

Харківський національний
університет радіоелектроніки

Kharkiv National
University of Radio Electronics

Державне підприємство
"Південний державний
проектно-конструкторський
та науково-дослідний інститут
авіаційної промисловості"

State Enterprise
"Southern National Design
&
Research Institute
of Aerospace Industries"

**СУЧАСНИЙ СТАН
НАУКОВИХ
ДОСЛІДЖЕНЬ
ТА ТЕХНОЛОГІЙ
В ПРОМИСЛОВОСТІ**

**INNOVATIVE
TECHNOLOGIES
AND
SCIENTIFIC SOLUTIONS
FOR INDUSTRIES**

№ 1 (15), 2021

No. 1 (15), 2021

*Щоквартальний
науковий
журнал*

*Quarterly
scientific
journal*

Харків
2021

Kharkiv
2021

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор
Бодянский Євгеній Володимирович,
д-р. техн. наук, професор

Заступник головного редактора
Айзенберг Ігор Наумович,
канд. техн. наук, професор (США);
Шекер Серхат,
д-р. техн. наук, професор (Туреччина)

Члени редколегії:

Артюх Роман Володимирович, канд. техн. наук;
Бабенко Віталіна Олексіївна, д-р. екон. наук, канд. техн. наук, професор;
Безкоровайний Володимир Валентинович, д-р. техн. наук, професор;
Гасімов Юсіф, д-р. мат. наук, професор (Азербайджан);
Гопснко Віктор, д-р. техн. наук, професор (Латвія);
Го Цян, д-р. техн. наук, професор (КНР);
Джавад Хамісабаді, канд. техн. наук, доцент (Іран);
Зайцева Єлена, д-р. техн. наук, професор (Словаччина);
Зачко Олег Богданович, д-р. техн. наук, доцент;
Коваленко Андрій Анатолійович, д-р. техн. наук, професор;
Костін Юрій Дмитрович, д-р. екон. наук, професор;
Левашенко Віталій, д-р. техн. наук, професор (Словаччина);
Лемешко Олександр Віталійович, д-р. техн. наук, професор;
Малєєва Ольга Володимирівна, д-р. техн. наук, професор;
Момот Тетяна Валеріївна, д-р. екон. наук, професор;
Музика Катерина Миколаївна, д-р. техн. наук, професор;
Назарова Галина Валентинівна, д-р. екон. наук, професор;
Невлюдов Ігор Шакирович, д-р. техн. наук, професор;
Опанасюк Анатолій Сергійович, д-р. фіз.-мат. наук, професор;
Павлов Сергій Володимирович, д-р. техн. наук, професор;
Перова Ірина Геннадіївна, д-р. техн. наук, доцент;
Петленков Едуард, канд. техн. наук (Естонія);
Петришин Любомир Богданович, д-р. техн. наук, професор (Польща);
Рубан Ігор Вікторович, д-р. техн. наук, професор;
Семенець Валерій Васильович, д-р. техн. наук, професор;
Сетлак Галина, д-р. техн. наук, професор (Польща);
Терзіан Ваган Якович, д-р. техн. наук, професор (Фінляндія);
Телстов Олександр Сергійович, д-р. екон. наук, професор;
Тімофєєв Володимир Олександрович, д-р. техн. наук, професор;
Філатов Валентин Олександрович, д-р. техн. наук, професор;
Чумаченко Ігор Володимирович, д-р. техн. наук, професор;
Чухрай Наталія Іванівна, д-р. екон. наук, професор;
Юн Джин, канд. фіз.-мат. наук, професор (КНР);
Ястремська Олена Миколаївна, д-р. екон. наук, професор.

ЗАСНОВНИКИ

Харківський національний університет радіоелектроніки,
Державне підприємство "Південний державний
проектно-конструкторський та науково-дослідний
інститут авіаційної промисловості"

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:

Україна, 61166, м. Харків, проспект Науки, 14
Інформаційний сайт: <http://itssi-journal.com>
E-mail редколегії: journal.itssi@gmail.com

EDITORIAL BOARD

Editor in Chief
Bodyanskiy Yevgeniy,
Dr. Sc. (Engineering), Professor, Ukraine

Deputy Chief Editor
Igor Aizenberg,
PhD (Computer Science), Professor (United States)
Serhat Seker,
Dr. Sc. (Engineering), Professor (Turkey)

Editorial Board Members:

Artiukh Roman, PhD (Engineering Sciences) (Ukraine);
Babenko Vitalina, Dr. Sc. (Economics); PhD (Engineering Sciences), Professor (Ukraine);
Bezkorovainyi Volodymyr, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Gasimov Yusif, Dr. Sc. (Mathematical), Professor (Azerbaijan);
Gopeyenko Victors, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Latvia);
Guo Qiang, Dr. Sc. (Engineering), Professor (P.R. of China);
Javad Khamisabadi, PhD (Industrial Management), Associate Professor (Iran);
Zaitseva Elena, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Slovak Republic);
Zachko Oleh, Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor (Ukraine);
Kovalenko Andrey, Dr. Sc. (Engineering), Professor, (Ukraine);
Kostin Yuri, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine);
Levashenko Vitaly, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Slovakia);
Lemeshko Oлександр, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Malyeyeva Olga, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Momot Tetiana, Dr. Sc. (Economics), Professor, (Ukraine);
Nazarova Galina, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Nazarova Galina, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine);
Nevliudov Igor, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Opanasyuk Anatoliy, Dr. Sc. (Physical and Mathematical), Professor (Ukraine);
Pavlov Sergii, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Perova Iryna, Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor (Ukraine);
Petlenkov Eduard, PhD (Engineering Sciences) (Poland);
Petryshyn Lubomyr, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Poland);
Ruban Igor, Dr. Sc. (Engineering), Professor, (Ukraine);
Semenets Valery, Dr. Sc. (Engineering), Professor, (Ukraine);
Setlak Galina, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Poland);
Terziyan Vagan, Dr. Sc. (Engineering), Professor, (Finland);
Teletov Aleksandr, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine);
Timofeyev Volodymyr, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Filatov Valentin, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Chumachenko Igor, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Chukhray Nataliya, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine);
Yu Zheng, PhD (Physico-Mathematical Sciences), Professor (P.R. of China);
Iastremaska Olena, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine).

ESTABLISHERS

Kharkiv National University of Radio Electronics,
State Enterprise "National Design & Research Institute
of Aerospace Industries"

EDITORIAL OFFICE ADDRESS:

Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauka Ave, 14
Information site: <http://itssi-journal.com>
E-mail of the editorial board: journal.itssi@gmail.com

Журнал включено до "Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук" наказом Міністерства освіти і науки України від 16.07.2018 №775 (додаток 7).

Затверджений до друку Науково-технічною Радою Харківського національного університету радіоелектроніки (Протокол № 4 від 19 березня 2021 р.).

Свідоцтво про державну реєстрацію журналу Серія KB № 22696-12596P від 04.05.2017 р.

ЗМІСТ

Інформаційні технології

- 5 **Базілевич К. О., Меняйлов Є. С., Чумаченко Д. І.**
Виділення зон розповсюдження захворюваності на коронавірус COVID-19 на основі методів кластерного аналізу
- 14 **Бакурова А. В., Юськів О. І., Широкопад Д. В., Рябенко А. Є., Терещенко Е. В.**
Нейромережеве прогнозування енергоспоживання металургійного підприємства (eng.)
- 23 **Безкоровайний В. В., Судік А. О.**
Оптимізація топологічних структур централізованих логістичних мереж у процесі реінжинірингу (eng.)
- 32 **Гур'янова Л. С., Панасенко О. В., Вознюк С. М.**
Системний аналіз і моделювання ринку освітніх послуг
- 43 **Данишина С. Ю.**
Узагальнений підхід до управління матеріальними ресурсами проєкту (eng.)
- 53 **Золотарьов Д. О.**
Розробка механізму для створення керованих подіями додатків на базі Wolfram Mathematica та Apache Kafka (eng.)
- 59 **Малєєва О. В., Єсінов В. В., Артюх Р. В., Косенко В. В.**
Реалізація гібридного методу пошуку близьких об'єктів з урахуванням загальних та акустичних характеристик (eng.)

Сучасні технології управління підприємством

- 69 **Агунг Ч., Крістін Н.**
Аналіз ефективності методів оптимізації для вирішення проблеми продавця, що подорожує (eng.)
- 76 **Кононенко О. І.**
Теоретичні аспекти управління брендом організації (eng.)
- 83 **Момот Т. В., Мураєв Є. В.**
Модель організаційно-інформаційного забезпечення розробки стратегії розумних міст в умовах цифрової економіки (eng.)
- 91 **Назаров Н. К.**
Управління соціально-трудовими конфліктами: український та зарубіжний досвід (eng.)
- 98 **Назарова Г. В., Демченко К. О.**
Теоретичні засади оцінювання соціальної безпеки регіону (eng.)

Інженерія та промислові технології

- 106 **Бондаренко І. С., Авруїні О. Г.**
Про збудження локального електричного струму в біологічному середовищі (eng.)
- 113 **Єрошенко О. А., Прасол І. В., Дацок О. М.**
Моделювання перетворювача електроміографічного сигналу для задач адаптивної електростимуляції (eng.)
- 120 **Невлюдов І. Ш., Разумов-Фризюк Е. А., Нікітін Д. О., Близнюк Д. С., Стрілець Р. Є.**
Технологія створення топології друкованих плат за допомогою полімерних 3D масок (eng.)
- 132 **Осадчий С. І., Демська Н. П., Олександров Ю. М., Невлюдова В. В.**
Дослідження архітектурних моделей diKW та 5C для створення кіберфізичних виробничих систем в рамках концепції industry 4.0. (eng.)
- 141 **Раскін Л. Г., Сіра О. В., Парфенюк Ю. Л.**
Управління пропускними здатностями проміжних пунктів у розгалуженій транспортній мережі.
- 149 **Алфавітний показник**

CONTENTS

Information Technology

- 5 **Bazilevych K., Menailov Ie., Chumachenko D.**
Identification of areas of coronavirus COVID-19 incidence spreading based on cluster analysis method
- 14 **Bakurova A., Yuskiv, O., Shyrokorad D., Riabenko A., Tereschenko E.**
Neural network forecasting of energy consumption of a metallurgical enterprise
- 23 **Beskorovainyi V., Sudik A.**
Optimization of topological structures of centralized logistics networks in the process of reengineering
- 32 **Guryanova L., Panasenko O., Voznyuk S.**
Systems analysis and modelling of the educational services market
- 43 **Danshyna S.**
General approach to project material resources management
- 53 **Zolotariov D.**
The mechanism for creation of event-driven applications based on Wolfram Mathematica and Apache Kafka
- 59 **Malyeyeva O., Yesipov V., Artiukh R., Kosenk, V.**
Implementation of a hybrid method of searching for close objects, taking into account the general and acoustic characteristics

Modern Enterprise Management Technologies

- 69 **Chandra Agung, Natalia Christine**
Determinants of capital structure in Nigerian oil and gas sector
- 76 **Kononenko O.**
Theoretical aspects of the organization brand management
- 83 **Momot T., Muraev Ye.**
Model of organizational and information support of smart city strategy development in the conditions of digital economy
- 91 **Nazarov N.**
Current state and features of logistics services market development in Ukraine
- 98 **Nazarova G., Demchenko K.**
Theoretical principles of assessing the social security of the region

Engineering & Industrial Technology

- 106 **Bondarenko I., Avrunin O.**
On the excitation of local electric current in the biological environment
- 113 **Yeroshenko O., Prasol I., Datsok O.**
Simulation of an electromyographic signal converter for adaptive electrical stimulation tasks
- 120 **Nevliudov I., Razumov-Fryzyuk E., Nikitin D., Bliznyuk D., Strelets R.**
Technology for creating the topology of printed circuit boards using polymer 3D masks
- 132 **Osadchy S., Demska N., Oleksandrov Yu., Nevliudova V.**
Research of DIKW and 5C architectural models for creation of cyber-physical production systems within the concept of industry 4.0
- 141 **Raskin L., Sira O., Parfeniuk Yu.**
Managing the capacity of intermediate points in an extensive transport network
- 149 **Alphabetical index**

УДК 57.087

DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.005>

К. О. БАЗІЛЕВИЧ, Є. С. МЕНЯЙЛОВ, Д. І. ЧУМАЧЕНКО

ВИДІЛЕННЯ ЗОН РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЗАХВОРЮВАНОСТІ НА КОРОНАВІРУС COVID-19 НА ОСНОВІ МЕТОДІВ КЛАСТЕРНОГО АНАЛІЗУ

Предмет: використання математичного апарату нейронних мереж для наукового обґрунтування протиепідемічних заходів з метою зниження захворюваності при прийнятті ефективних управлінських рішень. **Ціль:** застосувати кластерний аналіз, на основі нейронної мережі, для вирішення задачі виділення зон розповсюдження захворюваності. **Задачі:** проаналізувати методи аналізу даних для вирішення задачі кластеризації; розробити нейромережевий метод кластеризації територій України за характером епідемічного процесу COVID-19; на основі розробленого методу реалізувати програмний додаток аналізу даних для виділення зон розповсюдження захворюваності на прикладі коронавірусу COVID-19. **Методи:** моделі та методи аналізу даних, моделі та методи теорії систем (на базі інформаційного підходу), методи машинного навчання, зокрема метод Adaptive Boosting (на основі методу градієнтного спуску), методи навчання нейронних мереж. **Результати:** були використані розподілені по областях України дані Центру громадського здоров'я МОЗ України про захворюваність на COVID-19, кількість лабораторно обстежених осіб, кількість проведених лабораторних досліджень методами ПЦР та ІФА, кількість проведених лабораторних досліджень IgA, IgM, IgG; в моделі використані дані з березня 2020 по грудень 2020, при моделюванні не враховані дані з тимчасово окупованих територій України; для кластерного аналізу побудована нейронна мережа з 60 вхідними нейронами, 100 прихованими нейронами з активаційною функцією Фермі та 4 вихідними нейронами; для програмної реалізації моделі використана мова програмування Python. **Висновки:** проведено аналіз методів побудови нейронних мереж; аналіз методів навчання нейронних мереж, у тому числі методу градієнтного спуску; всі теоретичні відомості, описані в цій роботі, були використані для реалізації програмного продукту обробки даних тестування на COVID-19 в Україні; було проведено розбиття областей України на зони зараження вірусом COVID-19 та представлено карту цього розбиття.

Ключові слова: кластерний аналіз; нейронна мережа; машинне навчання; епідемічний процес; COVID-19.

Вступ

Мінімізація наслідків вірусу COVID-19 сьогодні є основним завданням, яким охоплені всі країни світу. Побудовано безліч прогнозів [1-3], розроблено велику кількість моделей поширення захворювання [4-6], епідемічної діагностики, але не дивлячись на спад темпів зараження епідемія вірусу триває.

За даними університету Джона Хопкінса [7], Україна займає 17 сходинку в топі лідерів за виявленими випадками вірусу COVID-19.

Виділення зон розповсюдження захворюваності є важливим завданням у рамках мінімізації наслідків хвороби та зменшення кількості заражень. Проте виділення таких зон лише за територіальним принципом (що зараз використовується в Україні) не є дієвим, адже при такому підході до розгляду не береться реальна ситуація із захворюваності та не аналізуються реальні статистичні дані.

Для вирішення цієї задачі у роботі запропоновано використовувати методи Data Mining, що показують відмінні результати при роботі зі стохастичними процесами [8-10], зокрема кластерний аналіз. Основна ідея кластерного аналізу - виділення серед безлічі даних груп, всередині яких елементи в певній мірі схожі.

Під кластерами у даному випадку маються на увазі зони з однаковим характером епідемічного процесу COVID-19. Таке розбиття дозволить вжити ефективних протиепідемічних заходів зі зниження епідемічної захворюваності на обраних територіях.

В рамках такого аналізу відбувається певна класифікація досліджуваних даних за рахунок

розподілу їх по групах. Ці групи впорядковані ієрархічно і структуру таких одержаних після аналізу кластерів можна представити у вигляді дерева. Для реалізації процедури кластеризації було використано багатопшарову нейронну мережу із зворотнім розповсюдженням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Застосування кластерного аналізу для вирішення задачі виділення зон розповсюдження захворюваності є важливим науковим завданням, що пропонується вирішувати із застосуванням нейронної мережі.

Під час практичної реалізації нейронної мережі виникає ряд проблем: зазвичай заздалегідь не відомо, якої складності необхідно буде розробити мережу для точної реалізації відображення необхідного процесу [11-13]. Ця складність може виявитися надмірно високою, що буде потребувати складної архітектури такої мережі. Як відомо – одношарові нейронні мережі здатні вирішувати тільки лінійно роздільні завдання [14]. Для зняття цього обмеження у роботі пропонується використовувати багатопшарові нейронні мережі [15,16]. В мережі з одним прихованим шаром вектор, відповідний до вхідного зразку, перетворюється прихованим шаром в певний новий простір, що може мати іншу розмірність, а потім гіперплощини, відповідні нейронам вихідного шару, поділяють його на класи. Таким чином, мережа розпізнає не тільки характеристики вихідних даних, але і "характеристики характеристик", сформовані прихованим шаром.

У багатопшарових перцептронах кожен нейрон має нелінійну функцію активації. Ця нелінійна функція є гладкою. Найпопулярнішою формою

функції, що задовольняє цій вимозі, є сигмоїдальна (що і використовується у дослідженні). Наявність нелінійності грає дуже важливу роль, так як в іншому випадку відображення "вхід-вихід" мережі можна звести до звичайного одношарового перцептрону. Більш того, використання логістичної функції мотивовано біологічно, так як в ній враховується відновлювальна фаза реального нейрона. Мережа містить один або кілька шарів прихованих нейронів, які не є частиною входу або виходу мережі. Ці нейрони дозволяють мережі навчатися вирішенню складних завдань, послідовно отримуючи найбільш важливі ознаки з вхідного образу (вектора). Мережа має високий ступінь зв'язності, що реалізовується за допомогою синаптичних з'єднань [17]. Саме цей вид нейронної мережі було обрано для досягнення мети дослідження.

Метою статті є розробка програмного додатку аналізу даних для виділення зон розповсюдження захворюваності на основі методів кластерного аналізу (на прикладі захворюваності на коронавірус COVID-19).

Дана постановка відповідає логіці побудови нейронної мережі для кластеризації даних, що дозволяє досягти потрібного результату. Результатом вирішення даного завдання буде розподіл України на кластери за станом захворюваності (що відповідає зонам карантину).

Основна частина

Розглянемо постановку задачі кластеризації. Нехай X – множина об'єктів, Y – множина номерів кластерів. Задана функція відстані між об'єктами $\rho(x, x')$. Є кінцева навчальна вибірка об'єктів $X^m = \{x_1, x_2, \dots, x_m\} \subset X$. Потрібно розбити вибірку на непересічні підмножини, які називаються кластерами, так, щоб кожен кластер складався з об'єктів, близьких за метрикою ρ , а об'єкти різних кластерів істотно відрізняються. При цьому кожному об'єкту $x_i \in X^m$ задається номер кластера y_i . Алгоритм кластеризації – це функція $a: X \rightarrow Y$, що будь-якому об'єкту $x \in X$ ставить у відповідність номер кластера $y \in Y$. Множина Y в деяких випадках відома заздалегідь, однак частіше ставиться завдання визначити оптимальне число кластерів, з точки зору того чи іншого критерію якості кластеризації. Кластеризація (навчання без вчителя) відрізняється від класифікації (навчання з учителем) тим, що мітки вихідних об'єктів y_i спочатку не задані, і навіть може бути невідома сама множина Y .

Кластеризація за допомогою нейронної мережі виконується наступним чином. На вхід до нейронної мережі подається вхідний вектор ознак: відповідно до алгоритму зворотного розподілу помилки, відбувається коригування ваг згідно заздалегідь

зумовленої класу вхідного вектора. Після навчання на виділення кількості вхідних образів відбувається перевірка мережі на певній кількості вхідних образів, які не брали участі в навчанні.

Метод виділення зон розповсюдження захворюваності на основі процедури градієнтного спуску

Процедури градієнтного спуску зазвичай використовуються там, де потрібно максимізувати або мінімізувати n -вимірні функції.

Градієнт – це вектор g , який визначений для будь-якої диференційованої точки функції, який вказує від цієї точки точно до найкрутішого підйому і вказує градієнт у цьому напрямку за допомогою своєї норми $|g|$. Таким чином, градієнт є узагальненням похідної для багатовимірних функцій. Відповідно, негативний градієнт $-g$ точно вказує на найкрутіший спуск. Оператор градієнта ∇ називається оператором набла, загальний запис градієнта g точки (x, y) двовимірної функції f становить $g(x, y) = \nabla f(x, y)$.

Нехай g – градієнт. Тоді g – вектор із n компонентами, який визначений для будь-якої точки (диференціальної) n -мірної функції $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Позначення оператора градієнта визначається як $g(x_1, x_2, \dots, x_n) = \nabla f(x_1, x_2, \dots, x_n)$. g спрямовує з будь-якої точки в бік найкрутішого підйому з цієї точки, з $|g|$ що відповідає ступеню цього підйому. Нехай f – n -мірна функція, а $s = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ задана початкова точка. Градієнтний спуск означає перехід від $f(s)$ проти напрямку g , тобто до $-g$ із кроками розміром $|g|$ у напрямку до все менших і менших значень f .

Зворотне розповсюдження – це процедура градієнтного спуску з функцією помилки $Err(W)$, яка отримує всі n вагових коефіцієнтів як аргументи та присвоює їм вихідні помилки, тобто стає n -мірною. На $Err(W)$ за допомогою градієнтного спуску шукається точка невеликої помилки або навіть точка найменшої помилки.

Таким чином, аналогічно правилу дельта, зворотне розмноження тренує ваги нейронної мережі. І саме правило дельти або його змінна δ_i для нейрона і розширюється від одного тренованого вагового шару до декількох шляхом зворотного розповсюдження.

Вхід мережі в окремі нейрони і є результатом зваженої суми. Крім того, як і при виведенні правила дельта, нехай $o_{p,i}$, $net_{p,i}$ т. д. Визначаються як вже знайомі o_i , net_i тощо за шаблоном введення p , який використаний для навчання.

Нехай вихідна функція знову буде тотожністю, отже, $o_i = f_{act}(net_{p,i})$ виконується для будь-якого нейрона i .

Тепер виконаємо те саме виведення, що і для правила дельта та функцій розбиття за допомогою

правила ланцюга. Спочатку потрібно вивести функцію помилки Err відповідно до ваги $w_{k,h}$.

$$\frac{\partial Err(w_{k,h})}{\partial w_{k,h}} = \frac{\partial Err}{\partial net_h} \cdot \frac{\partial net_h}{\partial w_{k,h}} \cdot \frac{\partial Err}{\partial net_h} = -\delta_h.$$

Першим фактором рівняння є $-\delta_h$, який буде розглянуто пізніше. Чисельник другого множника рівняння включає вхід мережі, тобто зважена сума включається в чисельник, щоб можна було негайно його отримати. Знову усі доданки суми випадають, крім суми, що містить $w_{k,h}$. Цей доданок називається $w_{k,h} \cdot o_k$. Якщо обчислити похідну, вихід нейрона k стає:

$$\frac{\partial net_h}{\partial w_{k,h}} = \frac{\partial \sum_{k \in K} w_{k,h} o_k}{\partial w_{k,h}} = o_k,$$

$$\delta_h = -\frac{\partial Err}{\partial net_h} = -\frac{\partial Err}{\partial o_h} \cdot \frac{\partial o_h}{\partial net_h}.$$

Згідно з визначенням багатовимірного ланцюгового правила, одразу отримуємо рівняння

$$-\frac{\partial Err}{\partial o_h} = \sum_{l \in L} \left(-\frac{\partial Err}{\partial net_l} \cdot \frac{\partial net_l}{\partial o_h} \right).$$

Сума у верхньому рівнянні містить два фактори. Обчислимо другий коефіцієнт у наступному рівнянні

$$\frac{\partial net_l}{\partial o_h} = \frac{\partial \sum_{h \in H} w_{h,l} \cdot o_h}{\partial o_h} = w_{h,l}.$$

Те саме стосується першого фактора згідно з визначенням δ :

$$-\frac{\partial Err}{\partial net_l} = \delta_l.$$

Тепер:

$$-\frac{\partial Err}{\partial o_h} = \sum_{l \in L} \delta_l w_{h,l}$$

тому бажана зміна ваги $\Delta w_{k,h}$

$$\Delta w_{k,h} = \eta o_k \delta_h,$$

$$\delta_h = f'_{act}(net_h) \cdot \sum_{l \in L} (\delta_l w_{h,l})$$

звичайно лише у випадку, коли h є внутрішнім нейроном (інакше не було б подальшого шару L). Загалом, результатом є узагальнення правила дельта, яке називається зворотним розповсюдженням помилки:

$$\Delta w_{k,h} = \eta o_k \delta_h,$$

$$\delta_h = \left\{ \begin{array}{l} f'_{act}(net_h) \cdot (t_h - y_h) \\ f'_{act}(net_h) \cdot \sum_{l \in L} (\delta_l w_{h,l}) \end{array} \right\}.$$

На відміну від правила дельти, δ трактується по-різному, залежно від того, чи h є вихідним чи внутрішнім (тобто прихованим) нейроном:

Якщо h – вихідний нейрон, то

$$\delta_{p,h} = f'_{act}(net_{p,h}) \cdot (t_{p,h} - y_{p,h}).$$

Таким чином, за означеною схемою навчання p вага $w_{k,h}$ від k до h пропорційно змінюється відповідно до

- швидкості навчання η ;
- вихідного $o_{p,k}$ нейрона-попередника k ;
- градієнта функції активації в положенні мережевого входу нейрона-наступника $f'_{act}(net_{p,h})$;
- різниці між вводом $t_{p,h}$ та виходом $y_{p,h}$ нейрона-наступника h .

У цьому випадку зворотне розмноження працює на двох нейронних шарах, вихідному шарі з наступним нейроном h і попереднім шаром з попередником нейроном k . Якщо h – внутрішній, прихований нейрон, то має місце.

$$\delta_{p,h} = f'_{act}(net_{p,h}) \cdot \sum_{l \in L} (\delta_{p,l} \cdot w_{h,l}).$$

Опис результатів, отриманих при роботі з програмним додатком

В якості вхідних даних є дата-сет зі статистикою проходження пацієнтів тестування на Covid-19 угрупований по областям України та медичним закладам [18]. Повний список параметрів:

- рівень зараженості;
- область;
- назва закладу (установи);
- кількість лабораторно обстежених осіб (первинні та ретестування);
- кількість проведених лабораторних досліджень методом ПЛР на COVID-19;
- кількість проведених лабораторних досліджень хворих з пневмоніями;
- кількість позитивних результатів на COVID-19;
- кількість результатів тестувань на COVID-19;
- кількість зразків, що надійшли на дослідження ПЛР;
- кількість непротестованих зразків, що залишаються в лабораторії;
- кількість лабораторно обстежених осіб;
- кількість проведених лабораторних досліджень;
- кількість позитивних результатів досліджень;
- виявлення антигенів.

На рис. 1 можна побачити частину імпортованих з дата-сету даних.

Результат нормалізації імпортованих даних можна побачити на рис. 2. Як можна бачити перші два стовпця відсутні через те що вони мають строковий тип даних. Усі 60 значень кожного запису представляють вхідний нейрон мережі.

Розглянемо приклад роботи програми з моделлю нейронної мережі, вказаною на рис. 3.

	2	3	4	...	58	59	60
ДУ «Вінницький ОЛЦ МОЗ України»	1316	93	...	209	8	0	
ТОВ "Діагностичний центр"МЕДІЛАБС", м. Вінниця	350	0	...	1986	0	0	
КНП "Вінницький обласний клінічний центр профі...	94	4	...	2991	87	47	
КНП "Вінницька обласна клінічна лікарня ім.М.І...	0	0	...	591	188	0	
КНП "Вінницький обласний клінічний високоспеці...	0	0	...	298	26	0	
...
КНП "ФТИЗИАТРІЯ"	0	0	...	15	15	0	
КНП "КМДКЛ № 2"	0	0	...	36	26	0	
ТОВ Нова діагностика	0	0	...	140	0	0	
КНП"Київський міський пологовий будинок №6"	0	0	...	0	0	0	
ТОВ "Клініка Маркова"	22	0	...	0	0	0	

[umns]

Рис. 1. Імпортовані данні

	3	4	5	6	7
0	0.299295	0.162872	0.192771	0.302479	0.203390
1	0.079600	0.000000	0.000000	0.082101	0.000000
2	0.021378	0.007005	0.000000	0.021833	0.014124
3	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
4	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
...
455	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
456	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
457	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
458	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
459	0.005003	0.000000	0.000000	0.005003	0.000000

[2300 rows x 60 columns]

Рис.2. Нормалізовані данні

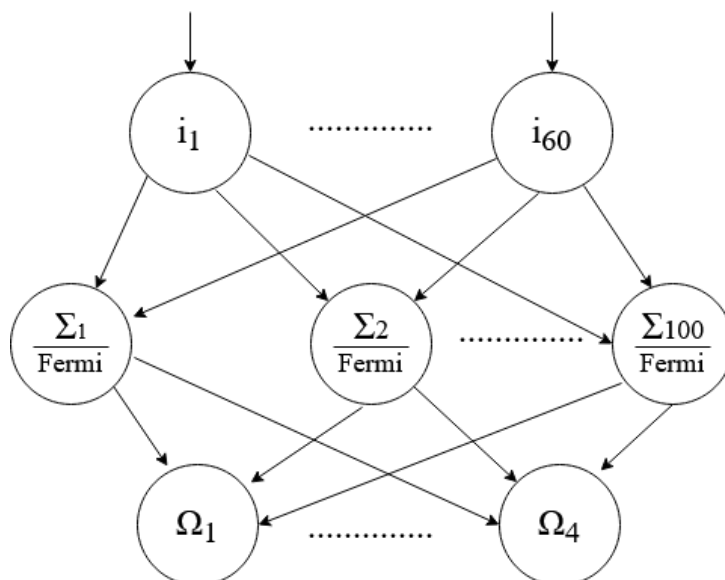


Рис. 3. Модель нейронної мережі з 60 входними нейронами, 100 прихованими нейронами з функцією активації Фермі та 4 вихідними нейронами

Вихідний нейрон – вектор з чотирьох компонент, індекс максимального значення якого є індексом кластеру до якого належить запис.

Між входними прихованими нейронами міститься матриця вагових коефіцієнтів, яка на першій ітерації ініціалізується випадковими значеннями. Розмір цієї

матриці (60x100). Вагові коефіцієнти першого входного нейрону до усіх нейронів на прихованому рівні можна побачити на рис.4. Кожне значення матриці коефіцієнтів буде змінюватись у період навчання.

```

[-0.55074841 -0.30045617 0.40008079 -0.62892543 -0.552295
 1.79613424 0.20481614 0.3304295 0.34907633 2.188642
 0.78918423 -2.04289116 -0.04020203 1.40965998 -0.356157
 2.17095693 0.09459189 -0.18997519 0.40140887 -0.989635
 0.60683112 -0.07350352 0.07641064 0.80437461 0.629701
 1.10081371 0.29816912 -1.18169771 -0.09301111 0.628639
 -0.15680307 0.12327033 0.41433496 -0.28864685 2.244296
 -0.0559052 -0.26257586 0.68607464 1.86950358 1.208992
 -1.9326388 -0.86330387 -0.64293224 0.09058302 0.405786
 0.16269968 -0.88488518 -0.61878525 -1.36440879 -0.888033
 0.18901213 0.63968365 -0.97510193 0.40153046 -0.511753
 -0.86328308 -1.91894846 1.17076114 -0.19605497 0.682347
 -1.61067836 -1.5535064 -0.99265388 -1.52559155 2.404002
 -0.54133163 0.06468708 -1.41063762 -1.02973355 -2.159183
 0.36913413 0.12705528 -1.88545164 1.19693911 -0.177951
 0.44241701 0.82330423 0.45288699 -0.27477905 -0.585110
 0.889565 -0.65124859 -2.29598436 0.60954192]

```

Рис. 4. Вагові коефіцієнти першого вхідного нейрону до усіх нейронів на прихованому рівні

На рис. 5 представлено графік значення функції похибки на кожній ітерації навчання. З графіку помітно, що приблизно з 350 епохи навчання,

значення функції похибки змінюється незначним чином, тому подальше навчання нейронної мережі не має сенсу.

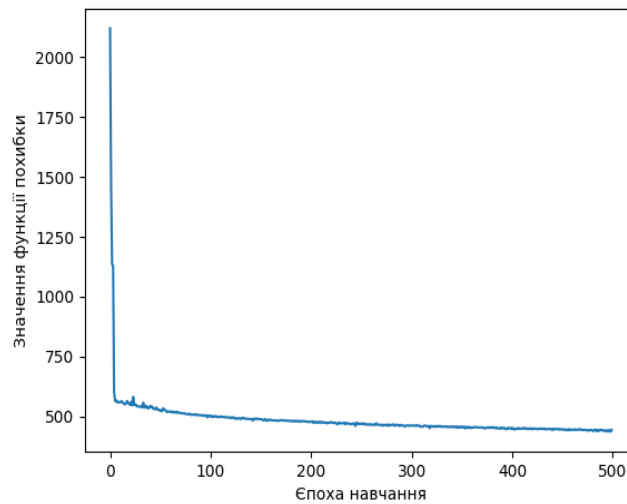


Рис. 5. Значення функції похибки на кожній ітерації навчання

На рис. 6 можна побачити графік відношення кількості вірних прогнозів до загальної кількості даних (точність прогнозу) на кожній ітерації навчання. Як можна бачити на рис. 6 чим більше

епох навчання, тим вище точність прогнозу нейронної мережі.

На рис. 7 представлено розподілення областей України на області зараження вірусом Covid-19 мережею.

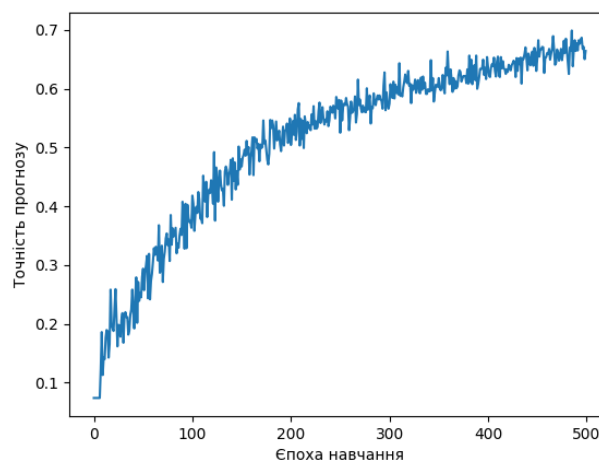


Рис. 6. Графік точності прогнозу на кожній ітерації навчання

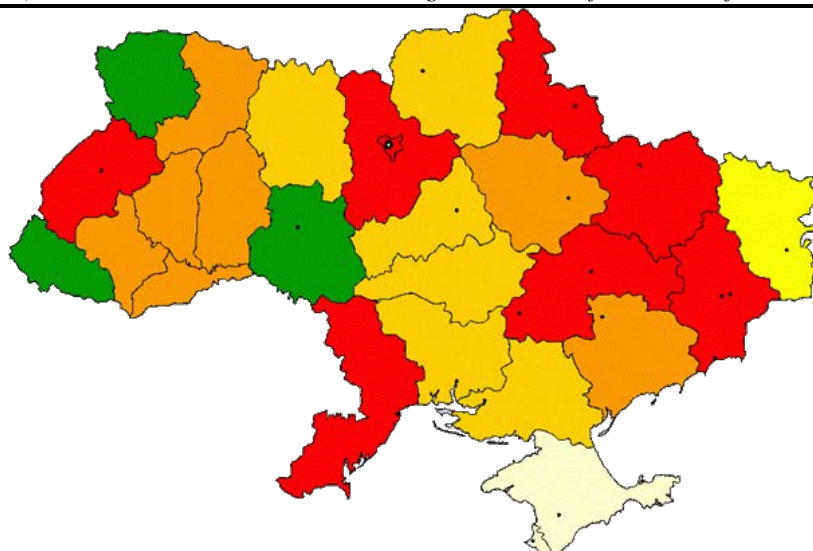


Рис. 7. Розбиття областей України на зони зараження

На рис. 7 області України замальовані кольорами відносно до їх перебування у зонах зараження вірусом COVID-19 (зелена, жовта, помаранчева, червона). Ціль моделювання була досягнута. На рис. 8 можна бачити приклад вихідного шару нейронної мережі.

Результати кластерного аналізу показали, що динаміку розповсюдження захворюваності на COVID-19 в Україні можна розділити на 4 кластери за схожістю епідемічного процесу. До першого кластеру

увійшли Волинська, Закарпатська та Вінницька області. До другого кластеру увійшли Львівська, Одеська, Сумська, Харківська, Донецька, Дніпропетровська, Київська області та місто Київ. Третій кластер включив Рівненську, Хмельницьку, Тернопільську, Чернівецьку, Івано-Франківську, Полтавську та Запорізьку області. Четвертий кластер включив всі інші області України.

```
[[[9.97716555e-01 9.98472477e-01 9.99236074e-01 5.63135028e-01]
[3.76436408e-01 9.99999999e-01 1.00000000e+00 9.99394698e-01]
[9.96782750e-01 9.98576014e-01 9.99305480e-01 5.23992579e-01]
[7.35402156e-01 9.99253078e-01 9.99923176e-01 4.53543932e-04]
[9.90967042e-01 9.98862561e-01 9.99263636e-01 6.99411258e-01]
[9.98845095e-01 9.97543204e-01 9.98503758e-01 4.25000149e-01]
[9.99957668e-01 9.97566808e-01 9.97340075e-01 6.88395617e-02]
[9.98258399e-01 9.99499650e-01 9.98970073e-01 2.61586687e-01]
[9.96889145e-01 9.98350235e-01 9.99298159e-01 5.33690463e-01]
[9.89137103e-01 9.98523057e-01 9.99627291e-01 5.30845169e-01]
[9.97380185e-01 9.97937991e-01 9.99061508e-01 6.14148761e-01]
[9.97114161e-01 9.98896633e-01 9.99384229e-01 5.19558518e-01]
[9.98387103e-01 9.98346917e-01 9.98770854e-01 4.45148473e-01]
[9.98105187e-01 9.98147540e-01 9.99183996e-01 5.54695172e-01]
[9.96732737e-01 9.99167121e-01 9.99427817e-01 5.90957768e-01]
[6.43734464e-06 9.99956512e-01 9.99993872e-01 9.99999990e-01]
[9.97445042e-01 9.96305550e-01 9.98784347e-01 7.83310043e-01]
[9.97657331e-01 9.96024236e-01 9.98655196e-01 7.95962663e-01]
[9.97116536e-01 9.96753021e-01 9.99208027e-01 7.97290689e-01]
[6.85970365e-01 9.98541120e-01 9.99993736e-01 9.95937710e-01]
[9.97971758e-01 9.97350963e-01 9.96068559e-01 1.29123515e-01]
[9.96210194e-01 9.99525166e-01 9.99190385e-01 4.07816005e-01]
[9.99507134e-01 9.96863581e-01 9.99385814e-01 4.43537046e-03]
[9.99972151e-01 9.98021060e-01 9.95538686e-01 7.99327279e-01]
[9.97220304e-01 9.98454135e-01 9.99033283e-01 3.71124277e-01]
[9.93911573e-01 9.99979428e-01 9.99999961e-01 9.99998772e-01]
[9.99877240e-01 9.99994058e-01 9.99421883e-01 5.52667613e-02]
[9.98032586e-01 9.98421984e-01 9.99193511e-01 4.92604748e-01]
[9.97021522e-01 9.98903128e-01 9.99546831e-01 4.76057802e-01]
[9.99298878e-01 9.99143813e-01 9.98291324e-01 3.71522259e-01]
[9.99141860e-01 9.98290020e-01 9.91545705e-01 1.20325047e-01]
[9.93698151e-01 9.98810087e-01 9.99673666e-01 6.63315841e-01]]]
```

Рис. 8. Приклад вихідного шару нейронної мережі

Результатом є максимальне число з вектору чотирьох компонент. Такий результат є унікальним

тому що враховує реальні дані захворюваності на Covid-19.

Висновки

В роботі було розглянуто та вирішено такі завдання: аналіз методів побудови нейронних мереж; аналіз методів навчання нейронних мереж, у тому числі метод градієнтного спуску; розробка програмного додатку аналізу даних для виділення зон розповсюдження захворюваності на основі методів кластерного аналізу (на прикладі захворюваності на коронавірус COVID-19).

Всі теоретичні відомості, описані в цій роботі, були використані для реалізації програмного продукту

обробки даних тестування на COVID-19 в Україні. Було проведено розбиття областей України на зони зараження коронавірусом COVID-19 та представлено графік цього розбиття.

*Дослідження виконане в рамках проєкту Національного фонду досліджень України №2020.02/0404 "Розробка інтелектуальних технологій оцінки епідемічної ситуації для підтримки прийняття управлінських рішень у сфері біобезпеки населення" [19].

Список літератури

1. Tabik S., et al. COVIDGR Dataset and COVID-SDNet Methodology for Predicting COVID-19 Based on Chest X-Ray Images. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*. 2020. Vol. 24. No. 12. P. 3595–3605. DOI: <https://doi.org/10.1109/JBHI.2020.3037127>
2. Marmarelis V. Z. Predictive Modeling of Covid-19 Data in the US: Adaptive Phase-Space Approach. *IEEE Open Journal of Engineering in Medicine and Biology*. 2020. Vol. 1. P. 207–213. DOI: <https://doi.org/10.1109/OJEMB.2020.3008313>
3. Cihan P. Fuzzy Rule-Based System for Predicting Daily Case in COVID-19 Outbreak. 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT). Istanbul, Turkey, 2020. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISMSIT50672.2020.9254714>.
4. Barman M., Mishra N. A time-delay SEAIR model for COVID-19 spread. IEEE 4th Conference on Information & Communication Technology (CICT). Chennai, India, 2020. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/CICT51604.2020.9312111>
5. Kapetanović A. L., Poljak D. Modeling the Epidemic Outbreak and Dynamics of COVID-19 in Croatia. 5th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech). Split, Croatia, 2020. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.23919/SpliTech49282.2020.9243757>
6. Horry M. J., et al. COVID-19 Detection Through Transfer Learning Using Multimodal Imaging Data. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 149808–149824. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3016780>
7. Johns Hopkins University & Medicine. Coronavirus resource center Baltimore, USA : site. URL: <https://coronavirus.jhu.edu/map.html> (last accessed: 17.02.2021).
8. Bazilevych K., et al. Stochastic modelling of cash flow for personal insurance fund using the cloud data storage. *International Journal of Computing*. 2018. № 3 (17). P. 153–162. DOI: <https://doi.org/10.47839/ijc.17.3.1035>
9. Базилевич К. А., и др. Определение вероятности заболевания болезнями сердца на основе методов Data Mining. *Интегрированные технологии в проектировании и конструировании*. 2019. № 83. С. 202–214.
10. Bazilevych K., et al. Determining the Probability of Heart Disease using Data Mining Methods. *CEUR Workshop Proceedings*. 2019. Vol. 2488. P. 1–12.
11. Fang W., Lacher R. C. Network complexity and learning efficiency of constructive learning algorithms. Proceedings of 1994 IEEE International Conference on Neural Networks (ICNN'94), Orlando, FL, USA, 1994, P. 366–369 Vol. 1. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICNN.1994.374191>
12. Tuma A., Haasis H., Rentz O. Emission oriented production control strategies based on fuzzy expert systems, neural networks and neuro-fuzzy approaches. Proceedings of 1993 International Conference on Neural Networks (IJCNN-93-Nagoya, Japan), Nagoya, Japan, 1993, pp. 2971–2974 vol.3. DOI: <https://doi.org/10.1109/IJCNN.1993.714346>
13. Bu Z., et al. Encrypted Network Traffic Classification Using Deep and Parallel Network-in-Network Models. *IEEE Access*. 2020. vol. 8, pp. 132950–132959. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3010637>
14. Goudreau M. W., et al. First-order versus second-order single-layer recurrent neural networks. *IEEE Transactions on Neural Networks*. May 1994. Vol. 5. No. 3. P. 511–513. DOI: <https://doi.org/10.1109/72.286928>
15. Guha D. R., Patra S. K. Cochannel Interference Minimization Using Wilcoxon Multilayer Perceptron Neural Network. 2010 International Conference on Recent Trends in Information, Telecommunication and Computing. Kerala, India. 2010. P. 145–149. DOI: <https://doi.org/10.1109/ITC.2010.50>
16. Hirahara M., Oka N. A hybrid model composed of a multilayer perceptron and a radial basis function network. Proceedings of 1993 International Conference on Neural Networks (IJCNN-93-Nagoya, Japan). Nagoya, Japan, 1993, P. 1353–1356. Vol. 2. DOI: <https://doi.org/10.1109/IJCNN.1993.716794>
17. Постарнак Д. В. Критический анализ моделей нейронных сетей. *Вестник Тюменского государственного университета*. 2012. № 4. С. 162–167.
18. Аналітичні панелі та відкриті дані: Офіційний канал Міністерства Охорони Здоров'я України : сайт. URL: <https://covid19.gov.ua/analitichni-paneli-dashbordiy> (дата звернення : 17.02.2021).
19. Yakovlev S., et. al. The Concept of Developing a Decision Support System for the Epidemic Morbidity Control. *CEUR Workshop Proceedings*. 2020. Vol. 2753. P. 265–274.

References

1. Tabik, S., Gomez-Rios, A., Martin-Rodriguez, J., Sevillano-Garcia, I., Rey-Area, M., Charte, D., Guirado, E., Suarez, J., Luengo, J., Valero-Gonzalez, M., Garcia-Villanova, P., Olmedo-Sanchez, E. and Herrera, F. (2020), "COVIDGR Dataset and COVID-SDNet Methodology for Predicting COVID-19 Based on Chest X-Ray Images", *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, No. 24 (12), P. 3595–3605. DOI: <https://doi.org/10.1109/JBHI.2020.3037127>
2. Marmarelis, V. (2020), "Predictive Modeling of Covid-19 Data in the US: Adaptive Phase-Space Approach", *IEEE Open Journal of Engineering in Medicine and Biology*, P. 207–213. DOI: <https://doi.org/10.1109/OJEMB.2020.3008313>

3. Cihan, P. (2020), "Fuzzy Rule-Based System for Predicting Daily Case in COVID-19 Outbreak", P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISMSIT50672.2020.9254714>
4. Barman, M. and Mishra, N. (2020), "A time-delay SEAIR model for COVID-19 spread", P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/CICT51604.2020.9312111>
5. Kapetanović, A. L. and Poljak, D. (2020), "Modeling the Epidemic Outbreak and Dynamics of COVID-19 in Croatia", *5th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*, Split, Croatia, P. 1–5, DOI: <https://doi.org/10.23919/SpliTech49282.2020.9243757>
6. Horry, M., Chakraborty, S., Paul, M., Ulhaq, A., Pradhan, B., Saha, M., Shukla, N. (2020), "COVID-19 Detection through Transfer Learning using Multimodal Imaging Data", *IEEE Access*, Vol. 8, P. 149808–149824. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3016780>
7. Johns Hopkins University & Medicine, "Coronavirus resource center Baltimore", USA: available at: <https://coronavirus.jhu.edu/map.html> (last accessed 17.02.2021).
8. Bazilevych, K., Mazorchuk, M., Parfeniuk, Y., Dobriak, V., Meniailov, I., Chumachenko, D. (2018), "Stochastic modelling of cash flow for personal insurance fund using the cloud data storage", *International Journal of Computing*, Vol. 17, P. 153–162. DOI: <https://doi.org/10.47839/ijc.17.3.1035>
9. Bazilevych, K., Meniailov, I., Goranina, S., Fedulov, K. (2019), "Determination of the likelihood of heart disease based on Data Mining methods" ["Opredeleniye veroyatnosti zabolevaniya boleznuyamy serdca na osnove metodov Data Mining"], *Integrated technologies in design and construction*, Vol. 83, P. 202–214.
10. Bazilevych, K., Meniailov, I., Fedulov, K., Goranina, S., Chumachenko, D., Pyrohov P. (2019), "Determining the Probability of Heart Disease using Data Mining Methods", *CEUR Workshop Proceedings*, Vol. 2488, P. 1–12.
11. Fang, W. and Lacher, R. C. (1994), "Network complexity and learning efficiency of constructive learning algorithms," *Proceedings of 1994 IEEE International Conference on Neural Networks (ICNN'94)*, Orlando, FL, USA, Vol. 1, P. 366–369. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICNN.1994.374191>
12. Tuma, A., Haasis, H. and Rentz, O. (1993), "Emission oriented production control strategies based on fuzzy expert systems, neural networks and neuro-fuzzy approaches", *Proceedings of 1993 International Conference on Neural Networks (IJCNN-93-Nagoya, Japan)*, Nagoya, Japan, Vol. 3, P. 2971–2974. DOI: <https://doi.org/10.1109/IJCNN.1993.714346>
13. Bu, Z., Zhou, B., Cheng, P., Zhang, K., Ling, Z. -H. (2020), "Encrypted Network Traffic Classification Using Deep and Parallel Network-in-Network Models", *IEEE Access*, Vol. 8, P. 132950–132959. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3010637>
14. Goudreau, M. W., Giles, C. L., Chakradhar, S. T., Chen, D. (1994), "First-order versus second-order single-layer recurrent neural networks", *IEEE Trans Neural Netw*, No. 5(3), P. 511–3. DOI: <https://doi.org/10.1109/72.286928>
15. Guha, D. R. and Patra, S. K. (2010), "Cochannel Interference Minimization Using Wilcoxon Multilayer Perceptron Neural Network", *2010 International Conference on Recent Trends in Information, Telecommunication and Computing*, Kerala, India, P. 145–149. DOI: <https://doi.org/10.1109/ITC.2010.50>
16. Hirahara, M. and Oka, N. (1993), "A hybrid model composed of a multilayer perceptron and a radial basis function network", *Proceedings of 1993 International Conference on Neural Networks (IJCNN-93-Nagoya, Japan)*, Nagoya, Japan, P. 1353–1356, Vol. 2. DOI: <https://doi.org/10.1109/IJCNN.1993.716794>
17. Postarnak, D. V. (2012), "Critical analysis of neural network models" ["Krytycheskyj analiz modelej neyronnykh setej"], *Bulletin of the Tyumen State University*, No. 4, P. 162–167.
18. "Analytical panels and open data: Official channel of the Ministry of Health of Ukraine", available at: <https://covid19.gov.ua/analitichni-paneli-dashbord> (last accessed 17.02.2021).
19. Yakovlev, S., Bazilevych, K., Chumachenko, D., Chumachenko, T., Huliannytskyi, L., Meniailov, I., Tkachenko, A. (2020), "The Concept of Developing a Decision Support System for the Epidemic Morbidity Control", *CEUR Workshop Proceedings*, Vol. 2753, P. 265–274.

Надійшла (Received) 22.02.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Базілевич Ксенія Олексіївна – кандидат технічних наук, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", доцент кафедри математичного моделювання та штучного інтелекту, Харків, Україна, email: k.bazilevych@khai.edu; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5332-9545>.

Базілевич Ксенія Алексеевна – кандидат технических наук, Национальный аерокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "Харьковский авиационный институт", доцент кафедры математического моделирования и искусственного интеллекта, Харьков, Украина, email: k.bazilevych@khai.edu; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5332-9545>.

Bazilevych Kseniia – PhD (Information Technologies), National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Associate Professor at the Department of Mathematical Modeling and Artificial Intelligence, Kharkiv, Ukraine.

Меняйлов Євген Сергійович – Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", старший викладач кафедри математичного моделювання та штучного інтелекту, Харків, Україна, email: j.menyailov@khai.edu; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9440-8378>.

Меняйлов Евгений Сергеевич – Национальный аерокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "Харьковский авиационный институт", старший преподаватель кафедры математического моделирования и искусственного интеллекта, Харьков, Украина, email: j.menyailov@khai.edu; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9440-8378>.

Meniailov Ievgen – National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Senior Lecturer at the Department of Mathematical Modeling and Artificial Intelligence, Kharkiv, Ukraine

Чумаченко Дмитро Ігорович – кандидат технічних наук, доцент, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", доцент кафедри математичного моделювання та штучного інтелекту, Харків, Україна, email: d.chumachenko@khai.edu; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2623-3294>.

Чумаченко Дмитрій Игоревич – кандидат технических наук, доцент, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "Харьковский авиационный институт", доцент кафедры математического моделирования и искусственного интеллекта, Харьков, Украина.

Chumachenko Dmytro – PhD (Systems and Means of Artificial Intelligence), Associate Professor, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Associate Professor at the Department of Mathematical Modeling and Artificial Intelligence, Kharkiv, Ukraine.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОН РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАБОЛЕВАЕМОСТЬЮ КОРОНАВИРУСОМ COVID-19 НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА

Предмет: использование математического аппарата нейронных сетей для научного обоснования противоэпидемических мер с целью снижения заболеваемости при принятии эффективных управленческих решений. **Цель:** применить кластерный анализ, на основе нейронной сети, для решения задачи выделения зон распространения заболеваемости. **Задачи:** проанализировать методы анализа данных для решения задачи кластеризации; разработать нейросетевой метод кластеризации территории Украины по характеру эпидемического процесса COVID-19; на основе разработанного метода реализовать программный продукт анализа данных для выделения зон распространения заболеваемости на примере коронавируса COVID-19. **Методы:** модели и методы анализа данных, модели и методы теории систем (на базе информационного подхода), методы машинного обучения, в частности метод Adaptive Boosting (на основе метода градиентного спуска), методы обучения нейронных сетей. **Результаты:** были использованы распределенные по областям Украины данные Центра общественного здоровья Минздрава Украины заболеваемостью COVID-19, количество лабораторно обследованных лиц, количество проведенных лабораторных исследований методами ПЦР и ИФА, количество проведенных лабораторных исследований IgA, IgM, IgG; в модели использованы данные с марта 2020 по декабрь 2020, при моделировании не учтены данные с временно оккупированных территорий Украины; для кластерного анализа построена нейронная сеть из 60 входных нейронов, 100 скрытых нейронов с активационной функцией Ферми и 4 выходными нейронами; для программной реализации модели использован язык программирования Python. **Выводы:** проведен анализ методов построения нейронных сетей; анализ методов обучения нейронных сетей, в том числе применения метода градиентного спуска для метода Adaptive Boosting; все теоретические сведения, описанные в данной работе, были использованы для реализации программного продукта обработки данных тестирования на COVID-19 в Украине; было проведено разбиение областей Украины на зоны заражения вирусом COVID-19 и представлена карта этого разбиения.

Ключевые слова: кластерный анализ; нейронная сеть; машинное обучение; эпидемический процесс; COVID-19.

IDENTIFICATION OF AREAS OF CORONAVIRUS COVID-19 INCIDENCE SPREADING BASED ON CLUSTER ANALYSIS METHOD

Subject: the use of the mathematical apparatus of neural networks for the scientific substantiation of anti-epidemic measures in order to reduce the incidence of diseases when making effective management decisions. **Purpose:** to apply cluster analysis, based on a neural network, to solve the problem of identifying areas of incidence. **Tasks:** to analyze methods of data analysis to solve the clustering problem; to develop a neural network method for clustering the territory of Ukraine according to the nature of the epidemic process COVID-19; on the basis of the developed method, to implement a data analysis software product to identify the areas of incidence of the disease using the example of the coronavirus COVID-19. **Methods:** models and methods of data analysis, models and methods of systems theory (based on the information approach), machine learning methods, in particular the Adaptive Boosting method (based on the gradient descent method), methods for training neural networks. **Results:** we used the data of the Center for Public Health of the Ministry of Health of Ukraine distributed over the regions of Ukraine on the incidence of COVID-19, the number of laboratory examined persons, the number of laboratory tests performed by PCR and ELISA methods, the number of laboratory tests of IgA, IgM, IgG; the model used data from March 2020 to December 2020, the modeling did not take into account data from the temporarily occupied territories of Ukraine; for cluster analysis, a neural network of 60 input neurons, 100 hidden neurons with an activation Fermi function and 4 output neurons was built; for the software implementation of the model, the programming language Python was used. **Conclusions:** analysis of methods for constructing neural networks; analysis of training methods for neural networks, including the use of the gradient descent method for the Adaptive Boosting method; all theoretical information described in this work was used to implement a software product for processing test data for COVID-19 in Ukraine; the division of the regions of Ukraine into zones of infection with the COVID-19 virus was carried out and a map of this division was presented.

Keywords: cluster analysis; neural network; machine learning; epidemic process; COVID-19.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Базілевич К. О., Меньяйлов Є. С., Чумаченко Д. І. Виділення зон розповсюдження захворюваності на коронавірус COVID-19 на основі методів кластерного аналізу. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 1 (15). С. 5–13. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.005>

Bazilevych, K., Meniailov, Ye., Chumachenko, D. (2021), "Identification of areas of coronavirus COVID-19 incidence spreading based on cluster analysis method", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (15), P. 5–13. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.005>

A. BAKUROVA, O. YUSKIV, D. SHYROKORAD, A. RIABENKO, E. TERESCHENKO

NEURAL NETWORK FORECASTING OF ENERGY CONSUMPTION OF A METALLURGICAL ENTERPRISE

The **subject** of the research is the methods of constructing and training neural networks as a nonlinear modeling apparatus for solving the problem of predicting the energy consumption of metallurgical enterprises. The **purpose** of this work is to develop a model for forecasting the consumption of the power system of a metallurgical enterprise and its experimental testing on the data available for research of PJSC "Dneprospsstal". The following **tasks** have been solved: analysis of the time series of power consumption; building a model with the help of which data on electricity consumption for a historical period is processed; building the most accurate forecast of the actual amount of electricity for the day ahead; assessment of the forecast quality. **Methods** used: time series analysis, neural network modeling, short-term forecasting of energy consumption in the metallurgical industry. The results **obtained**: to develop a model for predicting the energy consumption of a metallurgical enterprise based on artificial neural networks, the MATLAB complex with the Neural Network Toolbox was chosen. When conducting experiments, based on the available statistical data of a metallurgical enterprise, a selection of architectures and algorithms for learning neural networks was carried out. The best results were shown by the feedforward and backpropagation network, architecture with nonlinear autoregressive and learning algorithms: Levenberg-Marquard nonlinear optimization, Bayesian Regularization method and conjugate gradient method. Another approach, deep learning, is also considered, namely the neural network with long short-term memory LSTM and the adam learning algorithm. Such a deep neural network allows you to process large amounts of input information in a short time and build dependencies with uninformative input information. The LSTM network turned out to be the most effective among the considered neural networks, for which the indicator of the maximum prediction error had the minimum value. **Conclusions**: analysis of forecasting results using the developed models showed that the chosen approach with experimentally selected architectures and learning algorithms meets the necessary requirements for forecast accuracy when developing a forecasting model based on artificial neural networks. The use of models will allow automating high-precision operational hourly forecasting of energy consumption in market conditions.

Keywords: energy consumption; forecasting; artificial neural network; time series.

Introduction

Black metallurgy is one of the most energy-intensive industrial sectors. It is characterized by a high level of electricity consumption that is a significant component of energy use. Thus, the share of electricity in the cost of production of large enterprises in the industry varies from 11% to 16%, and in some cases its share increases to 30% [1].

The most electricity-intensive are steel production (its share of consumption is 32.3%), production of hot (21.9%) and cold-rolled products (12%), as well as agglomerative production (14.5%), blast-furnace based steel production (6.9%) and coke production (5.2%) [2].

The maximum specific consumption of electricity that is in electric steel production is 727 kWh / t of steel. Under this condition the consumption of electricity per ton of steel depends on the power of transformers, the specific electric power of arc furnaces, the use of fuel and oxygen burners, preheating of scrap and out-of-furnace processing.

The power consumption forecast in metallurgy that is necessary for optimal control of loading modes of electric power plants, which includes regulation of active and reactive loads of metallurgical enterprise, minimization of losses from reactive power flows and maintenance of voltage within set limits in electric networks due to strict power quality requirements.

The power consumption forecast in metallurgy that is necessary for optimal control of loading modes of electric power plants, which includes regulation of active and reactive loads of metallurgical enterprise, minimization of losses from reactive power flows and

maintenance of voltage within set limits in electric networks due to strict power quality requirements.

The peculiarities of electricity consumption by ferrous metallurgy enterprises include: a large number of electrical equipment that is used in the implementation of the technological process in each unit; great variety of types and capacities of electricity receivers; relatively weak links between the mutual influence of electricity receivers in the implementation of the technological process; a large number of electrical equipment that participates in ensuring the technological process in each unit and creates a conditionally constant load, also depends on the intensity of the technological process; factors those randomly affect the modes and volume of electricity consumption; a large number of hours of use of maximum electric power; large electrical intensity of the final product types; the possibility of changing the modes of operation and composition of equipment in the unit, product range and other systematically acting factors [3].

Therefore, the problem of forecasting electricity consumption in metallurgical production is one of the important scientific and practical tasks in the power industry today.

Planning is one of the main management functions. The deviation of actual consumption from the declared numbers by more than a certain percentage leads to the purchase of electricity from the balancing market at a higher price, deviation to a lesser value is also being punished by payment for undelivered electricity, which is determined by the difference between declared and actual consumption by the set fee rates.

The complexity of the energy consumption forecast caused by the need to consider many factors that affect

electricity consumption (the environment temperature; the level light; the day length; day of the week; transitions from winter to summer time and back; the presence of extraordinary events (disasters; mass actions); weather forecasts the state of other factors that affect the change in consumption in accordance to the data obtained from the processing of consumption statistics).

Improving the accuracy of forecasting saves energy resources, determines the efficiency of power supply management and, accordingly, increases the profits of energy companies. The need for accurate forecasting of electricity consumption is conditioned by technological and economic reasons. The total payment for the consumed electricity for the enterprise as a market participant consists of the payment for the actually consumed volume of electricity and the payment for the deviation of the actually consumed volume from the declared (forecasted) one. The higher possibility of the forecast error is, the greater is the deviation of the actual amount of electricity consumed from the declared (forecast) the greater is the additional costs of the enterprise to pay for electricity. Thus, reducing the forecast error will allow the enterprise to reduce the additional fee for electricity consumption caused by inaccurate forecasting.

In large energy-intensive industries, the share of electricity bills in the cost of production can reach tens of percent (for example, in metallurgical production, it is 11% - 30%) [4], and in a market economy, the prime cost of production will determine its competitiveness. Thus, in the conditions of modern energy market for large enterprises and mining industries it is important to create a system of hourly electricity consumption, which minimizes the deviation of power consumption from the declared.

Based on the done forecast, the actual and optimal modes of operation of power systems are calculated, as well as qualitative parameters (reliability, quality of electricity, etc.) are evaluated. Clear forecasting of electricity consumption provides optimal load distribution within the production process.

Analysis of recent research and publications

Currently, forecasting of electricity consumption in most of industrial enterprises is made on the experts' evaluation method, which in most of cases is not able to provide the necessary forecast accuracy. Electricity consumption forecasting gives us primary information for planning normal operating modes in energy management.

The accuracy of forecasting directly depends on the calculation methods. There are a large number of models and methods of short-term forecasting of the load on the power system of a metallurgical enterprise.

The formation and development of methods of mathematical modeling, forecasting and planning of electricity consumption, in particular in metallurgy, is related with the work of scientists, an overview of the main ideas of those are given below.

The monograph by Belt C.K. [5] is a fundamental work in energy management in the metallurgical industry.

The main idea that can be traced in it is that in the metallurgical industry there are unique processes and conditions those require a more individual approach. The author gives an explanation that the general methods of energy management in the very metallurgical industry, describes the advantages and reasons for implementing an energy management program, as well as reveal the basic indicators, tells us about data analysis, project identification and processes improvement.

In the article [6] a group of scientists presents a systematic review of existing publications on energy management in industry, that identifies five main elements of energy management, based on the following topics: strategy; planning, implementation; operation, control; organization and culture. The authors have developed a conceptual structure of energy management, which shows that a comprehensive approach is needed to effectively use the existing potential of energy efficiency.

The book [7] was written by the authors of the Neural Network Toolbox for MATLAB and provides a detailed description of the fundamental architectures of neural networks, learning rules, and applications for solving practical problems.

In [8], the authors offer the use of a deep neural network (DNN) for short-term electrical load prediction (STLF), which allowed to overcome the problems of nonlinearity and achieve higher prediction accuracy.

The manual [9] covers the latest trends and technologies in energy engineering and related industries, contains the latest materials on energy planning and policy.

The educational publication [10] explores a number of sustainable energy sources and tools used to analyze industry and future energy trends. The text contains an overview of energy economics with an integrated software package for research on energy use dynamics and forecasting; climatic and environmental factors of using energy are taken into consideration.

The main disadvantage of the existing methods is the need to build a load model and the constant refinement of the designed model. Another disadvantage of these methods is the inaccurate setup of the relationship between input and output variables, because the relationships between them are nonlinear.

Most of the existing power consumption forecasting algorithms are developed in the energy sector function as a combination of various statistical methods. However, due to the nonlinear relationship between the factors and the load on which it depends, qualitative modeling is a very complex process. The known methods of forecasting electricity consumption do not work with distorted or incomplete data, so we need new methods, approaches of forecasting electricity consumption, those could take into account different types of data.

In this paper, based on the analysis, the MATLAB complex with the Neural Network Toolbox was chosen to develop a model for forecasting the energy consumption of a metallurgical enterprise on the basis of ANN.

Highlight of the earlier unresolved parts of the general problem. Aim of the study

When we are building a model of forecasting electricity consumption for a metallurgical enterprise, several tasks are being set. They are:

1. To construct a mathematical model by processing the data on the load for the past period of time;
2. To obtain a forecast based on the obtained model.

The task of this study is to get as much information as possible from the available data to do and to build the most accurate forecast possible. The specific actions are selected on the basis of available data and availability of informational and technical systems. The solution of this problem requires preliminary research and descriptive analysis.

To solve the problem of forecasting electricity consumption, a number of smaller subtasks are set, those at the final stage will achieve the goal - to build a forecast with maximum accuracy.

The general task is divided into a number of subtasks, those include:

- descriptive analysis of the time series, or graphical analysis. The graphic analysis gives us an ability to identify obvious trends and patterns in the original data;
- time series research, as well as identification of regular and permanent components;
- obtaining an accurate forecast of the time series, taking into account fluctuations;
- evaluation of the quality of the constructed forecast.

The study of forecasting approaches shows that there is no standard, single method for forecasting electricity consumption: any enterprise has its special technological cycles, those together form a process that is unique to every enterprise.

The electricity consumption processes have functional, cyclical and random tendencies. The cyclical dependencies (they are usually daily, weekly and annual) are the easiest to predict. The cyclical trends, according to preliminary estimates, are for about 70 - 80% of all changes in the process of electricity consumption [11]. For example, the most significant cyclic factors in almost all industrial processes are the time, day of the week and the length of daylight.

The second of the important factors those are studied when solving the problem of forecasting are functional nature patterns (10 - 15% of the total deviations) [12]. This group can include deviations, those are explained by known and predicted factors those are specific to the metallurgical enterprise they are: air temperature or coolant use. Data analysis helps us to identify these factors and calculate their weight share in the energy consumption process.

The third component of the forecast is random trends. Their percentage share in the overall process is small, but the amplitude of deviations can be significant.

Operational forecast of electricity and power consumption is studied with the base on the current dynamics of power consumption at the last minute of each hour, but the main guideline for the technologist who

forms the forecast of consumption for the planned period is the trajectory of power consumption, placed in short-term consumption forecast. Therefore, providing the high accuracy of short-term forecast of electricity demand and capacity in power systems is a priority task. The operational forecasting of electricity and power consumption is a component of short-term forecasting.

The objective of this paper is to develop a model for forecasting the power system consumption of a metallurgical enterprise and its experimental testing on the data of "Dnipropetsstal" named after A. M. Kuzmin.

Solving the issue of improving the quality of operational consumption forecasting will be considered as a set of measures to improve the quality of short-term forecasting.

Materials and methods

The task of short-term forecasting of electricity consumption is a difficult task. The apparatus of artificial neural networks (ANN) has the ability to generalize information that describes nonlinear dependences in complex objects, processes and phenomena.

The shares of electricity consumption in the energy consumption system of PrJSC "Dnipropetsstal Electrometallurgical Plant" are determined by the production cycle, but in addition to the process of furnaces loading, they are affected by other needs those appear during the working hours. Therefore, as an array of input data for forecasting, statistical information was taken on the hourly consumption of electricity during the 24 hours period for the autumn months. Units of measurement of input information are MW / h.

Based on the training varieties and the formation of the forecast at the initial stage of the research, it is necessary for the ANN to select the weight coefficients in such a way that the standard deviation of the values of the outputs will be minimal. This requirement applies to the network of direct data extension and reverse error propagation (Feed-forward backpropagation - further FfB) [13]. Such network architecture requires its training at the expense of setting time targets, those should be the standard in the formation of the forecast and the input data that must be processed.

In order to set the input and target values of the function for the ANN model, it is necessary to use the architecture with nonlinear autoregression (NARX), which is presented in Figure 1. It is a recurring dynamic network with reversed connection that has several layers and is based on the autoregressive model:

$$y(t) = f(y(t-1), y(t-2), \dots, y(t-n), x(t-1), \dots, x(t-n)) \quad (1)$$

The predicted value of $y(t)$ depends on the n previous values of the output and on the n previous values of the time series. Fig. 1 shows the neural network scheme used in this research.

The NARX network in figure 1 is a two-layer reversed expansion neural network. The sigmoidal function acts as a transfer function in the hidden layer, and the linear function acts as a transfer function in the output layer.

The given network model uses delay lines with taps to store the previous values of $x(t)$ and $y(t)$. The original value of $y(t)$ is given back to the input of the network (after the delay), as $y(t)$ is a function dependent on the previous values: $y(t-1)$, $y(t-2)$, ..., $y(t-d)$.

There are two entrances in the network. One is external, and the other is connected to the output of the network, from that the input values are obtained. For each of the inputs there is a delay line with taps for storing the previous values. The number of neurons at the latent level will be established experimentally, and the number of delays is 2.

A closed loop in nonlinear autoregression allows one-step predictions, that is, it predicts the value of $y(t)$

from the previous values of $x(t-1)$, $x(t-2)$, $y(t-1)$, and $y(t-2)$. A closed-loop circuit can be used to perform multi-step prediction. This is caused by the fact that the predicted values of $y(t)$ will be used instead of the actual future values of $y(t)$.

Before you can start training a network that contains delay lines with taps, you must fill them with the initial values of input and output.

The task is to predict the time series, so as the input data will be used the numbers of time intervals in the prescribed manner, and as the output – the value of the analyzed energy consumption.

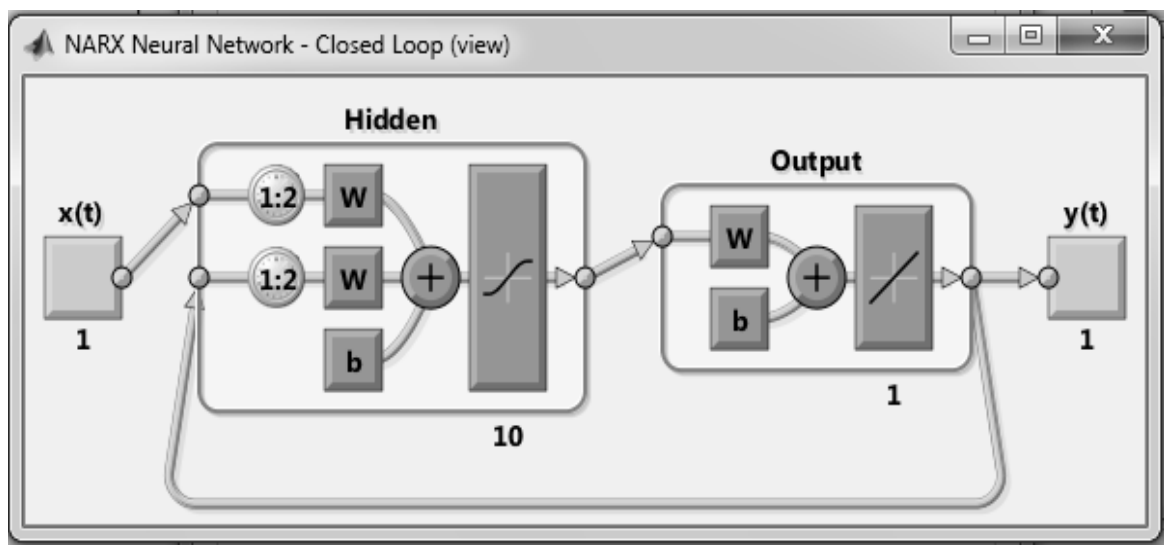


Fig. 1. Closed loop in a network of nonlinear autoregression

For effective network training, all input data is divided into three subsets. The first will be needed for training of a network (correction of scales). 70% of the data was used for the first one.

The second subset is necessary to avoid network overfitting. The control of network learning is carried out by calculating the error on the data from this subset. At the initial stage of learning the neural network, the error should be reduced. The over fitting will be evidenced by an increase in error. Therefore, a trained system will have scales, at those the error on the test subset would be minimal.

The third subset is a test. It is useful when comparing different models as an independent test of a trained network. Also, the test subset may indicate poor separation of the output data, if the minimum errors on the data and the verifiable subset are achieved in substantially distant ones from one iteration. For the second and third subsets, 15% of the data were allocated.

Another approach to forecasting energy consumption is deep learning [14]. A deep neural network allows you to process a large amount of input information in a short time, has the ability to build dependencies on non-informative input information, to detect hidden dependencies between the inputs and outputs.

Neural networks with long short-term memory (LSTM) have been created as a modification of recurrent neural networks (RNNs), those can be selected. Any recurrent neural network has the form of a chain of repeating modules of the neural network.

The core components of the LSTM network are the input sequence layer and the LSTM layer. The LSTM layer studies long-term relationships between time steps of given sequences.

The diagram in fig.2 illustrates the architecture of a simple LSTM network for forecasting. The network is started from the input layer of the Sequence Input sequence, which provides the LSTM layer. To predict class marks, it ends with a Fully Connected layer and regression of the source layer.



Fig. 2. Simple LSTM network architecture

To predict the meaning of future sequence time steps, it is possible to train the LSTM chain from sequence to sequence, where the answers are training sequences with values shifted by one. Thus, at each time step of the input sequence, the LSTM network learns to predict the value of the next time step. The training of such a network is carried out using the method of adam – adaptive moment estimation, optimization algorithm [14].

Forecast accuracy is estimated as the mean absolute error in percentages (MAPE):

$$MAPE = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \frac{|y_i - \bar{y}_i|}{y_i} \cdot 100, \quad (2)$$

where y_i – actual load values, forecast result, p is the amount of data.

According to the analysis of publications [7, 13, 15], a forecast error of no more than 5% is acceptable.

Study results and their discussion

In the Neural Network Toolbox environment, it is possible to use the following algorithms for learning neural networks: nonlinear Levenberg-Marquardt optimization, Bayesian Regularization methods and conjugate gradient methods (Scaled Conjugate Gradient) those are detailed described in sources [7, 13].

For objectivity of comparison of indicators of quality of forecasting at application of various algorithms of forecasting with use of the corresponding architecture of construction of ANN one was chosen exactly and on the same day that gave an opportunity to compare the results of received forecasts in the most accurate way.

When modeling the process of electricity consumption in the power system at the initial stage, a network that has an architecture of direct data propagation and reverse error propagation (Feed-forward backpropagation, or – FfB) and trained according to the Levenberg-Marquardt Algorithm was chosen.

The training results of the neural network in MATLAB are presented in the following way (fig. 3).

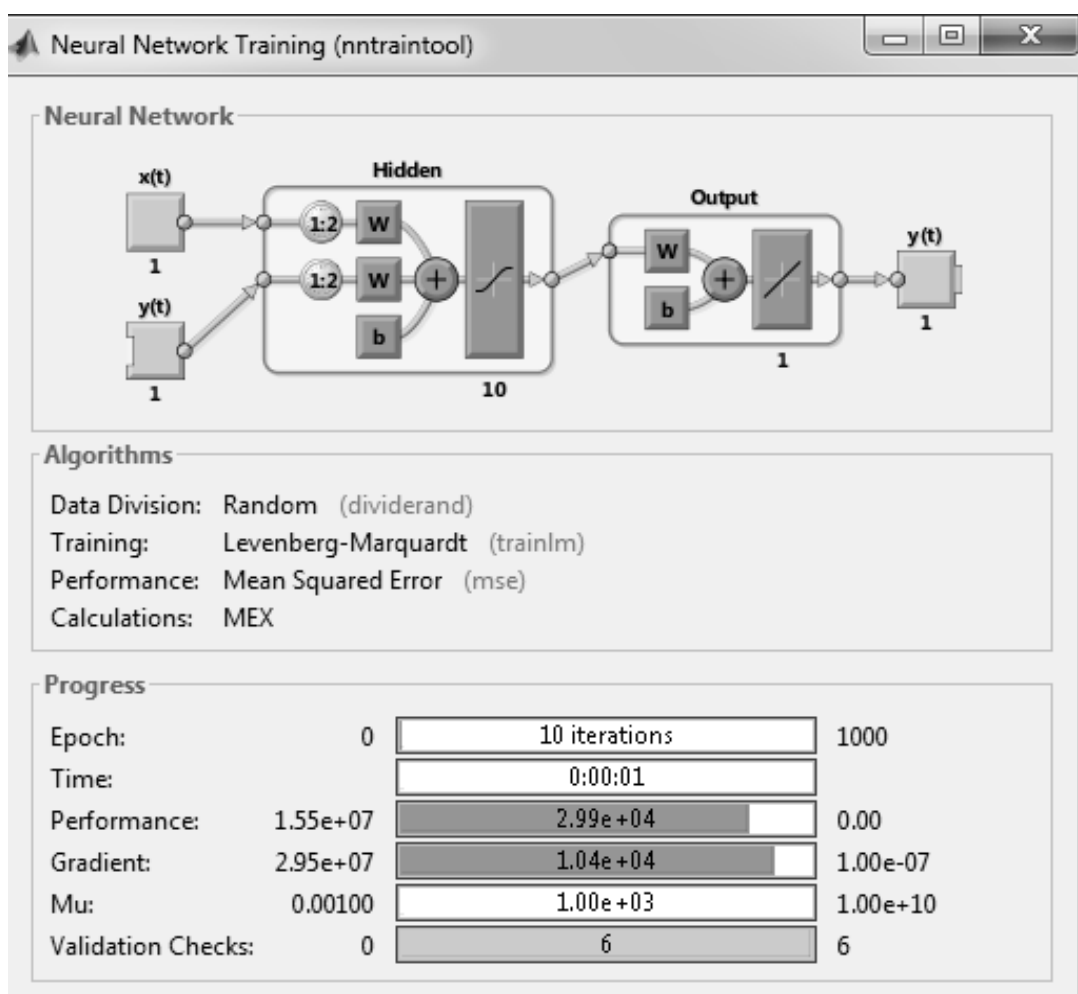
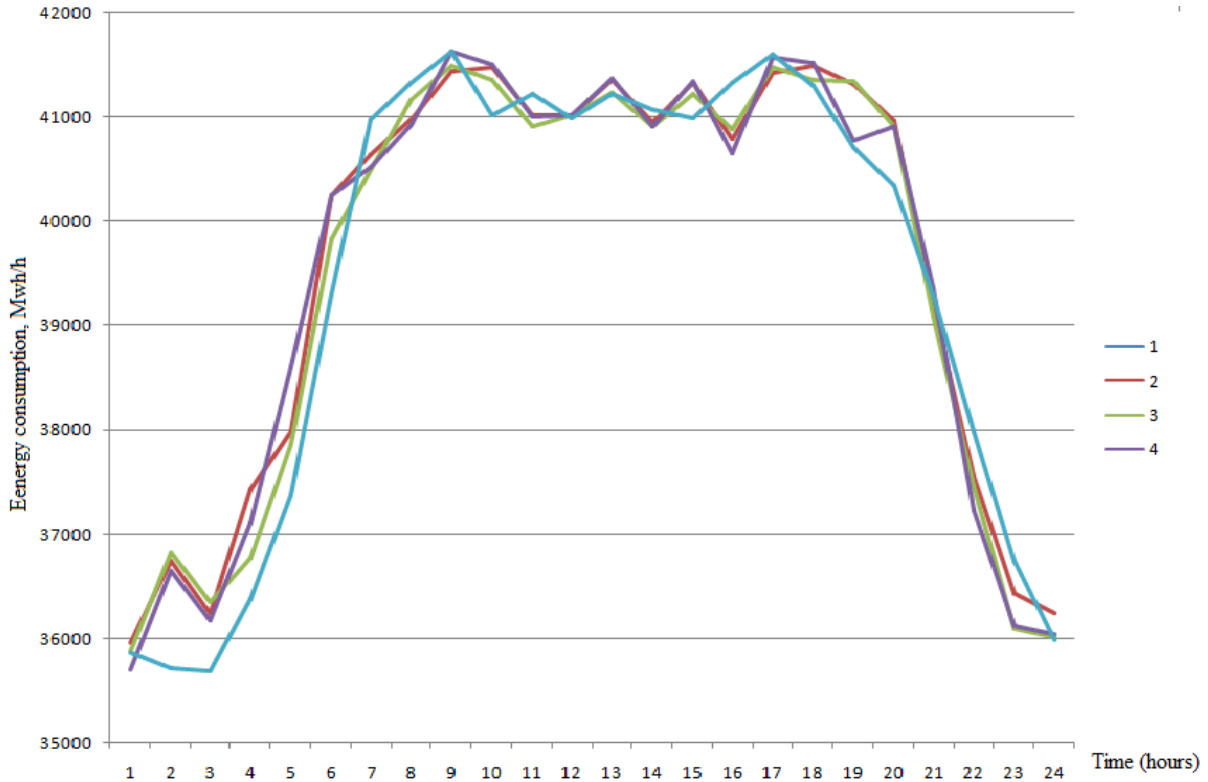


Fig. 3. The Neural network training results performed by Levenberg-Marquardt Algorithm on the architecture of the FfB model

In the following stages of the training, the same type of architecture, FfB, was used, but the learning algorithm changed: first, the Bayesian regularization algorithm, then the combined gradient method.

According to the obtained results, the comparison of the generated forecast from the actual values using different training algorithms on the FfB architecture are presented in fig. 4.



where 1 - The actual value of energy consumption; 2 - forecast value of energy consumption according to Levenberg-Marquardt Algorithm; 3 - forecast value of energy consumption according to Bayesian regularization algorithm; 4 - forecast value of energy consumption by the method of combined gradients

Fig. 4. Results of energy consumption forecasting using ANN

In contrast to the above ANN, a separate software solution is required for forecasting using the LSTM network.

The sequence of software implementation of deep training in the MATLAB package is:

- 1) to import data from Excel;
- 2) to divide the data into a training sample and a test;
- 3) to standardize the data to have a zero mean and modular deviation;

4) to create an LSTM regression network. Set the LSTM layer, which has 5 hidden modules. Further increase in the number of LSTM modules or layers doesn't improve the forecast quality due to insignificant quantity of training data in our case.

5) to set training options. Specify the 'adam' algorithm and train LSTM with the given training options using train Network for 250 epochs. To prevent the gradients from exploding, set the gradient threshold to 1;

6) to predict the value of several time steps in the future, use the predict And Update State function;

7) to initiate a network state, first predict the training data XTrain. Then we make the first prediction using the last time step of the learning answer YTrain (end).

The results of forecasting with the LSTM network are shown in fig. 5.

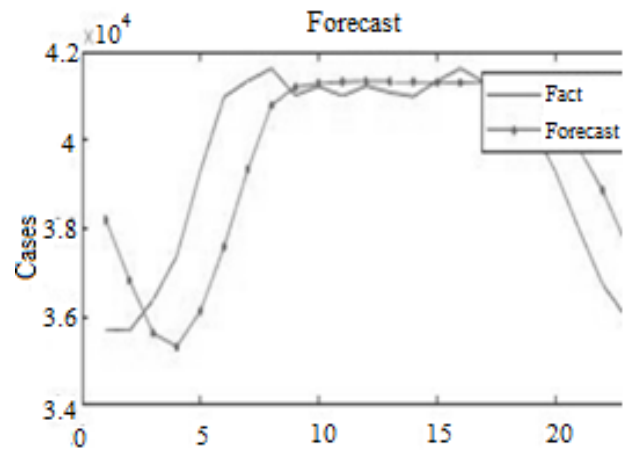


Fig. 5. Display of actual and forecasted data values with the LSTM network

The results of the obtained forecasts and calculations of forecasting accuracy according to formula (2) on different training algorithms are summarized in table 1.

Table 1. Characteristics of ANN training

Parameters	Levenberg – Marquardt Algorithm	Bayesian regularization algorithm	Combined gradients	LSTM Network
Epoches number	10	211	7	250
Training time	0:00:01	0:00:05	0:00:01	0:00:05
MAPE, %	2,87	3,07	3,27	2,59

According to table 1, the best among the used ANN for this training is the LSTM network, the maximum prediction error is 2.59% modulus per operating 24 hours period. In absolute terms, this is 1,069.76 MW.

The use of artificial neural networks allows to increase the consumption forecasting efficiency, as well as to consider the dynamic processes those are occurring in the power system, which affect the nature of electricity consumption and power, which increases the accuracy of forecasts.

To implement this task, the optimal software and hardware complex MATLAB was selected, that has tools for building and realizing ANN. We had the wide range of possibilities and proposed ready-made solutions so an analysis of the choice of the ANN architecture and the algorithm of its training was carried out in this software package.

Using MATLAB software package, experiments on the basis of statistical data of the metallurgical enterprise by the method of artificial neural networks were conducted. It is revealed that the developed neural networks may be used to make a forecast of electricity consumption for the 24 hours' time period ahead with a maximum accuracy of 2.87% of the actual volume of electricity consumed.

Conclusion and perspectives of further development

Developed models for forecasting energy consumption of "Electrometallurgical Plant "Dnipropetsstal" named after A. M. Kuzmin power systems based on LSTM ANN meet the requirements for the quality of short-term forecasting of consumption in power systems. But they fail to include all energy consumption problems and factors that affect the energy system of the enterprise. Therefore, there are a number of ways for the further model's improvement.

An important aspect of ferrous metallurgy enterprises is the risk of downtime for various reasons, the prediction of those using neural networks is considered in the article [16]. This fact makes a challenge for further research in this area regarding uninterrupted power supply and the impact of risk factors on the random component of the time series.

The issue is being analyzed in the articles by Chinese authors [17] relate to forecasting energy consumption in non-ferrous metallurgy, those enterprises have their own characteristics. The method of hybrid regression of reference vectors for research, that inspires to compare the

results obtained with the help of neural networks of different architecture with the results obtained by other methods is used.

In the monograph Belt C.K. [5] shows a tendency to increase gas consumption in the winter months and emphasizes that reducing the energy used for the station heating may be a viable project. Therefore, the following studies we provide the possibility of introducing meteorological factors into the model of electricity consumption forecasting to increase the efficiency of ANN.

High accuracy of short-term hourly forecasting of electricity consumption is a necessary condition for normal operation in the wholesale market of electricity and capacity (WMEC), otherwise such market entry does not make sense. In such conditions, the financial position of the WMEC participant depends on the accuracy of forecasting, so there is a problem of estimation of the economic efficiency of electricity consumption forecasting, but this requires additional research.

Management of a large electrometallurgical enterprise in terms of energy saving policy involves effective management of energy consumption by forecasting electricity consumption, that leads to new challenges and enhances the relevance of research in this area.

The forecasting results analysis done with the use of the developed models showed that the chosen approach with experimentally selected architectures and learning algorithms meets the necessary requirements that were set at the initial stage of creating a dynamic model of forecasting based on ANN. It can be concluded that the networks are built in the correct way, because the chosen learning algorithms make the model effective.

The practical value of the modeling carried out in this work is confirmed by a number of experiments performed on real and available for research data, those demonstrate the possibility of using the developed tool to solve forecasting problems.

The scientific novelty of this work is the formalization based on the neural network's theory of energy consumption forecasting models those include the daily volumes of electricity consumed.

The work was carried out as the part of the research work "Mathematical modeling of socio-economic processes and systems", the registration number DB05038, at the Department of System Analysis and Computational Mathematics of National University "Zaporizhzhya Polytechnic".

References

1. Kiyko, S. G. (2020), "Adaptive portfolio management of energy saving projects at a metallurgical enterprise", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (14), P. 56–70. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2020.14.056>
2. Hnatiienko, H. M., Snytiuk, V. Ie. (2008), *Ekspertni tekhnolohii pryiniattia rishen*, TOV "Maklaut", Kyiv.
3. Molokanova, V. M., Orliuk, O. P., Petrenko, V. O. (2020), "Formation of metallurgical enterprise sustainable development portfolio using the method of analyzing hierarchies", *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, No. 2, P. 131–136. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-2/131>
4. Kiyko, S. G. (2020), "Predictive adaptation in the management of the portfolio of energy saving projects at the metallurgical enterprise", *Science and technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*, No. 4 (41), P. 133–144. DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2020.41.16>
5. Belt, C. K. (2017), *Energy Management for the Metals Industry*, CRC Press, New York. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315156392>

6. Schulze, M., Nehler, H., Ottosson, M. (2016), "Energy management in industry: a systematic review of previous findings and an integrative conceptual framework", *Journal of Cleaner Production*, No. 112 (5), P. 3692–3708. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.060>
7. Hagan, M. T., Demuth, H. B., Beale, M. H. (2014), "Neural Network Design", available at : <http://hagan.okstate.edu/NNDesign.pdf>
8. Phyoo, P. P., Jeenanunta, C. (2019), "Electricity load forecasting using a deep neural network", *Engineering and Applied Science Research*, No. 46 (1), P. 10–17, available at : <https://ph01.tcithaijo.org/index.php/easr/article/view/116025> (last accessed 13 December 2020).
9. Goswami, D. Y., Kreith, F. (2015), *Energy Efficiency and Renewable Energy Handbook*, CRC Press, Boca Raton. DOI: <https://doi.org/10.1201/b18947>
10. Kutscher, Ch. F., Milford, J. B., Kreith, F. (2018), *Principles of Sustainable Energy Systems*, CRC Press, Boca Raton, DOI: <https://doi.org/10.1201/b21404>
11. Kirpichnikova, I. M., Saplin, L. A., Solomakho, K. L. (2014), "Prognozirovanie ob'emov potrebleniya elektroenergii", *Vestnik YuUrGU. Energetika*, No. 14 (2), P. 16–22, available at : <https://dspace.susu.ru/xmlui/handle/0001.74/4942> (last accessed 13 December 2020).
12. Shumilova, G. P., Gotman, N. E., Starceva, T. B. (2008), Prognozirovanie elektricheskikh nagruzok pri operativnom upravlenii elektroenergeticheskimi sistemami na osnove nejrosetevykh struktur, URO RAN, Ekaterinburg.
13. Bodyanskiy, E. V., Rudenko, O. G. (2004), *Iskusstvenny'e nejronny'e seti: arkhitektury, obucheniye, primeneniya, Teletekh, Khar'kov*.
14. "Time Series Forecasting Using Deep Learning" ["Prognozirovaniye vremennykh ryadov Ispol'zuya glubokoye obucheniye"], available at : <https://docs.exponenta.ru/deeplearning/ug/time-series-forecasting-using-deep-learning.html> (last accessed 13 December 2020).
15. Brejdo, I. V., Bulatbaeva, Yu. F., Orazgaleeva, G. D. (2020), "Algoritm sozdaniya modeli kratkosrochnogo prognozirovaniya energopotrebleniya na osnove nejronnoj seti v Matlab", *VI International Scientific Conference. Actual Problems of Technical Sciences, Krasnodar, April 2020, P. 1-6*, available at : <https://moluch.ru/conf/tech/archive/367/15614/> (last accessed 13 December 2020).
16. Vichuzhanin, V. V., Rudnichenko, N. D. (2016), "Development of the neural network model for prediction failure risk's of the complex technical systems components", *Informatics and Mathematical Methods in Simulation*, Vol. 6/ 4, P. 333–338.
17. Huang, Z., Yang, C., Zhou, X. et al (2020), "Energy Consumption Forecasting for the Nonferrous Metallurgy Industry Using Hybrid Support Vector Regression with an Adaptive State Transition Algorithm", *Cognitive Computation*, Vol. 12, P. 357–368. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12559-019-09644-0>

Received 28.02.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бакурова Анна Володимирівна – доктор економічних наук, професор, Національний університет "Запорізька політехніка", професор кафедри системного аналізу та обчислювальної математики, Запоріжжя, Україна; email: abaka111060@gmail.com; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6986-3769>.

Бакурова Анна Владимировна – доктор економічних наук, професор, Національний університет "Запорожская політехніка", професор кафедри системного аналізу та обчислювальної математики, Запорожжя, Україна.

Bakurova Anna – Doctor of Sciences (Economics), Professor, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Professor of the Department of Systems Analysis and Computational Mathematics, Zaporizhzhia, Ukraine.

Юськів Олесь Ігорівна – Національний університет "Запорізька політехніка", аспірант кафедри системного аналізу та обчислювальної математики, Запоріжжя, Україна; email: yuskivolesya@rambler.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7669-7647>.

Юськів Олесь Игоревна – Национальный университет "Запорожская політехніка", аспірант кафедри системного аналізу та обчислювальної математики, Запорожжя, Україна.

Yuskiv Olesia – National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Postgraduate of the Department of Systems Analysis and Computational Mathematics, Zaporizhzhia, Ukraine.

Широкоград Дмитро Вікторович – кандидат фізико-математичних наук, Національний університет "Запорізька політехніка", доцент кафедри системного аналізу та обчислювальної математики, Запоріжжя, Україна; email: hoiveringphoenix@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2784-4081>.

Широкоград Дмитрий Викторович – кандидат фізико-математических наук, Национальный университет "Запорожская політехніка", доцент кафедри системного аналізу та обчислювальної математики, Запорожжя, Україна.

Shyrokorad Dima – PhD (Physical and Mathematical Sciences), National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Associate Professor of the Department of Systems Analysis and Computational Mathematics, Zaporizhzhia, Ukraine.

Рябенко Антон Євгенійович – кандидат фізико-математичних наук, Національний університет "Запорізька політехніка", доцент кафедри системного аналізу та обчислювальної математики Запоріжжя, Україна; email: rjabenkoae@gmail.com; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7738-7918>.

Рябенко Антон Евгеньевич – кандидат фізико-математических наук, Национальный университет "Запорожская політехніка", доцент кафедри системного аналізу та обчислювальної математики, Запорожжя, Україна.

Riabenco Anton – PhD (Physical and Mathematical Sciences), National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Associate Professor of the Department of Systems Analysis and Computational Mathematics, Zaporizhzhia, Ukraine.

Терещенко Єліна Валентинівна – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний університет "Запорізька політехніка", доцент кафедри системного аналізу та обчислювальної математики, Запоріжжя, Україна; email: elina_vt@ukr.net, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6207-8071>.

Терещенко Элина Валентиновна – кандидат фізико-математических наук, доцент, Национальный университет "Запорожская політехніка", доцент кафедри системного аналізу та обчислювальної математики, Запорожжя, Україна.

Tereschenko Elina – PhD (Physical and Mathematical Sciences), Associate Professor, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Associate Professor of the Department of Systems Analysis and Computational Mathematics, Zaporizhzhia, Ukraine.

НЕЙРОМЕРЕЖЕВЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ МЕТАЛУРГІЙНОГО ПІДПРИЄМСТВА

Предметом дослідження є методи побудови і навчання нейронних мереж як апарату нелінійного моделювання для розв'язання задачі прогнозування енергоспоживання металургійних підприємств. **Метою** даної роботи є розробка моделі прогнозування споживання енергосистеми металургійного підприємства і його експериментальне випробування на доступних для дослідження даних ПрАТ "Дніпроспецсталь". Вирішені наступні **завдання**: аналіз часового ряду електроспоживання; побудова моделі, за допомогою якої обробляються дані про електроспоживання за історичний період; побудова якомога точнішого прогнозу фактичного обсягу електроенергії на добу вперед; оцінка якості прогнозу. Використано **методи**: аналізу часових рядів, нейромережевого моделювання, короткострокового прогнозування енергоспоживання в металургійній промисловості. Отримані **результати**: для розробки моделі прогнозування енергоспоживання металургійного підприємства на основі штучних нейронних мереж був обраний комплекс MATLAB з пакетом інструментів Neural Network Toolbox. При проведенні експериментів на основі доступних статистичних даних металургійного підприємства було виконано відбір архітектур і алгоритмів навчання нейронних мереж. Кращі результати показали мережа прямого поширення даних і зворотного поширення помилки, архітектура з нелінійною авторегресією і алгоритмами навчання: нелінійної оптимізації Levenberg-Marquard, метод Bayesian Regularization й метод сполучених градієнтів. Також розглянуто інший підхід – глибоке навчання, а саме нейронна мережа з довгою короткостроковою пам'яттю LSTM і алгоритмом навчання adam. Така глибока нейронна мережа дозволяє обробляти великі обсяги вхідної інформації за короткий час і будувати залежності за неінформативної вхідної інформації. Найбільш ефективною серед розглянутих нейронних мереж виявилася мережа LSTM, у якій показник максимальної помилки прогнозування мав мінімальне значення. **Висновки**: аналіз результатів прогнозування з використанням розроблених моделей показав, що обраний підхід з експериментально відібраними архітектурою і алгоритмами навчання задовольняє необхідним вимогам точності прогнозу при розробці моделі прогнозування на базі штучних нейронних мереж. Застосування моделей дозволить автоматизувати високоточне оперативне погодинне прогнозування енергоспоживання в ринкових умовах.

Ключові слова: енергоспоживання; прогнозування; штучна нейронна мережа; часовий ряд.

НЕЙРОСЕТЕВОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Предметом исследования являются методы построения и обучения нейронных сетей как аппарата нелинейного моделирования для решения задачи прогнозирования энергопотребления металлургических предприятий. **Целью** данной работы является разработка модели прогнозирования потребления энергосистемы металлургического предприятия и его экспериментальное испытание на доступных для исследования данных ЧАО "Днепропеталь". Решены следующие **задачи**: анализ временного ряда электропотребления; построение модели, с помощью которой обрабатываются данные об электропотреблении за исторический период; построение как можно более точного прогноза фактического объема электроэнергии на сутки вперед; оценка качества прогноза. Используются **методы**: анализа временных рядов, нейросетевого моделирования, краткосрочного прогнозирования энергопотребления в металлургической промышленности. Полученные **результаты**: для разработки модели прогнозирования энергопотребления металлургического предприятия на основе искусственных нейронных сетей был выбран комплекс MATLAB с пакетом инструментов Neural Network Toolbox. При проведении экспериментов на основе доступных статистических данных металлургического предприятия был выполнен отбор архитектур и алгоритмов обучения нейронных сетей. Лучшие результаты показали сеть прямого распространения данных и обратного распространения ошибки, архитектура с нелинейной авторегрессией и алгоритмами обучения: нелинейной оптимизации Levenberg-Marquard, метод Bayesian Regularization и метод сопряженных градиентов. Также рассмотрен другой подход – глубокое обучение, а именно нейронная сеть с длинной краткосрочной памятью LSTM и алгоритмом обучения adam. Такая глубокая нейронная сеть позволяет обрабатывать большие объемы входной информации за малое время и строить зависимости при неинформативной входной информации. Наиболее эффективной среди рассмотренных нейронных сетей оказалась сеть LSTM, у которой показатель максимальной ошибки прогнозирования имел минимальное значение. **Выводы**: анализ результатов прогнозирования с использованием разработанных моделей показал, что выбранный подход с экспериментально отобранными архитектурами и алгоритмами обучения удовлетворяет необходимым требованиям точности прогноза при разработке модели прогнозирования на базе искусственных нейронных сетей. Применение моделей позволит автоматизировать высокоточное оперативное почасовое прогнозирование энергопотребления в рыночных условиях.

Ключевые слова: энергопотребление; прогнозирование; искусственная нейронная сеть; временной ряд.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Бакурова А. В., Юськів О. І., Широкоград Д. В., Рябенко А. Є., Терещенко Е. В. Нейромережеве прогнозування енергоспоживання металургійного підприємства. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 1 (15). С. 14–22. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.014>

Bakurova, A., Yuskiv, O., Shyrokograd, D., Riabenko, A., Tereschenko, E. (2021), "Neural network forecasting of energy consumption of a metallurgical enterprise", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (15), P. 14–22. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.014>

V. BESKOROVAINYI, A. SUDIK

OPTIMIZATION OF TOPOLOGICAL STRUCTURES OF CENTRALIZED LOGISTICS NETWORKS IN THE PROCESS OF REENGINEERING

The **subject** of research in the article is the topological structures of closed logistics networks. The **purpose** of the work is to create a mathematical model and methods for solving problems of optimization of topological structures of centralized logistics networks in the process of reengineering, taking into account many topological and functional constraints. The article solves the following **tasks**: analysis of the current state of the problem of system optimization of logistics networks and methods of its solution; formalization of the problem of system optimization of logistics networks as territorially distributed objects; development of a mathematical model of the problem of optimization of centralized three-level topological structures of logistics networks at the stage of reengineering; development of a method for solving the problem of optimization of centralized three-level topological structures of logistics networks at the reengineering stage; estimation of time complexity of the method of optimization of centralized three-level topological structures of logistics networks. The following **methods** are used: methods of systems theory, methods of utility theory, optimization and operations research. The following **results** were obtained: analysis of the current state of the problem of system optimization of logistics networks and methods of its solution; the problem of system optimization of logistics networks as territorially distributed objects has been formalized; developed a mathematical model of the problem of reengineering three-level topological structures of logistics networks in terms of cost and efficiency for the case of combined production and processing points; methods of directed search of variants of construction of a logistic network which use procedures of coordinate optimization and modeling of evolution on the basis of genetic algorithm are developed; estimates of the accuracy and time complexity of optimization methods of centralized three-level topological structures of logistics networks are obtained. **Conclusions**: Based on the results of the study of methods for solving the problem, an approximation of their accuracy and time complexity was performed. In practice, this will allow you to choose a more efficient method for solving large-scale practical problems, based on the required accuracy, available computing and time resources. The method based on the coordinate optimization procedure has a significantly higher accuracy, but it is more complex from a computational point of view. The accuracy of the evolutionary method based on a genetic algorithm can be increased by increasing the number of iterations. The practical use of the proposed mathematical model and methods of reengineering the topological structures of centralized closed logistics systems by jointly solving problems for direct and reverse flows will reduce the cost of transport activities of companies.

Keywords: closed logistics; logistics network; optimization; reengineering; structure; topology.

Introduction

The processes of optimization of anthropogenic objects provide for the establishment of causal relationships and laws characteristic of the processes of movement of heterogeneous flows in them. This is done in order to identify and implement effective organizational forms and methods of object management. The effectiveness of such processes is largely determined by the quality of the relevant logistics [1]. One of the problems in managing the SCM supply chains (Supply Chain Management) is the design of SCND supplies networks (Supply Chain Network Design) [2]. Such networks are inherently facilities with significant territorial dispersal. The structural, cost and functional characteristics of logistics networks are largely determined by the topology (placement) of their elements (manufacturers, terminals, consumers). The topology of network elements, in turn, determines the topology of the corresponding flows.

Logistics networks operate in constantly changing conditions. This is due to the emergence of new consumers, changes in supply volumes, the introduction of environmental restrictions [3-4] and the like. As a result, at some stage, existing networks become inefficient or no longer meet new conditions. Attempts to upgrade them by solving traditional optimization problems do not guarantee efficient options. For more effective adaptation of such objects, a reengineering approach is increasingly used, which involves a fundamental analysis of existing options for their construction (modes of transport, structure,

topology, parameters, technology) and radical redesign [5]. This requires solving a set of problems of technological, structural, parametric, topological optimization, multifactorial evaluation and selection of system solutions taking into account their connections at all stages of the network life cycle [6]. At the same time, the principles of building a network are radically revised, which can lead to profound changes in the technology of its functioning, structure, parameters of elements, means of transport, topology. Given that logistics networks use a relatively small variety of alternative technologies, node (terminal) types and vehicle types, the main problem from a computational point of view is the optimization of their structure and topologies.

Analysis of the problem and methods of its solution

Traditionally, logistics are macro and micro logical systems [7]. The first species systems operate within the interaction of several property objects are not related to territorial distribution and are used by international transcontinental companies or intermediary organizations. The second species system solves the problems of interaction of one or more enterprises with one economic interest or a separate enterprise [8]. In this case, in the transport micro logical of a large enterprise allocate systems of global and local transportation. The task of global transportation in the general case is reduced to the optimal placement of intermediate truck units to minimize cargo transportation costs [9].

Increasingly, the tasks of environmental logistics are

increasingly relevant, which are aimed at reducing the level of risk of economic losses due to deterioration of environmental quality and enhancing ecological and economic efficiency of enterprises [10-11].

The subject of reversal logistics is the ordering and systematization of reverse commodity-material, information, cash flows [12-17]. Usually, tasks of direct and reversing logistics are considered as conditionally independent, which does not allow to receive effective global solutions to the logistics problem as a whole. Their joint solution generates a plurality of new tasks that require the development of new mathematical models and effective research methods [18].

One of the stages of synthesis of the system of global transportation of products of one manufacturer is structural and topological optimization of the centralized transport and warehouse system [19]. It is considered as set: the location of the supply center, set of consumers $I = \{i : i = \overline{1, n}\}$, for each of which is determined by the matrix of the distance location, supply volumes and transport tariffs for the delivery of goods. It is necessary to determine the optimal number of l^o and location of terminals, as well as subsets of consumers serviced by each of the terminals $I_j = \{i, j = \overline{1, l^o}\}$. In this case, in global transportation systems, it can be assumed that terminals are located near consumers of products.

Target function of the task shows the cost of delivery of products to consumers:

$$C = \sum_{j=1}^l c_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l q_i r_i d_{ij} v_{ij} \rightarrow \min_{r, d, v} \quad (1)$$

where c_j – the costs of creation and use of the j -th terminal (including delivery and storage costs); l – number of terminals; n – number of consumers of products; q_i – volume of cargo for the i -th consumer; r_i – transport tariff for the delivery of cargo to the i -th consumer; d_{ij} – distance between the i -th consumer and the j -th terminal; v_{ij} – Boolean variable: $v_{ij} = 1$, if the i -th consumer is serviced by the j -th terminal, $v_{ij} = 0$ – otherwise.

To solve the problem with the target function of the type (1), approximate methods of directed interruption in the direction of increasing the number of terminals of the network are quite effective [19]. Their time complexity has an order $O[n^2] r$, and the error of solutions for tasks with the number of consumers $n \leq 50$ is less than 5%.

The tasks of structural and topological optimization of closed logistics networks differ consideration of reversible flows from consumers to centers of production or processing (utilization). They predict the optimization of the network, in which, in the first level are centers of production and processing, on the second - terminals, on the third - end consumers. The cost of the network in this case consist of the cost of delivery of a direct flow from

the center of production to terminals C_{PT} , processing in the terminals of direct C_{T1} and reverse C_{T2} flows, the delivery of a direct flow from terminals to consumers C_{TS} , the delivery of a return flow from consumers to terminals C_{ST} and the backflow delivery from terminals to the center [18]:

$$C = C_{PT} + C_{T1} + C_{TS} + C_{ST} + C_{T2} + C_{TP} \quad (2)$$

The mathematical model of such a task with the target function (2) in the case of coincidence of production and processing points can be presented in this form:

$$C = \sum_{i=1}^n c_i x_{ii} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min_x \quad (3)$$

$$X = [x_{ij}] = \begin{cases} x_{ij} \in \{0, 1\}, i, j = \overline{1, n}; \sum_{i=j}^n x_{ij} \geq 1, \forall j = \overline{1, n}; \\ \sum_{j=1}^n \sum_{i=j}^n x_{ij} = 2(n-1) + \sum_{i=1}^n x_{ii}, \end{cases} \quad (4)$$

where c_i – the costs of the terminal are organized on the base (in the immediate vicinity of) i -th consumer; n – number of network elements; $X = [x_{ij}]$ – Matrix of network elements; x_{ij} – Boolean variable: $x_{ij} = 1$, if there is a direct link between i -th and j -th elements of the network; $x_{ij} = 0$ – in other case; c_{ij} – shipping costs flow from the network item i to the item.

The system of restrictions in the problem (3) - (4) describes the entire set of permissible three-level centralized structures with direct and reverse flows.

The basic task in the network of local transportation is the problem of optimizing ring routes, which is reduced to the classical sales problem (SP) or its varieties. The most effective precise algorithms for solving the SP without additional restrictions are based on the method of branches and limits, and heuristic methods use different search schemes in the vicinity of a basic solution [21-22].

The peculiarity of routing tasks in closed logistics systems is that the direct stream can be delivered to the network points and the reversible stream may be collected from the network items by one and the same vehicle. Consideration of this feature requires changes to mathematical models and methods for solving problems of optimization of networks of ring routes [18].

In modern conditions there are relatively rapid changes in flows in all chains of logistics networks. With relatively minor changes in flows, adaptation of existing structures, which requires decision-making in the context of part-time data [23-24]. At the level of micro logistics, this is reduced to the operational solution of the problem of optimizing the network of ring routes at a minimum of costs [25]. With significant changes in flows, there is a need for reengineering macro logistic networks. One of the most important tasks in this case is the problem of optimizing their topological structures in terms of efficiency and expenses. This determines the relevance of

tasks of developing mathematical models and methods for solving problems of reengineering of topological structures of logistics networks.

The **purpose** of this article is the development of a mathematical model and the method of solving the problem of optimizing the topological structures of logistics networks at the stage of reengineering, taking into account the set of structural, topological and functional constraints. To achieve the goal, the following tasks are solved:

- formalization of the problem of systematic optimization of logistics networks;

- development of a mathematical model of the problem of optimizing centralized three-level topological structures of logistics networks at the stage of reengineering;

- development of the method of solving the problem of reengineering of topological structures of centralized three-level logistics networks;

- evaluation of the time complexity of the method of optimizing centralized three-level topological structures of logistics networks.

Results of the study

Due to a significant territorial dispersion of elements of logistics networks, they are included in the class of territorially distributed objects [18]. Each of these objects as a system formally be submitted in the form of a tuple:

$$s = \langle E, R, G \rangle, \quad (5)$$

where E is a set of network elements; $R = [r_{ij}]$ – the set of bonds between elements, which traditionally set the matrix of adjacency: $r_{ij} = 1$, if there is a direct connection between the i -th and j -th network elements, - otherwise; $r_{ij} = 0$ – otherwise; G – a set of places where the network elements are located.

Based on a set of admissible locations of terminals of a system G^* , each of the variants of the network structure $\langle E, R \rangle$ may have different topologies $G \subseteq G^*$. Each of the network $\langle E, R, G \rangle$ topologies $G = \langle G_E, G_R, G_A \rangle$ (where G_E – topology of elements; G_R – topology of connections between elements; G_A – topology of movement of flows) will correspond to its set of functional and consumables:

$$P = \varphi(E, R, G), \quad (6)$$

where φ – a certain reflection.

$$\xi_l(s) = \begin{cases} \bar{a} \cdot (b_l + 1) \cdot \left(1 - \left(b_l / \left(b_l + \frac{\bar{k}(s)}{\bar{k}_a} \right) \right) \right), & 0 \leq \bar{k}(s) \leq \bar{k}_a; \\ \bar{a} + (1 - \bar{a}) \cdot (b_l + 1) \cdot \left(1 - \left(b_l / \left(b_l + \frac{\bar{k}(s) - \bar{k}_a}{1 - \bar{k}_a} \right) \right) \right), & \bar{k}_a < \bar{k}(s) \leq 1, \end{cases} \quad (10)$$

where \bar{k}_a, \bar{a} – normalized values of the coordinates of the gluing point of the components of the function,

According to the results of the analysis of the purpose of creating a network s , the conditions for its functioning and desirable properties P' that are evaluated by a plurality of local criteria $k_i(s)$, $i = \overline{1, m}$, a subset of elements $E'(P')$, connections between elements $R'(P')$ and topologies on which it can theoretically be implemented can be determined. Taking into account economic, environmental, other restrictions are determined subsets of permissible elements $E^* \subseteq E'(P')$, connections $R^* \subseteq R'(P')$ and topologies $G'(P')$ that provide the possibility of obtaining necessary properties. Further the most effective variant must be determined on the permissible set of network construction options $S^* = \{s\}$:

$$s^o = \arg \max_{s \in S^*} P(s). \quad (7)$$

Due to the incomplete certainty of the requirements for the properties of the logistics network as an efficiency assessment (a function of general utility) $P(s)$ in (2), it is proposed to use the function of belonging to the fuzzy set "Best Network Option" [26]:

$$\langle \text{Best Network Option} \rangle = \{ \langle s, P(s) \rangle \}, \quad (8)$$

where $s \in S^*$ – network construction option; $P(s)$ – the value of the function of the total utility of the option s , which assesses the degree of its belonging to a fuzzy set (8).

For quantitative evaluation of the efficiency of the variants of network construction, we use the most versatile additive-multiplicative model, built using Polynoma Kolmogorov Gabor:

$$P(s) = \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot \xi_i(s) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=i}^m \lambda_{ij} \cdot \xi_j(s) \cdot \xi_i(s) + \dots, \quad (9)$$

where m – is a number of local criteria characterizing network properties; λ_i, λ_{ij} – weight coefficients of local criteria and their yields $\lambda_i \geq 0, \lambda_{ij} \geq 0, \xi_l(s)$ – local criterion utility function $k_l(x)$, $l = i, j$.

To assess the usefulness of individual partial criteria values, it is proposed to use the gluing function, which has advantages in terms of accuracy and number of computer operations for its calculation compared to the Gauss, Harrington and logistics functions [27]:

$0 \leq \bar{k}_a \leq 1$, $0 \leq \bar{a} \leq 1$; b_1, b_2 – parameters, nonlinearity of the initial and final components of the function.

The task of reengineering the topological structure of a centralized three-level closed logistics network with the united items of production and processing is considered in such a statement. Are specified:

- set of elements of the existing network $I = \{i : i = \overline{1, n}\}$;

- an existing version of the topological structure of the network $s' \in S^*$ given by places of consumers, terminals (coincide with places of location of elements), center (coincides with the place of location of the element $i = 1$), as well as connections between elements, terminals and the center $[s'_{ij}]$, $i, j = \overline{1, n}$ ($s'_{ij} = 1$ if there are direct connections between elements i and j , and $s'_{ij} = 0$ otherwise);

- costs of creation (modernization), operation of terminals $[c_i]$, $i = \overline{1, n}$, implementation of transportation $i = \overline{1, n}$ $[c_{ij}]$, cost of resources that can be reused (or realized) after dismantling of equipment of terminals or vehicles.

It is necessary to determine the best of the set of functional-cost indicators option of the topological structure of the logistics network $s^o \in S^*$ (7).

Basic restrictions that are taken into account when optimizing topological structures of three-level centralized networks:

- each consumer of the network $i, i = \overline{1, n}$ must be connected to one of the terminals: $\sum_{j=1}^i s_{ij} + \sum_{j=1}^n s_{ij} = 1$ for all i for which $s_{ij} = 0, i = \overline{1, n}$ or directly to the manufacturer (center) $s_{1j} = 1, i = \overline{1, n}$;

$$k_I(s', s) = \Delta C = \sum_{i=1}^n [c_i(1 - s'_{ii}) s_{ii} + d_i s'_{ii} s_{ii} + e_i(1 - s'_{ii}) s'_{ii} - g_i(1 - s_{ii}) s'_{ii}] + \sum_{j=1}^n \sum_{i=j}^n [c_{ij}(1 - s'_{ij}) s_{ij} + d_{ij} s'_{ij} s_{ij} + e_{ij}(1 - s_{ij}) s'_{ij} - g_{ij}(1 - s_{ij}) s'_{ij}] \rightarrow \min_{s \in S^*}, \quad (11)$$

where c_i – costs for creating the i -th terminal in a new structure, $i = \overline{1, n}$; s'_{ii}, s_{ij} – elements of matrices of adjacency (connections) between elements in existing network $x' = [x'_{ij}]$ and network after reengineering $x = [x_{ij}]$; d_i – the cost of upgrading the i -th terminal; e_i – costs of dismantling the i -th terminal of the existing network; g_i – cost of resources, which can be reused (or implemented) after dismantling of equipment i -th terminal; c_{ij} – the given costs of transportation between the elements i and j , $i, j = \overline{1, n}$.

- more than one consumer must be directly connected to each terminal $\sum_{j=1}^i s_{ij} + \sum_{j=1}^n s_{ij} > 1$, for all i , for

which $s_{ii} = 1, i = \overline{1, n}$;

- each consumer i connects to terminal j by minimum of resulted expenses:

$$s_{ii} = 1 \wedge s_{ij} = 1 \rightarrow ij = \arg \min_{i \leq j \leq n} c_{ji} \quad \forall i, j = \overline{1, n};$$

- each of the terminals of the network j has a direct connection with the center $s_{1j} = 1 \rightarrow s_{1j} = 1$;

- the number of terminals in the network is in the range $1 \leq \sum_{i=1}^n s_{ii} \leq n/2$;

- the total number of direct links in the three-level network structure is equal to $\sum_{j=1}^n \sum_{i=j}^n s_{ij} = n + \sum_{i=1}^n s_{ii}$.

Formally set of permissible variants of network constructing can be shown in this form:

$$S = \{s\} = \begin{cases} [s_{ij}], s_{ij} \in \{0, 1\}, i, j = \overline{1, n}, s_{11} = 1; \\ \sum_{i=j}^n s_{ij} \geq 1, \forall j = \overline{1, n}; \\ \sum_{j=1}^n \sum_{i=j}^n s_{ij} = n + \sum_{i=1}^n s_{ii}; \\ s_{ii} = 1 \rightarrow s_{11} = 1 \quad \forall i = \overline{1, n}; \\ s_{ii} = 1 \wedge s_{ij} = 1 \rightarrow ij = \arg \min_{i \leq j \leq n} c_{ji} \quad \forall i, j = \overline{1, n}. \end{cases} \quad (10)$$

Target Function for reengineering of logistics network in the above designations may be shown in the form:

It is considered that the cost of modernization, dismantling and the cost of reused resources do not exceed the expenses of new terminals and the sale of transportation between the elements of the network:

$$e_i < c_i, \quad d_i < c_i, \quad g_i < c_i, \quad i = \overline{1, n}; \\ e_{ij} < c_{ij}, \quad d_{ij} < c_{ij}, \quad g_{ij} < c_{ij}, \quad i, j = \overline{1, n}. \quad (12)$$

Given the desire to minimize the maximum time of delivery of goods to consumers, the criterion of maximizing speed can be submitted in the form of:

$$k_2(s) = \tau(s) = \tau_{PT}(s) + \tau_T(s) + \tau_{TS}(s) \rightarrow \min_{s \in S^*}, \quad (13)$$

where $\tau_{PT}(s)$ – maximum time of transportation of goods from the center of production to terminals; $\tau_T(s)$ – maximum goods handling time in terminals; $\tau_{TS}(s)$ – maximum time for delivery of goods from terminals to consumers C_{TS} .

Determination of weight coefficients of model (9) is proposed using technology of comparator identification of advantages of decision-making person [26].

In practice, for some types of cargo, the change in delivery time (13) $\tau(s)$ is uncritical when changing the options for building a logistics network. Based on this, the two-criterion task (10) - (11), (13) is reduced to single-criterion (10) - (11) with an additional restriction on the maximum delivery time of the cargo:

$$\max_{2 < i \leq n} \tau_i(s) \leq \tau^*, \quad (14)$$

where $\tau_i(s)$ – time of delivery goods to the i -th consumer; τ^* – permissible time of goods delivery.

Analysis of the reported expenditure (11) provides the following conclusions.

If reengineering results in a topological structure that does not contain terminals and connections of a previously existing network, it requires maximum additional costs ΔC . Such a topological structure can be obtained by solving a traditional network design problem. In this case, the cost function of the number of terminals in the network $\Delta C(l)$ is unimodal [28–29].

In the general case of reengineering, the cost function of the number of nodes $\Delta C(l)$ can be multi-extreme. Analysis of the components of the function (11) showed that the most significant are the costs of delivering goods between elements of the network. At the same time, in the process of reengineering, situations are possible when different parts of the existing topological structure are used with a change in the number of terminals $1 \leq l \leq n/2$ at each step, which leads to the appearance of local extremes in the function determination interval (11).

The delivery time of the goods $\tau(l)$, which is determined by the ratio (13), increases with the number of terminals $1 \leq l \leq n/2$. To solve the problem of reengineering the topological structure, it is necessary to use methods that allow you to obtain effective solutions taking into account the monotonicity of the function $\tau(l)$ (13) and the multi-extremity of the cost function (11) depending on the number of terminals in the network $1 < l \leq n/2$.

Total number of topological network reengineering options for number of terminals $1 < l \leq n/2$ is:

$$N(n) = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^n C_n^l = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^n \frac{n!}{l!(n-l)!} = 2^n / 2, \quad (15)$$

where n – number of possible locations of terminals (system elements).

The solution of the problem by the method of complete search of all possible options for building a network for the number of consumers $n > 50$ is impractical due to the high time complexity of such a method.

To simplify the procedure for finding a global optimal solution of the problem (10) - (11) we use the idea of a method of directed variance proposed for reengineering of territorially distributed objects in the work [28]. Its essence lies in the previous definition of the boundaries of the number of network terminals $l_{min} \leq l \leq l_{max}$, which guaranteed corresponds to the optimal solution of the problem. As the lower limit of the number of terminals, we choose $l_{min} = 1$, that corresponds to the hypothetical situation when the only terminal is located on the territory of the manufacturer. To determine the upper limit, it is necessary to determine the minimum of maximum additional costs (11):

$$\Delta C_{max}(s, l) \rightarrow \min_{s, l}. \quad (16)$$

With this aim, it is necessary to solve the problem of synthesis of optimal topology of the network (10) – (11) without taking into account existing terminals. Search for optimal task solution is offered to be carried out on a segment $1 \leq l \leq l_{max}$, by changing the number of network terminals by rule $l := l + 1$.

Thus, to solve the problem by the proposed method, it is necessary to find solutions of two auxiliary tasks to find a minimum of maximum expenses and search for a minimum additional cost of reengineering. Each of the tasks has approximately the same computing complexity as a classical problem of propyling the topological structure. In view of this, the timing of the proposed method has an order $2O[t(n)]$ (where $t(n)$ is the timing of the method of solving the classical problem of structural and topological optimization).

The accuracy of the proposed method is determined by the accuracy of methods for solving problems determining the number of terminals and places of their placement.

In order to implement a directional selection of options for optimizing the placement of terminals, we use a coordinatewise optimization method (COM) and an evolutionary method built on the basis of a genetic algorithm (EM-GA).

Coordinatewise optimization method (COM) [28, 29]. The essence of the method is to improve the initial variant of the network by alternating optimization of places of possible location of one terminal in fixed placed. This procedure is cyclically repeated until the local extrema of the target function is reached (11).

Algorithm

1. Incoming data settings: a set of places for possible terminal locations; number of terminals $l := 1$; index of the current terminal – $j := 1$; current iteration value –

$i := 0$; the value of the full pass count for all network elements u ; an initial value for the best arrangement of the terminals w^o ; best current criterion value $\Delta C(w_i^u) := \infty$.

2. To form an initial version of placement of terminals w_i^u , distribute consumers between terminals for the minimum transportation costs $i, j = \arg \min_{i \leq j \leq n} c_{ji} \quad \forall i, j = 1, n$ and calculate the value of the criterion $\Delta C(w_i^u)$ (11).

3. Increase the value of the meter of iterations $i := i + 1$; for a terminal j at w_i^u to change its location at fixed terminal $l-1$ placement.

4. Calculate the value of the criterion $\Delta C(w_i^u)$ (11). If $\Delta C(w_i^u) \leq \Delta C(w_{i-1}^u)$, to save $\Delta C(w^u) := \Delta C(w_i^u)$, $w^o := w_i^u$ and go to step 5.

5. Increase the index of the current terminal $j := j + 1$. If $j < l$, go to step 3, otherwise go to step 6.

6. If $u = 0$, to save $w_i^{u+1} := w_i^u$, $u := u + 1$, $j := 1$ and go to step 3, otherwise - to step 7.

7. If $\Delta C(w^u) \leq \Delta C(w^{u-1})$, to save $w_i^{u+1} := w_i^u$, $u := u + 1$, $j := 1$ and go to step 3, otherwise - to step 8.

8. End of the algorithm operation: a decision was made to place terminals w^o with the minimum of the considered cost values $\Delta C(w^o)$.

Evolutionary method based on genetic algorithm (EM-GA). This method iteratively implements

the procedures of inheritance, mutation, selection, crossover [29-30]. Each chromosome of the genetic algorithm displays a plurality of terminal w_i locations on the iteration i . The terminal index code is used as the gene, and the function is used as the adaptability function (11).

Algorithm

1. Incoming data settings: a set of possible locations of terminals; chromosome population size; probability of mutation p ; number of iterations (populations) $i := 0$; the quantities of iterations i^* ; the best current criterion value $\Delta C(w_i) := \infty$.

2. Transition to next iteration $i := i + 1$. Population formation.

3. Calculate the value of the adaptability function (11) for all chromosomes of the population and choose the best chromosome by the minimum value of the adaptability function $\Delta C(w_i)$; $w^o := w_i$.

4. If $\Delta C(w_{i-1}) > \Delta C(w_i)$, then $w^o := w_i$.

5. If $i \geq i^*$, then go to step 9, otherwise go to step 6.

6. Chromosome selection.

7. Perform crossing operations and (with a given probability) mutation.

8. Form a new population and go to step 3.

9. End of algorithm operation: the decision to locate terminals with minimum cost considered w^o with the minimum of the considered cost values $\Delta C(w^o)$.

The results of the experimental study of accuracy and time of solving problems of optimization of topological structures of logistics networks with the number of elements $n = 15 \div 40$ are given in table 1.

Table 1. Results of experimental research of methods

Dimension of the task, n	Relative error of the decision, $\delta C(n)$, %		Time to solve the problem, $t(n)$, c	
	COM	EN-GA	COM	EN-GA
15	0.17	1.86	0.52	0.22
20	0.32	2.54	3.03	0.71
25	0.56	3.12	5.24	1.86
30	0.72	3.61	11.86	3.91
35	0.88	4.81	21.35	8.13
40	0.99	6.84	35.26	14.01
Average value	0.61	3.86	12.88	4.81

In order to predict the assessments of the proposed methods in solving large-size tasks, approximation of data in table 1 is carried out.

Functions of errors for the proposed modifications of the method of directional selection of options are approximated by polynomials with reliability R^2 :

- COM: $\delta C(n) = 0.0339n + 0.3268$, $R^2 = 0.9892$;

- EN-GA: $\delta C(n) = 0.0066n^2 - 0.1786n + 3.2418$; $R^2 = 0.9823$.

The functions of time complexity for the proposed modifications of the method of directed variants are approximated by polynomials with reliability R^2 :

- COM: $t(n) = 0.0615n^2 - 2.0388n + 17.939$, $R^2 = 0.9969$;

– EN-GA: $\delta C(n) = 0.028n^2 - 0.0083n + 9.2995$;
 $R^2 = 0.9966$.

Approximations obtained according to table 1 data 1, allow to choose a more effective modification of the method for solving practical problems of large dimension, based on the necessary accuracy, available computing and time resources.

The method based on coordinate optimization procedure COM has substantially higher accuracy, but it is more complex from a computing point of view. The accuracy of the evolutionary method based on the genetic EN-GA algorithm can be increased by increasing the number of iterations.

Conclusions

As a result of the study, the state of the problem of optimization of global and local transportation routes in macro and micro logistics in systems of ecological and reversing logistics is analyzed. It is established that the tasks of direct and reversing logistics are considered as conditionally independent, which does not allow to receive effective global solutions as a whole. In addition, because of the emergence of new consumers, the change in delivery volumes, the introduction of environmental restrictions there is a need to re-engine the logistics networks, which provides for their radical redevelopment. As a result of decomposition, problems are allocated tasks that require the development of new mathematical models and effective methods for solving their solutions.

References

1. Bowersox, D., Kloss, D. (2017), *Logistics: An Integrated Supply Chain. 2nd ed.* [Logistika: integrirovannaya tsep' postavok. 2-ye izd.] / Translate from English N. N. Baryshnikova, B.S. Pinsker, Moscow : Publishing house "Olimp-Business, 640 p.
2. Govindan, K., Fattahi, M., Keyvanshokoo, E. (2017), "Supply chain network design under uncertainty: A comprehensive review and future research directions", *European Journal of Operational Research*, Vol. 263, P. 108–141.
3. Pascual Cortés Pellicer, Faustino Alarcón Valero (2018), "Identification of Reverse Logistics Decision Types from Mathematical Models", *Journal of Industrial Engineering and Management*, No. 11 (2), P. 239–249.
4. Kannan Govindan, Hamed Soleimani, Devika Kannan (2015), "Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future", *European Journal of Operation Research*, Vol. 240, Issue 3, P. 603–626.
5. Petrov, E. G., Pisklakova, V. P., Beskorovainyi, V. V. (1992), *Geographically distributed service systems [Territorial'no raspredelennyye sistemy obsluzhivaniya]*, Kyiv : Tekhnika, 208 p.
6. Beskorovainyi, V. V. (2002), "Systemological analysis of the problem of structural synthesis of geographically distributed systems" ["Sistemologicheskii analiz problemy strukturnogo sinteza territorial'no raspredelennykh sistem"], *Automated control systems and automation devices*, Issue 120, P. 29–37.
7. Smirnov, I. G., Kosareva, T. V. (2013), *Transport logistics [Transportna lohistyka]*, Kyiv : CUL, 224 p.
8. Iastremska, O. (2018), "Logistics at an enterprise: the peculiarities of procurement activities", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (5), P. 141–148. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2018.5.141>
9. Morozov, O. (2018), "Methods of forming of a hierarchical system of warehouses for servicing geographically dispersed consumers", *Control, navigation and communication systems*, No. 5 (51), P. 98–101. DOI: <https://10.26906/SUNZ.2018.5.09>
10. Hurch, L., Khmara, L. (2014), "Development of "green logistics" in Ukraine" ["Rozvytok "zelenoyi lohistyky" v Ukraini", *Bulletin of Lviv Polytechnic National University, Logistics*, No. 811, P. 86–91.
11. Chortok, Y. (2007), "Directions to reduce the negative ecological and economic impact of the logistics system" ["Napryamky znyzhennya nehatyvnoho ekoloho-ekonomichnoho vplyvu lohistychnoyi systemy"], *The mechanism of regulation of the economy*, No. 3, P. 165–172.
12. Pollock, W. K. (2008), "10 Rules for Successful Reverse Logistics Operations", *Reverse Logistics Magazine*, P. 22–26.
13. Pollock, B., Dutta, S. (2016), "Driving Returns in the Reverse Logistics Service Chain", *Reverse Logistics Magazine*, Edition 16, P. 26–29.
14. Dyckhoff, H., Lackes, R., Reese, J. (2003), *Supply Chain Management and Reverse Logistics*, Berlin : Springer, 426 p.
15. Norek, C. D. (2002), "Return management: making order out of chaos", *Supply Chain Management Review*, Vol. 6, No. 3, P. 34–42.
16. Lazarev, V., Kul'kova, Y. (2014), "Reverse logistics – the logistics of return and reverse flows" ["Reversivnaya logistika – logistika vozvratnykh i obratnykh potokov"], *Manager*, No. 5 (51), P. 48–51.

17. Pavlova, E., Mamedova, I. (2015), "Return commodity flows in logistics: causal relationships" ["Vozvratnye tovaropotoki v logistike: prichinnye svyazi"], *World of transport*, Vol. 13, No. 5, P. 124–131.
18. Beskorovainyi, V., Kuropatenko, O., Gobov, D. (2019), "Optimization of transportation routes in a closed logistics system", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (10), P. 24–32. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.10.024>
19. Beskorovainyy, V., Imangulova, Z., Petrova, A. (2012), "Optimization of the number and location of distribution centers of the transport and storage system" ["Optimizatsiya kolichestva i mestopolozheniya raspredelitel'nykh tseftrov transportno-skladskoy sistemy"], *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, No. 5/3 (59), P. 24–28.
20. Beskorovainyi, V. V. (2004), "Method of structural-topological optimization for reengineering of geographically distributed objects" ["Metod strukturno-topologicheskoy optimizatsii dlya reinzhiniringa territorial'no raspredelennykh ob'yektov"], *Information processing systems*, Vol. 4, P. 26–33.
21. Prokopenkov, V., Kozhin, Y., Malykh, O. (2019), "Determination of the optimal circular route passing through the given set of points on the map", *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, No. 1 (7), P. 102–112. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.7.102>
22. Rogatkin, A., Zakharkina, M. (2016), "Optimization of motor transport routes: heuristic algorithms and the practice of logistics management" ["Optimizatsiya avtotransportnykh marshrutov: evristicheskie algoritmy i praktika logisticheskogo menedzhmenta"], *Moscow University Bulletin*, No. 1, P. 124–135.
23. Greco, S., Ehr Gott, M., Figueira, J. R. (2016), *Multiple Criteria Decision Analysis – State of the Art Surveys*, New York : USA, Springer, 1346 p.
24. Abbas Mardani, Ahmad Jusoh, Khalil MD Nor, Zainab Khalifah, Norhayati Zakwan and Alireza Valipour (2015), "Multiple criteria decision-making techniques and their applications – a review of the literature from 2000 to 2014", *Economic Research*, Vol. 28, No. 1, P. 516–571. DOI: <https://doi.org/10.1080/1331677X.2015.1075139>
25. Kosenko, V., Gopejenko, V., Persiyanova, E. (2019), "Models and applied information technology for supply logistics in the context of demand swings", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (7), P. 59–68. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.7.059>
26. Beskorovainyi, V. (2017), "Parametric synthesis of models for multicriterial estimation of technological systems", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (2), P. 5–11. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.2.005>
27. Beskorovainyi, V., Berezovskiy, H. (2017), "Identification of preferences in decision support systems", *ECONTECHMOD*, Vol. 06, No. 4, P. 15–20.
28. Beskorovainyi, V. V. (2004), "The method of structural and topological optimization for the reengineering of geographically distributed objects" ["Metod strukturno-topologicheskoy optimizatsii dlya reinzhiniringa territorial'no raspredelennykh ob'yektov"], *Information processing systems*, Vol. 4, P. 26–33.
29. Beskorovainyi, V. V., Podolyaka, K. E. (2015), "Modifications of the directed search method for reengineering the topological structures of large-scale monitoring systems" ["Modifikatsii metoda napravlenogo perebora dlya reinzhiniringa topologicheskikh struktur sistem krupnomasshtabnogo monitoringa"], *Radio electronics and informatics*, No. 3 (70), P. 55–62.
30. Beasley, J. E., Chu, P. C. (1996), "A genetic algorithm for the set covering problem", *European Journal of Operational Research*, No. 96 (2), P. 392–404.

Received 15.02.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Безкоровайний Володимир Валентинович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри системотехніки, Харків, Україна; email: vladimir.beskorovainyi@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7930-3984>.

Бескоровайный Владимир Валентинович – доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, профессор кафедры системотехники, Харьков, Украина.

Beskorovainyi Vladimir – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor of the Department of System Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Судік Антоній Олегович – Харківський національний університет радіоелектроніки, магістрант кафедри системотехніки, Харків, Україна; email: antonii.sudik@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5222-9419>.

Судик Антоний Олегович – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, магистрант кафедры системотехники, Харьков, Украина.

Sudik Antonii – Kharkiv National University of Radio Electronics, Master's Degree Candidate of the Department of System Engineering, Kharkiv, Ukraine.

ОПТИМІЗАЦІЯ ТОПОЛОГІЧНИХ СТРУКТУР ЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ ЛОГІСТИЧНИХ МЕРЕЖ У ПРОЦЕСІ РЕІНЖІНІРИНГУ

Предметом дослідження в статті є топологічні структури мереж замкнутої логістики. **Мета** роботи – створення математичної моделі та методів вирішення завдань оптимізації топологічних структур централізованих логістичних мереж у процесі їхнього реінжинірингу з урахуванням множини топологічних і функціональних обмежень. У статті вирішуються наступні **завдання**: аналіз сучасного стану проблеми системної оптимізації логістичних мереж та методів її вирішення; формалізація проблеми системної оптимізації логістичних мереж як територіально розподілених об'єктів; розробка математичної моделі задачі оптимізації централізованих тривірневих топологічних структур логістичних мереж на етапі реінжинірингу; розробка методу розв'язання задачі реінжинірингу топологічних структур централізованих тривірневих

логістичних мереж; оцінка часової складності методу оптимізації централізованих трирівневих топологічних структур логістичних мереж. Використовуються такі **методи**: методи теорії систем, методи теорії корисності, оптимізації та дослідження операцій. Отримані такі **результати**: виконано аналіз сучасного стану проблеми системної оптимізації логістичних мереж та методів її вирішення; виконано формалізацію проблеми системної оптимізації логістичних мереж як територіально розподілених об'єктів; розроблено математичну модель задачі реінжинірингу трирівневих топологічних структур логістичних мереж за показниками витрат та оперативності для випадку об'єднаних пунктів виробництва і переробки; розроблено методи спрямованого перебору варіантів побудови логістичної мережі, які використовують процедури покоординатної оптимізації та моделювання еволюції на основі генетичного алгоритму; отримано оцінки точності та часової складності методів оптимізації централізованих трирівневих топологічних структур логістичних мереж. **Висновки**: За результатами дослідження запропонованих методів розв'язання задачі виконано апроксимацію показників їхньої точності та часової складності. На практиці це дозволить обирати більш ефективний метод для розв'язання практичних задач великої розмірності, виходячи з необхідної точності, наявних обчислювальних і часових ресурсів. Метод на основі процедури покоординатної оптимізації має суттєво вищу точність, проте він є більш складним з обчислювальної точки зору. Точність еволюційного методу на основі генетичного алгоритму може бути підвищена шляхом збільшення кількості ітерацій. Практичне використання запропонованих математичної моделі і методів реінжинірингу топологічних структур централізованих мереж замкнутої логістики за рахунок спільного розв'язання задач для прямих і зворотних потоків дозволить скорочувати витрати на реалізацію транспортної діяльності компаній.

Ключові слова: замкнена логістика; логістична мережа; оптимізація; реінжиніринг; структура; топологія.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ ЛОГИСТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ В ПРОЦЕССЕ РЕИНЖИНИРИНГА

Предметом исследования в статье является топологические структуры сетей замкнутой логистики. **Цель** работы – создание математической модели и методов решения задач оптимизации топологических структур централизованных логистических сетей в процессе их реинжиниринга с учетом множества топологических и функциональных ограничений. В статье решаются следующие **задачи**: анализ современного состояния проблемы системной оптимизации логистических сетей и методов ее решения; формализация проблемы системной оптимизации логистических сетей как территориально распределенных объектов; разработка математической модели задачи оптимизации централизованных трехуровневых топологических структур логистических сетей на этапе реинжиниринга; разработка метода решения задачи реинжиниринга топологических структур централизованных трехуровневых топологических структур логистических сетей; оценка временной сложности метода оптимизации централизованных трехуровневых топологических структур логистических сетей. Используются следующие **методы**: методы теории систем, методы теории полезности, оптимизации и исследования операций. Получены следующие **результаты**: выполнен анализ современного состояния проблемы системной оптимизации логистических сетей и методов ее решения; выполнена формализация проблемы системной оптимизации логистических сетей как территориально распределенных объектов; разработана математическая модель задачи реинжиниринга трехуровневых топологических структур логистических сетей по показателям затрат и оперативности для случая объединенных пунктов производства и переработки; разработаны методы направленного перебора вариантов построения логистической сети, которые используют процедуры покоординатной оптимизации и моделирования эволюции на основе генетического алгоритма; получены оценки точности и временной сложности методов оптимизации централизованных трехуровневых топологических структур логистических сетей. **Выводы**: По результатам исследования предложенных методов решения задачи выполнены аппроксимация показателей их точности и временной сложности. На практике это позволит выбирать более эффективный метод для решения практических задач большой размерности, исходя из требуемой точности, имеющихся вычислительных и временных ресурсов. Метод на основе процедуры покоординатной оптимизации имеет существенно более высокую точность, однако он является более сложным с вычислительной точки зрения. Точность эволюционного метода на основе генетического алгоритма может быть повышена путем увеличения количества итераций. Практическое использование предложенных математической модели и методов реинжиниринга топологических структур централизованных сетей замкнутой логистики за счет совместного решения задач для прямых и обратных потоков позволит сокращать расходы на реализацию транспортной деятельности компаний.

Ключевые слова: замкнутая логистика; логистическая сеть; оптимизация; реинжиниринг; структура; топологія.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Безкоровайний В. В., Судік А. О. Оптимізація топологічних структур централізованих логістичних мереж у процесі реінжинірингу. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 1 (15). С. 23–31. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.023>

Beskorovainyi, V., Sudik, A. (2021), "Optimization of topological structures of centralized logistics networks in the process of reengineering", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (15), P. 23–31. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.023>

Л. С. Гур'янова, О. В. Панасенко, С. М. Вознюк

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ І МОДЕЛЮВАННЯ РИНКУ ОСВІТНІХ ПОСЛУГ

Предметом дослідження є комплекс моделей системного аналізу ринку освітніх послуг. **Мета** роботи – розробка комплексу моделей системного аналізу ринку освітніх послуг України, що дозволяють оцінити стан регіональних сегментів ринку; виділити сегменти, найбільш чутливі до скорочення мережі освітніх закладів; оцінити конкурентоспроможність освітніх послуг на зовнішньому ринку; визначити найбільш привабливі сегменти зовнішнього ринку. В статті вирішуються наступні **завдання**: розробити моделі класифікації регіонів за рівнем розвитку системи освіти; моделі комплексної оцінки рівня розвитку системи освіти, що дозволяють оцінити позиції України в порівнянні з європейськими країнами; розробити моделі класифікації зовнішніх сегментів ринку за рівнем привабливості для просування освітніх послуг ВНЗ України в контексті експортно орієнтованої моделі розвитку. Використовуються такі **методи**: системний аналіз - для опису об'єкта дослідження, концептуального підходу та комплексу розв'язуваних завдань; кластерний аналіз - для побудови моделей класифікації; методи таксономії, метод оцінювання рівня розвитку - для побудови рейтингової оцінки позиції України на ринку освітніх послуг. Отримано наступні **результати**: розроблено угруповання регіонів України за рівнем розвитку системи освіти, виділені "опорні" для формування мережі освітніх закладів регіони; запропонована система рейтингової оцінки країн на ринку освітніх послуг; виділені найбільш привабливі для просування освітніх послуг ВНЗ України зовнішні сегменти ринку. **Висновки**: реалізація моделей дозволила зробити висновок, що склад "опорних" для формування мережі освітніх закладів регіонів включає такі регіони, як м. Київ, Харківську, Одеську, Запорізьку, Львівську, Дніпропетровську області. Освітні послуги ВНЗ цих регіонів користуються найвищим попитом, проте ці ж регіони є найбільш уразливими до фази спаду ринку. Аналіз "заміщуючого" ефекту дозволив зробити висновок, що Україна характеризується високою рейтинговою оцінкою рівня розвитку системи освіти в порівнянні з європейськими країнами. В контексті експортно орієнтованої моделі розвитку виділені привабливі для України зовнішні сегменти ринку.

Ключові слова: освіта; освітні послуги; ринок освітніх послуг; системний аналіз; моделювання; кластерний аналіз; таксономічний показник

Вступ

Сучасний ринок освітніх послуг знаходиться в стадії активної трансформації, що пов'язано як з об'єктивно сформованими тенденціями зміни спектра вимог до змісту і технологій освоєння освітніх програм, так і зміною державних концепцій моделей розвитку системи освіти і, зокрема, системи вищої освіти.

В якості об'єктивно сформованої довгострокової тенденції розвитку ринку освітніх послуг можна виділити зростання попиту на дистанційну освіту, цифрові форми освіти. Цю тенденцію обумовлює цілий ряд причин, основними з яких є наступні:

- дистанційна освіта дозволяє провести ефективну адаптацію програми під потреби конкретних людей, персоніфікацію освітньої програми; не має обмежень в швидкості проходження і модульному наповненні програми; дозволяє вивчати окремі актуальні модулі програми; дає можливість реалізувати індивідуальну траєкторію навчання;

- дистанційна освіта приблизно в 4 рази дешевше за вартістю в порівнянні з очними формами навчання. Так, в Гарвардській он-лайн школі, в якій навчаються близько 2 000 аспірантів і 13 000 студентів, вартість навчання за 4 роки навчання обходиться дешевше, ніж за 1 рік он-лайн навчання. Таке здешевлення вартості освітніх програм є серйозним аргументом на користь вибору цифрових університетів для навчання, оскільки заборгованість по студентських кредитах в США перевищує 1,45 трн. дол. і близько 20% позичальників не в змозі погасити кредити [1]. Слід зазначити, що норма рентабельності інвестицій в освіту по країнах ОЕСР (на дану групу країн припадає понад 60% світового ВВП) становить близько 7%, а

період окупності – більше 14 років. В умовах нестабільного зовнішнього економічного середовища все більша кількість потенційних студентів замислюються про доцільність отримання вищої освіти і взяття кредиту на оплату навчання.

Таким чином, цифрові університети становлять все більш серйозну конкуренцію для класичних університетів. Наприклад, за прогнозами в найближчі 10-20 років будуть закриті понад 50% класичних університетів. Зниження попиту на освіту вже призвело до 10% скорочення університетів в Індії [1-2]. У цих умовах національні регулятори систем освіти починають приділяти все більшу увагу цифровим університетам. На даний момент можна виділити наступні базові моделі їх розвитку: розвиток масових он-лайн платформ, які формують інфраструктуру, зокрема, для класичних університетів; корпоративні цифрові університети, які активно розвиваються в рамках ІТ-компаній. Необхідно сказати, що велика увага в сучасних умовах приділяється стратегії інтеграції класичних і цифрових університетів, яка передбачає вибір одного з 3-х базових варіантів стратегії: стратегія 1 - покупка або злиття (поглинання); стратегія 2 - розвиток власної платформи; стратегія 3 - партнерська стратегія, спрямована на створення еко-системи на базі обміну цифровими сервісами і контентом [2-3].

Форма цифрового університету розглядається в якості можливого вектора інституційних перетворень і в Стратегії розвитку вищої освіти в Україні на 2021-2031 рр. [4], поряд з дослідними університетами, класичними університетами, корпоративними університетами і "клубами вищої освіти". На даний момент переважна кількість університетів України дотримуються комбінованої стратегії інтеграції, що

включає елементи стратегії розвитку власної платформи і інтеграції з корпоративними цифровими університетами.

Ще одним чітко вираженим трендом трансформації ринку освітніх послуг України є модифікація інституційного середовища, ініційована національним регулятором. Необхідність такої трансформації викликана негативними

демографічними процесами, зростанням соціального навантаження на бюджетну систему України. Зокрема, як зазначає Міністр соціальної політики Марина Лазебна [5], Україна входить в топ-15 країн світу з найбільш високими темпами скорочення населення за даними ООН. Тільки міграційний відтік населення за останні 10 років оцінюється на рівні 4 млн. чоловік - 10% населення (рис. 1).

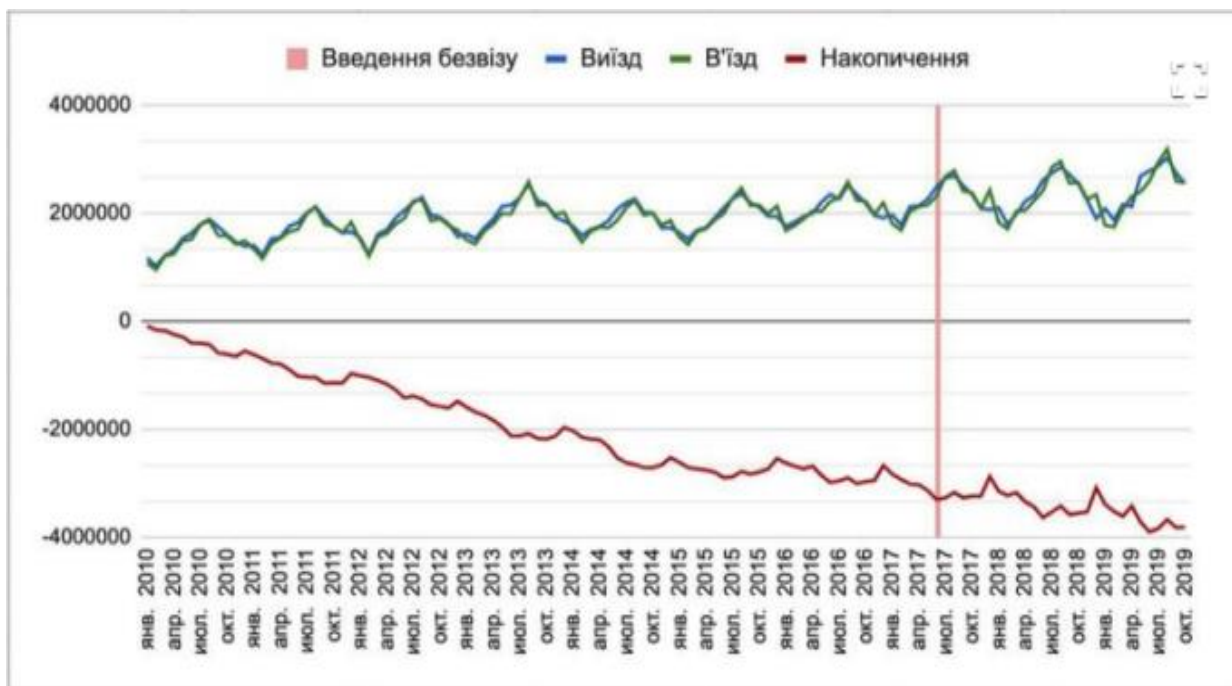


Рис. 1. Динаміка міграційного потоку, 2010-2019 рр.
Джерело: [6]

Депопуляція населення не може не впливати на ринок освітніх послуг. Як зазначено в Стратегії розвитку вищої освіти в Україні на 2021-2031 рр. [4], щільність мережі університетів в Україні є однією з найбільш високих - на 1 млн. населення припадає 6,7 університетів і 8 коледжів, технікумів, училищ. Більш висока щільність спостерігається тільки в Польщі - 9,2 університету. У країнах з високим рівнем розвитку, наприклад, Німеччині і Великобританії, цей індикатор значно нижче і становить 4,3 і 3,7 університету відповідно. При цьому фінансова модель розвитку системи вищої освіти в Польщі та Великобританії, орієнтована на потоки іноземних студентів, в якості базового елементу розглядає приватні університети, питома вага яких в загальній структурі становить 61,9% і 78,2% відповідно. В якості альтернативної стратегії можна навести приклад моделі фінансового розвитку системи вищої освіти в Німеччині: питома вага приватних університетів становить лише 33,7%.

Іншими словами, розглядаючи індикатори розвинених ринків в якості можливих індикативних значень, слід сказати, що кількість університетів в Україні в рамках прийнятої інституційної реформи може бути найближчим часом скорочена в 2 рази. Наслідки інституційних реформ вплинуть на ситуацію на ринках праці, рівень безробіття, якість трудового потенціалу в системі вищої освіти в силу мобільності населення, селекції та міграційної активності

найбільш кваліфікованих кадрів, рівень доступності вищої освіти, що буде супроводжуватися подальшими втратами в економічному зростанні, і "стисненням" економічного і соціального сектора. В силу цього актуальною дослідницькою задачею є системний аналіз і моделювання ринку освітніх послуг в контексті оцінки наслідків інституційних реформ і виявлення потенціалу адаптації системи освіти для забезпечення сталого розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Результати дослідження ринку освітніх послуг розглянуті в багатьох наукових виданнях. Робота [7] присвячена сегментації ринку освітніх послуг в Україні, а також аналізу факторів, що визначають ємність сегментів ринку. Дослідження, проведені в [8], націлені на порівняльний аналіз моделей фінансового розвитку системи освіти, піднімають питання недофінансування системи освіти. В роботі [9] розглядаються особливості маркетингової стратегії на ринку освітніх послуг. Стаття [10] присвячена аналізу можливостей застосування когнітивного моделювання для оцінки факторів, що впливають на попит на ринку освітніх послуг. В цілому необхідно сказати, що сучасні дослідження великої кількості українських авторів мають чітко виражений

маркетинговий акцент, що відображає постійно зростаючу конкуренцію за абітурієнта між освітніми закладами в умовах кризових демографічних трендів, глобальної конкуренції і ліберальної моделі розвитку економіки. Незважаючи на те, що університети де-юре є неприбутковими організаціями, основні цілі яких сконцентровані в соціальній площині і спрямовані на забезпечення високої якості освітніх послуг, доступності освіти, де-факто, проблеми з недофінансуванням, високим рівнем тіньової економіки та низькою наповнюваністю бюджету, зниження рівня доходів населення і платоспроможного попиту, призводять до все більш сильного домінування принципів конкурентного управління.

Посилення конкуренції в умовах глобального ринку нерозривно пов'язане з питаннями адаптації систем освіти та підвищення якості освітніх послуг. Так, питання адаптації національних систем освіти в умовах глобального ринку і діджиталізації розглядаються в роботі [11]. Виділено найбільш перспективні цифрові інструменти управління процесом освіти, що дозволяють підвищити конкурентоспроможність освітніх закладів. Стаття [12] присвячена розробці комплексу моделей панельних даних, що дозволяють провести оцінку віддачі витрат на освіту. Моделювання різних аспектів поєднання навчання з роботою на основі техніки аналізу панельних даних присвячена публікація [13]. В цілому зроблено висновок про негативний вплив кількості робочих годин на результати навчання, особливо в сфері вищої освіти. Моделювання впливу рівня доступності освіти на інтенсивність використання інтернету і розвиток цифрової економіки за допомогою методів пробіт-, логіт-аналізу проводиться в [14]. Проведені дослідження показали, що нерівномірність розвитку систем освіти тягне за собою чітко виражену поляризацію в цифровому і економічному розвитку. Ключові фактори, що визначають поведінкові аспекти на ринку освіти в країнах з високим і низьким рівнем розвитку, аналізуються в [15]. Здійснено аналіз диференціації факторів, що обумовлюють прийняття рішення про отримання вищої освіти на ринках з високим і низьким рівнем розвитку. В роботі [16] досліджуються підходи до моделювання оцінки ступеня задоволеності студентів контентом навчальної системи, що дозволяють здійснювати ефективну адміністрацію курсу. Таким чином, основним фокусом дослідження в даний час є розробка ефективних систем моніторингу ступеня задоволеності процесом навчання і оптимального вибору цифрових інструментів, що дозволяють підвищити якість, ефективність освітнього процесу та конкурентоспроможність освітньої послуги. Велика кількість робіт вчених країн з ринками, що розвиваються, системи освіти яких зазнають суттєвої трансформації, зачіпають різні аспекти пошуку оптимальної моделі розвитку з урахуванням демографічних, економічних і ін. чинників. Зокрема, максимальна кількість годин роботи студентів, яка

регламентується законодавчими обмеженнями, характеризується істотною диференціацією для країн різних груп.

Відзначаючи безумовну ефективність підходів, представлених в сучасних наукових роботах, слід зазначити, що недостатньо повно розглянуті питання системного аналізу і моделювання ринку освітніх послуг в контексті оцінки наслідків реформ системи освіти, спрямованих на оптимізацію мережі освітніх закладів, і оцінку потенціалу адаптації системи освіти.

Мета роботи. Метою роботи є розробка комплексу моделей системного аналізу ринку освітніх послуг України, що дозволяють оцінити стан регіональних сегментів ринку; виділити сегменти, найбільш чутливі до скорочення мережі освітніх закладів; оцінити конкурентоспроможність освітніх послуг на зовнішньому ринку; визначити найбільш привабливі сегменти зовнішнього ринку.

Методи дослідження

Пропонований концептуальний підхід до побудови комплексу моделей системного аналізу ринку освітніх послуг включає наступні основні модулі: *модуль 1* - побудова моделі класифікації регіональних сегментів ринку освітніх послуг за рівнем розвитку; *модуль 2* - побудова моделі комплексної оцінки якості освіти в Україні; *модуль 3* - сегментація зарубіжних ринків освітніх послуг за рівнем привабливості. Далі розглядається їх зміст.

Цільовою спрямованістю *першого модуля* є побудова моделі класифікації регіональних сегментів ринку освітніх послуг (регіонів) за рівнем розвитку системи освіти. Класифікація полягає в розбитті вихідної сукупності регіонів на порівняно невелику кількість класів $Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_l\}$ таким чином, щоб регіони, що належать одному класу (групі) перебували б на відносно невеликих відстанях один від одного. Для побудови угруповання застосовуються ієрархічні агломеративні і ітеративні методи кластерного аналізу [17-18]. Ієрархічні агломеративні методи дають лише умовно-оптимальне рішення в деякій підмножині локальних розбиттів (кластерів). Однак перевагою цих методів є простота обчислень та інтерпретації отриманих результатів. Сутність ієрархічних агломеративних методів полягає в тому, що на першому етапі кожен об'єкт вибірки розглядається як окремий кластер. Процес об'єднання кластерів відбувається послідовно: на підставі матриці відстаней або матриці подібності об'єднуються найбільш близькі об'єкти. Результати кластеризації, представлені у вигляді дендрограми, дозволяють вибрати число кластерів, при якому сумарна міжгрупова дисперсія буде приймати максимальне значення. Це число кластерів використовується для підбору початкових умов ітераційного алгоритму методу "к-середніх" [19].

Алгоритм методу "к-середніх" включає такі основні кроки: з n регіонів досліджуваної сукупності відбираються випадковим чином або задаються дослідником виходячи з будь-яких апіорних

міркувань k точок (регіонів). Ці точки приймаються за еталони; кожному еталону присвоюється порядковий номер, який одночасно є і номером кластера; з решти $(n-k)$ регіонів витягується точка X_i с координатами (x_{i1}, \dots, x_{im}) і перевіряється, до якого з еталонів (центрів) вона знаходиться найближче. Регіон, що перевіряється, приєднується до того центру (стандарту), якому відповідає $d_i = \min d_{il} (l=1, \dots, k)$; еталон замінюється новим, перерахованим з урахуванням приєднаної точки, і вага його (кількість регіонів, що входять в даний кластер) збільшується на одиницю. Якщо зустрічаються дві або більше мінімальних відстані, то i -й регіон приєднують до центру з найменшим порядковим номером; вибирається точка X_{i+1} і для неї повторюються всі процедури. Таким чином, через $(n-k)$ кроків всі точки (регіони) сукупності виявляються віднесеними до одного з k кластерів, але на цьому процес розбиття не закінчується. Для того щоб домогтися стійкості розбиття за тим же правилом, всі точки X_1, X_2, \dots, X_n знову приєднуються до отриманих кластерів, при цьому ваги продовжують накопичуватися. Нове розбиття порівнюється з попереднім. Якщо вони збігаються, то робота алгоритму завершується. В іншому випадку цикл повторюється. Остаточне розбиття має центри тяжіння, які не збігаються з еталонами, їх можна позначити C_1, C_2, \dots, C_n . При цьому кожна точка $X_i (i=1, 2, \dots, n)$ буде відноситися до такого кластеру (класу), для якого $D(x_j, c_i) = \min d(x_j, c_j)$.

Після завершення процедур класифікації необхідно оцінити отримані результати. Для цієї мети використовується деяка міра якості класифікації, так званий функціонал якості. Найкращим за обраним функціоналом слід вважати таке розбиття, при якому досягається екстремальне значення цільової функції - функціоналу якості. При аналізі розбиття розглядалися наступні функціонали якості:

$$F_1 = \sum_{l=1}^k \sum_{i \in S_l} d^2(x_i, \bar{x}_l), \quad F_2 = \sum_{l=1}^k \sum_{i, j \in S_l} d_{ij}^2, \quad F_3 = \sum_{l=1}^k \sum_{j=1}^p \sigma_{lj}^2,$$

де x_i – вектор значень змінних для i -го об'єкта, що входить в l -й кластер; $d(x_i, \bar{x}_l)$ – відстань між i -м об'єктом і центром l -го кластера; σ_{lj}^2 – дисперсія j -ї змінної в кластері S_l .

Оптимальним вважається розбиття, при якому $F_i \rightarrow \min$, де A – множина всіх допустимих розбиттів.

Реалізація моделей класифікації дозволить виділити регіональні сегменти ринку, які, з одного боку, є опорними для мережевої структури системи вищої освіти, а, з іншого, найбільш уразливими до реалізації стратегії "стиснення".

Призначенням *другого модуля* є побудова моделі комплексної оцінки якості освіти в Україні.

Необхідність комплексної оцінки обумовлена різновекторністю зміни показників, що ускладнює їх аналіз і вимагає подання у вигляді синтетичної оцінки, яка є результатом згортки індикаторів, що відображають розвиток окремих підсистем. Модель комплексної оцінки якості освіти заснована на одному з методів побудови еталонного об'єкта – таксономічному показнику рівня розвитку [17]. Показник рівня розвитку розраховується за формулою:

$$d_i^* = 1 - \frac{c_{i0}}{c_0},$$

де $c_0 = \bar{c}_0 + 2 \cdot S_0$,

$$\bar{c}_0 = \frac{1}{w} \sum_{i=1}^w c_{i0},$$

$$S_0 = \sqrt{\frac{1}{w} \sum_{i=1}^w (c_{i0} - \bar{c}_0)^2},$$

$$c_{i0} = \sqrt{\sum_{j=1}^m (Z_{ij} - Z_{oj})^2} - \text{Евклідова відстань між}$$

точками-одиницями (регіонами) і точкою P_0 , що представляє собою еталон розвитку.

Основою для побудови еталону розвитку служить поділ ознак на стимулятори і дестимулятори. Ознаки, які надають позитивний, стимулюючий вплив на рівень розвитку системи освіти, називаються стимуляторами, на відміну від ознак – дестимуляторів. Координати еталона розвитку визначаються наступним чином:

$$z_{0s} = \begin{cases} z_{rs} = \max_r z_{rs}, & \text{якщо } s \in I \\ z_{rs} = \min_r z_{rs}, & \text{якщо } s \notin I, (s=1, \dots, m) \end{cases},$$

де I – множина стимуляторів, z_s – стандартизоване значення ознаки s для об'єкта r .

Оскільки ознаки мають різну розмірність, то при формуванні матриці відстаней $C = (d_{i0}), i=1, n$ здійснюється їх стандартизація за формулою:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{S_j}, \quad j=1, 2, \dots, m,$$

де \bar{x}_j – середнє арифметичне значення j -ї ознаки; S_j – стандартне відхилення j -ї ознаки; z_{ij} – стандартизоване значення j -ї ознаки для i -го об'єкта.

Значення таксономічного показника рівня розвитку змінюються в діапазоні від 0 до 1. Чим ближче значення інтегрального показника до 1, тим вище оцінка якості освіти.

Реалізація моделі оцінки якості освіти дасть можливість оцінити рівень конкурентоспроможності системи освіти України в умовах глобального ринку.

Змістом *третього модуля* є угруповання зарубіжних сегментів ринку за рівнем привабливості для освітніх закладів України. Для реалізації моделі класифікації використовуються описані вище в першому модулі методи кластерного аналізу. Побудова такої моделі класифікації дозволить виділити сегменти ринку, що формують "заміщуючий" ефект в разі прийняття за основу частково експортно орієнтованої моделі розвитку системи освіти.

Таким чином, реалізація наведеного вище концептуального підходу дозволить виділити найбільш чутливі до "шоків" інституційних реформ регіональні сегменти ринку освітніх послуг України, оцінити конкурентоспроможність системи освіти в умовах глобального ринку, визначити найбільш привабливі "заміщуючі" зарубіжні сегменти ринку.

Результати досліджень та їх обговорення

У відповідність із запропонованим вище підходом в *першому модулі* здійснювалося групування регіональних сегментів ринку за рівнем розвитку

систем освіти. В якості вихідного інформаційного простору ознак розглядалися такі індикатори, як кількість абітурієнтів (коледжі, технікуми); кількість абітурієнтів університетів (академії, інститути) регіону; кількість студентів в коледжах, технікумах, училищах на бюджетній формі навчання; кількість студентів в університетах, академіях, інститутах на бюджетній формі навчання; кількість студентів в коледжах, технікумах, училищах на контрактній формі навчання; кількість студентів в університетах, академіях, інститутах на контрактній формі навчання. Вибір системи індикаторів обумовлений їх інформаційною забезпеченістю в відкритих джерелах даних. Для побудови класифікації, як було сказано вище, використовувалися ітеративні і ієрархічні агломеративні методи кластерного аналізу. Для оцінки якості класифікації застосовувалися наведені вище функціонали якості. Підсумкове розбиття на основі методу Уорда, який дозволяє мінімізувати сумарну внутрішньо-групову дисперсію, наведено на рис. 2. Для обробки даних використовувався ППП Statistica.

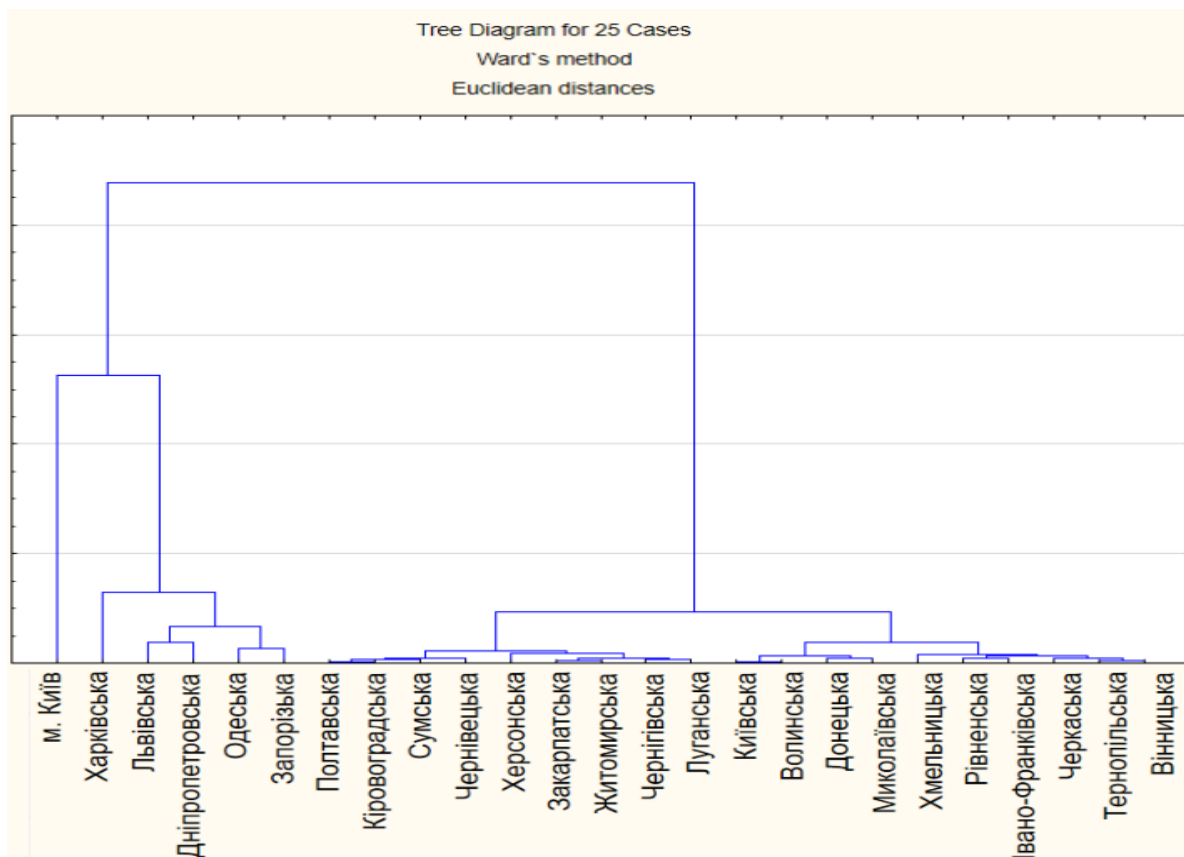


Рис. 2. Дендрограма класифікації регіональних сегментів ринку освітніх послуг за рівнем розвитку
Джерело: отримано авторами.

Дані рис. 2 показують, що м. Київ утворює ізольований одноелементний кластер з найбільш високими значеннями аналізованих показників. Оскільки м. Київ характеризується значною поляризацією соціально-економічного розвитку у порівнянні з іншими регіонами України, то для

отримання більш коректної і інтерпретованої класифікації м. Київ було виключено з подальшого аналізу. Результати реалізації моделі кластерного аналізу на усіченому списку регіонів наведені на рис. 3.

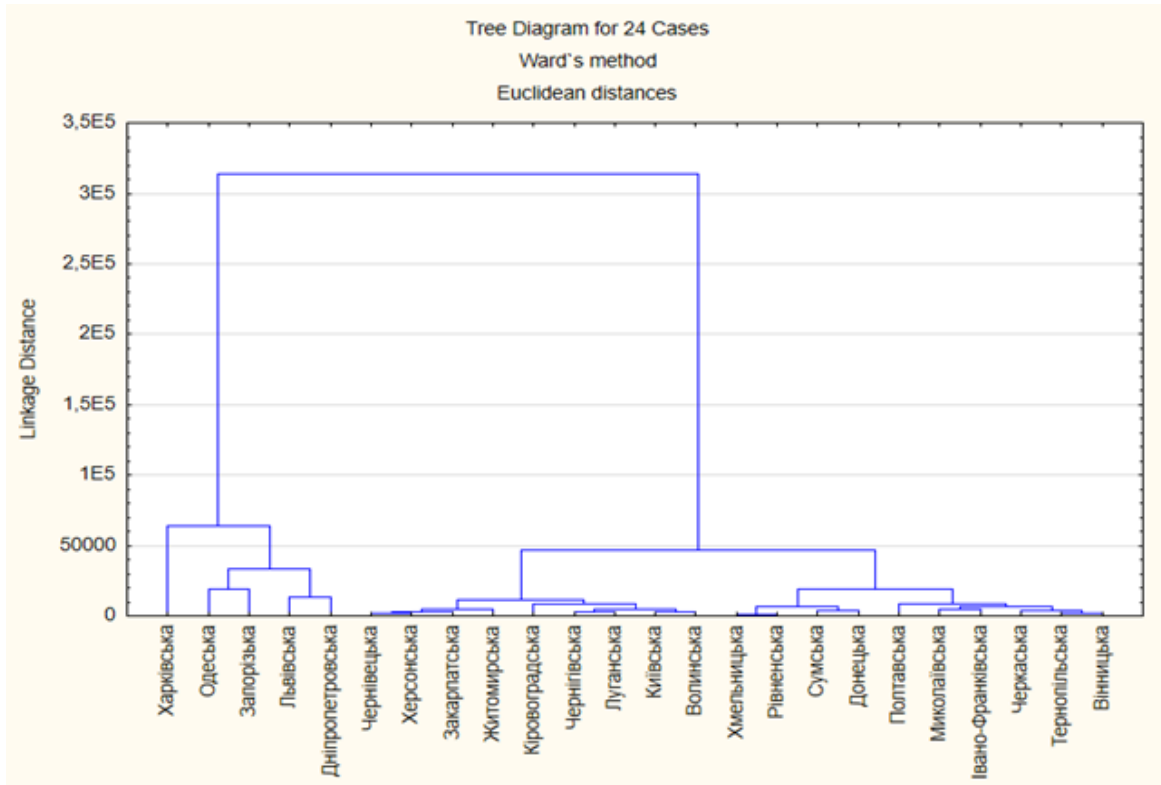


Рис. 3. Дендрограма класифікації регіональних сегментів ринку освітніх послуг за рівнем розвитку (без урахування м. Києва)
Джерело: отримано авторами.

Як видно з рис. 3, результати кластерного аналізу дозволяють виділити групу регіонів з найбільш високим рівнем розвитку системи освіти. До цієї групи належать такі регіони, як Харківська область, Одеська область, Запорізька область,

Львівська область, Дніпропетровська область. Таким чином, "опорну" мережу регіонів формують 24% регіонів України. Візуалізація географічної структури кластерів приведена на рис. 4.

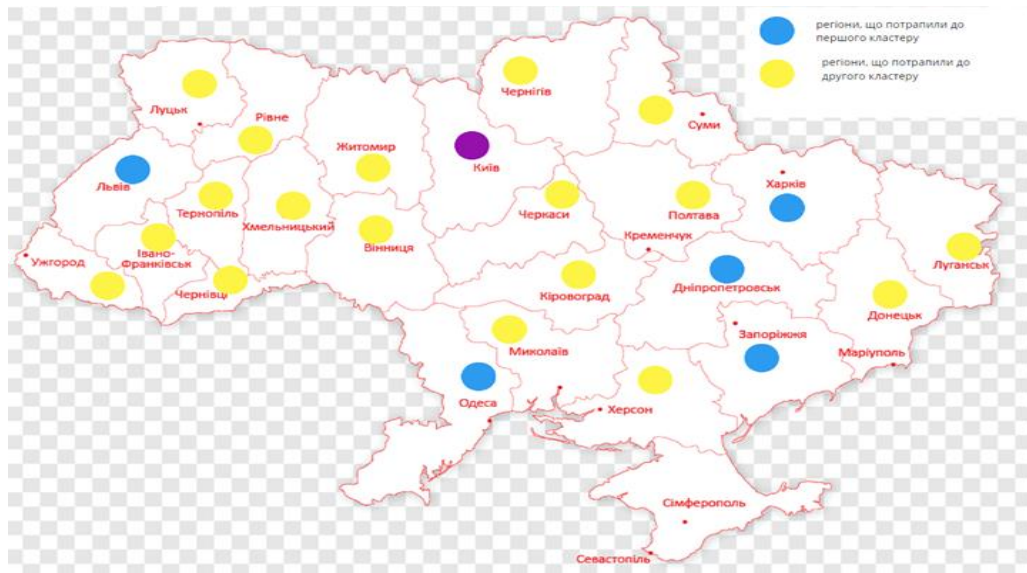


Рис. 4. Результати класифікації регіональних сегментів ринку за рівнем розвитку
Джерело: отримано авторами.

Таким чином, вище були виділені "опорні" для розвитку мережі освітніх закладів регіони, що охоплюють Захід, Центр і Південний схід України. Слід зазначити, що в силу великої кількості освітніх закладів, які сконцентровані в цих регіонах, дані

сегменти є найбільш уразливими до оптимізації числа університетів, яка буде супроводжуватися істотними негативними соціально-економічними наслідками. Для аналізу можливості розвитку освітніх закладів не тільки за рахунок внутрішнього попиту, а й за рахунок

зовнішнього ринку, у другому модулі здійснювалася побудова комплексної оцінки рівня розвитку систем освіти макрорегіонів (країн).

Для побудови комплексної оцінки рівня розвитку системи освіти, як було сказано вище, застосовувався

один з методів таксономії – метод рівня розвитку. Інформаційний простір ознак сформовано на основі відкритих баз даних [20-21]. Для зіставлення макрорегіонів використовувалася система індикаторів, наведена в табл. 1.

Таблиця 1. Інформаційний простір ознак рівня розвитку системи освіти

Умовне позначення	Показник	Група
X1	Індекс грамотності дорослого населення	Стимулятор
X2	Відсоток школярів, що лишаються на другий рік	Дестимулятор
X3	Результати країн по читацькій грамотності	Стимулятор
X4	Результати країн по математичній грамотності	Стимулятор
X5	Результати країн по природничій грамотності	Стимулятор
X6	Рівень безробіття серед молоді, що закінчила навчання в вищому навчальному закладі	Дестимулятор
X7	Середній час виходу на роботу після закінчення навчання	Дестимулятор

Джерело: сформовано авторами.

Як видно з табл. 1, при визначенні координат точки-еталона, в якості індикаторів-стимуляторів, які відображають фактори, що позитивно впливають на рівень розвитку системи освіти, були виділені: індекс грамотності дорослого населення, результати країн по читацькій грамотності, результати країн по математичній грамотності, результати країн по природничій грамотності. До індикаторів-

дестимуляторів були віднесені: відсоток школярів, що лишаються на другий рік; рівень безробіття серед молоді, що закінчила навчання в вищому навчальному закладі; середній час виходу на роботу після закінчення навчання. Значення Евклідової метрики і інтегрального показника рівня розвитку наведені в табл. 2.

Таблиця 2. Значення інтегрального показника рівня розвитку

Назва країни	Евклідова відстань	Рівень розвитку	Ранг
Бельгія	2,56	0,65	12
Болгарія	6,24	0,15	25
Чехія	2,20	0,70	9
Данія	1,96	0,73	7
Німеччина	1,14	0,84	2
Естонія	0,54	0,93	1
Ірландія	2,27	0,69	11
Греція	7,48	0,01	28
Іспанія	4,15	0,44	18
Франція	3,21	0,57	15
Хорватія	4,37	0,41	20
Італія	4,91	0,33	22
Кіпр	6,20	0,16	24
Латвія	2,59	0,65	13
Литва	3,35	0,55	17
Люксембург	3,31	0,55	16
Мальта	6,12	0,17	23
Австрія	2,67	0,64	14
Польща	1,96	0,73	6
Португалія	6,60	0,11	27
Румунія	6,44	0,13	26
Словенія	1,69	0,77	5
Словаччина	4,61	0,37	21
Україна	1,36	0,82	3
Фінляндія	4,23	0,43	19
Швеція	1,36	0,82	3
Великобританія	2,24	0,70	10
Норвегія	1,96	0,73	8

Джерело: отримано авторами

Інтерпретація інтегрального показника, представленого в табл. 2, наступна: чим ближче значення до 1, тим вище рівень розвитку системи освіти. Дані табл. 2 показують, що перші позиції рейтингу займають такі країни, як Естонія, Німеччина, Швеція, Україна, Словенія, Польща, Данія, Норвегія, Чехія, Великобританія. Таким чином, Україна має досить високу конкурентну позицію серед європейських країн.

У третьому завершальному модулі була проведена сегментація зовнішнього ринку за рівнем привабливості. Для реалізації завдань третього модуля використовувалися наведені вище методи кластерного аналізу. В якості інформаційного простору ознак розглядалися такі індикатори як кількість прийнятих на навчання до ЗВО України іноземних студентів, кількість випускників-іноземних студентів ЗВО України. Результати класифікації представлені на рис. 5.

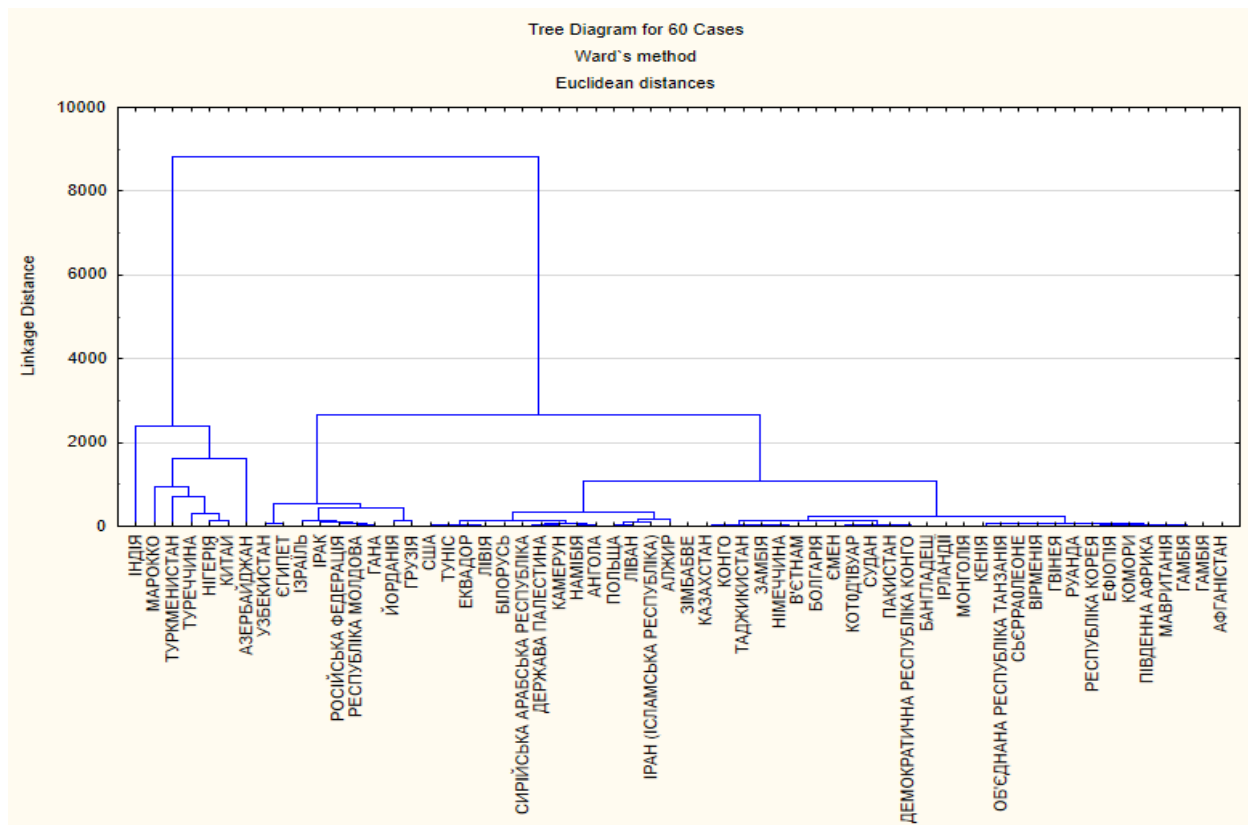


Рис. 5. Дендрограма класифікації країн за кількістю студентів, що навчаються в українських ЗВО

Джерело: отримано авторами.

Як видно з рис. 5, до найбільш привабливих зовнішніх сегментів для просування освітніх послуг ЗВО України відносяться такі країни, як Індія, Марокко, Туркменістан, Туреччина, Нігерія, Китай, Азербайджан. Наступний за рівнем привабливості кластер сформували такі макрорегіони: Єгипет, Ізраїль, Ірак, Російська Федерація, Республіка Молдова, Гана, Йорданія, Грузія. Дані ринки є перспективними для просування освітніх послуг ЗВО України.

Висновки та перспективи подальшого розвитку

Проведені дослідження дозволяють зробити наступні висновки:

запропонований концептуальний підхід до побудови комплексу моделей системного аналізу ринку освітніх послуг України, що дозволяють оцінити стан регіональних сегментів ринку; виділити сегменти, найбільш чутливі до скорочення мережі освітніх закладів; оцінити конкурентоспроможність

освітніх послуг на зовнішньому ринку; визначити найбільш привабливі сегменти зовнішнього ринку;

- реалізація моделі класифікації регіонів за рівнем розвитку систем освіти дозволила виділити мережу "опорних" регіонів для мережі освітніх закладів, які формують найбільш значимий соціально-економічний ефект в період циклічного зростання економіки і одночасно є найбільш чутливими до негативних наслідків в період спаду;

- запропонована модель комплексної оцінки рівня розвитку системи освіти, реалізація якої показала високу конкурентну позицію України по рівню розвитку системи освіти серед європейських країн і можливість часткової реалізації експортно орієнтованої моделі розвитку;

- реалізація моделі класифікації зовнішніх сегментів ринку за рівнем привабливості дозволила виділити макрорегіони з високим і середнім рівнем привабливості для ЗВО України з точки зору просування освітніх послуг і залучення іноземних студентів.

У ролі напрямків подальших досліджень можна виділити: аналіз стійкості результатів класифікації та рейтингування до особливостей систем діагностичних індикаторів; оцінка динамічної стійкості класифікації; аналіз перспектив розвитку цифрових освітніх закладів і їх інтеграції з класичними структурами в контексті розвитку каналів надання освітніх послуг у рамках експорт-орієнтованої моделі розвитку; посилення автономії ЗВО в частині адміністрації та

спрощення процедур просування освітніх послуг ЗВО України на зовнішні ринки.

Подяки. Дякуємо магістру кафедри економічної кібернетики та системного аналізу Харківського національного економічного університету ім. С. Кузнеця Шпак Анні за проведення експериментальних розрахунків.

Список літератури

1. Subhash Kak (2018), "Universities must prepare for a technology-enabled future", URL: <https://theconversation.com/universities-must-prepare-for-a-technology-enabled-future-89354>
2. "E-Learning - Market Analysis, Trends, and Forecasts". 2018. URL: <https://www.researchandmarkets.com/reports/2832322/e-learning-market-analysis-trends-and#rela3-4463680>
3. "Global Online Education Market - Forecasts from 2018 to 2023". 2018. URL: <https://www.researchandmarkets.com/reports/4463680/global-online-education-market-forecasts-from>
4. "Стратегія розвитку вищої освіти в Україні на 2021-2031 роки". 2021. URL: http://www.reform.org.ua/proj_edu_strategy_2021-2031.pdf
5. "Україна входить в топ-15 країн світу з найшвидшими темпами скорочення населення". Мінсоцполітики 2021. URL: <http://jkg-portal.com.ua/ua/publication/one/ukrajina-vkhodit-v-top-15-krajin-svtu-z-najshvidshimi-tempami-skorochennja-naselennja---mnsocpoltiki-59718>
6. Винокуров Я. Почти 10% населения: в правительстве подсчитали, сколько украинцев выехали за границу с начала десятилетия. 2020. URL: <https://hromadske.ua/ru/posts/pochti-10-naseleniya-v-pravitelstve-podschitali-skolko-ukraincev-vyehali-za-granicu-s-nachala-desyatiletija>
7. Хандій О. О. Дослідження особливостей ринку освітніх послуг вищих навчальних закладів. *Економіка та держава*. 2015. № 4. С. 44–47
8. Ахновська І. О. Аналіз потенціалу освітнього ринку України. *Фінанси, облік, банки*. 2017. № 1 (22). С. 34–45.
9. Могилова А. Ю., Решетнікова І. В. Особливості маркетингу на ринку освітніх послуг. *Науковий вісник Ужгородського національного університету*. 2016. Вип. 10/ 2. С. 21–25.
10. Огаренко Т. Ю. Концепція моделювання динаміки попиту на послуги вищих навчальних закладів. *Ефективна економіка*. 2010, № 10. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=350>
11. Putilov A., Timokhin D., Pimenova V. Adaptation of the educational process to the requirements of the global nuclear market according the concept of "economic cross" through its digitalization. *Procedia Computer Science*. 2020. 169. P. 452-457. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.02.226.17>
12. Thu Ha Truong, Keiichi Ogawa, Jean-Baptiste M. B. Sanfo. Educational expansion and the economic value of education in Vietnam: An instrument-free analysis. *International Journal of Educational Research*. 2021. Vol. 2. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijedro.2020.100025>
13. Fung-Mey Huang, Jen-Che Liao, Chin-Chun Yi. The impact of labor market work and educational tracking on student educational outcomes: Evidence from Taiwan. *Economics of Education Review*. 2020. Vol. 77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.econedurev.2020.101955>
14. Billon Margarita, Crespo Jorge, Lera-Lopez Fernando. Do educational inequalities affect Internet use? An analysis for developed and developing countries. *Telematics and Informatics*. 2021. Vol. 58. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tele.2020.101521>
15. Jakob Martina, Combet Benita. Educational aspirations and decision-making in a context of poverty. A test of rational choice models in El Salvador. *Research in Social Stratification and Mobility*. 2020. Vol. 69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rssm.2020.100545>
16. Misuraca Michelangelo, Scipi Germana, Spano Maria. Using Opinion Mining as an educational analytic: An integrated strategy for the analysis of students' feedback. *Studies in Educational Evaluation*. 2021. Vol. 68. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.stueduc.2021.100979>
17. Гур'янова Л. С. Моделювання збалансованого соціально-економічного розвитку регіонів : монографія. Бердянськ : ФОП Ткачук О.В. 2013. 406 с.
18. Адаптивные методы в системах принятия решений : монография. Под ред. Н. А. Кизима, Т. С. Клебановой. Х. : ИД "ИНЖЭК", 2007. 368 с.
19. Моделювання економічної безпеки: держава, регіон, підприємство : монографія. За ред. Гейця В. М. Х. : ВД "ИНЖЕК", 2006. 240 с.
20. EUROSTAT. 2019. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/>
21. OECD. 2019. URL: <https://www.oecd.org/pisa/>

References

1. Subhash, Kak (2018), "Universities must prepare for a technology-enabled future", available at : <https://theconversation.com/universities-must-prepare-for-a-technology-enabled-future-89354>
2. "E-Learning - Market Analysis, Trends, and Forecasts" (2018), available at : <https://www.researchandmarkets.com/reports/2832322/e-learning-market-analysis-trends-and#rela3-4463680>
3. "Global Online Education Market - Forecasts from 2018 to 2023" (2018), available at : <https://www.researchandmarkets.com/reports/4463680/global-online-education-market-forecasts-from>

4. "Higher Education Development Strategy in Ukraine in 2021-2031" ["Strategiya rozvytku vyshhoi osvity v Ukrayini na 2021-2031 roky"] (2021), available at : http://www.reform.org.ua/proj_edu_strategy_2021-2031.pdf
5. "Ukraine is among the top 15 countries in the world with the fastest rate of population decline - the Ministry of Social Policy" ["Ukrayina vxodyt v top-15 krayin svitu z najshvydshymy tempamy skorochennya naselennya – Minsocpolitky"] (2021), available at : <http://jkg-portal.com.ua/ua/publication/one/ukrajina-vkhodit-v-top-15-krajn-svtu-z-najshvidshimi-tempami-skorochennya-naselennya---mnsocpoltiki-59718>
6. Vinokurov, J (2020), "Almost 10% of the population: the government has calculated how many Ukrainians have left abroad since the beginning of the decade" ["Pochty 10% naseleniyya: v pravyltelstve podschytyaly, skolkо ukraincev vyexaly za granyczu s nachala desyatyletya"], available at : <https://hromadske.ua/ru/posts/pochti-10-naseleniya-v-pravitelstve-podschitali-skolkо-ukraincev-vyehali-za-granicu-s-nachala-desyatyletiya>
7. Khandiy, O. O. (2015), "Research of features of the market of educational services of higher educational institutions" ["Doslidzhennya osoblyvostej rynku osvitnix poslug vyshhyx navchalnyx zakladiv"], *Economy and state*, No. 4, C. 44–47.
8. Akhnovskay, I. O. (2017). "Analysis of the potential of the educational market of Ukraine" ["Analiz potencialu osvitnogo rynku Ukrayiny"]. *Finance, accounting, banks*. No. 1 (22), P. 34–45.
9. Mogilova, A. Yu., Reshetnikov, I. V. (2016), "Features of marketing in the market of educational services" ["Osoblyvosti marketyngu na rynku osvitnix poslug"], *Scientific Bulletin of Uzhhorod National University*, No. 10/2, P. 21–25.
10. Ogarenko, T. Yu. (2010), "The concept of modeling the dynamics of higher education services demand" ["Konceptiya modelyuvannya dynamiky popytu na poslugy vyshhyx navchalnyx zakladiv"], *Efficient economy*, No. 10, available at : <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=350>
11. Putilov, A., Timokhin, D., Pimenova, V. (2020), "Adaptation of the educational process to the requirements of the global nuclear market according to the concept of "economic cross" through its digitalization", *Procedia Computer Science*, No. 169, P. 452–457. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.02.226.17>
12. Thu Ha Truong, Keiichi Ogawa, Jean-Baptiste, M. B. S. (2021), "Educational expansion and the economic value of education in Vietnam: An instrument-free analysis", *International Journal of Educational Research*, Vol. 2. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijedro.2020.100025>
13. Fung-Mey Huang, Jen-Che Liao, Chin-Chun Yi. (2020), "The impact of labor market work and educational tracking on student educational outcomes: Evidence from Taiwan", *Economics of Education Review*, Vol. 77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.econedurev.2020.101955>
14. Billon Margarita, Crespo Jorge, Lera-Lopez Fernando (2021), "Do educational inequalities affect Internet use? An analysis for developed and developing countries", *Telematics and Informatics*, Vol. 58. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tele.2020.101521>
15. Jakob Martina, Combet Benita (2020), "Educational aspirations and decision-making in a context of poverty. A test of rational choice models in El Salvador", *Research in Social Stratification and Mobility*, Vol. 69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rssm.2020.100545>
16. Misuraca Michelangelo, Scepi Germana, Spano Maria (2021), "Using Opinion Mining as an educational analytic: An integrated strategy for the analysis of students' feedback", *Studies in Educational Evaluation*, Vol. 68. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.stueduc.2021.100979>
17. Guryanova, L. S. (2013), *Modeling of balanced socio-economic development of regions [Modelyuvannya zbalansovanogo socialno-ekonomichnogo rozvytku regioniv]* : monograph, Berdyansk : FOP Tkachuk O. V., 406 p.
18. Ed. Kizim, N. A., Klebanova, T. S. (2007), *Adaptive methods in decision-making systems [Adaptyvnye metody v systemax prynyatyya resheniy]* : monograph, Kharkiv : ID INZHEK, 368 p.
19. Ed. Geyets, V. M. (2006), *Modeling of economic security: state, region, enterprise [Modelyuvannya ekonomichnoyi bezpeky: derzhava, region, pidpryyemstvo]*: monograph, Kharkiv : VD "INZHEK", 240 p.
20. "EUROSTAT" (2019), available at : <https://ec.europa.eu/eurostat/>
21. "OECD" (2019), available at : <https://www.oecd.org/pisa/>

Надійшла (Received) 28.02.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гур'янова Лідія Семенівна – доктор економічних наук, професор, Харківський національний економічний університет імені С. Кузнеця, зав. кафедри економічної кібернетики і системного аналізу, Харків, Україна; email: guryanovalidiya@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2009-1451>.

Гурьянова Лидия Семеновна – доктор экономических наук, профессор, Харьковский национальный экономический университет имени С. Кузнеця, зав. кафедры экономической кибернетики и системного анализа, Харьков, Украина.

Guryanova Lidiya – Doctor of Sciences (Economics), Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Head of the Department of Economic Cybernetics, Kharkiv, Ukraine.

Панасенко Оксана Володимирівна – кандидат економічних наук, Харківський національний економічний університет імені С. Кузнеця, доцент кафедри економічної кібернетики і системного аналізу, Харків, Україна; email: oksana.panasenko@hneu.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0951-6495>.

Панасенко Оксана Владимировна – кандидат экономических наук, Харьковский национальный экономический университет имени С. Кузнеця, доцент кафедры экономической кибернетики и системного анализа, Харьков, Украина.

Panasenko Oksana – PhD (Economics Sciences), Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Associate Professor of the Department of Economic Cybernetics, Kharkiv, Ukraine.

Вознюк Сергій Миколайович – Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", старший викладач кафедри вищої математики та системного аналізу, email: S.voznyuk@khai.edu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1837-8752>.

Вознюк Сергей Николаевич – Национальный аэрокосмический университет им. М. Е. Жуковского "Харьковский авиационный институт", старший преподаватель кафедры высшей математики и системного анализа, Харьков, Украина.

Voznyuk Serhiy – National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Senior Lecturer of the Department of Higher Mathematics and Systems Analysis, Kharkiv, Ukraine.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ РЫНКА ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСЛУГ

Предметом исследования является комплекс моделей системного анализа рынка образовательных услуг. **Цель** работы – разработка комплекса моделей системного анализа рынка образовательных услуг Украины, позволяющих оценить состояние региональных сегментов рынка; выделить сегменты, наиболее чувствительные к сокращению сети образовательных учреждений; оценить конкурентоспособность образовательных услуг на внешнем рынке; определить наиболее привлекательные сегменты внешнего рынка. В статье решаются следующие **задачи**: разработать модели классификации регионов по уровню развития системы образования; разработать модели комплексной оценки уровня развития системы образования, позволяющие оценить позиции Украины в сравнении с европейскими странами; разработать модели классификации внешних сегментов рынка по уровню привлекательности для продвижения образовательных услуг ВУЗов Украины в контексте экспортно-ориентированной модели развития. Используются следующие **методы**: системный анализ – для описания объекта исследования, концептуального подхода и комплекса решаемых задач; кластерный анализ – для построения моделей классификации; методы таксономии, метод уровня развития – для построения рейтинговой оценки позиции Украины на рынке образовательных услуг. Получены следующие **результаты**: разработана группировка регионов Украины по уровню развития системы образования, выделены "опорные" для формирования сети образовательных учреждений регионы; предложена система рейтинговой оценки стран на рынке образовательных услуг; выделены наиболее привлекательные для продвижения образовательных услуг ВУЗов Украины внешние сегменты рынка. **Выводы**: реализация моделей позволила сделать вывод, что состав "опорных" для формирования сети образовательных учреждений регионов включает такие регионы, как г. Киев, Харьковскую, Одесскую, Запорожскую, Львовскую, Днепропетровскую области. Образовательные услуги ВУЗов этих регионов пользуются наиболее высоким спросом, однако эти же регионы являются наиболее уязвимыми к фазе спада рынка. Анализ "замещающего" эффекта позволил сделать вывод, что Украина характеризуется высокой рейтинговой оценкой уровня развития системы образования в сравнении с европейскими странами. В контексте экспортно-ориентированной модели развития выделены привлекательные для Украины внешние сегменты рынка.

Ключевые слова: образование; образовательные услуги; рынок образовательных услуг; системный анализ; моделирование; кластерный анализ; таксономический показатель.

SYSTEMS ANALYSIS AND MODELLING OF THE EDUCATIONAL SERVICES MARKET

The **subject** of the research is a set of models of systems analysis of the educational services market. The **goal** of the work is to develop a set of models of systems analysis of the educational services market in Ukraine, which allow to assess the state of regional market segments; to highlight the segments which are the most sensitive to the reduction of the educational institutions network; to assess the competitiveness of educational services in the foreign market; to determine the most attractive segments of the foreign market. The paper solves the following **tasks**: models of classification of regions according to the level of development of the education system are developed; models for a comprehensive assessment of the level of development of the education system are proposed, which allow assessing the position of Ukraine in comparison with European countries; models for classifying external market segments by the level of attractiveness for promoting educational services of Ukrainian universities in the context of an export-oriented development model are developed. The following **methods** are used: systems analysis – to describe the object of research, conceptual approach and a set of tasks to be solved; cluster analysis – for building classification models; taxonomy methods, development level method – to build a rating assessment of Ukraine's position in the educational services market. The following **results** have been obtained: a grouping of the regions of Ukraine by the level of development of the education system has been developed, the "pivotal" regions for the formation of a network of educational institutions have been identified; a system of rating assessment of countries in the educational services market institutions has been proposed; the most attractive external market segments for the promotion of educational services of universities in Ukraine institutions have been identified. **Conclusions**: the implementation of the models made it possible to conclude that the composition of the "pivotal" regions for the formation of a network of educational institutions includes such regions as Kyiv, Kharkiv, Odesa, Zaporizhzhia, Lviv, Dnipro regions. Educational services of universities in these regions are in the highest demand, but these regions are also the most vulnerable to the phase of market decline. The analysis of the "substitute" effect made it possible to conclude that Ukraine is characterized by a high rating of the level of development of the education system in comparison with European countries. In the context of the export-oriented development model, external market segments that are attractive for Ukraine have been highlighted.

Keywords: education; educational services; educational services market; systems analysis; modelling; cluster analysis; taxonomic indicator.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Гур'янова Л. С., Панасенко О. В., Вознюк С. М. Системний аналіз і моделювання ринку освітніх послуг. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 1 (15). С. 32–42. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.032>

Guryanova, L., Panasenko, O., Voznyuk, S. (2021), "Systems analysis and modelling of the educational services market", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (15), P. 32–42. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.032>

S. DANSHYNA

GENERAL APPROACH TO PROJECT MATERIAL RESOURCES MANAGEMENT

The **subject** matter of the article is the processes of managing the material resources of the project. The **goal** of the work is to form a generalized approach to the management of material resources project by determining and formalizing the management processes of them. The following **tasks** were solved in the article: the processes of managing material resources project, which based on the process approach, are formed; place of these processes in the PMBOK structure is defined, these processes are integrated with other project management processes; a formalized presentation of the project management processes of the project is given; tools and methods of managing material resources of the project are identified. The following **methods** used are – methods of system analysis, decision-making theory, and inventory management theory. The following **results** were obtained – with target to make informed management decisions, it was proposed to allocate a separate area of knowledge, within which the processes of the management of material resources of the project are formed, their possible connection with the groups of PMBOK processes is shown. Based on the process approach, presentations of the processes were formalized. They are elements of managing material resources of projects. They define inputs and outputs, show interrelations with other processes of a specific area of knowledge, provide basic recommended tools and methods. **Conclusions:** the processes management resource described in the PMBOK methodology are analyzed. This made it possible to form possible directions for improving the project's resource support. It is noted that the solution to this problem depends on the management of the material resources of the project. A separate area of knowledge has been highlighted, within the framework of the processes of management of material resources project – the processes of evaluating material resources, procurement management and supply, distribution of material resources, managing material resources. They define inputs and outputs, show interrelations with other processes of a specific area of knowledge, provide basic recommended tools and methods. The results obtained can be useful when managing projects at any stage of the life cycle.

Keywords: project management; non-reproducible project resources; project processes; process information flow model.

Introduction

Project management as a scientific direction is in constant development to increase the efficiency of managerial decisions. Analysis of about hundreds of sciencedirect.com databases (<https://www.sciencedirect.com>) confirmed that among the key factors that require close attention in drafting, the issues of improving the processes of material resources management are the most up-to-date. Even articles dealing with the problem of improving rental planning processes consider the tasks related to their resource provision (for example, in works [1, 2], where one of the reasons for exceeding the duration of the project is called resource shortage). This confirms the statement that "...management of project resources is exactly the curse that does not give a recreation to scientists" [3].

The resource is all that the project has, and therefore the timing, budget, quality of the project implementation and its product depend significantly on effective management by ensuring the optimal use of resources to achieve the project results with the specified indicators [3, 4]. Note that resources are a multifaceted concept that includes material resources, project team, finance, information, knowledge and technology. But existing project methodologies do not contain unambiguous approaches to resource management; new project management methods create new problems in their management, increase the risk of over expenditure and reduce the likelihood of its success [1 - 5]. This is what requires new approaches to project resource management.

Analysis of the problem and existing methods

We focus on the PMBoK methodology from the Project management institute (PMI), as one that has good

recommendations, allows to plan a project from start to finish and execute it according to this plan. In PMBoK, project resource management is a field of knowledge that combines the processes of identification, acquisition and management in order to timely provide the necessary resources in the right place [4, 6]. In this case, regardless of the definition in the third edition of the PMBoK, two separate branches of knowledge related to project resources were distinguished – human resources management and supply management [6], in the sixth edition other industries were formed – resource management and procurement management [4] (table 1).

In the early version of the PMBoK standard, there are two types of project resources - non-reproducible and reproducible [6].

Non-reproducible (stored or accumulating resources) - resources that, in the course of the project work, seek to spend completely, preventing their reuse; however, if it is not possible to use a resource of this type at a certain point in time, then it is accumulated for consumption in the future.

Resources of the second type during the project implementation retain their shape and at the end of the work can be used for other works. A striking example of this type of resources is human resources [3].

In the future, the material resources of the project will be understood as resources of the first, non-reproducible type.

As we can see in the early version of PMBoK (Table 1), management processes for different types of resources differ significantly. For the management of material resources of non-reproducible type, the processes of procurement and supply management that occur during the creation of the material flow of the project are defined [4].

Table 1. Comparison of groups of project resource management processes

PMBok version	Field of knowledge	Project resource management processes	
		Process Group	Activities
<i>A Guide to the Project Management Body of Knowledge (Guide PMBoK), 3rd ed., USA: PMI, 2004.</i>	Human Resources Management	Planning Process Group	Human resource planning
		Execution Process Group	Project team set Project team development
		Monitoring and Control Processes Group	Project team management
	Supply Management	Planning Process Group	Purchasing and procurement planning Contract planning
		Execution Process Group	Request information from sellers Selection of sellers
		Monitoring and Control Processes Group	Contract administration
		Final Process Group	Closing contracts
<i>A Guide to the Project Management Body of Knowledge (Guide PMBoK), 6th ed., USA: PMI, 2017.</i>	Resource Management	Planning Process Group	Resource management planning Estimation of operations resources
		Execution Process Group	Supply of resources Project team development Project team management
		Monitoring and Control Processes Group	Resource control
	Purchasing Management	Planning Process Group	Procurement management planning
		Execution Process Group	Procurement
		Monitoring and Control Processes Group	Procurement control

But in the latest project management guides there is no fundamental difference between the two types of resources. The field of knowledge of resource management from the same positions considers the issues of project team management and management of materials and components. This is not always appropriate for such reasons:

1. Invalid resources are the resources of type "Energy", reproductive resources - resources of type "Strength", which is manifested by the difference in the approach to management: if in the first case, an important management indicator is the presence, in the second – responsibility, talentance, trigger performance, etc. [7].

2. The attempt to combine resources of different types in one field of knowledge leads to the fact that the tools and methods proposed for the implementation of processes in this field are generalized, heuristic procedures (expert assessments, assessments by analogy, meetings, communication methods) prevail over accurate calculations.

3. The key concepts of resource management are formed as "solving the tasks of acquisition, management, motivation and mobilization of project team members" [4, p. 309], which makes secondary tasks of logistics of the project.

The **aim** of the work is to form a generalized approach to the management of material resources of the project by defining and formalizing the processes of their management.

The **task** of the study:

- based on the process approach, to form processes for managing the material resources of the project;
- to identify the location of the profile material resource management processes in the PMBoK structure and integrate them with other project management processes;

- formalize the processes of material resources management of the project;
- to identify key tools and methods for managing project material resources.

Materials and Methods

The requirement for material resources forms the "material supply chain" of the project. In the context of management, the main goal of this chain is to combine activities that have fallen out of the field of view of projects, but are directly related to material resources (logistics, inventory management), with project management activities (project scheduling, resource planning, resource allocation) in such a way as to ensure the success of the project by saving time and finance, reducing waiting times, improving customer satisfaction, reducing storage space, etc. [7, 8]. For example, the results of research on construction projects (P. F. Tunji-Olayeni and etc. [8]) indicate that logistics management is a more important element of construction project management. According to experts (architects, builders, project managers), the main problems that arise and lead to negative consequences in the projects are related to transportation, improper storage, delays in the supply of materials, etc. [8]. This has made it possible to separate processes directly related to logistics in the management of project resources, in particular [9]:

- material resource assessment processes – processes related to resource management planning in order to form approaches to assessing the type and quantity of materials, equipment and consumables, their supply and use in the performance of project work;

- procurement and supply management processes - processes that provide the project with the resources necessary for its implementation;

- material resource allocation processes - processes related to resource allocation in the project supply chain and their delivery to the application site;

- Inventory management processes - processes aimed at managing inventory levels and monitoring project resource management performance.

Project management is an integrative action that requires all of its processes to be structured and linked to other processes to facilitate their coordination for project success [4, 6]. To do this, the PMBoK divides all processes into five groups - initialization, planning, monitoring, and closing process groups [4]. The relationship between process groups and project material management processes is shown in table 2[9].

Table 2. Relationship of project material resource management processes with groups of project management processes

Processes related to the logistics of the project	Project process groups according to PMBoK				
	Initiation	Planning	Implementation	Monitoring and control	Closing
Evaluation of material resources		Project material resource management planning	Estimation of material resources of project operations		
Management of procurement and supply of material resources		Procurement and supply management planning	Organize the supply and purchase of material resources	Control of procurement and supply of material resources	
Allocation of material resources of the project		Planning the management of the distribution of material resources in the logistics chain of the project	Organize the delivery of material resources to the place of application	Control of the distribution of material resources	
Inventory management of project material resources		Project material inventory management planning	Regulation of the level of stocks of material resources of the project	Monitoring the effectiveness of inventory management	

The process approach assumes that any process is considered, focusing on its inputs and outputs [4, 5], the principles of conceptual modeling allow considering it in relation to a separate field of knowledge (or a separate functional unit). Thus, the processes of material resource management of the project can be represented as a model of information flows of the process [10]

$$I_Pr = (V, Z, \varphi, A, O, \psi), \quad (1)$$

where $V = \{v_1, v_2, v_3\}$ is the set of input data, which includes: v_1 – assets of the organizational process project containing standard processes, life cycle project, instructions, template, storage rules, retrospective information on resources types, etc.; v_2 – environmental factors, which include information on the economic conditions of the project, the availability of resources, their location, when these resources may be available, terms of supply, etc.; v_3 – list of suppliers;

$O = \{o_1, o_2, o_3, o_4, o_5\}$ – the set of source data that contains o_1 – resource needs; o_2 – bills to pay; o_3 – consolidated resource management plan; o_4 – consolidated resource calendar (updates); o_5 – project logistics chain structure (updates);

$Z = \{z_1, z_2\}$ – a set of documents that regulate the process and ensure its proper flow: the project charter (z_1), which contains a high-level description of the project, requirements, list of stakeholders, aggregated events, financial resources that may affect the

management of material resources; project management plan (z_2), in particular, issues related to schedule, cost, risks, supply, etc.;

φ – update function, the implementation of which is associated with the clarification (correction) of input data in accordance with the requirements of the documents governing the process of managing the material resources of the project;

$A = \{a_1, a_2, a_3, a_4\}$ – set of operations related to the logistics of the project (according to table 2);

ψ – output function, as a result of which the initial data of the process of material resources management of the project are formed.

Supporting the idea of graphical representation of models, we present the obtained model (1) in graphical form (fig. 1).

The internal content of information flows in the process of managing the material resources of the project is regulated by a number of documents, which prescribe the requirements for their design and composition. These documents form a single internal standard for the preparation and maintenance of projects through data modules in a single software and communication environment - the database (library) of the project, which receive when implementing the update function [10]:

$$\varphi: V \times Z \rightarrow V, \quad (2)$$

that is, the content of the elements of the set V varies depending on the scope and complexity of the project, updated and adjusted within the overall process of change

management during the receipt of new information on the project.

Execution of update function (2) clarifies the content of the elements of the set V. For example, the assets of the project organizational process that come to the input of processes related to material management, when implementing the function ϕ taking into account the requirements of the project management plan, are transformed into the initial requirement of "developing a hierarchical resource structure," the form, type and content of which are standardized.

After clarifying the input data by performing the function ϕ for the implementation of material resource management processes of the project, certain functions (operations) are provided, which form a reflection [10]:

$$\psi : A \times V \rightarrow O, \tag{3}$$

which unambiguously determines what will be at the exit of the development project process depending on the inputs and certain operations.

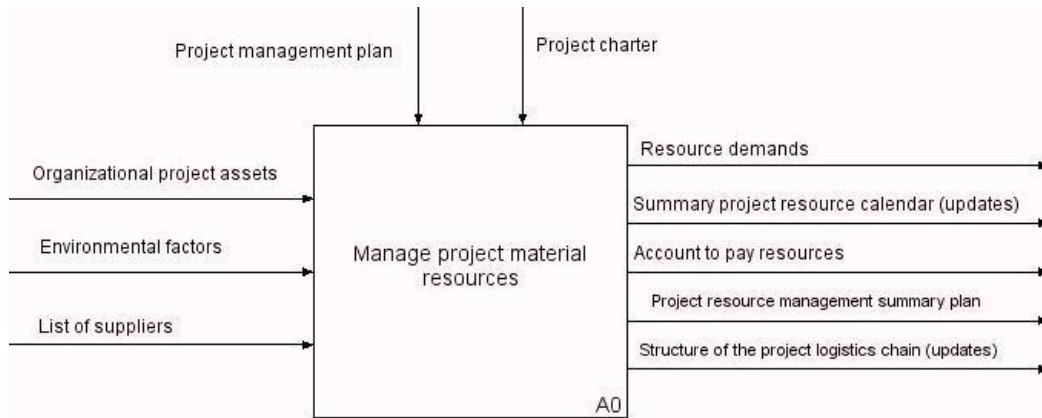


Fig. 1. Graphical representation of the model of information flows of material resources management processes of the project

Analyzing the table 2, let's form a set A. It consists of elements: a_1 – to estimate the material resources of the project; a_2 – to manage the procurement and supply of material resources of the project; a_3 – to allocate material resources of the project; a_4 – to manage stocks of material resources of the project.

Therefore, according to expression (3), the function ψ converts the set of input data $V = \{v_1, v_2, v_3\}$ into the set of output data $O = \{o_1, o_2, o_3, o_4, o_5\}$, passing through operations $A = \{a_1, a_2, a_3, a_4\}$, taking into account the requirements of the norming documents of the set $Z = \{z_1, z_2\}$. In graphical form, the function ψ is shown in fig. 2.

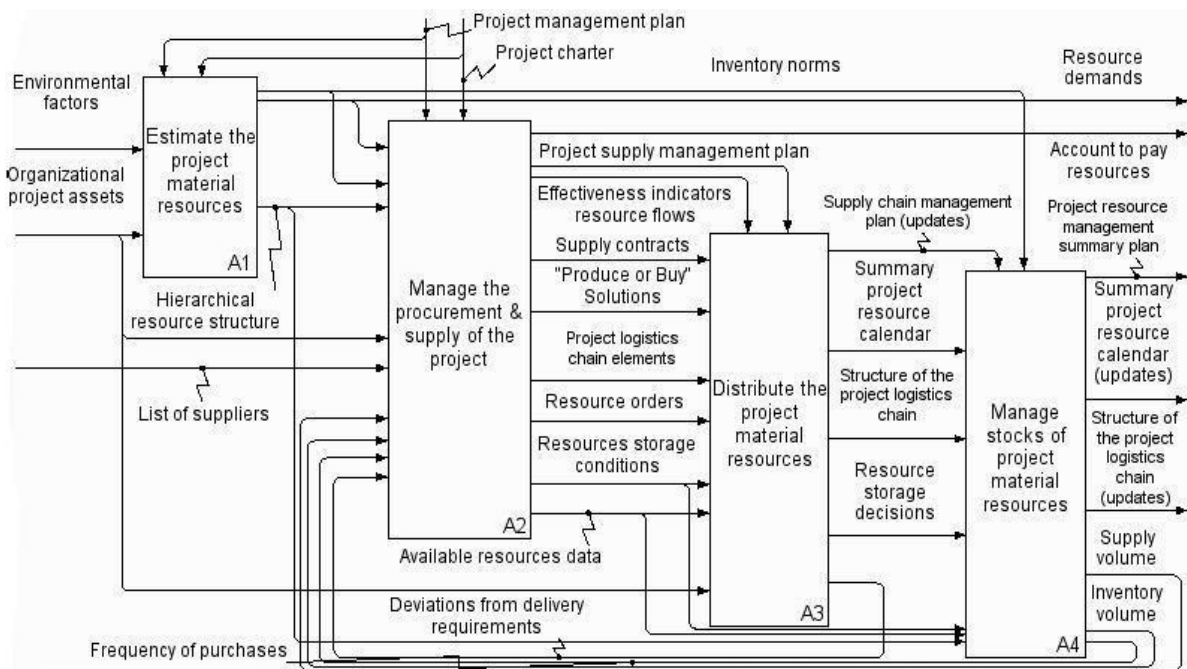


Fig. 2. Graphic view of the function ψ model of information flows of material resource management processes of the project

Complex information links between operations (fig. 2) and the hierarchical nature associated with the distribution between groups of PMBoK project management processes (table 2), lead to the need for further transformation of project material resource management processes into a set of hierarchically organized subprocesses.

The information flow model of the A1 subprocess is according to expression (1), a set of objects

$$I_{-A_1} = (V_{A_1}, Z_{A_1}, \varphi_{A_1}, A_{A_1}, O_{A_1}, \psi_{A_1}), \quad (4)$$

where $V_{A_1} = \{v_1^{A_1}, v_2^{A_1}\}$ is the set of input data, which according to fig. 2 consists of the assets of the organizational process ($v_1^{A_1}$) and environmental factors ($v_2^{A_1}$);

$Z_{A_1} = \{z_1^{A_1}, z_2^{A_1}\}$ is a set of documents that regulate the subprocess, which in accordance with fig. 2 contains the project management plan ($z_1^{A_1}$) and the project charter ($z_2^{A_1}$);

$O_{A_1} = \{o_1^{A_1}, o_2^{A_1}, o_3^{A_1}\}$ – the set of source data, which according to fig. 2 consists of a hierarchical structure of work ($o_1^{A_1}$), resource requirements ($o_2^{A_1}$) and stock standards ($o_3^{A_1}$);

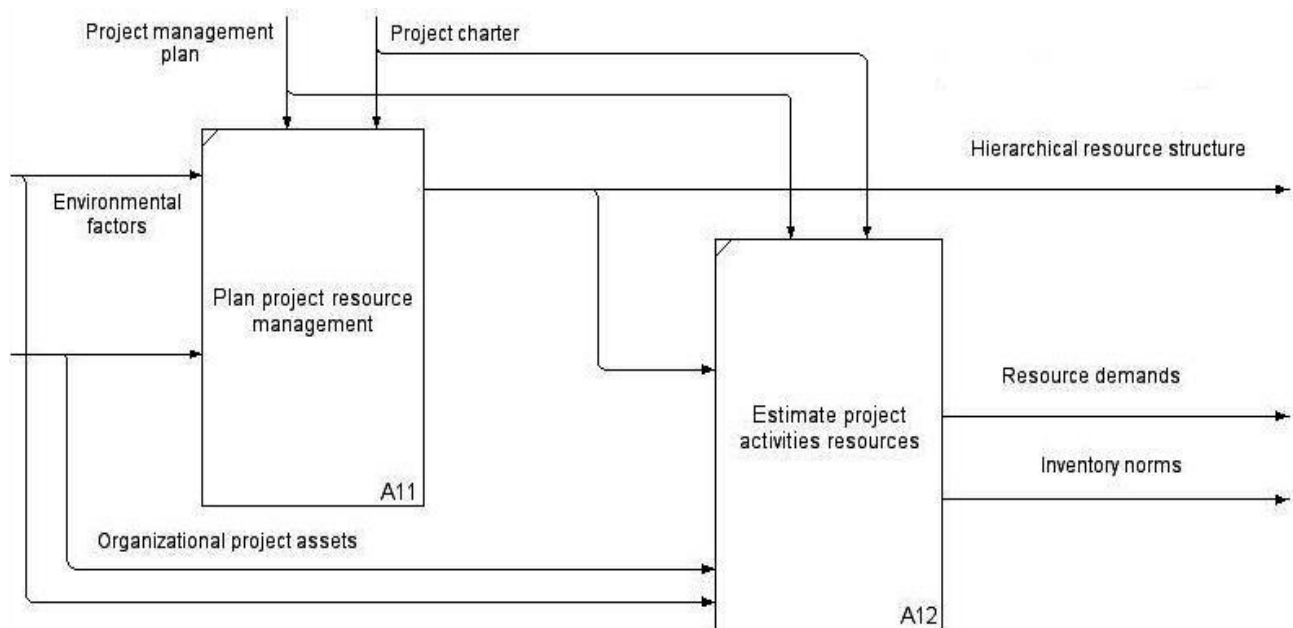


Fig. 3. Graphic view of the function ψ subprocess of evaluation of material resources of the project

But for the adaptation and development of project management, the theory of inventory management can be used [11], for example, in determining inventory norms.

Based on the hierarchical structure of resources, the need (Λ) in a certain type of material resource is evaluated.

Assume that during the project implementation the need for material resources Λ may arise n times at regular intervals. Then the size of the aggregate order is a multiple of Λ , i.e. [12]

$A_{A_1} = \{a_{A11}, a_{A12}\}$ – the set of operations of the subprocess, which according to table 2 define a_{A11} planning of management of material resources of the project and a_{A12} estimation of material resources of operations of the project.

In model (4), the output function performs a mapping $\psi_{A_1} : A_{A_1} \times V_{A_1} \rightarrow O_{A_1}$, the graphical representation of which is shown in fig. 3.

The main purpose of A1 subprocess is to determine the integral amount of resources required to perform the project, to form a hierarchical structure of resources, to find the function of resource needs and to determine the norms of stocks.

The main recommended tools and methods of realization of the subprocess of assessment of material resources of the project are [4, 10]:

- expert assessments;
- methods of displaying data, in particular in the formats of hierarchical schemes, matrices or text;
- analysis of alternatives;
- open estimates;
- software for managing the project;
- evaluations "bottom - up".

$$Q = \Lambda n,$$

and the average resource level is equal to:

$$Q_{cp} = \Lambda \frac{n-1}{2}.$$

In this case, the occurrence of costs associated with stocks will coincide with one of the "points of need". Their value is calculated by the formula:

$$L = S\Lambda \frac{n-1}{2} + \frac{hK}{n}, \quad (5)$$

where S – costs of storing a unit of resources, the value of which determines the assets of the organizational process of the project; K – the cost of order formation, the level of which depends on environmental factors; h – the total frequency of resource demand during the project implementation.

Therefore, analyzing expression (5), we note:

- if the quantity $[n] = 1$ (where $[n]$ is an integer), then the supply of material resources should be organized in such a way as to directly satisfy the need Λ ;
- condition $[n] > 1$ means that conditions should be provided for storage of material resources;
- inequality $nK - S\Lambda \leq 0$ is a necessary and sufficient condition for non-creation of a stock.

The obtained results are the input data of the following subprocess A_2 , the model of its information flows according to expression (1) has the form:

$$I_{-A_2} = (V_{A_2}, Z_{A_2}, \varphi_{A_2}, A_{A_2}, O_{A_2}, \psi_{A_2}), \quad (6)$$

where $V_{A_2} = \{v_1^{A_2}, v_2^{A_2}, \dots, v_9^{A_2}\}$ – the set of input data, which according to fig. 2 consists of norms of stocks ($v_1^{A_2}$), resource requirements ($v_2^{A_2}$), hierarchical structure of resources ($v_3^{A_2}$), assets of organizational process ($v_4^{A_2}$), list of suppliers ($v_5^{A_2}$), volumes of deliveries ($v_6^{A_2}$), frequency

of purchases ($v_7^{A_2}$), size of stocks ($v_8^{A_2}$), deviations in deliveries ($v_9^{A_2}$);

$Z_{A_2} = \{z_1^{A_2}, z_2^{A_2}\}$ – a set of documents that regulate the subprocess, which in accordance with fig. 2 contains the project management plan ($z_1^{A_2}$) and the project charter ($z_2^{A_2}$);

$O_{A_2} = \{o_1^{A_2}, o_2^{A_2}, \dots, o_{10}^{A_2}\}$ – the set of source data, which according to fig. 2 consists of "produce or purchase" ($o_1^{A_2}$) decisions, project supply management plan ($o_2^{A_2}$), project logistics chain elements ($o_3^{A_2}$), resource conservation conditions ($o_4^{A_2}$), supply contracts ($o_5^{A_2}$), resource orders ($o_6^{A_2}$), resource promotion performance indicators ($o_7^{A_2}$), invoices for payment of resources ($o_8^{A_2}$), data on available resources ($o_9^{A_2}$), deviations in deliveries ($o_{10}^{A_2}$);

$A_{A_2} = \{a_{A21}, a_{A22}, a_{A23}\}$ – the set of operations of the subprocess, which according to table 2 determine a_{A21} planning of procurement and supply management, a_{A22} organization of supply and procurement of material resources; a_{A23} control of procurement and supply of material resources.

In the model (6) the output function has the form $\psi_{A_2} : A_{A_2} \times V_{A_2} \rightarrow O_{A_2}$, the graphical representation is shown in fig. 4.

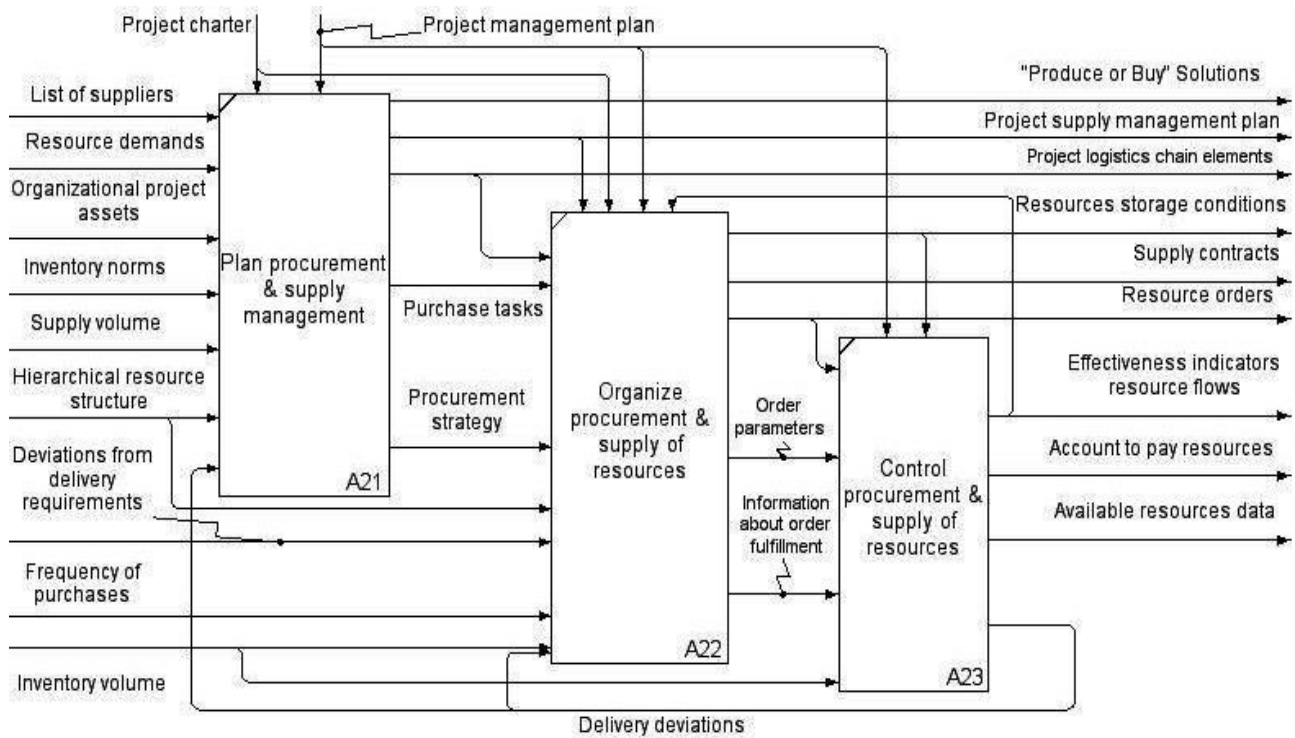


Fig. 4. Graphical presentation of the function ψ subprocess of procurement and supply management of material resources

Unlike others, subprocess A_2 may be related to existing legal obligations and penalties. This subprocess can be started at the initial phase of the project life cycle,

when developing its feasibility study, then at the planning stage, when the need for material resources is specified, the possibilities of providing them are assessed [13].

Personnel in charge of procurement and supply of material resources may not always be a member of the project team [4].

The most common tools and methods for implementing this subprocess are [4, 6, 13]:

- expert assessments;
- data collection and analysis;
- inspections and audits.

The model of information flows of the subprocess of distribution of material resources of the project has the form:

$$I_{-A_3} = (V_{A_3}, Z_{A_3}, \varphi_{A_3}, A_{A_3}, O_{A_3}, \psi_{A_3}), \quad (7)$$

where $V_{A_3} = \{v_1^{A_3}, v_2^{A_3}, \dots, v_7^{A_3}\}$ is a set of input data, which consists of assets of the organizational process ($v_1^{A_3}$), conditions for saving resources ($v_2^{A_3}$), supply contracts ($v_3^{A_3}$), elements of the logistics chain of the project ($v_4^{A_3}$), data on available resources ($v_5^{A_3}$), orders for resources ($v_6^{A_3}$), decisions to "produce or purchase" ($v_7^{A_3}$);

$Z_{A_3} = \{z_1^{A_3}, z_2^{A_3}\}$ – a set of documents that regulate the subprocess, which is determined by the project supply

management plan ($z_1^{A_3}$) and resource efficiency indicators ($z_2^{A_3}$);

$O_{A_3} = \{o_1^{A_3}, o_2^{A_3}, \dots, o_5^{A_3}\}$ – the set of source data formed by the structure of the logistics chain of the project ($o_1^{A_3}$), the decision to save resources ($o_2^{A_3}$), the project supply management plan (update) ($o_3^{A_3}$), the consolidated calendar of resources ($o_4^{A_3}$), deviations from the supply requirements ($o_5^{A_3}$);

$A_{A_3} = \{a_{A31}, a_{A32}, a_{A33}\}$ – the set of subprocess operations, which in accordance with table 2 determine a_{A31} as a planning the management of resource allocation in the logistics chain of the project, a_{A32} – the organization of resource delivery to the place of application; a_{A33} – controlling the distribution of material resources.

In model (7) the output function is given by the mapping: $\psi_{A_3} : A_{A_3} \times V_{A_3} \rightarrow O_{A_3}$. Its graphical representation is shown in fig. 5.

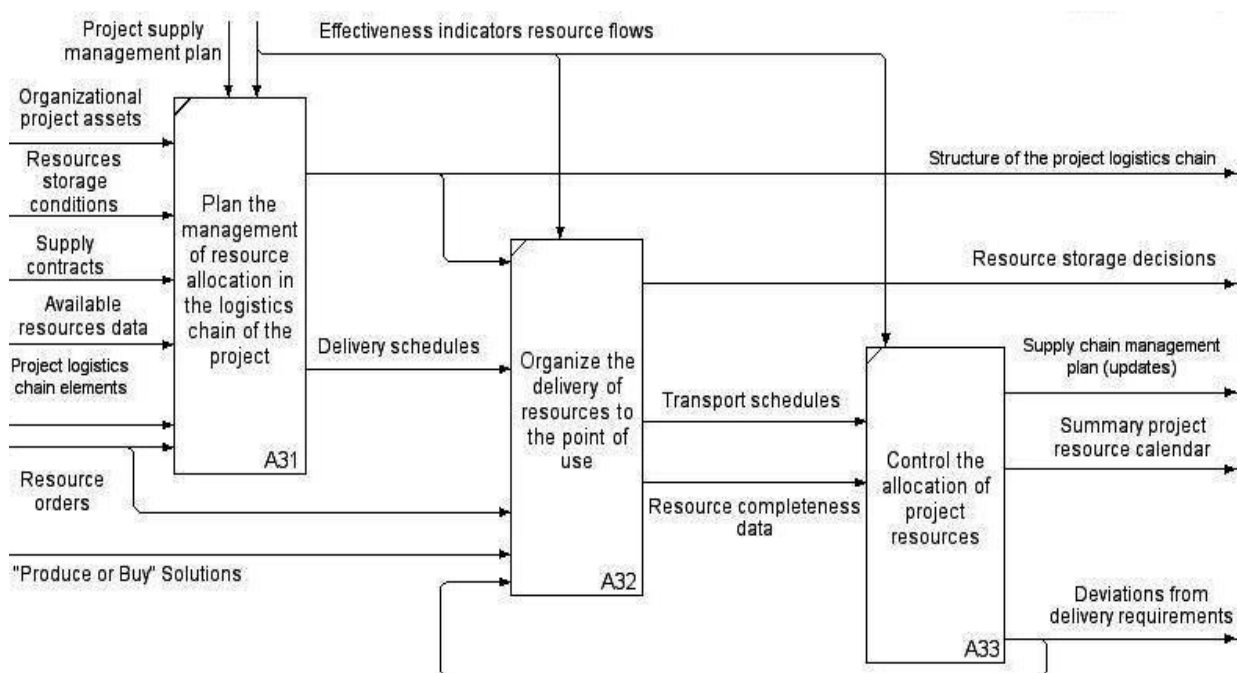


Fig. 5. Graphic view of the function ψ subprocess of allocation of material resources of the project

Implementation of subprocess A_3 is aimed at solving a number of problems, among which we highlight [9, 13]:

- creation of delivery schedules;
- development of decisions regarding the structure of the logistics chain of the development project, which is created during the movement of material resources from supplier to consumer;
- organization of transport flows on the basis of transport work schedules;

- substantiation of decisions on storage of resources and their completeness and organization of storage.

Therefore, the main tools and methods of the subprocess of allocation of material resources of the project are:

- expert assessments;
- data display methods;
- grid methods;
- project management software;
- methods of logistics.

Project inventory management refers to monitoring and making decisions to save time and money by minimizing the retention costs required to implement the project effectively. The goal of the inventory management system is to ensure the continuous execution of the project by supplying resources at the scheduled quality date with minimal maintenance costs [9, 14, 15].

The model of information flows of the A_4 subprocess has the form:

$$I_{-A_4} = (V_{A_4}, Z_{A_4}, \varphi_{A_4}, A_{A_4}, O_{A_4}, \psi_{A_4}), \quad (8)$$

where $V_{A_4} = \{v_1^{A_4}, v_2^{A_4}, \dots, v_6^{A_4}\}$ is the set of input data formed by: consolidated resource calendar ($v_1^{A_4}$), hierarchical structure of resources ($v_2^{A_4}$), data on available resources ($v_3^{A_4}$), resource conservation decisions ($v_4^{A_4}$), project logistics chain structure ($v_5^{A_4}$), resource conservation conditions ($v_6^{A_4}$);

$Z_{A_4} = \{z_1^{A_4}, z_2^{A_4}\}$ – a set of documents regulating the

subprocess, which consists of stock standards ($z_1^{A_4}$) and an updated supply management plan ($z_2^{A_4}$);

$O_{A_4} = \{o_1^{A_4}, o_2^{A_4}, \dots, o_7^{A_4}\}$ – a set of input data consisting of an updated resource summary calendar ($o_1^{A_4}$), supply quantities ($o_2^{A_4}$), inventory quantity ($o_3^{A_4}$), purchasing frequency ($o_4^{A_4}$), project resource summary plan ($o_5^{A_4}$), updated supply chain structure ($o_6^{A_4}$), inventory dynamics data ($o_7^{A_4}$);

$A_{A_4} = \{a_{A41}, a_{A42}, a_{A43}\}$ – the set of operations of the subprocess, which according to table 2 define a_{A41} project resource inventory management planning, a_{A42} – regulation of the level of resource stocks; a_{A43} – monitoring inventory management performance indicators.

In model (8), the output function has the form: $\psi_{A_4} : A_{A_4} \times V_{A_4} \rightarrow O_{A_4}$; its graphical representation is shown in fig. 6.

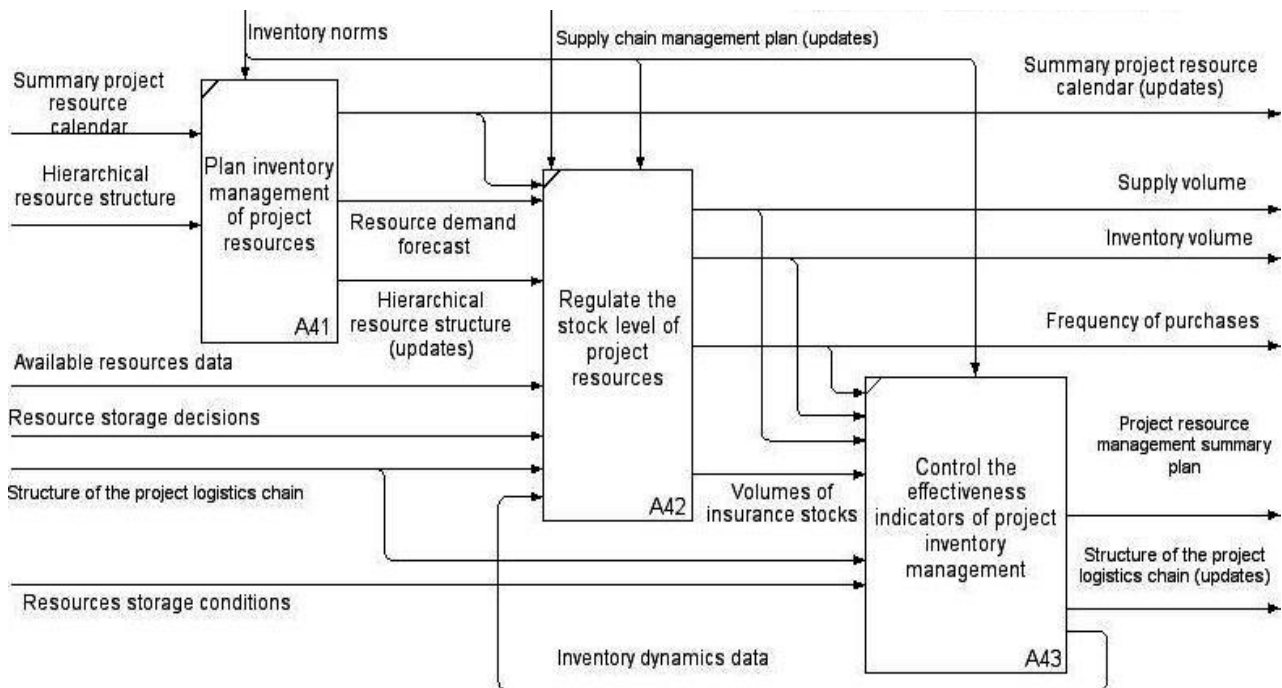


Fig. 6. Graphical view of the function ψ subprocess of inventory management of material resources of the project

It is easy to notice that the main tasks of the subprocess of inventory management of the project are atypical for project management. This determines that the tools and methods used to implement this sub-process are more applicable in logistics [11, 12, 15]. Among them we note:

- methods of selective management;
- methods of linear and dynamic programming;
- forecasting methods;
- methods of inventory management theory;
- methods of logistics.

Conclusions and prospects for further development

An analysis of the project resource management processes described in the project management methodologies, in particular in PMBoK, showed that human and material resource management issues are not separated, and among other project resource issues, only procurement management issues are considered. This can lead to negative consequences in management and, for some projects, become a prerequisite for the deterioration of the financial stability of the project, slow down the pace of business activity, and increase the risks of exceeding

the project budget and deadlines. It is noted that the solution to this problem depends on the management of material resources of the project – processes that have a significant impact on the cost of the project, its schedule, risks, quality.

In order to adopt more thorough management decisions, it is proposed to allocate a separate field of knowledge, in which the processes of management of material resources are formed, their possible connection with PMBoK processes is shown. Formal representations of processes that make up management of material resources of the project are formed based on a process approach. The inputs and exits are identified, the relationships with other processes of the defined field of

knowledge are shown, the main recommended tools and methods are shown.

Thus, the principles are generalized and an approach is applied that is applicable in the field of project management, which formalizes and structures the processes of material resources management of the project so that they can be used in many projects. This approach, based on processes, is integrated into project management, contains a description of the knowledge required for the organization and implementation of activities to provide material resources of the project.

The results obtained can be useful in project management at any stage of the life cycle.

References

- Chand, Sh., Singh, H., Ray, T. (2019), "Evolving heuristics for the resource constrained project scheduling problem with dynamic resource disruptions", *Swarm and Evolutionary Computation*, Vol. 44, P. 897–912. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2018.09.007>
- Markou, Ch., Koulinas, G. K., Vavatsikos, A. P. (2017), "Project resources scheduling and leveling using Multi-Attribute Decision Models: Models implementation and case study", *Expert Systems with Applications*, Vol. 77, P. 160–169. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.01.035>
- Teslya, Yu. N., Egorchenkova, A. V., Egorchenkova, N. Yu., Kataev, D. S. (2012), "Product Planning Systems Projects" ["Produktovyye sistemyi planirovaniya proektov"], *Project Management and Production Development*, No. 1 (41), P. 13–19.
- National standard (2017), "Guide of project management body of knowledge" ["Rukovodstvo k svodu znaniy po upravleniyu proektami (Rukovodstvo PMBOK)"], Project Management Institute, Inc.
- Mishra, Pr., Mishra, P., Purohit, R. (2018), "Material delivery problems in construction projects: A possible solution", *Materials today: proceeding of 7th Int. Conf. of Materials Processing and Characterization*, Vol. 5, Issue 2, Part 1, P. 6497–6501. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.01.135>
- National standard (2004), "Guide of project management body of knowledge" ["Rukovodstvo k svodu znaniy po upravleniyu proektami (Rukovodstvo PMBOK)"], Project Management Institute, Inc.
- Matos, P.V., Romão, M., Sarmiento, J. M., Abaladas, A. (2019), "The adoption of project management methodologies and tools by NGOs: A mixed methods perspective", *Journal of Business Research*, Vol. 101, P. 651–659. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.01.067>
- Tunji-Olayeni, P. F., Afolabi, A. O., Eshofonia, E. E., Ayim, B. A. (2018), "Dataset for material logistics on construction sites", *Data in Brief*, Vol. 20, P. 1142–1147. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.08.194>
- Danshyna, S. Yu. (2018), "Methodological support for managing material resources management of development projects" ["Metodolohichne zabezpechennia protsesu upravlinnia materialnyimi resursamy proektu rozvytku"], *Mathematical models and latest management technologies for economic and technical systems: collective monograph*, edited by I. Chumachenko, V. Timofeyev, Kharkiv, P. 79–88.
- Danshyna, S., Fedorovich, O., Djakons, D. (2020), "Formalization of the processes of projects for the development of high-tech enterprises", *Intelligent computer-integrated information technology in project and program management: collective monograph*, edited by I. Linde, I. Chumachenko, V. Timofeyev, Riga, P. 23–28. DOI: <https://doi.org/10.30837/MMP.2020.023>
- Rolfe, B. (2013), "Doing Project Management Ironically", *Procedia – Social and Behavioral Science*, Vol. 74, P. 264–273. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.03.022>
- de Vries, J. (2020), "Identifying inventory project management conflicts: Results of an empirical study", *International Journal of Product Economics*, Vol. 226, P. 897–912. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107620>
- Mazur, I., Shapiro, V., Olderogge, N., Polkovnikov, A. (2011), *Project management [Upravlenie proektami]*, Moscow, 960 p.
- Meyer, Ch. M., Garsia Torres, E. L. (2019), "Success Factors for Supply Chain Management Projects: An Empirical Analysis", *Proceeding of 9th IFAC Conf. on Manufacturing, Modelling, Management and Control "MIM-2019"*, Berlin, Germany, Vol. 52, Issue 13, P. 153–158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.168>
- Trojet, M., H'Mida, F., Lopez, P. (2011), "Project scheduling under resource constraints: Application of the cumulative global constraint in a decision support framework", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 61, Issue 2, P. 357–363. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2010.08.014>

Received 10.02.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Даншина Світлана Юрїївна – кандидат технічних наук, доцент, Національний аерокосмічний університет імені М. С. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", доцент кафедри геоінформаційних технологій та космічного моніторингу Землі, Харків, Україна; email: s.danshyna@khai.edu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7354-4146>.

Даншина Светлана Юрьевна – кандидат технических наук, доцент, Национальный аэрокосмический университет имени Н. Е. Жуковского "Харьковский авиационный институт", доцент кафедры геоинформационных технологий и космического мониторинга Земли, Харьков, Украина.

Danshyna Svitlana – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Associate Professor of the Department of Geo-Information Technologies and Space Monitoring of the Earth, Kharkiv, Ukraine.

УЗАГАЛЬНЕНИЙ ПІДХІД ДО УПРАВЛІННЯ МАТЕРІАЛЬНИМИ РЕСУРСАМИ ПРОЄКТУ

Предметом дослідження в статті є процеси управління матеріальними ресурсами проєкту. **Мета** роботи – формування узагальненого підходу до управління матеріальними ресурсами проєкту шляхом визначення та формалізації процесів управління ними. В статті вирішуються такі **завдання**: ґрунтуючись на процесному підході, сформовано процеси управління матеріальними ресурсами проєкту; визначено місце процесів управління матеріальними ресурсами проєкту в структурі РМВоК та інтегровано їх з іншими процесами управління проєктами; наведено формалізоване представлення процесів управління матеріальними ресурсами проєкту; визначено інструменти та методи управління матеріальними ресурсами проєкту. Використовуються загальнонаукові **методи** системного аналізу, теорії прийняття рішень, теорії управління запасами. Отримано такі **результати**: з метою прийняття більш ґрунтовних управлінських рішень запропоновано виділити окрему галузь знань, в рамках якої сформовано процеси управління матеріальними ресурсами проєкту, показано їх можливий зв'язок з групами процесів РМВоК. Базуючись на процесному підході, розроблено формалізоване представлення процесів, що складають управління матеріальними ресурсами проєкту. Для них визначено входи та виходи, показано взаємозв'язки з іншими процесами визначеної галузі знань, наведено основні рекомендовані інструменти та методи. **Висновки**: проаналізовано процеси управління ресурсами проєкту, описані в методології РМВоК, що дало змогу сформувати можливі напрямки покращення ресурсного забезпечення проєкту. Зазначено, що рішення цієї проблеми залежить від управління матеріальними ресурсами проєкту. Виділено окрему галузь знань, в рамках якої сформовано процеси управління матеріальними ресурсами проєкту – процеси оцінювання матеріальних ресурсів, управління закупівлями та постачанням, розподілення матеріальних ресурсів, управління запасами матеріальних ресурсів. Для них визначено входи та виходи, показано взаємозв'язки з іншими процесами визначеної галузі знань, наведено основні рекомендовані інструменти та методи. Отримані результати можуть бути корисними при управлінні проєктами на будь-якому етапі життєвого циклу.

Ключові слова: проєктний менеджмент; невідтворювальні ресурси проєкту; процеси проєкту; модель інформаційних потоків процесу.

ОБОБЩЕННЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ МАТЕРИАЛЬНЫМИ РЕСУРСАМИ ПРОЕКТА

Предметом исследования в статье являются процессы управления материальными ресурсами проекта. **Цель** работы – формирование обобщенного подхода к управлению материальными ресурсами проекта путем определения и формализации процессов управления ними. В статье решаются следующие **задачи**: основываясь на процессном подходе, сформированы процессы управления материальными ресурсами проекта; определено их место в структуре РМВоК, их интегрировано с другими процессами управления проектам; приведено формализованное представление процессов управления материальными ресурсами проекта; определены инструменты и методы управления материальными ресурсами проекта. Используются **методы** системного анализа, теории принятия решений, теории управления запасами. Получены следующие **результаты**: с целью принятия обоснованных управленческих решений предложено выделить отдельную область знаний, в рамках которой сформированы процессы управления материальными ресурсами проекта, показана их возможная связь с группами процессов РМВоК. Основываясь на процессном подходе, разработано формализованное представление процессов, являющихся составляющими управления материальными ресурсами проекта. Для них определены входы и выходы, показаны взаимосвязи с другими процессами определенной области знаний, приведены основные рекомендуемые инструменты и методы. **Выводы**: проанализированы процессы управления ресурсами проекта, описанные в методологии РМВоК. Это позволило сформировать возможные направления улучшения ресурсного обеспечения проекта. При этом отмечено, что решение этой проблемы зависит от управления материальными ресурсами проекта. Выделена отдельная область знаний, в рамках которой сформированы процессы управления материальными ресурсами проекта - процессы оценки материальных ресурсов, управления закупками и поставками, распределения материальных ресурсов, управления запасами материальных ресурсов. Для них определены входы и выходы, показаны взаимосвязи с другими процессами определенной области знаний, приведены основные рекомендуемые инструменты и методы. Полученные результаты могут быть полезными при управлении проектами на любом этапе жизненного цикла.

Ключевые слова: проектный менеджмент; невозпроизводимые ресурсы проекта; процессы проекта; модель информационных потоков процесса.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Даншина С. Ю. Узагальнений підхід до управління матеріальними ресурсами проєкту. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 1 (15). С. 43–52. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.043>

Danshyna, S. (2021), "General approach to project material resources management", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (15), P. 43–52. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.043>

D. ZOLOTARIOV

THE MECHANISM FOR CREATION OF EVENT-DRIVEN APPLICATIONS BASED ON WOLFRAM MATHEMATICA AND APACHE KAFKA

The article is devoted to the research and development of the mechanism of interaction between Wolfram Mathematica programs and Apache Kafka queue to provide the ability to build event-driven applications based on it. The **subject** of the research is the practical principles of building a mechanism for interaction between Wolfram Mathematica and Apache Kafka. The **purpose** of the article is to develop and substantiate practical recommendations regarding the formation of a mechanism for publishing messages to the Apache Kafka queue and reading messages from it for programs of the mathematical processor Wolfram Mathematica, which will make it possible to build event-driven applications. **Tasks**: to determine the mechanism of such interaction, prove the choice of tools for its implementation, create and test the obtained results. The research used the following **tools**: Apache Kafka, Kafkacat, the method of developing the Wolfram Mathematica package. The **results** of the research: the mechanism of interaction between Wolfram Mathematica and Apache Kafka was determined and the corresponding toolkit was created on its basis in the form of two Mathematica packages, which are built on using Apache Kafka as a queue client and third-party Kafkacat software, respectively. It is shown that the first option is less reliable and consumes much more computer resources during operation. It has been demonstrated that the Mathematica processor is currently not suitable in its pure form for real-time data analysis. Recommendations are given regarding the use of built-in compilation functions to increase the speed of such processing. **Conclusions**. Practical recommendations have been developed and substantiated regarding the formation of the mechanism of interaction between the Wolfram Mathematica mathematical processor and the Apache Kafka queue manager for the possibility of working in two directions with the queue: publishing messages and reading them. A toolkit for such interaction in the form of Mathematica packages has been created, their capabilities have been demonstrated, as well as comparison with each other. The economic benefit of using the described tools is shown. Future ways of its improvement are given.

Keywords: event-driven applications; queue manager; mathematical processor; saving resources and funds; Kafka; Mathematica.

Introduction

Recent years have been marked by the rapid development of micro service architecture and the distributed processing of information in real or near real time. This is primarily due to the development and improvement of data delivery mechanisms such as queue managers.

Based on them, such event-driven products are built as: IoT [1-2], which work with the flow of messages from "smart" things; web platforms [3] that display the results of receiving or processing events to the end user; data processing pipelines [4-7], responding to events of different nature, and others. The peculiarity of such systems is that they focus not so much on reducing the processing time of each individual event and bringing it closer to real time, but on the guaranteed and clear sequence of interconnected events and guarantees the processing of each of them. The latter comes to the fore because event generators and consumers are often completely technologically and algorithmically independent, and can also be located in space at a considerable distance from each other. In addition, consumers - queue data points - can appear in the system as needed, change at any time, and be excluded from it when they are no longer needed. The consequence of this feature is that the number of queue clients is limited only by the capacity of the queue managers' servers.

One of the most popular, fault-tolerant and powerful queue managers at the moment is Apache Kafka. It allows you to build a distributed system of brokers (managers) of the queue, which is able not only to dynamically adapt to the load from the queue customers of both types (generators and consumers), but also easily scale both vertically and horizontally.

The benefits of event-oriented architecture are increasingly being appreciated beyond the development of commercial products. One of the promising areas is the processing of such a message flow by mathematical processors, which allows you to use their full range of tools for analysis. For example, the implementation of the study of data obtained from Kafka in the mathematical package MathWorks MATLAB is already underway [8] and has a fairly rich functionality.

The Wolfram Mathematica processor is one of the world leaders in the field of symbolic and numerical data processing and is used in almost every field of knowledge and science, which is clearly seen, for example, in publications [9-12], where this matpacket is used to solve different areas of applied technology. Therefore, the construction of event-driven products based on it is an urgent task.

But there is still no effective and reliable mechanism for connecting this math processor and Kafka to receive or publish data. There is a single undocumented MQTTLink package [13] for the MQTT protocol (mosquitto), which, through third-party software, allows you to connect to a Kafka cluster. But it does not guarantee correct operation [14].

Therefore, the **purpose** of this article is to develop and substantiate practical recommendations for the formation of the mechanism of interaction between the mathematical processor Wolfram Mathematica and the queue manager Apache Kafka to work in two directions: publishing messages in the queue and consuming messages from it – which will build event-driven applications in Mathematica. The **task** of the article is to identify the necessary elements of such a mechanism and justify the choice of tools for their construction.

Using Apache Kafka

The Mathematica mat package itself, as mentioned above, does not have built-in interoperability with Kafka. And the easiest way to organize this interaction is to locally install Apache Kafka software on the client computer as a queue client and interact with the queue through it. The diagram of the system constructed on such approach is given in fig. 1. It should be noted that Kafka also requires the installation of a Java code execution platform. It should also be borne in mind that currently Kafka developers do not guarantee the correct operation of all components of their platform on Windows [15].

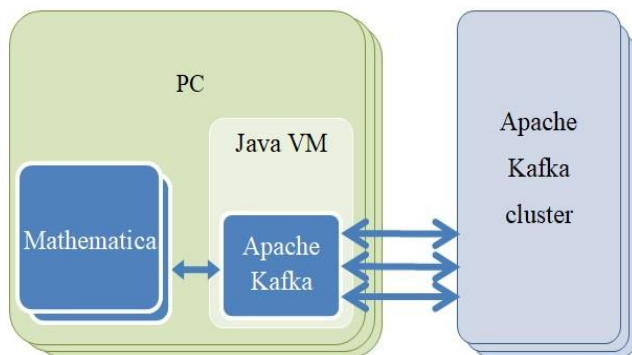


Fig. 1. Connecting to a Kafka cluster via a local Apache Kafka installation as a client

Scripts from the `"/ bin /"` subdirectory for Linux systems and `"/ bin / windows /"` for Windows systems in

```
Run["echo \"" < key < ":" < value < "\" | kafka-console-producer.bat ... "
< " --property \"parse.key=true\" --property \"key.separator=:\""];
```

The publication is made in the form of `"key: value"`, which is indicated by two arguments of the script with the prefix `--property`. Moreover, the `"value"` should not have time transfers. The function is a call to the `echo`

```
Run["kafka-topics.bat ... --create"];
```

To read from a data stream in Mathematica, use the `Read` function, the parameters of which are the file name and read mode: `string`, `write`, `word`, and others. But if you put an exclamation point at the beginning of the file name, it will be treated as a command to execute and the `Read` function will return its output to the standard stream. Also, instead of the file name, you can pass the handle of the

```
stream = OpenRead["!kafka-console-consumer.bat ... --from-beginning"];
While[True,{
  Check[str=Read[stream,String], Break[]];
  If[str===EndOfFile || callback[str]===False, Break[]];
}];
Close[stream];
```

The above construction opens a data stream initiated by the script `"kafka-console-consumer.bat"` and reads in an infinite loop. Each message is processed by a user function in the callback variable. In this case, the simplest way to break messages is used – as a text string by hyphenation of the line `"\n"`. But if the messages contain such characters, it is possible to switch the reading mode

the Kafka installation directory are used for publishing, reading messages, and other operations in turn. For certainty, we will consider only Windows as a client, for Linux the difference will be only in the extension of scripts `".sh"`.

The publishing operation is a one-time execution of the instant termination script `"kafka-console-producer.bat"`, which is performed each time to send a separate message to the queue, which is read from the standard input stream (`stdin`). Read operation - one-time execution of the script `"kafka-console-consumer.bat"` without completion, which is an endless process of reading messages from the queue and output them to the standard output stream (`stdout`). The main parameters of all scripts are: `--bootstrap-server` - a comma-separated list of bootstrap servers to connect to the Kafka cluster, and `--topic` - the name of a specific queue. Hereinafter, these general parameters in the code are replaced by three dots for brevity.

Therefore, the construction of the mechanism of interaction of Mathematica with the Kafka cluster should be based on the use of built-in functions of executing external applications and reading streaming data that work with standard input and output streams.

To run external applications from a Mathematica document, use the `Run` function, the only parameter of which is the command to execute. The function of publishing in turn built on its basis looks as follows.

environment command, which provides data for publication to the Kafka script input.

Creating and deleting queues is done in a similar way, for example, creating:

thread opened by the `OpenRead` function, which takes in the file name with all the comments above. The mechanism of operation of the `Read` function is such that it does not end until the data flow reaches the value of `EndOfFile`, i.e. does not end. The reading of queue data based on it is given below.

to `"Record"` and set in the `RecordSeparators` option of the `Read` function a valid character for dividing the flow into messages. The use of the intermediate function `OpenRead` is intended to obtain a flow descriptor for its correct closure by the function `Close`, however, as mentioned above, you can pass the command directly by the first argument to the function `Read`. In the latter case, the

thread will be closed only when the current Mathematica kernel is closed.

For ease of distribution and use, the developed functions based on the above are designed in the form of Mathematica package "KafkaLocalLink", which is built in a standard way and has the following structure of files and directories, shown in fig.2.



Fig. 2. The structure of the directories of the Mathematica package of interaction with Kafka

Each of the Consume.m and Produce.m files has descriptions of the function of obtaining a list of queue names and their specialized ones. The first is reading, the second is deleting, creating a queue, and publishing to it.

The advantages of separating the developed program code into a package include the possibility of its dynamic loading in Mathematica.

Using Kafkacat

An alternative approach to publishing to the Kafka queue might be to install Kafkacat [16] on the client, a third-party software for connecting to a Kafka cluster that does not require the Java platform but requires Windows version 10 with Windows Subsystem for installed and configured. Linux (WSL) [17] based on Ubuntu. The diagram of the system built on the use of Kafkacat is shown in fig. 3.

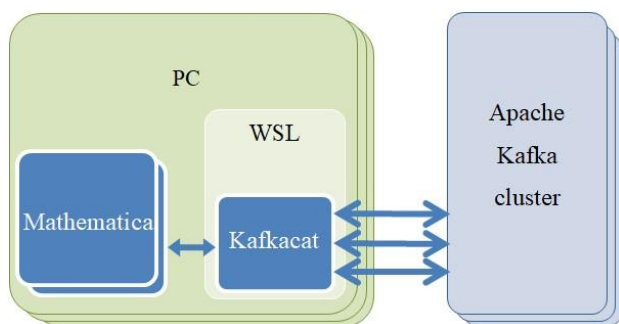


Fig. 3. Connecting to a cluster via a local Kafkacat installation

In terms of built-in features, this application is not inferior to the original Apache Kafka software, but much more convenient to use.

A similar package for Mathematica is based on it. Which differs only in the following remarks. The publishing team in the queue will look much shorter:

```
"... | kafkacat -P -K: -b ... -t ..."
```

The argument "-P" includes publishing mode, "-K" - sets the colon as a separator between the key and the value of the message, the last "-b" and "-t" - are completely similar to "--bootstrap-server" and "--topic".

The reading command from the queue will look like this:

```
"!kafkacat -C -J -u -q -b ... -t ..."
```

Where the argument "-C" includes read mode, "-J" - receive a message in full JSON-format, "-u" - switches to unbuffered output mode, "-q" - excludes the output of service information.

As mentioned above, using the "-J" parameter for Kafkacat returns a string that is a JSON object with complete information about the message from the queue: publication time, key, values, headers, offsets, and more. But Mathematica does not have a built-in convenient mechanism for working with the JSON format, so to process this string and get from it the fields "key" (message key) and "payload" (message text) you need to use the following approach:

```
json = ImportString[str, "JSON"];
key = "key" /. json;
```

Similar constructs are used to retrieve other fields from the object, such as "headers", "offset" or "ts".

Work demonstration and comparison

To implement the experiment, two Mathematica documents were created on the client computer: a generator and a reader. Each of them has its own core of the mathematical processor, which is allocated its own core of the CPU - for guaranteed parallel and independent document processing. The first developed package was used to connect to the Apache Kafka cluster. After receiving the results, the queue was deleted and the second Kafkacat-based package was used.

As a platform for the deployment of the queue, cloud technologies DigitalOcean were chosen, which is one of the world leaders, where servers based on Ubuntu 20.04 LTS x64 OS were located, which proved to be a reliable and fast platform in previous developments [20].

To demonstrate the operation of the developed tools for building event-driven programs in Mathematica, the generation of an arbitrary number in the range [-50.50] is selected, repeated 100 times with a delay of one second. A small number of iterations are chosen for the convenience of plotting.

The content of the experiment is as follows: on the publication side, an arbitrary number is generated and added to the end of the points array, which has a dynamic update (via the Dynamic function) in the document, and is sent to the queue. At the same time, the client-reader receives a message with this number, adds it to its array, which automatically leads to the restructuring of the graph based on it, which also has a dynamic output. The graph is constructed by the ListPlot function for the entire definition area [1,100] and with the option

"InterpolationOrder -> 2", which at the boundary points leads to the output values from the original range of values [-50.50] and serves as an additional load on message processing.

Since the client can only connect to a queue that already exists, the first to run was a document with the

publication of messages, which first creates a queue, followed by a reader document. The result obtained at the same time for both documents for the package with Kafkacat is shown in fig. 4.

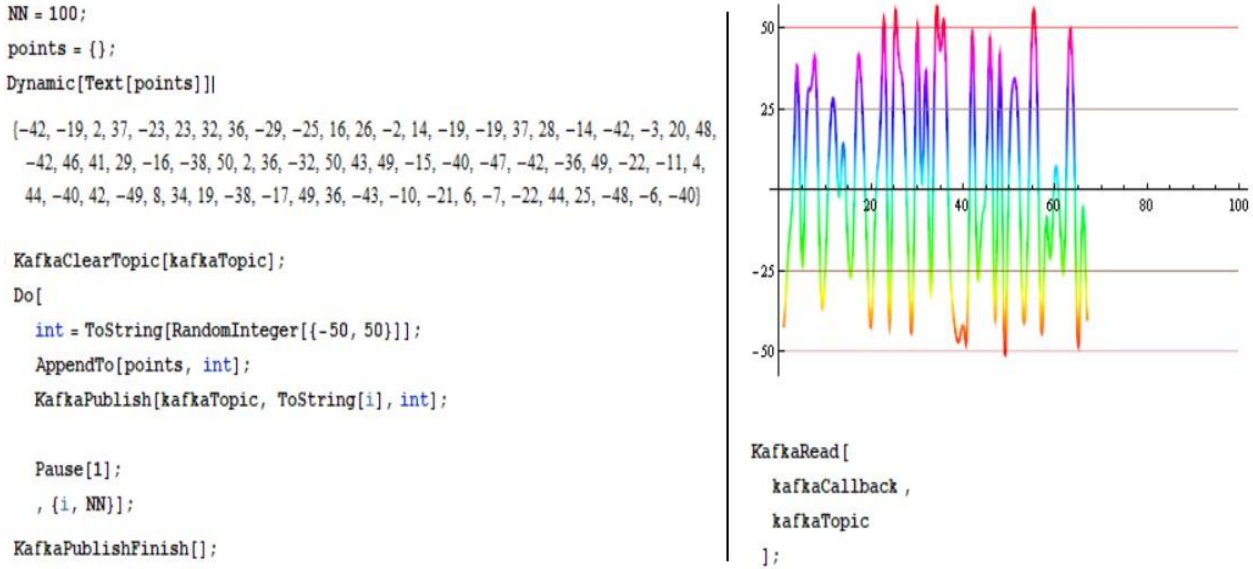


Fig. 4. Simultaneous publishing (right) and reading from the same queue (left) using the Kafkacat-based package

The figure above shows that the client-reader does not lag behind the client-generator. But in real time it is clear that such a lag is still there, although insignificant. The main delay that has been shown in the simulation is the updating of dynamic objects in the document: for the text field when publishing - imperceptible, for graphics - about 0.2s, which is visible to the eye. With more complex processing operations, the delays will be even greater.

This in turn indicates that the Mathematica package is not yet designed for real-time data analysis and cannot handle critical operations. For complex data stream

analysis tasks, it is recommended to use in Mathematica compilation of functions in WVM bytecode or even C, which in practice [21] can increase its execution speed from 2 to 10 times or more depending on the input function being compiled.

The comparison of the speed of the developed packages is as follows. For publication, only the publication of data in the queue is selected as the most resource-intensive process. The experiment described above was repeated 15 times for each developed package to exclude measurement error. The measurement results were averaged. They are given in table 1.

Table 1. Consumption of computer resources by clients of the Kafka queue

Name	Using OM (MB)	CPU time usage (%)
Package based on Apache Kafka	132	79,3
Package based on Kafkacat	5	0,5

This clearly shows that Kafkacat is much faster to perform and more economical to operate, because it requires almost an order of magnitude less computer resources.

Prospects for further development of the system

Prospects for further development of the developed tools are the following improvements.

Due to the fact that the queue never ends and because of this, the program will never receive an EndOfFile signal during normal operation, it seems promising to develop an additional mechanism for forcibly exiting queue messages by the client-reader on a signal from the client-generator or in any other way, as well as to include in the package processing service fields

"headers" from a JSON object describing the message in Kafkacat.

Disadvantages of this tool include the installation and configuration of multiple components on the Kafka cluster client computer. In addition, a direct connection to the Kafka cluster is associated with the following complications - each client needs to know the IP addresses of bootstrap servers, have authorization data on all servers in the cluster and know all the necessary settings to work with them. Therefore, it seems promising to transfer this component of the mechanism of interaction from cluster clients to a separate server, which will act as an intermediary, hiding all the settings of interaction with the cluster and authentication.

Conclusions

The paper develops and substantiates practical recommendations for the formation of the mechanism of interaction of the mathematical processor Wolfram Mathematica and the queue manager Apache Kafka for the possibility of working in two directions: publishing messages in the queue and consuming messages from it.

Appropriate tools have been created in the form of two Mathematica packages, built on the use of Apache Kafka as a queue client and third-party Kafkacat software, respectively.

It is shown that the first option is less reliable and requires much more machine resources during operation.

It has been demonstrated that the Mathematica processor is not currently suitable in its pure form for real-time queue data analysis. Recommendations for using built-in compilation features to increase message processing speed are given.

The economic benefit of using the described tools is achieved due to the possibility of developing powerful data analyzers from the Kafka queue with a relatively easy-to-learn Mathematica processor instead of developing narrowly specialized tools. And also due to fast and flexible updating of such program in a matpacket which can be changed at any moment and started at once on execution.

References

- Ed-daoudy, A., Maalmi, K. (2019), "A new Internet of Things architecture for real-time prediction of various diseases using machine learning on big data environment", *Journal of Big Data*, Vol. 6, No. 104. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0271-7>
- Mahapatra, T. (2020), "Composing high-level stream processing pipelines", *Journal of Big Data*, Vol. 7, No. 81. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40537-020-00353-2>
- Nasiri, H., Nasehi, S., Goudarzi, M. (2019), "Evaluation of distributed stream processing frameworks for IoT applications in Smart Cities", *Journal of Big Data*, Vol. 6, No. 52. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0215-2>
- Jung, S., Kim, Y., Hwang, E. (2018), "Real-time car tracking system based on surveillance videos", *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, Vol. 2018, No. 133. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13640-018-0374-7>
- Ismail, A., Truong, H. L., Kastner, W. (2019), "Manufacturing process data analysis pipelines: a requirements analysis and survey", *Journal of Big Data*, Vol. 6, No. 1. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40537-018-0162-3>
- Kim, Y. K., Kim, Y., Jeong, C. S. (2018), "RIDE: real-time massive image processing platform on distributed environment", *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, Vol. 2018, No. 39. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13640-018-0279-5>
- Kolajo, T., Daramola, O., Adebisi, A. (2019), "Big data stream analysis: a systematic literature review", *Journal of Big Data*, Vol. 6, No. 47. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0210-7>
- GitHub (2020), "Mathworks-ref-arch/matlab-apache-kafka: MATLAB Interface for Apache Kafka", available at: <https://github.com/mathworks-ref-arch/matlab-apache-kafka> (last accessed 10 December 2020).
- Rehman, S., Idrees, M., Shah, R. A. et al. (2019), "Suction/injection effects on an unsteady MHD Casson thin film flow with slip and uniform thickness over a stretching sheet along variable flow properties", *Boundary Value Problems*, Vol. 2019, No. 26. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13661-019-1133-0>
- Ghorbani, M. A., Singh, V. P., Sivakumar, B. et al. (2017), "Probability distribution functions for unit hydrographs with optimization using genetic algorithm", *Applied Water Science*, Vol. 7, P. 663–676. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13201-015-0278-y>
- DeCanio, S. J. (2020), "Can an AI learn political theory?", *AI Perspectives*, Vol. 2, Article 3. DOI: <https://doi.org/10.1186/s42467-020-00007-2>
- You, X., Chen, D. R. (2018), "A new sequence convergent to Euler–Mascheroni constant", *Journal of Inequalities and Applications*, Vol. 2018, Article 75. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13660-018-1670-6>
- Mathematica Stack Exchange (2020), "Networking - Connect Mathematica to message broker - Kafka, NATS or mosquitto", available at: <https://mathematica.stackexchange.com/questions/199848/connect-mathematica-to-message-broker-kafka-nats-or-mosquitto> (last accessed 10 December 2020).
- Mathematica Stack Exchange (2020), "Networking - MQTTLink TopicSubscribe[] cannot receive messages", available at: <https://mathematica.stackexchange.com/questions/211940/mqttlink-topicsubscribe-cannot-receive-messages> (last accessed 10 December 2020).
- Apache Kafka (2020), "Apache Kafka", available at: <https://kafka.apache.org/documentation/#os> (last accessed 10 December 2020).
- GitHub (2020), "Edenhill/kafkacat: Generic command line non-JVM Apache Kafka producer and consumer", available at: <https://github.com/edenhill/kafkacat> (last accessed 10 December 2020).
- Microsoft Docs (2020), "An overview on the Windows Subsystem for Linux", available at: <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/wsl/> (last accessed 10 December 2020).
- Stack Overflow (2020), "Kafka bootstrap-servers vs zookeeper in kafka-console-consumer", available at: <https://stackoverflow.com/questions/41774446/kafka-bootstrap-servers-vs-zookeeper-in-kafka-console-consumer> (last accessed 10 December 2020).
- Stack Overflow (2020), "Apache kafka - bootstrap-server vs zookeeper params in consumer console", available at: <https://stackoverflow.com/questions/53954877/bootstrap-server-vs-zookeeper-params-in-consumer-console> (last accessed 10 December 2020).
- Zolotariov, D. (2020), "The distributed system of automated computing based on cloud infrastructure", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (14), P. 47–55. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2020.14.047>
- Zolotariov, D. A. (2020), "Automation and optimization of scientific and engineering calculations in Wolfram Mathematica", Kharkiv: FOP Panov A. M. ISBN: 978-617-7859-36-8 [In Ukrainian].

Received 23.12.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Золотарьов Денис Олексійович – кандидат фізико-математичних наук, Харків, Україна; email: denis@zolotariov.org.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4907-7810>.

Золотарів Денис Алексеевич – кандидат фізико-математических наук, Харків, Україна.

Zolotariov Denis – PhD (Physics and Mathematics Sciences), Kharkiv, Ukraine.

РОЗРОБКА МЕХАНІЗМУ ДЛЯ СТВОРЕННЯ КЕРОВАНИХ ПОДІЯМИ ДОДАТКІВ НА БАЗІ WOLFRAM MATHEMATICA ТА APACHE KAFKA

Стаття присвячена дослідженню та розробці механізму взаємодії програм Wolfram Mathematica із менеджером черги Apache Kafka для надання можливості побудови на його основі керованих подіями додатків. **Предметом** дослідження є практичні засади побудови механізму взаємодії Wolfram Mathematica із Apache Kafka. **Метою** статті є розробка та обґрунтування практичних рекомендацій щодо формування механізму публікації повідомлень у чергу Apache Kafka та споживання повідомлень із неї для програм математичного процесору Wolfram Mathematica, що дасть можливість побудови керованих подіями додатків. **Завдання** роботи: визначити механізм такої взаємодії, обґрунтувати вибір інструментів для його реалізації, створити та протестувати отриманий результат. У ході дослідження використано засоби: інформаційні технології Apache Kafka, Kafkacat, спосіб побудови пакету Wolfram Mathematica. **Результати** дослідження: визначений механізм взаємодії Wolfram Mathematica із Apache Kafka та створений відповідний інструментарій на його основі у вигляді двох пакетів Mathematica, що побудовані на використанні Apache Kafka у якості клієнта черги та стороннього програмного забезпечення Kafkacat відповідно. Показано, що перший варіант є менш надійним та потребує значно більше машинних ресурсів під час роботи. Продемонстровано, що на даний момент математичний процесор Mathematica не підходить у чистому вигляді для аналізу даних у реальному часі. Дані рекомендації щодо використання вбудованих функцій компілювання для підвищення швидкості обробки. **Висновки.** Розроблені та обґрунтовані практичні рекомендації щодо формування механізму взаємодії математичного процесору Wolfram Mathematica та менеджеру черги Apache Kafka для можливості роботи у двох напрямках із чергою: публікації повідомлень та їх читання. Створений інструментарій для такої взаємодії у вигляді пакетів Mathematica, продемонстровані їх можливості, а також порівняння між собою. Показана економічна вигода від використання описаного інструментарію. Наведені майбутні шляхи його вдосконалення.

Ключові слова: керовані подіями додатки; менеджери черги; математичний процесор; економія ресурсів та коштів; Kafka; Mathematica.

РАЗРАБОТКА МЕХАНИЗМА ДЛЯ СОЗДАНИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ СОБЫТИЯМИ ПРИЛОЖЕНИЙ НА БАЗЕ WOLFRAM MATHEMATICA И APACHE KAFKA

Статья посвящена исследованию и разработке механизма взаимодействия программ Wolfram Mathematica с менеджером очереди Apache Kafka для предоставления возможности построения на его основе управляемых событиями приложений. **Предметом** исследования являются практические принципы построения механизма взаимодействия Wolfram Mathematica с Apache Kafka. **Целью** статьи является разработка и обоснования практических рекомендаций относительно формирования механизма публикации сообщений в очередь Apache Kafka и чтения сообщений из нее для программ математического процессора Wolfram Mathematica, что даст возможность построения управляемых событиями приложений. **Задача** работы: определить механизм такого взаимодействия, обосновать выбор инструментов для его реализации, создать и протестировать полученный результат. В ходе исследования использованы **средства:** информационные технологии Apache Kafka, Kafkacat, способ разработки пакета Wolfram Mathematica. **Результат** исследования: определен механизм взаимодействия Wolfram Mathematica с Apache Kafka и создан соответствующий инструментарий на его основе в виде двух пакетов Mathematica, которые построены на использовании Apache Kafka в качестве клиента очереди и стороннего программного обеспечения Kafkacat соответственно. Показано, что первый вариант менее надежен и потребляет значительно больше компьютерных ресурсов во время работы. Продемонстрировано, что на данный момент математический процессор Mathematica не подходит в чистом виде для анализа данных в реальном времени. Даны рекомендации относительно использования встроенных функций компилюрования для повышения скорости такой обработки. **Выводы.** Разработаны и обоснованы практические рекомендации относительно формирования механизма взаимодействия математического процессора Wolfram Mathematica и менеджера очереди Apache Kafka для возможности работы в двух направлениях с очередью: публикации сообщений и их чтения. Созданы инструментарий для такого взаимодействия в виде пакетов Mathematica, продемонстрированы их возможности, а также сравнение между собой. Показана экономическая выгода от использования описанного инструментария. Приведены будущие пути его усовершенствования.

Ключевые слова: управляемые событиями приложения; менеджеры очереди; математический процессор; экономия ресурсов и средств; Kafka; Mathematica.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Золотарьов Д. О. Розробка механізму для створення керованих подіями додатків на базі Wolfram Mathematica та Apache Kafka. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 1 (15). С. 53–58. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.053>

Zolotariov, D. (2021), "The mechanism for creation of event-driven applications based on Wolfram Mathematica and Apache Kafka", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (15), P. 53–58. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.053>

O. MALYEYEVA, V. YESIPOV, R. ARTIUKH, V. KOSENKO

IMPLEMENTATION OF A HYBRID METHOD OF SEARCHING FOR CLOSE OBJECTS, TAKING INTO ACCOUNT THE GENERAL AND ACOUSTIC CHARACTERISTICS

The **subject** of research in the article is the methods of finding close objects and technologies of forming recommendations. The **aim** of the article is to develop a recommendation system based on a hybrid method of searching for objects, taking into account both user preferences and audio characteristics of objects. The following **tasks** are solved: analysis of methods and algorithms used in recommendation systems; development of a hybrid method of forming recommendations on the principle of double organization; determination of the main functions and architecture of the system of formation of musical recommendations; testing of calculation algorithms and search methods in the system for analysis of similarity of musical recommendations. The following research **methods** are used: methods of correlation analysis, methods of similarity theory, algorithms of collaborative filtering and content analysis, hybrid methods, methods of analysis of audio characteristics, programming technologies. The following **results** were obtained: A study of collaborative filtering, content-based filtering and hybrid methods. Algorithms and calculation formulas of the considered methods are given. The main audio characteristics of musical compositions are considered. The method of formation of recommendations on the principle of double organization is developed. The main functions of the system of formation of musical recommendations are listed and the diagram of components is formed. An example of calculating the characteristics of user preferences and similarity of musical compositions by audio characteristics is given. **Conclusions:** According to the results of testing the system by three methods, we can conclude that the proposed hybrid method was the most effective among the studied recommendation methods with the lowest standard error rate. In addition, the hybrid method on the principle of double organization solves such problems of existing recommendation methods as excessive similarity of recommendations, potentially small number or no proposals at all by compensating data from one block of data from another.

Keywords: audio characteristics; recommendation system; collaborative filtering; content oriented method.

Introduction

With the receipt of a huge amount of information, it became possible to create models of behavior of certain groups of Internet users, as well as their interests. Recommendation systems facilitate the social process of information exchange and help users to find the most valuable information for them among the large amount of available information (books, articles, web pages, music, etc.) [1]. Recommendation systems have also become key applications in e-commerce, providing suggestions for users to receive the products that best suit their interests, needs and preferences. The recommendation system generates and provides individualized proposals, selects its own settings of many interesting or useful objects from a huge number of possible.

Analysis of existing publications and problem statement

Recommendation systems are designed to form recommendations to consumers regarding the choice of goods and services in the presence of a significant number of alternatives [2, 3]. Such systems use ratings or information about the preferences of other users as input. With the use of machine learning, relationships are formed between the properties of objects and the characteristics of consumers [4, 5].

The scope of such systems is mainly related to the use of e-commerce [6]. Such systems simplify the choice of users who do not have enough knowledge about the characteristics of the objects of interest to them (goods and services) with a wide choice.

In [7] the main types of recommendation systems on the Internet, based on the methods of content and

collaborative filtering, are considered. The methods of collecting data about users from web resources, necessary for the formation of recommendations, are considered. Methods of constructing classifiers for content filtering are investigated. There are also ways to calculate the similarity of users or objects in collaborative filtering.

The article [8] proposes an ontological model of an intelligent search and recommendation system focused on functioning in the open environment of the Web, social Web and Semantic Web. The directions of gaining knowledge about users are considered, the expediency of personal testing for creating groups of users with common interests is analyzed, which provides an opportunity for collaborative forecasting of search results evaluations. Methods of replenishment of this model with new knowledge by inductive generalization of experience of interaction of the user with the system providing self-training of search and recommendation system directed on improvement of its work are developed.

During the existence of information technology, many methods have been proposed for the formation of proposals, including content-oriented methods, collaborative methods, knowledge-based methods and more.

The most well-known, popular, accurate and effective methods of forming proposals are such methods as:

- collaborative filtration;
- content-oriented filtering;
- demographic filtering;
- utilitarian filtration;
- filtering based on knowledge base.

A Bayesian preference model is used, which statistically combines several types of information useful for making proposals, such as user preferences and expert

assessments. They use the methods of the Markov chain and Monte Carlo to conclude on the basis of a sample of parameters from the full conditional distribution of parameters. These models achieved higher performance than pure collaborative filtering.

A promising area is the development of hybrid referral systems that combine the advantages of existing methods of finding similar objects. Therefore, the aim of the article is to develop a recommendation system based on a hybrid method of searching for objects, taking into account both user preferences and audio characteristics of objects.

The following tasks are solved:

1. Analysis of methods and algorithms used in recommendation systems.
2. Development of a hybrid method of forming recommendations on the principle of double organization.
3. Definition of the main functions and architecture of the system of formation of musical recommendations
4. Testing of calculation algorithms and search methods in the system for analysis of similarity of musical recommendations.

Materials and methods

Content-based recommendation systems make suggestions by analyzing the content of information and finding patterns in it [9, 10]. Content-based recommender uses heuristic methods or classification algorithms to make suggestions.

Collaborative Filtering (CF) methods use a user preference database for items to predict additional topics or products that a new user might like [11, 12]. The source information is a list of m users $\{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ and a list of n elements $\{i_1, i_2, \dots, i_n\}$. Each u_i user has a list of elements that he has evaluated or that have been inferred from their behavior. Ratings can be rated both on a quantitative scale and on a qualitative or nominal scale.

Memory-based CF algorithms use user and object databases to generate predictions. Each user is part of a group of people with similar interests. By identifying the so-called neighbors of a new user (or active user), they can make predictions of benefits for new objects.

The following steps are performed in the CF algorithm:

- calculation of similarity or weight $w_{i,j}$ which reflects the correlation between two users or two objects i and j ;

- making predictions for the active user on the weighted medium values of all user or object ratings.

To make the top N recommendations, it is necessary to identify N nearest neighbors [13].

Let's look at methods for calculating similarities between users or objects [14]:

1. Similarity based on Pearson's correlation:

$$w_{u,v} = \frac{\sum_{i \in I} (r_{u,i} - \bar{r}_u)(r_{v,i} - \bar{r}_v)}{\sqrt{\sum_{i \in I} (r_{u,i} - \bar{r}_u)^2} \sqrt{\sum_{i \in I} (r_{v,i} - \bar{r}_v)^2}},$$

where $w_{u,v}$ – a measure of similarity between the two users, i, j – objects, u, v – users, \bar{r}_v – medium user rating v , $r_{u,i}$ – rating of user u for the object i .

To calculate the similarity, you can use a limited Pearson correlation, Spearman's rank correlation, Kendall correlation.

Similarity based on the cosine vector. If we have a matrix of features of objects R of dimension $m \times n$, then the similarity between the two elements i and j is defined as the cosine of n -dimensional vectors corresponding to the i -th and j -th columns of the matrix R :

$$w_{i,j} = \cos(\vec{i}, \vec{j}) = \frac{\vec{i} \cdot \vec{j}}{\|\vec{i}\| * \|\vec{j}\|}.$$

Obtaining predictions or recommendations is the most important step in collaborative filtering. The forecast of user rating a for a particular object i is the weighted medium of all ratings for that object:

$$P_{a,i} = \bar{r}_a + \frac{\sum_{u \in U} (r_{u,i} - \bar{r}_u) w_{a,u}}{\sum_{u \in U} |w_{a,u}|},$$

where r_a and r_u – medium user ratings a and u for all other rated items, $w_{a,u}$ – the weight of the difference between user a and user u .

The summation occurs for all users $u \in U$ who have rated object i .

For object-based forecasting, the weighted mediums of the prediction estimates $P_{u,i}$ user u for object i are used.

$$P_{u,i} = \frac{\sum_{n \in N} r_{u,n} w_{i,n}}{\sum_{n \in N} |w_{i,n}|},$$

where $w_{i,n}$ – the weight of the difference between objects i and n , $r_{u,n}$ – user rating u for object n .

The summation occurs for all other estimated objects $n \in N$ by user u .

The algorithms of top- N recommendations allow to determine k most similar objects for each of the other objects as follows [13]:

- 1) the set of candidates (C) for the recommended objects is determined;
- 2) combines k most similar objects;
- 3) objects are selected from the set U , which the user has already evaluated;
- 4) the similarity between each object from set C and set U is calculated;
- 5) the resulting set of C objects, sorted in descending order of similarity, will be the recommended list of top- N objects.

Consider a method based on the *factorization of rating matrices*. The essence of this method is to break the matrix of ratings into the product of two matrices - a matrix of hidden user preferences and a matrix of implicit characteristics of the object. For each object, the degree to

which it has a particular characteristic can be either positive or negative, as well as for the user, the degree of his interest in the object can be positive if he is interested, or negative if not interested. The rating is represented as a scalar product of two vectors: a vector of hidden user preferences and a vector of implicit characteristics of the object, which shows the general interest of the user in the characteristics of the object.

Each user u , according to this model, must correspond to a vector and $\in \mathbb{R}$, the components of which show the extent to which the object has each of the factors. Similarly, each object i corresponds to a similar vector $i' \in \mathbb{R}$, the components of which show the extent to which the user is close (interesting) objects that have each of the factors. The evaluation of the object by user u is thus represented as a scalar product. The idea of the method is to find the values of vectors and, using known estimates, and then use the found values of these vectors to calculate the predictions of unknown estimates. The main task in building a recommendation system based on the modeling of latent factors is to find the components of vectors and.

In the search for such a breakdown of the rating matrix, the regularized quadratic error is minimized. The minimization is performed either by the stochastic gradient descent method or by the alternative least squares method. In the method of least squares there is a cyclic recalculation of vectors of users and objects, i.e. when fixing vectors of objects, regularization is carried out only on the vectors of users, divided into smaller squares. In the same way regularization of vectors of users on vectors of objects is carried out.

Machine learning methods, data mining algorithms can recognize complex models based on training data, and then make intelligent predictions for common CF problems for test data or real data [15]. CF algorithms based on Bayesian models, clustering models, and dependency networks can be used as CF models if user estimates are reliable, and regression models and singular decomposition methods can be used for quantitative estimates.

The Bayesian algorithm assumes that the characteristics are independent, the probability of a certain class of all characteristics can be calculated [16]. For incomplete data, probability calculations and classification are made from observations:

$$\text{class} = \arg \max_{j \in \text{classSet}} p(\text{class}_j) \prod_o P(X_o = x_o | \text{class}_j),$$

where class – is a set of classes, x_o – characteristics.

Content-based filtering depends on the content of objects represented by certain characteristics [17]. To calculate the similarity between the two products, the objective distance between the elements is considered. When objects are described by numerical attributes, a metric such as Euclidean distance is used:

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2},$$

where x_i and y_i – i -th characteristics of objects x and y .

If the attributes are nominal, the function can be calculated to quantify the distance, assuming a value of 0 when both elements are equal or 1 otherwise:

$$d(x, y) = \omega \sum_{i=1}^n \delta(x_i, y_i),$$

where ω and δ – nominal characteristics.

Systems that implement a recommendation approach based on content, analyze a set of objects that have previously been evaluated by the user, and build a profile of user interests based on the characteristics of objects evaluated by the same user. A profile is a structured representation of users' interests adopted to recommend new objects. The recommendation process is mainly to match the attributes of the user profile with the attributes of the content object.

Audio analysis techniques are used to compare audio files. Audio analysis, an area that includes automatic speech recognition (ASR), digital signal processing, and music classification, tagging, and generation, is a developed subdomain of deep learning applications. The products must be described by automatic methods. In the music industry, automatic methods are implemented by algorithms that analyze the parameters

1) low level:

- mel frequency,
- sampling frequency of the audio file,
- spectral width,
- spectral center of the sound frame,
- color of audio, etc.;

2) intermediate level:

- key,
- rhythm,
- harmony,
- intensity,
- structure;

3) high level: for example, analysis of similar guitar solos.

Some of the most common machine learning systems, such as Alexa, Siri and Google Home, are based on models that extract information from audio signals. Sound waves are digitized by sampling from discrete intervals known as sampling rates. Typically, this is 44.1 kHz for CD-quality audio, i.e. 44,100 samples per second.

Each sample represents the amplitude of the wave in a certain time interval, where the depth in bits determines the degree of its detail (fig. 1).

In signal processing, sampling is the conversion of a continuous signal into a series of discrete values. The sound is presented in the form of an audio signal with such parameters as frequency, bandwidth, decibels, etc. A typical audio signal can be expressed as a function of amplitude and time, as in fig. 2.

In addition to these characteristics, a spectrogram is used for comparison - a visual way to represent the signal level in time at different frequencies present in the form of a wave.

From the specified characteristics it is necessary to choose signs which will be used for comparison.

Spectral (frequency) features are obtained by converting a time signal into a frequency domain using a Fourier transform. These include:

- fundamental frequency,
- frequency components,
- spectral centroid,
- spectral flux,
- spectral density,
- spectral decline, etc.

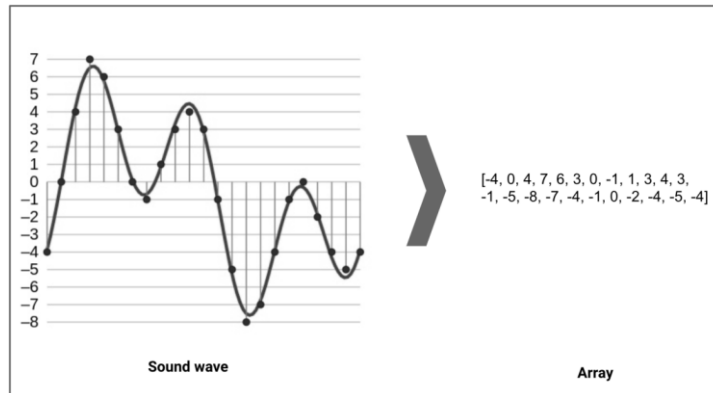


Fig. 1. Example of digital signal processing of samples

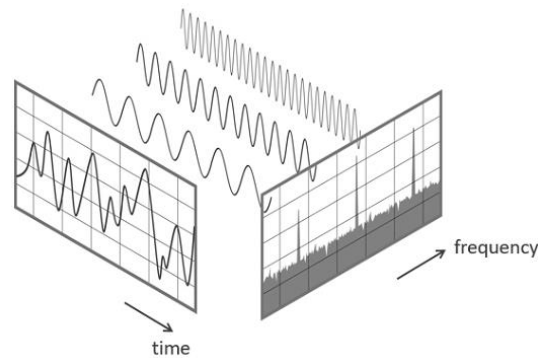


Fig. 2. Representation of sound in the form of an audio signal as a function of amplitude and time

1. The spectral centroid indicates at what frequency the energy of the spectrum is concentrated:

$$f_c = \frac{\sum_k S(k)f(k)}{\sum_k S(k)},$$

where $S(k)$ is a spectral value of the separation element k , $f(k)$ – frequency of the element k .

2. Spectral width - the width of the band of light at half the maximum point (fig. 3).

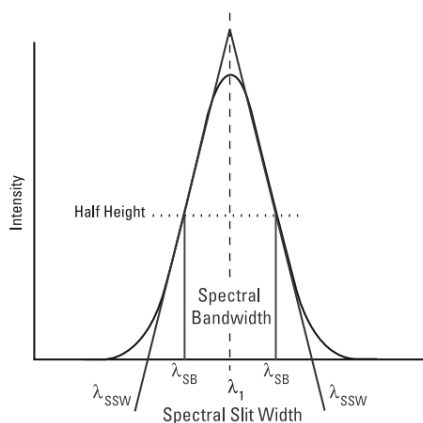


Fig. 3. Graphic representation of spectral width. Spectral decline is a measure of the waveform expressed by the frequency at which high frequencies fall to zero.

4. Zero cross-section speed - a method of measuring the smoothness of the signal, which is expressed by the number of zero cross-sections within the signal segment.

5. Mel-frequency spectral coefficients (MFSC) are a set of features that describe the common form of the spectral envelope.

6. Chromaticity - is represented by a vector of signs of 12 elements, which indicates the amount of energy of each altitude class {C, C #, D, D #, E, ..., B} in the signal.

The quality of the recommendations can be assessed by the following criteria:

- accuracy,
- resistance to attacks,
- dependence on cold start,
- reliability and others.

To measure the accuracy of predicting results, you can use indicators such as:

- medium absolute error (MAE),
- medium standard error (MSE),
- medium error (ME),
- standard deviation (SD).

Medium standard error is calculated by the following formula:

$$MSE = \sqrt{\frac{\sum_{(u,i) \in T} (p_{ui} - r_{ui})^2}{T}},$$

where u – user, i – product or object, r – evaluation, p – projected estimate, T – the total number of test estimates.

Method of forming recommendations on the principle of double organization.

In order to avoid the limitations of any system and increase the speed of submission of proposals, combined (hybrid) methods of proposal formation are used. *Hybrid recommendation systems* combine CF with other recommendation methods. Hybrid methods are created by adding characteristics for CF models, adding CF characteristics to content-oriented models, or combining different CF algorithms.

The CF algorithm, supported by the content, uses the Bayesian classifier, and then fills the missing values of the rating matrix with forecasts from the content prediction system to form a matrix of pseudo-ratings. Based on the obtained pseudo-rating matrix, forecasting is performed using a weighted algorithm and Pearson correlation.

The weighted hybrid recommender combines different methods of supply based on the weight calculated by the results of other methods. A linear function with normalized weights can be used as an integration. As a result, you can choose a weighted majority or a weighted average.

The switching hybrid recommender switches between recommendation methods using a number of criteria. Here there is a problem of complexity of parameterization for switching criteria.

There are also mixed hybrid recommenders, cascading hybrid recommenders, meta-level recommenders and others.

The combination of several methods of forming proposals in hybrid methods is as follows:

- monolithic organization, when one of the methods is chosen as the main one, and the others strengthen and support its work;
- parallel organization, in which each of the methods works separately, and then the results of their work are combined according to certain principles;
- pipeline organization, when all methods work sequentially, with the input data for each subsequent method is the output of the previous.

In order for the results of the methods to be the most effective, the principle of double organization is applied and an algorithm is developed that combines the methods of parallel and pipeline organization as follows (fig. 4):

- filtering takes place in two independent working units;
- in one of the blocks the method of collaborative filtering will work first, and at the end of its work the obtained results are processed by the content-oriented method;
- in another block, on the contrary, first the content-oriented filtering works, and then - collaborative filtering;
- after receiving the results from the two blocks, a common list of objects will be displayed as suggestions.

Each of the individual units supports the principle of conveyor organization in its work.

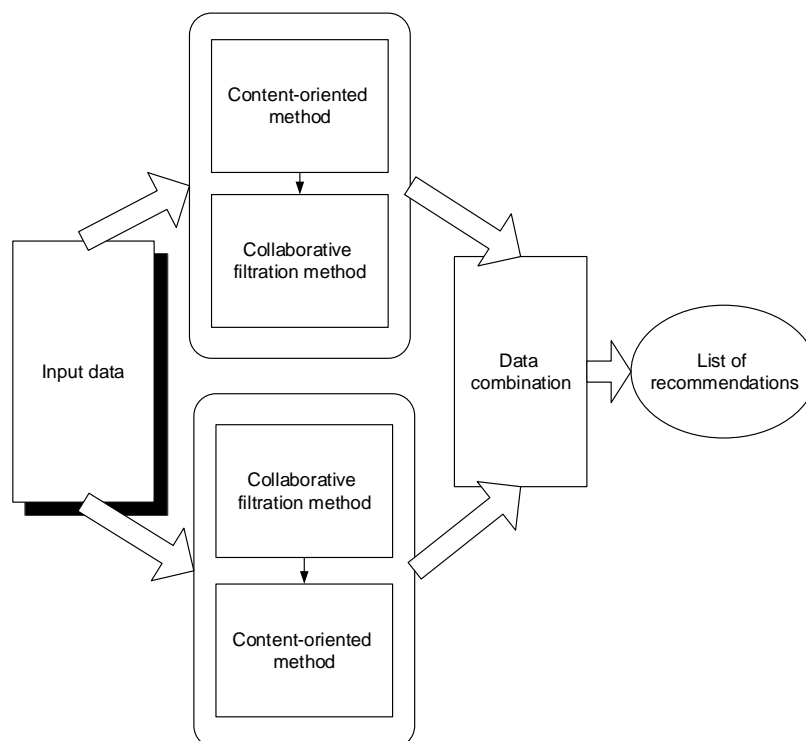


Fig. 4. Hybrid method of forming proposals based on double organization

The developed hybrid method combines the approaches of parallel and pipeline organization. Conveyor cascade organization of recommendation methods in each of the individual units allows to obtain more accurate proposals at the output. The first method in

the chain is responsible for creating rough estimates for candidate products, as well as for eliminating products without grades. The second method adjusts the results of the evaluations of the first method and organizes them, creating a final list of proposals. Each of the blocks is

given a weighting factor, which is calculated and changed during the analysis of the results of previous proposals. Initially, the coefficients of both blocks are 0.5. If after receiving the offers the user gave a rating that is different from the forecast, then when recommending this object to other users, the weight will increase, which will allow you to refine the rating.

The main functions and architecture of the system of formation of musical recommendations

The music recommendation system is a standalone web application that allows users to receive suggestions for favorite items based on their music profile.

The main *functions* of the system:

- formation of a musical profile;
- creating lists of personal musical preferences;
- integration with music resources (Last.fm, Spotify);
- generating a list of music offers;
- the ability to listen to and purchase recommended songs;
- search for information about songs and their performers.

Creating a music user profile is one of the main functions of a web application. A music profile is a user's

listening history, that is, a list of names of music tracks and their artists that have been registered as listened to. The user can integrate with other existing music resources by downloading a listening history and adding this information to their profile. This information then becomes available to anyone and can be obtained via http-requests through a special API. In this way you can get a more complete picture of the various user preferences.

Two lists of personal preferences are created for each user: favorite music tracks and those you don't like ("favorites" and "blacklist"). Suggestions will be generated primarily for songs that have been added to the favorites list, and will be ignored primarily similar to those included in the "black" list.

In the component diagram shown in fig. 5, you can see the central position of the web server, which makes requests via the http protocol to open APIs of remote resources, such as iTunes, Last.fm, Spotify, SoundCloud, YouTube. The user will use the web interface in the browser to provide commands in the form of requests to the web server, which in turn will execute them and return the result to the browser, which will show it to the user.

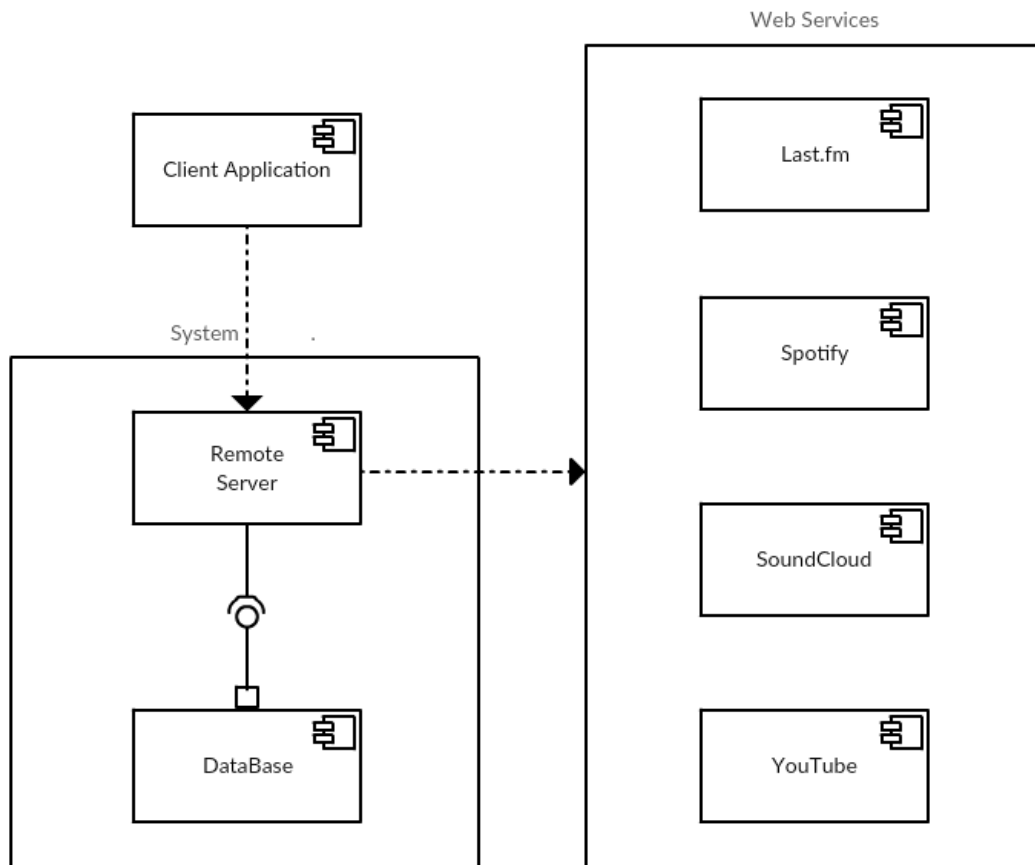


Fig. 5. Component diagram

In order for the collaboration filtering method to give a correct result, it is necessary to have a large amount of data on the preferences of the user of the recommendation system, as well as all users who have common advantages with the data. But at the beginning of the system it takes some time for the database to acquire the size necessary

for the correct operation of the system. This phenomenon is called a cold start or a problem of a new user or a new object [18]. The required coverage can be defined as the percentage of products that the algorithm can offer. The problem of reduced coverage occurs when the number of user ratings is very small compared to the large number of

objects in the system, and the referral system cannot generate offers for them. Another problem is the phenomenon of neighboring transitivity in databases with a small amount of information, in which users cannot be identified as "similar to each other" if they do not have a score for the same objects.

Thus, to ensure the operation of content-oriented methods, you must first have a database with a description of the products, information about which will be used to provide proposals. It is advisable not to collect product descriptions yourself, but to use a ready-made complete data set. The most complete description of the characteristics of world music songs is contained in the database of the Spotify service, while also having free access via the Spotify Web API.

It should be noted that different methods of generating proposals have different means of using input data then generating output. For example, collaborative filtering techniques will generate user ratings and tastes, interests, and preferences when listening to music when generating suggestions, while content-oriented methods will form a set of data-like songs.

Analysis of user preferences and similarity of musical compositions by audio characteristics. System testing.

Here's an example of measuring the similarity of three different users' queries for different genres of music using Pearson's correlation.

We received user ratings for nine music genres. Each user rated the genres on a scale of 1 to 5, where the most favorite genres have a rating of 5 and the least attractive - 1, respectively.

Having three users, the system is three pairs to calculate the Pearson correlation coefficients. Connections between traits can be strong (close) and weak, they are assessed on the Chaddock scale, where:

$0.1 < r_{xy} < 0.3$ – weak connection;

$0.3 < r_{xy} < 0.5$ – moderate connection;

$0.5 < r_{xy} < 0.7$ – noticeable connection;

$0.7 < r_{xy} < 0.9$ – strong connection.

$0.9 < r_{xy} < 1$ – very strong connection.

Below is table 1 with ratings of genres by three users.

Table 1. User ratings of different genres

Genres	User 1	User 2	User 3
Pop	4	5	5
Chanson	2	3	3
Country	4	3	3
Opera	5	5	2
Rock	1	1	4
Jazz	5	3	2
Folk	3	3	1
Hip-Hop	5	5	5
Symphonic	2	1	1

When comparing the ratings of users 1 and 2, the Pearson correlation coefficient 0.8005 was obtained. On the Chaddock scale, this is a strong connection. A comparison of 1 and 3 user ratings showed a score of 0.1318, which is a weak link. Comparison between users 2 and 3 gives a moderate factor - 0.4278.

Thus, if user 1 needs recommendations, he needs to consider the preferences of user 2. User 2 must listen first to user 1 and secondly to user 3.

An example of calculations of audio characteristics of three compositions is given. The Euclidean distance is calculated on the basis of the spectral centroid. Each data set for an individual composition will consist of 12 elements, the value of which is measured in the range between 0 and 1 (table 2). The closer to 1, the higher the frequency of concentration of energy in the spectrum. For example, the closer the ratio is to 1, the more likely it is that the audio contains a large number of loud vocalist sounds or musical instruments. Each element of the array is the average value of the spectral centroids for a duration of 15-20 seconds.

Table 2. The value of the audio characteristics of the compositions

No.	"Highway to Hell"	"Back in Black"	"Billie Jean"
1	0.854411946129	0.842525219898	0.309617027413
2	0.604124786151	0.561826888508	0.257490051780
3	0.593634078776	0.508715259692	0.384942835571
4	0.495885413963	0.443531142139	0.393766280475
5	0.266307830936	0.296733836002	0.340499471454
6	0.261472105188	0.250213568176	0.284685235124
7	0.506387076327	0.488540873206	0.490791264466
8	0.464453565511	0.360508747659	0.513048089201
9	0.665798573683	0.575435243185	0.569896183990
10	0.542968988766	0.361005878554	0.508417866340
11	0.580444285770	0.678378718617	0.519187529821
12	0.445219373624	0.409036786173	0.490379584500

The following values of Euclidean distance are obtained:

- between the songs "Highway to Hell" and "Back in Black" 0.2761;

- between "Highway to Hell" and "Billie Jean" 0.7041;

- between "Back in Black" and "Billie Jean" 0.6888.

The greater the Euclidean distance characteristics between the two tracks, the less similar they are. That is, if the algorithm will determine the most similar song to the track "Back in Black", then in the first place in the priority of recommendations will be "Highway to Hell".

For verification, spectrograms of compositions were constructed, on which you can visually see the difference between "Highway to Hell" and "Billie Jean", which confirms the results of calculations (fig. 6, fig. 7).

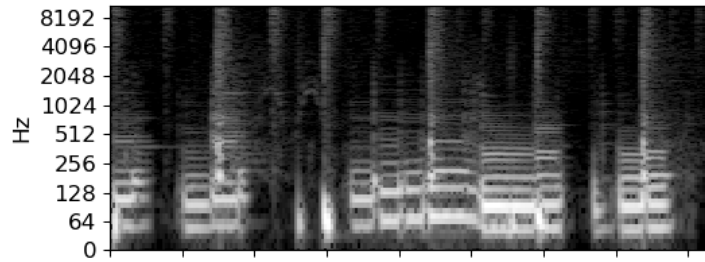


Fig. 6. "Highway to Hell" Spectrogram

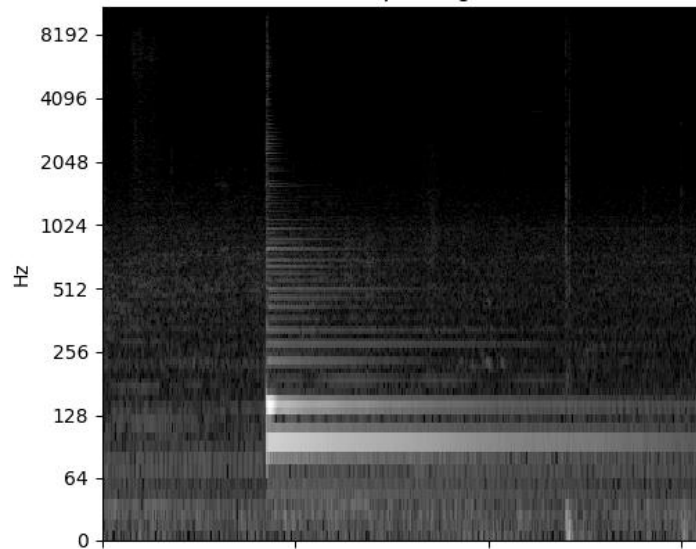


Fig. 7. "Billie Jean" Spectrogram

The system was tested based on the Spotify database, where, according to the statistical website Expanded Ramblings, as of 2020, about 100 million users have been registered and about 30 million music tracks have been added. As the results of the analysis showed, when using 10% or 1% of the data, the results did not change, so all experiments were conducted on 1%, i.e. on 100 thousand users, 30 thousand tracks and 2 million ratings.

Using test data, the process of forming proposals for test users was carried out by two methods sequentially. The method of collaborative filtering by calculating the root mean square error using test data, received an accuracy estimate of 1.48 and worked for about 13 minutes. The content-based method received an accuracy estimate of 1.39 when working for 10 minutes. The hybrid method on the principle of double organization received an estimate of accuracy of 1.37 with a duration of 22 minutes.

Conclusions

The article investigated collaborative filtering, content-based filtering and hybrid methods. Algorithms

and calculation formulas of the specified methods are resulted. The main audio characteristics of musical compositions are considered.

The method of formation of recommendations on the principle of double organization is developed.

The main functions of the system of formation of musical recommendations are determined and the diagram of components is formed.

An example of calculating the characteristics of user preferences and similarity of musical compositions by audio characteristics is given.

According to the results of testing the system by three methods, we can conclude that the proposed hybrid method is worse than others in speed by about one and a half times. However, this method proved to be the most effective among the studied recommendation methods with the lowest value of the root mean square error. In addition, the hybrid method on the principle of dual organization solves such problems of existing recommendation methods as excessive similarity of recommendations, potentially small number or no proposals at all by compensating data from one block of data from another.

References

1. Haidai, B., Artiukh, R., Malyeyeva, O. (2018), "Analysis and modelling the preferences of social networks users", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (3), P. 5–12. DOI: <http://dx.doi.org/10.30837/2522-9818.2018.3.005>
2. Aggarwal, C. C. (2017), *Recommender Systems : The Textbook*, Springer, New York, 498 p.

3. Miller, B. N., Konstan, J. A., Riedl, J. (2004) "PocketLens: toward a personal recommender system", *ACM Transactions on Information Systems*, Vol. 22, No. 3, P. 437–476.
4. Chalyy, S. F., Leshchyns'kyy, V. O., Leshchyns'ka, I. O. (2018) "Modelyuvannya kontekstu v rekomendatsiynnykh systemakh". *Problems of information technologies*, No. 23, P. 21–26. DOI: <https://doi.org/10.35546/pit.v0i23.193>
5. Malyeyeva, O., Nosova, N., Fedorovych, O., Kosenko, V. (2018) "The semantic network creation for an innovative project scope as a part of project knowledge ontology", *CEUR Workshop Proceedings*, P. 2362.
6. Martín, S. S., López-Catalán, B., Ramón-Jerónimo, M. A. (2012), "Factors determining firms' perceived performance of mobile commerce", *Industrial Management & Data Systems*, No. 112, P. 946–963.
7. Meleshko, E. V. Semenov, S. G. Khokh, V. D. (2018), "Doslidzhennya metodiv pobudovy rekomendatsiynnykh system v merezhi internet", *Control, Navigation and Communication Systems. Collection of Scientific Papers*, No. 1 (47), P. 131–136. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.1.131>
8. Rohushyna, Yu. V. (2014), "Rozrobka metodiv formuvannya ta popovneniya ontolohichnoyi modeli semantichnoyi poshucovo-rekomenduyushoyi systemy", *Engineering Software*, No. 2 (18), P. 34–46.
9. Baltrunas, L., Ludwig, B., Peer, S., Ricci, F. (2011), "Context-Aware Places of Interest Recommendations for Mobile Users", *Proceedings of the 14th International Conference on Human-Computer Interaction*, Berlin: Springer, P. 531–540. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-21675-6_61
10. Baltrunas, L., Ludwig, B., Ricci, F. (2011), "Context Relevance Assessment for Recommender Systems", *Proceedings of the 16th International Conference on Intelligent User Interfaces*, New York : Association for Computing Machinery, P. 287–290. DOI: <https://doi.org/10.1145/1943403.1943447>
11. Xiaoyuan, Su, Taghi, M., Khoshgoftaar, A. (2009), "Survey of Collaborative Filtering Techniques A Survey of Collaborative Filtering Techniques", *Advances in Artificial Intelligence Archive*, Article ID 421425, 19 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2009/421425>
12. Herlocker, J. L., Konstan, J. A., Terveen, L. G. Riedl, J. T. (2004), "Evaluating collaborative filtering recommender systems", *ACM Transactions on Information Systems (TOIS)*, Vol. 22, No. 1, P. 5–53.
13. Karypis, G. (2001), "Evaluation of item-based top-N recommendation algorithms", *CIKM '01: Proceedings of the 10th international conference on Information and knowledge management*, P. 247–254. DOI: <https://doi.org/10.1145/502585.502627>
14. Kucheruk, V. Yu., Hlushko, M. V. (2018), "Pokrashchennya alhorytmu "ITEM TO ITEM" metodu kolaboratyvnoyi fil'tratsiyi dlya rozrobky rekomendatsiynnykh system na osnovi kosynusnoyi miry shlyakhom otsinky relevantnosti", *Scientific Journal "ScienceRise"*, Vol. 1, No. 1 (42), P. 20–24. DOI: <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2018.120886>
15. Malieieva, J., Kosenko, V., Malyeyeva, O., Svetlichnyj, D. (2019), "Creation of collaborative development environment in the system of distance learning", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (8), P. 62–71. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.8.062>
16. Miyahara, K., Pazzani, M. J. (2002), "Improvement of collaborative filtering with the simple Bayesian classifier", *Semantic Scholar*, Corpus ID: 16843019.
17. "Content-based book recommendation using learning for text categorization", available at : <https://www.cs.utexas.edu/users/ml/papers/libra-sigir-wkshp-99.pdf>
18. Sobhanam, H., Mariappan, A. K. (2013), "Addressing cold start problem in recommender systems using association rules and clustering technique", *Proceedings of the International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI- 2013)*, P. 402–411.

Received 20.01.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Малєєва Ольга Володимирівна – доктор технічних наук, професор, Національний аерокосмічний університет імені М. С. Жуковського "ХАІ", професор кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Харків, Україна; email: o.malyeyeva@khai.edu; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9336-4182>.

Малєєва Ольга Владимировна – доктор технических наук, профессор, Национальный аэрокосмический университет имени Н. Е. Жуковского "ХАИ", профессор кафедры компьютерных наук и информационных технологий, Харьков, Украина.

Malyeyeva Olga – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"; Professor of the Department of Computer Science and Information Technologies, Kharkiv, Ukraine.

Єсіпов Вадим Віталійович – Національний аерокосмічний університет імені М. С. Жуковського "ХАІ", магістр кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Харків, Україна; email: v.esipov98@gmail.com; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6852-5338>.

Есипов Вадим Витальевич – Национальный аэрокосмический университет имени Н. Е. Жуковского "ХАИ", магистр кафедры компьютерных наук и информационных технологий, Харьков, Украина.

Yesipov Vadym – National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Master of the Department of Computer Sciences and Information Technologies, Kharkiv, Ukraine.

Артюх Роман Володимирович – кандидат технічних наук, Державне підприємство "Південний державний проектно-конструкторський та науково-дослідний інститут авіаційної промисловості", директор, Харків, Україна; email: roman.artuyh77@gmail.com; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5129-2221>.

Артюх Роман Владимирович – кандидат технических наук, Государственное предприятие "Южный государственный проектно-конструкторский и научно-исследовательский институт авиационной промышленности", директор, Харьков, Украина.

Artiukh Roman – PhD (Engineering Sciences), State Enterprise "National Design & Research Institute of Aerospace Industries", Director, Kharkiv, Ukraine.

Косенко Віктор Васильович – доктор технічних наук, професор, Державне підприємство "Південний державний проектно-конструкторський та науково-дослідний інститут авіаційної промисловості", помічник директора з наукової роботи, Харків, Україна; email: kosv.v@ukr.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4905-8508>.

Косенко Віктор Васильевич – доктор технических наук, профессор, Государственное предприятие "Южный государственный проектно-конструкторский и научно-исследовательский институт авиационной промышленности", помощник директора по научной работе, Харьков, Украина.

Kosenko Viktor – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, State Enterprise "National Design & Research Institute of Aerospace Industries", Assistant Director for Research, Kharkiv, Ukraine.

РЕАЛИЗАЦИЯ ГИБРИДНОГО МЕТОДУ ПОШУКУ БЛИЗЬКИХ ОБ'ЄКТІВ З УРАХУВАННЯМ ЗАГАЛЬНИХ ТА АКУСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Предметом дослідження в статті є методи пошуку близьких об'єктів та технології формування рекомендацій. **Метою** статті є розробка рекомендаційної системи на основі гібридного методу пошуку об'єктів з урахуванням як переваг користувачів, так і аудіохарактеристик об'єктів. Вирішуються наступні **завдання**: аналіз методів та алгоритмів, що застосовуються в рекомендаційних системах; розробка гібридного методу формування рекомендацій за принципом подвійної організації; визначення основних функцій та архітектури системи формування музичних рекомендацій; тестування розрахункових алгоритмів та методів пошуку в системі для аналізу схожості музичних рекомендацій. Використовуються такі **методи** дослідження: методи кореляційного аналізу, методи теорії подібності, алгоритми колаборативної фільтрації та аналізу контенту, гібридні методи, методи аналізу аудіохарактеристик, технології програмування. Отримано наступні **результати**: Проведено дослідження методів колаборативної фільтрації, фільтрації на основі контенту та гібридних методів. Приведені алгоритми та розрахункові формули розглянутих методів. Розглянуті основні аудіохарактеристики музичних композицій. Розроблено метод формування рекомендацій за принципом подвійної організації. Перелічено основні функції системи формування музичних рекомендацій та сформовано діаграму компонентів. Приведено приклад обчислювання характеристик вподобань користувачів та схожості музичних композицій за аудіохарактеристиками. **Висновки**: За результатами тестування роботи системи трьома методами можна зробити висновок, що запропонований гібридний метод виявився найбільш ефективним серед досліджених рекомендаційних методів при найменшому показнику середньоквадратичної помилки. Крім того, гібридний метод за принципом подвійної організації вирішує такі проблеми існуючих рекомендаційних методів, як надмірна подібність рекомендацій, потенційно мала кількість або відсутність пропозицій взагалі за рахунок компенсації даних з одного блоку даними з іншого.

Ключові слова: аудіохарактеристики; рекомендаційна система; колаборативна фільтрація; контент орієнтований метод.

РЕАЛИЗАЦИЯ ГИБРИДНОГО МЕТОДА ПОИСКА БЛИЗКИХ ОБЪЕКТОВ С УЧЕТОМ ОБЩИХ И АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Предметом исследования в статье являются методы поиска близких объектов и технологии формирования рекомендаций. **Цель** статьи – разработка рекомендательной системы на основе гибридного метода поиска объектов с учетом как предпочтений пользователей, так и аудиохарактеристик объектов. Решаются следующие **задачи**: анализ методов и алгоритмов, применяемых в рекомендационных системах; разработка гибридного метода формирования рекомендаций по принципу двойной организации; определение основных функций и архитектуры системы формирования музыкальных рекомендаций; тестирование расчетных алгоритмов и методов поиска в системе для анализа сходства музыкальных рекомендаций. Используются такие **методы** исследования: методы корреляционного анализа, методы теории подобия, алгоритмы колаборативной фильтрации и анализа контента, гибридные методы, методы анализа аудиохарактеристик, технологии программирования. Получены следующие **результаты**: Проведено исследование методов колаборативной фильтрации, фильтрации на основе контента и гибридных методов. Приведены алгоритмы и расчетные формулы рассмотренных методов. Рассмотрены основные аудиохарактеристики музыкальных композиций. Разработан метод формирования рекомендаций по принципу двойной организации. Перечислены основные функции системы формирования музыкальных рекомендаций и сформирована диаграмма компонентов. Приведен пример вычисления характеристик предпочтений пользователей и сходства аудиохарактеристик музыкальных композиций. **Выводы**: По результатам тестирования работы системы тремя методами можно сделать вывод, что предложенный гибридный метод оказался наиболее эффективным среди исследованных рекомендационных методов при наименьшем значении среднеквадратичной ошибки. Кроме того, гибридный метод по принципу двойной организации решает такие проблемы существующих рекомендационных методов, как чрезмерное сходство рекомендаций, потенциально малое количество или отсутствие предложений вообще за счет компенсации данных из одного блока данным другим.

Ключевые слова: аудиохарактеристики; рекомендационная система; колаборативная фильтрация; контент ориентированный метод.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Малєєва О. В., Єсіпов В. В., Артюх Р. В., Косенко В. В. Реалізація гібридного методу пошуку близьких об'єктів з урахуванням загальних та акустичних характеристик. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 1 (15). С. 59–68. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.059>

Malyeyeva, O., Yesipov, V., Artiukh, R., Kosenko, V. (2021), "Implementation of a hybrid method of searching for close objects, taking into account the general and acoustic characteristics", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (15), P. 59–68. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.059>

AGUNG CHANDRA, CHRISTINE NATALIA

PERFORMANCE ANALYSIS OF OPTIMIZATION METHODS FOR SOLVING TRAVELING SALESMAN PROBLEM

The **subject** of this research is distance and time of several city tour problems which known as traveling salesman problem (tsp). The **goal** is to find out the gaps of distance and time between two types of optimization methods in traveling salesman problem: exact and approximate. Exact method yields optimal solution but spends more time when the number of cities is increasing and approximate method yields near optimal solution even optimal but spends less time than exact methods. The **task** in this study is to identify and formulate each algorithm for each method, then to run each algorithm with the same input and to get the research output: total distance, and the last to compare both methods: advantage and limitation. **Methods** used are Brute Force (BF) and Branch and Bound (B&B) algorithms which are categorized as exact methods are compared with Artificial Bee Colony (ABC), Tabu Search (TS) and Simulated Annealing (SA) algorithms which are categorized as approximate methods or known as a heuristics method. These three approximate methods are chosen because they are effective algorithms, easy to implement and provide good solutions for combinatorial optimization problems. Exact and approximate algorithms are tested in several sizes of city tour problems: 6, 9, 10, 16, 17, 25, 42, and 58 cities. 17, 42 and 58 cities are derived from tsplib: a library of sample instances for tsp; and others are taken from big cities in Java (West, Central, East) island. All of the algorithms are run by MATLAB program. The **results** show that exact method is better in time performance for problem size less than 25 cities and both exact and approximate methods yield optimal solution. For problem sizes that have more than 25 cities, approximate method – Artificial Bee Colony (ABC) yields better time which is approximately 37% less than exact and deviates 0.0197% for distance from exact method. The **conclusion** is to apply exact method for problem size that is less than 25 cities and approximate method for problem size that is more than 25 cities. The gap of time will be increasing between two methods when sample size becomes larger.

Keywords: traveling salesman problem; optimization method; exact method; approximate methods; gaps.

Introduction

Traveling salesman problem, called TSP is a description of a large class of problems known as combinatorial optimization problems and literally also known as a Chinese postman problem or single vehicle routing problem (VRP). Many real-world problems can be modeled as variants of TSP as a real-world problems are often more complicated than TSP. Since there are many powerful transformation technique to convert the variants to TSP, any outcome for TSP can be used for a wide variety of real-world of problems [1,2]. TSP is one of the most important transportation problems in operational logistics. Transportation is needed to guarantee the mobility of people and goods and as part of the economic system, transportation has an important function in national development [3]. The concept of TSP is described as follows: a salesman or a vehicle has a number of cities to visit with a distance of time between two cities and each city is visited only once (Hamiltonian cycle) and returns to the starting city then the total distance or time is minimized [4, 5, 6]. Distance is a key factor in transportation. According to [7, 8] the distance controls for transportation cost, and for health center, distance plays a crucial role in health service accessibility [9], for food distribution, distance should be considered when assessing the environmental impact of transporting food [10]. Transportation cost is about one third or two third of total logistics cost [11]. The facts tell us about the need to search the shortest route in order to minimize cost, minimize risk and minimize damage.

There are two types of optimization methods: one is exact method and the other one is approximate method [12]. Exact methods produce optimal solutions and approximate (heuristics) methods produce high solutions

in a reasonable time but no guarantee optimal solution. Brute force, Branch and Bound, Dynamic Programming are examples of exact methods or limited search methods [13] where Artificial Bee Colony, Tabu Search and Simulated Annealing are examples of approximate methods. Although approximate method does not produce optimal solution but it has some advantages such as short searching time of solution compared to exact methods, near optimal solution even optimal, and simplicity of implementation.

Brute Force algorithm searches all solution space, exhaustive search for combinatorial problem, generates a list of all potential solutions to the problem in a systematic manner and evaluates potential solutions one by one, disqualifies infeasible ones and keeps track of the best one found for an optimization problem [14].

Branch and Bound (B&B) algorithm is a fundamental and widely used methodology for producing exact solutions to NP-hard optimization problems. This method is proposed by Land & Doig. B&B algorithm creates and prunes the nodes and this happens in a recursive way. This strategy has three main components: branching, bounding, and the selection of the next node. Important decisions have to be made that influence the performance of the algorithm [15] this solves a discrete optimization problem by breaking up its feasible set into smaller subsets, calculating bounds on the objective function value over each subset and using them to discard certain subsets from further consideration. The bounds are obtained by replacing the problem over a given subset with an easier problem, such that the solution value of the latter bounds that of the former. The procedure ends when each subset has either produced a feasible solution or contains no better solution than the one already in hand. The best solution found is a global optimum [16].

Artificial Bee Colony (ABC) algorithm is a heuristic method and optimization algorithm that comes under Swarm Intelligence and inspired by social behavior of natural bees. This method introduced by Dervis Karaboga in 2005. The term swarm is used in a general manner to refer to any restrained collection of interacting agents or individuals. This ABC algorithm has been compared with that of differential evolution (DE), particle swarm optimization (PSO) and evolutionary algorithm (EA), and the result shows the ABC perform better than DE, PSO and EA [17]. Bee colony optimization has been successfully applied to various hard combinatorial optimization problems, mostly in transportation, location and scheduling fields [18].

Tabu Search (TS) algorithm is a powerful algorithm approach that has been implemented with great success to any difficult combinatorial problems and generally provide good solutions very early in the search. TS was proposed by Fred Glover in 1986 which allow Local Search (LS) to overcome local optima. The basic principle of TS is to pursue LS when finds a local optimum by allowing non improving movement and back to previous visited is prevented by the use of memories which called tabu lists [19].

Simulated Annealing (SA) algorithm is a heuristic algorithm for obtaining good solutions and has several interesting features such as easy to implement, can be generally used to a wide range problems and can provide high quality solutions to many problems [20]. SA is regarded as one of most commons heuristics technique [21].

Based on the paper published above, both exact and approximate methods have outstanding performance where exact method yields optimal solution but time consuming, and on the other hand, approximate yields near optimal solution but faster than exact method. From this point of view, performance analysis needs to be conducted to get the percentage of difference both solution and processing time, so the goal in this paper is to find how large the differences are for solution and time between exact and approximate methods based on case study of goods distribution to varied number of destinations in cities – small and medium size.

Materials and methods

1. Brute Force (BF) algorithm is a straightforward approach and usually based on problem statement and definitions of concepts involved. This solution to combinatorial problems, this suggests generating each and every combinatorial object such as permutations, combinations or subsets of a set of the problem, selecting those of them that satisfying all the constraints, and then finding a desired object [22].

%Input: a list P of n ($n \geq 2$) points $P_1 = (x_1, y_1), \dots, P_n = (x_n, y_n)$

%Output: Indices index1 and index2 of the closet pair of points

$D_{min} \leftarrow \infty$

for $i \leftarrow 1$ to $n - 1$ do

for $j \leftarrow i + 1$ to n do

$d \leftarrow \text{sqrt} \left((x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 \right)$ // sqrt is

the square root function

if $d < d_{min}$

$d_{min} \leftarrow d$; index1 $\leftarrow i$; index2 $\leftarrow j$

return index1, index2

2. Branch and Bound (B&B) algorithm

The branch and bound (B&B) algorithm implicitly enumerates all possible solutions to the problem under consideration, by storing partial solutions which called subproblems in the structure of tree. Unexplored nodes generate children by partitioning the solution space into smaller regions that can be solved recursively (branching) and rules are used to prune off regions of the search space that provably suboptimal (bounding). When all trees has been explored, the best solution found in the search and is returned [23]. The pseudocode is:

Set $L = \{X\}$ and initialize \hat{x}

while $L \neq \emptyset$:

Select a subproblem S from L to explore

If a solution $\hat{x}' \in \{x \in S \mid f(x) < f(\hat{x})\}$ can

be found: Set $\hat{x} = \hat{x}'$

If S can not be pruned:

Partition S into S_1, S_2, \dots, S_r

Insert S_1, S_2, \dots, S_r into L

Remove S from L

Return \hat{x}

3. Artificial Bee Colony (ABC) algorithm

ABC algorithm is simple, easy, very fast and it can be effectively applied to combinatorial optimization problem, in this algorithm, the bees are divided in three groups: employed bees, onlooker bees and scout bees. Each food source position represents a candidate solution of optimization problem. The number of employed bees or the onlooker bees is equal to the number of solutions in the population.

This below equation represents an initial solution which random route between 1 and 25 generated by this equation. At the same time, a scout bee searches the new foods when a source is abandoned [24, 25]:

$$x_{ij} = x_j^{\min} + \text{rand}(0,1)(x_j^{\max} - x_j^{\min}), \quad (1)$$

where abandoned source is x_i and $j \in \{1, 2, \dots, D\}$; D is the number of optimization parameters.

This following equation represents the employed bee phase that performs random modifications on adjacent to a solution.

$$v_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij}(x_{ij} - x_{kj}), \quad (2)$$

where: $k \in \{1, 2, \dots, SN\}$ and $\{1, 2, \dots, D\}$ are randomly chosen indexes, but k has to be different from i ; $\phi_{i,j}$ is a random number between -1 and 1; $x_{i,j}$ is a comparison of two food positions; SN is the number of food sources.

The number of food sources is equal to the number of employed bees

Then, the last equation, onlooker bee choose a food source with probability proportional to the quality of food source

$$fitness_i = \begin{cases} \frac{1}{1+f_i} & \text{if } f_i \geq 0 \\ 1+abs(f_i) & \text{if } f_i < 0 \end{cases}, \quad (3)$$

where f_i is the fitness value of the solution i

In this study, number of cities is 6, 9, 10, 16, 17, 25, 42, 58 and the manipulating operators are swap, insertion, and reversion.

A short algorithm is shown below [26]:

Initialize population.

Repeat

Place the employed bees on their food sources and determine their nectar amounts

Calculate the probability value of the sources with which they are preferred by the onlooker bees

Place the onlooker bees on the food sources depending on their nectar amounts

Stop the exploitation process of the sources exhausted by the bees

Send the scouts to the search area for discovering new food sources randomly

Memorize the best food source found so far

Until requirements are met

4. Tabu Search (TS) algorithm

The main idea of this algorithm is allowing climbing moves when there is no improving neighbouring solution exists such as a move is allowed even if a new solution s' from neighbourhood of the current solution s is worse than the current one. In nature, return to the locally optimal solutions previously visited is not allowed in order to avoid cycling of the search. TS is based on a methodology of prohibitions: some moves are frozen (tabu) from time to time. The pseudocode for the standard (pure) tabu search as follows [27]:

Function tabu_search(s);

// input: s – the initial solution; output: s^* - the best solution found //

$s^* := s$;

initialize the tabu list T ;

repeat // continue the main cycle of TS //

given neighbourhood function θ , tabu list T , and aspiration criterion,

find the best possible solution $s' \in \theta'(s) \subseteq \theta(s)$, where $\theta'(s)$ consists of solutions that (or

their "attributes") are not currently in the tabu list T or satisfy the aspiration criterion;

$s := s'$; // replace the current solution by new one //

insert the solution s (or its "attribute") into the tabu list T ;

if $f(s) < f(s^*)$ then $s^* := s$; // save the best so far solution //

update the tabu list T

until termination criterion is satisfied;

return s^*

end

5. Simulated Annealing (SA) algorithm

Is very useful in finding global optima in the presence of local optima large numbers. The simulated annealing algorithm starts from a higher temperature which is called the initial temperature. When the temperature decreases gradually, the solution tends to be stable but the solution may be a local optimal solution. Pseudocode is as follows [28]:

Input: initial temperature T_0 , minimum temperature T_{min} , maximum number of iteration K_{max} , probability of temperature drop ρ ;

Output: the optimal solution X_{best} ;

Generating an initial solution X_0 ;

$X_{best} \leftarrow X_0$;

Computing the value of objective function $f(X_0)$ and $f(X_{best})$;

$T_i \leftarrow T_0$;

While $T_i > T_{min}$ do

$\Delta f \leftarrow f(X_{new}) - f(X_{best})$;

If $\Delta f < 0$ then $X_{best} \leftarrow X_{new}$;

Endif

If $\Delta f \geq 0$ then $\rho \leftarrow e^{-\frac{\Delta f}{T}}$;

If $c \leftarrow \text{random}[0,1] \geq \rho$ then $X_{best} \leftarrow X_{new}$;

Else $X_{best} \leftarrow X_{best}$;

End if

End if

$i \leftarrow i + 1$; $T_i \leftarrow \rho \times T_i$;

end while

Return X_{best} ;

Research Methodology

Doing this research, there are some steps that must be followed, starting from goal setting, analysing and drawing the conclusion which can be seen in fig. 1.

Results and Discussions

1. Results

By using MATLAB program based PC, the results for every algorithm indicated in table 1.

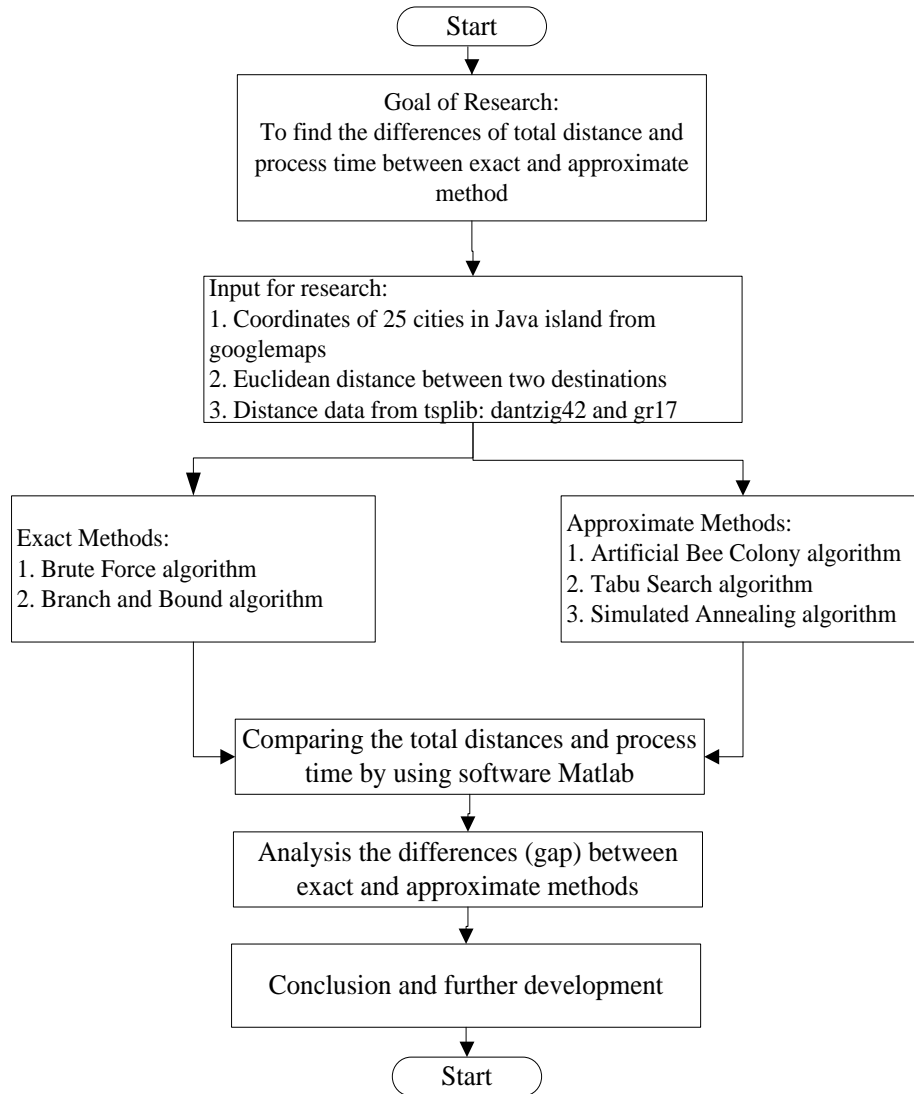


Fig. 1. Research Methodology

Tabel 1. Comparison of distance and time

Algo	6 cities		9 cities		10 cities		16 cities		Gr17 (tsplib)		25 cities		Dantzig42 (tsplib)		Brazil58 (tsplib)	
	Dist	Time	Dist	Time	Dist	Time	Dist	Time	Dist	Time	Dist	Time	Dist	Time	Dist	Time
BF*	587	2	608	18	861	111	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B&B	587	0.14	608	0.06	861	0.31	1,465	4.69	2,085	3.87	2,251	12,750	699	187	25,395	>82,800
BKS									2,085		2,251		699		25,395	
ABC	587	5	608	5	861	6	1,465	7	2,085	6	2,251	6	699	117	25,400	740
TS	587	5	608	6	861	7	1,636	11	2,085	12	2,556	22	856	51		
SA	587	34	608	23	861	26	1,465	33	2,085	30	2,274	29	774	29		

*the time cost is too expensive; Dist means distance; BKS = Best Known Solution

In this study, the first thing to see is the results of distance for each algorithm. In the case of 6 cities to 10 cities, all algorithms yield the same distances and competitive process time. Starting from study of 16 cities, TS does not yield optimal solution where SA starts from the case of 25 cities. BF algorithm is less efficient tool when the cities grow to more than 10 cities, because it will grow like $n!$, so if there is 11 cities, then time needed will be 11 times as long as the time for 10 cities. When the number of cities is increasing to more than twenty cities, one can benefit from approximate

method because it has less time than exact method and the result is also optimal. ABC algorithm is more powerful than others and from time aspect, ABC has less time about 37.43% than B&B algorithm for case Dantzig42 shown in fig. 2. ABC algorithm also tested for tsplib brazil58 shown in figure 3, the distance deviates only 0.0197% but amount of time is increasing compared to Dantzig42. For case of cities is less than or the same as 10 cities, both exact and approximate methods show the same distance, the gap is only in time.

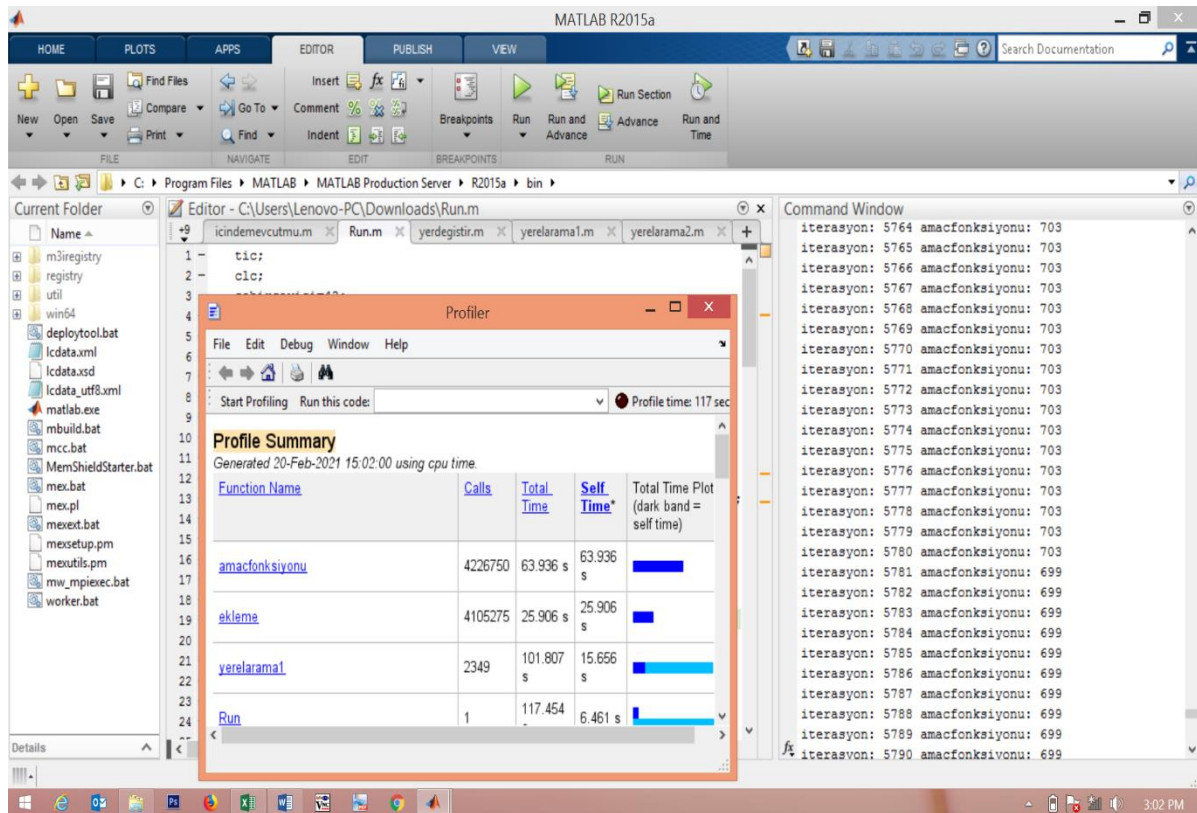


Fig. 2. ABC algorithm tested on dantzig42 tsplib

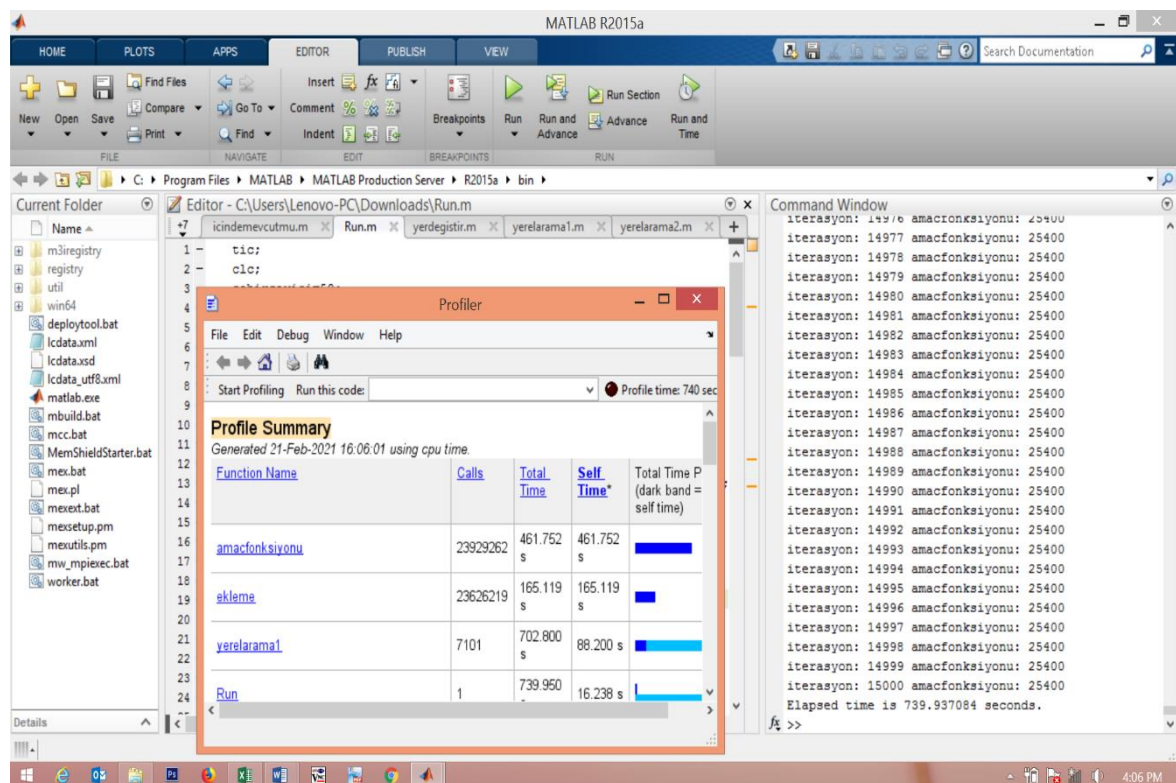


Fig. 3. ABC algorithm tested on brazil58 tsplib

2. Discussions

There are numerous algorithms and cases now, then each algorithm in this manuscript must be tested on larger size, validated and compared with other algorithms especially approximate methods and cases from other

countries in order to increase conviction for users both for distance and time. According to [29], B&B algorithm is suitable for solving less than 60 locations, then one should consider to apply approximate method.

Conclusions and Further Development

Transportation distance can be minimized by choosing the shortest route. There are two optimization methods, one is exact and the other is approximate. Exact methods – Brute Force and Branch and Bound algorithms provides optimal solution but Brute Force algorithm yields

about $n!$ when the number of cities is more than 10, and Branch and Bound algorithm is less efficient in time when the number of cities is more than 25 cities than approximate method – Artificial Bee Colony algorithm. Exact method is fit to problems less than 25 cities and Approximate method is fit to problems larger than 25 cities.

References

- Dimitrijevic, V., Saric, Z. (1997), "An Efficient Transformation of The Generalized Traveling Salesman Problem into The Traveling Salesman Problem on Diagraphs", *Information Sciences*, Vol. 102, Issues 1-4, P. 105–110. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0020-0255\(96\)00084-9](https://doi.org/10.1016/S0020-0255(96)00084-9)
- Baniasadi, P., Foumani, M., Miles, K. S., Ejov, V. (2020), "A Transformation Technique for The Clustered Generalized Traveling Salesman Problem with Applications to Logistics", *European Journal of Operational Research*, Vol. 285, Issue 2, P. 444–457. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor>
- BPS – Statistik Indonesia (2019), "Land Transportation Statistics, Statistik Transportasi Darat", available at : www.bps.go.id
- Saud, S., Kodaz, H., Babaoglu, I. (2017), "Solving the Traveling Salesman Problem Using Optimization Algorithms", *IAIT Conference Proceedings. The 9th International Conference on Advances in Information Technology*, Vol. 2017. DOI: <https://doi.org/10.18502/kss.v3i1.1394>
- Jadczak, R. (2014), "Traveling Salesman Problem: Approach to Optimality", *De Gruyter Open*, Vol. XV, Issue 2, P. 157–159. DOI: <https://doi.org/10.2478/eam-2014-0024>
- Chandra, A., Setiawan, B. (2018), "Optimizing the Distribution Routes Using Vehicle Routing Problem (VRP) Method", *Journal Manajemen Transportasi dan Logistik*, Vol. 05, No. 2, available at : <http://ejournal.stmt-trisakti.ac.id/index.php/jmtranslog>
- Query, J. A. (2015), "The Impact of Transportation Costs and Trade Barriers on International Trade Flows", *Dissertation, Department of Economics, Graduate School of the University of Oregon*, available at: <https://scholarsbank.uoregon.edu>
- Victoria Transport Policy Institute (2020), "Transportation Cost and Benefit Analysis II – Literature Review", available at : www.vtpi.org/tca/tca02.pdf (last accessed: 19.02.2021).
- Keya, K. T., Rahman, M. M., Rob, U., Bellows, B. (2014), "Distance, Transportation Cost and Mode of Transport in the Utilization of Facility – Based Maternity Service: Evidence for Rural Bangladesh", *International Quarterly of Community Health Education*. DOI: <https://10.2190/IQ.35.1.d>
- Bernatz, G. (2009), "Apples, Bananas, Oranges: Using GIS to Determine Distance Travelled, Energy Use, and Emissions from Imported Fruit", *Papers in Resource Analysis*, Saint Mary's University of Minnesota Central Service Press. Winona, MN, Vol. 11, P. 16, available: <http://www.gis.smumn.edu> (last accessed: 13.02.2021).
- Chandra, A., Naro, A. (2020), "A Comparative Study of Capacitated Vehicle Routing Problem Heuristics Model", *International Journal of Engineering and Emerging Technology*, Vol. 5, No. 2, P. 94-100. DOI: <https://doi.org/10.24843/IJEET.2020.v05.i02.p015>
- Talbi, E. G. (2009), *Metaheuristics: From Design to Implementation*, John Wiley and Sons, New Jersey.
- Vatutin, E. (2017), "Comparisons of Decisions Quality of Heuristics Methods with Limited Depth First Search Techniques in the Graph Shortest Path Problem", *De Gruyter Open*, P. 428–434. DOI: <https://doi.org/10.1515/eng-2017-0041>
- Black, A. P. (2019), "Lecture 6: Exhaustive Search Algorithms. Department of Computer Science", Portland State University, available at : <https://web.cecs.pdx.edu>
- Droste, I. (2017), "Algorithms for the Traveling Salesman Problem", *Thesis, Universiteit Utrecht. Facuteit Betawetenschappen*. Netherland, available at: <https://dspace.library.uu.nl>
- Balas, E., Toth, P. (1983), "Branch and Bound Methods fo the Traveling Salesman Problem", *Management Science Research Report*, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania 15213, No. MSRR 488, available at : <https://apps.dtic.mil>
- Karaboga, D., Basturk, B. (2008), "On the Performance of Artificial Bee Colony Algorithm", *Applied Soft Computing*, No. 8, P. 687–697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2007.05.007>
- Teodorovic, D., Selmic, M., Davidovic, T. (2015), "Bee Colony Optimization Part II: The Application Survey", *Yugoslav Journal of Operations Research*, Vol. 25, No. 2, P. 185–219. DOI: <https://doi.org/10.2298/YJOR131029020T>
- Gendreau, M. (2002), *An Introduction to Tabu Search*, Universite de Montreal, Montreal, Canada. Available at : http://www.ifi.uio.no/infheur/Bakgrunn/Intro_to_TS.Gendreau.htm
- Eglese, R. W. (1990), "Simulated Annealing: A Tool for Operational Research", *European Journal of Operational Research*, No. 46, P. 271–281. DOI: [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90001-R](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90001-R)
- De Weck, O. (2010), "Lecture 10: Simulated Annealing: A Basic Introduction", MIT OpenCourseWare, available at : <http://ocw.mit.edu>
- Zhu, Y. W. (-), "Brute Force", University of Seattle, available at: <http://www.fac-staff.seattleu.edu>
- Morrison, D., Jacobson, S. H., Sauppe, J. J., Sewell, E. C. (2016), "Branch and Bound algorithms: A Survey of Recent Advances in Searching, Branching, and Pruning", *Discrete Optimization*, No. 19, P. 79–102. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.disopt.2016.01.005>
- Onder, E., Ozdemir, M., Yildirim, B. F. (2013), "Combinatorial Optimization Using Artificial Bee Colony Algorithm and Particle Swarm Optimization Supported Genetic Algorithm", *KAU IIBF Dergisi*, No. 4 (6), P. 59–70, available at : <https://ssrn.com>
- Kocer, H. E., Akca, M. R. (2014), "An Improved Artificial Bee Colony Algorithm with Local Search for Traveling Salesman Problem", *Cybernetics and Systems: An International Journal*, Vol. 45, No. 8, P. 635–649. DOI: <https://doi.org/10.1080/01969722.2014.970396>
- Boussaid, I., Lepagnot, J., Siarry, P. (2013), "A Survey On Optimization Metaheuristics", *Information Sciences*, No. 237, P. 82–117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2013.02.041>
- Misevicius, A. (2004), "Using Iterated Tabu Search for the Traveling Salesman Problem", *Informacines Technologijos Ir Valdymas*, No. 3 (32), P. 29–40, available at : <https://itc.ktu.lt>
- Zhou, A. H., Zhu, L. P., Hu, B., Deng, S., Song, Y., Qiu, H., Pan, S. (2019), "Traveling-Salesman-Problem Based on Simulated Annealing and Gene-Expression Programming", *Information*, Vol. 10, No. 7. DOI: <https://doi.org/10.3390/info10010007>
- Mataija, M., Segic, M. R., Jozic, F. (2016), "Solving the Traveling Salesman Problem Using the Branch and Bound Method", *Zbomik Veleucilista u Rjeci*, Vol. 4 No. 1, P. 259–270, available at : <https://hrcaj.srce.hr>

Received 20.02.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Chandra Agung – Master of Engineering (Civil Engineering), Master of Management (Financial Management), Senior Lecturer, Universitas Mercu Buana, Department of Industrial Engineering, Jakarta, Indonesia; email: agung.chandra@mercubuana.ac.id; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0338-1588>.

Агунг Чандра – магістр технічних наук (цивільне будівництво), магістр управління (фінансовий менеджмент), старший викладач університету Мерку Буана, департамент промислового машинобудування, Джакарта, Індонезія.

Natalia Christine – Master of Engineering (Industrial Engineering and Management), Senior Lecturer, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya Jakarta, Department of Industrial Engineering, Jakarta, Indonesia; email: chrisnatalia@atmajaya.ac.id; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4260-684X>.

Крістіні Наталія – магістр технічних наук (промислова інженерія та управління), старший викладач, католицький університет Індонезії Атма Джая Джакарта, департамент промислового машинобудування, Джакарта, Індонезія.

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ПРОДАВЦЯ, ЩО ПОДОРОЖУЄ

Предметом цього дослідження є відстань та час декількох проблем з екскурсіями містом, які відомі як проблема продавця-мандрівника (ппм). **Мета** полягає в тому, щоб з'ясувати розриви між відстанями та часом між двома типами методів оптимізації у проблемі продавця, що подорожує: точним та приблизним. Точний метод дає оптимальне рішення, але вимагає більше часу, коли кількість міст збільшується, а приблизний метод дає майже оптимальне рішення, навіть оптимальне, але потребує менше часу, ніж точні методи. **Завданням** цього дослідження є визначити та сформулювати кожен алгоритм для кожного методу, потім запустити кожен алгоритм з однаковим входом і отримати результат дослідження: загальна відстань, яка надасть можливість порівняти обидва методи: їх перевагу та обмеження. Використані **методи** – алгоритми Brute Force (BF) та Branch and Bound (B&B), які класифікуються як точні методи, порівнюються з алгоритмами Artificial Bee Colony (ABC), Tabu Search (TS) та Simulated Annealing (SA), які класифікуються як приблизні методи, або відомі як методи евристики. Ці три наближені методи обрані, оскільки вони є ефективними алгоритмами, прості у реалізації та забезпечують хороші рішення для комбінаторних задач оптимізації. Точні та приблизні алгоритми перевіряються у кількох розмірах задач екскурсії містом: 6, 9, 10, 16, 17, 25, 42 та 58 міст. 17, 42 та 58 міст вибрані з ппmlib: бібліотеки зразків екземплярів для ппм; а інші взяті з великих міст острова Ява (Західний, Центральний, Східний). Всі алгоритми запущені програмою MATLAB. **Результати** показують, що точний метод кращий у часі за обсягом завдання на менше ніж 25 міст, коли і точні, і приблизні методи дають оптимальне рішення. Для обсягів завдання, яке враховує більше 25 міст, приблизний метод – Artificial Bee Colony (ABC) дає кращий час, який приблизно на 37% менше, ніж точний, і відхиляється на 0,0197% для відстані від точного методу. **Висновок** полягає у застосуванні точного методу для обсягу проблеми менше 25 міст та приблизного методу для обсягу проблеми більше 25 міст. Розрив у часі буде збільшуватися між двома методами, коли обсяг вибірки стає більшим.

Ключові слова: проблема продавця, що подорожує; метод оптимізації; точний метод; наближені методи; прогаліни.

АНАЛІЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ПРОДАВЦА, КОТОРЫЙ ПУТЕШЕСТВУЕТ

Предметом настоящего исследования является расстояние и время нескольких проблем с экскурсиями по городу, которые известны как проблема продавца-путешественника (ппп). **Цель** состоит в том, чтобы выяснить разрывы между расстояниями и временем между двумя типами методов оптимизации в проблеме продавца, который путешествует: точным и приближенным. Точный метод дает оптимальное решение, но требует больше времени, когда количество городов увеличивается, а примерный метод дает почти оптимальное решение, даже оптимальное, но требует меньше времени, чем точные методы. **Задачей** данного исследования является определить и сформулировать каждый алгоритм для каждого метода, затем запустить каждый алгоритм с одинаковым входом и получить результат исследования: общее расстояние, которое даст возможность сравнить оба метода: их преимущество и ограничения. Исползованные **методы** – методы Brute Force (BF) и Branch and Bound (B & B), которые классифицируются как точные методы, сравниваются с алгоритмами Artificial Bee Colony (ABC), Tabu Search (TS) и Simulated Annealing (SA), которые классифицируются как приближенные методы или известны как методы эвристики. Эти три приближенные методы выбраны, поскольку они являются эффективными алгоритмами, просты в реализации и обеспечивают хорошие решения для комбинаторных задач оптимизации. Точные и приближенные алгоритмы проверяются в нескольких размерах задач экскурсии по городу: 6, 9, 10, 16, 17, 25, 42 и 58 городов. 17, 42 и 58 городов выбраны из ппplib: библиотеки образцов экземпляров для ппп; а другие взяты из крупных городов острова Ява (Западный, Центральный, Восточный). Все алгоритмы запущены программой MATLAB. **Результаты** показывают, что точный метод лучше во времени по объему задания на менее чем 25 городов, когда и точные, и приближенные методы дают оптимальное решение. Для объемов задачи, которая учитывает более 25 городов, приближенный метод - Artificial Bee Colony (ABC) дает лучшее время, которое примерно на 37% меньше, чем при точном методе, и отклоняется на 0,0197% для расстояния точного метода. **Вывод** заключается в применении точного метода для объема проблемы менее 25 городов и приближенного метода для объема проблемы более 25 городов. Разрыв во времени будет увеличиваться между двумя методами, когда объем выборки становится больше.

Ключевые слова: проблема продавца, который путешествует; метод оптимизации; точный метод, приближенные методы; разрывы.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Chandra Agung, Natalia Christine (2021), "Performance analysis of optimization methods for solving traveling salesman problem", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (15), P. 69–75. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.069>

O. KONONENKO

THEORETICAL ASPECTS OF THE ORGANIZATION BRAND MANAGEMENT

The **subject** matter of research in the article is the development of the concept of "brand", as well as modern approaches to the process of brand formation of the organization. Recent decades the concept of "brand" has become widespread. It is applied to the individual, to the enterprise, and also to government initiatives. However, in the literature there is no single point of view on the definition of this concept. The **goal** of the article is to analyze the existing definitions of the concept of "brand" and modern approaches to the process of brand formation of the organization. To achieve this goal, it is necessary to solve the following tasks: to collect the definitions of the concept of a brand, given by organizations, scientists, specialists, to analyze these definitions and their dynamics, to analyze the main features of strategic brand management. The system analysis **method** was applied to achieve the goal of the work. **Results.** The most well-known definitions of the concept of "brand" are given. It is shown that it can be considered from the standpoint of a company that creates goods or provides services under its own brand, or from the standpoint of a buyer who perceives this brand. The way this concept evolves over time is analyzed. It is shown that the brands are a combination of tangible and intangible elements that can be combined into the following groups: visual design elements, distinctive product features (quality, individuality, sounds, aroma, taste, etc.), intangible aspects of customer interaction with the product or company. quality of customer service, etc.). Based on the analysis of existing concepts, the own definition of the concept of "brand" is proposed, which meets the requirements of modernity. The definition of "branding" is considered. It is shown that brand management uses a variety of marketing tools and techniques to increase the value of branded goods in the eyes of buyers and that a large proportion of buyers are willing to pay more for the product of your favorite brand. The main stages of strategic brand management include: determining the position and value of the brand, planning and implementation of the brand marketing program, measuring brand effectiveness, increasing and maintaining brand value. The concept of "brand book" and the advantages of its use are considered. The structure of the brand book is described. It is shown that it is important for the development of companies to create a marketing strategy for rebranding. In the process of rebranding, there are usually four main stages, namely: marketing audit, brand repositioning, restyling of its visual attributes and changing the principles of communication. **Conclusions:** the definition of "brand" and the use of strategic brand management and rebranding will form the brand of the organization, which will be better perceived by consumers and will have a positive image in society.

Keywords: brand; definition; branding; brand book; rebranding; stages.

Introduction

In the modern world, it is difficult to find a person who would never use the word "brand" or did not have even the slightest idea about its content, because at this stage of human development, this term permeates almost all aspects of society. Today, the term "brand" can be just as easily applied to a utility, charity, football team, badminton team, celebrity, or in general - to a government initiative, as previously applied exclusively to wrap in branded material packaging [1].

In general, the word "brand" comes from the Old Norse "brand", which translates as "smoke, fire", and the origins of its history can be found in the days when pastoralists burned certain characteristic symbols on the skin of cattle in order to then be able to distinguish animals that belonged to different owners [2]. Thus, even in ancient times, the "brand" was perceived as a distinctive feature that helped to distinguish the product or property of a particular owner from hundreds of other, outwardly very similar products.

However, still, despite the limitless scope of the concept of "brand" and its rich history, even in the specialized literature on branding it is impossible to find a single definition of this term.

Analysis of recent research and publications

The definition of "brand" in recent years has been devoted to the works of such authors as S. Ahmad, L. De Chernatony, R. Clifton, D. D'Alessandro, F.-R. Esch, J. Gregory, K. Keller, Ph. Kotler, M. Owens,

J. Wiechmann, A.W. Bulanov, E.A. Rudaya, D.A. Shevchenko and others. These definitions, on the one hand, differ significantly from each other, on the other hand, undergo changes over time. Definitions of this concept are closely related to the processes of forming a competitive brand of the organization.

Purpose of the work

The aim of the article is to analyze the existing definitions of the concept of "brand" and modern approaches to the process of brand formation of the organization. To achieve this goal it is necessary to perform the following tasks: to collect definitions of the concept of brand, which are given by organizations, scientists, specialists, to analyze these definitions and their dynamics, to analyze the main features of strategic brand management.

Research results***The essence of the brand and its main components.***

The American Marketing Association defines "brand" as "a name, term, mark, symbol, design, or combination thereof, intended to identify the goods or services of one seller or group of sellers, and to distinguish a product or service from goods or services of competitors" [3].

ISO 10668: 2010 [4] defines a "brand" as an intangible asset related to marketing, including, but not limited to, names, terms, signs, symbols, logos and designs, or a combination thereof, designed to identify

goods, services or organizations, or a combination of them, which creates different images and associations in the minds of stakeholders, thereby generating economic benefits/values.

Many scholars and practitioners in the field of branding, studying the question of how to correctly interpret such a fundamental concept as "brand", tried to provide their own options for its definition. The most well-known of them are listed below in table 1.

Which of the proposed brand definitions is the most complete and meaningful? Which researcher's approach allows to identify the fundamental features of the concept of "brand" at a deep level? The answer to these questions is very difficult to provide, because the difficulty of unambiguous interpretation of the brand is due to a number of reasons. First, the brand, like any other complex phenomenon in marketing, is multifaceted. It can be viewed from the standpoint of a company that

creates goods or provides services under its own brand, or from the standpoint of a buyer who perceives this brand. The desired image of the brand that the organization would like to get and its perception by customers in reality does not always coincide. Thus, the choice of different aspects and points of view provides a multifaceted interpretation of the concept of "brand". Secondly, it is necessary to distinguish between specific and abstract definitions of the brand, because much depends on the level of specification and the context of application of this concept. Third, the very concept of "brand" is constantly evolving under the influence of changes in the external marketing environment and, as a consequence, is filled with new meaning [13]. This is to meet the demands of consumers, which are changing, including as a result of gaining experience related to the product or service, as well as to constantly maintain and increase competitiveness [14, 15].

Table 1. Approaches to defining the concept of "brand" of different researchers

Definition	Researcher
A brand is not a thing, a product, a company or an organization. Brands do not exist in the real world - they are mental constructions. A brand is best described as the sum of a person's entire experience, his perception of a thing, product, company or organization. Brands exist in the form of consciousness or specific people or society.	James R. Gregory, from the book "Leveraging the Corporate Brand" [5]
We define a brand as a trademark that in the eyes of the consumer absorbs a clear and meaningful set of values and attributes. The products are made in the factory. But a product becomes a brand only when it acquires many tangible, intangible and psychological factors. The main thing to remember is that brands are not created by the manufacturer. They exist only in the minds of consumers.	Charles Brymer, General Manager "Interbrand Schecter" [6]
A brand is more than just advertising or even marketing. This is all that comes to a person's mind about a product when they see its logo or hear the name.	David F. D'Alessandro, General Manager "John Hancock", from the book "Brand Warfare: 10 Rules for Building the Killer Brand" [7]
A brand is a set of perceptions in the consumer's imagination.	Paul Feldwick, Executive Director of Strategic Planning, BMP DDB, International Director of Branding Planning, DDB [6]
A brand is an identified product, service, person or place created in such a way that the consumer or buyer perceives the unique added value that best meets his needs.	Leslie De Chernatony, Professor of Brand Marketing and Director of the Center for Research in Brand Marketing at Birmingham University Business School, author of several books on branding [8]
Brands are figurative representations stored in the memory of stakeholders, which perform the functions of identification and differentiation and determine the behavior of consumers in choosing products and services.	Franz-Rudolf Esch, Professor of Marketing, University of Giessen, Germany, Director of the Institute for Brand and Communication Research ("Institut für Marken- und Kommunikationsforschung") [9]
Brand is a name that influences the behavior of market consumers / buyers.	Jean-Noel Kapferer, Professor of the School of Management HEC (France), recognized specialist in branding [6]
A brand is a commercially valuable sign or sum of signs that is known to a certain group of people, evokes in their memory similar information and a similar attitude to real or imaginary objects (interpretation). The brand is able to influence the behavior of this group of people in the interests of its owner, which creates its commercial value. The commercial value of a brand is also determined by how easily it can be detached from one object and transferred to another object or group of objects while maintaining its interpretation.	A.V. Bulanov, from the book "Brand 2.0. From philosophy to practice" [10]
Brand is a sign, symbol, word or combination thereof that helps consumers distinguishing the goods or services of one company from another. The brand is perceived as a well-known brand or company that occupies a special place in the minds and psychology of consumer segments from the masses of their own kind.	D.A. Shevchenko, from the book "Advertising. Marketing. PR" [11]
A brand is a receptive sign of an organization and its products, by which the consumer can distinguish the organization and its products from others.	Chovanová, H. H., Korshunov, A. I., & Babčanová, D. [12]

Leading brand management specialist Leslie de Cernaton in his book "From brand vision to brand evaluation. Strategic process of brand growth and strengthening" identified and summarized the main approaches that interpret the brand [16]. We have displayed his achievements in the form of a diagram (fig. 1).

Obviously, a concept "brand" evolves together with development of world economy, for this reason already a long ago from a simple method for distinguishing of commodities of different producers a brand grew into the difficult, complex phenomenon that includes for itself quite a bit constituents and carries in itself deep maintenance. It is worth noting that even Philip Kotler has

revised his own definition of the brand several times, constantly expanding its value. Thus, first, the founder of modern marketing management theory defined a brand as a name, term, trademark, symbol, image, or a combination thereof, designed to identify the goods and services of one seller or sellers and differentiate them from the goods and services of competitors. However, a little later F. Kotler clarified his previous definition: "A brand is any name, title, trademark, etc., which have a certain meaning and associations" [18]. Finally, Kotler's interpretation of the brand was transformed into: "Brand is a complex concept that can express six meanings: 1) attributes; 2) benefits; 3) value; 4) culture; 5) individuality; 6) user." [19].

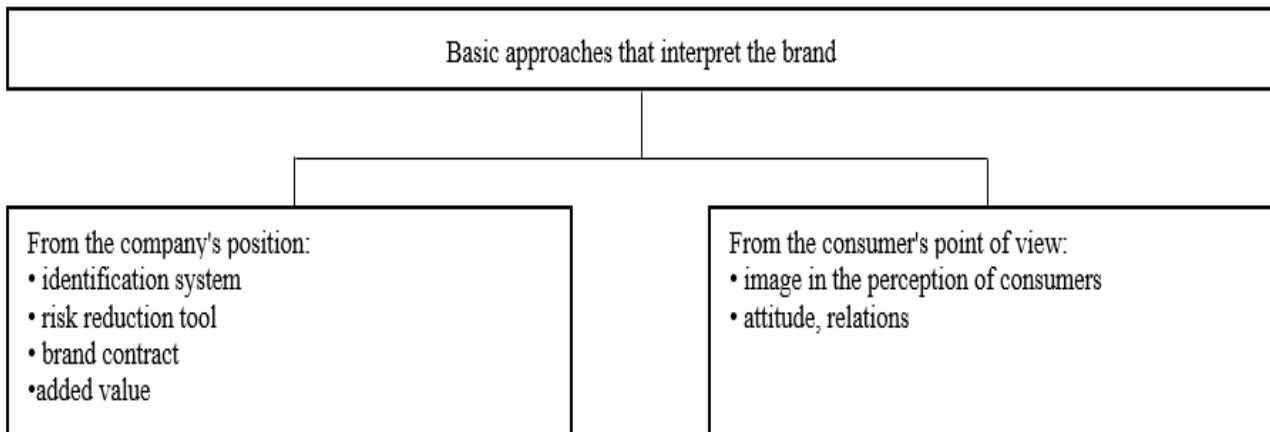


Fig. 1. Varieties of brand interpretations

The above definitions of the brand, proposed by Philip Kotler, actually lead us to the conclusion of what elements make up the brand - it contains all possible characteristics that distinguish goods and services from one seller to another: name, design, style, symbols, points interactions with customers, etc., and in general all elements of the brand work as a psychological trigger or stimulus that evokes an association with all other thoughts about the brand. Thus, brands are a combination of tangible and intangible elements that can be combined into such groups:

1) Visual design elements: name, logo, corporate colors and fonts, slogan, packaging, graphics, shape, etc.

2) Distinctive features of the product: quality, individuality, sounds (unique melody or set of notes can become a characteristic feature of the brand), aroma, taste, etc.

3) Intangible aspects of customer interaction with the product or company: reputation, quality of customer service, etc. [20].

Thus, the brand can be defined as a holistic image, which gradually develops in the minds of the target audience, based on all the information received, which relates to all aspects of the brand owner.

Modern approaches to the process of forming a competitive brand of the organization.

Creating a brand, despite the objective complexity of this task, is only the beginning of another infinitely long process called brand management, because for a

brand to continue to succeed, companies must constantly make concerted efforts to ensure its dynamic branding.

In 2001, Molly Hislop defined branding as the process of establishing a connection between a company's product and its emotional perception by customers in order to differentiate itself from competitors and build loyal relationships with customers [21]. In 2004 and 2008, Kapferer and Keller, respectively, published their vision of branding, in their view: "Branding is meeting customers' expectations and constantly meeting their needs" [22].

According to [23], brand management is the process of maintaining and improving a brand so that its name is associated with positive results. A brand is what customers think of when they see or hear a brand name, ie a brand is the image and individuality of a product or service offered by a company. Brand management, in turn, uses a variety of marketing tools and techniques to increase the value of branded goods in the eyes of customers. Based on the goals set by the marketing strategy, brand management allows product prices to grow and create loyal customers through positive associations and images, or good awareness of potential consumers about the brand. For example, Scott Davis published a study in his book, which indicates that 72% of buyers are willing to pay a price for a favorite brand that is 20% higher than the price of the nearest competing brand; 50% of buyers are ready for a similar excess of the price by a quarter, and 40% are even willing to overpay

a third of the price in order to buy a product of a certain brand [24].

Thus, proper brand management can increase loyalty to it, which in turn forces customers to return, which in turn directly affects the company's benefits. Simply said, a successful brand allows its rights holders to raise product prices and increase their own profits. In fact, without smart brand management, most global companies would not have achieved such success.

The authors of [25] conducted a survey of consumers and concluded that brand knowledge has a great influence on consumer behavior, and this result is statistically significant. Brand knowledge includes brand awareness and brand image. People are switching from local to branded products. They like to use branded products to show their status, power and wealth.

In [26], based on a survey of 200 graduates and working young people, it was concluded that there is a strong statistically significant positive correlation between advertising and brand preferences, as well as the relationship between customer income and brand preference.

The process of strategic brand management is necessary to create and maintain brand value. Developing a strategy that successfully maintains or improves brand awareness, strengthens consumer associations with it, emphasizes the quality and usefulness of the brand, is an important task of brand management. In general, in the process of strategic brand management, researchers identify the following main stages:

1. Determining the position and value of the brand.

The first step in the strategic brand management process begins with a clear definition of what a brand should be in terms of value to consumers, and how it should be positioned in a competitive market. Philip Kotler notes that brand positioning is a set of actions of the company to form its offer and build an image so that the brand occupies a special and significant place in the minds of the target consumer.

2. Planning and implementation of a brand marketing program.

Brand building is the next step in managing an organization's brand. This stage of forming a holistic brand involves planning such components as pricing, packaging, customer service and more. In addition, during this stage, techniques are developed to build a recognizable brand and further support consumer awareness of it, i.e. at this stage; strategies for marketing, branding and advertising are agreed.

3. Measuring brand effectiveness.

It is important not only to create a brand, but also to constantly measure and monitor its effectiveness against competitors and other market dynamics. There are several different theories as to which parameters best reflect the effectiveness of a brand. Let's focus on the list proposed by D. Aaker, which includes such indicators as: brand awareness, perceived quality / brand leadership, brand loyalty, brand associations and indicators of market behavior (e.g., market share) [27].

4. Increasing and maintaining brand value.

The final stage in the process of brand management after evaluating the effectiveness is to work on improving the brand image to ensure the growth and maintenance of brand value. Brand value is a measure of the quality it offers [28].

In general, according to a study by Lucidpress, consistent and continuous branding can increase the company's average annual profits by about 23%, but despite these statistics, only a quarter of organizations have their own official brand book (or brand style guide) whose recommendations they really follow. In fact, about 60% of companies admit that the product they create does not always meet the principles of their brand [29]. Although it is consistent adherence to the developed principles that helps companies achieve the coherence needed to form a recognizable brand, positive associations and, as a result, gain customer loyalty.

A brand book or brand style guide is an official document that sets out specific guidelines for maintaining brand identity in all external and internal communications. Brand books often contain clear recommendations on the correct use of the logo, corporate colors, acceptable manipulation of images and photos, information about the voice/tone of the brand ("Tone of voice"), etc.

The most obvious advantage of having, and most importantly - the constant use of a brand book, is that it provides an organization that works under its own brand, consistency and unity, which help to form the identity of the brand image. All this over a longer period contributes to the emergence of trust and loyalty from the target audience.

A brand book is usually created according to a certain structure and consists of three main sections: "About the brand", "Recommendations for visual content", "Principles of communication".

The section "About the brand" prescribes the mission, values and target audience of the brand. Identifying these points at the outset is a key to further creating a logical and holistic image.

In the section "Recommendations for visual filling" you need to provide all the necessary information about the following elements:

- 1) Logo: its location, variations for different platforms and channels, colors, sizes and proportions;
- 2) Corporate colors: color palette and texture, necessarily their monochrome version;
- 3) Fonts: corporate typography, which is used in the titles and main texts of official documents;
- 4) Photos: their style and basic principles, accompanied by specific examples;
- 5) Other: brand names, patterns, graphics, icons,

The final section "Principles of communication" describes in detail the principles of communication between the brand and its target audience, they include:

- 1) Language: official-business, informal;
- 2) Tone: authoritative, caring, conservative, friendly, provocative, humorous, etc.;
- 3) Style: formatting, use of terminology, admissibility of slang and its limits, branded "emoji";
- 4) Presence in social networks: types of publications, time of publications, different styles of social media;

5) E-mails: structure, signature and tone;

6) Readability and grammar: types of sentences and their length, capital letters, numbers, abbreviations, abbreviations [30].

Thus, it can be argued that the brand is a well-thought-out system of associations that identify it in the eyes of consumers, and the brand book helps the company to adhere to the chosen concept and consolidate the image of the brand in the market. However, sometimes companies no longer want or can maintain a stable image, and they need to make changes to brand positioning, separate from the negative nuances of previous branding, broadcast a new philosophy of the organization, expand or change their target audience, or transfer the company to higher level. To solve such problems, there is a marketing strategy of rebranding, which creates a new name, logo, slogan, design, concept or combination for the existing brand in order to form a new, differentiated identity in the minds of consumers, investors, competitors and other stakeholders' parties [31]. This often involves radical changes in brand image, marketing strategy and advertising topics.

In the process of rebranding, there are usually four main stages, namely: marketing audit, brand repositioning, restyling of its visual attributes and changing the principles of communication. Let's consider in more detail what measures each of the specified stages provides.

Marketing audit. The main goal is to assess brand awareness and loyalty to consumers, study the images and associations it evokes in the target audience, and identify the strengths and weaknesses of the brand, its competitive advantages, and the presence of barriers to its positive perception. Based on the results of the marketing audit, a decision is made as to whether there is a need to reposition the brand.

The main task of brand repositioning is a significant change in the perception of the target market of its key advantages and features against the background of other proposals in a competitive market [32].

Restyling is a change in the design and visual attributes of a brand (logo, corporate identity, colors, etc.), i.e. it is a cosmetic change in its appearance. The task of transforming the ideology or positioning of the brand is not related to restyling, but the design change is in accordance with the previously developed new characteristics of the brand.

Changing the principles of communication involves the use of a new style of communication with the audience (changing the tone of messages, communication channels, etc.) to convey information about the updated characteristics of the brand [33].

Conclusions

The paper shows that the existing definitions of "brand" differ significantly from each other. The reasons for the differences are that this concept can be considered both from the standpoint of the company and from the standpoint of the buyer, the level of specification or abstraction may also differ. In recent years, there have been transformations of this concept from name, term, trademark, symbol, image or their combination to a complex concept that reflects the elements of visual design, product features, and intangible aspects of customer interaction with the product or company. Based on the analysis of existing concepts, the own definition of the concept of "brand" is proposed, which meets the requirements of modernity.

The definition of "branding" is given. It is shown that brand management uses a variety of marketing tools and techniques to increase the value of branded goods in the eyes of buyers and that a large proportion of buyers are willing to pay more for the product of your favorite brand. The main stages of strategic brand management include: determining the position and value of the brand, planning and implementation of the brand marketing program, measuring brand effectiveness, increasing and maintaining brand value.

The concept of "brand book" and the advantages of its use are considered. The structure of the brand book is described. It is substantiated why it is important for the development of companies to create a marketing strategy for rebranding. There are four main stages of the rebranding process, namely: marketing audit, brand repositioning, restyling of its visual attributes and changing the principles of communication. It is shown that the above definition of "brand" and the use of strategic brand management and rebranding will form the brand of the organization, which will be better perceived by consumers and will have a positive image in society.

The results of the work will be used in conducting a marketing audit of the existing brand of the organization providing educational services, and, if necessary, in developing proposals for its rebranding.

References

1. Clifton, R., Ahmad, S. (2009), *Brands and Branding*, John Wiley & Sons, 256 p.
2. Keller, K. L. (2008), *Strategic Brand Management*, Pearson/Prentice Hall, 3rd edition.
3. "Branding", available at : <https://www.ama.org/topics/branding/> (last accessed 20.02.2021).
4. "ISO 10668:2010 Brand valuation — Requirements for monetary brand valuation".
5. Gregory, J. R., Wiechmann, J. G. (1997), *Leveraging the Corporate Brand*, McGraw-Hill, 1st ed., 1997.
6. "Brand" ["Brend"] available at : http://www.neoanalytics.ru/media/file/binary/2011/7/4/201078651243/brend_pdf?srv=app1 (last accessed 20.02.2021).
7. D'Alessandro, D. F., Owens, M. (2001), *Brand Warfare: 10 Rules for Building the Killer Brand*, McGraw-Hill, 1st ed., 204 p.
8. de Chernatony, L. (1998), *Brand Management (The International Library of Management)*, Dartmouth Pub Co, 1st ed.
9. Esch, F.-R. (1990), *Expertensystem zur Beurteilung von Anzeigenwerbung*, Physica-Verlag, 1st ed.

10. Bulanov, A. V. (2014), *Brand 2.0. From philosophy to practice [Brend 2.0. Ot filosofii k praktike]*, OJSC "Krasnaya Zvezda", Moscow, 496 p.
11. Shevchenko, D. A. (2014), *Advertising. Marketing. PR [Reklama. Marketing. PR]* : textbook, "RGGU", Moscow, 3rd ed., rev. and add, 639 p.
12. Chovanová, H. H., Korshunov, A. I., Babčanová, D. (2015). "Impact of brand on consumer behavior", *Procedia Economics and Finance*, No. 34, P. 615–621.
13. Rudaya, E. A. (2006), *Fundamentals of Brand Management [Osnovyi brend-menedzhmenta]*, Aspect-Press, Moscow, 254 p.
14. Domnin, V. N., Starov, S. A. (2017), "Evolution of key concepts of brand management", *Vestnik of Saint Petersburg University. Management*, Vol. 16, Issue 1, P. 5–32. DOI: 10.21638/11701/spbu08.2017.101
15. De Chernatony, L., Drury, S., Segal-Horn, S. (2004), "Identifying and sustaining services brands' values", *Journal of Marketing Communications*, No. 10 (2), P. 73–93.
16. Chernatony, L. (2006), *From Brand Vision to Brand Valuation. Strategic process of growth and strengthening of brands [Ot videniya brenda k otsenke brenda. Strategicheskiiy protsess rosta i usileniya brendov]*, Trans. from Eng., New knowledge, Minsk.
17. Kotler, P. (2005), *Marketing of the XXI century [Marketing XXI veka]*, Trans. from English, Neva, Neva Economics, St. Petersburg, 425 p.
18. Kotler, P. (2007), *Fundamentals of Marketing. Short course. [Osnovyi marketinga. Kratkiy kurs]*, Trans. from English, 8th ed., Williams, Moscow, 832 p.
19. Tretyak, O. L. (2005), *Marketing: New Landmarks of the Management Model [Marketing: novyye orientiryi modeli upravleniya]* : A Textbook, INFRA-M, Moscow, XII, 403 p.
20. "Elements of Brand. Principles of Marketing – Reading", available at : <https://courses.lumenlearning.com/clinton-marketing/chapter/reading-elements-of-brand/> (last accessed 20.02.2021).
21. Hislop, M. (2001), *Dynamic Logic 's Branding 101 : An Overview of Branding and Brand Measurement for Online*, 22 p.
22. Shamoon, S, Saiqa Tehseen. (2011), "Brand Management: What Next?", *Interdisciplinary Journal of Contemporary Research in Business*, Business Source Complete. Web. Oct 20, 2012, No. 2.12, P. 435–441.
23. Gibson, K. (2009), "BusinessDictionary.com", *Reference Reviews*, Vol. 23 No. 2, P. 25–26. DOI: <https://doi.org/10.1108/09504120910935183>
24. Davis, S. M. (2000), *Brand Asset Management : Driving Profitable Growth through Your Brands*, Jossey-Bass a Wiley Company, San Francisco.
25. Fatima, S., Aftab, M., Iqbal, M. T. (2014), "The impact of branding on consumer buying behavior", *International Journal of Technology and Research*, No. 2 (2), P. 54–64.
26. Lekshmi, D. N., Jeevandas, M. S. (2020), "Impact of Branding In Consumer Buying Behaviour and Influence of Advertisement on Branding", *International Journal of Advanced Science and Technology*, No. 29 (7), P. 4460–4465.
27. Aaker, D. A. (2003), *Creating strong brands [Sozdanie silnyih brendov]*, Publishing house "Grebennikov", Moscow, 433 p.
28. "Brand Management Definition, Importance & Example, Marketing Dictionary", available at : <https://www.mbaskool.com/business-concepts/marketing-and-strategy-terms/10533-brand-management.html> (last accessed 20.02.2021).
29. "How to Build a Brand Around Sustainability?", Lucidpress, available at : <https://www.lucidpress.com/blog/how-to-build-brand-around-sustainability> (last accessed 20.02.2021).
30. "How To Create A Brand Book", DesignRush, available at : <https://www.designrush.com/trends/brand-book> (last accessed 20.02.2021).
31. Muzellec, L., Lambkin, M. (2006), "Corporate rebranding: destroying, transferring or creating brand equity?", *European Journal of Marketing*, Vol. 40, No. 7/8, P. 803–824. DOI: <https://doi.org/10.1108/03090560610670007>
32. Lamb, C. W., Hair, J. F., McDaniel, C. (2009), *Essentials of Marketing*, South-Western.
33. *Restyling. Marketer's notes [Restyling. Zapiski marketologa]*, available at : http://www.marketch.ru/marketing_dictionary/marketing_terms_r/restyling/ (last accessed 20.02.2021).

Received 27.02.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Коновенко Оксана Ігорівна – Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, студентка кафедри маркетингу, Харків, Україна; email: oksanako3101@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6919-0656>.

Коновенко Оксана Ігорівна – Харьковский национальный экономический университет имени Семёна Кузнеця, студентка кафедры маркетинга, Харьков, Украина.

Kononenko Oksana – Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Student of the Department of Marketing, Kharkiv, Ukraine.

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ УПРАВЛІННЯ БРЕНДОМ ОРГАНІЗАЦІЇ

Предметом дослідження в статті є розвиток поняття "бренд", а також сучасні підходи до процесу формування бренду організації. Поняття "бренд" в останні десятиліття набуло широкого поширення. Його застосовують і до окремої особистості, і до підприємства, і до державних ініціатив. Однак в літературі немає єдиної точки зору з приводу визначення цього поняття. **Метою** роботи є аналіз існуючих визначень поняття "бренд" і сучасних підходів до процесу формування бренду організації. Для досягнення цієї мети необхідно виконати наступні **завдання**: зібрати визначення поняття бренд, які дані організаціями, науковцями, фахівцями, проаналізувати ці визначення та їх динаміку, проаналізувати основні особливості стратегічного управління брендом. Для досягнення мети роботи застосований метод системного аналізу. **Результати**. Наведено найбільш

відомі визначення поняття "бренд". Показано, що його можна розглядати з позиції компанії, що створює товари чи надає послуги під власним брендом, або ж з позиції покупця, який сприймає цей бренд. Проаналізовано, як еволюціонує це поняття з часом. Показано, що бренди являють собою поєднання матеріальних та нематеріальних елементів, які можна поєднати у такі групи: елементи візуального дизайну, відмінні особливості продукту (якість, індивідуальність, звуки, аромат, смак тощо), нематеріальні аспекти взаємодії клієнтів з продуктом чи компанією (репутація, якість обслуговування клієнтів тощо). На основі аналізу існуючих понять запропоновано власне визначення поняття "бренд", яке відповідає вимогам сучасності. Розглянуто визначення поняття "брендинг". Показано, що бренд-менеджмент використовує розмаїття маркетингових інструментів та технік для збільшення цінності брендovanого товару в очах покупців і що велика частка покупців готова більше заплатити за товар улюбленої марки. Основні етапи стратегічного управління брендом включають: визначення позиції та цінності бренду, планування та імплементація програми маркетингу бренду, вимірювання ефективності бренду, збільшення та підтримання цінності бренду. Розглянуто поняття "брендбук" та переваги його використання. Описано структуру брендбуку. Показано, що важливим для розвитку компаній є створення маркетингової стратегії ребрендингу. У процесі ребрендингу зазвичай виділяють чотири основні етапи, а саме: маркетинговий аудит, репозиціонування бренду, рестайлінг його візуальних атрибутів та зміна принципів комунікації. **Висновки:** наведене визначення поняття "бренд" і використання стратегічного управління брендом та ребрендингу дозволять формувати бренд організації, який буде краще сприйматися споживачами та матиме позитивний імідж у суспільстві.

Ключові слова: бренд; визначення; брендинг; брендбук; ребрендинг; етапи.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ БРЕНДОМ ОРГАНИЗАЦИИ

Предметом исследования в статье является развитие понятия "бренд", а также современные подходы к процессу формирования бренда организации. Понятие "бренд" в последние десятилетия получило широкое распространение. Его применяют и к отдельной личности, и к предприятию, и к государственным инициативам. Однако в литературе нет единой точки зрения по поводу определения этого понятия. **Целью** работы является анализ существующих определений понятия "бренд" и современных подходов к процессу формирования бренда организации. Для достижения этой цели необходимо решить следующие **задачи**: собрать определения понятия бренд, данные организациями, учеными, специалистами, проанализировать эти определения и их динамику, проанализировать основные особенности стратегического управления брендом. Для достижения цели работы применен метод системного анализа. **Результаты.** Приведены наиболее известные определения понятия "бренд". Показано, что его можно рассматривать с позиции компании, создает товары или предоставляет услуги под собственным брендом, или с позиции покупателя, который воспринимает этот бренд. Проанализировано, как эволюционирует это понятие со временем. Показано, что бренды представляют собой сочетание материальных и нематериальных элементов, которые можно объединить в следующие группы: элементы визуального дизайна, отличительные особенности продукта (качество, индивидуальность, звуки, аромат, вкус и т.п.), нематериальные аспекты взаимодействия клиентов с продуктом или компанией (репутация, качество обслуживания клиентов и т.п.). На основе анализа существующих понятий предложено собственное определение понятия "бренд", которое отвечает требованиям современности. Рассмотрены определения понятия "брендинг". Показано, что бренд-менеджмент использует разнообразие маркетинговых инструментов и техник для увеличения ценности брендированного товара в глазах покупателей и большая часть покупателей готова больше заплатить за товар любимой марки. Основные этапы стратегического управления брендом включают: определение позиции и ценности бренда, планирование и имплементация программы маркетинга бренда, измерения эффективности бренда, увеличение и поддержание ценности бренда. Рассмотрено понятие "брендбук" и преимущества его использования. Описана структура брендбука. Показано, что важным для развития компаний является создание маркетинговой стратегии ребрендингу. В процессе ребрендинга обычно выделяют четыре основных этапа, а именно: маркетинговый аудит, репозиционирование бренда, рестайлинг его визуальных атрибутов и изменение принципов коммуникации. **Выводы:** приведенное определение понятия "бренд" и использование стратегического управления брендом и ребрендингу позволяют формировать бренд организации, который будет лучше восприниматься потребителями и иметь положительный имидж в обществе.

Ключевые слова: бренд; определения; брендинг; брендбук; ребрендинг; этапы.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Кононенко О. І. Теоретичні аспекти управління брендом організації. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 1 (15). С. 76–82. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.076>

Kononenko, O. (2021), "Theoretical aspects of the organization brand management", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (15), P. 76–82. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.076>

T. MOMOT, YE. MURAEV

MODEL OF ORGANIZATIONAL AND INFORMATION SUPPORT OF SMART CITY STRATEGY DEVELOPMENT IN THE CONDITIONS OF DIGITAL ECONOMY

The article is devoted to the study of the theoretical and methodological foundations of the development of a model of organizational and information support for the development of smart city strategy in a digital economy. The **subject** of the study is a set of theoretical, methodological and practical aspects to ensure the formation of a model of organizational and information support for the development of a strategy for smart cities in a digital economy. The **purpose** of the article is to develop theoretical and methodological provisions and substantiate practical recommendations for the formation of a model of organizational and information support for the development of a strategy for smart cities on a balanced scorecard in a digital economy.: to analyze the most progressive cities in the world to create and implement a strategy of smart cities in terms of leading international rankings of smart cities; to study and systematize methodical approaches to the assessment of smart cities according to **Objectives** to international rankings in the digital economy; summarize the advantages and disadvantages of ranking smart cities; to offer a model of organizational and information support for the development of a strategy for smart cities on a balanced system of indicators in a digital economy. In the course of the research the following **methods** were used: abstract-logical analysis, theoretical generalization and systematization, system analysis. The paper analyzes the most progressive cities in the world in terms of leading international rankings of smart cities in the digital economy. Methodological approaches to the assessment of smart cities according to international rankings in the digital economy are summarized; their advantages and disadvantages are identified. It is proved that today there is no single methodological approach to assessing the rating of a smart city. A model of organizational and information support for the development of a strategy for smart cities on a balanced scorecard in a digital economy has been developed. **Conclusions.** A comparative analysis of the Top 10 smartest cities in the world in terms of leading international rankings; on the basis of the conducted analysis the components of the assessment of smart cities are systematized within the framework of the studied methodological approaches to the assessment of smart cities according to international rankings. a model of organizational and information support for the development of a smart cities strategy on a balanced system of indicators was developed, which is considered as an integrated assessment system; the information and analytical tools for assessing the level of balanced development of smart cities, is an informative basis for positioning the city on the selected components of a balanced scorecard are proposed.

Keywords: "smart cities"; digital economy; ratings of smart cities; balanced scorecard; strategy of smart cities; model of organizational and information support; information and analytical tools.

Introduction

The concept of "smart cities" is becoming more widespread in the world. According to the new Navigant Research Global Market Report, there are more than 250 smart city projects in the world from 178 cities, and most of them focus on five key areas, namely, smart energy, smart water, smart transport, smart buildings and smart management [1]. In such conditions, the relevance of developing sound organizational and information support for developing a smart cities strategy for the digital economy is increasing.

Analysis of recent research and publications

The growing level of urbanization in the world makes it advisable to transform municipal government on the principles of the Smart Cities concept by integrating systems and data, modernizing urban infrastructure, introducing effective municipal management, increasing the development of innovation and human capital.

The importance of the introduction of balanced urban development management in the context of comprehensive digitalization, the problems of its implementation led to the study of these issues by a wide range of scientists, especially foreign ones. Thus, theoretical and methodological approaches to the introduction of the "Smart Cities" concept are comprehensively covered in the works of such foreign scientists as L. Buys, D. Genari, J. Graham, I. Zubizarreta, T. Yigitkanlar, P. Evans, G. Ezkowitz, M. Kamruzzaman,

L. Costa, L. Leidesdorf, J. Lazara, R. McQuaid, M. Marshall, J. Muske, C. Oberg, D. O'Brien, S. Osborne, M. Roscia, T. Savaris, A. Seravalli, K. Strokosh, B. Hutchinson, P. Hennelly and many others [2, 3, 4, 5].

A. A. Andrienko, A. S. Korepanov's studies are devoted to substantiating the theoretical and methodological foundations of managing the development of "smart" large cities in Ukraine in the context of the widespread introduction of information and communication technologies [6, 7].

Highly appreciating the fundamental achievements and quite high interest in the development of the concept of smart cities, it should be noted that the problem of studying the organizational and information support for the development of smart cities strategy in the digital economy taking into account the influence of the factors of the digital economy remains beyond the attention of scientists, which determines the relevance and timeliness of this study.

Purposes and objectives of the study

The purpose of the article is to develop theoretical and methodological provisions and substantiate practical recommendations on the formation of a model of organizational and information support for the development of a strategy for smart cities on a balanced system of indicators in the digital economy. The objective of the work is to analyze the most progressive cities in the world to create and implement a strategy of smart cities in terms of leading international rankings of smart cities; to

study and systematize methodological approaches to the assessment of smart cities according to international rankings in the digital economy; summarize the advantages and disadvantages of smart city rating; to offer a model of organizational and information support for the development of smart cities strategy for a balanced scorecard in the digital economy.

Materials and methods of research

The theoretical and methodical basis of the study was the scientific works of leading domestic scientists and foreign scientists-economists, international ratings of smart cities, namely: IESE Cities in Motion Index, IMD – SUTD (SCI), Smart City Index, Smart City Strategy Rating, (SCSI), PwC Cities of Opportunity 7, EasyPark

Smart City Index, Kearney (GCI) (GCO); Methodical approaches to assessing intelligent cities according to international ratings. In the course of the study, such methods were used: abstract-logical analysis, theoretical generalization and systematization, system analysis.

Research results and their discussion

The assessment of the current situation and the systematization of the experience of the world's leading smart cities are important for the construction of the strategy and its further implementation. So, at the first stage, representative cities were selected, which are the most progressive in the world to create and implement a smart city strategy in the context of the leading international smart city ratings (table 1).

Table 1. Comparable analysis of the Top 10 smartest cities in the world in terms of international ratings

City	IESE Cities in Motion Index, 2020 (CIMI)	IMD – SUTD (SCI) Smart City Index 2020	Smart City Strategy Rating, (SCSI)	PwC Cities of Opportunity 7	EasyPark Smart City Index 2019	Kearney (GCI) (GCO) 2020
London (Great Britain)	1 (0)	15 (+5)	Advanced (3)	1	50	2 (0)
New York (USA)	2 (0)	10 (+28)	None	6	23	1 (0)
Paris (France)	3 (-1)	61 (-10)	Implementation Follower (10)	4	38	3 (0)
Tokyo (Japan)	4 (-2)	79 (-17)	None	15	54	4 (0)
Reykjavik (Iceland)	5 (0)	-	None	-	-	-
Copenhagen (Denmark)	6 (-2)	6 (-1)	None	-	4	20 (-3)
Berlin (Germany)	7 (-2)	38 (+1)	None	12	-	15 (-1)
Amsterdam (Netherlands)	8(+5)	9 (+2)	None	5	3	23 (-3)
Singapore (Singapore)	9 (-2)	1 (0)	Advanced (2)	2	9	9 (-3)
Hong Kong (China)	10 (-1)	32 (+5)	None	9	87	6 (-1)
Zurich (Switzerland)	11 (-4)	3 (-1)	None	-	11	22 (-7)
Oslo (Norway)	12 (0)	5 (-2)	None	-	1	-
Chicago (USA)	13 (-4)	44 (+12)	Well progressing (5)	13	-	8 (0)
Stockholm (Sweden)	14 (+1)	16 (+9)	None	7	5	8 (2)
Vienna (Austria)	18(+8)	25 (-8)	Advanced (1)	-	7	22 (+3)
Helsinki (Finland)	22 (0)	2 (+6)	None	-	19	-
Taipei (Taiwan)	27 (-3)	8 (-1)	None	-	25	26 (-1)
Geneva (Switzerland)	34 (+2)	7 (-3)	None	-	33	16 (-4)
Auckland (New Zealand)	35 (0)	4 (+2)	None	-	58	-
Beijing (China)	84 (+1)	82 (-22)	None	19	99	5 (+4)
Toronto (Canada)	30 (+12)	30 (-15)	None	3	-	19 (-2)
San Francisco (USA)	20 (-1)	27 (-15)	None	8	-	13 (+9)
Sydney (Australia)	17 (-2)	18 (-4)	None	10	-	12 (+1)
Kyiv (Ukraine)	115 (+4)	98 (-6)	None	-	-	-

Note: Compiled by the authors according to [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]. The parentheses show the changes in the rating compared to 2019.

The obtained data indicate that as a result of applying various methodological approaches to assessing the rating of smart cities, different cities entered the top ten "smart cities" in the same year according to different leading compilers. Moreover, according to different ratings, cities occupy different positions. Only cities such as London, Singapore and Paris are represented in each of the ratings under consideration.

The Center for Globalization and Strategy of the IESE Business School of the University of Navarre, since

2014, annually compiles the IESE Cities in Motion Index (CIMI), calculated to help the public and governments determine the effectiveness of the city. The CIMI indicator system is a research platform based on an integrated approach that combines an innovative approach to city management and a twenty-first century city model based on four factors: a sustainable ecosystem, innovation, equal opportunities for citizens and well-connected territories based on nine basic aspects, including human capital, social cohesion, economy, governance,

environment, mobility and transport, urban development, international importance and technology. The analytical platform is based on a series of in-depth interviews with city authorities, entrepreneurs, scientists and experts whose activities are related to the development of smart cities. So, according to the 2020 report (sixth edition), experts surveyed the degree of development in 174 cities (including 79 capitals) from 80 countries. The conceptual model of the CIMI index is based on the implementation of urban ranking, which is considered as a set of steps covering the research of the situation, the construction of a strategy and its further implementation [2]. It is important to note that the CIMI indicator system includes not so much SMART and ICT indicators, but rather the results of their application. According to the IESE Cities in Motion Index (CIMI) 2020 rating, Europe is the most effective geographical region with 14 cities, which are among the 25 best smart cities (table 2).

According to the IESE rating, for six consecutive years London has never fallen below the second position, and since 2019 it ranks first, including in terms of human capital (thanks to a large number of business schools and universities) and conditions for international cooperation. Since 2017, it remains in the top ten in terms of the development of management, mobility and transport, technology and urban planning. In addition, more startups and programmers are concentrated in the British capital than in any other city in the world. So, the open data platform "London Datastore" uses more than 50,000 people, companies, developers and researchers monthly, which makes it possible to achieve significant success in solving transport issues, in particular through the use of Heathrow shuttles that connect London with Heathrow Airport. The weakest link in the British capital is still social cohesion with position 64. However, in this position there is a deterioration compared to the 45th position in 2019 and an improvement compared to the 68th position in 2018 and the 105th in 2017. In order to manage the life support of the city, the Smart London system allows city authorities to model situations in each area of the city on the basis of 60 criteria, including demographic, geological and historical data. There are more than 300 outdoor surveillance cameras per 1 km² of London.

Singapore is an island city-state, confidently located in the top rankings of smart cities in the world. The successful implementation of the Smart Nation program has already allowed Singaporeans to get high-speed Internet access in every home. And for each resident of Singapore there are three smartphones. Along with the development of high-tech industries in Singapore ICT is widely used in the social sphere.

In the IESE ranking, New York ranks second in the world thanks to the best economic indicators (1st place in the world in the state of the urban economy), high human capital, progressive urban planning and good conditions for establishing international ties. New York City has nearly 7,000 high-tech companies and ranks 8th in technicality, providing many integrated technology services, such as free Wi-Fi LinkNYC. Like the residents of London, social cohesion (137 positions), which has

improved compared to 151 positions in 2019, has not yet been achieved by New Yorkers.

Amsterdam is one of the most progressive cities in Europe thanks to the symbiosis of financial technologies, energy efficiency and culture. A web site with open data called Amsterdam Smart City was created for residents of the city. The number of bicycles (881 thousand) here exceeds the number of inhabitants (850 thousand), because it is convenient to use them thanks to a developed system of automated services. Amsterdam plans to become the first European city with zero emissions. Therefore, the city authorities plan to ban cars with gasoline and diesel engines until 2025.

Paris, like London, is one of the most important financial centers in Europe. Its strongest points in the IESE Cities in Motion Index (SIMI) 2020 are international relations (2 position), transport and mobility (2 position), human capital (6 position), urban planning (12 position), economy (13 position) [2]. In addition, Paris is actively using open innovation, the Internet of Things (to optimize the flow of transport and pedestrians) and an automated metro system. To improve air quality in the city, the authorities are promoting the use of bicycles and electric cars.

As for the environment, for the second year in a row, the best city is Reykjavik (5th overall rating), followed by Copenhagen (6th). More than 99% of the city's electricity is generated thanks to geothermal sources; the authorities have completely abandoned combustible minerals. Iceland's capital also approved a program that plans to become a zero-carbon city by 2040. However, the level of urban planning remains low (125 position).

According to the rating of the "smartest" cities in the world IMD - SUTD (SCI) Smart City Index 2020, compiled by the Smart City Observatory of the World Competitiveness Center of the Institute for Management Development (IMD) in collaboration with Singapore University of Technology and Design (SUTD), Singapore is one of the Top 10 smartest cities in the world (Singapore), followed by Helsinki (Finland), Zurich (Switzerland), Auckland (New Zealand), Oslo (Norway), Copenhagen (Denmark), Geneva (Switzerland), Taipei (Taiwan), Amsterdam (Netherlands) and New York (USA). The rating has been compiled since 2019 by interviewing residents about the technological capabilities of their city in five key sectors: health and safety, mobility, activities, opportunities and management [4]. In 2020, 109 cities of the world were interviewed. The assessment is based on how people perceive the scale and impact of efforts to make their cities "smart," combining "economic and technological aspects" with "humane dimensions." The study also assessed the availability of technology for urban residents. In 2020, Kiev took 98th place in the ranking of the smartest cities in the world IMD - SUTD (SCI) Smart City Index 2020, having lost 6 positions in a year. According to the results of the survey, Kiev residents identified corruption, road quality, affordable housing, safety and air pollution as key issues that need to be addressed in the city (table 2).

Table 2. Systematization of methodical approaches to the assessment of smart cities according to international rankings

Ranking	Year	Developer	Components of smart city assessment
IMD – SUTD (SCI) Smart City Index	2019	Swiss Business School IMD together with the Singapore University of Technology and Design The rating assesses 109 cities by surveying 120 residents of each city	Rated by five key spheres: 1. health and safety, 2. mobility, 3. activities, 4. opportunities, 5. management. Cities are distributed into four groups based on the Human Development Index (HDI).
EasyPark Smart City Index	2018	Swedish developer of electronic solutions for city parking EasyPark estimates 500 cities	1. smart parking, 2. urban planning, 3. car-sharing services, 4. education, 5. urban traffic, 6. business ecosystem, 7. public transport, 8. 4G LTE, 9. clean energy, 10. Internet speed, 11. smart construction, 12. WiFi access points 13. MSW handling, 14. the prevalence of smartphones, 15. protection of the environment, 16. standard of living, 17. involvement of residents, 18. digitalization of the government, 19. methods of transition to a "smart city".
Smart City Strategy Index (SCSI)	2017	Developer: Ronald Berger. The 2019 rating scores 153 cities with an officially developed Smart City Strategy	The rating includes 3 smart city dimensions, 12 components and 31 indicators. Action Fields: 1. houses, 2. energy and environment, 3. mobility, 4. education, 5. health, 6. management, Activators. Planning: 7. budget, 8. plan, 9. coordination, 10. stakeholders, Activators. Infrastructure and politics. 11. political and legal base 12. infrastructure.
Cities of Opportunity	2014	Pricewaterhouse Coopers (PWC). The rating assesses the readiness of the 30 largest cities in the world to introduce future technologies	Appreciated by 67 indicators grouped by ten components: 1. intellectual capital and innovation, 2. technological readiness, 3. openness of the city, 4. transport and infrastructure, 5. health and safety, 6. resistance and environment, 7. demography and suitability for life, 8. economy, 9. simplicity of doing business, 10. cost.
IESE Cities in Motion Index (CIMI)	2014	IESE University of Navarre Business School The rating estimates 174 cities from 80 countries, of which 79 are capitals	101 Indicator is grouped according to 9 components: 1. human capital (development, attraction and education of talents), 2. social cohesion (consensus between social groups), 3. economics, 4. environment,

The end **Table 2**

IESE Cities in Motion Index (CIMI)	2014	IESE University of Navarre Business School The rating estimates 174 cities from 80 countries, of which 79 are capitals	5. management, 6. urban planning, 7. international relations, 8. technology, 9. mobility (ease of movement)
Global Cities Index, Global Cities Outlook (GCO) Kearney	2011	Kearney scores Global Cities Index (GCI) and Global Cities Outlook (GCO). In 2020 rating evaluates 151 cities.	GCI 1. business activity, 2. human capital, 3. exchange of information, 4. cultural experience, 5. political activity, GCO 1. personal well-being, 2. economy, 3. innovation, 4. management.

Note: Compiled by the authors according to [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14].

Singapore has spent the most on smart city initiatives in the world, well ahead of New York, London and Tokyo, investing \$ 1.1 billion.

R. Berger's report Smart City Strategy Rating (SCSI) states that 153 cities around the world, including large and small, have published an official Smart City strategy. 15 of them have strategic plans that demonstrate a comprehensive strategic approach. Moreover, only 8 of them are at an advanced stage of implementation. In addition, the report notes that there are about 500 cities worldwide with a population of more than one million (according to UN estimates), with only 49 of them having a formal Smart City strategy (table 2). According to the results of 2019, the group of leading cities included: Vienna (selected flagship projects: E - medicine, open public data, virtual office), London (selected flagship projects: open city data ecosystem, sensory infrastructure) and Singapore (selected flagship projects: digital and touch platforms, national digital identity) [5]. Summarizing the experience of the world's leading cities, R. Berger proves the need for a participatory approach to developing a smart city strategy.

According to the Cities of Opportunity 7 PricewaterhouseCoopers LLP rating, five cities are among the top ten in terms of indicators estimated: London, New York, Tokyo, Amsterdam and Paris. London maintains a rating of No. 1 among 30 cities assessed by three groups of indicators, namely, intellectual capital and innovation; technological readiness; global openness. Intellectual capital and innovations generated by a highly certified society are the sewers of the development of the modern urban ecosystem. Within this group of indicators, the leaders are London, San Francisco, Paris, Amsterdam, Toronto, New York, Los Angeles, Tokyo, Sydney, Stockholm and Chicago. The process readiness assessment takes into account such components as quality (or reliability of connections), speed (unloading/downloading), value (cost) and digital safety. The top ten in this component include Singapore, London, Amsterdam, New York, Stockholm, Hong Kong, San Francisco, Tokyo, Paris and Toronto. The indicators of the third group assess the global connections and attractiveness of the city outside its local borders and measure the global attractiveness of the city, taking into

account the social, economic and cultural magnetism of the city at the international level. London remains in the first position in this group of indicators. Paris moved from 7th position in 2014 to 2nd in 2020. Among the leaders in this group of indicators are Beijing, Dubai, Hong Kong, Tokyo, Singapore, and Amsterdam [6].

The Swedish developer of electronic solutions for managing urban parking EasyPark has developed the Smart Cities Index, consisting of 19 components. As part of an integrated approach to the calculation of the index, both criteria directly related to the use of ICT and general criteria reflecting the level of development of the urban economy and the quality of life in the city as a whole are proposed. [7].

Leading international management consulting company Kearney evaluates the ratings of the world's leading cities according to the Global Cities Index (GCI) (assesses global urban activity) and Global Cities Outlook (GCO) (assesses the ability of the city to attract talented human. According to the GCI rating for the fourth year in a row, New York leads the ranking of world cities, followed by London, Paris and Tokyo Best cities rated by GCO - London, New York, Paris.

Summing up, it is worth noting that as a result of the use of various evaluation criteria and the construction of a rating in the same year, different cities entered the top ten "smart cities" of the world according to different compilers. Thus, in the positions of the first ten "smart" cities in the world, 22 cities occupy according to various ratings. Three of them (London, Paris and Singapore) are represented in all the ratings under consideration.

Thus, the study allows us to conclude that today there is no single methodological approach to assessing the rating of a smart city. All considered methodological approaches are based on the calculation of an integrated criterion that characterizes not only the use of smart-technologies and ICT, but also the result of their application, which affects the state and level of development of the city. The aggregation of indicators that characterize smart cities into one integrated indicator provides compactness and clarity of the obtained ratings. In this direction, rating is used as a sound tool to present the results of the survey of smart cities in the dynamics and is an informative basis for positioning the city on

selected components to identify competitive advantages for developing strategies for smart city development in the digital economy.

Along with the advantages of rating smart cities, the disadvantages should also be noted. First, it is problematic to collect statistical information to compile a ranking of smart cities. Second, there is a correlation between the indicators that characterize the various components of the rating. Third, the considered methodological approaches do not substantiate the choice of values of weights for the construction of a smart city rating. Fourth, the level of influence of the subjective factor remains high when conducting expert surveys. Fifth, the use of not only statistical indicators in the ranking raises the problem of ambiguous interpretation of the obtained results. There may even be a politicized nature of the interpretation of the results obtained and the interests of individual parties. In addition, the ratings state the facts of past achievements of cities in the areas analyzed and do not take into account the prospects of strategic development.

However, despite these disadvantages, the rating of cities is a fairly reasonable tool for making strategic decisions and determining promising directions for the development of smart cities in the digital economy.

In addition, a necessary step to develop a strategy for smart cities in Ukraine is to summarize existing officially adopted strategies for the development of smart cities among the world's smartest cities represented in international rankings. It is worth noting that among the Top 10 cities, London, Singapore and Vienna are advanced in developing a smart city strategy. Paris is a follower of smart city strategy and Chicago is a well progressed smart city strategy development city (table 1).

Thus, based on the results of the study of the process of developing and implementing the strategy of the world's leading smart cities, it was established that the development of the smart city strategy should be carried out through the use of sound organizational and information support with the calculation of an integrated indicator for the priority areas of smart city development.

For this purpose, a model of organizational and information support for the development of a smart cities strategy on a balanced system of indicators is proposed, which is considered as a complex, open, integral, integrated system in external processes, which should be organically combined with the overall city development strategy and ensure the balance of long-term goals of sustainable city development (fig. 1).

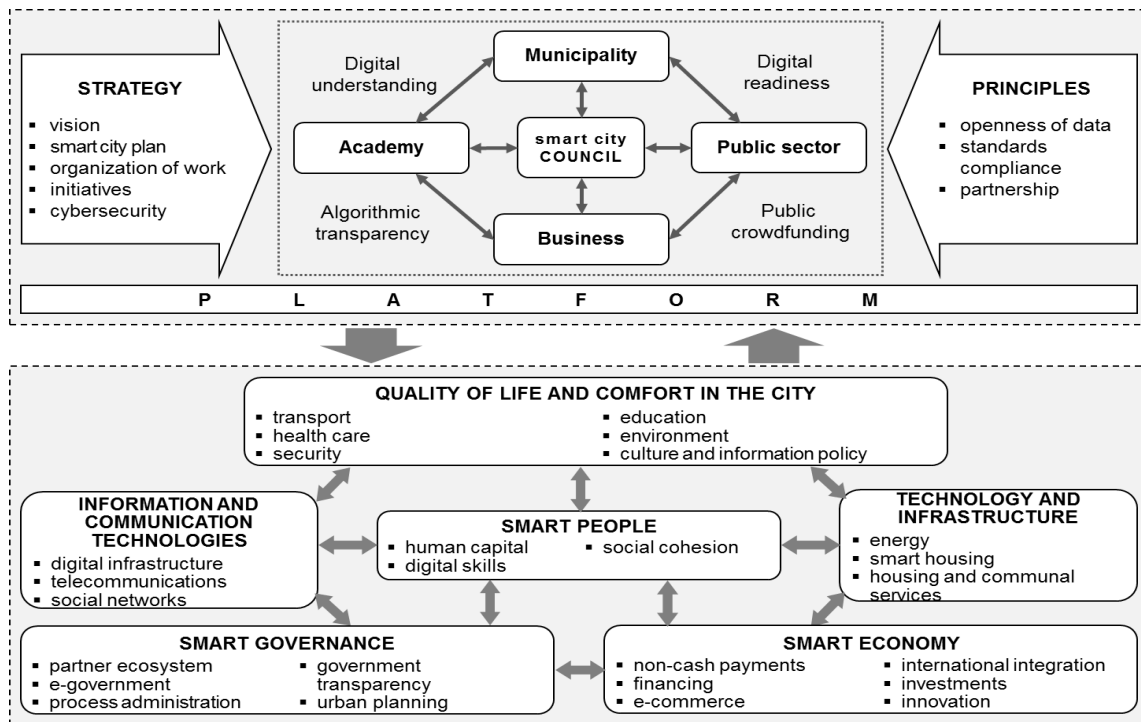


Fig. 1. Conceptual model of organizational and information support for the development of smart cities strategy on a balanced system of indicators in the digital economy

The proposed model, unlike the existing ones, is based on the use of indicator analysis with the implementation of an integrated assessment of interdependent indicators of balanced development of a smart city. For this purpose, based on the results of systematization of methodological approaches to the assessment of smart cities according to international ratings, information and the analytical tool have been formed to assess the level of balanced development of smart cities according to a balanced system of smart city indicators (Smart City Balanced Scorecard (SCBSC),

which allows you to identify priorities and activities for developing a development strategy. The proposed information and analytical tool for assessing the level of balanced development of smart cities is based on the assessment of an integrated smart city indicator according to the following priority areas of smart city development (or projections of a balanced indicator system): smart people, smart governance, information and communication technologies, technology and infrastructure, smart economy, quality of life and comfort in the city [15].

Conclusions

The generalization of foreign experience indicates the need to introduce the ranking of cities of Ukraine using modern information and analytical tools to assess the level of balanced development of smart cities using methodological approaches of leading ratings of the world.

According to the results of the study, it was found that organizational and information support for the development of a smart city strategy according to a balanced system of indicators is defined as a complex, open, integral, integrated system in external processes, which should be organically combined with the general strategy for the development of the city and ensure a balance of long-term goals for the sustainable development of the smart city in the digital economy.

A model of organizational and information support for the development of a smart city strategy based on a balanced scorecard is proposed, which, in contrast to the existing ones, is based on an integrated approach that combines an innovative approach to smart city management and the Smart City Balanced Scorecard (SCBSC), which allows to identify priorities and measures to develop a strategy for the development of a smart city in a digital economy.

An information and analytical tool for assessing the level of balanced development of smart cities is proposed, which is an informative base for positioning the city according to the selected components of the balanced indicator system, which ensures the compactness and visibility of the ratings and sub-ratings obtained for and is a reasonable tool for presenting the results of the survey of smart cities in dynamics with determining competitive advantages for working out a strategy for the development of a smart city in a digital economy.

References

1. Navigante Research. More than 250 Smart City Projects Exist in 178 Cities Worldwide", available at : <https://guidehouseinsights.com/news-and-views/more-than-250-smart-city-projects-exist-in-178-cities-worldwide>
2. Muraev, Ye. (2020), "Urban development based on the concept of "smart cities" in the digital economy: theoretical and methodological principles of implementation", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (12), P. 6–13. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.12.109>
3. Oberg, C., Graham, G., Hennelly, P. (2015), "Smart cities - A literature review and business network approach discussion on the management of organisations", *IMP Journal*, No. 11 (3), P. 468–484.
4. Zubizarreta, I., Seravalli, A., Arrizabalaga, S. (2015), "Smart city concept: What it is and what it should be", *Journal of Urban Planning and Development*, No. 142 (1), P. 1–8. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)UP.19435444.0000282](https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.19435444.0000282)
5. Alkandari, A., Alnashet, M., Alshaikhli, I. F. (2012), "Smart cities: a survey", *Journal of Advanced Computer Science and Technology Research*, No. 2 (2), P. 79–90.
6. Andrienko, A. A. (2018), "SMART-approaches to the development of large cities: prospects for implementation in Ukraine" ["SMART-pidkhody do rozvytku velykykh mist: perspektyvy vprovadzhennya v Ukraini"], *Public Administration and Local Self-Government*, Vol. 3 (38), P. 100–106.
7. Korepanov, O. S. (2018), *Methodological bases of statistical maintenance of management of development of "smart" sustainable cities in Ukraine* [Metodolohichni zasady statystychnoho zabezpechennya upravlinnya rozvytkom "rozumnykh" stalykh mist v Ukraini] : monograph, Kyiv : SE "Inform.-analit. Agentstvo", 354 p.
8. "IESE Cities in Motion Index 2020", available at : <https://media.iese.edu/research/pdfs/ST-0542-E.pdf>
9. "IESE Cities in Motion Index 2019", available at : <https://media.iese.edu/research/pdfs/ST-0509-E.pdf>
10. "Smart City Index 2020", available at : <https://www.imd.org/smart-city-observatory/smart-city-index/>
11. "Smart City Strategy Index 2019", available at : <https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Smart-City-Strategy-Index>
12. "PwC. Cities of Opportunity", available at : <https://www.pwc.com/us/en/cities-of-opportunity/2016/cities-of-opportunity-7-report.pdf>
13. "EasyPark Group. EasyPark", available at : <https://www.easyparkgroup.com/smart-cities-index/>
14. "Global City Index 2020", available at : <https://www. Kearney.com/global-cities/2020>
15. Muraev, E. V. (2020), "Development of a strategy of smart cities of Ukraine according to a balanced system of indicators in the digital economy" ["Rozrobka stratehii rozumnykh mist Ukrainy za zbalansovanoju systemoyu pokaznykiv v umovakh tsyfrovoyi ekonomiky"], *Bulletin of Khmelnytsky National University*, No. 4, Vol. 2 (284), P. 106–109.

Received 25.01.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Момот Тетяна Валеріївна – доктор економічних наук, професор, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, завідувач кафедри фінансово-економічної безпеки, обліку і аудиту, Харків, Україна; email: tvmomot@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7397-3565>.

Момот Татьяна Валерьевна – доктор экономических наук, профессор, Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, заведующая кафедры финансово-экономической безопасности, учета и аудита, Харьков, Украина.

Momot Tetiana – Doctor of Sciences (Economics), O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Head of the Department of Financial and Economic Security, Accounting and Auditing, Kharkiv, Ukraine.

Мураєв Євген Володимирович – Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, здобувач, Харків, Україна; email: e.murayev@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4321-9531>.

Мураев Евгений Владимирович – Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, соискатель, Харьков, Украина.

Muraev Yevgen – O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, P.D Student, Kharkiv, Ukraine.

МОДЕЛЬ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОЗРОБКИ СТРАТЕГІЇ РОЗУМНИХ МІСТ В УМОВАХ ЦИФРОВОЇ ЕКОНОМІКИ

Стаття присвячена дослідженню теоретико-методичних засад розробки моделі організаційно-інформаційного забезпечення розробки стратегії розумних міст в умовах цифрової економіки. **Предметом** дослідження є сукупність теоретичних, методичних і практичних аспектів щодо забезпечення формування моделі організаційно-інформаційного забезпечення розробки стратегії розумних міст в умовах цифрової економіки. **Метою** статті є розробка теоретико-методичних положень та обґрунтування практичних рекомендацій щодо формування моделі організаційно-інформаційного забезпечення розробки стратегії розумних міст за збалансованою системою показників в умовах цифрової економіки. **Завдання** роботи: проаналізувати найбільш прогресивні у світі міста щодо створення та впровадження стратегії розумних міст в розрізі провідних міжнародних рейтингів розумних міст; дослідити та систематизувати методичні підходи до оцінки розумних міст за міжнародними рейтингами в умовах цифрової економіки; узагальнити переваги та недоліки рейтингування розумних міст; запропонувати модель організаційно-інформаційного забезпечення розробки стратегії розумних міст за збалансованою системою показників в умовах цифрової економіки. У ході дослідження використано **методи**: абстрактно-логічний аналіз, теоретичного узагальнення та систематизації, системний аналіз. В роботі проаналізовано найбільш прогресивні у світі міста в розрізі провідних міжнародних рейтингів розумних міст в умовах цифрової економіки. Узагальнено методичні підходи до оцінки розумних міст за міжнародними рейтингами в умовах цифрової економіки, визначено їх переваги та недоліки. Доведено, що на сьогодні не існує єдиного методологічного підходу до оцінки рейтингу розумного міста. Розроблено модель організаційно-інформаційного забезпечення розробки стратегії розумних міст за збалансованою системою показників в умовах цифрової економіки. Здійснено порівняльний аналіз Топ-10 найрозумніших міст світу в розрізі провідних міжнародних рейтингів; на базі проведеного **Висновки** аналізу систематизовано компоненти оцінки розумних міст в рамках досліджених методичних підходів до оцінки розумних міст за міжнародними рейтингами. На базі проведеного дослідження розроблено модель організаційно-інформаційного забезпечення розробки стратегії розумних міст за збалансованою системою показників, що розглядається як комплексна система оцінки; запропоновано інформаційно-аналітичний інструментарій оцінки рівня збалансованого розвитку розумних міст, що є інформативною базою для позиціонування міста за обраними компонентами збалансованої системи показників.

Ключові слова: "розумні міста"; цифрова економіка; рейтинги розумних міст; збалансована система показників; стратегія розумних міст; модель організаційно-інформаційного забезпечення; інформаційно-аналітичний інструментарій.

МОДЕЛЬ ОРГАНИЗАЦИОННО-ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАЗРАБОТКИ СТРАТЕГИИ УМНЫХ ГОРОДОВ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ

Статья посвящена исследованию теоретико-методических основ разработки модели организационно-информационного обеспечения разработки стратегии умных городов в условиях цифровой экономики. **Предметом** исследования совокупность теоретических, методических и практических аспектов по обеспечению формирования модели организационно-информационного обеспечения разработки стратегии умных городов в условиях цифровой экономики. **Целью** статьи является разработка теоретико-методических положений и обоснование практических рекомендаций по формированию модели организационно-информационного обеспечения разработки стратегии умных городов по сбалансированной системе показателей в условиях цифровой экономики. **Задачи** работы: проанализировать наиболее прогрессивные в мире города по созданию и внедрению стратегии умных городов в разрезе ведущих международных рейтингов умных городов; исследовать и систематизировать методические подходы к оценке умных городов по международным рейтингам в условиях цифровой экономики; обобщить преимущества и недостатки рейтингования умных городов; предложить модель организационно-информационного обеспечения разработки стратегии умных городов по сбалансированной системе показателей в условиях цифровой экономики. В ходе исследования использованы методы: абстрактно-логический анализ, теоретического обобщения и систематизации, системный анализ. В работе проанализированы наиболее прогрессивные в мире города в разрезе ведущих международных рейтингов умных городов в условиях цифровой экономики. Обобщены методические подходы к оценке умных городов по международным рейтингам в условиях цифровой экономики, определены их преимущества и недостатки. Доказано, что на сегодняшний день не существует единого методологического подхода к оценке рейтинга умного города. Разработана модель организационно-информационного обеспечения разработки стратегии умных городов по сбалансированной системе показателей в условиях цифровой экономики. **Выводы.** Осуществлен сравнительный анализ Топ-10 самых умных городов мира в разрезе ведущих международных рейтингов; на основе проведенного анализа систематизированы компоненты оценки умных городов в рамках исследованных методических подходов к оценке умных городов по международным рейтингам. На основе проведенного исследования разработана модель организационно-информационного обеспечения разработки стратегии умных городов по сбалансированной системе показателей, рассматривается как комплексная система оценки; предложено информационно-аналитический инструментальный оценки уровня сбалансированного развития умных городов, является информативной базой для позиционирования города по выбранным компонентами сбалансированной системы показателей.

Ключевые слова: "умные города"; цифровая экономика; рейтинги разумных городов; сбалансированная система показателей; стратегия разумных городов; модель организационно-информационного обеспечения; информационно-аналитический инструментальный.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Момот Т. В. Мураев С. В. Модель організаційно-інформаційного забезпечення розробки стратегії розумних міст в умовах цифрової економіки. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 1 (15). С. 83–90. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.083>

Momot, T., Muraev, Ye. (2021), "Model of organizational and information support of smart city strategy development in the conditions of digital economy", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (15), P. 83–90. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.083>

N. NAZAROV

SOCIAL AND LABOR CONFLICT MANAGEMENT: UKRAINIAN AND FOREIGN EXPERIENCE

The **subject** of study in the article is the process of socio-economic conflict management. The **purpose** of the work is to substantiate the theoretical provisions and methodological approaches in the management of labor conflicts as a form of social and labor relations based on Ukrainian and foreign experience. The following **tasks** are solved in the article: to investigate the essence and place of social and labor conflict in the system of social contradictions; provide a classification of conflicts in the social and labor sphere; to study the forms and methods of resolving social and labor conflicts; to analyze the success of conflict prevention in Ukrainian and foreign practice. The following **methods** are used: method of analysis and synthesis, classification-analytical method, abstract-logical method, historical-retrospective analysis and generalization. The following **results** were obtained: the concept of socio-economic conflict is clarified. The classification of conflicts is carried out, which gives an understanding of the nature and essence of conflict relations on the following grounds: the method of conflict resolution (antagonistic and compromise conflicts); spheres of conflict (political, social, economic, organizational conflicts); direction of impact (vertical and horizontal conflicts); degree of conflict confrontation (hidden and open conflicts); the number of participants in conflict interaction (intrapersonal, interpersonal, intergroup); needs (cognitive and interest conflicts). Structural and interpersonal methods for resolving conflict situations are defined. An analysis of the current state of resolution and prevention of labor conflicts in 2020 was conducted according to the National Service for Mediation and Reconciliation. Foreign experience in resolving labor disputes has proved the feasibility of developing the following ways to resolve labor disputes in Ukraine: with the help of special courts on labor and social security (sectoral justice); through civil proceedings in general courts; through conciliation and arbitration procedures. **Conclusions:** The analysis allowed to determine the essence of social and labor conflict as a form of social and labor relations at the micro, meso, and macro levels, which is manifested in the opposition of the subjects of the socio-economic sphere. Applying the gained world experience it is possible to reduce social tensions and to strengthen social and economic safety of the state.

Keywords: conflict; conflict situation; social and labor relations; contradictions; collective labor disputes; mediation procedures; conciliation procedures.

Introduction

Modern theory of labor economics is forced to reconsider the nature and role of conflict in the functioning of socio-economic systems in connection with the permanent conflict situation in society, which is not only a source of contradictions but also a driving force of civilization. The inevitability of contradictions is a manifestation of the law of unity and the struggle of opposites, one of the classical laws of dialectics. According to this law, any phenomenon or situation is considered as a unity of opposing parties that are mutually exclusive. The joint activity of people is accompanied by a clash of different views on events taking place at the micro, meso and macro levels of the socio-economic environment.

Significant contribution to the formation of conflict theory was made by such foreign authors as: Deming V., Siegert V., Simmel G., Lang D., Mall E., Levin K., Kozer J.I., Albert M., Deutsch M., Mescon M., Darendorf R., Parsons T., however, it should be noted that sociological and behavioral approaches to conflict management dominate in their works.

It is important to note that the subject of social conflict has a long tradition, established in the works of Aristotle, M. Weber, T. Hobbes, G. Simmel, N. Machiavelli, K. Marx and other classics of the science of man and society. Modern problems of conflict management, strategies of behavior during conflicts, ways of their constructive solution were investigated by N. Vyshnyakova, S. Emelyanov, H. Cornelius, U. Mastenbrook, E. Melibruda, M. Mescon, B. Withers, S. Feir, V. Sheinov; Ways of realization of conceptual provisions of management of social and labor conflicts were considered by O.A. Grishnova, V.A. Dyatlov,

G.V. Zhavoronkova, O.M. Skibitsky, A.V. Kazanovsky, Y.I. Palekha, M.I. Prystupa, V.O. Kudin and other scientists.

Social and labor relations are a leading component of the whole system of relations of society, which determine the way of life of people, the structure of related processes and relations. The level of development of social and labor relations characterizes the degree of democratization of society, the social orientation of its economic system, the perfection of social relations in general. In this regard, the importance of studying such a form of social and labor relations as labor conflicts and scientific substantiation of methodological and scientific and practical tools for preventing and resolving contradictions in social and labor relations is growing. It should be noted that the reasons for the emergence of conflicting social and labor relations are not isolated, they are interconnected, and their relationship with social and labor relations is both complex and problematic.

The **purpose** of this article is to substantiate the theoretical provisions and methodological approaches in the management of labor conflicts as a form of social and labor relations based on Ukrainian and foreign experience.

Realization of the set purpose assumes the decision of the following tasks: to investigate essence and a place of social and labor conflict in system of social contradictions; provide a classification of conflicts in the social and labor sphere; to study the forms and methods of resolving social and labor conflicts; to analyze the success of conflict prevention in Ukrainian and foreign practice.

Analysis of the problem and existing methods

The concept of conflict originates from the Latin

word "conflictus" – collision. In textbooks on conflictology by L. Yemelyanenko, V. Petyukha, L. Torgova, A. Hrynenko [1], Dutkevych T. [2], Vorozheykina I., Kibanova A., Zakharova D. [3] are provided various, but similar to the content definitions of conflict. For example, A. Ershov defined the conflict as the action of opposite, incompatible in this situation motives, interests, types of behavior. N. Hryshyna interprets the conflict as a conscious obstacle to achieving the goals of joint activities, as a reaction based on the incompatibility of characters, cultural foundations and needs. According to D. Kaidalov and E. Sulimenko, conflict is a clash of interests, views, attitudes, aspirations

of the individual. A. Kovalev defines conflict as a phenomenon of interpersonal and group relations, as a manifestation of confrontation, an active clash of assessments, principles, opinions, characters, standards of behavior.

Almost all scholars emphasize that the conflict is based on contradictions that take the form of differences. Conflicts can be hidden or overt, but they are based on a lack of agreement. Therefore, we define a conflict as a lack of agreement between two or more parties - individuals or groups. In the table 1 other definitions of the conflict by different authors are given.

Table 1. Scholars' views on the concept of "conflict"

Author	Definition
Krysa O. [4]	Conflict is a lack of agreement between two or more parties (individuals or groups); clash of opposing views, positions, and interests.
Kuzmin O. [5]	Conflict situation is the presence of reasons that create the preconditions for conflict. Conflict situation that requires resolution provides the existence of several mandatory elements: the parties to the conflict; object of conflict; the driving force is an incident.
Balabanova L. [6]	Conflict is a special type of interaction, which is based on opposite and incompatible goals, interests, types of behavior of people and social groups, which are accompanied by negative psychological manifestations.
Zinchenko S. [7]	Conflict is a collision of opposite, incompatible tendencies, a single episode in the mind, in interpersonal interactions or interpersonal relationships of individuals or groups of people, associated with negative emotional experiences

The object of the conflict and its participants together form the subject of the conflict, ie they are considered as necessary prerequisites for the emergence of a conflict situation. The incident leads to the beginning of the conflict, plays the role of a catalyst. Conflict situation is determined by objective circumstances, and the incident occurs by accident, when the necessary preconditions are created [8].

Traditionally, there are three fundamentally different ways of resolving labor disputes.

First, a compromise based on reconciling the interests of the conflicting parties (e.g., administration and workers); at the same time each of the parties makes concessions.

Second, unilateral suppression of one party to the other (for example, the organization of strikebreaking, the introduction of troops, forced labor).

Third, integrative, in which new ways and models of behavior of the conflicting parties in the area that caused the conflict are developed and implemented (for example, privatization of the enterprise if the administration and employees cannot reach an agreement) [9].

In most cases, it is the integrative way of resolving the conflict that is optimal, because compromise and one-sided ways only slow down their development, without completely eliminating "tensions", without achieving a full settlement of the conflict. Resolving conflicts caused by objective contradictions involves their timely and accurate diagnosis, joint search for ways to overcome.

Analyzing the approaches to the essence of the phenomenon of social and labor conflicts, we can identify the main system-forming components of the concept of "conflict":

- the presence of interaction between different social actors;
- the interaction is in the nature of a contradiction perceived by the subjects or groups of subjects;
- contradiction is manifested in the opposition of the subjects, aimed at protecting their interests by limiting the activity of opponents.

Different approaches to the disclosure of the concept of "conflict" due to the fact that the study of conflict problems concerns different sciences: psychology, sociology and economics. Therefore, we will consider an interdisciplinary approach to conflicts.

Problem solving.

To select an adequate method of influence and management of the relevant conflict, it is advisable to classify depending on the main features: the method of resolution; spheres of manifestation; direction of influence; degree of expressiveness; number of participants; impaired needs (table 2).

Based on the classification, we define the types of conflicts, ie the variant of conflict interaction, distinguished by a certain feature.

Table 2. Conflict classification

A feature of classification	Types of conflicts
1. Method of solving:	violent; nonviolent
2. Sphere of manifestation:	political; social; economic; organizational
3. Focus on influence:	vertical; horizontal
4. Degree of expressiveness:	open; hidden
5. Number of participants:	intrapersonal; interpersonal; intergroup
6. Needs:	cognitive; conflicts of interest

The above classification gives an understanding of the nature and essence of conflict relations, so let's consider it in more detail.

1. The method of resolving conflicts involves their division into antagonistic (violent) conflicts and compromise (non-violent) ones.

Violent (antagonistic) conflicts are ways of resolving conflicts by destroying the structures of all parties to the conflict or refusing all but one party to participate in the conflict [10]. Compromise conflicts allow several options for their resolution due to mutual change of goals of the parties to the conflict, terms, conditions of interaction.

2. Areas of conflict are diverse: politics, economics, social relations, views and beliefs of people. There are political, social, economic, organizational conflicts.

Political conflicts are a clash over the distribution of power, a form of struggle for power.

Social conflict is a contradiction in the system of relations of people (groups), characterized by the strengthening of opposing interests, trends of social communities and individuals. Varieties of social conflicts are labor or socio-labor, ie in the field of labor. This is a large group of conflicts that have recently arisen in our country very often in the form of strikes, pickets, speeches by large groups of employees of organizations [1].

Economic conflicts are a wide range of conflicts, which are based on the contradictions between the economic interests of individuals and groups. It is a struggle for certain resources, benefits, spheres of economic influence, distribution of property, and so on. These types of conflicts are common at different levels of government [11].

Organizational conflicts are the result of hierarchical relations, regulation of personal activities, and the use of distributive relations in the organization: the use of job descriptions, the functional assignment of the employee's rights and responsibilities; introduction of formal management structures; availability of provisions on remuneration and evaluation of work, bonuses for employees.

3. According to the direction of influence, there are vertical and horizontal conflicts. A characteristic feature of them is the distribution of power, which is in the opponents at the time of the conflict.

In vertical conflicts, the amount of power decreases vertically from top to bottom, which determines the different starting conditions for the parties to the conflict: chief - subordinate, higher organization - enterprise, founder - enterprise [9, 10]. In horizontal conflicts there is an interaction of equal in volume of available power or hierarchical level of subjects: managers of one level, experts - among themselves, suppliers - consumers.

4. The degree of severity of conflict confrontation involves the allocation of hidden and overt conflicts [12].

Open conflicts are characterized by a pronounced clash of opponents: quarrels, disputes, clashes. Interaction is governed by norms that correspond to the situation and status of the parties to the conflict. In the case of a hidden conflict, there are no external aggressive actions between the parties, but indirect methods of influence are used.

5. The number of participants in conflict interaction allows to divide them into intrapersonal, interpersonal, intergroup [1, 3].

Intrapersonal conflicts are a clash within the individual equal in strength, but oppositely directed motives, needs, interests. The peculiarity of this type of conflict is the choice between desire and ability, between the need to perform and compliance with the necessary norms.

Intergroup conflicts – conflicts between different groups, units, which affect the interests of people united during the conflict into a single cohesive community. It should be noted that this cohesion may disappear immediately after the end of the conflict, but at the time of defending the common interest, the unity of the group can be quite significant.

Interpersonal conflicts are clashes of individuals with a group, among themselves, the struggle for the interests of each party. This is one of the most common types of conflict.

6. Cognitive conflicts and conflicts of interest are distinguished depending on the broken needs [2, 13].

Cognitive conflict is a conflict of views, points of view, knowledge. In such a conflict, the goal of each subject is to convince the opponent, to prove the correctness of his point of view, his position. Conflicts of interest can be represented as a counterbalance to cognitive conflict, which means confrontation based on

the conflict of interests of different opponents (groups, individuals, organizations).

Existing methods of resolving conflict situations are divided into two groups: structural and interpersonal (table 3).

Table 3. *Methods of resolving conflict situations*

Structural methods	
Clarification of the requirements for the content of the work	Delegation to individuals or structural units of clearly defined powers to perform the assigned functions and acquaintance with the responsibility for their implementation, prompt proof of the maximum available useful information on this issue);
The principle of using the hierarchy (appeal to the head) in resolving conflict situations	Hierarchy determines the order of interaction and subordination, regulates information flows and indicates which person is responsible for making a particular management decision;
Subordination of the purposes of divisions to the general organizational purposes.	The overall goal of the organization, to which the other goals of the units are subordinated, forces all units, formal and informal groups and individuals to contribute to its achievement;
Influence on behavior through the reward system	A fair reward has a positive effect on people's behavior and avoids destructive conflicts. It is important that the reward system does not encourage negative behavior by individuals or groups of individuals.
Interpersonal methods	
1. Evasion	A person (group of people, enterprise, part of society), anticipating the aggravation of the situation seeks to avoid actions that provoke the incident [22, p.53-61].
2. Smoothing	There are no signs of a future conflict, there is an active prevention of its manifestation, the contradictions of the parties are eliminated or veiled. The device style is used in the following typical situations: - if necessary, maintain good relations with opponents; - the importance of the result for opponents.
3. Coercion	Control over the situation and regulation of its development. In the undesirable direction of the conflict, the person who is endowed with power and authority intervenes and uses force to influence the situation, directs the desired direction to the conflict.
4. Compromise	Temporary or neutral solution to the problem, which conditionally satisfies all parties involved in the conflict. Rivals (opponents) make mutual concessions partially accept the point of view of the other party or postpone the solution of the issue for the future, leaving it open. Compromise is sometimes the last chance to make a rational decision.
5. Conflict resolution	The most desirable and radical way to develop the situation. The parties get acquainted in detail with the arguments both for and against, make mutual concessions, and resolve key issues by collective decision-making. This style is especially effective when the parties have different hidden needs and cannot identify the reasons why these needs remain unmet.

A special type of conflict is a labor or social-labor conflict. According to Art. 2 of the Law of Ukraine "On the Procedure for Resolving Collective Labor Disputes (Conflicts)", a collective labor dispute (conflict) is a disagreement that has arisen between the parties to social and labor relations regarding:

- a) the establishment of new or changes in existing socio-economic conditions of work and industrial life;
- b) concluding or amending a collective agreement;
- c) implementation of a collective agreement, contract or some of their provisions;
- d) non-compliance with the requirements of labor legislation [14].

To regulate the interaction of the parties to the labor conflict on the basis of consensus and constructive resolution of problems in Ukraine, the National Mediation and Reconciliation Service (NMRS) has been established, which is an independent mediator in resolving and preventing labor conflicts.

Thus, in 2020, the NMRS took part in the resolution of 377 collective labor disputes (conflicts) (3 - at the national, 3 - at the sectoral, 6 - at the territorial, 365 - at the industrial level), which directly involved more than 1.4 million employees 6778 of economic subjects [15].

The largest number of labor conflicts was registered, in particular, at enterprises, institutions, organizations of Lviv (93), Zakarpattya (56), Mykolaiv (24) and Volyn (24) regions; among the types of economic activity - at enterprises, institutions, organizations of the budget sphere (117), transport (37), public administration (34, which is 36% more than in 2019), mechanical engineering (27), mining and quarrying (21, which is almost 2 times more than in 2019).

In total, in 377 disputes, employees made 767 claims, which is 6.7% more than in the previous year, of which: 455 (59%) – for non-compliance with labor legislation; 151 (20%) – on the implementation of the collective agreement, agreement or some of their provisions; 142 (18%) – on the establishment of new or changes in existing socio-economic conditions of work and industrial life; 19 (3%) – on the conclusion or amendment of a collective agreement, agreement [15].

As a result of the measures taken by the NMRS to facilitate the resolution of conflicts and prevent their occurrence, wage arrears in the amount of UAH 690.8 million or 57% of the total debt (UAH 1 billion 203.5 million) were repaid, which was the main reason disputes and conflict situations, and UAH 134.5 million was

deregistered due to the termination of employment between the parties, including the dismissal of more than two-thirds of employees who demanded the repayment of arrears of wages.

Foreign experience in resolving labor disputes suggests three ways of possible dispute resolution:

- 1) with the help of special courts on labor and social security (sectoral justice);
- 2) through civil proceedings in general courts;
- 3) through conciliation and arbitration procedures.

In European countries, the United States and Japan great importance is paid to the pre-trial procedure for resolving labor disputes and conflicts.

In the United States in 1947 under the Ministry of Labor was established Federal Service for Mediation and Reconciliation (FSMR), which 30 years later received the status of an independent organization. The FSMR has a list of 1,700 qualified independent arbitrators whose task is to consider the dispute impartially and render its verdict. In the United States, in addition to the FSMR, there are other organizations - the American Association of Arbitrators, the National Academy of Arbitrators, which also mediate at the invitation of the parties. In total, the United States has 5,000 arbitrators who hear more than 100,000 cases each year. Labor relations in the public sector are regulated by the Federal Board of Labor Relations [12, 16].

In Japan, the Labor Relations Law provides for three ways of resolving labor disputes out of court: conciliation, mediation, and arbitration. All these methods fall within the competence of the Labor Relations Commission. It includes representatives of trade unions and employers, as well as members of the public. Reconciliation of the parties is carried out with the help of a mediator appointed by the commission. The mediator has the right, having studied the situation, to propose his own project to resolve the conflict. Mediation negotiations are carried out by a mediation committee set up by the Labor Relations Commission on a tripartite basis from representatives of the trade union, the employer and the public. The parties retain the right to accept or reject proposals made by the committee [13]. Arbitration is carried out through a special arbitration committee, which includes authoritative members of the Commission on Labor Relations. The decisions of the arbitration panel shall be binding on both parties to the conflict.

Conciliation and arbitration procedures are the first stage of labor dispute settlement in the UK, France and Italy. In Spain, according to Royal Decree No. 5 of January 26, 1979, no labor court is allowed to accept a claim for consideration unless there has been an attempt to reconcile the parties.

The mediation method is widely used in the Scandinavian countries. Labor conflicts that are not resolved with the help of intermediaries are considered by national parliaments, which adopt special resolutions. In Lithuania, according to the current legislation, the conflict is regulated by the reconciliation committee, which compiles.

In Estonia, a trade union has the right to seek help in resolving a conflict from a higher-level organization (such

as a national-level trade union), which in turn forms a conciliation commission of employers' and trade unions' representatives. If the conciliation commission does not reach an agreement, the labor dispute is referred to a state mediator, who can personally take up the case or appoint a local mediator. [16, 17].

In Hungary, there is a Service for Mediation and Arbitration of Social and Labor Relations. Mediators who are members of this service are appointed by the Minister of Labor in agreement with the social partners. The service is financed from the state budget. The Service is obliged to report annually on its work to the tripartite National Council for Reconciliation of Interests.

In Poland, the Law on the Procedure for Resolving Collective Labor Disputes provides for the involvement of a mediator in order to reach an agreement between the parties. A characteristic feature of the Polish system is that the parties usually invite well-known, respected people to become mediators - deputies and senators, ministers, prominent religious figures. If the parties to a collective conflict have not agreed on the candidacy of a mediator, he may be appointed by the Ministry of Labor from a list of mediators on the proposal of one of the parties [1, 13, 16].

In Romania, in the event of a conflict, trade union representatives inform the Ministry of Labor, which is obliged to appoint a mediator within 24 hours, who is instructed to carry out the conciliation procedure. The parties are not obliged to agree to the mediator's proposals. In case of disagreement, the conflict may be referred to an arbitration commission.

In Croatia, mediation is mandatory in resolving conflicts related to the signing, amendment or prolongation of a collective agreement. Other industrial disputes may also be subject to a mandatory mediation procedure if the parties have not agreed on alternative methods of resolving such conflicts. In the event of a conflict, a "council of mediators" is created with three members: one employee, one employer and one "mediator", who is appointed from a list drawn up by the economic and social council. Mediation must be completed within five days [2, 6].

World experience convincingly shows that the problems of the economy and social life, including in the field of hired labor, are best solved if the focus is not on confrontation, but on achieving social harmony, coordination of interests of different social groups. Each country has its own characteristics of conflict resolution. However, there is a single general rule: collective economic disputes are usually considered in the conciliation procedure; as such disputes are usually associated with the creation of new legal norms [16]. For example, in the United States, the conciliation method is used to resolve collective economic conflicts, and for collective legal conflicts, judicial and administrative proceedings are used; in the United Kingdom, the conciliation and arbitration method is used for all types of labor disputes; in France, collective economic and legal conflicts are resolved through the conciliation method, and legal intervention is provided for the resolution of legal conflicts.

The conclusion of collective agreements in Austria is a prerequisite for all areas of activity and applies to all employees. Instead, they are valid only within one enterprise and apply only to it. The basis of social partnership is the principle of cooperation between employers and employees, which is implemented in the form of negotiations, collective agreements and collective agreements, coordination of draft regulations, consultations in decision-making by social partners at all levels.

Conclusions

The analysis allowed to determine the essence of social and labor conflict as a form of social and labor relations at the micro, meso, and macro levels, which is manifested in the opposition of the subjects of the socio-economic sphere. Social contradictions lead to a conflict situation, the development of which can be both

constructive and destructive. It can be argued that to some extent social and labor conflicts are becoming an integral part of public life, because social and economic inequality, stratification of society, non-compliance with labor legislation; wage arrears, social and environmental security create permanent contradictions, the solution of which requires the intervention of both government agencies and civil society. The given classification of conflicts in the social and labor sphere allows to develop preventive measures in the prevention of conflicts, applying certain forms and methods of the decision of social and labor conflicts. Analysis of conflict prevention tools in Ukrainian and foreign practice has shown that a common feature is the mandatory use of procedures aimed at achieving social consensus, coordination of the interests of various social groups through the mediation of state and non-state institutions. Applying the gained world experience it is possible to reduce social tensions and to strengthen social and economic safety of the state.

References

1. Yemel'yanenko, L. M., Petyukh, V. M., Torhova, L. V., Hrynenko, A. M. (2003), *Conflictology [Konfliktolohiya]* : Textbook, ed. L. M. Gerasina, M. I. Gentlemen, Kyiv : KhNEU, 315 p.
2. Dutkevych, T. V. (2005), *Conflictology with the basics of management psychology [Konfliktolohiya z osnovamy psykholohiyi upravlinnya]* : Textbook, Kyiv : Center for Educational Literature, 456 p.
3. Vorozheikin, I. E., Kibanov, A. Ya., Zakharov, D. K. *Conflictology [Konfliktologiya]* : Textbook, Moscow : INFRA-M, 224 p.
4. Krysa, O. Y. (2005), "Formation of a modern approach to the role of conflicts in the organization" ["Formuvannya suchasnoho pidkholodu do roli konfliktiv v orhanizatsiyi "], *Bulletin of Lviv Polytechnic National University*, No. 526, P. 684.
5. Kuzmin, O. E., Melnyk, O. G. (2003), *Fundamentals of Management [Osnovy menedzhmentu]* : Textbook, Kyiv : "Akademvidav", 416 p.
6. Balabanova, L. V., Sardak, O. W. (2006), *Personnel management [Upravlinnya personalom]* : Textbook, Kyiv : VD "Professional", 512 p.
7. Zinchenko, S. (2005), "Personnel management as a special type of management activity" ["Upravlinnya personalom yak osoblyvyy vyd upravlins'koyi diyal'nosti"], *Bulletin of the National Academy of Public Administration under the President of Ukraine*, No. 3, P. 156–161.
8. Lozhkin, G. V. (2007), *Psychology of conflict: theory and modern practice [Psykholohiya konfliktu: teoriya i suchasna praktyka]* : Textbook, Kyiv : VD "Professional", 416 p.
9. Garmatyuk, O. (2010), "Mechanisms of conflict prevention and resolution in crisis management" ["Mekhanizmy poperedzhennya i rozv'yazannya konfliktiv v antykrizovomu upravlinni"], *Socio-economic problems and the state*, Issue 1 (3), P.50–55.
10. Mala, N. T., Ugrin, L. E. (2010), "Conflict in the organization: classification and modeling" ["Konflikt u orhanizatsiyi: klasyfikatsiya ta modelyuvannya"], *Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine*, Vol. 20, P.212–219.
11. Vovk, I., Vovk, Yu. (2010), "Management of innovation conflicts in the implementation of resource-saving measures at machine-building enterprises" ["Upravlinnya innovatsiyynykh konfliktamy pry vprovadzhenni resursooshchadnykh zakhodiv na mashynobudivnykh pidpryemstvakh"], *Socio-economic problems and the state*, Issue 1 (3), P. 39–50.
12. Mayer, Bernard S. (2012), *The Dynamics of Conflict: A Guide to Engagement and Intervention 2nd Edition*, Jossey-Bass A Wiley Imprint, 386 p.
13. Boushey Heather (2019), *Finding Time: The Economics of Work-Life Conflict Paperback*, Harvard University Press, 360 p.
14. Law of Ukraine "On the Procedure for Resolving Collective Labor Disputes (Conflicts)" [Zakon Ukrayiny "Pro porjadok vyrishennya kolektyvnykh trudovykh sporiv (konfliktiv)"], available at : <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/137/98-вр>
15. "Information on the results of the National Mediation and Reconciliation Service for 2020" ["Informatsiya pro rezul'taty diyal'nosti Natsional'noyi sluzhby poserednytstva i prymyrennya za 2020 rik"], available at : <https://nspp.gov.ua/home/struktura-nspp-5/13950-informatsiya-pro-rezultaty-diialnosti-natsionalnoi-sluzhby-poserednytstva-i-prymyrennia-za-2020-rik/>
16. Furlong, Gary T. (2020), *The Conflict Resolution Toolbox: Models and Maps for Analyzing, Diagnosing, and Resolving Conflict. 2-nd Edition*, The John Wiley & Sons Inc., 246 p.
17. Nazarova, G. V., Goncharova, S. Yu., Sotnikova, Yu. V., Agramakova, N. V. (2018), *Social economy [Sotsial'na ekonomika]*: textbook, Kharkiv : KhNEU, 284 p.

Received 23.12.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Назаров Нікіта Костянтинович – кандидат економічних наук, доцент, Харківський національний економічний університет імені С. Кузнеця, доцент кафедри менеджменту та бізнесу, Харків, Україна; email: nikita_nazarov_88@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8766-2248>.

Назаров Никита Константинович – кандидат экономических наук, доцент, Харьковский национальный экономический университет имени С. Кузнеця, доцент кафедры бизнеса и менеджмента, Харьков, Украина.

Nazarov Nikita – PhD (Economics Sciences), Associate Professor, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Associate Professor of the Department of Management and Business, Kharkiv, Ukraine.

УПРАВЛІННЯ СОЦІАЛЬНО-ТРУДОВИМИ КОНФЛІКТАМИ: УКРАЇНСЬКИЙ ТА ЗАРУБІЖНИЙ ДОСВІД

Предметом дослідження в статті є процес управління соціально-економічними конфліктами. **Мета** роботи – обґрунтування теоретичних положень та методичних підходів в управлінні трудовими конфліктами як формою соціально-трудова відносин на основі українського та зарубіжного досвіду. В статті вирішуються наступні **завдання**: дослідити сутність і місце соціально-трудова конфлікту в системі соціальних суперечностей; навести класифікацію конфліктів у соціально-трудова сфері; дослідити форми і методи вирішення соціально-трудова конфліктів: провести аналіз успішності запобігання конфліктам в українській та зарубіжній практиці. Використовуються такі **методи**: метод аналізу та синтезу, класифікаційно-аналітичний метод, абстрактно-логічний метод, історико-ретроспективний аналіз та узагальнення. Отримано наступні **результати**: уточнено поняття соціально-економічного конфлікту. Проведена класифікація конфліктів, яка дає розуміння щодо природи і сутності конфліктних відносин за наступними ознаками: спосіб розв'язання конфліктів (антагоністичні (насилницькі) конфлікти та компромісні (ненасилницькі); сфери прояву конфліктів (політичні, соціальні, економічні, організаційні конфлікти); спрямованість впливу (вертикальні й горизонтальні конфлікти); ступінь конфліктного протистояння (приховані і відкриті конфлікти); кількість учасників конфліктної взаємодії (внутриособистісні, міжособистісні, між групами); потреби (когнітивні конфлікти та конфлікти інтересів). Визначені структурні та міжособистісні методи вирішення конфліктних ситуацій. Проведено аналіз українського та світового досвіду вирішення соціально-трудова конфліктів. За даними Національної служби посередництва і примирення здійснено дослідження сучасного стану вирішення та запобігання трудовим конфліктам у 2020 році. Зарубіжний досвід вирішення трудових конфліктів довів доцільність розвитку в Україні наступних шляхів врегулювання трудових спорів: за допомогою спеціальних судів із питань праці та соціального забезпечення (галузеве правосуддя); через цивільний процес у загальних судах; за допомогою примирних і арбітражних процедур. **Висновки**: Проведений аналіз дозволив визначити сутність соціально-трудова конфлікту як форми соціально-трудова відносин на мікро, мезо, та макрорівнях, що виявляється в протидії суб'єктів соціально-економічної сфери. Застосовуючи напрацьований світовий досвід можна послабити соціальну напруженість та зміцнити соціально-економічну безпеку держави.

Ключові слова: конфлікт, конфліктна ситуація; соціально-трудова відносини; протиріччя; колективні трудові спори; посередницькі процедури; примирні процедури.

УПРАВЛЕНИЕ СОЦИАЛЬНО-ТРУДОВЫМИ КОНФЛИКТАМИ: УКРАИНСКИЙ И ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ

Предметом исследования в статье является процесс управления социально-экономическими конфликтами. **Цель** работы – обоснование теоретических положений и методических подходов к управлению трудовыми конфликтами как формой социально-трудова отношений на основе украинского и зарубежного опыта. В статье решаются следующие **задачи**: исследовать сущность и место социально-трудова конфликта в системе социальных противоречий; провести классификацию конфликтов в социально-трудова сфері; исследовать формы и методы решения социально-трудова конфликтов: провести анализ успешности предотвращения конфликтов в украинской и зарубежной практике. Используются следующие **методы**: метод анализа и синтеза, классификационно-аналитический метод, абстрактно-логический метод, историко-ретроспективный анализ и обобщение. Получены следующие **результаты**: уточнено понятие социально-экономического конфликта. Проведена классификация конфликтов, которая дает понимание о природе и сущности конфликтных отношений по следующим признакам: способ решения конфликтов (антагонистические и компромиссные конфликты); сферы проявления конфликтов (политические, социальные, экономические, организационные конфликты); направленность воздействия (вертикальные и горизонтальные конфликты); степень конфликтного противостояния (скрытые и открытые конфликты); количество участников конфликтного взаимодействия (внутриличностные, межличностные, между групповые); потребности (когнитивные конфликты и конфликты интересов). Определены структурные и межличностные методы разрешения конфликтных ситуаций. Проведен анализ украинского и мирового опыта решения социально-трудова конфликтов. По данным Национальной службы посредничества и примирения проведено исследование современного состояния решения и предотвращения трудовых конфликтов в 2020 году. Зарубежный опыт решения трудовых конфликтов доказал целесообразность развития в Украине и таких путей урегулирования трудовых спорів: с помощью специальных судов по вопросам труда и социального обеспечения (отраслевое правосудие); через гражданский процесс в общих судах; с помощью примирительных и арбитражных процедур. **Выводы**: Проведенный анализ позволил определить сущность социально-трудова конфликта как формы социально-трудова отношений на микро-, мезо и макроуровнях, что проявляется в противодействии субъектов социально-экономической сфери. Применяя наработанный мировой опыт можно ослабить социальную напряженность и укрепить социально-экономическую безопасность государства.

Ключевые слова: конфликт; конфликтная ситуация; социально-трудова отношения; противоречия; коллективные трудовые споры; посреднические процедуры; примирительные процедуры.

Бібліографічні опису / Bibliographic descriptions

Назаров Н. К. Управління соціально-трудова конфліктами: український та зарубіжний досвід. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 1 (15). С. 91–97. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.091>

Nazarov, N. (2021), "Social and labor conflict management: Ukrainian and foreign experience", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (15), P. 91–97. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.091>

G. NAZAROVA, K. DEMCHENKO

THEORETICAL PRINCIPLES OF ASSESSING THE SOCIAL SECURITY OF THE REGION

The **subject** of research in the article is the theoretical foundations of the formation and development of the category of social security in the region. The **purpose** of the work is to analyze the preconditions for the formation of social security, to reveal the chronology of the formation of the concept of social security from the standpoint of international experience and to conduct an etymological, morphological analysis of the concept of social security. The **article** solves the following tasks: to investigate the theoretical aspects of the formation of the concept of social security, to determine the features and main directions of its development; to substantiate the expediency the approaches to social security; to conduct an etymological analysis of the concept of social security. The following **methods** are used: method of analysis and synthesis, classification-analytical method, abstract-logical method, historical-retrospective analysis and generalization. The following **results** were obtained: the definitions of foreign and Ukrainian scientists were systematized, morphological analysis was implemented, which made it possible to determine theoretical and methodological signs of this concept. The components of social security were justified: the macro level, the mesoroven and the micro level. The key ideas of the concept of social security, which are embedded in international and state normative legal acts, are identified. It has been proved that the reflection of the provisions of the concept of social security in international documents has influenced the practical implementation of developments in social policy around the world. The study of social security levels made it possible to distinguish the micro level, or personal level of human security. Based on the concept of social security, trends and results of social and economic processes are determined, while combining a system of goals, objectives, destabilizing and stabilizing factors of the external and internal environment. **Conclusions:** The analysis of social security has proved the need to focus the attention of the State on issues of social protection, namely interests, freedoms, preservation and development of human potential, ensuring a decent and high standard of living, regardless of age, gender, income level of the population. To assess the level and state of social security, it is proposed to use instrumental, situational, static, process, systemic and functional approaches. The concept of social security is complemented by modern studies of human capital, human development, and regional economy.

Keywords: social security concept; scientific approaches; levels of social security; morphological and etymological analysis.

Introduction

The processes of socio-economic transformations of social development necessitate the search for, development and improvement of new approaches to the essence, analysis, evaluation and regulation of socio-economic processes in order to achieve sustainable social development and social progress. The results of the study of patterns of socio-economic development prove the crucial role of humanistic factors in the development of the national economy, improving the economic efficiency of production and social justice distribution of material and spiritual goods, as well as in ensuring social security.

It is the process of transition from the industrial economy to the post-industrial one that is accompanied by an increase in the share of the intangible market product. At the same time, the intellectual component of a person plays an increasingly important role in an intangible product, which in turn is determined by the level of development of human capital. Thus, it is a person, his intellectual and creative abilities, knowledge, skills and skills that are the main components that are able to create cost, effectively realize potential, and equipment, raw materials, energy is only an inert potential, which, by nature, does not create anything further. According to the study, the growth of human capital by 1% leads to an increase in labor productivity by 3.81% and an acceleration in GDP growth per capita by 1-3% (Belousov I. I., 2019).

The new socio-economic paradigm of the development of society: the transition from the traditional model of economic development to innovation causes new problems, the approach to solving which, from the point of view of the development of society, provides for a

change of priorities. It is not a person – for the sake of achieving economic goals, but an economy - for the sake of human development. Not a person – for the protection of the state, its territorial integrity, independence, sovereignty and inviolability of borders, but a state – for the protection of human interests, the creation and use of the benefits of development that are achieved through social solidarity.

Analysis of recent research and publications

The theoretical basis of security issues in the paradigm of social development of society was laid by scientists Mahbub ul-Hak and A. Sen and further developed in the works of foreign scientists: A. Atkinson, J. Bergman, N. Vaughan-Williams, J. Dixon, J. Dreze, L. Kotlikova, A. Leveld, K. Peoples, A. Sen, A. Sinfield and domestic scientists I. Belous, O. Belyaev, M. Dyba, A. Kolot, N. Kolenda, N. Kraus, V. Lugova, O. Lyndyuk, P. Lyashenko, P. Nazarkin, O. Novikova, E. Podolska, V. Skuratovsky, O. Sydoruchuk, O. Sychenko and others. Recognizing the high degree of scientific and theoretical development of security issues, the practical significance of its provision in modern conditions of society development, a certain range of issues related to the modern interpretation of the concept of "security," taking into account the influence of new challenges and the aggravation of existing destructive socio-economic processes, requires further research in accordance with the objective needs of practical and research activities.

The **aim** of the study. To analyze the preconditions for the formation of social security, to reveal the chronology of the formation of the concept of social

security from the standpoint of international experience and to conduct an etymological, morphological analysis of the concept of social security.

Problem solving

The socio-economic concept of "social security" is one of the key theoretical and applied concepts of modern economics, but in conditions of increased instability and uncertainty of social, economic, environmental and other processes affecting the development of society, the concept of "social security" requires a study of its essence and features of application in accordance with modern realities of the development of society.

It should be noted that the coverage of security issues in the national scientific literature reflects, in our opinion, the Ukrainian specifics of the development of society. The traditional underestimation of man, human life, and human potential has determined the need to violate the security problem, primarily from the point of view of national (state) security.

At the same time, the phenomenon of "social security" does not always "find a place" in the complex of national security problems. And some scientists and specialists reduce the role of social security to ensuring economic security. Such an approach is a logical reflection of the model of development of society, in which a person is only a means of economic growth, and not its goal.

This approach to the essence of the concept of "security" in foreign scientific literature is called "traditional" (or political). In accordance with this approach, the basis is "a vision of state security and the main threat is military in nature," that is, the nature of security is "purely military and increasing the level of security means increasing the military capacity of the state" (Peoples C., Vaughan-Williams N. 2010). But the vast majority of governments around the world, primarily Europe, have moved away from the provisions of the traditional approach, since the conditions of the modern development of society require a rethinking of the essence of the concept - from "state security" to "human security".

The above is a kind of theoretical foundation of the modern concept of social security. The study found that the concept of "social security" is multifaceted and interpreted in the scientific literature in different ways, so for a comprehensive study of this concept summarizes the existing definitions of social security proposed by domestic and foreign scientists and highlights the main approaches to its interpretation.

A review of the existing definitions of the essence of social security allowed us to identify such approaches to the study of the concept as: (1) instrumental, (2) situational, (3) static, (4) process, (5) systemic, (6) functional, which is shown in fig. 1.

The term "social security" was first used in 1935 in a US legal act, namely the Social Security Act, which initiated the development of a number of programs to help the disabled and temporarily unemployed. From this document, other countries also begin to use this concept in

national legislation. Thus, in 1938, the term social security was used in a New Zealand law.

In the future, the frequency and scope of this concept has expanded significantly. Thus, in 1948, United Nations experts used the concept of "social security" in the Universal Declaration of Human Rights (Article 22); from that moment on, social security was officially proclaimed the right of every person.

In 1952, the International Labor Organization (ILO) presented the final definition of social security in Convention 102. Thus, today, social security is the basis of well-being in almost all countries of the world.

The development of social security as a concept in foreign countries is seen as a system of measures implemented mainly by public authorities and local governments and designed to minimize the negative consequences of social risks and threats (from loss of wages due to unemployment, childbirth, diseases, etc.) to an individual or social group. The main forms of social security are social assistance, social insurance, social transfers to certain categories of the population and health care. The study of social security in foreign countries is reduced to the analysis of the implementation of these forms and their impact on socio-economic processes and relations in society.

As a result of studying the world literature, an etymological analysis of the concept of "social security" was conducted. It is revealed that the studied concept has a number of "shades" of meaning. Thus, in the English literature there are several variants of translation of this concept: "social security", "social safety", "social welfare", "social protection" (Cambridge Dictionary, 2020).

Despite the variety of translations of the concept, we should pay attention to the results of P.A. Lyashenko's research. The scientist notes that the concept of "social security" is equivalent in English to the translation of "social security" (public security), but not the translation of "social security", which is proposed by "Google translator, and which would be logical to translate this way" (Lyashenko, 2018).

Instead, the results of content analysis by P.A. Lyashenko confirm the widespread prevalence of the very concept of "social security". Thus, "the request for social security in English around the world has a stable popularity in the range of 65% – 75% over the past 5 years". A comparative analysis of the popularity of the equivalent concepts of social security in English: "social security" and "social security" gave the following result: worldwide in the last year, the concept of "social security" is 75% -80% more popular (by number of requests) for the concept of "social security".

The results of the study and the conclusions of P.A. Lyashenko are debatable, because the scientist did not take into account other options for the translation of social security. It should be added that in authoritative academic foreign dictionaries: there is no version of the translation of the phrase "social security" at all.

Table 1. Comparative analysis of translation options for the concept of "social security"

No.	Options for translating the concept of "social security"	Translation of definitions from various sources	Source
1	2	3	4
1.	Social Security	System of social benefits provided by the government in case of loss of breadwinner or payment of old-age pension, or in case of disability	Cambridge dictionary
		The system of relations between the state, legal entities and individuals regarding the formation of financial resources for their redistribution to the payment of social assistance: in case of disability, payment of old-age pension, etc.	Oxford Dictionary
2.	Societal security	There is no interpretation of this concept in foreign academic dictionaries	–
3.	Social Safety	The state of protection from threats or harm	Oxford Dictionary
4.	Social Welfare	Services provided by the government or private organizations to help the poor, the sick or the elderly	Cambridge dictionary
		Practical or financial assistance provided mainly by the government to those in need	Oxford Dictionary
5.	Social Protection	Insurance against socially dangerous cases	Oxford Dictionary

The above studies allow us to conclude that the concept of "social security" has different versions of translation precisely because of the existence of contradictions in its use; inconsistency between national and global approaches to its interpretation.

The results in the world practice of defining social security have mainly applied instrumental significance. According to the definitions of foreign scholars A. Atkinson and L. Kotlikof, social security should be understood as a set of payments in cash and in kind, including services provided to certain categories of persons. Among domestic scientists, supporters of this approach are EA Podolskaya and PO Nazarkin (2015).

The results of the study of the definition of "social security" confirmed the existence of an instrumental approach to defining the concept of a conglomerate of mechanisms that can guarantee such security. Therefore, according to this approach, social security is identified with social protection, social guarantees that are implemented in society through social policy.

It should be noted that today the most common approach to the interpretation of social security is to define the concept proposed by the International Labor Organization, which considers social security as a set of measures to protect against the dangers arising from the risks associated with the development of society. Foreign scientists who have studied social security, namely A. Sinfield, A. Sen and J. Bergman, follow this non-instrumental approach. Thus, A. Sinfield describes social security situationally, i.e. as a state of protection against loss of resources. Then J. Bergman considers social security as a situation of complete protection of the person from the task of any harm to it. Among domestic scientists, supporters of the situational approach include: I.I. Belous, I.F. Hnybidenko, A.M. Kolot, O.F. Novikova, N.M. Kraus, P.A. Lyashenko, O.O. Sychenko, V.A. Skuratovsky and O.A. Lyndyuk.

As a result of the study, the majority of scientists who explore social security issues are considered to consider this concept as a certain state of protecting

interests (Belous II, Kolanda N.V., Sichenko O.O., 2013); the state of life of man and society. As the analysis of literary sources showed, in a broad understanding, the state of social security should be constant and aimed at preserving and developing human potential, simple or expanded reproduction of the population, as well as achievements in the society of social harmony and integrity (Kolanda N.V., 2013).

The concept of "social security" in the Guidelines for calculating the level of economic security of Ukraine, approved by the Order of the Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine is considered in terms of process approach, namely as the development of the state, which can ensure a high standard of living as the most important component of the country's economic potential". In addition, a common feature of the vast majority of interpretations of the concept of "social security" is the attempt of scientists to define it as a concept that reflects the trends and results of social and economic processes, combining a system of goals, objectives, and destructive factors of external and internal environment.

In turn, V.M. Lugova and T.V. Golubeva consider social security as a set of elements that make up the system of mutually beneficial partnerships. Scientists claim that social security is "a system of mutually beneficial partnership between staff and management of the enterprise, which is provided by the material and intangible needs of employees and the interests of the enterprise" (Lugova VM, Golubeva TV, 2011).

As part of the analysis of existing approaches, a functional approach should be identified. Proponents of this approach view social security as the state of the most effective government regulation to prevent threats and ensure the stable functioning of social policy. Thus, T.A. Shakhmatova emphasizes that social security is "provided by the state in the process of performing its management functions socio-economic and socio-political state, which ensures a normal standard of living".

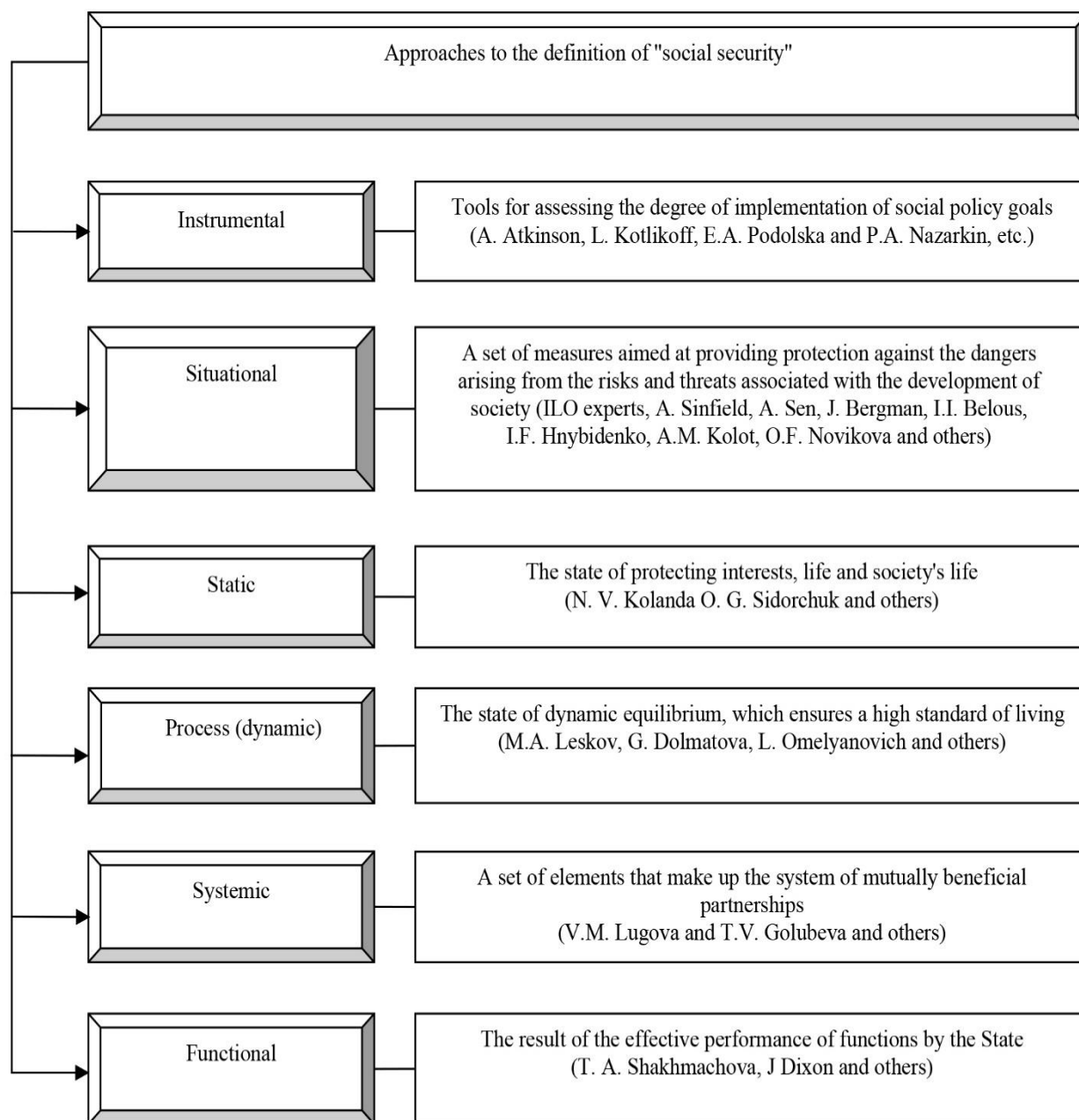


Fig. 1. Generalization of approaches to the definition of "social security"

Generalization of the main approaches to the interpretation of the essence of social security: static, procedural, systemic, functional, instrumental, situational allowed to obtain a more comprehensive and clear idea of social security. The existence of a significant number of separate approaches to the definition of the concept should be associated not only with the inconsistency between national and global approaches to its interpretation, but also between different areas of practical application. Thus, a number of definitions of social security are due to the fact that in the field of theoretical research, social security is analyzed in the works of scientists in philosophy, sociology, economics, law and more.

Thus, the genesis of the generic concept of "security" follows from the biological nature of man: since the primary basis of man is the instinct of self-preservation, the need for security becomes one of the main, after

meeting physiological needs. The need to meet the need for social security accompanies man throughout the development of civilization and is inextricably linked with the formation of the state and society (2018), thus linking social security with the development of law and legal relations.

In sociology, social security is defined through the prism of social development and social relations, which forms an individual with a certain social status and a separate role in society. When considering social security as a concept of sociology, one should take into account the important role of the family as a social institution in the formation, security, formation and development of the individual. At the family level, cultural, spiritual and moral and ethical values, norms and rules are formed, violation of which can affect the safety of others.

In psychology, social security is considered to be “a state of psychological protection of social groups and society as a whole from the influence of adverse both internal and external factors. Under such conditions, the state of consciousness of man and society is able to perceive the environment and development as adequate processes, which creates conditions and expands opportunities to meet needs, including social today and gives confidence in the future.

Therefore, it is obvious that the phenomenon of social security is comprehensive and has a complex interdisciplinary dimension, resulting in the concept of "social security" constantly acquires new characteristics.

Thus, modern realities of the development of society and a modern international society deny a traditional and unilateral health understanding. The need to concentrate the state's attention on social security issues, namely interests, freedoms, preservation and development of human potential, ensuring a decent and high standard of living, regardless of age, gender, level of income, supporting the effective stimulation of society's activities leads to rapid development and dissemination of social security concept. It is worth noting that this concept is enriched with modern socio-economic concepts of human capital, human development, the concept of the knowledge economy, regional economy, etc.

This necessitates further research in the direction of forming a scientifically sound definition of the concept of social security, which would most fully characterize its essence in modern conditions of society. To do this, the dissertation formed a set of definitions of "social security" and applied the method of morphological analysis, the feature of which is to solve the problem by identifying and combining the main structural components, which, in turn, allows to summarize and systematize various options and justify the most appropriate.

The study of the definitions of foreign and domestic modern scientists on the understanding of the term "social security" allowed to identify, identify, systematize and structure the main elements of the system of the studied concept - morphological features. Depending on the approach to the analysis of one or another feature of the studied concept, the grouping of features into certain blocks is carried out, namely: key characteristics of the concept, objects, level, and components of social security, purpose and factors influencing social security.

The next stage in the implementation of morphological analysis is the formation of a matrix of morphological features, a list of scientists who have studied this concept, and literature sources. The identification of the morphological feature is as follows: if in the studied definition of "social security" there is a significant feature, it is assigned 1 point; otherwise the points are not assigned. Based on the calculation of the sum of the scores of a certain morphological feature from the set of definitions, the most typical features are identified, ie those that are most often used to define the concept of "social security".

Combinations of morphological features form a number of variants of the characteristic of the concept of "social security", with which it is possible to determine considerations about the essence of this concept of each of the studied scientific sources. Thus, the author highlights the most typical features of the concept of "social security", which are listed below.

Among the set of definitions, the key characteristic is the vision of social security as a state of protection of a person or a person, and as a state of protection of his social interests (Novikova O.F., Podolskaya E.A., Sychenko O.O. 1997, 2015,2012). Determining the feasibility of including such a key feature in the definition proposed by the dissertation requires attention to the concept of "social interest".

There are different interpretations of this concept. The meaning of the concept of "interest" is considered by scientists as "a set of important incentives, the orientation of an individual or social group, and as a certain element of motivation". The Sociological Dictionary offers the following definition of social interest: "expression of social needs of the subject (individual, group, population) through its place (status) in the system of social relations and interaction about the conditions and means of meeting these needs". Thus, social interest is a rather broad concept that comes from the needs of a person or a social group.

Among other key characteristics of social security, scientists identify it as a component of national security and as a result of effective social policy.

It should be noted that the functioning of the state and its institutions is carried out in the historically determined social space, and the very existence of the state is possible only within the socially established conditional threshold limits of this space. Going abroad threatens the existence of the state, the loss of national integrity, so in this regard; it is proposed to consider social security as the main characteristic of the national social space, which allows to implement the strategy of national security.

Analyzing the formation of definitions of social security of scientists over time, it should be noted that key characteristics are changing. Thus, P.A. Lyashenko offers a slightly different interpretation of security as "a form of metastable state of its socio-economic system". A metastable state, or a state of conditional stability, must be achieved as a result of fluctuations in the parameters of this system. That is, ensuring stability in the transition from one state to another under the influence of destructive factors. This interpretation of the concept under study reflects the dynamism and is considered through the prism of the development of society.

In the interpretation of the concept of "social security" an important place is occupied by the object of social security, i.e. the one (who is affected), which is protected from external and internal threats. In the definitions of scientists can be identified a number of objects: man, person, citizen, individual social groups, society as a whole, the state.

The definition of an object in the definitions of scientists is associated with the allocation of levels of social security.

According to the identified objects of social security, we consider it appropriate to identify levels of influence on them, ensuring their social interests, protection from the negative impact of destructive factors: macro level (social security of the state and society), meso level (social security of the region) and micro level or the level of social security of the employee). Undoubtedly, social security is systemic, which is why the levels of social security are interconnected and interdependent.

Social security at the state level is a component of national security – a national strategy and direction in international politics, which aims to achieve a sustainable state of social protection, sustainable human development and stable growth of quality of life. The key ideas of the concept of social security are laid down in international and state regulations.

As a result of the spread of social security, first of all, at the international level – the reflection of the provisions of the concept in international documents, began the continuation of research on the concept of social security and practical implementation of developments in social policy around the world.

Taking into account the uneven level of social security in the regions is an objective necessity and one of the fundamental indicators of the formation of the national strategy, a tool for developing a mechanism of national governance in the social sphere. Differentiation of regions by level of social security is due to the existence of a number of factors: historical, demographic, environmental, economic, political and others. The existence of uneven distribution of regions by level of social security increases the feasibility of allocating social security in the region, the purpose of which is to set priorities, form and implement state regional social policy taking into account the peculiarities of regional development.

The study of levels of social security has identified a micro-level, or personal level of human security. It is at the personal level that it is expedient to spread social security in the fields of human science as an individual: psychology, biology, pedagogy, sociology.

The enterprise plays an important role in the formation of social security at the micro level. Enterprises whose policies are focused on staff, social security and development are flexible and competitive. Therefore, ensuring social security, active cooperation between management and staff should be a strategic direction of any enterprise, and should include safe working conditions, the possibility of educational and professional development of the employee and so on. Undoubtedly, the introduction of elements of the concept of social security in the enterprise has a slightly different character than at the macro and meso level, it is necessary to take into account the peculiarities of the enterprise, its size, financial resources, opportunities and so on.

With regard to the components of social security, most often, scientists do not define them by revealing the meaning and essence of this concept, but they can be considered to be extremely important. Thus, V. Skuratovsky and O. Lyndyuk identify economic, political, social and spiritual components.

The main goal of social security, scientists believe the preservation, effective implementation and development of human potential; ensuring a decent and quality standard of living; achieving social harmony and integrity; prevention of social explosions, minimization of the impact of risks and threats; sustainable social system; realization of social interests; preservation of the gene pool, favorable demographic situation; providing the population with support in the face of threats and risks; satisfaction of tangible and intangible needs.

Among the main factors of influencing social security, scientists distinguish loss or reduction of income as a result of social risks; decline to minimal quality standards, or exit per threshold standard; threats to national security.

Summarizing the above, it can be concluded that a person is in a state of social security provided that there is no or minimized influence of social risks and threats, in the event of these destructive factors, it is the mechanism of public administration in the social sphere that is designed to prevent, counteract and minimize the influence of such factors both at the regional and state levels.

Thus, the concept of "social security" is characterized by scientists both as a state in a certain period of time and as a result of state policy in the social sphere, which is measured both quantitatively and qualitatively. It should be added that the presence of identified and analyzed morphological signs of social security is evidence of the comprehensive nature of the concept under study. Summarization and systematization of existing definitions and combination of morphological features on the studied problem, as well as analysis on the possibility and advisability of including certain features in order to form the most complete disclosure of the content and essence of the concept "social security" allows the dissertation to define it as a state of protection and balance of social interests of a person, social groups and society, from the negative influence of destabilizing factors for which the preservation, effective realization and development of human potential, a decent and high-quality standard of living, as well as the achievement of social cohesion and continuity of the social system are ensured

Conclusions

According to the results of the study we conclude that the current reality emphasizes the need to expand security and focus on the study of social security in the region, as well as focus on the formation and development of theoretical aspects of social security and its practical implementation.

The concept of social security reflects the trends and results of social and economic processes, combining a system of goals, objectives, destructive factors of the external and internal environment. The generalization of the main approaches to defining the essence of social

security made it possible to identify static, process, systemic, functional, instrumental, situational approaches. The existence of a number of selected approaches is associated with various areas of practical application of this concept.

References

1. Bilous, I. I. (2009), "Concept of social security and its role in the system of national security of the state", *Efektivna ekonomika*, No. 3. DOI: <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2019.3.41>
2. Kolenda, N. V. (2013), "Social security of the population and its main components" ["Sotsial'na bezpeka naselennya ta yiyi osnovni skladovi "], *Modern directions of theoretical and applied researches*, 2013. March, 19–30.
3. Kraus, N. (2013), "Social safety on different levels of economic aggregation", *Economy and Region*, No. 5 (42), P. 189–193. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/econrig_2013_5_32
4. Lugova, V. M., Golubeva, T. V. (2011), "Social security as a key subsystem of enterprise security" ["Sotsial'na bezpeka yak klyuchova pidsystema bezpeky pidpnyemstva"], *BUSINESSINFORM*, No. 10, P. 69–72.
5. Lyashenko, P. A. (2018), *Management of economic development of the region on the basis of counteraction to threats to its social security [Upravlinnya ekonomichnym rozvytkum rehionu na zasadakh protydyi zahrozam yoho sotsial'niy bezpetsi]* : dis. ... cand. econ. Science: 08.00.05. Severodonetsk, 218 p.
6. Order of the Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine (2013), "Methodical recommendations for calculating the level of economic security of Ukraine" ["Metodychni rekomendatsiyi shchodo rozrakhunku rivnya ekonomichnoy bezpeky Ukrayiny "], 29.10.2013 No. 1277, available at : <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v1277731-13/stru>
7. Novikova, O. F. (1997), *Social security: organizational and economic problems and solutions [Sotsial'na bezpeka: orhanizatsiyno ekonomichni problemy i shlyakhy vyrishennya]*, Donetsk : IEP NAS of Ukraine.
8. Podolska, Y. A., Nazarkin, P. O. (2015), New sense and innovative ways to ensure social security, *Bulletin of Odessa National University. Series: Sociology and Political Science*, Vol. 20, No. 2, P. 19–25, available at : http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vonu_sip_2015_20_2_4
9. Sychenko, O. O. (2012), "Social security in the system of national security of the state" ["Sotsial'na bezpeka v systemi natsional'noy bezpeky derzhavy"], *Scientific works. Governance*, Vol. 186, No. 174, P. 34–38.
10. Gnibidenko, I. F., Kolot, A. M., Novikova, O. F. and others (2006), *Social Security: Theory and Ukrainian Practice [Sotsial'na bezpeka: teoriya ta ukrayins'ka praktyka]* : Monograph / Ed. I. F. Hnybidenko, A. M. Kolota, V. V. Rogovy, Kyiv : KNEU, 292 p.
11. "Cambridge Dictionary", available at : <http://dictionary.cambridge.org/ru> (last accessed: 17.10.2018).
12. Peoples, C., Vaughan-Williams, N. (2010), "Critical Security Studies: An Introduction. Routledge", available at : <http://www.bristol.ac.uk/spais/people/columba-l-peoples/pub/2617537>
13. "International Labour Standards on Social security", available at : <https://www.ilo.org/global/standards/subjects-covered-by-international-labour-standards/social-security/lang--en/index.htm>
14. Dixon, J. (1999), *Social Security in Global Perspective*, London. P. 376 p.
15. Kotlikoff, L. J. (1987), "Justifying Public Provision of Social Security", *Journal of Policy Analysis and Management*, Vol. 6 (4), P. 674–696.

Received 23.02.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Назарова Галина Валентинівна – доктор економічних наук, професор, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, завідувач кафедри соціальної економіки, Харків, Україна; email: gnazarova.ua@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4893-5406>.

Назарова Галина Валентиновна – доктор економічних наук, професор, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, завідувач кафедри соціальної економіки, Харків, Україна.

Nazarova Galyna – Doctor of Sciences (Economics), Professor, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Head of the Department of Social Economics, Kharkiv, Ukraine.

Демченко Катерина Олегівна – Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, аспірант кафедри соціальної економіки, Харків, Україна; email: kate0074@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4097-5406>.

Демченко Катерина Олеговна – Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, аспірант кафедри соціальної економіки, Харків, Україна.

Demchenko Kateryna – Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Postgraduate student of the Department of Social Economics, Kharkiv, Ukraine.

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ОЦІНЮВАННЯ СОЦІАЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ РЕГІОНУ

Предметом дослідження в статті є теоретичні засади формування та розвитку категорії соціальної безпеки регіону. **Мета** роботи – проаналізувати передумови формування соціальної безпеки, розкрити хронологію формування поняття соціальної

безпеки з позиції міжнародного досвіду та провести етимологічний, морфологічний аналіз поняття соціальної безпеки. В статті вирішуються наступні **завдання**: дослідити теоретичні аспекти формування концепції соціальної безпеки, визначити особливості та основні напрями її розвитку; обґрунтувати підходи до дослідження соціальної безпеки; провести етимологічний аналіз поняття соціальної безпеки. Використовуються такі **методи**: метод аналізу та синтезу, класифікаційно-аналітичний метод, абстрактно-логічний метод, історико-ретроспективний аналіз та узагальнення. Отримано наступні **результати**: проведено систематизацію визначень зарубіжних і українських науковців; морфологічний аналіз дав змогу визначити теоретико-методологічні ознаки цього поняття. Обґрунтовано складові соціальної безпеки: макрорівень, мезорівень та мікрорівень. Визначені ключові ідеї концепції соціальної безпеки, які закладено у міжнародні та державні нормативно-правові акти. Доведено, що відображення положень концепції соціальної безпеки у міжнародних документах вплинуло на практичне втілення розробок у соціальній політиці різних країн світу. Дослідження рівнів соціальної безпеки дозволило виділити мікрорівень, або особистісний рівень людської безпеки. На основі концепції соціальної безпеки, визначено тенденції та результати соціальних та економічних процесів, поєднуючи при цьому систему цілей, завдань, дестабілізуючих та стабілізуючих чинників зовнішнього і внутрішнього середовища. **Висновки**: Проведений аналіз соціальної безпеки довів необхідність зосередження уваги держави на питаннях соціальної захищеності, а саме інтересів, свобод, збереження і розвитку людського потенціалу, забезпечення гідного та високого рівня життя незалежно від віку, статі, рівня доходів населення. Для оцінювання рівню та стану соціальної безпеки запропоновано застосовувати інструментальний, ситуативний, статичний, процесний, системний та функціональний підходи. Концепція соціальної безпеки доповнена сучасними дослідженнями людського капіталу, людського розвитку, регіональної економіки.

Ключові слова: концепція соціальної безпеки; наукові підходи; рівні соціальної безпеки; морфологічний та етимологічний аналіз.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЦЕНКИ СОЦИАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РЕГИОНА

Предметом исследования являются теоретические основы формирования и развития категории социальной безопасности региона. **Цель** работы - проанализировать предпосылки формирования социальной безопасности, раскрыть хронологию формирования понятия социальной безопасности с позиции международного опыта и провести этимологический, морфологический анализ понятия социальной безопасности. В статье решаются следующие **задачи**: исследовать теоретические аспекты формирования концепции социальной безопасности, определить особенности и основные направления ее развития; обосновать подходы к исследованию социальной безопасности; провести этимологический анализ понятия социальной безопасности. Используются следующие **методы**: метод анализа и синтеза, классификационно-аналитический метод, абстрактно-логический метод, историко-ретроспективный анализ и обобщение. Получены следующие **результаты**: проведена систематизация определений зарубежных и украинских ученых; морфологический анализ позволил определить теоретико-методологические признаки этого понятия. Обоснованы составляющие социальной безопасности на макроуровне, мезоуровне и микроуровне. Определены ключевые идеи концепции социальной безопасности, которые заложены в международные и государственные нормативно-правовые акты. Доказано, что отображение положений концепции социальной безопасности в международных документах повлияло на практическое воплощение разработок в социальной политике разных стран мира. Исследование уровней социальной безопасности позволило выделить микроуровень, или личностный уровень человеческой безопасности. На основе концепции социальной безопасности, определены тенденции и результаты социальных и экономических процессов, с выделением системы целей, задач, дестабилизирующих и стабилизирующих факторов внешней и внутренней среды. **Выводы**: Проведенный анализ социальной безопасности доказал необходимость сосредоточения внимания государства на вопросах социальной защищенности, а именно интересов, свобод, сохранения и развития человеческого потенциала, обеспечения достойного и высокого уровня жизни независимо от возраста, пола, уровня доходов населения. Для оценки уровня и состояния социальной безопасности предложено применять инструментальный, ситуативный, статический, процессный, системный и функциональный подходы. Концепция социальной безопасности дополнена современными исследованиями человеческого капитала, человеческого развития, региональной экономики.

Ключевые слова: концепция социальной безопасности; научные подходы; уровни социальной безопасности; морфологический и этимологический анализ.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Назарова Г. В., Демченко К. О. Теоретичні засади оцінювання соціальної безпеки регіону. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 1 (15). С. 98–105. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.098>

Nazarova, G., Demchenko, K. (2021), "Theoretical principles of assessing the social security of the region", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (15), P. 98–105. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.098>

I. BONDARENKO, O. AVRUNIN

ON THE EXCITATION OF LOCAL ELECTRIC CURRENT IN THE BIOLOGICAL ENVIRONMENT

The **subject** of the study in the article is to study the method of excitation of human body tissues using an electric current. The **purpose** of the work is to develop a method for exciting local current in a human body affecting the microcirculation of blood and excitability of local areas of muscle tissue during the treatment process. The article solves the following **tasks**: the creation of a model pattern of fabric, the rationale for the generation of electric current inside the sample, the development of the design of the current generation system and measuring the electrical response of the model sample of the tissue on the occurrence of electric current, determining the size and spatial current distribution in the model sample of the fabric, comparison The obtained current values with known and admissible in medical practice its values, determination of the advantages of the proposed method of excitation of current compared to the traditional used in medicine. The following **methods** were used: analysis of scientific publications for the subject of the study, the calculation of the expected current parameters in the model sample, the method of designing the nodes of the current generation and measurement system of the electrical response, the experimental method of excitation of the current and measuring the sample response to it. The following **results** were obtained: a new acoustic-magnetic method of exciting electric current in local areas of muscle tissue is justified, which allows determining for them the optimal values of the therapeutic current and the value of its threshold value. model samples of muscle tissue are created, a magnetohydrodynamic method of generating electric current inside the patient's body is justified, design of a system for generating current and measuring the electrical response of a model fabric sample to the occurrence of electric current in it; determining the magnitude and spatial distribution of the current in the model fabric sample; comparison of obtained current values with known and permissible values in medical practice and proved their safety for a person. Calculated ratios are obtained, which connect value of excited local current with parameters of ultrasonic radiation, external permanent magnetic field and biological medium. The materials have been found that the current density excited in the local area of the biological medium is independent of the ultrasound frequency and is determined mainly by the intensity of the ultrasound and the constant magnetic field. The advantages of the current excitation method according to the present invention over the conventional galvanic method of passing current through the patient's skin are the ability to generate current in any desired local area of the patient's tissue and its complete safety. **Conclusions**: The scientific foundations of the new method of excitation of local current inside the human body have been developed and experimentally tested on model samples. Using this method can significantly increase the effectiveness of the treatment process based on the effect of current on blood microcirculation in predetermined areas of muscle tissue and for the first time will allow distinguishing and determining with high accuracy thresholds of their excitability by electric current.

Keywords: blood microcirculation, threshold of muscle tissue excitability; tissue model; magnetic hydrodynamics of conducting solution; ultrasound; local electric current.

Introduction

Physical and chemical phenomena caused by the magnetohydrodynamic effect and electric current through a conductive biological environment (BE) are widely used in modern medicine for diagnosis and therapy [1, 2, 3, 4, 5, 6]. These phenomena, in particular, include: electrophoresis of the ions of drugs of drugs through human skin in a constant magnetic field (CMF); measurement of the flow rate of blood in the magnitude of the electric field generated by it in the PMP during the pulse filling of the blood vessel; braking of blood current in vessels under the action of a large PMP; therapeutic galvanization of muscle tissue by passing a constant electrical current of low density through the patient's skin from the external high-voltage (80 V) voltage source; strengthening the microcirculation of blood and the definition of the first threshold of the validity of the current in the muscular tissue by passing an alternating electric current through the skin of the patient. All these phenomena occur either due to the natural movement of blood ions and plasma under the action of the ambient heat or the activity of the heart, or when the transport current is supplied to the BE from the external voltage source.

Recently, the study of the movement of electric and magnetic particles in the magnetic field under the

influence of ultrasonic radiation (USR) has begun in BE. In particular, for the first time, the value of the electric field strength arising in the model electro conductive sample BE under the joint action of ultrasound and CMF [7] was measured. Also, for the first time, an acoustic-magnetic method (AMM) of acting on a model BE sample containing magnetic nanoparticles was proposed and investigated in order to determine the possibility of high-precision measurement of their concentration in the pathological focus of BE with the target delivery of therapeutic preparations to it [9].

One of the topical problems of medicine is to study the excitability of human body tissues, which is associated with changes in the membrane cell potential and the condition of blood microcirculation and lymph in tissues. One of the ways of influencing the excitability of muscle tissue and human organs is transmitting an alternating electric current through it. In this case, an important measurable indicator of tissue excitability is the first threshold for the sensibility of the transmitted current. The traditional and common method of transmitting current through the muscle tissue is the use of an electrical circuit from an adjustable voltage generator, the input wire connecting one of the terminals of the generator with the skin of the patient through the clamping electrode at a particular point of the body and

the output wire connecting the other point to the other point on the patient's skin with the second output of the generator [6]. The gap of one of the wires includes an ammeter, according to which the magnitude of the first threshold current is measured when the patient is sensitive to the patient's appearance of the muscles. This method of determining the threshold current and therapeutic current corresponding to the optimal level of blood circulation has an important disadvantage that affects the informativeness of their measurement. This is caused by the fact that the current through the muscles with this method is not spatially homogeneous. Its density is maximum in the area of the supply electrodes and decreases when removing them. In addition, when passing in the field of internal organs, this inhomogeneity increases, as they have different electrical resistance. As a result, the amount of therapeutic current and the measured threshold current are averaged throughout the muscular volume and do not correspond to their local values for one or another organ or a particular area of even homogeneous muscle tissue. Therefore, the development of a new non-integrated method is required to establish the amount of therapeutic current and measuring its threshold value. The new method should allow to establish the optimal local values of the therapeutic current for various sections of the human body and measure the values of the threshold current in them.

The **purpose** of this work is to substantiate the possibility of creating a new local excitation method using AMM in a given BE section of an alternating electric current, eliminating the need for its contact (galvanic) transmission through the skin of the patient and does not have drawbacks of this traditional flow of current formation through the patient's body.

Model system for generating an electric field in BE with AMM

For the existence of an electric current in any environment, it is necessary to have an electric field in it. Figure 1 shows a schematic diagram of a system that allows exciting using AMM and measure the variable with a frequency of USR electric field of the BE model in the form of a solution placed in a cylindrical vessel. A low-conductive NaCl solution in water, having a density, viscosity and electrical conductivity, close in magnitude to the BE parameters [6, 10].

With the effect of USR with frequency f on the upper part of the solution along its height (in the direction of the Z axis in fig. 2), a wave of compression and expansion propagates. The counter wave reflected from the bottom of the vessel interferes with the incident wave. If the distance from the bottom of the vessel to the emitter USR (h) is equal to an integer (n) of the lengths (λ) of sound waves ($h = n\lambda$), then the so-called standing wave [11] is installed in the vessel. The velocity distribution V_Z of the solution particles in the standing wave is as shown in fig. 2.

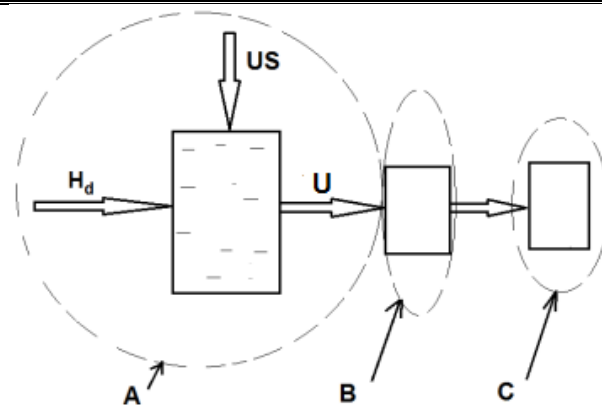


Fig. 1. Circuit diagram of blocks (A, B, C) systems for excitation of local current in a model sample of a biological environment. Block A includes a model sample, to which an external constant magnetic field (B) and ultrasound radiation (US) and which generates an alternating voltage (U). Block B serves to measure the voltage U, and the block C is a voltage registrar U.

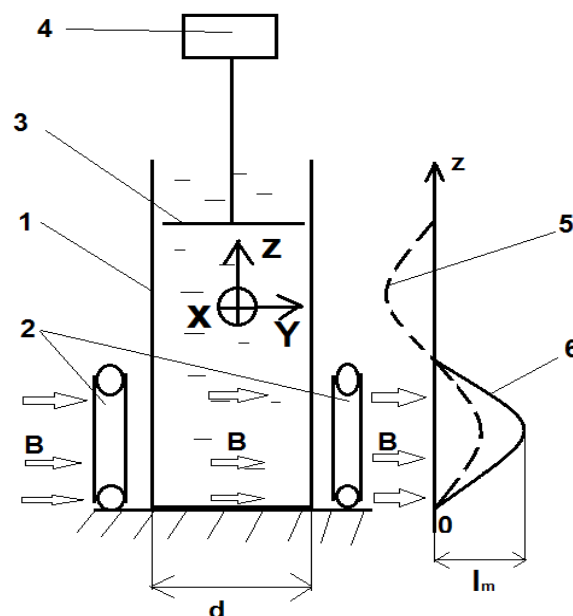


Fig. 2. Functional scheme of the system for the implementation of acoustic-magnetic excitation of electric current in the BE model sample in the form of a solution of NaCl, 1 – vessel with a solution, 2 – Helmholtz coils to create a magnetic field with induction $B = m_0 H_d$, 3 – round flat radiator ultrasound, 4 – Ultrasound generator, 5 – distribution of velocity V_z movement into the solution under the action of sound (dash line), 6 – current distribution (I) in solution, $m_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Gm/m}$.

With the simultaneous action of the USR and a constant magnetic field B_Y on the solution, directed perpendicular to the direction of propagation of the USR along the Y axis, an alternating electric field with an intensity E_X appears in it [7, 8] in accordance with the relation known from magnetohydrodynamics:

$$E_x = V_z \times B_y = E_{mx} \sin 2\pi f = V_{mz} \sin 2\pi f \times B_y, \quad (1)$$

where E_{mx} , V_{mz} , – the amplitude of the electric field strength and the velocity of the solution. In this case, the

EX direction is perpendicular to both the direction of induction of the field B_y and to the direction V_z . To measure the distribution of the EX value at different points of the vessel, which means that in different sections of the standing wave in the solution, two (or more) metal measuring probes are placed with a distance (base) L between them. The value of EX can be represented by the derivative of the electric potential U in the direction x :

$$E_x = \frac{dU}{dx} \approx \frac{(U_2 - U_1)}{L}, \quad (2)$$

where $(U_2 - U_1)$ – The potential difference at two points (1, 2) of the solution located at a distance L along the X axis. The potential difference (voltage) on probes can be measured by a voltmeter of alternating voltage. Calculations [7] show that the value of the maximum voltage U_m on probes is described by the formula:

$$U_m = E_{mx} \times L = \left[\frac{2P}{c\rho_1} \right]^{0.5} B_y \times L, \quad (3)$$

where $\left[\frac{2P}{c\rho_1} \right]^{0.5} = V_{mX}$, and P , c , ρ_1 is the intensity (power) of USR, speed of sound in solution, density of solution.

Fig. 2 shows a detailed functional diagram of a model system for studying the electrical properties of the BE sample in magnetic and acoustic fields, as well as the spatial distributions of the velocity V_z of the solution displacement under the action of USR along the direction Z of USR propagation and the excited electric current I . This figure also shows the source constant magnetic field with induction B_Y in the area of solution in the form of two Helmholtz coils (2), USR generator (4), cylindrical vessel with a model solution (1), USR emitter (3) generating sound along the Z axis of the vessel. The different polarities of the maxima E along the height of the vessel correspond to the places of maximum compression and extension of the solution under the action of the USR standing wave. Note that a similar picture of the appearance of a standing wave can take place if the USR “beam” is passed through the human body, since an incident sound wave on the skin on one side of the body will be reflected in the same way from the skin on the opposite side of the body.

To obtain the maximum voltage value on probes, it is necessary to arrange the probes in the maximum E_x region. As is known [11], the length of a standing wave is equal to the length (λ) of the wave of sound in the studied medium and is given by the expression:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (4)$$

where c is the sound speed in solution.

Thus, changing the frequency of USR, it is possible to change the distribution of the E_x in the vessel and have two or more maxima of the electric field strength of

different polarity along the direction of the propagation of the sound in it (fig. 3).

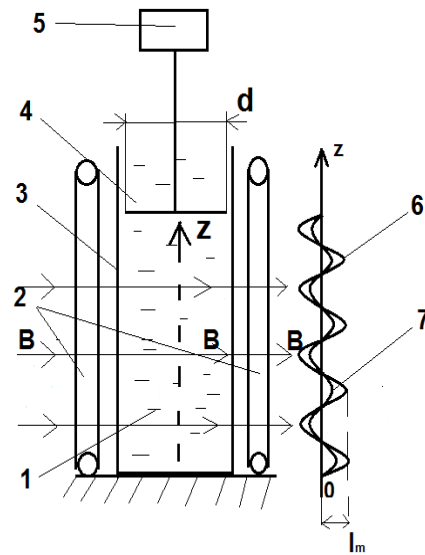


Fig. 3. Functional diagram of the system for excitation with AMM of the “chain” of sections of electric current excitation in a solution (1) simulating a biological environment, 2 – Helmholtz coils, 3 – cylindrical vessel with a solution with an inner diameter d , 4 – flat round USR emitter with a diameter d , 5 – USR generator, 6 – distribution of the solution velocity under the action of USR, 7 – distribution of the magnitude of the excited current in local areas of the solution.

The periodic change in the electric field intensity in space results in a periodic change in the potential difference along the height of the vessel and a corresponding periodic change in the current value flowing in various zones of the electro conductive solution located along the length of the vessel and according to the Ohm law inversely proportional to the electrical resistance of the solution (or biological real medium). Materials A sufficiently large distance between current maxima, equal to half the wavelength of the low frequency USR, allows to create one (as in figure 2) or several (as in Figure 3) current zones spaced in space along the axis of the vessel, which in the real BE will act on its different sections with different excitability. For example, at a USR frequency of 22 kHz, the length of the sound half wave is about 30 mm in water (and in a near-density BE).

As can be seen in fig. 2, localization in a solution with an electric current, having a length along the z axis equal to one half-period of the standing wave, can be organized by the spatial localization of the CMF action per solution (or to the patient's body site). To do this, it is necessary to use the source of the local magnetic field as a permanent magnet or coils with a current having dimensions that do not exceed half the length of the standing wave in the vessel. Only in this part of the vessel (or patient) will there be an electric current as a result of the use of AMM. The weakening or absence of a magnetic field in the rest of the vessel leads to the practical absence of an electric field in it in accordance with formula (1) due to the absence of the cause (magnetic field) of the occurrence of the electric current. At the same time, the

permissible distance from the local CMF source to the current generation in the real situation, i.e. when the current is excited in the patient's body, it should not significantly exceed the size (aperture) of the field source. This is due to an increase in the inhomogeneity of the magnetic field of scattering of the local source as it removes from it and with a decrease in its value, and hence, with a decrease in the generated current. It follows from this that the maximum depth of the location in the patient's body of a single area with a current having about 30mm (at a frequency of USR about 20 kHz) can be no more than 50-100mm.

To create a patient in a patient several sections ("chains") with a current along the USR "beam" (as in fig. 3, at a frequency of USR 4 times higher compared to fig. 3), the formation of a homogeneous CMF on the entire length of these sections is necessary.

This can be done using a Helmholtz coil with a diameter somewhat large than the height of the model vessel and, accordingly, large than the size of the patient's

body section in the actual situation of the use of AMM in medical practice. It uses one of the advantages of USR (compared with the electromagnetic field of high frequency), which practically does not fade at distances characteristic of the sizes of the human body. Therefore, when using AMM restrictions on the location of the processed current of the BE region does not exist. With an increase in frequency only decreases the length of the areas with an excited current in their "chain" located along the USR "beam".

Calculation of an electric current excited in BE model with AMM

The calculation of an AMM-excited current in BE was carried out on the basis of experimentally obtained potential difference values on two copper probes introduced into the NaCl model solution [7, 12]. The diagram of the measuring system is shown in fig.4.

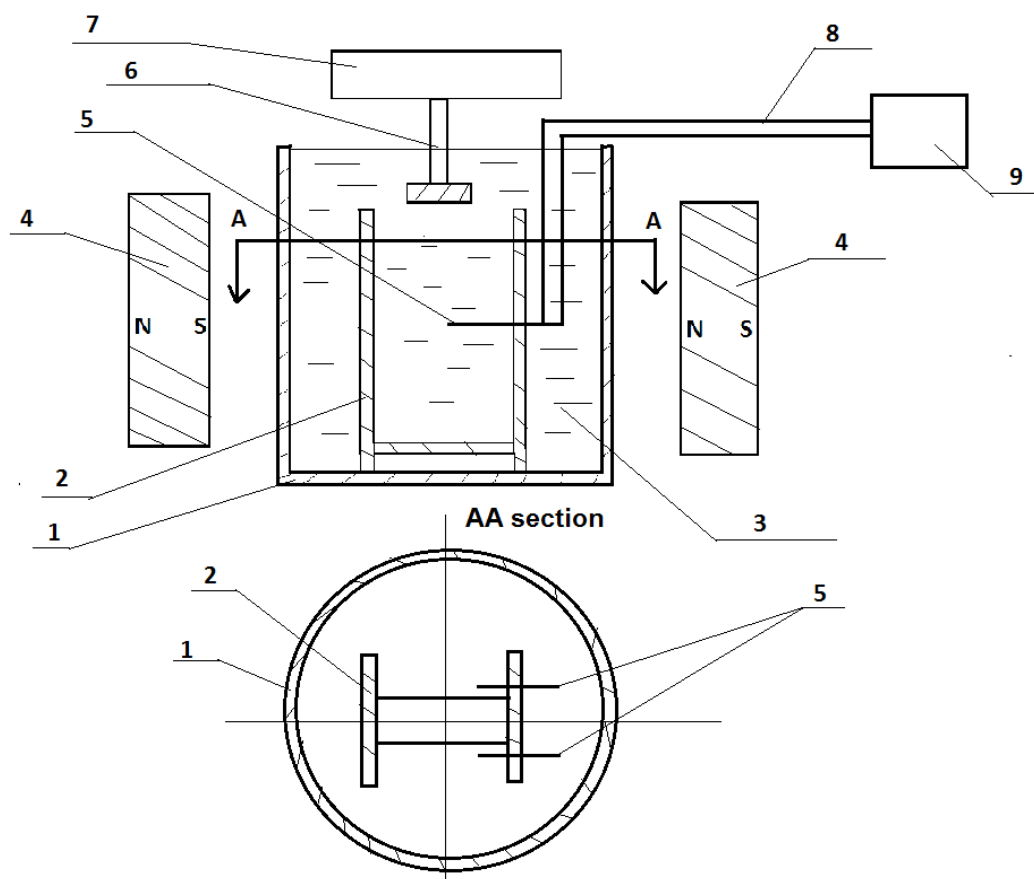


Fig. 4. Measuring system diagram: 1 – copper cup, 2 – plates for fixing electrical probes, 3 – NaCl solution, 4 – permanent magnets, 5 – electrical probes, 6 – sonic conduit of the USR source, 7 – USR generator, 8 – wires from probes to voltmeter, 9 – selective microvoltmeter.

The probes with a length of 1 cm and a distance between them $L = 1$ cm were located approximately in the region of the maximum distribution of the electric field strength at a power of USR 0.01 W/cm^2 at a frequency of 22 kHz ($\lambda = 6.8$ cm). One standing wave period was located at the distance between the USR source and the bottom of the vessel with the solution. The value of the

CMF, created by two permanent magnets with a diameter of 45 mm, in the area of the probes was equal to 0.4 T. The amplitude of the voltage U_m across the probes was 5×10^{-5} V. The region of the main part of the current flowing between the probes can be approximately represented as a cube with sides equal to 1 cm, since equal to the diameter (d) of the USR "beam", and its average

length ($\lambda/4$) along the Z axis are also about 1 cm. For the BE averaged resistivity at low frequencies equal to $\rho_2 = 140 \text{ Ohm cm}$ [6, 10], assuming that the resistance is mainly active, it can be calculated using Ohm's law the amplitude of the current I_m through the BE specified region:

$$I_m = \frac{U_m}{R} = \frac{U_m}{\rho_2 d / (\lambda/4)} = \frac{V_{mz} B_y d}{(4\rho_2/\lambda)} = \frac{cV_{mz} B_y d}{(4\rho_2 f)}, \quad (5)$$

where R – current flow area resistance. Substituting the value for the velocity V_{mz} into formula (5), we obtain:

$$I_m = \frac{c[2P/c\rho_1]^{0.5} B_y d}{4\rho_2 f}. \quad (6)$$

For the maximum current density j_m , from (5) and (6) we obtain:

$$j_m = \frac{I_m}{(\lambda/4)d} = \frac{I_m f}{cd} = \frac{[2P/c\rho_1]^{0.5} B_y}{\rho_2}. \quad (7)$$

It follows from (7) that the density of the excited local current does not depend on the USR frequency. After substituting the numerical values of the parameters into formula (6), we obtain $I_m = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ A}$. In this case, the maximum current density j_m in such a local BE model region was $j_m = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ A/cm}^2$. According to medical standards [6], the maximum permissible harmless current density passed for therapeutic purposes through biological tissues and human organs should not exceed $0,5 \text{ mA/cm}^2 = 0,5 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2 = 5 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2 \dots$

If it is necessary to generate current densities greater than $j_m = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ using AMM, the value of the electric field EX excited in BE should be increased.

According to formula (7), this can be achieved primarily by increasing the USR intensity and CMF value within acceptable limits. From the point of view of medical safety (to exclude BE cavitation), the USR power should not exceed 1 W/cm^2 [11]. A constant magnetic field, provided the patient is in a static position in this field, can be very large (7 or more Tesla) [13, 14, 15]. With the indicated values of the permissible low-frequency USR intensity and with a CMF equal to 7T, it follows from formula (7) that in a local area of the

biological environment with a USR beam diameter of 1 cm, a current with a maximum density of about 10^{-4} A/cm^2 can be excited. The regulation of the current density in the local sections of BE can occur over a wide range by changing the power USR or the value of the CMF

The main advantages of generating alternating current through BE using AMM over the traditional galvanic method of passing current through the patient's skin are:

1) the possibility of exciting electric current in local, predetermined areas of the biological environment:

a) in the form of a single region with a characteristic size of about 30 mm and with a maximum alternating current density in it up to 10^{-4} A/cm^2 (which is five times less than the permissible and dangerous value for humans) at a frequency of about 20 kHz with a CMF source aperture no more half wavelength USR (about 30 mm);

b) in the form of several amplitude-modulated current regions with the size of each of them equal to half the length of the USR standing wave in the patient's body and located in a uniform magnetic field;

2) the safety of the proposed equipment for creating local areas with current due to the absence of sources of increased electrical voltage in it.

Conclusions

A new, more informative and safe method of creating an electric current in the human body for medicinal purposes has been proposed and substantiated. The method is based on the excitation of an electric current in a local area of the body using the acousto-magnetic method (AMM). To substantiate this method, computational and experimental studies were performed on model samples of a biological environment. A calculated relationship is obtained that connects the magnitude of the excited current with the parameters of the ultrasonic and magnetic fields, as well as with the parameters of the model sample. The calculated ratios are verified by comparison with experimental results. The local density of the excited current in the experimental model sample was calculated and the possibility of reaching a current density at the level of 10^{-4} A/cm^2 , which is close to the maximum permissible value for the human body, $5 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$ was shown.

References

1. Abakumov, V. G., Gotra, Z. Y., Zlepko, S. M. and others. (2010), *Optoelectronic medical systems [Optoelektronni medychni systemy]*, Vinnytsia : UNIVERSUM-Vinnytsia, 329 p.
2. Kizimova, N. N. (1991), "Magnetohydrodynamic effects during blood movement" ["Magnitogidrodinamicheskiye efekty pri dvizhenii krovi"], *Biophysics*, Vol. 36, No. 1, P. 147.
3. Belousova, L. E. (1965), "On the possibility of inhibition and stopping of blood by a magnetic field" ["O vozmozhnosti tormozheniya i ostanovki krovi magnitnym polem"], *Biophysics*, Vol. 10, No. 2, P. 365–366.
4. Vardanyan, V. A. (1973), "Influence of a magnetic field on blood flow" ["Vliyaniye magnitnogo polya na techeniye krovi"], *Biophysics*, Vol. 18, No. 3, P. 491–496.
5. Karchevsky, E. M., Marochnik, L. S. (1965), "On the hydrodynamic variant of blood movement" ["O gidrodinamicheskom variante premeshcheniya krovi"], *Biophysics*, Vol. 10, No. 3, P. 371–373.

6. Oleinik, V. P. (2006), Fundamentals of the interaction of physical fields with biological objects [Osnovy vzaimodeystviya fizicheskikh poley s biologicheskimi ob'yektami], Kharkiv, KhAI.
7. Avrunin, O. (2019), "Acoustic excitation of electric field in water solution NaCl", *Przegląd elektrotechniczny*, No. 1 (4), P. 160–163. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2019.04.28>
8. Rosa, R. (1979), Magnetohydrodynamic energy conversion [Magnitogidrodinamicheskoye preobrazovaniye energii], Moscow, 252 p.
9. Bondarenko, I. S., Avrunin, O. G., Rakhimova, M. V., Bondarenko, S. I., Krevsun, A. V., Kulish, S. M. (2019), "Acoustomagnetic Registration of Magnetic Nanoparticles in a Liquid Medium", *Telecommunications and Radio Engineering*, Vol. 78 (8), P. 707–714.
10. Berezovsky, V. A., Kolotilov, A. M. (1990), Biophysical characteristics of human tissues [Biofizicheskiye kharakteristiki tkaney cheloveka], Kyiv, Naukova Dumka.
11. Elpiner, I. E. (1963), Ultrasound. Physicochemical and biological action [Ul'trazvuk. Fiziko-khimicheskoye i biologicheskoye deystviye], Moscow : Fizmatgiz, 420 p.
12. Bondarenko, I. S., Avrunin, O. G. (2017), "Magnetic hydrodynamics of the biological environment, Actual problems of automation and instrumentation" ["Magnitnaya gidrodinamika biologicheskoy sredy, Aktual'nyye problemy avtomatiki i priborostroyeniya"] : materials of the 1st International scientific and technical conference, P. 252.
13. Chizhik, V. I. (2009), *Quantum Radiophysics. Magnetic resonance and its applications*, St. Petersburg University, 700 p.
14. Wang, X. L., Ghorbani, R., Peleckis, G., Dou, S. X. (2008), "Very high critical field and superior Jc-field performance in NdO_{0.82}F_{0.18}FeAs with Tc of 51 K", arXiv:0806.0063 (31 May 2008).
15. Hunte, F., Jaroszynski, J., Gurevich, A., Larbalestier, D. C., Jin, R., Sefat, A. S., McGuire, M. A., Sales, B. C., Christen, D. K., Mandrus, D. (2008), "Two-band superconductivity in LaFeAsO_{0.89}F_{0.11} at very high magnetic fields", *Nature*. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature07058>

Received 13.02.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бондаренко Ігор Станіславович – Харківський національний університет радіоелектроніки, асистент кафедри біомедицинської інженерії, Харків, Україна; email: igor.bondarenko@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2925-3020>.

Бондаренко Ігорь Станіславович – Харьковський національний університет радіоелектроніки, асистент кафедри біомедицинської інженерії, Харків, Україна.

Bondarenko Igor – Kharkiv National University of Radio Electronics, Assistant of the Department of Biomedical Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Аврунін Олег Григорович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри біомедицинської інженерії, Харків, Україна; email: oleh.avrunin@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6312-687X>.

Аврунин Олег Григорьевич – доктор технических наук, профессор, Харьковський національний університет радіоелектроніки, заведуючий кафедри біомедицинської інженерії, Харків, Україна.

Avrunin Oleg – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Head of the Department of Biomedical Engineering, Kharkiv, Ukraine.

ПРО ЗБУДЖЕННЯ ЛОКАЛЬНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ В БІОЛОГІЧНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Предметом дослідження в статті є вивчення способу збудження тканин організму людини за допомогою електричного струму. **Мета** роботи – розробка методу збудження локального струму в тілі людини, що впливає на мікроциркуляцію крові і збудливість локальних ділянок м'язової тканини в перебігу лікувального процесу. У статті вирішуються наступні **завдання**: створення модельного зразка тканини, обґрунтування методу генерації електричного струму всередині зразка, розробка конструкції системи генерації струму і вимірювання електричного відгуку модельного зразка тканини на виникнення в ній електричного струму, визначення величини і просторового розподілу струму в модельному зразку тканини, порівняння отриманих значень струму з відомими і допустимими в медичній практиці його значеннями, визначення переваг запропонованого способу збудження струму в порівнянні з традиційним, який використовується в медицині. Використовуються такі **методи**: аналіз наукових публікацій з предмету дослідження, розрахунок очікуваних параметрів струму в модельному зразку, метод конструювання вузлів системи генерації струму і вимірювання електричного відгуку, експериментальний метод збудження струму і вимірювання відгуку зразка на нього. Отримані наступні **результати**: обґрунтовано новий акусто-магнітний метод збудження електричного струму в локальних ділянках м'язової тканини, який дозволяє визначати для них оптимальні значення лікувального струму і величину його порогового значення, створені модельні зразки м'язової тканини, обґрунтований магнітогідродинамічний спосіб генерації електричного струму всередині тіла пацієнта, створена конструкція системи генерації струму і вимірювання електричного відгуку модельного зразка тканини на виникнення в ній електричного струму, визначена величина і просторовий розподіл струму в модельному зразку тканини, виконано порівняння отриманих значень струму з відомими і допустимими в медичній практиці його значеннями і доведено їх безпечність для людини. Отримано розрахункові співвідношення, що зв'язують величину збудження локального струму з параметрами ультразвукового випромінювання, зовнішнього постійного магнітного поля і біологічного

середовища. Встановлено, що щільність струму, що збуджується в локальній ділянці біологічного середовища, не залежить від частоти ультразвуку і визначається в основному величинами інтенсивності ультразвуку і постійного магнітного поля. Перевагами запропонованого методу збудження струму в порівнянні з традиційним гальванічним методом пропускання струму через шкіру пацієнта є можливість створювати струм в будь-якому необхідному локальній ділянці тканини пацієнта і повна його безпека. **Висновки:** розроблено та експериментально перевірено на модельних зразках наукові основи нового методу збудження локального струму всередині тіла людини. Використання цього методу може істотно підвищити ефективність лікувального процесу на основі впливу струму на мікроциркуляцію крові в заздалегідь заданих ділянках м'язової тканини і вперше дозволить розрізняти і визначати з високою точністю пороги їх збудливості електричним струмом.

Ключові слова: мікроциркуляція крові; поріг збудливості м'язової тканини; модель тканини; магнітна гідродинаміка провідного розчину; ультразвук; локальний електричний струм.

О ВОЗБУЖДЕНИИ ЛОКАЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В БИОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

Предметом исследования в статье является изучение способа возбуждения тканей организма человека с помощью электрического тока. **Цель** работы – разработка метода возбуждения локального тока в теле человека, влияющего на микроциркуляцию крови и возбудимость локальных участков мышечной ткани в течении лечебного процесса. В статье решаются следующие **задачи:** создание модельного образца ткани, обоснование метода генерации электрического тока внутри образца, разработка конструкции системы генерации тока и измерения электрического отклика модельного образца ткани на возникновение в ней электрического тока, определение величины и пространственного распределения тока в модельном образце ткани, сравнение полученных значений тока с известными и допустимыми в медицинской практике его значениями, определение преимуществ предлагаемого способа возбуждения тока по сравнению с традиционным, используемым в медицине. Используются такие **методы:** анализ научных публикаций по предмету исследования, расчет ожидаемых параметров тока в модельном образце, метод конструирования узлов системы генерации тока и измерения электрического отклика, экспериментальный метод возбуждения тока и измерения отклика образца на него. Получены следующие **результаты:** обоснован новый акусто-магнитный метод возбуждения электрического тока в локальных участках мышечной ткани, который позволяет определять для них оптимальные значения лечебного тока и величину его порогового значения, созданы модельные образцы мышечной ткани, обоснован магнитогидродинамический способ генерации электрического тока внутри тела пациента, создана конструкция системы генерации тока и измерения электрического отклика модельного образца ткани на возникновение в ней электрического тока, определена величина и пространственное распределение тока в модельном образце ткани, выполнено сравнение полученных значений тока с известными и допустимыми в медицинской практике его значениями и доказана их безопасность для человека. Получены расчетные соотношения, связывающие величину возбуждаемого локального тока с параметрами ультразвукового излучения, внешнего постоянного магнитного поля и биологической среды. Установлено, что плотность тока, возбуждаемого в локальном участке биологической среды, не зависит от частоты ультразвука и определяется в основном величинами интенсивности ультразвука и постоянного магнитного поля. Преимуществами предлагаемого метода возбуждения тока по сравнению с традиционным гальваническим методом пропускания тока через кожу пациента являются возможность создавать ток в любом требуемом локальном участке ткани пациента и полная его безопасность. **Выводы:** разработаны и экспериментально проверены на модельных образцах научные основы нового метода возбуждения локального тока внутри тела человека. Использование этого метода может существенно повысить эффективность лечебного процесса на основе воздействия тока на микроциркуляцию крови в заранее заданных участках мышечной ткани и впервые позволит различать и определять с высокой точностью пороги их возбудимости электрическим током.

Ключевые слова: микроциркуляция крови; порог возбудимости мышечной ткани; модель ткани; магнитная гидродинамика проводящего раствора; ультразвук; локальный электрический ток.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Бондаренко І. С., Аврунін О. Г. Про збудження локального електричного струму в біологічному середовищі. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 1 (15). С. 106–112. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.106>

Bondarenko, I., Avrunin, O. (2021), "On the excitation of local electric current in the biological environment", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (15), P. 106–112. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.106>

O. YEROSHENKO, I. PRASOL, O. DATSOK

SIMULATION OF AN ELECTROMYOGRAPHIC SIGNAL CONVERTER FOR ADAPTIVE ELECTRICAL STIMULATION TASKS

The **subject** matter of the article is an electromyographic signal transducer, which are an integral part of devices for adaptive electrical stimulation of muscle structures based on reverse electromyographic communication. The **goal** of the work is to study the features, obtaining the corresponding theoretical relationships and computer modeling of a differential biopotential converter, providing amplification of the useful component and suppression of harmful interference, the spectra of which intersect. The following **tasks** were solved in the article: determining the effect of electrode width and electrode spacing on crosstalk; formation of the electrode-skin model and the input circuit of the transducer, obtaining theoretical relations for calculating the rejection coefficient, construction of the transducer circuit and its computer simulation. The following **methods** were used – methods of mathematical modeling of processes and technical devices; methods of analysis, structural and parametric synthesis of nonlinear electronic circuits; methods of machine design. The following **results** were obtained – a biopotential amplifier circuit with tracking feedback on power supply is proposed; modeling of dynamic processes by means of the Multisim program was carried out; on the basis of the constructed model of the electrode-skin input circuit and the obtained analytical relationships, the rejection coefficient of the input circuit of the equivalent circuit is calculated; the requirements for the signal registration module are formulated. **Conclusions:** The considered version of the electromyographic signal converter circuit based on tracking communication on power supply, effectively rejects 50 Hz common mode noise. On the basis of the constructed equivalent model of the input circuit of the amplifier, the theoretical relation for calculating the rejection coefficient of such amplifiers. The circuit is simulated in the Multisim program, the results confirmed the correctness of its functioning. The requirements for the interelectrode distance and the thickness of the electrodes themselves are also formulated. The results obtained can be used to design complexes for adaptive electrical stimulation.

Keywords: biopotential amplifier; useful signal; interference; muscle; electrode system; simulation; Multisim.

Introduction

Currently, the measurement of electromyographic (EMG) signals is widely used in clinical practice for the diagnosis of various diseases. Also, the measurement of human biopotentials is actively used in prosthetic technology. The main task is to measure the degree of tension of an individual muscle. There are various methods for determining the degree of muscle contraction [1-2]. But to amplify very weak signals, special biopotential amplifiers are needed.

Analysis of the problem and existing methods

When developing devices for receiving EMG signals, it is necessary to take into account a number of specific features of these devices.

The main difficulty in developing EMG signal amplifiers is that these signals have a low amplitude (from 20 μV to 2 mV at maximum muscle contraction), while the useful signal can be superimposed noise, the amplitude of which can significantly exceed the EMG-signal. It is necessary to take into account the fact that the amplitude characteristics of EMG signals for different muscles may differ significantly, they may have different values in different people [3-7].

The problem is the effect of 50 Hz guidance on the useful signal. The situation is complicated by the fact that the frequency of 50 Hz is in the spectrum of the useful signal, which has a range of 20-500 Hz. To attenuate this interference, signal filtering alone is not enough [3].

The next problem includes myographs, which have a different range of voltage measurement, which makes it difficult to register the full range of changes in the amplitude of the useful signal. For example, in the multifunctional complex for neurophysiological studies

"Neuron-Spectrum-5" the voltage measurement range is 5 μV -50 mV, with a relative error of voltage measurement in the range from 0.1 to 50 mV - within $\pm 5\%$ [8].

When the signal is diverted from any muscle group, there may be cross-interference from neighboring muscle groups. Thus, it is necessary to minimize the mutual influence of electrical activity of neighboring muscles. This is achieved by optimal selection of the shape of the electrodes, the interelectrode distance, the choice of points of application of the electrodes.

The effectiveness of the rehabilitation process using electrical stimulation in various skeletal muscle lesions is determined by the adequacy of stimulating effects. This applies to both the shape of the effects and the parameters, such as amplitude, frequency or others. These parameters are individual not only for the individual patient and the condition of the muscles, but also depend on the specific type of muscle. Therefore, it is important to have electromyographic feedback in the process of electrical stimulation. Therefore, in systems of adaptive electrical stimulation it is necessary to provide means of measuring the electrical activity of muscles. The electromyogram signal is low-frequency and in-phase interference, which are located in the spectrum of the useful signal, so special amplifiers are used to neutralize such interference. Amplifiers must provide active neutralization due to the feedback signal supplied to the neutralizing electrode.

The **aim** of this article is to study and computer model the differential biopotential amplifier.

Features of electrodes

The correct positioning of the electrodes on the skin surface is important. To obtain the maximum signal amplitude, the electrodes are superimposed on the so-

called moving points [9].

To obtain a stable electrode-skin contact and to reduce the impedance of the skin, the skin must be properly prepared before applying the electrodes [10-11].

Fig. 1 clearly shows the dependence of the amplitude of the signal on the location of the electrodes over the area of the studied muscle. With the correct positioning of the electrodes increases the amplitude of the useful signal, increases the signal-to-noise ratio, reduces the effect of cross-interference from neighboring muscles.

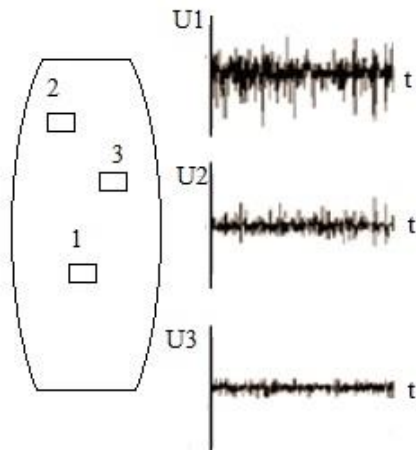


Fig. 1. The dependence of the signal on the place of application of the electrodes [3]

It is necessary to use electrodes made of materials that would ensure stable skin-electrode contact for a long time, and were not prone to polarization effects. In this case, it is advisable to use electrodes made of silver, silver chloride electrodes, or gold or platinum [3]. They do not oxidize, are weakly polarized, but are expensive.

Promising use of capacitive electrodes in which the conductive layer is covered with a dielectric.

With regard to the shape of the electrodes themselves, it should be noted that the geometry of the electrodes affects the amplitude of the signal being taken, as well as the level of crosstalk. The main parameters are the interelectrode distance and the area of the surface occupied by the electrode. Thus, the amplitude of the removed signal will be directly proportional to the

interelectrode distance, while the bandwidth will decrease with increasing distance [12].

Fig. 2 presents the dependences of the level of cross-interference on the interelectrode distance and the width of the electrodes. These dependences are obtained by using electrodes with a width of 7.5 and 1 mm and changing the distance between them.

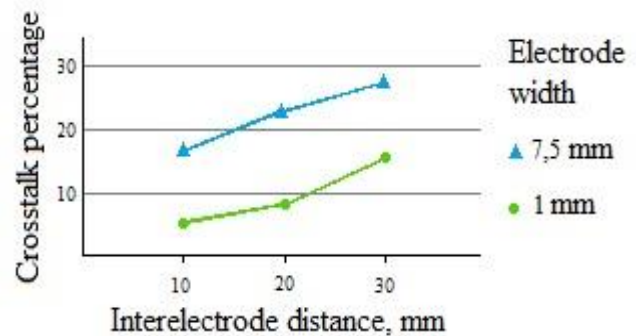


Fig. 2. Dependence of the level of cross-barriers from the interelectrode distance and width of the electrodes [3]

The conductivity of muscle tissues is due to complex biochemical and biophysical processes. The linearity of the obtained dependence of the amplitude of the EMG signal from the distance between the electrodes allows us to assume that in the inverted range, muscle fiber can be considered a homogeneous conductor [13].

One of the physiological properties of skeletal muscles is conductivity, that is, the ability to carry out an excitation wave. At the heart of the excitation rate is the rate of biochemical reactions occurring on cell membranes. Electric irritation of the muscle fiber leads to a change in the ion conductivity of the membrane due to passage through sodium, calcium and potassium channels of currents of the corresponding ions [14-15].

The structure and features of the electrode-skin contact

One of the requirements when using surface electrodes is to reduce the transition resistance of the electrode-skin. The structure of the electrode-skin contact is shown in fig. 3.

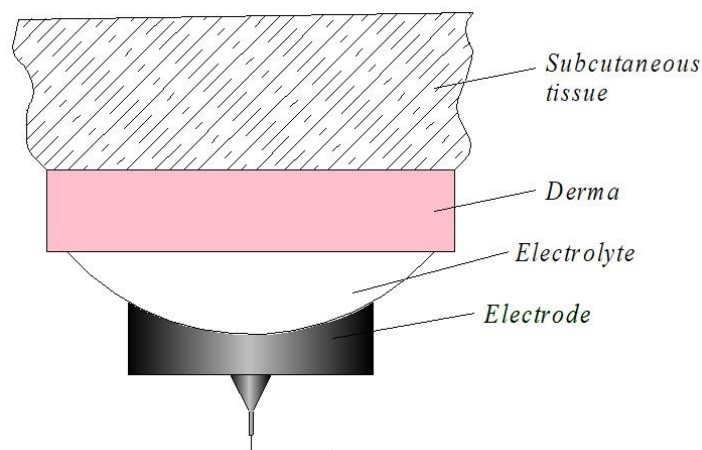
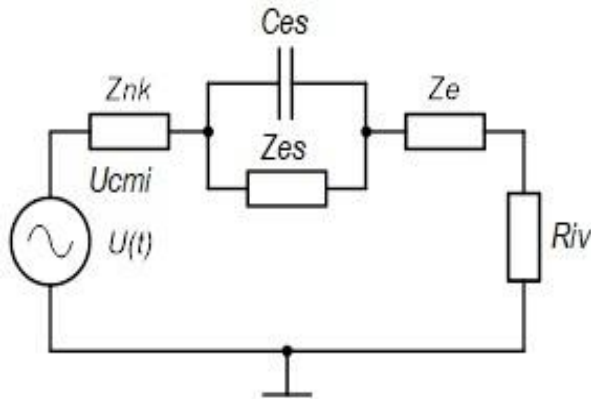


Fig. 3. Electrode-skin contact structure

An equivalent electrode-skin contact scheme can be represented as follows (fig. 4).



$U(t)$ – source of biopotential; Z_{nk} – resistance of subcutaneous tissues; C_{es} , Z_{es} – capacitance and resistance of electrode-skin contact; Z_e – electrode resistance; R_{iv} – input resistance of the biopotential amplifier.

Fig. 4. Equivalent electrode-skin circuit

Differential biopotential amplifier

Different transition supports of the electrode-skin through different channels leads to the fact that the in-phase interference, which is present on the human body, acts as a useful differential signal, and then significantly amplified. Therefore, it is necessary to reduce the transient resistance to equalize the difference between the interelectrode potentials.

Construct an equivalent circuit that includes a transient resistance electrode-skin (R_{es}) and the input circuit of the differential amplifier (R_d , R_{cmi}) (fig. 5). The voltage source U_{cmi} simulates the presence of in-phase interference on the human body. The difference in the transition supports of the electrode-skin is taken into account by the presence of the correction ΔR_{es} .

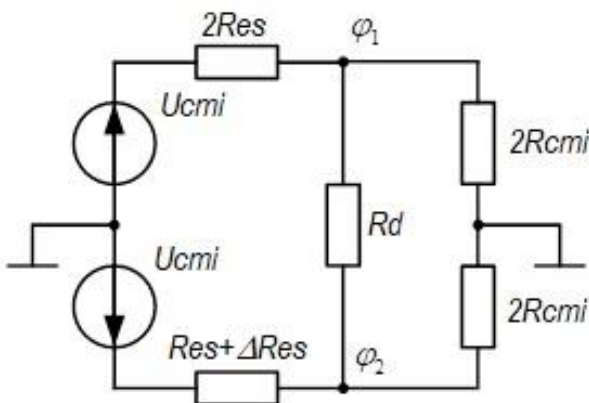


Fig. 5. Equivalent scheme for calculating the rejection coefficient

Since in practice the relation $R_{dif} \gg R_{es}$ is always fulfilled, then for the potentials of nodes 1 and 2 the following difference is applied to the input of the amplifier:

$$U = \phi_1 - \phi_2 = U_{es} 2R_{cmi} \left(\frac{\Delta R_{es}}{(R_{es} + \Delta R_{es} + 2R_{cmi})(R_{es} + 2R_{es})} \right), \quad (1)$$

where ϕ_1 – node 1, ϕ_2 – node 2, U_{cmi} – source of power, R_{cmi} – input circuit of the differential amplifier, ΔR_{es} – the difference in the transient resistances of the electrode-skin, R_{es} – transient resistance electrode-skin. Neglecting the values R_{es} and ΔR_{es} in comparison with R_{cmi} (since $R_{cmi} \gg R_{es}$), we obtain:

$$U \approx U_{cmi} \frac{\Delta R_{es}}{2R_{cmi}}. \quad (2)$$

This difference is a differential signal, i.e.

$$U_{in.dif} = \frac{\Delta R_{es}}{2R_{cmi}} U_{cmi}, \quad (3)$$

and the cophasal signal transfer factor to the output in the form of a differential:

$$K_{rc} = \frac{U_{in.dif}}{U_{cmi}} = \frac{\Delta R_{es}}{2R_{cmi}}. \quad (4)$$

Taking into account the formula for finding the coefficient of rejection:

$$H = \frac{K_{rr}}{K_{rc}}, \quad (5)$$

at $K_{rr}=1$ we finally find:

$$H = \frac{2R_{cmi}}{2\Delta R_{es}}. \quad (6)$$

Thus, the difference in the transition resistances of the electrode-skin limits the rejection coefficient of the input circuit. Therefore, in order to reduce the transient resistance, it is necessary to carefully apply special pastes.

Biopotential amplifier modeling and signal registration module requirements

It is advisable to use AD620 chips from AnalogDevices as an instrumental amplifier, which requires only one external resistor to set the gain from 1 to 10000. AD620 has low voltage input noise and low current input noise, which makes it a good choice for pre-amplification [16]. The characteristics of AD620 are given in table 1. Four-channel operational amplifier AD704 from AnalogDevices on bipolar transistors, which has a small input bias current, typical of amplifiers based on BiFET technology (a combination of bipolar and field-effect transistors), but has a much lower temperature drift I_B [17]. The characteristics of AD704 are given in table 2. Fig. 6 shows an electrical schematic diagram of the biopotential amplifier.

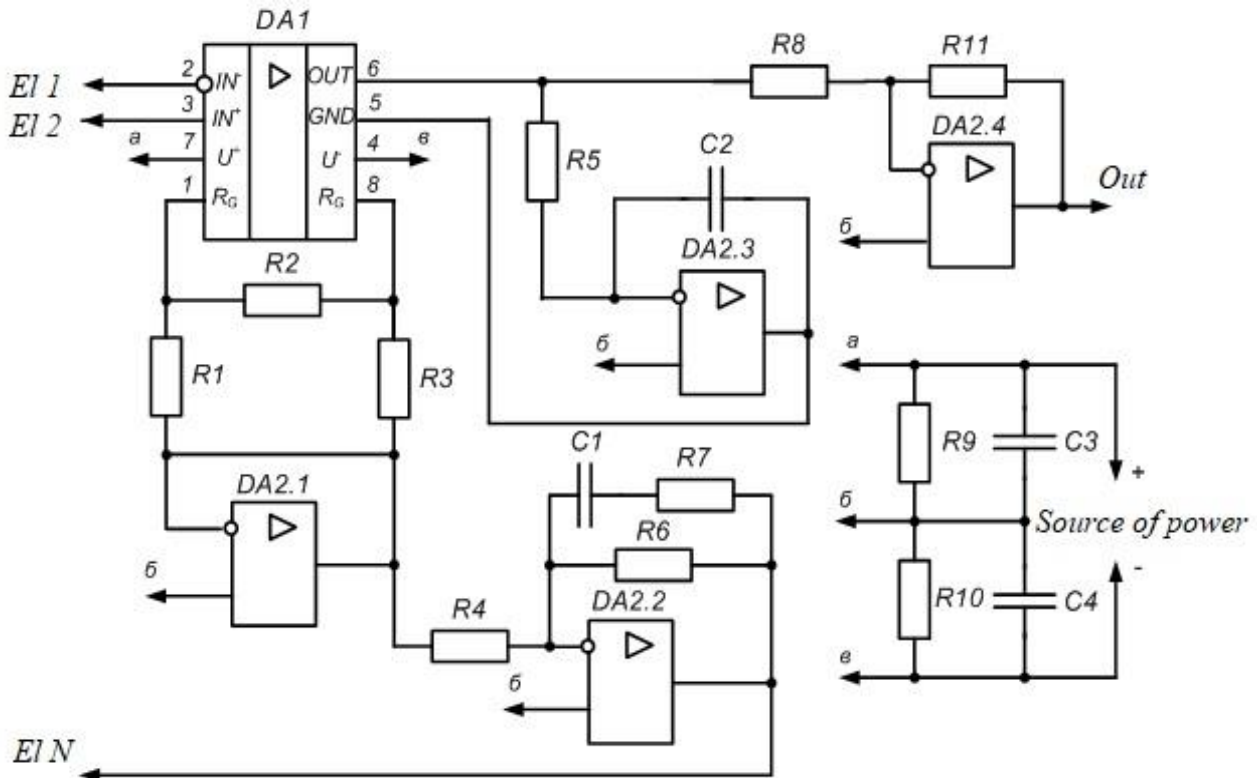


Fig. 6. Schematic electrical circuit of the biopotential amplifier

Table 1. Characteristics of the chip AD620

Name	Value
Supply voltage	4.6... 36 V
Current of own consumption	900 μ A
Programmable gain	none
The maximum growth rate of the output signal	1.2 V/ μ s
Operating temperature range	-40...85°C
Technical feature of OP	Low Power
Frequency of single gain	1 MHz
Noise level	9 nV/Hz

Table 2. Characteristics of the chip AD704

Name	Value
Shear voltage	150 μ V
Shear voltage drift	1.5 μ V/°C
Input bias current	270 pA

Fig. 7 presents the result of modeling the circuit of the electrical principle of the biopotential amplifier in the graphic editor of the Multisim program.

The simulation results confirm the efficiency of the circuit and allow to obtain the necessary characteristics.

The quality of registration of biosignals is influenced by many factors, among which the properties of the electrodes play an important role. Elimination of influence of antiphase physical obstacles and leads is reached by reduction of the area of the closed contour formed by wires of assignments, application of shielding methods.

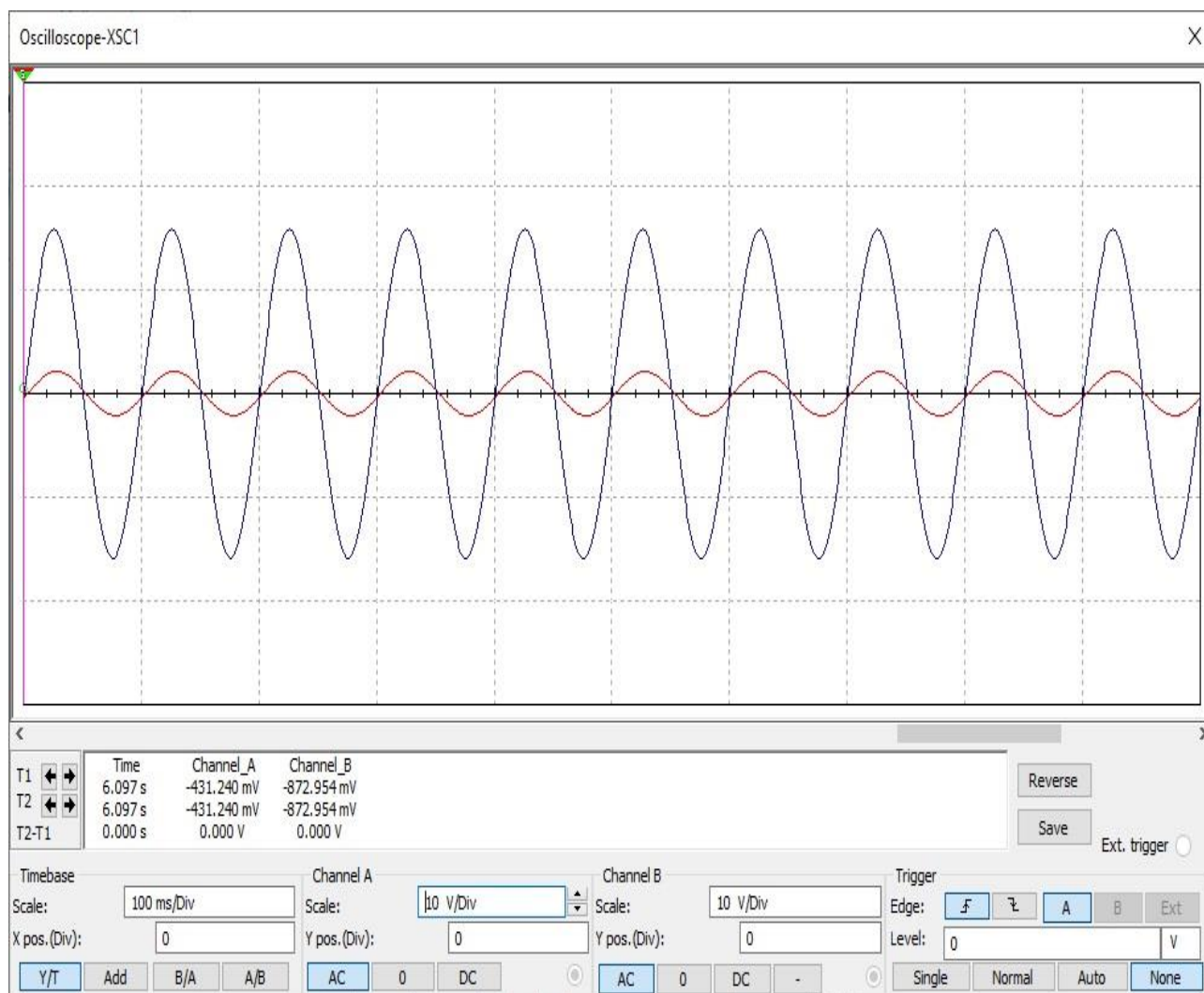


Fig 7. The result of simulation in Multisim program

Conclusions

As a result of the research, the scheme of the biopotential amplifier in the Multisim program was proposed and tested. The operation of the electric schematic diagram of the notch filter for attenuation of network interference is simulated, and also on the basis of the constructed model of the input circuit electrode-skin

and the received analytical relations the coefficient of resection of the input circuit of the equivalent circuit is calculated. The requirements to the signal registration module are offered and the necessary element base is selected. Such amplifiers can be used, in particular, to amplify weak electromyographic signals in diagnostic devices or monitor the effectiveness of therapeutic procedures of the human musculoskeletal system.

References

1. Voelker M. (2015), "Implantable EMG measuring system", *AMA Conferences*.
2. Pestrikov P. P., Pestrikova T. V. (2019), "Measuring system for recording signals of surface electromyography of the muscles of the forearm" ["Izmeritel'naya sistema dlya registratsii signalov poverkhnostnoy elektromiografii myshts predplech'ya"], *Electronic scientific publication "Scientific notes of PNU"*, Vol. 10, No. 2, P. 173–180.
3. Safin D. R., Pilshchikov I. S., Urakseev M. A., Gusev V. G. (2009), "Evaluation of the effectiveness of various designs of electrodes and biosignal amplifiers in prosthetic control systems" ["Otsenka effektivnosti razlichnykh konstruksiy elektrodov i usiliteley biosignalov v sistemakh upravleniya protezami"], *News of higher educational institutions. Volga region. Technical science*, No. 2 (10), P. 88–101.
4. Datsok, O. M., Prasol, I. V., Yeroshenko, O. A. (2019), "Construction of a biotechnical system of muscular electrical stimulation", *Visnik of NTU "KhPI". Series: Informatics and modeling*, No. 13 (1338), P. 165–175. DOI: <https://doi.org/10.20998/2411-0558.2019.13.15>
5. Yeroshenko, O. A., Prasol, I. V., Datsok, O. M. (2019), "Improving the efficiency of devices for electrical stimulation of human muscles" ["Pidvyshchennya efektyvnosti funktsionuvannya aparativ dlya elektrostymulyatsiyi m'yaziv lyudyny"], *Information technologies: science, technology, technology, education, health: abstracts of the XXVII international scientific-practical conference MicroCAD-2019, May 15-17, 2019 / for ed. prof. Sokol Ye. I., Kharkiv : NTU "KhPI"*, P. 21.

6. Yeroshenko, O. A., Prasol, I. V. (2018), "Information technologies for determining parameters of stimuli of electromyostimulation systems" ["Informatsionnyye tekhnologii opredeleniya parametrov stimulov sistem elektromiostimulyatsii"], *The use of information technology in the training and operation of law enforcement: materials International. scientific-practical conf. Mar 14-15 2018*, Kharkiv, NANGU, P. 122–124.
7. Barabash, O. V., Radchenko, V. A., Tkachev, V. N., Tokarev, V. V. (2017), "Computer multibiometric system of personality identification based on a set of biometric features" ["Komp'yuternaya mul'tibiometricheskaya sistema identifikatsii lichnosti po sovkupnosti biometricheskikh priznakov"], *Telecommunication and information technologies*, No. 3. P. 64–71.
8. Sushkova, O. S. (2017), *A system for screening early diagnosis of parkinsonism based on the analysis of monitoring parameters of signals of multichannel electroencephalograms, electromyograms, and muscle tremor* [Sistema skringovoy ranney diagnostiki parkinsonizma na osnove analiza parametrov monitoringa signalov mnogokanal'nykh elektroentsefalogramm, elektromiogramm i myshechnogo tremora], Moscow, 114 p.
9. Slavutsky, Ya. L. (1982), *Physiological aspects of bioelectric prosthesis management* [Fiziologicheskiye aspekty bioelektricheskogo upravleniya protezami], Medicine, Moscow.
10. Kovalenko, A., Kuchuk, H., Lyashenko, O. (2019), "Resource allocation of a multiphase big data processing system with high-intensity input stream", *Control, navigation and communication systems. Collection of scientific works*, No. 3 (55), P. 115–119. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.3.115>
11. Luca, De C. J. (1997), "The use of surface electromyography in biomechanics", *Journal of Applied Biomechanics*, No. 13 (2).
12. Roy, S. H. (2007), "Electro-Mechanical stability of surface EMG sensors", *Medical and biological engineering and computing*, No. 45.
13. Osipov, A. N., Bondarik, V. M., Kuznetsov, D. F. (2014), "The influence of interelectrode distance on the energy characteristics of electromyograms" ["Vliyaniye mezhelektrodnogo rasstoyaniya na energeticheskiye kharakteristiki elektromiogramm"], *International scientific and technical conference dedicated to the 50th anniversary of MRTI-BSUIR, March 18-19, 2014, materials conf. At 2 h. 2*, Minsk, P. 115–116.
14. Babinkov, V. I. (2017), "To the question of the causes of the variability of the impedance of a contracting muscle during stimulation impedance myography" ["K voprosu o prichinakh variabel'nosti impedansa sokrashchayushcheyasya myshtsy pri stimulyatsionnoy impedansnoy miografii"], *Wounds and wound infections, Journal of them. prof. B. M. Kostyuchenka*, No. 4 (3), P. 8–13.
15. Davydova, N. (2020), "Amplitude-time analysis of biomechanical patterns of human motions", *Journal of Engineering Science*, Vol. XXVII, No. 3, P. 169–181.
16. Analog Devices, Inc. All Rights Reserved, "AD620", available at: <https://analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD620.pdf> (lastaccessed 11.05.2020).
17. Analog Devices, Inc. All Rights Reserved, "AD704", available at: <https://analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD704.pdf> (lastaccessed 11.05.2020).

Received 17.02.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Єрошенко Ольга Артурівна – Харківський національний університет радіоелектроніки, асистент кафедри електронних обчислювальних машин, аспірант кафедри біомедичної інженерії, Харків, Україна; email: olha.yeroshenko@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6221-7158>.

Єрошенко Ольга Артурівна – Харьковський національний університет радіоелектроніки, асистент кафедри електронних вичислювальних машин, аспірант кафедри біомедицинської інженерії, Харків, Україна.

Yeroshenko Olha – Kharkiv National University of Radio Electronics, Assistant Lecturer of the Department of Electronic Computers, PhD student of the Department of Biomedical Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Прасол Ігор Вікторович – доктор технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри біомедичної інженерії, Харків, Україна; email: igor.prasol@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2537-7376>.

Прасол Игорь Викторович – доктор технических наук, доцент, Харьковський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри біомедицинської інженерії, Харків, Україна.

Prasol Igor – Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor of the Department of Biomedical Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Дацок Олег Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри біомедичної інженерії, Харків, Україна; email: oleh.datsok@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4489-3819>.

Дацок Олег Михайлович – кандидат технических наук, доцент, Харьковський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри біомедицинської інженерії, Харків, Україна.

Datsok Oleh – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor of the Department of Biomedical Engineering, Kharkiv, Ukraine.

МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЕЛЕКТРОМІОГРАФІЧНОГО СИГНАЛУ ДЛЯ ЗАДАЧ АДАПТИВНОЇ ЕЛЕКТРОСТИМУЛЯЦІЇ

Предметом дослідження в статті є перетворювачі електроміографічного сигналу, які є складовою частиною пристроїв для адаптивної електростимуляції м'язових структур на основі зворотного електроміографічного зв'язку. **Мета** роботи –

дослідження особливостей, отримання відповідних теоретичних співвідношень та комп'ютерне моделювання диференційного перетворювача біопотенціалів, що забезпечує підсилення корисної складової і приглушення перешкоди, спектри яких перетинаються. В статті вирішуються наступні **завдання**: визначення впливу ширини електродів і міжелектродної відстані на перехресні перешкоди; формування моделі електрод-шкіра і вхідного кола перетворювача, отримання теоретичних співвідношень для розрахунку коефіцієнта режекції, побудова схеми перетворювача та її комп'ютерне моделювання. Використовуються такі **методи**: методи математичного моделювання процесів і технічних пристроїв; методи аналізу, структурного і параметричного синтезу нелінійних електронних схем; методи машинного проектування. Отримано наступні **результати**: запропоновано схему підсилювача біопотенціалів, що стежить зворотним зв'язком по живленню; проведено моделювання динамічних процесів засобами програми Multisim; досліджено схему підсилювача біопотенціалів у програмі Multisim; на основі побудованої моделі вхідного кола електрод-шкіра і отриманих аналітичних співвідношень розраховано коефіцієнт режекції вхідного кола еквівалентної схеми; сформульовано вимоги до модулю ресстрації сигналу. **Висновки**: Розглянутий варіант схеми перетворювача електроміографічного сигналу на основі зв'язку, що стежить по живленню, дозволяє ефективно гасити синфазну перешкоду 50 Гц. На основі побудованої еквівалентної моделі вхідного кола підсилювача отримані теоретичні співвідношення для розрахунку коефіцієнта режекції таких підсилювачів. Схема промодельована в середовищі програми Multisim, результати підтвердили ефективність її функціонування. Сформульовано вимоги до міжелектродної відстані і товщини самих електродів. Отримані результати можуть бути використані для проектування комплексів адаптивної електростимуляції.

Ключові слова: підсилювач біопотенціалів; корисний сигнал; перешкода, м'яз; система електродів; моделювання; Multisim.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОМИОГРАФИЧЕСКОГО СИГНАЛА ДЛЯ ЗАДАЧ АДАПТИВНОЙ ЭЛЕКТРОСТИМУЛЯЦИИ

Предметом исследования в статье являются преобразователи электромиографического сигнала, которые являются составной частью устройств для адаптивной электростимуляции мышечных структур на основе обратной электромиографической связи. **Цель** работы – исследование особенностей, получение соответствующих теоретических соотношений и компьютерное моделирование дифференциального преобразователя биопотенциалов, обеспечивающего усиление полезной составляющей и подавление вредной помехи, спектры которых пересекаются. В статье решаются следующие **задачи**: определение влияния ширины электродов и межэлектродного расстояния на перекрестные помехи; формирование модели электрод-кожа и входной цепи преобразователя, получение теоретических соотношений для расчета коэффициента режекции, построение схемы преобразователя и ее компьютерное моделирование. Используются следующие **методы**: методы математического моделирования процессов и технических устройств; методы анализа, структурного и параметрического синтеза нелинейных электронных схем; методы машинного проектирования. Получены следующие **результаты**: предложено схему усилителя биопотенциалов со следящей обратной связью по питанию; проведено моделирование динамических процессов средствами программы Multisim; на основе построенной модели входной цепи электрод-кожа и полученных аналитических соотношений рассчитан коэффициент режекции входной цепи эквивалентной схемы; сформулированы требования к модулю регистрации сигнала. **Выводы**: Рассмотренный вариант схемы преобразователя электромиографического сигнала на основе следящий связи по питанию позволяет эффективно подавлять синфазную помеху 50 Гц. На основе построенной эквивалентной модели входной цепи усилителя получены теоретические соотношения для расчета коэффициента режекции таких усилителей. Схема промоделирована в среде программы Multisim, результаты подтвердили эффективность ее функционирования. Сформулированы требования к межэлектродному расстоянию и толщине самих электродов. Полученные результаты могут быть использованы для проектирования комплексов адаптивной электростимуляции.

Ключевые слова: усилитель биопотенциалов; полезный сигнал; помеха; мышца; система электродов; моделирование; Multisim.

Бібліографічні опису / Bibliographic descriptions

Срошенко О. А., Прасол І. В., Дацок О. М. Моделювання перетворювача електроміографічного сигналу для задач адаптивної електростимуляції. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 1 (15). С. 113–119. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.113>

Yeroshenko, O., Prasol, I., Datsok, O. (2021), "Simulation of an electromyographic signal converter for adaptive electrical stimulation tasks", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (15), P. 113–119. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.113>

I. NEVLIUDOV, E. RAZUMOV-FRYZYUK, D. NIKITIN, D. BLIZNYUK, R. STRELETS

TECHNOLOGY FOR CREATING THE TOPOLOGY OF PRINTED CIRCUIT BOARDS USING POLYMER 3D MASKS

The **subject** of research is the influence of factors of exposure of two-dimensional images on the topology of conductors in the manufacture of printed circuit boards by the method of three-dimensional polymer photomasks. The **purpose** of the work is ensuring the accuracy and preservation of the geometric dimensions of the conductors of printed circuit boards during LCD exposure of masks on the work piece. To achieve this goal, it is necessary to solve the following **tasks**: to analyze photolithography technology and types of polymer 3D printing; to develop a technological process for exposing photopolymer masks to a printed circuit board blank using 3D printing technologies; to conduct experimental studies to determine the optimal exposure parameters; on the basis of the empirical results obtained, to calculate the correlation coefficients of the factors for recall; to construct a linear regression model of the dependence of the deviations of the geometric dimensions of the printed conductors on the parameters of solutions for etching and exposure conditions. **Results**: The constructed regression models will become the basis for creating a software database that optimizes the initial images of the topology of printed conductors in the automated production of printed circuit boards. This will simplify the process of developing the topology of printed circuit boards, taking into account the real influence of the parameters of the technological operations of etching and exposure on the thickness of the tracks of the conductors of the printed circuit boards, which will reduce the proportion of rejects in the manufacture of single- and double-sided printed circuit boards. **Conclusions**: an LCD exposure technology and a method for studying the effects of exposure factors on the quality of printed circuit board topology are proposed, which provide sufficient empirical data to create regression models for calculating the influence of technological factors on the final dimensions of conductive paths in the production of printed circuit boards. Further development of the proposed technology will make it possible to manufacture rigid and flexible printed circuit boards completely, with conductive paths, a dielectric base, electronic elements that can be used in various devices.

Keywords: printed circuit boards; exposure; polymer photomasks; etching solution; LCD printing; regression analysis; topology; conductor image adaptation.

Introduction

Modern development of technologies in the field of instrument making is aimed primarily at miniaturization of devices and integration in one device of a large number of modules, which in turn leads to the need to miniaturize both products as a whole and their individual components, components and printed modules [1]. Miniaturization of the device involves both reducing the size of electronic elements and the dimensions of printed circuit boards (PCBs) [2]. The process of manufacturing boards using photolithography technology is time consuming and requires additional costs of materials and equipment to create stencils, the use of which in turn does not allow you to quickly adjust production to create new products. Modern automated production is characterized by the lack of such flexibility, which is their significant disadvantage. One of the ways to solve these problems can be the development of methods for adaptation and optimization of technological parameters of exposure of the topology of the PCB, using additive 3D printing technology, in the manufacture of single-sided and double-sided PCB, made on the basis of foil fiberglass and getinax blanks without the use of photoresist films. Thus, this approach can provide not only a solution to the problem, but also provide the necessary parameters of the product, such as:

- preservation of geometric dimensions of the PCB topology;
- accuracy of positioning of conductors;
- ensuring the electrical reliability of PCBs;
- preservation of mechanical stability of conductors;
- avoidance of defects in the PCB topology.

Problem statement and research purpose

The main task of the study is to develop a technology for creating a conductive topology of printed circuit boards using SLA and DLP 3D printing technologies. To solve this problem, it is necessary to perform the following:

- to assess the capabilities of traditional technologies for the production of printed circuit boards;
- to analyze modern methods of 3D printing with photopolymer resins - this will serve as a justification for the new method proposed in this article;
- to develop on the basis of the analysis of 3D printing technology and the principle of operation of the device for LCD exposure;
- to conduct a series of experiments and identify the dependence of the accuracy of the geometric dimensions of the PCB topology on the technological parameters of exposure;
- to compare the quality of PCB conductors made with 3D masks and conductors made with a film photoresistor.

The end result is to obtain empirical data on the basis of which a correlation-regression model of the influence of technological parameters of printing on the preservation of the initial geometric dimensions of the topology of printed conductors is built.

Research and analysis of the obtained results

At the initial stage of the photolithography process, the treated surface is covered with a photoresist, which is applied with an aerosol, or by gluing a photosensitive polymer film. Then through the photomask, with the set

topology of the board, the photoresist is illuminated. Next, the exposed areas are removed in the developer. The obtained pattern on the photoresist is used for further technological stages: etching, electrodeposition, vacuum

spraying or others. After one of these processes, the remnants of the photoresist in the development are also removed (fig. 1).

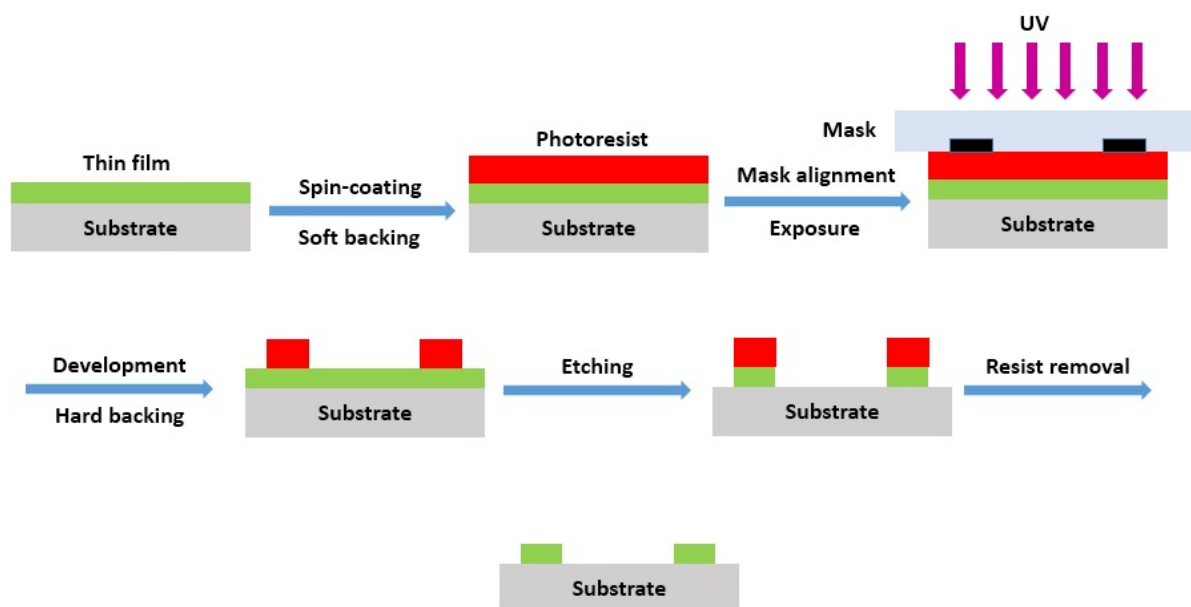


Fig. 1. Simplified photolithography scheme for printed circuit boards

Exposure can be performed both with the use of a photo template and without it (non-mask lithography). In the latter case, the image on the photoresist is formed directly by the movement of the laser spot, or by an electron beam or a group of them focused on the surface of the photoresist. When using photo templates, projection exposure methods are more often used, when the image from the photo template is transferred to the photoresist, using a system of optical lenses.

Thus, the process of photolithography consists of successive stages: the application of a photoresist on the product and the subsequent exposure of the photomask on the treated surface, followed by etching. Each stage requires highly specialized equipment and consumables. Expensive, difficult to maintain, dimensional machines (such as installations for direct exposure) cannot be used in the production process of small businesses.

In mass production, each stage takes a significant amount of time, for example, when applying a photoresist by aerosol requires time to dry the products. Also, as a result of an operator error or technical failure of the equipment, defects in the product may occur at each stage. To minimize these negative factors, a higher level of

automation is required, which ensures control and synchronous operation of all main and auxiliary equipment.

In addition, at the stage of etching, geometric deviations of the obtained image from the original PCB topology are possible, for example, etching of conductor tracks.

The advent of additive manufacturing technologies (3D printing) allows a new look at the solution to this problem. Photopolymer printing technologies can be used to mask certain areas of the foil dielectric and subsequent etching of the conductor system. This equipment allows quick readjustment for the production of new products, while ensuring high manufacturing accuracy [2].

One of the most popular printing technologies for precision prototyping is printing technology with photopolymer resins and powder materials, which in comparison with other additive manufacturing technologies allow to produce parts for various purposes with high accuracy and detail.

There are several technologies for illuminating the polymer in photopolymer printers. From them it is possible to define the three basics (fig. 2) [3]:

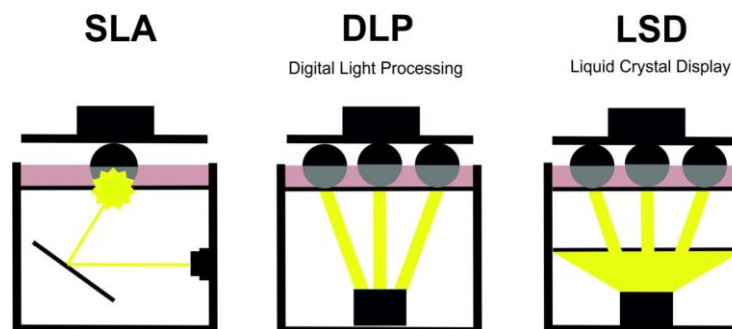


Fig. 2. Types of photopolymer 3D printing technologies

1) SLA technology (Selective Laser Sintering). The method of additive production (3D-printing) called "stereolithography" is the sequential polymerization of thin layers of liquid photosensitive polymer by a low-power ultraviolet laser beam. In the working capacity of the 3D printer there is a platform immersed in liquid resin. Initially, the platform is near the surface of the polymer,

covered with a thin layer of 20 microns to 150 microns, on which the laser begins to form a layer of detail [4-5].

The model is cut into thin layers equal to the resolution of the printer along the vertical axis. After creating one layer, the printer immerses the platform in the thickness of the new layer of the model (from 10 μm to 150 μm) and creates the next layer (fig. 3).

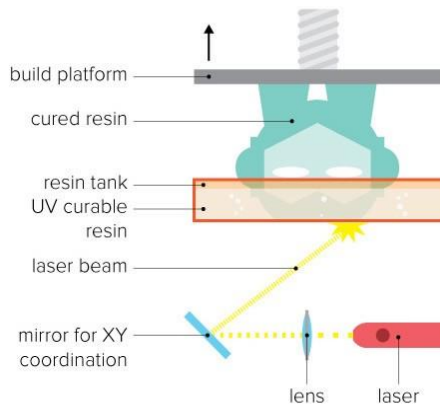


Fig. 3. Scheme of SLA printer operation

Under the influence of a laser, the power of which is relatively small, which makes the printer cheaper than devices working with powder materials SLS, SLM, etc., the polymer hardens, forming the walls of the future product. Thus, the model is created entirely layer by layer. If it has hinged elements, then supports are built for them from the same polymer, which are then mechanically removed. Support in the model is provided and created in CAD-programs at the design stage of the model.

The advantage of this technology: the ability to build large models; high accuracy; the ability to build models of any shape and design; low percentage of material consumption; low operating noise [3].

Disadvantages: the use of photopolymer, which is more expensive than other materials; high cost of the printer; the need to ensure a high class of accuracy when building a printer (ensuring the correct angle of the

mirror); the need for precise mechanics (accuracy of the location of the bath at the level of one layer from the surface to the platform); the need for frequent printer maintenance;

2) DLP technology (Digital Light Processing). The principle of operation of 3D printers using 3D printing technology DLP is similar to the operation of the projector [5-6]. The polymer turns into a solid form under the action of light of the visible spectrum and the whole layer is illuminated at once. The light flux is modulated by micromechanical mirrors, each of which is controlled separately. Depending on the position of the mirror, the light either passes to a given point of the layer or not. Thus, the machine has a fixed logical extension - the number of points in the XY coordinates. Their physical size depends on the distance from the radiation source in the system of micro mirrors is the model (fig. 4).

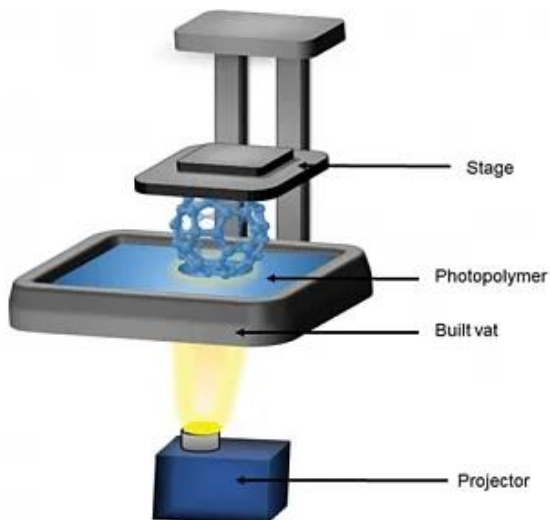


Fig. 4. Scheme of DLP printer operation

The disadvantage of this technology is the dependence on the working area of the projector and the accuracy of the XY axis. Such projectors have a high price, which is also a disadvantage. Use only with a personal computer or microcomputer that controls the projector and control board. It can be large with a small work area to provide the required distance from the projector lens to the bath.

The advantages are: low cost compared to SLA technology; the need for less accurate manufacturing of components; high print speed due to high projector lamp power [7].

3) LCD technology. The printer with illumination of a photopolymer by a light-emitting diode UV matrix with use of the LCD display as a mask (fig. 5).

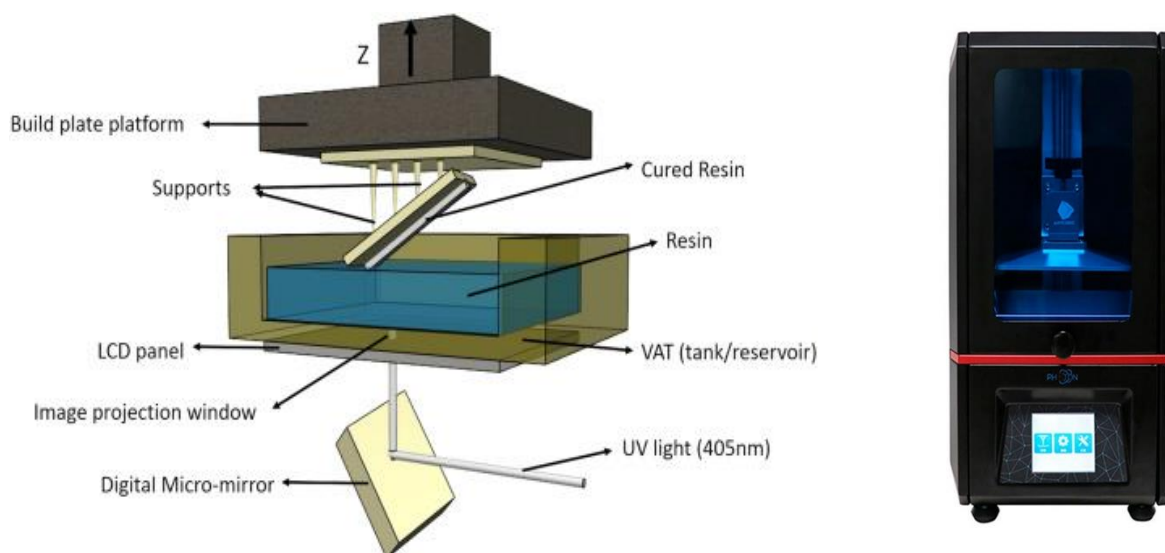


Fig. 5. Scheme of LCD printer operation

The photopolymer is illuminated by an LED matrix, the image is formed due to the LCD display, which displays the cross section of the molded part frame by frame. If the differences between classic SLA technology and DLP and LCD are obvious, then DLP and LCD lighting technology are often confused, which is incorrect, because each of these technologies has its own characteristics that affect the capabilities of the printer, print quality.

The disadvantage of this technology is the dependence of the work area on the screen size, accuracy depends on the screen and its size, today there are no more than 10 inch screens on the market, and with such a screen even with 8K resolution less than 50 microns' pixel size is impossible. Also a relative disadvantage is finding the screen directly under the bath. The bath consists of an aluminum body and a film with a thickness of 50-150

microns, which with minor mechanical damage can pass photopolymer resin, which will get on the screen and electronics and lead to possible fire or damage to the printer [8].

The advantages of this technology are low cost, ease of maintenance and extensive upgrade options. Compared to DLP technology, the advantage is the absence of image distortion on the work area.

As a result of comparison it is possible to draw a conclusion that these three kinds of technology today have a wide field of use, each of which occupies the niche in a life and production. But LCD technology today has the greatest development, thanks to which it has great scientific interest in research and improvement of technology and its use. In the table 1 SLA, DLP and LCD technologies are compared [7-8].

Table 1. Comparison of SLA, DLP and LCD technologies [9-10]

Technology	Features
1. XY print area size	
SLA	Not limited, the higher the print area, the lower the speed (the beam must have time to "run around" a large area)
DLP	Unlimited, the higher the print area, the lower the print speed and the lower the printer resolution
LCD	The print area is tightly tied to the size of the LCD display
2. Print speed	
SLA	The slowest of the three technologies. This is due to the consistent illumination and low power of the laser
DLP	The fastest is due to the high power of the projector
LCD	"Average" print speed. Print speed is related to the power of UV matrices. The power of the matrix can not be increased indefinitely, because powerful matrices require powerful cooling and begin to "punch" the "stencil" from the LCD display

The end **Table 1.**

3. Parasitic illumination along the Z axis	
SLA	Minimal
DLP	Maximum. High illumination is associated with both the high power of the projector lamps and the greater share of long-wave actinic radiation in the spectrum
LCD	Average
4. Parasitic illumination along the XY axis	
SLA	Minimal
DLP	Properly focused, it is minimal, but higher than SLA
LCD	Maximum. Strong parasitic illumination is associated with the illumination of neighboring pixels due to the imperfection of the focus of the UV matrix system (more precisely, with its complete absence of light on the mask falls at different angles). This shortcoming is likely to be corrected in the future.
5. Factors affecting the resolution (in addition to the properties of the polymer and the thickness of the layer)	
SLA	1) Laser spot diameter and spot positioning accuracy. Typical values from 100 microns to 200 microns (for a laser spot), from 40 microns to 20 microns (positioning accuracy) 2) on 3D printers with SLA technology you can print, for example, objects with very thin - vertical walls with a thickness of only 100 microns, a horizontal layer - about 30-50 microns
DLP / LCD	1) Pixel size and focus accuracy. Typical resolution - 1920x1080, respectively, the pixel size depends on the print area on XY 2) Lower resolution compared to SLA printers, because the image in them is formed through a pixel matrix (from 33 μm to 47 μm), which does not allow to achieve smoother contours of the part compared to SLA technology
6. Price	
SLA	In the range of \$2500-5300, "professional" - from \$5300 and above
DLP	\$ 4,000 and up
LCD	\$ 400-700

The use of these 3D printing technologies will create a camouflage layer on the foil dielectric for further etching. Photopolymer resins, which are chemically inert to most herbalists, are used as masking material. Thus, due to the technologies of photopolymer 3D printing, it is possible to create a fully finished mask of the required thickness and configuration.

The use of 3D-printing will allow to produce PCBs that meet the requirements of accuracy classes DSTU 53429-2009 (table 2) from the first to the seventh, on the indicator "Width of conductors", and from the first to the fifth class on the indicator "Distance between conductors",

examples are microcontroller boards based on Arduino and Raspberry. Such limitations are due to the very physics of the processes used in 3D printing technology.

For the practical implementation of the considered technologies it is necessary to develop software that allows to control the exposure process, to adapt the topological pattern of the PCB taking into account the technological parameters and possible manufacturing defects.

Let's consider the process of photoexposure using DLP technology and the proposed design of the "mask" printer (fig. 6).

Table 2. Accuracy class of printed circuit boards according to DSTU 53429-2009

Name of the parameter	The smallest nominal size values for the accuracy class						
	1	2	3	4	5	6	7
Conductor width	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10	0,075	0,050
The distance between the conductors	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10	0,075	0,050
Warranty belt contact pad	0,30	0,20	0,10	0,05	0,025	0,020	0,015
The presence of a metal coating	The maximum dimensional deviation produces the figures for the accuracy class						
	1	2	3	4	5	6	7
Without coverage	$\pm 0,15$	$\pm 0,10$	$\pm 0,05$	$\pm 0,03$	$\pm 0,03$	$\pm 0,02$	$\pm 0,015$
Coated	+0,25-0,15	+0,15-0,10	$\pm 0,10$	$\pm 0,05$	+0,03	$\pm 0,02$	$\pm 0,015$
Type of printed circuit board	Position tolerance of the location of the printed conductor for the accuracy class						
	1	2	3	4	5	6	7
UPCB, BPCB, MPCB (outer layer)	0,20	0,10	0,05	0,03	0,02	0,01	0,005
MPCB (inner layer)	0,30	0,15	0,10	0,08	0,05	0,02	0,01

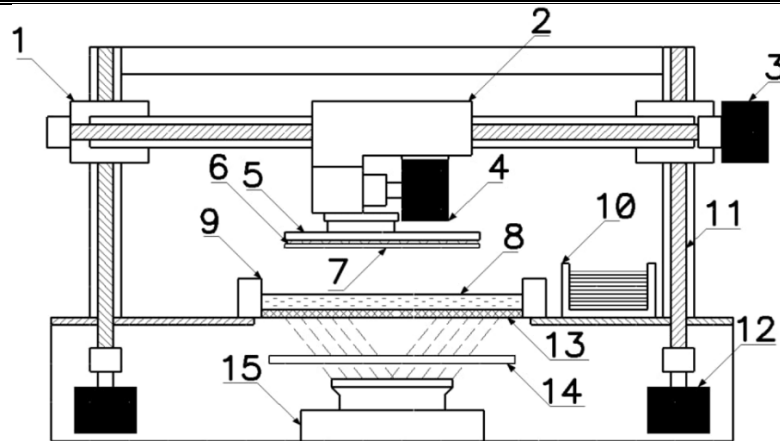


Fig. 6. The design scheme of the "mask" printer based on DLP technology: 1 - vertical axis carriage; 2 - carriage of the horizontal axis; 3 - stepper motor of the horizontal axis; 4 - the engine of the rotary mechanism; 5 - the basis of the mechanism for capturing boards; 6 - gripping mechanism; 7 - blank; 8 - photopolymer resin; 9 - bath for photopolymer; 10 - box for polymerized blanks; 11 - ball-screw transmission (KGP); 12 - stepper motors of vertical axes; 13 - transparent film of the bottom of the bath; 14 - optical system of mirrors; 15 - DLP projector.

The horizontal carriage (2), on which the gripping mechanism (6) is mounted, captures the foil getinax or fiberglass blank (7), moves along the horizontal axis by means of KGP (11) and stepper motor (3).

Reaching the desired horizontal position and descending by means of KGP (11) and stepper motors of the vertical axis (12), the carriage transfers the work piece (7) to the bath (9) with photopolymer resin (8), lowers the work piece to a depth of 20 μm from the transparent bottom baths (13). Then the DLP projector with UV radiation (15) is turned on, through the optical system of mirrors (14) the image is fed to the transparent bottom of the bath (13). As a result of resin polymerization, under the action of radiation, the illuminated areas of the topology harden and stick to the work piece, thus creating a stencil of the future board. The carriage with the polymerized work piece rises up. The rotary mechanism

(4) tilts the work piece several times smoothly, at a small angle, so that the excess uncured resin flows into the bath. The finished work piece is moved to a container (10) with isopropyl alcohol for purification from liquid polymer residues. At the next technological stage, the blanks of the boards are etched, after which the photopolymer masks are removed from the blanks.

The use of these 3D printing technologies will create a masking layer on the foil dielectric for further etching. Photopolymer resins, which are chemically inert to most herbalists, are used as masking material. Thus, due to photopolymer 3D printing technologies, it is possible to create a fully finished mask of the required thickness and configuration.

When using photopolymer 3D-printing technologies, it is possible to simultaneously perform the stage of mask application and exposure (fig. 7).

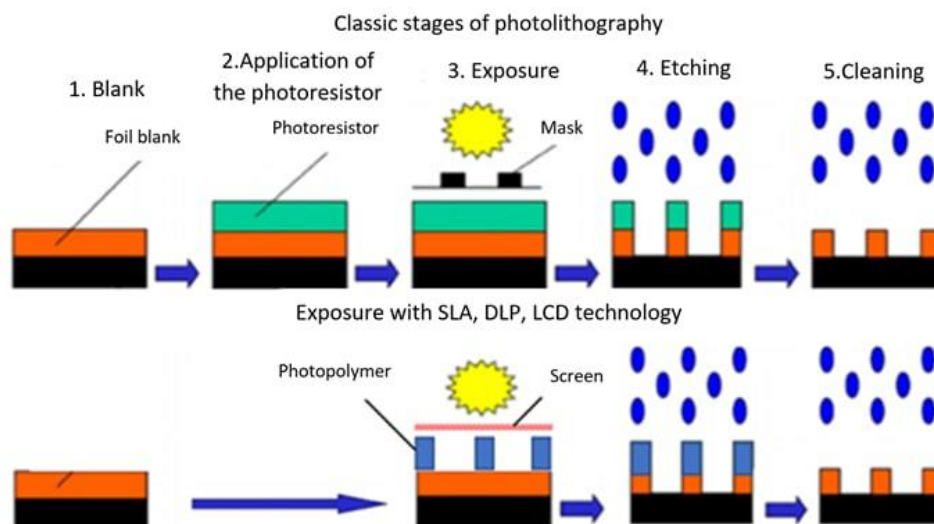


Fig. 7. Stages of 3D exposure of masks

This approach can be implemented using SLA or LCD printing technologies and has the advantages of:

- the installation directly exposes the set topology on the work piece, without prior application of photoresist films or aerosols;

- there is no need for two separate installations for drawing a photoresist and exposure - everything is carried out simultaneously on one installation, it allows to unload production areas;

- since the exposure time of the photopolymer is from 6 to 14 seconds, which is less than the exposure time of the photoresistive films, thus increasing the productivity.

Based on this, an experiment was conducted to manufacture a PCB using LCD technology. The created 3D topology of conductors (PCB 40 × 40 mm) was transferred to foil fiberglass (brand SF DSTU 10316-78) and etched in a solution of ferric chloride (FeCl₃) (fig. 8).

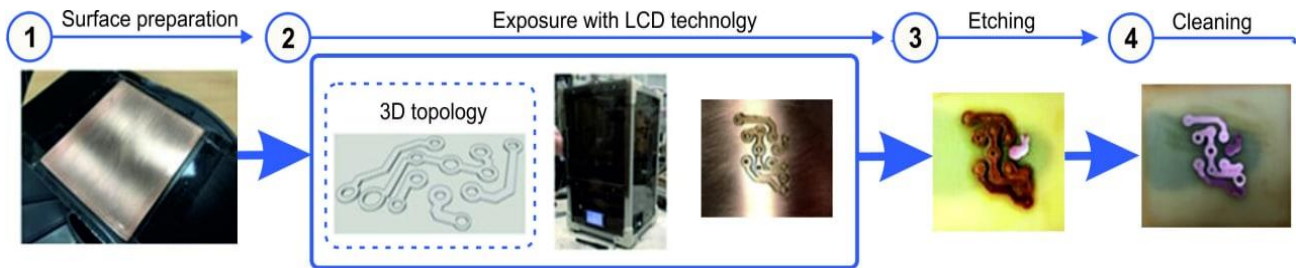


Fig. 8. Manufacturing of PCB topology using LCD printer

Plexiwire Resin Basic Orange Transparent photopolymer resin was used to make the sample, which was chosen due to its high mechanical and technological parameters: short exposure time; minimum layer thickness; no harmful effects on staff; slight shrinkage during polymerization; high resistance to chemical reagents.

In the first experiment, the adhesion of the photopolymer resin to the foil blank was tested. The result shows the resistance of the photopolymer resin to the effects of ferric chloride and high-quality adhesion to the surface, but there is a deviation of ± 0.06 mm at a base conductor size of 2 mm.

This is due to the long duration of illumination of the photopolymer in the first experiment, namely 17 seconds. The obtained result allowed to make the following assumptions:

1) there is a linear dependence of the geometric size of the conductors on the duration of illumination. The longer is the illumination time, the greater is the deviation of the size to the larger side, respectively, at a shorter illumination time - the deviation is less [12];

2) at low light intensity, the photopolymer resin may not be sufficiently polymerized. Thus, insufficient ultraviolet radiation can lead to poor adhesion to the work piece, which can lead to etching of the conductors and reduce the size of the conductors [12-13];

3) the greater is the height of the base layer of the photopolymer mask, the greater is the gap between the screen and the work piece, which can lead to greater diffraction of light flux, in accordance with the greater parasitic illumination of the conductors [12].

To verify these assumptions, 40 measurements of the deviation of the obtained dimensions from the original geometric were performed and a linear regression model was built taking into account the following parameters:

- duration of illumination of resin - from 7 to 16 seconds;

- radiation intensity: maximum - 2800 lm and minimum - 1600 lm;

- the thickness of the base layer is 20 μm and 50 μm .

The results of measuring the deviations of the obtained dimensions from the original geometric dimensions, to build a model of linear regression, are shown in the table 3.

Table 3. Deviation of geometric dimensions

Layer thickness, 20 μm										
Intensity of a light stream, 1600 lm										
Polymerization time, s	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Deviation, mm	0,008	0,010	0,011	0,012	0,014	0,017	0,026	0,032	0,046	0,052
Layer thickness, 20 μm										
Intensity of a light stream, 2800 lm										
Polymerization time, s	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Deviation, mm	0,009	0,01	0,012	0,013	0,015	0,021	0,028	0,035	0,048	0,057
Layer thickness, 50 μm										
Intensity of a light stream, 1600 lm										
Polymerization time, s	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Deviation, mm	0,009	0,011	0,012	0,012	0,016	0,022	0,029	0,036	0,052	0,061
Layer thickness, 50 μm										
Intensity of a light stream, 2800 lm										
Polymerization time, s	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Deviation, mm	0,01	0,013	0,015	0,018	0,024	0,03	0,037	0,055	0,063	0,067

We enter the obtained data to perform basic linear regression analysis of exposure parameters in the program *IBM SPSS Statistics*. Fig. 9 graphically shows the

dependence of the deviation of the basic dimensions of the PCB conductors from the exposure time [14-15].

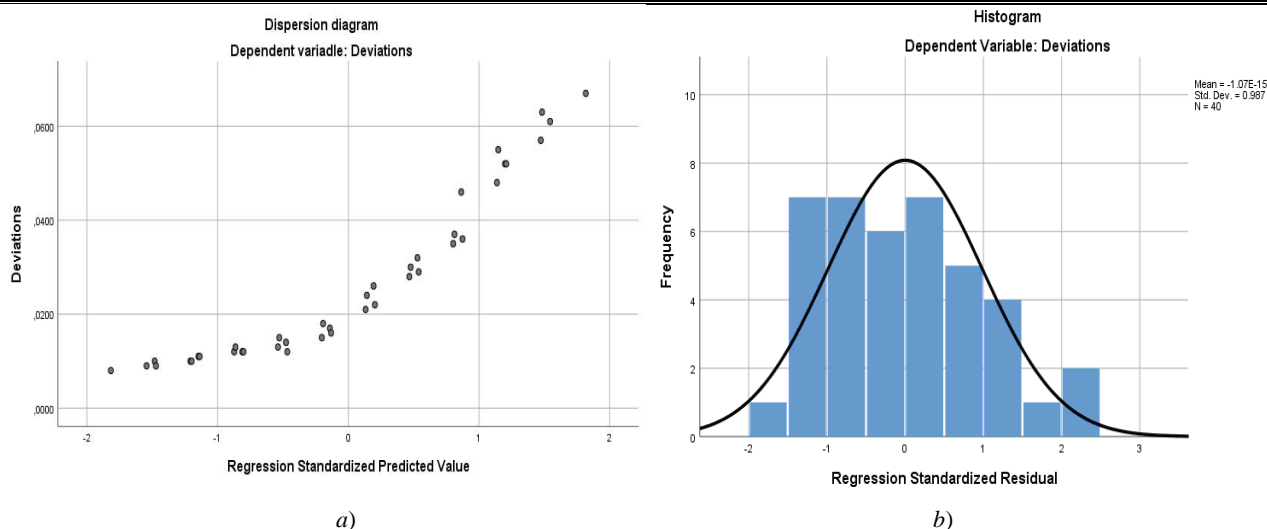


Fig. 9. The results of deviations of the geometric dimensions of the PCB with increasing values of the parameters: a) a graph of the deviations from a series of experiments; b) diagram of the normal distribution

Using the calculations "Summary for the model", we obtained the value of the coefficient of determination "R" - 0.936. This indicator corresponds to the values calculated by the model (linear regression) and the results obtained during experimental studies.

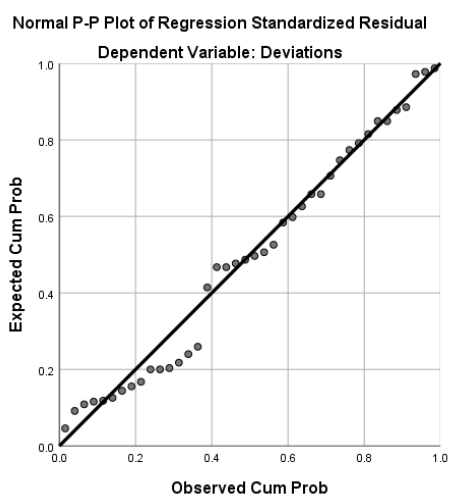
For greater accuracy of the test, the obtained result is listed on the model with non-standardized predicted values (fig. 10, a) and the correlation of deviation parameters from standardized values (calculated deviations) is calculated (fig. 10, b and 10, c).

Model summary

Model	R	R-square	Adjusted R-square	Standard error of estimation	Change R square	Statistics change			Significance change F
						Change F	st.1	st.2	
1	,936 ^a	,877	,867	,0065548	,877	85,585	3	36	,000

a. Predictor: (constant), Intensity, Thickness, Time

a)



b)

Correlation

		Deviations	Unstandardized Predicted Value
Deviations	Pearson correlation	1	,936**
	Significance (two-way)		,000
	N	40	40
Unstandardized Predicted Value	Pearson correlation	,936**	1
	Significance (two-way)	,000	
	N	40	40

** . Correlation is significant at the level 0,01 (two-way).

c)

Fig. 10. The results of calculations of coefficients: a) consolidated models; b) regression line; c) correlation of values

The value of "R" in the recalculation is equal to 0.936, which proves that there is a correlation between the obtained and predicted values.

The coefficient of multiple determination "R²" is equal to 0.877. This means that the parameters included in the system, 87.7% affect the result. The adjusted

coefficient "R²" is equal to 0.867 or 86.7%. The standard estimation error is 0.0065548.

According to the table ANOVA (fig. 11) we test the hypothesis of equality "R²" = 0. Since the level of "Significance" < 0.05, it confirms the accuracy of previous results.

Model		Sum of squares	st.	Medium square	F	Significance
1	Regression	,011	3	,004	85,585	,000 ^b
	The remainder	,002	36	,000		
	Total	,013	39			

a. Dependent variable: Deviations

b. Predictors: (constant), Intensity, Thickness, Time

Fig. 11. Results of significance calculations

To determine the weight of each variable, we use the "Beta-coefficient", which shows how much the value of the parameter changes from an increase of one of the

factors. To search for "Beta-coefficients", the calculation will be performed using standardized values of "Z-points".

This is necessary to make sure that the standardized values and the non-standardized one's match (fig. 12).

Model		Non-standardized coefficients		Standardized coefficients Beta	t	Significance	Correlations		
		B	Standard error				Zero order	Partly	Component
1	(Constant)	2,466E-16	,058		,000	1,000			
	Zscore(Time)	,913	,058	,913	15,621	,000	,913	,934	,913
	Zscore(Thickness)	,164	,058	,164	2,798	,008	,164	,423	,164
	Zscore(Intensity)	,130	,058	,130	2,219	,033	,130	,347	,130

a. Dependent variable: Zscore(Deviations)

Fig. 12. Results of calculations of "Beta-coefficients"

Based on the level of significance of the coefficients, it is possible to compare whether the "Beta-coefficient" of this factor differs from zero. In this case, all values of "Significance" are less than 0.05, which proves that all the factors that are included in the model are true.

The results of the Pearson correlation of response factors are shown in fig. 13.

		Deviations	Time	Thickness	Intensity
Deviations	Correlations Pearson	1	,913**	,164	,130
	Meaning (doudle-sided)		,000	,313	,425
	N	40	40	40	40
Time	Correlations Pearson	,913**	1	,000	,000
	Meaning (doudle-sided)	,000		1,000	1,000
	N	40	40	40	40
Thickness	Correlations Pearson	,164	,000	1	,000
	Meaning (doudle-sided)	,313	1,000		1,000
	N	40	40	40	40
Intensity	Correlations Pearson	,130	,000	,000	1
	Meaning (doudle-sided)	,425	1,000	1,000	
	N	40	40	40	40

**. Correlation is significant at the level 0,01 (doudle-sided).

Fig. 13. The results of Pearson's correlation calculations

Conclusions

Experiments show that when using the technology of photopolymer 3D printing, it is possible to transfer the image of the topology on the PCB, combining the processes of photoresist application and exposure of the topology simultaneously in one installation. In the course of experiments and construction of a linear regression

model, in contrast to the results of classical photoresist films, good adhesion of the polymerized photopolymer to the surface of the PCB blank was observed, as a result of chemical etching avoided etching of track ends (fig. 14).

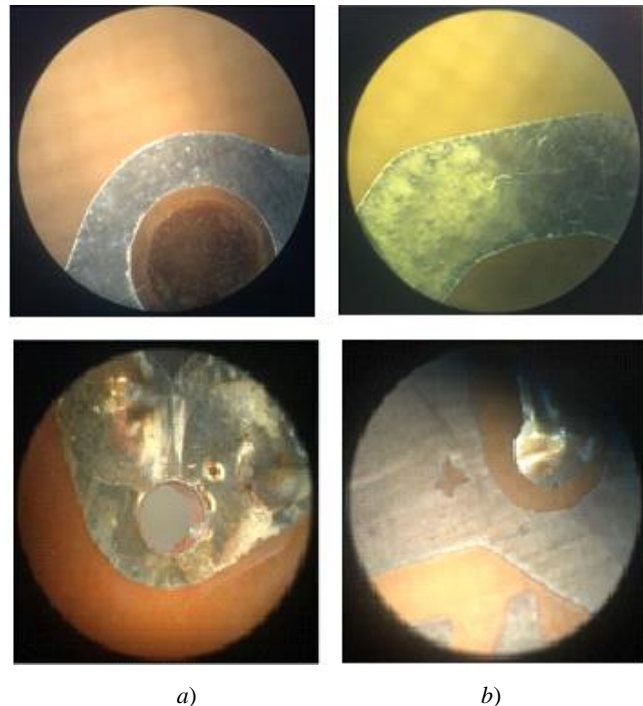


Fig. 14. Comparison of the results of the ends of the tracks after etching PCB a) the ends of the tracks of the conductors using a photopolymer mask; b) the ends of the conductor tracks using photoresist film

Based on the obtained values of "Beta-coefficients" it is possible to make conclusions:

- an increase of one unit of time affects the increase in the value of the deviation of the dimensions by 0.931;

- an increase of one unit of radiation intensity affects the increase in the value of the deviation of the dimensions by 0.130;

- an increase of 30 units of thickness affects the increase in the value of the deviation of the dimensions by 0.164;

This proves that the most important factor in 3D exposure is time. That is, the regression equation is as follows:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 = 0,11 + 0,931x_1 + 0,130x_2 + 0,164x_3; \quad (1)$$

where Y is a factor of deviation of geometric dimensions of PCB topology; b_0, b_1, b_2, b_3 – coefficients of linear regression of the influence of parameters on the factor; x_1, x_2, x_3 – parameters of influence on the factor.

However, in further research, it will be possible to include additional factors in the model and build a more accurate regression model that can be used in the development of software for 3D-exsonation of PCBs.

Graphs of the dependence of the influence of technological parameters on the geometric dimensions of the conductor topology are shown in fig. 15.

Thus, the use of additive 3D printing technologies allows:

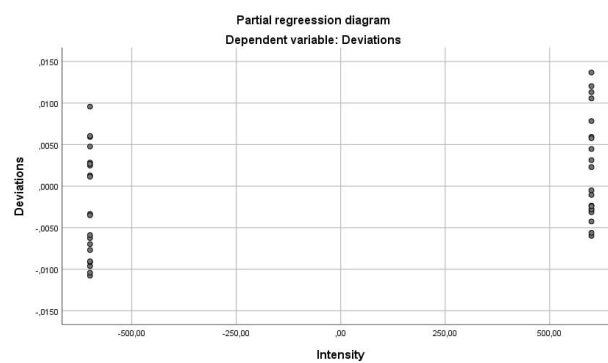
- significantly simplify and reduce the cost of manufacturing PCBs, eliminating from the production process the stage of applying a photoresist to the work piece;

- use production areas more efficiently;

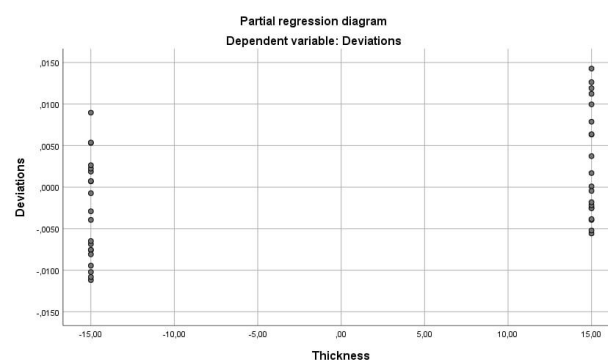
- adapt the original PCB topology, taking into account the influence of technological factors (in the presence of appropriate software);

- to achieve high accuracy of manufacturing of conductors.

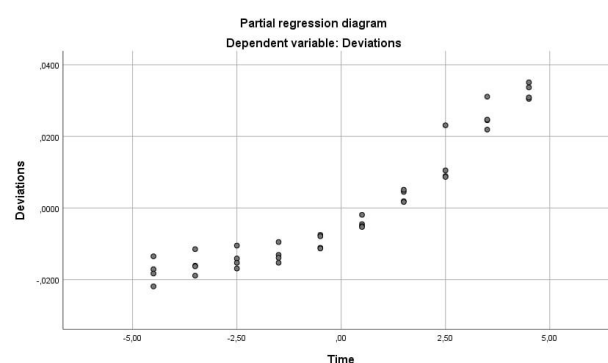
Further development of the proposed technology will allow to manufacture rigid and flexible PCBs completely, with conductive tracks, dielectric basis, electronic elements that can be used in various devices.



a)



b)



c)

Fig. 15. Deviation of the sizes of PCB topology at increase of values of factors: a) deviation at the maximum and minimum values of radiation intensity; b) deviations at different values of the layer thickness; c) deviation from the increase in exposure time

References

1. Nevliudov, I., Razumov-Fryziuk, Ye. A., Nevliudova, V., Demska, N. (2016), "Influence mechanical action on flexible printed circuit board", *Problems of Friction & Wear*, Vol. 1(70), P. 143–149. DOI: 10.18372/0370-2197.1(70).10402
2. Nevliudov, I. Sh., Tymchuk, I. T., Protsenko, M. A., Demska, N. P. (2018), "The advanced design and technological solutions of ultralight detector modules for physical experiments", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, Vol. 3 (5), P. 67–78. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2018.5.067>
3. Vaezi, M., Seitz, H., Yang, S. (2013), "A review on 3D micro-additive manufacturing technologies", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 67 (5-8), P. 1721–1754. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4605-2>
4. Pan, Y., Chen, Y. (2016), "Meniscus process optimization for smooth surface fabrication in Stereolithography", *Additive Manufacturing*, Vol. 12, Part B, P. 321–333. DOI:10.1016/j.addma.2016.05.004
5. Kumar, S., Bhushan, P., Pandey, M., Bhattacharya, S. (2019), "Additive manufacturing as an emerging technology for fabrication of microelectromechanical systems (MEMS)", *Journal of Micromanufacturing*, Vol. 2 (2), P. 175–197. DOI: <https://doi.org/10.1177/2516598419843688>

6. Mohammed, J. S. (2016), "Applications of 3D printing technologies in oceanography", *Methods in Oceanography*, Vol. 17, P. 97–117. DOI: 10.1016/j.mio.2016.08.001
7. "SL/SLA (stereolithography)" ["SL/SLA (stereolytohrafiya)"], available at : <https://www.jetcom-3d.ru/technology/stereolithography> (last accessed 03.11.2020).
8. Manapat, J. Z., Chen, Q., Ye, P., & Advincula, R. C. (2017), "3D printing of polymer nanocomposites via stereolithography", *Macromolecular Materials and Engineering*, Vol. 302 (9), P. 1600553. DOI: <https://doi.org/10.1002/mame.201600553>
9. "DLP (Digital Light Processing)" ["DLP (Digital Light Processing)"], available at : <https://www.jetcom-3d.ru/technology/digital-light-processing> (last accessed 03.11.2020).
10. Jacobsen, A., Jorgensen, T., Tafford, Kirkhorn, E. (2015), "Concepts for 3D print productivity systems with advanced DLP photoheads", *In Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications VII, International Society for Optics and Photonics*, Vol. 9376, P. 937605. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2084962>
11. "Modern photopolymer printers 3D printers: laser, DLP, LCD" ["Современные фотополмерные прынтеры 3D-прынтеры: лазерные, DLP, LCD"] available at : <https://3dtoday.ru/blogs/pl32/modern-photopolymer-3d-printersprinters-laser-dlp-lcd> (last accessed 05.11.2020).
12. Shen, J. Y. H., & Tan, Z. X. (1999), "Curing characteristics of acrylic photopolymer used in stereolithography process", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 5 (1), P. 27–34. DOI: <https://doi.org/10.1108/13552549910251855>
13. Andrzejewska, E. (2001), "Photopolymerization kinetics of multifunctional monomers", *Progress in Polymer Science*, Vol. 26, No. 4, P. 605–665. DOI: 10.1016/S0079-6700(01)00004-1
14. Huang, Y.-M., Kuriyama, S., Jiang, C.-P. (2004), "Fundamental study and theoretical analysis in a constrained-surface stereolithography system", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 24, No. 5-6, P. 361–369. DOI: 10.1007/s00170-003-1627-9
15. Dubnov, P. Yu. (2004), *Processing statistical information using SPSS [Обработка статистической информации с помощью SPSS]*, Moscow : NT Press, 221 p.

Received 19.02.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Невлюдов Ігор Шакирович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харків, Україна; email: igor.nevliudov@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9837-2309>.

Невлюдов Игорь Шакирович – доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, заведующий кафедрой компьютерно-интегрированных технологий, автоматизации и мехатроники, Харьков, Украина.

Nevliudov Igor – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Head of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics, Kharkiv, Ukraine.

Разумов-Фризюк Евгений Атаольевич – кандидат технічних наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харків, Україна; email: ievgenii.razumov-fryziuk@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7426-3805>.

Разумов-Фризюк Евгений Анатольевич – кандидат технических наук, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры компьютерно-интегрированных технологий, автоматизации и мехатроники, Харьков, Украина.

Razumov-Fryzyuk Evgeny – PhD (Engineering Sciences), Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics, Kharkiv, Ukraine.

Нікітін Дмитро Олександрович – Харківський національний університет радіоелектроніки, асистент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харків, Україна; email: dmytro.nikitin@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5591-4438>.

Никитин Дмитрий Александрович – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, ассистент кафедры компьютерно-интегрированных технологий, автоматизации и мехатроники, Харьков, Украина.

Nikitin Dmytro – Kharkiv National University of Radio Electronics, Assistant of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics, Kharkiv, Ukraine.

Близнюк Данило Сергійович – Харківський національний університет радіоелектроніки, старший лаборант кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харків, Україна; email: danylo.blyzniuk@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3041-1885>.

Близнюк Данила Сергейович – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, старший лаборант кафедры компьютерно-интегрированных технологий, автоматизации и мехатроники, Харьков, Украина.

Bliznyuk Danila – Kharkiv National University of Radio Electronics, Senior Laboratory Assistant of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics, Kharkiv, Ukraine.

Стрілець Роман Євгенійович – Харківський національний університет радіоелектроніки, лаборант кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харків, Україна; email: roman.strilets@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5123-8703>.

Стрелец Роман Евгеньевич – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, лаборант кафедры компьютерно-интегрированных технологий, автоматизации и мехатроники, Харьков, Украина.

Strelets Roman – Kharkiv National University of Radio Electronics, Laboratory Assistant of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics, Kharkiv, Ukraine.

ТЕХНОЛОГІЯ СТВОРЕННЯ ТОПОЛОГІЇ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ ЗА ДОПОМОГОЮ ПОЛІМЕРНИХ 3D МАСОК

Предметом дослідження є вплив факторів експонування двовимірних зображень на топологію провідників при виготовленні друкованих плат методом тривимірних полімерних фотомасок. **Мета** роботи – забезпечення точності та збереження геометричних розмірів провідників друкованих плат при LCD експонуванні масок на заготовку. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **завдання**: проаналізувати технологію фотолітографії та види полімерного 3D друку; розробити технологічний процес експонування фотополімерних масок на заготовку друкованої плати, використовуючи технологію 3D друку; провести експериментальні дослідження для визначення оптимальних параметрів експонування; на основі отриманих емпіричних результатів розрахувати коефіцієнти кореляції факторів на відгук; побудувати лінійну регресійну модель залежності відхилень геометричних розмірів друкованих провідників від параметрів розчинів для травлення і умов експонування. **Результати**: побудовані регресійні моделі дають можливість спрогнозувати вплив технологічних параметрів експонування на точнісні показники геометричних розмірів топології провідників друкованих плат при 3D масочному виготовленні при LCD експонуванні, оптимізуючого вихідні зображення топології друкованих провідників при автоматизованому виробництві друкованих плат. Це спростить процес розробки топології друкованих плат з урахуванням реального впливу параметрів технологічних операцій травлення і експонування на товщину доріжок провідників друкованих плат, що зменшить частку браку при виготовленні односторонніх та двосторонніх друкованих плат. **Висновки**: запропонована технологія LCD експонування та метод дослідження впливів факторів експонування на якість топології друкованих плат, які дають достатні емпіричні данні для створення регресійних моделей розрахунку впливу технологічних факторів на кінцеві розміри провідникових доріжок при виробництві друкованих плат. Подальший розвиток запропонованої технології дозволить виготовляти жорсткі та гнучкі ДП повністю, зі струмопровідними доріжками, діелектричною основою, радіоелектронними елементами, які можуть застосовуватися в різних пристроях.

Ключові слова: друковані плати; експонування; полімерні фотомаски; розчини для травлення; LCD друк; регресійний аналіз; топологія; адаптація зображення провідників.

ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ТОПОЛОГИИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ С ПОМОЩЬЮ ПОЛИМЕРНЫХ 3D МАСОК

Предметом исследования является влияние факторов экспонирования двумерных изображений на топологию проводников при изготовлении печатных плат методом трехмерных полимерных фотомасок. **Цель** работы – обеспечение точности и сохранения геометрических размеров проводников печатных плат при LCD экспонировании масок на заготовку. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задания**: проанализировать технологию фотолитографии и виды полимерной 3D печати; разработать технологический процесс экспонирования фотополімерных масок на заготовку печатной платы, используя технологии 3D печати; провести экспериментальные исследования для определения оптимальных параметров экспонирования; на основе полученных эмпирических результатов рассчитать коэффициенты корреляции факторов на отзыв; построить линейную регрессионную модель зависимости отклонений геометрических размеров печатных проводников от параметров растворов для травления и условий экспонирования. **Результаты**: Построенные регрессионные модели станут основой для создания базы данных программного обеспечения, оптимизирующего исходные изображения топологии печатных проводников при автоматизированном производстве печатных плат. Это упростит процесс разработки топологии печатных плат с учетом реального влияния параметров технологических операций травления и экспонирования на толщину дорожек проводников печатных плат, что уменьшит долю брака при изготовлении одно- и двусторонних печатных плат. **Выводы**: предложена технология LCD экспонирования и метод исследования воздействий факторов экспонирования на качество топологии печатных плат, которые дают достаточные эмпирические данные для создания регрессионных моделей расчета влияния технологических факторов на конечные размеры проводящих дорожек при производстве печатных плат. Дальнейшее развитие предлагаемой технологии позволит изготавливать жесткие и гибкие печатные платы полностью, с токопроводящими дорожками, диэлектрической основой, радиоэлектронными элементами, которые могут применяться в различных устройствах.

Ключевые слова: печатные платы; экспонирование; полимерные фотомаски; травильный раствор; LCD печать; регрессионный анализ; топология; адаптация изображения проводников.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Невлюдов І. Ш., Разумов-Фризюк Е. А., Нікітін Д. О., Близнюк Д. С., Стрілець Р. Є. Технологія створення топології друкованих плат за допомогою полімерних 3D масок. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 1 (15). С. 120–131. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.120>

Nevludov, I., Razumov-Fryzyuk, E., Nikitin, D., Bliznyuk, D., Strelets, R. (2021), "Technology for creating the topology of printed circuit boards using polymer 3D masks", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (15), P. 120–131. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.120>

S. OSADCHY, N. DEMSKA, YU. OLEKSANDROV, V. NEVLIUDOVA

RESEARCH OF DIKW AND 5C ARCHITECTURAL MODELS FOR CREATION OF CYBER-PHYSICAL PRODUCTION SYSTEMS WITHIN THE CONCEPT OF INDUSTRY 4.0

The development of cyber-physical production systems is a complex scientific and technical task, therefore the developer needs to determine the requirements, tasks for the system being developed and choose an architectural model for its implementation. In turn, the choice of an architectural model assumes a balance for the set of requirements of persons interested in its development. In a typical case, the development of a specific cyber-physical industrial systems needs to be adapted to the means of implementation, to the realities of its future use, maintenance and evolution. **Subject matter** of this study are architectural models for building complex cyber-physical production systems. **Goal** of this article is a study of architectural models DIKW and 5C, according to the results of the decomposition of which, in the future, it will be possible to carry out a mathematical description of elementary problems of each level and their physical or simulation modeling. To achieve this goal, it is necessary to solve the following **tasks**: analyze the DIKW model; analyze the architectural model 5C; compare the DIKW model and the 5C architectural model, using its structural decomposition into levels, information and command channels with feedback within each structure. The research carried out is based on the methods of decomposition and formalized representation of systems. **Conclusions**: Based on the results of the decomposition at each structural level of the DIKW and 5C models, a decomposition structure was developed, which shows the main differences and general similarities of the models. It was revealed that the 5C model, as a common software shell that combines integrated sensors and actuators, is more suitable for solving problems of developing a cyber-physical production system, and the DIKW interpretation model is more suitable for solving problems of modifying existing systems at enterprises, and the choice of the model itself the development of a cyber-physical production system depends on the requirements of the customer, existing equipment, the level of its automation and the level of project financing.

Keywords: Industry 4.0; Smart Manufacturing; Digital Twins; cyber-physical industrial systems; DIKW model; 5C architecture.

Introduction

With the emergence of new requirements for the production of high-tech products, in the widespread use of digital, network and intelligent technologies, the constant development of integrated production innovations, a necessary condition became the introduction of information technology, which is the main engine for a new industrial revolution.

In particular, the new generation of uninhabited, intelligent production, includes major and profound changes in the philosophy of modern industry, based on the concept of Industry 4.0, proposed by Germany [1-2]. In turn, the United States launched the Advanced Manufacturing Partnership project [3], the United Kingdom put forward the UK Industry 2050 strategy [4]. In addition, France introduced the New Industrial France program [5], Japan proposed the Society 5.0 program [6], and Korea began production under the Innovation 3.0 program [7].

Basically, in these projects, the development of intellectual production is seen as a key tool for creating competitive means of industrial development of large countries around the world. The "Made in China 2025" plan, formerly known as "China Manufacturing 2025" [8], specifically emphasizes the intellectualization of production, based on the in-depth integration of next-generation information technology into industry.

Based on these requirements, within the concept of Industry 4.0, the technology of creation of digital twins (Digital Twins) of technological processes, within the limits of Smart Manufacturing is offered. As a result of the collaboration of theoretical research, a new approach to the realization of production was created, as a synthesis

of cybernetic and physical components - "Cyber-physical production systems" (SPPS).

The growing complexity of production systems requires appropriate management architectures that provide flexible adaptation during their operation.

According to the analysis of problems in the development of complex SPPS [9-12] it is determined that their creation depends primarily on their architectural model, type and type of equipment, parameters of production processes at all stages of the life cycle, which directly affect the structure of information flows, their visualization in the cybernetic component and the implementation of feedback. In essence, the new term, SPPS is an architectural paradigm in which comprehensive sounding technology is a fundamental part [13].

Problem statement and research purpose

Modern production (enterprise) is a technological system consisting of interconnected horizontally and vertically subsystems. The basis of each complex technological system (TS), in our case, the company, are the production processes that are performed in the relevant departments. The TS of the production unit consists of a set of typical main and auxiliary technological processes and devices controlled by automated control systems (ACS), which include systems designed to control continuous production, automated production lines, complex lines of units and machines, machines with numerical program management [13].

The amount of information that must be received and promptly processed to form effective management influences in modern management systems has grown so

much that it far exceeds the capabilities of one person. Therefore, the management of complex objects is entrusted to a team of people, the quantitative growth of which still does not provide the required quality of object management. There is a critical point when intensive coordination of information within the management system itself is required to coordinate and coordinate individual management influences, to inform some people about the decisions made by other people. Therefore, the main tool for solving modern problems of management of material objects is ACS, in which the main role and creativity of man are combined with the widespread use of modern mathematical methods and automation tools [13].

Currently, a clearly defined 5-layer automation architecture has been formed (fig. 1). Over the past three decades, the evolution of information technology has transformed the world we live in, generating new business models and influencing the industry in such a way that global consumers change their way of consuming [14]. According to observations, companies that do not invest in efficiency, in fact, pose a threat to their survival. Without

efficiency, the company cannot guarantee the level of quality, accuracy and demand required for the current market. In this regard, the structure of Industry 4.0 dictates new directions for creating efficient and smart production [14].

Due to the development of network technologies, 5 layers may not be needed in the future. These technologies allow to connect into a single corporate network numerous and remote computer, which are used to control and analyze material, energy and financial flows in the production of products, as well as TP management, which facilitated the transition to SPPS. In these systems with the help of very complex software the whole complex of tasks on management of activity of the enterprise, including tasks of the account, planning, management of TP, etc. is jointly solved.

Thus, the main action of SPPS, in contrast to the classic ACS representation, is that the sensors transmit data directly to the cloud. Services (such as production planning) automatically subscribe to the necessary data in real time - a vision of cyber physical systems (fig. 2).

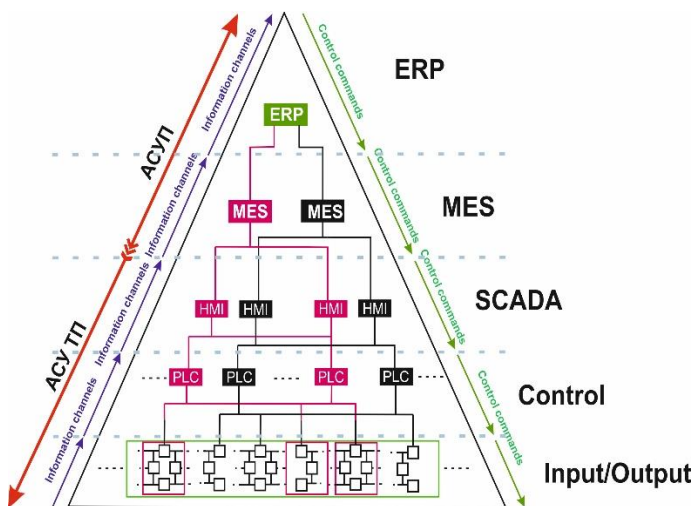


Fig. 1. Classical construction of production process control (DIKW model)

At present, there is no single approach to the development of SPPS and for each company it is an individual task. Considering the existing modern approaches to the production of electronic devices, we can see that they are mainly streaming, flexible and discrete. This is due to the fact that most global brands do not have their own production of components, and order their production in contract electronics companies (Jable, etc.) as a result of which production lines have a short life cycle, and readjustment and reprogramming of each unit takes a lot a lot of time, compared to the lifetime of this line [15].

One of the pioneers in this field is Festo, which offers new approaches to automation of control processes based on the use of SPPS and IoT technologies. This approach is based on the concept of a single cloud structure "Festo Cloud", to which, using an industrial gateway IoT, connect mechatronic devices, which for the implementation of the process control process can be

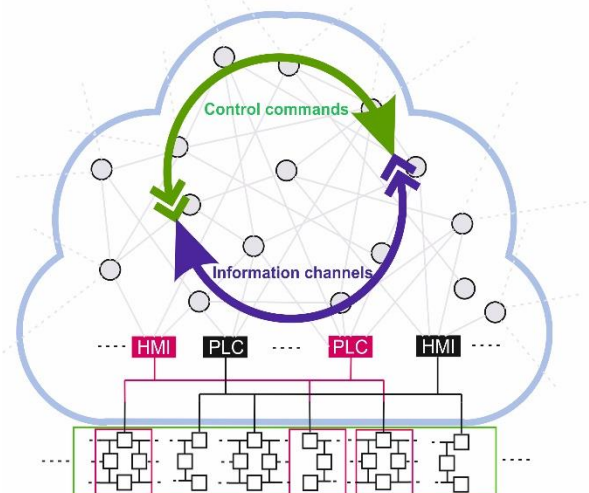


Fig. 2. SPPS-based process control

combined into "Automation Platforms", with a single information support.

When complicating or simplifying the technological process of manufacturing products in the production line are added to the actuator and mechatronic module, which controls it, and is an integral part of the overall "Automation Platform". This solution allows to reduce the time of reconfiguration of the production line for the production of new products, as well as to implement the connection of individual equipment or shops without interfering with the control system of the machine [15]. SPPS provides tools to overcome complexity and flexibility, but integrating component data with existing management systems remains a challenge.

The disadvantages of the classical construction of the process of production process management (model DIKW) and the main advantages of the implementation of cyber-physical systems are given in table 1.

Table 1. Comparative analysis of the construction production processes control

Disadvantages of DIKW	Advantages of SPPS	Explanation
lack of adaptability	advanced information functions at the level of ACS TP	ability to adapt to changes in the external environment
weak dynamism, flexibility	high survivability and reliability of the system in case of failure of its individual elements	ability to respond sensitively to changes in demand, technology, etc.
weak adequacy	adequate diagnostics of technological equipment and tools at the level of ACS TP	constant compliance of the organizational structure with the parameters of the managed system
specialization	timely submission to operational personnel of reliable information on the course of the technological process, the state of equipment and technological controls	restriction and specification of the scope of activities of each management unit
rigid optimality	implementation of particularly complex control and regulation algorithms	establishing rational links between levels and levels of government
poor efficiency	ensuring effective automated control of technological processes in normal, transient and pre-emergency modes of operation, production of products of a given quality and quantity	prevention of irreversible changes in the managed system during decision-making
weak reliability	providing staff with retrospective information in full for analysis, optimization and planning of equipment operation, as well as its repair in real time	guarantee of reliability of information transfer
low efficiency	simplification of technological equipment management by reducing the number of equipment at the level of ACSTP	compliance of maintenance costs with the organization's capabilities
lack of simplicity	optimal communication (interface) "man-machine"	ease for staff to adapt to this form of management

According to the results of the analysis, it can be determined that the advantages of SPPS are the implementation of an automated cycle of creating a new product from pre-design research to production of a serial sample, while providing work at all stages - from research to production - based on without material transfer of information between the components of the systems of this cycle using local area networks.

Thus, to create a system that works with knowledge and is able to some extent replace the expert or help him in decision-making in production management, it is necessary to seek to lay in the architecture of the system the ability to implement these functions.

The development of architectural models should also use the accumulated experience of successful developments, especially experience embedded in architectural styles, each of which is a sample of common standard solutions, and integrates significant solutions based on the principles of rationality. Significant decisions and forms of their integration must be rationally presented and justified and not only declared, but also have a justification "Why they were preferred among the alternatives" [16].

The development of SPPS is a complex scientific and technical task, so the developer needs to determine the requirements, tasks for the developed system and choose the architectural model of its implementation. In turn, the choice of architectural model involves maintaining a balance for the set of requirements of persons interested in its development. Typically, the development of a particular SPPS requires adaptation to the realities of the funds and funds allocated for development, and to the realities of its future use, taking into account its maintenance and evolution [16].

Presentation of the main research material.

The main decisions on the above requirements and adaptation, which includes the construction of a balanced set of requirements, are made when building the SPPS architecture. There is architecture in different volumes: software, hardware, information support; organizational support, enterprises. Thus, the following is an overview of the architectural representations of SPPS, taking into account its representation in the context of "enterprise".

Analyzing publications: [14, 17], which consider ANSI ISA 95, 5C and 8C models; [18], where the model 8C is proposed on the basis of the model 5C and [19], which is dedicated to the development of the integration model CPPS-IoE-5C - it can be seen that they are descriptive, which does not allow to compare a model when choosing an architecture for developed by SPPS.

Therefore, in the framework of this study, a comparative analysis of the DIKW model with the architectural model 5C will be conducted, based on the results of their decomposition at each structural level.

The DIKW model (also known as the DIKW pyramid, the DIKW hierarchy, the data pyramid, the knowledge hierarchy) is a hierarchical model for representing the flow of data through information, knowledge, and wisdom. The name of the DIKW model is an abbreviation of the first letters "Data, Information, Knowledge, Wisdom" which description is given in fig. 3.

Data is a set of discrete facts about events obtained as input from processes. The data mainly consists of symbols or signs representing stimuli or signals that are not useful for processing;

Information is processed data. This is due to the provision of context by the data or through data questions. This usually requires the collection of various data sources and the provision of some value or correspondence to a set

of facts. The information tries to answer the question "Who? Which? When? Where?";

Knowledge is a more derived form of data. It consists of concepts, experiences, ideas, values and judgments of people with a clear reference to information. This usually requires information analysis and assists in decision making. Knowledge tries to answer the question "How?";

Wisdom - gives a final understanding of the data. It describes the application of knowledge and provides contextual awareness to form a strong sound judgment. Using wisdom allows an organization to manage its strategy and growth in a competitive marketplace. Wisdom tries to answer the question "Why?".

With the advent of Industry 4.0 concepts and the

concept of Smart Manufacturing, the DIKW model received the following iteration of hierarchical levels, which is presented in fig. 4 and is formed on the principle of "bottom to top".

At the first field level is the interaction with the production process using sensors and actuators; at the control level is the regulation and control of actuators using programmable logic controllers (PLC); the level of the technological line (production level) (actually the level of the production process) performs the function of control and monitoring of the technological process of production; operations level is designed for production planning, quality management, etc. ; enterprise level planning provides order management, processing, general production planning, etc.

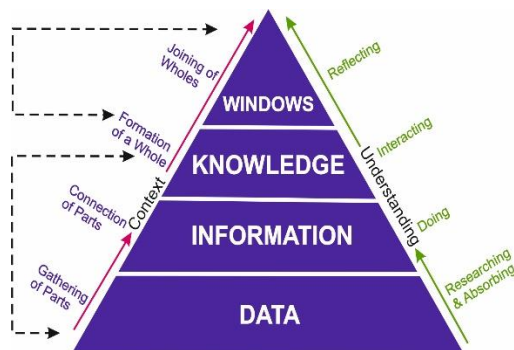


Fig. 3. Classic representation of the DIKW model

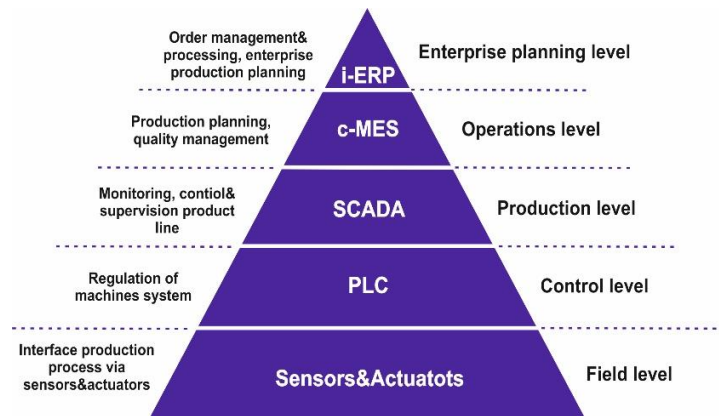


Fig. 4. Interpretation of the DIKW model in terms of its application in Smart Manufacturing

In 2015, [19] proposed an architectural model 5C, presented, which according to the authors consists of the following levels of "Smart Connection", "Data-to-

Information Conversion", "Cyber", "Cognition" and "Configuration". A general view of the CPPS 5C architecture is presented in fig. 5.

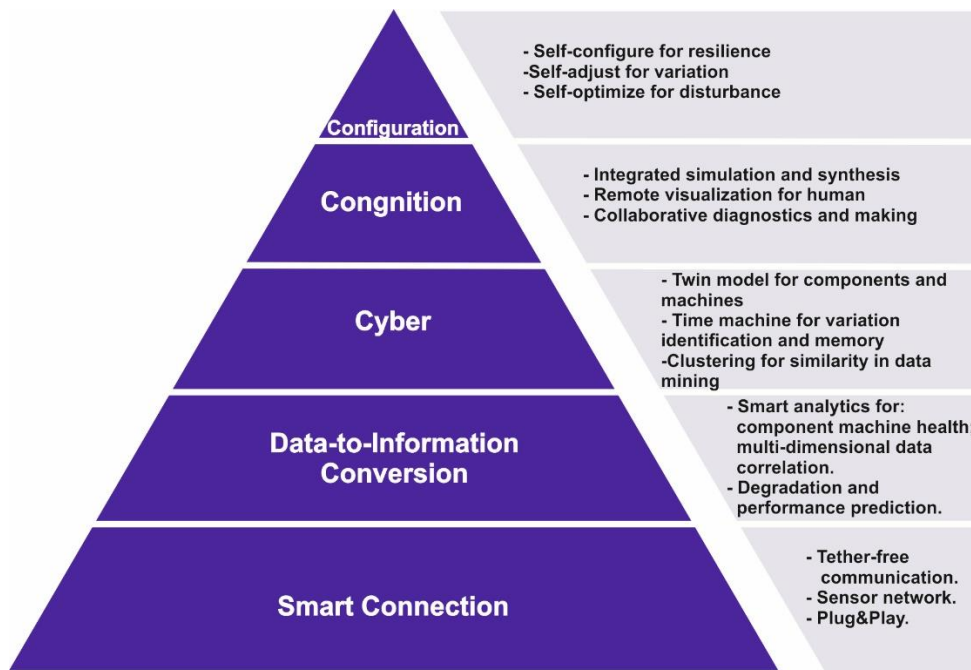


Fig. 5. Architectural model 5C

At the first level of "Smart Connection" machines and their components are used to obtain accurate and reliable data in the first step of SPPS management for Smart Manufacturing.

Smart connection – the level of data acquisition using sensors used to collect various parameters of the technological process of production of products in real time. IIoT technologies used for data transmission and control according to selected protocols in accordance with the specification of the selected equipment.

Data-to-information conversion – is designed to convert the received data into information. This level is considered from the point of view of the fact that some devices can implement functions of forecasting and monitoring of equipment wear – which introduces the concept of "intelligence" quality.

Cyber – a level that is given the role of the main information center, which collects an array of information from the equipment to the industrial network. According to the received data, productivity of one equipment is compared and ranked among all identical types of the equipment which are in an industrial network.

Cognition – designed to provide analytical information directly to operators for production decisions. This level allows remote and joint diagnosis and decision making in the production environment;

Configuration – returns feedback from the "Cyber" level to the "Smart Connection", i.e. performs dispatch control, which allows you to make equipment with self-configuration, self-tuning and self-optimization.

For comparative analysis of architectural models 5C and interpretive model DIKW, in terms of its application in Smart Manufacturing, it is proposed to decompose it:

- by levels;
- by the areas of information flows about the state and management teams;
- by the number of feedbacks - types and kinds of network protocols used to create channels for transmitting information between levels.

Based on the above parameters of the decomposition of the model 5C developed [14] (fig. 5) and the interpretation model DIKW (fig. 4), for the convenience of information perception developed a decomposition structure, which is presented in fig. 6.

As can be seen from the above structure (fig. 6), both models at the first level Smart Connection and Field level consist of sensors and actuators that interact with the 0 level – the technological object of control, here is information about the state of the object from the lower level transmitted to the upper level.

The information received from the sensors is transmitted to the *Control level*, which contains the *Programmable Logic Controller (PLC)*, where the regulation and control of actuators.

In contrast to the DIKW model, the 5C model proposes a solution to place at the *Data-to-Information Conversion* level two parallel *Configurations*, which act as feedback from the *Cyber* level to the *Smart Connection* level [14], which allows to make equipment with self-configuration, self-tuning and self-optimization. As a

result of this combination, the decomposition structure of the 5C model becomes one level smaller.

Considering the 5C model, we can see that the Cyber layer acts as the main information center, which collects an array of information from the equipment and the data checks its performance and ranking among the same type that are in the network.

Then the information comes to level 4 - *Cognition*, which combines a single set (modules) of software *Human-machine interface (HMI)* and *Graphical User Interface (GUI)*, which are designed to provide analytical information directly to operators or software robots. Similarly, this level allows remote and joint diagnosis and decision making in the production environment.

In contrast to level 4 Cognition in model C5, the functions listed in model DIKW are represented from level 3 *Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA)* through level *Manufacturing Execution System (MES)* to level 5 *Enterprise Resource Planning (ERP)*.

At the MES and ERP levels, the content of information is transmitted by means of syntax or purely formal, structural properties of language, thus the type of message uniquely determines its content. SPPS has a semiotic structure, i.e. the full-fledged linguistic nature of information connections. In this case, the uniqueness of the transmission is violated and in the process of signal processing by the successor is a fundamentally new technology – the interpretation of the received message. This means that the reaction of the system or receiving element will be far from unambiguous, it depends on the content, which to some extent is inherent in the signal. Such systems must have not only a much larger information reserve, but also the ability to distinguish meaningful elements. Therefore, in order to achieve the information integral SPPS that is being developed, to determine the structure at an early stage, which will further allow to recognize and identify information links and their characteristics.

In most cases, at levels 3-5 of the DIKW model, software products from different developers are used to implement their functions, which limits their adaptability to the problem to be solved, and also contains only a general set of solutions that are suitable for a particular field of production.

After all, the most difficult to balance non-functional requirements are those responsible for its quality and/or the quality of the development process. In the search for balance should take into account the fact that: the end user is interested in intuitive and predictable behavior when interacting with it, in such quality characteristics as "convenience", "intelligibility" and "ability to learn"; the system administrator is interested in intuitive tools for his work, including tools that help in monitoring the state of SPPS and its behavior; the marketer is interested in winning functions in the market of related systems and the price; the buyer is interested in the price, stability of work and the plan of delivery and commissioning;

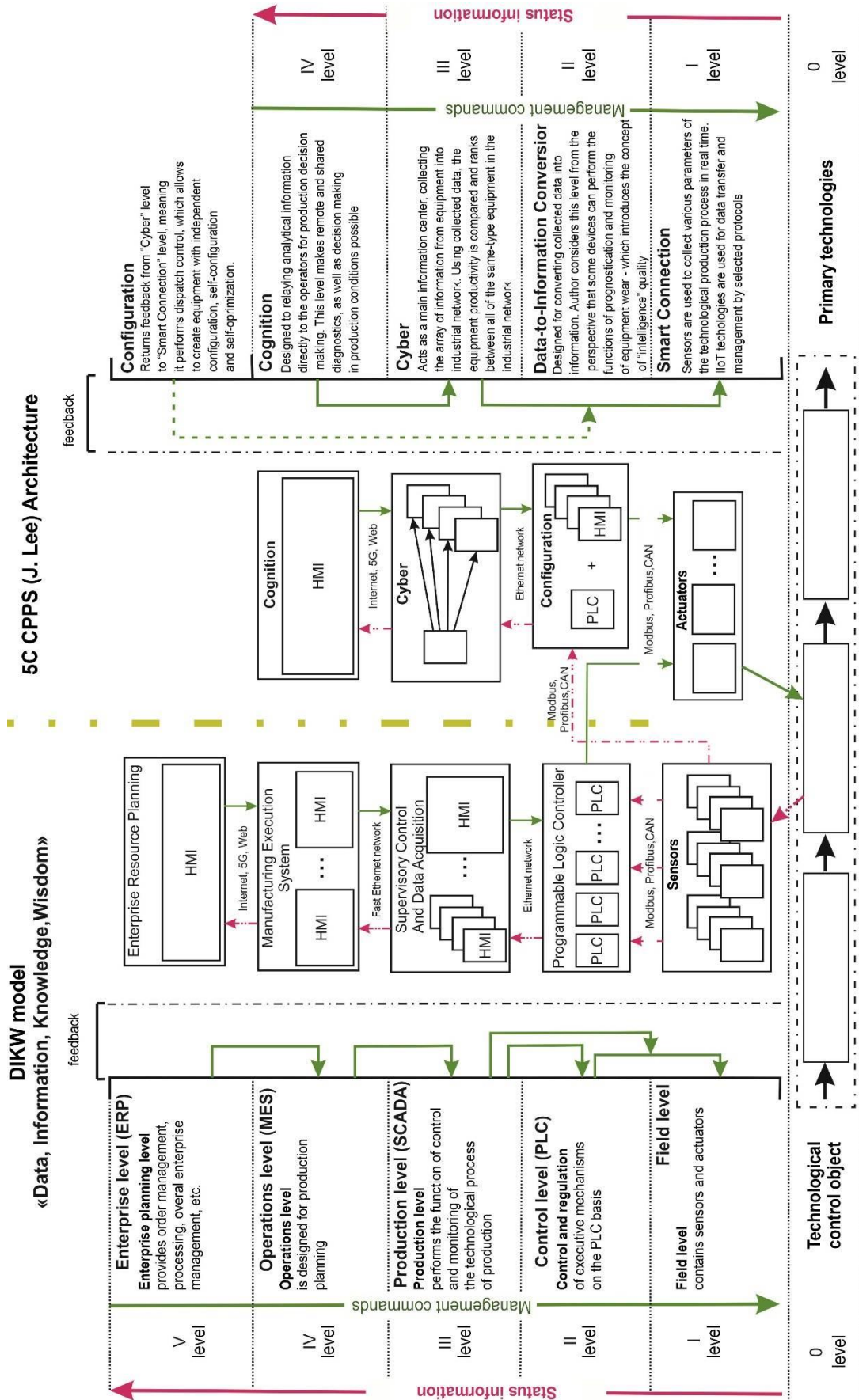


Fig. 6. Decomposition structure of comparable architectural models DIKW and 5C

the developer is interested in clear and consistent requirements for the system, as well as in the possibility of using a simple approach to design [20]; the project manager is interested in the predictability of the deployment of works and their results, in the tracing of the project, action plan, productive means, available resources, primarily financial resources; the person responsible for maintenance is interested in the clarity of the system and the solutions invested in its development, as well as in the documentation and ease of modification.

Conclusions

It is worth noting that the solution proposed by Festo is currently the idea of production of the future (a prototype plant in Scharnhausen) [15]. There are still many questions about creating a methodological, mathematical, functional and algorithmic framework that will describe the interaction of control processes within the system, optimize the choice and number of mechatronic devices, distribute tasks and connections of the cybernetic component, simplify the mechanism of adding and connecting new mechatronic devices to minimize the number of changes to information flows (command and control flows) in existing systems.

The article analyzes the architectural models of DIKW and 5C in terms of their application for the development of cyber physical production systems. For convenience of comparison, the factors on the basis of which the decomposition of their interpretive models was carried out were chosen. On the basis of the performed decomposition the decomposition structure of the DIKW and 5C models was developed, which shows the main differences and general similarities of the models.

The use of the proposed decomposition structure of architectural models will allow to define and outline the purpose and tasks at each level of decomposition, to make a mathematical description of elementary tasks and their physical or simulation modeling, to achieve the main goal of SPPS development.

According to the results of the work, it was concluded that the 5C model, as the only software shell that combines integrated sensors and actuators, is more suitable for solving the problem of SPPS development. In turn, the DIKW interpretation model is more suitable for solving problems of modification of existing systems in enterprises, and the choice of SPPS development model depends on the requirements of the customer, existing equipment, the level of its automation and the level of project financing.

References

1. Sony, M., Naik, S. (2019), "Key ingredients for evaluating Industry 4.0 readiness for organizations: a literature review", *Benchmarking: An International Journal*, Vol. 27, No. 7, P. 2213–2232. DOI: <https://doi.org/10.1108/BIJ-09-2018-0284>
2. Rossit, D. A., Tohmé, F., Frutos, M. (2019), "Industry 4.0: smart scheduling", *International Journal of Production Research*, No. 57 (12), P. 3802–3813. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1504248>
3. Holdren, J. P., Power, T., Tassej, G., Ratcliff, A., Christodoulou, L. (2012), "A National strategic plan for advanced manufacturing", *US National Science and Technology Council*, Washington, DC., available at :: <http://www.docin.com/p-391856652.html>
4. Foresight, U. K. (2013), *The future of manufacturing: a new era of opportunity and challenge for the UK*, Summary Report, The Government Office for Science, London, 20 p.
5. Cohen, E. (2007), "Industrial Policies in France: The Old and the New", *Journal of Industry, Competition and Trade*, No. 7, P. 213–227. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10842-007-0024-8>
6. Taki, H. (2017), "Towards Technological Innovation of Society 5.0", *Journal-Institute of Electrical Engineers of Japan*, No. 137 (5), P. 275–275. DOI: <https://doi.org/10.1541/ieejjournal.137.275>
7. Moon, H. C., Chung, J. E., Choi, S. B. (2018), "Korea's Manufacturing Innovation 3.0 Initiative", *Journal of Information and Management*, No. 38 (1), P. 26–34. DOI: https://doi.org/10.20627/jsim.38.1_26
8. Zhou, J. (2015), "Intelligent manufacturing-main direction of "made in china 2025", *Zhongguo Jixie Gongcheng/China Mechanical Engineering*, No. 26 (17), P. 2273–2284. DOI: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-132X.2015.17.001>
9. Paulo Leitão, Armando Walter Colombo, Stamatis Karnouskos (2016), "Industrial automation based on cyber-physical systems technologies: Prototype implementations and challenges", *Computers in Industry*, Vol. 81, P. 11–25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2015.08.004>
10. Huang, G., Chen, J., Khojasteh, Y. (2021), "A cyber-physical system deployment based on pull strategies for one-of-a-kind production with limited resources", *Journal of Intelligent Manufacturing*, No. 32 (2), P. 579–596. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-020-01589-8>
11. Stefano Zanero (2017), "Cyber-Physical Systems", *Computer*, Vol. 50, Issue 4, P. 14–16. DOI: <https://doi.org/10.1109/MC.2017.105>
12. Mosterman, P. J., Zander, J. (2016), "Cyber-physical systems challenges: a needs analysis for collaborating embedded software systems", *Software & Systems Modeling*, No. 15, P. 5–16. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10270-015-0469-x>
13. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Demska, N., Novoselov, S. (2020), "Development of a software module for operational dispatch control of production based on cyber-physical control systems", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (14), P. 155–168. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2020.14.155>
14. Lee, J., Jin, C., Bagheri, B. (2017), "Cyber physical systems for predictive production systems", *Production Engineering*, Vol. 11, P. 155–165. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11740-017-0729-4>
15. Sergeychik, A. (2019), "A step towards Industry 4.0: Festo devices for modern production" ["Shag navstrechu "Industrii 4.0": ustroystva Festo dlya organizatsii sovremennogo proizvodstva"], *Control Engineering Rossiya*, No. 4 (82), P. 38–41.

16. Sosnin, P. I. (2008), *Architectural modeling of automated systems* [Архітектурное моделирование автоматизированной системы], Ul'yanovsk, UIGTU, 147 p.
17. Lee, J., Davari, H., Singh, J., Pandhare, V. (2018), "Industrial artificial intelligence for industry 4.0-based manufacturing systems", *Manufacturing Letters*, No. 18, P. 20–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.09.002>
18. Jiang, J. (2018), "An improved cyber-physical systems architecture for industry 4.0 smart factories", *Advances in Mechanical Engineering*, No. 10 (6). DOI: <https://doi.org/10.1177/1687814018784192>
19. Erasmus, J., Vanderfeesten, I., Traganos, K., Keulen, R., Grefen, P. (2020), "The HORSE project: The application of business process management for flexibility in smart manufacturing", *Applied Sciences (Switzerland)*, No. 10 (12). DOI: <https://doi.org/10.3390/APP10124145>
20. Beskorovainyi, V. (2020), "Combined method of ranking options in project decision support systems", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (14), P. 13–20. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2020.14.013>

Received 26.02.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Осадчий Сергій Іванович – доктор технічних наук, професор, Центральноукраїнський національний технічний університет, завідувач кафедри автоматизації виробничих процесів, Кропивницький, Україна; email: srg2005@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1811-3594>.

Осадчий Сергей Иванович – доктор технических наук, профессор, Центральноукраинский национальный технический университет, заведующий кафедрой автоматизации производственных процессов, Кропивницкий, Украина.

Osadchy Sergei – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Central Ukrainian National Technical University, Head of the Department of Automation of Production Processes, Kropyvnytskyi, Ukraine.

Демська Наталія Павлівна – кандидат технічних наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, старший викладач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харків, Україна; email: demska.nataliia@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9931-9964>.

Демская Наталия Павловна – кандидат технических наук, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, старший преподаватель кафедры компьютерно-интегрированных технологий, автоматизации и мехатроники, Харьков, Украина.

Demska Nataliia – PhD (Engineering Sciences), Kharkiv National University of Radio Electronics, Senior Lecturer of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics, Kharkiv, Ukraine

Олександров Юрій Миколайович – кандидат технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харків, Україна; email: yuriy.oleksandrov@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8252-9685>.

Александров Юрий Николаевич – кандидат технических наук, профессор, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, профессор кафедры компьютерно-интегрированных технологий, автоматизации и мехатроники, Харьков, Украина.

Oleksandrov Yuriy – PhD (Engineering Sciences), Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics, Kharkiv, Ukraine.

Невлюдова Вікторія Валеріївна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харків, Україна; email: d_tapr@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1158-5089>.

Невлюдова Виктория Валерьевна – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры компьютерно-интегрированных технологий, автоматизации и мехатроники, Харьков, Украина.

Nevliudova Viktoriia – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics, Kharkiv, Ukraine.

ДОСЛІДЖЕННЯ АРХІТЕКТУРНИХ МОДЕЛЕЙ DIKW ТА 5C ДЛЯ СТВОРЕННЯ КІБЕРФІЗИЧНИХ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ В РАМКАХ КОНЦЕПЦІЇ INDUSTRY 4.0

Розробка кіберфізичної виробничої системи є складною науково-технічною задачею, тому розробнику потрібно визначити вимоги, завдання, що пред'являються до розроблюваної системи і обрати архітектурну модель її реалізації. У свою чергу вибір архітектурної моделі передбачає дотримання балансу для сукупності вимог осіб, зацікавлених в її розробці. У типовому випадку розробка конкретної кіберфізичної виробничої системи потребує адаптації до засобів реалізації, до реалій майбутнього її використання, супровіду і еволюції. **Предметом** даного дослідження є архітектурні моделі побудови складних кіберфізичних виробничих систем. **Метою** даної статті є дослідження

архітектурних моделей DIKW та 5C, за результатами проведення їх декомпозиції на кожному структурному рівні для подальшого проведення математичного опису елементарних завдань кожного рівня і їх фізичного або імітаційного моделювання. Для досягнення поставленої мети необхідне вирішення наступних завдань: провести аналіз моделі DIKW; провести аналіз архітектурної моделі 5C; порівняти модель DIKW і архітектурну модель 5C, за допомогою їх структурної декомпозиції за рівнями, інформаційними і командними каналами зі зворотніми зв'язками всередині кожної структури. Проведені дослідження базуються на методах декомпозиції та формалізованого представлення систем. **Висновки:** за результатами проведення декомпозиції на кожному структурному рівні моделей DIKW і 5C була розроблена декомпозиційна структура, на якій показані основні відмінності і загальні подібності моделей. Виявлено, що модель 5C, як єдина програмна оболонка, яка об'єднує в собі інтегровані датчики і виконавчі пристрої, більше підходить для вирішення завдання розробки кібер-фізичної виробничої системи, а інтерпретаційна модель DIKW більше підходить для рішень задач модифікації існуючих систем на підприємствах, а сам вибір моделі розробки кіберфізичної виробничої системи залежить від вимог замовника, існуючого обладнання, рівня його автоматизації і рівня фінансування проекту.

Ключові слова: Industry 4.0; Smart Manufacturing; Digital Twins; кібер-фізичні промислові системи; модель DIKW; архітектура 5C.

ИССЛЕДОВАНИЕ АРХИТЕКТУРНЫХ МОДЕЛЕЙ DIKW И 5C ДЛЯ СОЗДАНИЯ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ В РАМКАХ КОНЦЕПЦИИ INDUSTRY 4.0

Разработка киберфизической производственной системы является сложной научно-технической задачей, поэтому разработчику нужно определить требования, задачи, предъявляемые к разрабатываемой системе и выбрать архитектурную модель ее реализации. В свою очередь выбор архитектурной модели предполагает соблюдение баланса для совокупности требований лиц, заинтересованных в ее разработке. В типичном случае разработка конкретной киберфизической производственной системы нуждается в адаптации к средствам реализации, к реалиям будущего ее использования, сопровождения и эволюции. **Предметом** данного исследования являются архитектурные модели построения сложных киберфизических производственных систем. **Целью** данной статьи является исследование архитектурных моделей DIKW и 5C, по результатам декомпозиции которых, в дальнейшем, станет возможным проведение математического описания элементарных задач каждого уровня и их физического или имитационного моделирования. Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих **задач:** провести анализ модели DIKW; провести анализ архитектурной модели 5C; сравнить модель DIKW и архитектурную модель 5C, с помощью ее структурной декомпозиции по уровням, информационных и командных каналов с обратными связями внутри каждой структуры. Проведенные исследования базируются на методах декомпозиции и формализованного представления систем. **Выводы:** по результатам проведения декомпозиции на каждом структурном уровне моделей DIKW и 5C была разработана декомпозиционная структура, на которой показаны основные отличия и общие сходства моделей. Виявлено, что модель 5C, как общая программная оболочка, которая объединяет в себе интегрированные датчики и исполнительные устройства, больше подходит для решения задач разработки киберфизической производственной системы, а интерпретационная модель DIKW больше подходит для решения задач модификации существующих систем на предприятиях, а сам выбор модели разработки киберфизической производственной системы зависит от требований заказчика, существующего оборудования, уровня его автоматизации и уровня финансирования проекта.

Ключевые слова: Industry 4.0; Smart Manufacturing; Digital Twins; киберфизические производственные системы; модель DIKW; архитектура 5C.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Осадчий С. І., Демська Н. П., Олександров Ю. М., Невлюдова В. В. Дослідження архітектурних моделей diKW та 5C для створення кіберфізичних виробничих систем в рамках концепції industry 4.0. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 1 (15). С. 132–140. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.132>

Osadchy, S., Demska, N., Oleksandrov, Yu., Nevliudova, V. (2021), "Research of DIKW and 5C architectural models for creation of cyber-physical production systems within the concept of industry 4.0", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (15), P. 132–140. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.132>

УДК 519.237

DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.141>

Л. Г. РАСКІН, О. В. СІРА, Ю. Л. ПАРФЕНЮК

УПРАВЛІННЯ ПРОПУСКНИМИ ЗДАТНОСТЯМИ ПРОМІЖНИХ ПУНКТІВ У РОЗГАЛУЖЕНІЙ ТРАНСПОРТНІЙ МЕРЕЖІ

Предмет. Розглянуто важливий для практики окремий випадок транспортної задачі з проміжними пунктами, коли пропускні здатності цих пунктів не задані. **Ціль.** Сформульована задача відшукування невідомого розподілення пропускних здатностей проміжних пунктів, котре мінімізує сумарні транспортні витрати. **Задачі.** Постановка задачі управління пропускними здатностями проміжних пунктів у триаксальній транспортній задачі. Розроблений метод має високу швидкість за рахунок використання структурної декомпозиції задачі. Метод має невисоку обчислювальну складність, що є вагомим перевагою для практичного застосування. **Метод.** Запропоновано два методи розв'язання задачі. Перший реалізує ітераційну процедуру поліпшення початкового плану для двоїстої моделі початкової задачі. Обчислювальна схема на кожній ітерації є двокроковою. На першому кроці ітерації вирішується координуюча задача, вирішення якої задає черговий набір значень пропускних спроможностей проміжних пунктів. На другому кроці цей набір використовується для вирішення початкової транспортної задачі. Отримане в результаті рішення перевіряється на оптимальність. Якщо воно не оптимальне, то виконується перехід до чергової ітерації. Для реалізації запропонованої обчислювальної схеми використаний метод оптимізації нульового порядку Нелдера-Міда. **Результати.** Доведено можливість конструктивного використання цього методу з огляду на велику кількість обмежень транспортного типу. З метою спрощення технології вирішення транспортних задач на кожній ітерації алгоритму введені їх двоїсті моделі. У зв'язку з тим, що обчислювальна складність запропонованого методу швидко зростає зі збільшенням числа проміжних пунктів, запропонований простий наближений альтернативний метод розв'язання задачі. **Висновки.** Запропонований метод вирішує завдання розрахунку пропускної здатності проміжних пунктів в системі "виробництво – доставка – споживання".

Ключові слова: транспортна задача з проміжними пунктами; пропускні спроможності пунктів не задані; методи вирішення.

Вступ

Задача управління поставками в розгалужених транспортних мережах є однією з найбільш наукоємних в комплексі проблем логістики - загальної теорії керування потоками. Методи вирішення завдань управління рухом товарів формуються в термінах теорії лінійного програмування.

При цьому, в залежності від особливостей системи "виробництво - доставка - споживання" вирішуються різноманітні завдання з планування і організації перевезень. Формулювання і рішення цих задач враховують продуктивність і розміщення пунктів виробництва, техніко-економічні можливості різних видів транспорту, розміщення і обсяги потреб продукту в пунктах споживання, вартості перевезень і т.д. Математична модель канонічної транспортної задачі має ряд специфічних особливостей в порівнянні із загальним завданням лінійного програмування. По-перше, транспортна задача є двухіндексною, тому шукане рішення завдання - не вектор, а матриця. По-друге, в системі обмежень задачі кожна змінна зустрічається рівно два рази, а самі обмеження накладаються на суми змінних в рядках і стовбцях матриці змінних. Для вирішення транспортних завдань використовується метод потенціалів - це спеціальна модифікація симплекс-методу, розробленого для загальної задачі лінійного програмування. Метод потенціалів, алгоритм і обчислювальна процедура його реалізації складніше симплекс-методу внаслідок двухіндексності транспортної задачі.

Канонічна модель, що задає метод вирішення транспортних завдань широко використовується в практиці організації та управління перевезеннями.

Разом з тим, якщо в реальній задачі транспортуються товари широкої номенклатури, призначені для задоволення потреб сотень споживачів, то канонічна модель транспортної задачі ускладнюється. При доставці багатомономенклатурної продукції з'являється необхідність в проведенні додаткових операцій: контейнеризація, пакування, підгрупу партій вантажів, сортування і т.д. У зв'язку з цим на маршрутах прямування вантажів доцільно створювати проміжні пункти - великі розподільні складські бази. Реалізація цієї ідеї призводить до трехіндексності моделі транспортної задачі.

Ускладнення моделі призводить до істотного ускладнення алгоритму та обчислювальної схеми виконання завдання. Радикальне спрощення трехіндексної моделі досягається, якщо фіксувати пропускні спроможності проміжних пунктів. При цьому, як буде показано далі, рішення вихідної трехіндексної завдання зводиться до послідовного розв'язання пари двухіндексних задач. Принциповий недолік цього підходу - відсутність обґрунтування вибору значень пропускних здатностей проміжних пунктів. Зрозуміло, що невдалий вибір цих значень може призвести до не прогнозовано великих втрат. Ця обставина робить актуальною проблему розробки точного і прийняттого за складністю методу вирішення трехіндексних завдань при знятих обмеженнях на пропускні спроможності пунктів, що і визначає мету дослідження. Для досягнення сформульованої мети необхідно вирішити такі завдання:

- розробити метод відшукування набору значень пропускних спроможностей проміжних пунктів, що забезпечує мінімальні сумарні витрати на транспортування;

- розробити просту (в порівнянні з методом потенціалів) обчислювальну процедуру, що реалізує запропонований метод

Постановка задачі

Математична модель канонічної транспортної задачі має вигляд [1-6]

$$L(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j, \quad (5)$$

де, i – номер постачальника; j – номер споживача; a_i – обсяг виготовленого продукту i -м виробником, $i = 1, 2, \dots, m$; b_j – обсяг попиту на продукт j -м споживачем, $j = 1, 2, \dots, n$; c_{ij} – вартість перевезення одиниці продукту от i -го постачальника до j -го споживача; x_{ij} – запланований обсяг транспортування від i -го постачальника до j -го споживача.

Співвідношення (2), (3) забезпечують задоволення вимог до плану перевезення, а формула (1) задає критерій оптимальності задачі - сумарна вартість перевезення.

Для вирішення отриманої двухіндексної транспортної задачі застосовується метод потенціалів, який є спеціальною модифікацією симплекс-методу, розробленого для вирішення загальної задачі лінійного програмування [7].

Якщо кількість споживачів велика (в рази перевищує кількість постачальників), то ефективна можливість знизити транспортні витрати і час на доставку товару приводить нас до ідеї створення додаткових (проміжних) пунктів. Математична модель задачі у такому випадку ускладнюється - вона стає трехіндексної.

Постановка цього завдання має наступний вигляд [8-10]. Маємо m пунктів поставки товару і заданий набір (a_1, a_2, \dots, a_m) , визначає розподіл товару по постачальниках; є n пунктів споживання цього товару і заданий набір (b_1, b_2, \dots, b_n) , задає їх потреби; є ℓ пунктів, які використовуються як проміжні центри (склади) і заданий набір $(d_1, d_2, \dots, d_\ell)$, який обмежує їх пропускні спроможності. Крім того, задана матриця вартостей $C = (c_{ijk})$, де, c_{ijk} – вартість

перевезення одиниці товару від i -го постачальника до j -го споживача через k -й проміжний пункт.

Далі вводиться матриця $X = (x_{ijk})$, де, x_{ijk} – кількість вантажу, призначене для перевезення товару від i -го постачальника до j -го споживача через k -й проміжний пункт.

Завдання полягає в відшуканні матриці $X = (x_{ijk})$, що мінімізує сумарну вартість перевезень

$$L(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{\ell} c_{ijk} x_{ijk} \quad (6)$$

що задовольнятиме системі обмежень

$$\sum_{k=1}^{\ell} \sum_{j=1}^n x_{ijk} = a_i, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^{\ell} \sum_{i=1}^m x_{ijk} = b_j, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

$$x_{ijk} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad k = 1, 2, \dots, \ell. \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ijk} \leq d_k, \quad k = 1, 2, \dots, \ell. \quad (10)$$

При цьому звичайна двухіндексна транспортна задача перетворюється до трехіндексної [11]. Відповідно до поставленої мети потрібно розробити метод розв'язання задачі (6) – (9), більш ефективний, ніж метод потенціалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Методам вирішення й можливості реального використання класичних транспортних задач присвячена велика кількість робіт, наприклад [1-5]. Вперше коректна математична модель для транспортної задачі лінійного програмування була запропонована в [6]. Далі ця модель багаторазово обговорювалася в канонічній двухіндексної постановці. Мабуть, перша згадка про можливість узагальнення класичної задачі на випадок великої кількості індексів зроблено в [7]. Метод рішення трехіндексної задачі запропоновано в [8], а обґрунтований в [9]. Надалі трехіндексна задача з обмеженнями у вигляді подвійних сум розглядається в роботах [10-14].

При цьому детально аналізується метод потенціалів і формується ідея спрощення задачі з проміжними пунктами при фіксації їх пропускних спроможностей. В [15] запропоновано рекурентна процедура побудови початкового плану в трехіндексній задачі. На жаль, ця процедура занадто трудомістка, так як перевірка конструктивності плану вимагає великої кількості обчислень. Слід зазначити, що у всіх відомих роботах передбачається, що для вирішення багатоіндексних завдань буде використаний метод потенціалів. У зв'язку з цим формулюються рекомендації щодо обмеження

розмірності задачі ($N=mpe$, m – число постачальників, p – число споживачів, e – число проміжних пунктів). Таким чином, короткий аналіз відомих робіт виявляє пробіл, пов'язаний з відсутністю практично реалізованих, простих методів вирішення багатоіндексних транспортних завдань (зокрема задач з проміжними пунктами, пропускні спроможності яких не задані), мотивуючий продовження досліджень.

Матеріали та методи

Якщо у вихідній задачі обмеження (10) формулюються як рівності і виконуються умови балансу:

$$\sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j = \sum_{k=1}^{\ell} d_k, \quad (11)$$

то трехіндексна задача (6) – (10) розпадається на дві незалежні двухіндексні задачі [11–13].

Задача А. Знайти набір $X_1 = (x_{ik})$, $i = 1, 2, \dots, m$, $k = 1, 2, \dots, \ell$, мінімізуючий

$$L_A(X_1) = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^{\ell} c_{ik} x_{ik} \quad (12)$$

та задовольняючий обмеженням

$$\sum_{i=1}^m x_{ik} = d_k, \quad k = 1, 2, \dots, \ell, \quad (13)$$

$$\sum_{k=1}^{\ell} x_{ik} = a_i, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (14)$$

$$x_{ik} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad k = 1, 2, \dots, \ell. \quad (15)$$

Задача Б. Знайти набір $X_2 = (x_{kj})$, $k = 1, 2, \dots, \ell$, $j = 1, 2, \dots, n$, мінімізуючий

$$L_B(X_2) = \sum_{k=1}^{\ell} \sum_{j=1}^n c_{kj} x_{kj} \quad (16)$$

та задовольняючий обмеженням

$$\sum_{j=1}^n x_{kj} = d_k, \quad k = 1, 2, \dots, \ell, \quad (17)$$

$$\sum_{k=1}^{\ell} x_{kj} = b_j, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (18)$$

$$x_{kj} \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, \ell, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (19)$$

Обидва сформульовані завдання вирішуються методом потенціалів. Як уже було відзначено вище, основний недолік цього підходу полягає в використанні обмежень (10). Необхідність їх задоволення істотно знижують потенціал ефективності системи транспортувань від

постачальників до споживачів. Більш природною є інша постановка задачі, в якій значення пропускних спроможностей d_k , $k = 1, 2, \dots, \ell$, проміжних пунктів не фіксуються, але умова балансу (11) виконується. Для вирішення завдання в цій постановці використовуємо декомпозиційний підхід.

Введемо набір $Y = \{y_k\}$, $k = 1, 2, \dots, \ell$, невідомих значень пропускних спроможностей проміжних пунктів. Ці значення повинні бути невід'ємні, та в сукупності, задовольняти умові балансу

$$\sum_{k=1}^{\ell} y_k = \sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j = S. \quad (20)$$

При тому задачі (12) – (15) та (16–19) будуть мати наступний вигляд:

Задача А1. Знайти набір $X_1 = (x_{ik})$, $i = 1, 2, \dots, m$, $k = 1, 2, \dots, \ell$, мінімізуючий (12) та задовольняючий обмеженням (14) – (15), а також обмеженням

$$\sum_{i=1}^m x_{ik} = y_k, \quad k = 1, 2, \dots, \ell. \quad (21)$$

Задача Б1. Знайти набір $X_2 = (x_{kj})$, $k = 1, 2, \dots, \ell$, $j = 1, 2, \dots, n$, мінімізуючий (16) та задовольняючий обмеженням (18) – (19), а також обмеженням

$$\sum_{j=1}^n x_{kj} = y_k, \quad k = 1, 2, \dots, \ell. \quad (22)$$

Зрозуміло, що будь-якому допустимому набору Y відповідає своє рішення $X_1(Y)$ задачі A_1 та своє рішення $X_2(Y)$ задачі B_1 . Природно сформулювати завдання відшукування набору Y та залежних від Y наборів $X_1(Y)$, $X_2(Y)$, мінімізуючих

$$L(X_1(Y), X_2(Y)) = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^{\ell} c_{ik} x_{ik}(Y) + \sum_{k=1}^{\ell} \sum_{j=1}^n c_{kj} x_{kj}(Y) \quad (23)$$

та задовольняючий обмеженням (14) – (15), (18) – (19), (21) – (22).

Розглянемо можливі підходи до вирішення поставленого завдання. Залежність змінних (x_{ik}) та (x_{kj}) від вектора Y призводить до того, що отримана задача вже не являє собою стандартну задачу лінійного програмування. Однак, вона з використанням ідеї декомпозиції може бути зведена до вирішення послідовності звичайних завдань лінійного програмування наступним чином. Пропонований метод вирішення має наступну структуру: зовнішня задача і сукупність внутрішніх завдань. У зовнішній задачі формується набір векторів $Y_s = \left(y_k^{(s)} \right)$, $s = 1, 2, \dots, \ell + 1$, кожен з яких задає своє

розподілення пропускних здатностей проміжних пунктів і задовольняє умовам балансу (20). Далі для кожного з цих векторів вирішується відповідна внутрішня задача, що складається з транспортних задач А1 та Б1. Результати рішення цих задач визначають сумарну вартість (23) транспортування продукту від виробників до споживачів через проміжні пункти. Сукупність отриманих при цьому значень сумарної вартості для різних векторів Y_s , $s = 1, 2, \dots, \ell + 1$, використовується для коригування (поліпшення) набору Y_s . Така схема може бути реалізована будь-яким методом нульового порядку (Боксу-Улсона, Хука-Дживса, Розенброка, Нелдера-Міда). Найбільш ефективним з них вважається метод Нелдера-Міда.

Опишемо коротко особливості організації обчислювальної процедури методу Нелдера-Міда стосовно аналізованої завдання. Координати Y_1, Y_2, \dots, Y_{p+1} точок початкового симплекса задамо матрицею D , $\dim D = \ell \times (\ell + 1)$.

$$D = \begin{pmatrix} \frac{s}{p} & \frac{s}{l} + a & \frac{s}{l} - \frac{a}{l-1} & \dots & \frac{s}{l} - \frac{a}{l-1} \\ \frac{s}{p} & \frac{s}{l} - \frac{a}{l-1} & \frac{s}{l} + a & \dots & \frac{s}{l} - \frac{a}{l-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{s}{p} & \frac{s}{l} - \frac{a}{l-1} & \frac{s}{l} - \frac{a}{l-1} & \dots & \frac{s}{l} + a \end{pmatrix}, \quad \frac{a}{l-1} < \frac{s}{l}.$$

Стовпці цієї матриці задають варіанти розподілу пропускної здатності проміжних пунктів. Кожне з цих розподілів відповідає умові балансу (20). Для кожного варіанту Y_s розподілу вирішуються транспортні задачі А та Б, обчислюються відповідні витрати і їх сума L_s . Значення L_s – критерій якості варіанту, що використовується для ранжирування сумарних витрат в порядку зростання L_s . Далі, відповідно до методу, "найгірша" точка Y_{l+1} відображається щодо центра ваги C – фігури, що виходить після видалення з симплекса "гіршої" точки, по формулі $U = C + \alpha(C - Y_{l+1})$, $\alpha \leq 1$. Отримана точка U піддається аналізу. При цьому, якщо $L(u) < L(Y_1)$, то виконується операція розтягнення, для чого розраховується нова точка $V = C + \gamma(C - Y_{l+1})$, $\gamma = 1.5$, яка замінює "гіршу" точку. Якщо ж $L(Y_1) \leq L(u) \leq L(Y_l)$, то замість "гіршої" використовується точка U . Якщо $L(Y_l) < L(u) \leq L(Y_l)$, то виконується операція стиску, для чого розраховується точка $W = C + \beta(C - Y_{l+1})$, $\beta = 0.5$, замінює "гіршу". Нарешті, якщо $L(u) > L(Y_l)$, то реалізується операція редукції симплекса. При цьому всі точки симплекса "підтягуються" до кращої точки L_1 . При

цьому нові координати точок визначаються за формулою

$$y'_k = \frac{1}{2}(Y_1 + Y_k), \quad k = 2, 3, \dots, l + 1.$$

Покажемо тепер, що, незалежно від способу розрахунку, нові точки будуть коректними, тобто відповідний розподіл пропускної здатності проміжних пунктів буде задовольняти умовам балансу (20). Похідної точки початкового симплекса, що задаються матрицею D , цій умові очевидно задовольняють (сума елементів для будь-якого стовпця матриці дорівнює S). Через ці $(l + 1)$ точок в l – координатному просторі проведемо гіперплощину, описану співвідношенням

$$a_1 y_{1j} + a_{12} y_{2j} + \dots + a_l y_{lj} = s, \quad j = 1, 2, \dots, l + 1.$$

Потрібно довести, що одержувані в результаті реалізації методу нові точки належать цій гіперплощині. Проведемо необхідні викладки для випадку, коли виконана операція віддзеркалення.

При цьому

$$\begin{aligned} C &= \frac{1}{l} \sum_{j=1}^l Y_j = \frac{1}{l} \begin{pmatrix} y_{11} + y_{12} + \dots + y_{1l} \\ y_{21} + y_{22} + \dots + y_{2l} \\ \dots \dots \dots \dots \dots \\ y_{e1} + y_{e2} + \dots + y_{el} \end{pmatrix}, \\ U &= C + \alpha(C - Y_{l+1}) = \frac{1}{l} \begin{pmatrix} \sum_{j=1}^l y_{1j} \\ \dots \\ \sum_{j=1}^l y_{lj} \end{pmatrix} + \alpha \left[\frac{1}{l} \begin{pmatrix} \sum_{j=1}^l y_{1j} \\ \dots \\ \sum_{j=1}^l y_{lj} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} y_{1,l+1} \\ \dots \\ y_{l,l+1} \end{pmatrix} \right] = \\ &= \frac{1}{l} \begin{pmatrix} \sum_{j=1}^l y_{1j} \\ \dots \\ \sum_{j=1}^l y_{lj} \end{pmatrix} + \frac{\alpha}{l} \begin{pmatrix} \sum_{j=1}^l y_{1j} - l y_{1,l+1} \\ \dots \\ \sum_{j=1}^l y_{lj} - l y_{l,l+1} \end{pmatrix} = \\ &= \frac{1}{l} \begin{pmatrix} \sum_{j=1}^l y_{1j} + \alpha \sum_{j=1}^l y_{1j} - \alpha l y_{1,l+1} \\ \dots \\ \sum_{j=1}^l y_{lj} + \alpha \sum_{j=1}^l y_{lj} - \alpha l y_{l,l+1} \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} \frac{1}{l} \sum_{j=1}^l [(1 + \alpha) y_{1,j} - \alpha y_{1,l+1}] \\ \dots \\ \frac{1}{l} \sum_{j=1}^l [(1 + \alpha) y_{l,j} - \alpha y_{l,l+1}] \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Оцінка вектору U представляє координати нової точки, отриманої в результаті операції віддзеркалення. Підставимо їх до рівняння гіперплощини. При цьому

$$\begin{aligned}
& a_1 \left[\frac{1}{l} \sum_{j=1}^l (1+\alpha) y_{1j} - \alpha y_{1,l+1} \right] + \\
& + a_2 \left[\frac{1}{l} \sum_{j=1}^l (1+\alpha) y_{2j} - \alpha y_{2,l+1} \right] + \dots \\
& \dots + a_l \left[\frac{1}{l} \sum_{j=1}^l (1+\alpha) y_{lj} - \alpha y_{l,l+1} \right] = \\
& = \frac{1+\alpha}{l} \left[\sum_{j=1}^e a_1 y_{1j} + \sum_{j=1}^l a_2 y_{2j} + \dots + \sum_{j=1}^l a_l y_{lj} \right] - \\
& - \alpha \left[a_1 y_{1,l+1} + a_2 y_{2,l+1} + \dots + a_l y_{l,l+1} \right] = \\
& \frac{1+\alpha}{l} \sum_{j=1}^l (a_1 y_{1j} + a_2 y_{2j} + \dots + a_l y_{lj}) - \\
& - \alpha (a_1 y_{1,l+1} + a_2 y_{2,l+1} + \dots + a_l y_{l,l+1}) = \\
& = (1+\alpha) S - \alpha S = S,
\end{aligned}$$

що і потрібно було довести. Запропонована декомпозиція структури вихідної трьох індексної задачі (6) – (10) істотно спрощує її шляхом зведення до вирішення більш простих двохіндексних задач.

Однак, принципова особливість реальних транспортних задач (велика кількість обмежень) визначає доцільність застосування для вирішення кожної з внутрішніх задач підхід, заснований на теорії подвійності [7]. Задачі, двоякі по відношенню до завдань А і Б мають вигляд.

Задача А1. Знайти набори $\{u_i\}$, $i=1,2,\dots,m$, $\{v_k\}$, $k=1,2,\dots,\ell$ максимізуючі набори

$$L(u,v) = \sum_{i=1}^m a_i u_i + \sum_{k=1}^{\ell} d_k v_k \quad (24)$$

та що задовольняють обмеженням

$$u_i + v_k \leq c_{ik}, \quad i=1,2,\dots,m, \quad k=1,2,\dots,\ell. \quad (25)$$

Задача Б1. Знайти набори $\{v_k\}$, $k=1,2,\dots,\ell$, $\{w_j\}$, $j=1,2,\dots,n$, максимізуючі

$$L_B(v,w) = \sum_{k=1}^{\ell} d_k v_k + \sum_{j=1}^n b_j w_j \quad (26)$$

та що задовольняють обмеженням

$$v_k + w_j \leq c_{kj}, \quad k=1,2,\dots,p, \quad j=1,2,\dots,n \quad (27)$$

Отримані задачі простіші вихідних прямих задач з наступних причин [14–16]. По-перше, ці задачі, на відміну від прямих двохіндексних задач, є одноіндексними. По-друге, структура обмежень двоїстих задач простіша ніж структура прямих, так як кожне обмеження містить всього дві змінні. І, нарешті, найважливіше спрощення полягає в тому, що для вирішення отриманих двоїстих задач може бути використаний звичайний симплекс – метод, а не специфічний метод потенціалів.

Нарешті, додаткове зниження загальної тривалості виконання задачі може бути отримано

наступним чином. Задачі \bar{A} і \bar{B} , які вирішуються на кожній ітерації, є незалежними. Однак, рішення задачі \bar{A} може бути використано для швидкого отримання початкового плану задачі \bar{B} .

Дійсно, нехай для конкретного вектора U_3 вирішена задача (20) – (25) та отримані набори $\{u_i^{(s)}\}$ та $\{v_k^{(s)}\}$. Підставляючи набір $\{v_k^{(s)}\}$ у (23) отримаємо нерівність

$$w_j \leq c_{kj} - v_k^{(s)}, \quad k=1,2,\dots,l+1, \quad j=1,2,\dots,n. \quad (28)$$

Тепер для відшукування $\{w_j\}$ отримуємо найпростішу задачу лінійного програмування: знайти $\{w_j\}$, максимізуючу $\sum_{j=1}^n b_j w_j$ та що задовольняє (28).

Ця задача вирішується з урахуванням (28) послідовним розрахунком w_j у порядку зменшення значень b_j . Отримане при цьому рішення $\{v_k^{(s)}\}$, $\{w_j\}$ перевіряється на оптимальність і, якщо це необхідно, поліпшується.

Описані вище прийоми успішно вирішують задачі, розмірність яких не є гранично високою ($mn \leq 10^4$). У більш складних задачах може бути використаний ще один метод, для реалізації якого необхідно вирішити наступну попередню задачу. Нехай в системі "поставщики – проміжні пункти – споживачі" задані матриця

$$C_1 = (C_{ik}), \quad i=1,2,\dots,m, \quad k=1,2,\dots,l, \\ i=1,2,\dots,l \text{ і } C_2 = (C_{kj}), \quad k=1,2,\dots,l \quad j=1,2,\dots,n.$$

Тепер для кожної пари (i,j) простим перебором відшукується проміжний пункт k_{ij} , через який забезпечується мінімальна за вартістю доставка одиниці продукту з i у j . При цьому використовується співвідношення

$$\begin{aligned}
C_{ik_{ij}j} &= C_{ik_{ij}} + C_{k_{ij}j} = \\
&= \min_k \{C_{i1} + C_{1j}, C_{i2} + C_{2j}, \dots, C_{ik} + C_{kj}, \dots, C_{il} + C_{lj}\} = \\
&= \hat{C}_{ij}, \quad i=1,2,\dots,m, \quad j=1,2,\dots,n.
\end{aligned} \quad (29)$$

Отримана в результаті матриця $\hat{C} = (\hat{C}_{ij})$ разом з наборами $\{a_i\}$, $\{b_j\}$ формує звичайну двохіндексну транспортну задачу. Вирішення цього завдання визначає обсяг перевезення для кожної пари "постачальник – споживач" із зазначенням відповідного проміжного пункту, які в сукупності задають шуканий план транспортувань. Нехай $X^{(0)} = (X_{ij}^{(0)})$ – отриманий оптимальний план. Оскільки у відповідності (29) для кожної пари (i,j)

визначений найкращий проміжний пункт k_{ij} , то можна записати $X_{ij}^{(0)} = x_{ik_{ij}j}$, $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, n$.

Тоді необхідна пропускна здатність для кожного проміжного пункту може бути визначена за формулою

$$d_k = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ikj}, \quad k = 1, 2, \dots, l. \quad (30)$$

Таким чином, якщо для кожної пари "постачальник - споживач" визначено мінімальний за вартістю маршрут, то задача відшукування раціонального розподілу пропускної здатності проміжних пунктів зводиться до однократного вирішення звичайної двухіндексної транспортної задачі із подальшим використанням співвідношення (30).

Розглянемо, нарешті, ще одну проблему, яка реально виникає при вирішенні задачі транспортування коли попит споживачів – випадковий.

Оцінки необхідної пропускної спроможності проміжних пунктів у цьому випадку можна отримати наступним чином. Для фіксованого набору (a_i) та для сукупності різних випадкових наборів (b_j) при виконанні умови балансу вирішуються двухіндексні транспортні задачі. За результатами вирішення цих задач з використанням (30) визначається сукупність відповідних випадкових значень d_k , $k = 1, 2, \dots, l$. Далі з використанням стандартної статистичної обробки цих значень для кожного проміжного пункту оцінюються m та σ^2 (математичне очікування і дисперсія необхідної пропускної спроможності). В умовах малої вибірки будемо вважати, що невідома щільність розподілу випадкових значень d_k , $k = 1, 2, \dots, l$, є нормальною. Тоді для кожного проміжного пункту може бути розраховане деяке порогове значення необхідної пропускної спроможності, ймовірність перевищення якого не перевищує заданого (досить малого) значення.

Результати

1. Основний результат роботи – новий ефективний метод розрахунку раціонального розподілу пропускних спроможностей проміжних пунктів у триаксіальній транспортній задачі.

Метод заснований на використанні структурної декомпозиції задачі. При цьому рішення вихідної трьохіндексної задачі зведено до послідовного розв'язування набору двухіндексних задач. Оцінимо виграш у обчислювальній складності, отриманий при реалізації цієї ідеї. В [15] отримано співвідношення для оцінки обчислювальної складності задач лінійного програмування. При цьому якщо у задачі мається S змінних та T обмежень, то обчислювальна складність F задачі оцінюється співвідношенням $F_0 = O(S^4T + S^3T^2 + S^2T^3)$. Нехай у вихідній трьохіндексній задачі є m постачальників, n

споживачів та l проміжних центрів. Тоді $S = mne$, а $T = m + n + e - 2$. При цьому обчислювальна складність такого завдання визначається співвідношенням

$$F_0 = O[(mnl)^4(m+n+l) + (mnl)^3(m+n+l)^2 + (mnl)^2(m+n+l)^3]. \quad (31)$$

При реструктуризації рішення цієї задачі зведено до вирішення p двухіндексних задач, в яких $S = m\ell$, $T = m + \ell$, та r двухіндексних задач, в яких $S = n\ell$ и $T = n + \ell$. Обчислювальна складність цих завдань оцінюється співвідношеннями

$$F_1 = O[(m\ell)^4(m+\ell) + (m\ell)^3(m+\ell)^2 + (m\ell)^2(m+\ell)^3]. \quad (32)$$

$$F_2 = O[(n\ell)^4(n+\ell) + (n\ell)^3(n+\ell)^2 + (n\ell)^2(n+\ell)^3]. \quad (33)$$

Виграш, що отримується при реструктуризації, дорівнює $\eta = \frac{F_0}{\ell[F_1 + F_2]}$.

2. Запропоновано наближений метод розв'язання задачі для випадку, коли розмірність задачі виявляється гранично високою.

Обговорення

Важлива перевага запропонованого методу – висока швидкодія. Висока ефективність методу – результат комбінації двох підходів: структуризації і застосування теорії подвійності. Ідейна інтерпретація процедури структуризації така: вихідна складна трьохіндексна оптимізаційна задача замінюється набором набагато більш простих двохіндексних задач. Цей же ефект досягається і при заміні прямих транспортних задач їх подвійними аналогами: двохіндексна задача перетворюється на одноіндексну. Запропонований метод успішно вирішує задачу раціонального розподілу сумарної обмеженої пропускної здатності проміжних пунктів, мінімізуючи сумарну вартість перевезень. Природне обмеження на область застосування методу пов'язано з використанням допущення, що вихідні параметри задачі (вартості транспортування вантажів) – відомі детерміновані константи. У реальності ці параметри задані або неточно [16-17], або нечітко [18-20]. Виникаючі задачі не можуть бути вирішені традиційними оптимізаційними методами. Можливі підходи до їх вирішення запропоновані в [21-23].

Висновки

1. Вперше отримано метод розрахунку пропускної здатності проміжних пунктів у розгалуженій транспортній мережі, що відрізняється тим, що вихідна складна багатоіндексна задача зведена до набору більш простих задач меншою індексних.

2. Удосконалено обчислювальну процедуру вирішення вихідної задачі, що відрізняється

комплексним використанням двох підходів подвійності), що дозволило істотно підвищити спрощення (реструктуризація та застосування теорії ефективність вирішення вихідної задачі.

Список літератури

1. Бирман И. Я. Транспортная задача линейного программирования. М. : Изд. эк. лит., 1962. 262 с.
2. Серая О. В. Многомерные модели логистики в условиях неопределенности. Х. : ФОП Стеценко, 2010. 512 с.
3. Нестеров Б. П. Транспортная задача линейного программирования. М. : МПС, 1962. 189 с.
4. Раскин Л. Г. Анализ сложных систем и элементы теории управления. М. : Сов. радио, 1976. 344 с.
5. Юдин Д. Б., Гольштейн Е. Г. Задачи линейного программирования транспортного типа. М.: Сов. радио, 1969. 382 с.
6. Dantzig G. B. Linear Programming and Extensions. New Jersey: Princeton University Press, 1948. 634 p.
7. Motzkin T. S. The multi-index transportation problem. *Bulletin of the American Mathematical Society*. 1952. Vol. 58. No. 4. P. 32.
8. Halley K. B. The solid transportation problem. *Operations Research*. 1962. Vol. 10. № 4. P. 62–71.
9. Corban A. On a three-dimensional transportation problem. *Revue Roumaine De Mathematiques Pures et Appliquees*. 1965. Vol. 11. No. 1. P. 91–98.
10. Corban A. Transportation problem with intermediate centres. *Revue Roumaine De Mathematiques Pures et Appliquees*. 1971. Vol. 16. No. 9. P. 34–43.
11. Corban A. On a three-dimensional transportation problem with interchangeable centres. *Revue Roumaine De Mathematiques Pures et Appliquees*. 1965. Vol. 11. No. 4. P. 65.
12. Miħu C. Programe tridimensionale. Bucur: Ed. Tehn. 1970. 168 p.
13. Анисимова Н. П., Ванина Е. А. Линейное программирование. СПб. : НИЧ ВШЭ, 2012. 700 с.
14. Лунгу К. А. Линейное программирование. М. : ФИЗМАТГИЗ, 2005. 128 с.
15. Березнев В. А. О полиномиальной сложности симплекс-метода. *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 2004. Том 44, №7. С. 1244–1260.
16. Pawlak Z. Rough Sets: Theoretical Aspects of Reasoning about Data. Pawlak. Dordrecht : Kluwer Academic Publisher, 1991. 284 p.
17. Slowinski R., Vanderpooten, D. A generalized definition of rough approximations based on similarity. *IEEE Transactions on Knowledge and data Engineering*. 2000. Vol. 12. No. 2. P. 331–336.
18. Zadeh L. A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy Sets and Systems*. 1978. Vol. 1. No. 1. P. 3–28.
19. Кофман, А. Введение в теорию нечетких множеств: пер. с франц. М. : Радио и связь, 1982. 486 с.
20. Раскин Л. Г., Серая О. В. Нечеткая математика. Х. : Парус, 2008. 352 с.
21. Raskin L., Sira O. Method of solving fuzzy problems of mathematical programming. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 5. Issue 4. P. 23–28. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.81292>
22. Sira O. V., Al-Shqeerat K. H. A New Approach for Resolving Equations with Fuzzy Parameters. *European Journal of Scientific Research*. 2009. Vol. 38. Issue 4. P. 619–625.
23. Raskin L., Sira O. Fuzzy models of rough mathematics. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 6. Issue 4. P. 53–60. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.86739>

References

1. Birman, I. Ya. (1962), *Transport linear programming problem*, Eksmo, Moscow, 262 p.
2. Sira, O. V. (2010), *Multidimensional Logistics Models Under Uncertainty*, FOP Stetsenko, Kharkiv, 512 p.
3. Nesterov, B. P. (1962), *Transport linear programming problem*, MPS, Moscow, 189 p.
4. Raskin, L.G. (1976), *Analysis of complex systems and elements of control theory*, Sovetskoe radio, Moscow, 344 p.
5. Yudin, D. B., Holstein, Ye. G. (1969), *Transport-type linear programming problems*, Sovetskoe radio, Moscow, 382 p.
6. Dantzig, G. B. (1948), *Linear Programming and Extensions*, Princeton University Press, New Jersey, 634 p.
7. Motzkin, T. S. (1952), "The multi-index transportation problem", *Bulletin of the American Mathematical Society*, Vol. 58, No. 4, P. 32.
8. Halley, K. B (1962), "The solid transportation problem", *Operations Research*, Vol. 10, No. 4, P. 62–71.
9. Corban, A. (1965), "On a three-dimensional transportation problem", *Revue Roumaine De Mathematiques Pures et Appliquees*, Vol. 11, No. 1, P. 91–98.
10. Corban, A. (1971), "Transportation problem with intermediate centres", *Revue Roumaine De Mathematiques Pures et Appliquees*, Vol. 16, No. 9, P. 34–43.
11. Corban, A. (1965), "On a three-dimensional transportation problem with interchangeable centres", *Revue Roumaine De Mathematiques Pures et Appliquees*, Vol. 11, No. 4, P. 65.
12. Miħu, C. (1970), *Programe tridimensionale*, Ed. Tehn., Bucur, 168 p.
13. Anisimova, N. P., Vanina, E. A., (2012), *Linear programming*, Nich Vshe, St. Petersburg, 700 p.
14. Lungu, K. (2005), *Linear programming*, FIZMATGIZ, Moscow, 128 p.
15. Berезnev, V. A. (2004), "On the polynomial complexity of the simplex method", *Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics*, Vol. 44, No. 7. P. 1244–1260.
16. Pawlak, Z. (1991), *Rough Sets: Theoretical Aspects of Reasoning about Data*, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, 284 p.
17. Slowinski, R., Vanderpooten, D. (2000), "Generalized definition of rough approximations based on similarity", *IEEE Transactions on Knowledge and data Engineering*, Vol. 12, No. 2, P. 331–336.
18. Zadeh, L. A. (1978), "Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility", *Sets and Systems*, Vol. 1, No. 1, P. 3–28.
19. Kofman, A. (1982), *Introduction to fuzzy set theory*, Sovetskoe radio, Moscow, 486 p.
20. Raskin, L. G., Sira, O. V. (2008), *Fuzzy mathematics*, Parus, Kharkiv, 352 p.
21. Raskin, L., Sira, O. (2016), "Method of solving fuzzy problems of mathematical programming", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 5, Issue 4, P. 23–28. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.81292>
22. Sira, O. V., Al-Shqeerat, K. H. (2009), "A New Approach for Resolving Equations with Fuzzy Parameters", *European Journal of Scientific Research*, Vol. 38, Issue 4, P. 619–625.
23. Raskin, L., Sira, O. (2016), "Fuzzy models of rough mathematics", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 6, Issue 4, P. 53–60. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.86739>

Надійшла (Received) 20.02.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Раскін Лев Григорович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", професор кафедри розподілених інформаційних систем і хмарних технологій, Харків, Україна; email: topology@ukr.net; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9015-4016>.

Раскин Лев Григорьевич – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", профессор кафедры распределенных информационных систем и облачных технологий, Харьков, Украина.

Raskin Lev – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor of the Department of Distributed Information Systems and Cloud Technologies, Kharkiv, Ukraine.

Сіра Оксана Володимирівна – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", професор кафедри розподілених інформаційних систем і хмарних технологій, Харків, Україна; email: topology@ukr.net; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4869-2371>.

Серая Оксана Владимировна – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", профессор кафедры распределенных информационных систем и облачных технологий, Харьков, Украина.

Sira Oksana – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor of the Department of Distributed Information Systems and Cloud Technologies, Kharkiv, Ukraine.

Парфенюк Юрій Леонідович – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", аспірант кафедри розподілених інформаційних систем і хмарних технологій, Харків, Україна; email: parfuriy.l@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5357-1868>.

Парфенюк Юрий Леонидович – Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", аспирант кафедры распределенных информационных систем и облачных технологий, Харьков, Украина.

Parfeniuk Yurii – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Postgraduate Student of the Department of Distributed Information Systems and Cloud Technologies, Kharkiv, Ukraine.

УПРАВЛЕНИЕ ПРОПУСКНЫМИ СПОСОБНОСТЯМИ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ПУНКТОВ В РАЗВЕТВЛЕННОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ

Предмет. Рассмотрен важный для практики частный случай транспортной задачи с промежуточными пунктами, когда пропускные способности этих пунктов не заданы. **Цель.** Отыскание неизвестного распределения пропускных способностей промежуточных пунктов, которое минимизирует суммарные транспортные расходы. **Задачи.** Постановка задачи управления пропускными способностями промежуточных пунктов в триаксиальной транспортной задаче. Разработанный метод обладает высоким быстродействием за счет использования структурной декомпозиции задачи. Метод имеет невысокую вычислительную сложность, что является весомым преимуществом для практического применения. **Метод.** Предложено два метода решения задачи. Первый реализует итерационную процедуру улучшения начального плана для двойственной модели исходной задачи. Вычислительная схема на каждой итерации является двухшаговой. На первом шаге итерации решается координирующая задача, решение которой задает очередной набор значений пропускных способностей промежуточных пунктов. На втором шаге этот набор используется для решения исходной транспортной задачи. Получаемое в результате решение проверяется на оптимальность. Если оно не оптимально, то выполняется переход к очередной итерации. Для реализации предложенной вычислительной схемы использован метод оптимизации нулевого порядка Нелдера-Мида. **Результаты.** Доказана возможность конструктивного использования этого метода с учетом большого числа ограничений транспортного типа. С целью упрощения технологии решения транспортных задач на каждой итерации алгоритма введены двойственные их модели. В связи с тем, что вычислительная сложность предлагаемого метода быстро растет с увеличением числа промежуточных пунктов, предложен простой альтернативный приближенный метод решения задачи. **Выводы.** Предложенный метод решает задачу расчета пропускной способности промежуточных пунктов в системе "производство - доставка - потребление".

Ключевые слова: транспортная задача с промежуточными пунктами; пропускные способности пунктов не заданы; методы решения.

MANAGING THE CAPACITY OF INTERMEDIATE POINTS IN AN EXTENSIVE TRANSPORT NETWORK

Relevance. A special case of a transport problem with intermediate points, when the throughput capacity of these points is not specified, is considered, which is important for practice. **Purpose.** The problem of finding an unknown distribution of the throughput capacity in intermediate points, which minimizes the total transport costs, is formulated. **Method.** Two methods for solving the problem are proposed. The first one implements an iterative procedure for improving the initial plan for dual model of original problem. The computational scheme at each iteration is a two-step one. At the first step of iteration, a coordinating problem is solved, the solution of which sets the next set of values for throughput of intermediate points. In the second step, this set is used to solve the original transport problem. The resulting solution is tested for optimality. If it is not optimal, then transition to the next iteration is performed. To implement proposed computational scheme, the Nelder-Mead zero-order optimization method was used. **Tasks.** Statement of problem for controlling the throughput capacities of intermediate points in triaxial transport problem. The developed method has high performance due to the use of the structural decomposition of problem. The method has low computational complexity, which is a significant advantage for practical application. **Results.** The constructive possibility use of this method has been proved, taking into account a large number of transport-type restrictions. In order to simplify the technology for solving transport problems at each iteration of the algorithm, their dual models are introduced. Due to the fact that computational complexity of proposed method grows rapidly with an increase in the number of intermediate points, a simple alternative approximate method for solving the problem is proposed. **Conclusions.** The proposed method solves problem of calculating the throughput of intermediate points in "production - delivery - consumption" system.

Keywords: transport problem with intermediate points, throughput points are not specified, methods of solution.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Раскин Л. Г., Сіра О. В., Парфенюк Ю. Л. Управління пропускними здатностями проміжних пунктів у розгалуженій транспортній мережі. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 1 (15). С. 141–148. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.141>

Raskin, L., Sira, O., Parfeniuk, Yu. (2021), "Managing the capacity of intermediate points in an extensive transport network", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (15), P. 141–148. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.141>

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Аврунін О. Г.	106
Агунг Чандра	69
Артюх Р.В.	59
Базілевич К. О.	5
Бакурова А. В.	14
Безкоровайний В. В.	23
Близнюк Д. С.	120
Бондаренко І. С.	106
Вознюк С. М.	32
Гур'янова Л. С.	32
Даншина С. Ю.	43
Дацок О. М.	113
Демська Н. П.	132
Демченко К. О.	98
Єрошенко О. А.	113
Єсіпов В. В.	59
Золотарьов Д. О.	53
Кононенко О. І.	76
Косенко В. В.	59
Крістін Наталія	69
Малєєва О. В.	59
Меняйлов Є. С.	5
Момот Т. В.	83
Мурасєв Є. В.	83
Назаров Н. К.	91
Назарова Г. В.	98
Невлюдов І. Ш.	120
Невлюдова В. В.	132
Нікітін Д. О.	120
Олександров Ю. М.	132
Осадчий С. І.	132
Панасенко О. В.	32
Парфенюк Ю. Л.	141
Прасол І. В.	113
Разумов-Фризюк Е. А.	120
Раскін Л. Г.	141
Рябенко А. Є.	14
Сіра О. В.	141
Стрілець Р. Є.	120
Судік А. О.	23
Терещенко Е. В.	14
Чумаченко Д. І.	5
Широкорад Д. В.	14
Юськів О. І.	14

ALPHABETICAL INDEX

Avrunin Oleg	106
Chandra Agung	69
Artiukh Roman	59
Bazilevych Kseniia	5
Bakurova Anna	14
Beskorovainyi Vladimir	23
Bliznyuk Danila	120
Bondarenko Igor	106
Voznyuk Serhiy	32
Guryanova Lidiya	32
Danshyna Svitlana	43
Datsok Oleh	113
Demska Nataliia	132
Demchenko Kateryna	98
Yeroshenko Olha	113
Yesipov Vadym	59
Zolotariov Denis	53
Kononenko Oksana	76
Kosenko Viktor	59
Natalia Christine	69
Malyeyeva Olga	59
Meniailov Ievgen	5
Momot Tetiana	83
Muraev Yevgen	83
Nazarov Nikita	91
Nazarova Galyna	98
Nevliudov Igor	120
Nevliudova Viktoriia	132
Nikitin Dmytro	120
Oleksandrov Yuriy	132
Osadchy Sergei	132
Panasenko Oksana	32
Parfeniuk Yurii	141
Prasol Igor	113
Razumov-Fryzyuk Evgeny	120
Raskin Lev	141
Riabenko Anton	14
Sira Oksana	141
Strelets Roman	120
Sudik Antonii	23
Tereschenko Elina	14
Chumachenko Dmytro	5
Shyrokorad Dima	14
Yuskiv Olesia	14

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**СУЧАСНИЙ СТАН НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА
ТЕХНОЛОГІЙ В ПРОМИСЛОВОСТІ**

Щоквартальний науковий журнал

№ 1 (15), 2021

Відповідальний секретар журналу *І. Г. Перова*
Відповідальний за випуск *А. А. Коваленко*
Комп'ютерна верстка *О. Ю. Персіянова*

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:

Україна, 61166, м. Харків, проспект Науки, 14

Тел.: +38 (057) 704-10-51

Веб-сайт: <http://itssi-journal.com>

E-mail: journal.itssi@gmail.com

Формат 60×84/8. Умов. друк. арк. 16,88. Тираж 150 прим.

Відруковано з готових оригінал-макетів в типографії ФОП Андреев К.В.
Єдиний державний реєстр юридичних осіб та фізичних осіб-підприємців.
Запис №24800170000045020 від 30.05.2003.

61166, Харків, вул. Серпова, 4, тел. 063-993-62-73
e-mail: ep.zakaz@gmail.com