

ISSN 2786-5460 (Print)
ISSN 2786-5479 (Online)

МІЖРЕГІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ УПРАВЛІННЯ ПЕРСОНАЛОМ
INTERREGIONAL ACADEMY OF PERSONNEL MANAGEMENT



**НАУКОВІ ПРАЦІ
МІЖРЕГІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ
УПРАВЛІННЯ ПЕРСОНАЛОМ**

**ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ
ТА СУСПІЛЬСТВО**

**SCIENTIFIC WORKS
OF INTERREGIONAL ACADEMY
OF PERSONNEL MANAGEMENT**

**INFORMATION TECHNOLOGY
AND SOCIETY**

**Випуск 1 (7), 2023
Issue 1 (7), 2023**



Видавничий дім
«Гельветика»
2023

*Рекомендовано до друку Вченою радою
Міжрегіональної Академії управління персоналом
(протокол № 6 від 31 травня 2023 року)*

Інформаційні технології та суспільство / [головний редактор О. Попов]. – Київ : Міжрегіональна Академія управління персоналом, 2023. – Випуск 1 (7). – 88 с.

Журнал «Інформаційні технології та суспільство» є науковим рецензованим виданням, в якому здійснюється публікація матеріалів науковців різних рівнів у вигляді наукових статей з метою їх поширення як серед вітчизняних дослідників, так і за кордоном.

Редакційна колегія не обов'язково поділяє позицію, висловлену авторами у статтях, та не несе відповідальності за достовірність наведених даних і посилань.

Головний редактор: Попов О. О. – член-кор. НАН України, д-р техн. наук, професор, с.н.с., заступник директора з науково-організаційної роботи, Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України.

Редакційна колегія:

Василенко М. Д. – д-р фіз.-мат. наук, проф., професор кафедри кібербезпеки, Національний університет «Одеська юридична академія»; **Горбов І. В.** – канд. техн. наук, с.н.с., старший науковий співробітник, Інститут проблем реєстрації інформації НАН України; **Дуднік А. С.** – д-р техн. наук, доц., доцент кафедри мережевих та інтернет технологій, Київський національний університет імені Тараса Шевченка; **Євсєєв С. П.** – д-р техн. наук, професор кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця; **Зибін С. В.** – д-р техн. наук, доц., завідувач кафедри інженерії програмного забезпечення, Національний авіаційний університет; **Кавун С. В.** – д-р екон. наук, канд. техн. наук, проф., завідувач кафедри комп'ютерних інформаційних систем та технологій, Міжрегіональна Академія управління персоналом; **Комарова Л. О.** – д-р техн. наук, с.н.с., директор Навчально-наукового інституту інформаційної безпеки та стратегічних комунікацій, Національна академія Служби безпеки України; **Мілов О. В.** – д-р техн. наук, професор кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця; **Охріменко Т. О.** – канд. техн. наук, старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії протидії кіберзагрозам в авіаційній галузі, Національний авіаційний університет; **Рудніченко М. Д.** – канд. техн. наук, доц., доцент кафедри інформаційних технологій, Державний університет «Одеська політехніка»; **Скुरатовський Р. В.** – канд. фіз.-мат. наук, доц., доцент кафедри обчислювальної математики та комп'ютерного моделювання, Міжрегіональна Академія управління персоналом; **Супрун О. М.** – канд. фіз.-мат. наук, доц., доцент кафедри програмних систем і технологій, Київський національний університет імені Тараса Шевченка; **Табунщик Г. В.** – канд. техн. наук, проф., професор кафедри програмних засобів, Національний університет «Запорізька політехніка»; **Фомін О. О.** – д-р техн. наук, доц., професор кафедри комп'ютеризованих систем управління, професор кафедри прикладної математики та інформаційних технологій, Державний університет «Одеська політехніка»; **Хохлячова Ю. Є.** – канд. техн. наук, доц., доцент кафедри безпеки інформаційних технологій, Національний авіаційний університет; **Чолишкіна О. Г.** – канд. техн. наук, доц., директор Інституту комп'ютерно-інформаційних технологій та дизайну, Міжрегіональна Академія управління персоналом; **Чорний О. П.** – доктор технічних наук, професор, директор Навчально-наукового інституту електричної інженерії та інформаційних технологій, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського; **Юдін О. К.** – д-р техн. наук, проф., директор центру кібербезпеки Навчально-наукового інституту інформаційної безпеки та стратегічних комунікацій, Національна академія Служби безпеки України; **Гопєєнко Віктор** – dr. sc. ing., проф., проректор з наукової роботи, директор навчальної програми магістратури «Комп'ютерні системи», Університет прикладних наук ISMA (Латвійська Республіка); **Leszczyna Rafal** – dr hab. inż., професор кафедри комп'ютерних наук у менеджменті, Гданський технологічний університет (Республіка Польща).

*Свідчення про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації
«Інформаційні технології та суспільство» Серія КВ № 24815-14755Р від 27.04.2021 р.*

Відповідно до Наказу МОН України № 1290 від 30 листопада 2021 року (додаток 3) журнал включено до Переліку наукових фахових видань України (категорія Б) зі спеціальностей 121 – Інженерія програмного забезпечення, 122 – Комп'ютерні науки, 123 – Комп'ютерна інженерія, 124 – Системний аналіз, 125 – Кібербезпека, 126 – Інформаційні системи та технології.

Усі електронні версії статей журналу оприлюднюються на офіційній сторінці видання
<http://journals.maup.com.ua/index.php/it>

Статті у виданні перевірені на наявність плагіату за допомогою програмного забезпечення
StrikePlagiarism.com від польської компанії Plagiat.pl.

*Recommended for publication
by Interregional Academy of Personnel Management
(Minutes No. 6 dated 31 May 2023)*

Information Technology and Society / [chief editor Oleksandr Popov]. – Kyiv : Interregional Academy of Personnel Management, 2023. – Issue 1 (7). – 88 p.

Journal «Information Technology and Society» is a peer-reviewed scientific edition, which publishes materials of scientists of various levels in the form of scientific articles for the purpose of their dissemination both among domestic researchers and abroad.

Editorial board do not necessarily reflect the position expressed by the authors of articles, and are not responsible for the accuracy of the data and references.

Chief editor: Oleksandr Popov – Corresponding Member of NAS of Ukraine, Doctor of Engineering, Professor, Senior Research Scientist, Deputy Director for Scientific-Organizational Affairs, Institute of Environmental Geochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine.

Editorial Board:

Mykola Vasylenko – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Professor at the Department of Cybersecurity, National University «Odesa Law Academy»; **Ivan Horbov** – PhD in Engineering, Senior Research Associate, Senior Research Fellow, Institute for Information Recording of NAS of Ukraine; **Andrii Dudnik** – Doctor of Engineering, Associate Professor, Senior Lecturer at the Department of Networking and Internet Technologies, Taras Shevchenko National University of Kyiv; **Serhii Yevseiev** – Doctor of Engineering, Professor at the Department of Cybersecurity and Information Technologies, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics; **Serhii Zybin** – Doctor of Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Software Engineering, National Aviation University; **Serhii Kavun** – Doctor of Economics, PhD in Engineering, Professor, Head of the Department of Computer Information Systems and Technologies Interregional Academy of Personnel Management; **Larysa Komarova** – Doctor of Engineering, Senior Research Scientist, Laureate of State Prize, Director of Educational-Scientific Institute of Information Security and Strategic Communications, National Academy of the Security Service of Ukraine; **Oleksandr Milov** – Doctor of Engineering, Professor at the Department of Cybersecurity and Information Technologies, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics; **Tetiana Okhrimenko** – PhD in Engineering, Senior Research Scientist at the Scientific Research Laboratory for Countering Aviation Cyberthreats, National Aviation University; **Mykola Rudnichenko** – PhD in Engineering, Associate Professor, Senior Lecturer at the Department of Information Technologies, Odessa Polytechnic State University; **Ruslan Skuratovskiy** – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Senior Lecturer at the Department of Computational Mathematics and Computer Modeling, Interregional Academy of Personnel Management; **Olha Suprun** – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Senior Lecturer at the Department of Software Systems and Technologies, Taras Shevchenko National University of Kyiv; **Halyna Tabunshchik** – PhD in Engineering, Professor, Professor at the Department of Software Tools, “Zaporizhzhia Polytechnic” National university; **Oleksandr Fomin** – Doctor of Engineering, Associate Professor, Professor at the Department of Computerized Control Systems, Professor at the Department of Applied Mathematics and Information Technologies, Odessa Polytechnic State University; **Yuliia Khokhlachova** – PhD in Engineering, Associate Professor, Senior Lecturer at the Department of Information Technology Security, National Aviation University; **Olha Cholyshkina** – PhD in Engineering, Associate Professor, Director of the Institute of Computer Information Technologies and Design, Interregional Academy of Personnel Management; **Oleksii Chornyi** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Educational and Scientific Institute of Electrical Engineering and Information Technologies, Kremenchuk National University named after Mykhailo Ostrogradskiy; **Oleksandr Yudin** – Doctor of Engineering, Professor, Director of the Cybersecurity Center of the Educational-Scientific Institute of Information Security and Strategic Communications, National Academy of the Security Service of Ukraine; **Hopeienko Viktor** – dr. sc. ing., Professor, Vice Rector for Research, Director of the study programme “Computer systems”, ISMA University of Applied Sciences (Republic of Latvia); **Leszczyna Rafal** – dr hab. inż., Profesor, Katedra Informatyki w Zarządzaniu, Politechnika Gdańska (Republic of Poland).

*Print media registration certificate «Information Technology and Society»
series KV No. 24815-14755P dated 27.04.2021*

According to the Decree of MES No. 1290 (Annex 3) dated November 30, 2021, the journal was included in the List of scientific professional publications of Ukraine (category B) in specialties 121 – Software engineering, 122 – Computer sciences, 123 – Computer engineering, 124 – Systems analysis, 125 – Cybersecurity, 126 – Information systems and technologies.

All electronic versions of articles in the collection are available on the official website edition
<http://journals.maup.com.ua/index.php/it>

The articles were checked for plagiarism using the software
StrikePlagiarism.com developed by the Polish company Plagiat.pl.

© Interregional Academy of Personnel Management, 2023
© Copyright by the contributors, 2023

ЗМІСТ

Наталія БЕРНАЦЬКА, Ельвіра ДЖУМЕЛЯ, Орест КОЧАН РОЗРОБКА ВЕБ-ІНТЕРФЕЙСУ ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНОЇ СИСТЕМИ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ З ВИКОРИСТАННЯМ БІБЛІОТЕКИ REACT	6
Надія БОЛЮБАШ, Михайло ОЛІЙНИК МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ПРОГРЕСИВНОГО ВЕБЗАСТОСУНКУ БІБЛІОТЕКИ НА ОСНОВІ МОДЕЛІ RAIL	13
Nikolai VASILENKO, Anton SYSOIENKO METHOD FOR INCREASING THE STABILITY OF PSEUDORANDOM SEQUENCES SYNTHESIZED ON THE BASIS OF MODULO ADDITION OPERATIONS	21
Юлія КАЗИМИРЕНКО, Ігор МИХЕЛЄВ, Микола МАТВЄЄВ СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ВИПРОБУВАНЬ ГАЗОТУРБІННИХ КАМЕР ЗГОРЯННЯ У СЕРЕДОВИЩІ COMMON LISP	29
Василь КОСТИРКО, Анатолій КОСТЕНКО, Михайло ПЛЕША ЗАСТОСУВАННЯ СОЛВЕРІВ Z3 В СИСТЕМІ ВЕРИФІКАЦІЇ PYTHON-ПРОГРАМ.....	36
Валентина МАКОЄДОВА МОДЕЛЮВАННЯ СУПРОВОДУ ВСТУПНОЇ КАМПАНІЇ ЗАКЛАДУ ВИЩОЇ ОСВІТИ.....	44
Андрій НЕСТЕРУК, Богдан КОРНІЄНКО СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ ЗНЕВОДНЕННЯ ТА ГРАНУЛЮВАННЯ У ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ.....	50
Олег ОСАДЧИЙ ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ДІАГНОСТИЦІ ПСИХОЛОГІЧНОГО СТАНУ	59
Yelyzaveta RACHENKO, Nataliia DOTSENKO APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE FORMATION OF A PROJECT TEAM IN THE FIELD OF AEROSPACE COMMUNICATIONS	66
Володимир ТИХОХОД, Лариса КУБЛІЙ, Андрій ОНИСЬКО ДОСЛІДЖЕННЯ БАГАТОЗВ'ЯЗНИХ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ ШЛЯХОМ РОЗВ'ЯЗАННЯ СИСТЕМ ІНТЕГРАЛЬНИХ РІВНЯНЬ ВОЛЬТЕРА І РОДУ МЕТОДОМ КОЛОКАЦІЙ	73
Володимир ТОКАР, Станіслав ДУБИКІВСЬКИЙ, Катерина ПАЛАГУТА, Юлія САМОЙЛЕНКО, Валерій ПАШОРІН АРХІТЕКТУРА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЗВО З УРАХУВАННЯМ ВИМОГ ЄС.....	80

CONTENTS

Natalia BERNATSKA, Elvira DZHUMELIA, Orest KOCHAN DEVELOPMENT OF THE WEB INTERFACE OF THE INFORMATION AND ANALYTICAL SYSTEM OF ENVIRONMENTAL MONITORING USING THE REACT LIBRARY.....	6
Nadiia Boliubash, Mykhailo OLIINYK METHODS FOR INCREASING THE PERFORMANCE OF THE LIBRARY'S PROGRESSIVE WEB APPLICATION BASED ON THE RAIL MODEL	13
Nikolai VASILENKO, Anton SYSOIENKO METHOD FOR INCREASING THE STABILITY OF PSEUDORANDOM SEQUENCES SYNTHESIZED ON THE BASIS OF MODULO ADDITION OPERATIONS	21
Yuliia KAZYMYRENKO, Igor MYKHELIEV, Mykola MATVYEYEV SYSTEMATIZATION AND VISUALIZATION OF EXPERIMENTAL TESTS OF GAS TURBINE COMBUSTION CHAMBERS IN THE COMMON LISP ENVIRONMENT.....	29
Vasyl KOSTYRKO, Anatolij KOSTENKO, Mykhaylo PLESHA APPLICATION OF Z3 SOLVERS IN THE VERIFICATION SYSTEM FOR PYTHON PROGRAMS.....	36
Valentyna MAKOIEDOVA MODELING OF SUPPORT FOR AN INTRODUCTORY CAMPAIGN OF A HIGHER EDUCATION INSTITUTION	44
Andrii NESTERUK, Bogdan KORNIYENKO CONTROL SYSTEMS FOR DEHYDRATION AND GRANULATION PROCESSES IN A FLUIDIZED BED.....	50
Oleh OSADCHYI USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN MENTAL HEALTH DIAGNOSIS	59
Yelyzaveta RACHENKO, Nataliia DOTSENKO APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE FORMATION OF A PROJECT TEAM IN THE FIELD OF AEROSPACE COMMUNICATIONS	66
Volodymyr TYKHOKHOD, Larysa KUBLII, Andrii ONYSKO RESEARCH OF MULTICONNECTED DYNAMIC SYSTEM BY SOLVING OF SYSTEMS OF VOLTERRA INTEGRAL EQUATIONS OF THE FIRST KIND BY THE METHOD OF COLOCATIONS	73
Volodymyr TOKAR, Stanislav DUBYKIVSKYI, Kateryna PALAGUTA, Yuliia SAMOILENKO, Valery PASHORIN THE ARCHITECTURE OF INTELLIGENT DECISION-MAKING SYSTEMS OF THE INFORMATION INFRASTRUCTURE OF HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS CONSIDERING EU REQUIREMENTS	80

УДК 004.896+ 504.064
DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.1.1>

Наталія БЕРНАЦЬКА

кандидат технічних наук, інженер 1 категорії кафедри фізичної, аналітичної та загальної хімії Інституту хімії та хімічних технологій, Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013 (maksymiv.natali@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-6062-1971

Ельвіра ДЖУМЕЛЯ

доктор філософії, асистент кафедри програмного забезпечення Інституту комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013 (elvira.a.dzhumelia@lpnu.ua)

ORCID: 0000-0003-3146-8725

Орест КОЧАН

доктор технічних наук, професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Інституту комп'ютерних технологій, автоматики та метрології, Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013 (orest.v.kochan@lpnu.ua)

ORCID: 0000-0002-3164-3821

Natalia BERNATSKA

Candidate of Technical Sciences, Engineer of the 1st Category of the Department of Physical, Analytical and General Chemistry of the Institute of Chemistry and Chemical Technologies, Lviv Polytechnic National University, S. Bandery str., 12, Lviv, 79013 (maksymiv.natali@gmail.com)

Elvira DZHUMELIA

Doctor of Philosophy, Assistant of the Software Department of the Institute of Computer Sciences and Information Technologies, Lviv Polytechnic National University, S. Bandery str., 12, Lviv, 79013 (elvira.a.dzhumelia@lpnu.ua)

Orest KOCHAN

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Information and Measurement Technologies of the Institute of Computer Technologies, Automation and Metrology, Lviv Polytechnic National University, S. Bandery str., 12, Lviv, 79013 (orest.v.kochan@lpnu.ua)

Бібліографічний опис статті: Бернацька Н., Джумеля Е., Кочан О. (2023). Розробка веб-інтерфейсу інформаційно-аналітичної системи екологічного моніторингу з використанням бібліотеки React. *Інформаційні технології та суспільство*, 1 (7), 6–12. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.1.1>

Bibliographic description of the article: Bernatska N., Dzhumelia E., Kochan O. (2023). Rozrobka veb-interfeisu informatsiino-analitychnoi systemy ekolohichnoho monitorynhu z vykorystanniam biblioteki React [Development of the web interface of the information and analytical system of environmental monitoring using the React library]. *Informatsiini tekhnolohii ta suspilstvo – Information technology and society*, 1 (7), 6–12. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.1.1>

РОЗРОБКА ВЕБ-ІНТЕРФЕЙСУ ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНОЇ СИСТЕМИ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ З ВИКОРИСТАННЯМ БІБЛІОТЕКИ REACT

Екологічний моніторинг довкілля є сучасною формою реалізації процесів екологічної діяльності за допомогою засобів інформатизації і забезпечує регулярну оцінку і прогнозування стану середовища, життєдіяльності суспільства та умов функціонування екосистем для прийняття управлінських рішень щодо екологічної безпеки, збереження природного середовища та раціонального природокористування. Екологічний моніторинг є першим і головним етапом у забезпеченні екологічної безпеки, запобіганні і ліквідації негативного впливу господарської діяльності на довкілля, збереженні природних ресурсів. Інформаційно-аналітичне забезпечення екологічного моніторингу необхідне для реалізації таких можливостей як одержання первинних даних від суб'єктів моніторингу, збереження, обробка, передача та аналіз інформації про стан навколишнього природного середовища. Метою даної статті є створення веб-інтерфейсу інформаційно-аналітичної системи з допомогою бібліотеки React. Розроблено веб-інтерфейс інформаційно-аналітичної системи підтримки прийняття рішень на основі інтерактивної карти пунктів відбору проб води та візуалізації отриманих результатів екологічного моніторингу. Для розробки використано бібліотеку React – JavaScript бібліотеку з відкритим кодом, яка використовується для побудови користувацьких інтерфейсів. Показ інтерактивної карти моніторингу налаштовано з допомогою інтерактивних карт Leaflet – JavaScript бібліотеки з відкритим кодом для

створення браузерних та адаптованих під мобільні пристрої інтерактивних карт. Бібліотека реалізує підтримку шарів мап, які побудовані за технологією: WMS, GeoJSON, або векторного відображення поверхні. Для візуалізації результатів моніторингу використано бібліотеку Chart.js. Дана бібліотека дозволяє створювати графіки та діаграми будь-якого типу, а також вибудовувати дані на діапазоні часу та логарифмічній шкалі.

Ключові слова: екологічний моніторинг, інформаційно-аналітична система, React, Leaflet, Chart.js.

DEVELOPMENT OF THE WEB INTERFACE OF THE INFORMATION AND ANALYTICAL SYSTEM OF ENVIRONMENTAL MONITORING USING THE REACT LIBRARY

Ecological monitoring of the environment is a modern form of implementation of ecological activity processes with the help of informatization tools and provides regular assessment and forecasting of the state of the environment, the vital activity of society and the conditions of the functioning of ecosystems for the adoption of management decisions regarding environmental safety, preservation of the natural environment and rational use of nature. Environmental monitoring is the first and main stage in ensuring environmental safety, preventing and eliminating the negative impact of economic activity on the environment, and preserving natural resources. Information and analytical support for environmental monitoring is necessary for the implementation of such opportunities as receiving primary data from monitoring subjects, saving, processing, transmitting and analyzing information about the state of the natural environment. The purpose of this article is to create a web interface of an information and analytical system using the React library. The web interface of the information and analytical decision support system was developed based on an interactive map of water sampling points and visualization of the obtained results of environmental monitoring. For development, the React library was used – an open source JavaScript library that is used to build user interfaces. The display of the interactive monitoring map is configured using Leaflet interactive maps – an open source JavaScript library for creating interactive maps adapted for browsers and mobile devices. The library implements the support of map layers, which are built according to the technology: WMS, GeoJSON, or vector display of surfaces. The Chart.js library was used to visualize monitoring results. This library allows you to create graphs and charts of any type, as well as plot data on a time range and a logarithmic scale.

Key words: environmental monitoring, information-analytical system, React, Leaflet, Chart.js.

Вступ

Інформаційно-аналітичне забезпечення екологічного моніторингу необхідне для реалізації таких можливостей як одержання первинних даних від суб'єктів моніторингу, збереження, обробка, передача та аналіз інформації про стан навколишнього природного середовища. Гірничо-хімічна промисловість займає одне з провідних місць в інфраструктурі економіки нашої країни. Але, разом з цим, діяльність гірничо-хімічних підприємств є визначальним чинником техногенезу, який істотно ускладнює екологічну ситуацію на локальних територіях через значне нагромадження великої кількості відходів виробництва.

Науковцями Національного університету «Львівська політехніка» проводяться дослідження, спрямовані на удосконалення методології оцінювання показників, що визначають рівень екологічної небезпеки після закриття гірничо-хімічного підприємства на основі аналізу процесів впливу на довкілля основних джерел небезпеки. За результатами досліджень створено інформаційно-аналітичну систему для ефективного зберігання, оброблення, аналізу даних моніторингу, а також прогнозування можливих змін в довкіллі на підставі даних про поточний екологічний стан.

Метою даної статті є створення веб-інтерфейсу інформаційно-аналітичної системи з допомогою бібліотеки React.

Огляд літератури

Одним із промислових басейнів, що зазнали інтенсивної експлуатації, є Передкарпатський сірконосний басейн [1]. На даний момент екологічна ситуація в межах Роздільського державного гірничо-хімічного підприємства «Сірка» є однією з найнапруженіших в Україні [1, 2]. Тут нагромаджено переважна більшість усіх твердих промислових відходів Львівщини [3]. Роздільське ДГХП «Сірка» знаходиться на стадії ліквідації, але все ще несе загрозу довкіллю. Тому є необхідність в створенні інформаційно-аналітичної системи моніторингу, за допомогою якої можна отримати, створити інформацію та здійснити її опрацювання, аналізування. і прогнозування – визначення наслідків ситуації [4, 5]. Інформаційно-аналітичне забезпечення регіонального екологічного моніторингу необхідне для реалізації таких можливостей як одержання первинних даних від суб'єктів моніторингу, збереження, обробка, передача та аналіз інформації про стан навколишнього природного середовища, що, в свою чергу необхідне для моделювання та прогнозування розвитку екологічної ситуації в регіоні та прийняття науково обґрунтованих управлінських рішень в галузі охорони довкілля, екологічної безпеки [6, 7].

Типова ІАСМ складається із банку даних, геоінформаційної карти та програмного забезпечення. Програмний продукт поєднує базу даних системи з електронним картографічним забезпеченням, перегляд відомостей про об'єкти моніторингу, аналізування даних про якість компонентів довкілля, джерела небезпеки гірничо-хімічного підприємства, автоматизоване нанесення на карту місць

розташування точок відбору проб, скидів, водозаборів, побудову тематичних карт та ін. [1, 3]. Картографічною базою для розроблення стратегії керування є низки карт, що характеризують стан різноманітних елементів навколишнього середовища, так наприклад карта ураженості території екзогенними геологічними процесами, карта оцінки фонового техногенного навантаження на довкілля. Зручним варіантом може слугувати геоінформаційна система QGIS з вільним доступом і відкритим кодом. Система є багатофункціональною, написана на мовах програмування C++ та Python [3]. Основним призначенням системи є опрацювання і аналізування просторових даних, розроблення різної картографічної продукції. Геоінформаційна система QGIS дає змогу користувачам створювати карти з безліччю шарів, використовуючи різні картографічні проєкції [1]. Також QGIS забезпечує інтеграцію з іншими відкритими ГІС-пакетами. Плагіни, написані на Python, C++, розширюють можливості QGIS. Є плагіни для геокодування за допомогою Google Геокодування API, виконання геообробки (fTools) схожими на стандартні інструменти ArcGIS, інтерфейс з PostgreSQL/PostGIS, SpatiaLite і MySQL баз даних, і використання Mapnik як карту візуалізації [1, 3]. Різноманітні модульні програми написані на C і C++ для системи моніторингу якості води [8].

У статті [9] описано модель ODM Tools Python – програмне забезпечення з відкритим кодом, яке дозволяє користувачам робити запити та експортувати, візуалізувати та виконувати контроль якості обробки часових рядів даних спостережень за навколишнім середовищем, що зберігаються в базі даних ODM, за допомогою автоматизованих сценаріїв на Python.

Реалізація веб-орієнтованої системи підтримки прийняття рішень, описана у статті [10], базується на створеній веб-платформі з доступом до бази даних, керуванням сесіями, перевіркою введених даних, створення шаблонів. Дана система створена з допомогою Django (Django Software Foundation 2015a), фреймворку для веб-додатків мови програмування Python (Python Software Foundation 2015). В даному випадку Django використано разом із додатковими просторовими функціями для створення веб-додатків ГІС GeoDjango (Django Software Foundation 2015b).

Python – мова програмування, запропонована для розробки програмного забезпечення завдяки своїй гнучкості і легка інтеграція з усіма компонентами. Інтерфейс програмного забезпечення контролює взаємодію з користувачем і відповідає за отримання вхідних даних, які потім надсилаються відповідному компоненту [11]

Веб-фреймворк Flask використано авторами статті [12] для розробки веб-аплікації системи моніторингу. Flask написаний на мові Python і має просте, легке у використанні ядро, підтримує різноманітні розширення, зручний спосіб відображення карти в режимі онлайн [12].

Обговорення

Нами розроблено веб-інтерфейс інформаційно-аналітичної системи підтримки прийняття рішень на основі інтерактивної карти пунктів відбору проб води та візуалізації отриманих результатів гідрохімічного моніторингу Роздільських озер. Дана веб аплікація доступна в інтернеті за посиланням <http://ecotest.infostore.in.ua/>.

React JS – це бібліотека JavaScript з відкритим кодом, яка використовується спеціально для побудови користувацьких інтерфейсів. Бібліотека дозволяє розробникам створювати веб-програми, які можуть змінювати дані,

не завантажуючи сторінку. Основна перевага React.JS полягає в тому, що він масштабований, простий та швидкий [13].

React – ідеальний інструмент для створення масштабованих вебдодатків, особливо SPA (односторінкових застосунків). React відносно простий в освоєнні, має зрозумілий та лаконічний синтаксис. React використовує віртуальний DOM (VDOM) – це концепція програмування, в якій «віртуальне» уявлення призначеного для користувача інтерфейсу зберігається в пам'яті і синхронізується з «справжнім» DOM за допомогою бібліотеки ReactDOM. Цей процес називається узгодженням. Ви вказуєте, в якому стані повинен перебувати призначений для користувача інтерфейс, а React забезпечує відповідність реального DOM цьому стану. Віртуальний DOM представляє легку копію звичайного DOM. І відмінною рисою React є те, що дана бібліотека працює саме з віртуальним DOM, а не звичайним. У підсумку така схема взаємодії з елементами веб-сторінки працює набагато швидше і ефективніше, ніж якби ми працювали з JavaScript з DOM безпосередньо. Іншою відмінною рисою бібліотеки є концентрація на компонентах – ми можемо створити окремі компоненти і потім їх легко переносити з проєкту в проєкт. Ще одна особливість React – використання JSX. JSX представляє комбінацію коду JavaScript і XML і надає простий і інтуїтивно зрозумілий спосіб для визначення коду візуального інтерфейсу. React JSX трансформує XML-подібний синтаксис в JavaScript. [13].

У React використовується компонентний підхід. Бібліотека немає контролерів, моделей, шаблонів – все є компонент. Компоненти можна перевикористовувати, успадковувати один від одного, об'єднувати.

Компонент – це свого роду будівельна одиниця, з якої збирається інтерфейс. Перевагою є можливість порівняння React'ом віртуального DOM'а з реальним, і виконання мінімальних змін для їх синхронізації. Віртуальний DOM вирішує проблему з обробкою подій в різних браузерах, за рахунок цього React надає сумісну модель подій в будь-якому браузері. React дозволяє використовувати будь-який інструмент при розробці, він добре поєднується з іншими фреймворками. Дизайн React поєднується з асинхронними серверними архітектурами для адаптації до майбутніх технологій. Таким чином, React варто використовувати, якщо необхідно створити якісний і в найкоротші терміни швидкий, легкий, зручний односторінковий додаток [14]. Оскільки логіка компонентів написана на JavaScript, замість шаблонів можна з легкістю передавати складні дані у програму і зберігати стан окремо від DOM. Компоненти реалізують метод `render()`, який приймає вхідні дані і повертає те, що буде показано користувачу. Доступ до вхідних даних, які передаються в компонент, можна отримати за допомогою `render()` та `this.props`. React притримує парадигми декларативного програмування. Таким чином, від розробника лише вимагають описання різних частин інтерфейсу в різних станах системи, а сам фреймворк буде самостійно рендерити необхідні елементи, оновлюючи сторінку у відповідності до динамічних змін, ініційованих користувачем чи іншими чинниками. При цьому жодних обмежень про інші технології, які будуть використовуватись додатково, не існує. Тому є можливим розробляти нові функції в React, не переписуючи існуючий код. React також може рендеритись на сервері, використовуючи Node, і приводити в дію мобільні програми, які використовують React Native [15].

Показ інтерактивної карти моніторингу налаштовано з допомогою інтерактивних карт Leaflet – JavaScript бібліотеки з відкритим кодом для створення браузерних та адаптованих під мобільні пристрої інтерактивних карт (рис. 1). Бібліотека реалізує підтримку шарів map, які побудовані за технологією: WMS, GeoJSON, або векторного відображення поверхні. Leaflet – проста, продуктивна та зручна у використанні бібліотека. Може бути розширена за рахунок використання численних плагінів, має гарний, легкий у використанні та добре документований API, простий та читабельний вихідний код, зручний для роботи [16].

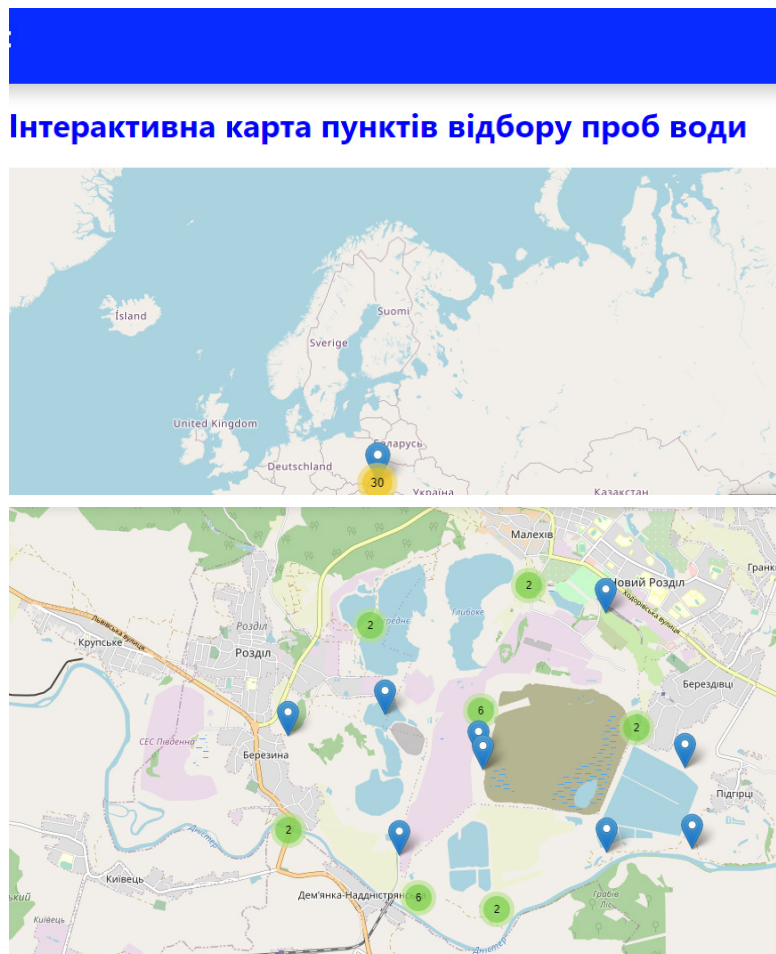


Рис. 1. Скріни веб-додатку інтерактивної карти відбору проб води на території ДГХП «Сірка»

Бібліотека React Leaflet забезпечує прив'язку між React і Leaflet. Вона не замінює Leaflet, але використовує його для абстрагування шарів Leaflet як компонентів React. Таким чином, вона може поводитися інакше, ніж інші компоненти React, зокрема:

– **Візуалізація DOM**

React не рендерить шари Leaflet у DOM, це рендеринг виконує сам Leaflet. React відтворює лише елемент <div> під час відтворення компонента MapContainer і вмісту компонентів шарів інтерфейсу користувача [16].

– **Властивості компонентів**

Властивості, передані компонентам, використовуються для створення відповідного екземпляра Leaflet, коли компонент відображається вперше, і за замовчуванням їх слід розглядати як незмінні. Під час першого відтворення всі ці властивості мають підтримуватися Leaflet, однак вони не будуть оновлюватися в інтерфейсі користувача, якщо вони зміняться, якщо вони явно не задокументовані як змінні. Змінні властивості порівнюються за посиланням (якщо не вказано інше) і застосовуються викликом відповідного методу в екземплярі елемента Leaflet [16].

– **Посилання на елементи Leaflet**

Якщо не вказано інше, усі компоненти, експортовані React Leaflet, підтримують посилання, які показують створений екземпляр елемента Leaflet або елемент DOM (для панелей). Це дозволяє програмам отримувати доступ до імперативних API Leaflet, коли це потрібно, але може призвести до неузгодженості з установленими атрибутами, тому використовувати їх слід обережно [17].

Візуалізація отриманих даних моніторингу з допомогою Chart.js

Екологічний моніторинг довкілля є сучасною формою реалізації процесів екологічної діяльності за допомогою засобів інформатизації і забезпечує регулярну оцінку і прогнозування стану середовища, життєдіяльності суспільства та умов функціонування екосистем для прийняття управлінських рішень щодо екологічної безпеки, збереження природного середовища та раціонального природокористування. Важко заперечити той факт, що переважна більшість інформації має географічний аспект і тому її можна просторово аналізувати і наочно представляти у вигляді карт, схем, діаграм, графіків та малюнків. Ще із стародавніх часів людина пристосовувалася до умов навколишнього середовища, сприймала її таку як є і намагалася підлаштувати під себе. Вона вже тоді прагнула полегшити свою працю шляхом застосування різних предметів і механізмів. З розвитком людства і відповідно науково-технічного прогресу з'явилися досконалі системи автоматизованого управління, які в даний час застосовуються скрізь.

Аналогами інформаційної системи накопичення і візуалізації екологічних замірів є будь-яке програмне забезпечення, яке має можливість візуалізувати статистичні дані. Існує багато спеціальних інструментів для створення візуалізації. Деякі з них зовсім прості у використанні: потрібно тільки завантажити дані та вибрати, як вони будуть відображатися, інші програми більш складні і комплексні – вимагають спеціальних знань і вмінь програмування. Є варіанти додатків, які можна безкоштовно завантажити, змінити і налаштувати та створювати інфографіку в режимі онлайн.

Chart.js – безкоштовна Javascript бібліотека, призначена для створення графіків та діаграм. Дана бібліотека дозволяє створювати графіки та діаграми будь-якого типу, а також вибудовувати дані на діапазоні часу та логарифмічній шкалі. Також у неї вбудовані засоби роботи з анімацією, що дозволить ефектно видозмінювати графіки залежно від нових даних, а також експериментувати з кольором (рис. 2).

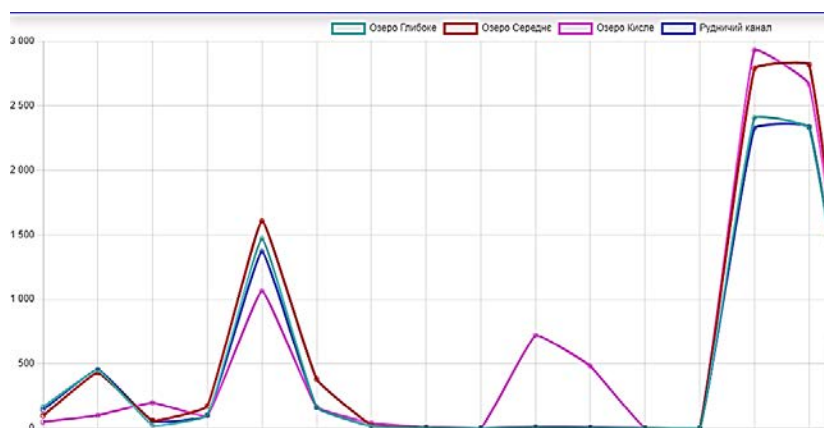


Рис. 2. Скрін веб-додатку візуалізації отриманих результатів аналізу проб води на території ДГХП «Сірка»

Розмір бібліотеки Chart.js становить приблизно 11Kb, також є можливість ще зменшити розмір бібліотеки шляхом включення в неї тільки тих модулів, які необхідні в конкретному випадку [1]. Chart.js дозволяє створювати діаграми різних типів: – Лінійна діаграма (Line chart) – це спосіб побудови точок даних на лінії. Часто він використовується для відображення даних тенденцій або порівняння двох наборів даних. – Гістограма (Bar chart) надає спосіб відображення значень даних, представлених у вигляді вертикальних стовпчиків. Іноді його використовують для відображення даних тенденцій та порівняння кількох наборів даних. – Пелюсткова діаграма (Radar chart) – це спосіб відображення кількох точок даних та варіацій між ними. – Секторні та кільцеві діаграми (Pie chart) – це найбільш часто використовувані діаграми. Вони розділені на сегменти, дуга кожного сегмента показує пропорційне значення кожного фрагмента даних. Вони чудово демонструють співвідношення пропорцій між даними. – Діаграми полярних областей (Polar area chart) схожі на кільцеві діаграми, але кожен сегмент має однаковий кут – радіус сегмента відрізняється залежно від значення. Цей тип діаграми часто корисний, коли ми хочемо показати дані порівняння, подібні до кругової діаграми, але також показати шкалу значень для контексту. – Бульбашкова діаграма (Bubble chart) використовується для відображення трьох вимірів даних одночасно [18]. Розташування бульбашки визначається першими двома розмірами та відповідними горизонтальною та вертикальною осями. Третій вимір представлений розміром окремих бульбашок. – Діаграми розсіювання (Scatter chart) базуються на основних лінійних діаграмах із зміною осі x на лінійну вісь. Для використання діаграми розсіювання дані повинні передаватися як об'єкти, що містять властивості X та Y. – Змішані діаграми. За допомогою Chart.js можна створювати змішані діаграми, які є комбінацією двох або більше різних типів діаграм. Поширеним прикладом є гістограма, яка також включає лінійний набір даних. Іншою чудовою особливістю бібліотеки Chart.js є той факт, що створені нею діаграми адаптивні, вони можуть змінювати свій розмір при зміні розмірів вікна браузера таким чином, щоб ефективно займати весь доступний для цього простір сторінки. На відміну від багатьох інших бібліотек подібного типу Chart.js має детальну і добре викладену документацію, за допомогою якої можна легко створювати як прості, так і складні зразки діаграм [19].

Висновки

Розроблено веб-інтерфейс інформаційно-аналітичної системи гірничо-хімічного підприємства з допомогою бібліотеки React – бібліотеки JavaScript з відкритим кодом, яка використовується для побудови користувальницьких інтерфейсів. Показ інтерактивної карти моніторингу налаштовано з допомогою інтерактивних карт Leaflet – JavaScript бібліотеки з відкритим кодом для створення браузерних та адаптованих під мобільні пристрої інтерактивних карт. Для візуалізації результатів моніторингу використано бібліотеку Chart.js. Дана бібліотека дозволяє створювати графіки та діаграми будь-якого типу, а також вибудовувати дані на діапазоні часу та логарифмічній шкалі. На відміну від багатьох інших бібліотек подібного типу Chart.js має детальну і добре викладену документацію, за допомогою якої можна легко створювати як прості, так і складні зразки діаграм.

Список використаних джерел:

1. Pohrebennyk V., Dzhumelia E. Evaluation of Impact of Mining and Chemical Enterprise on Ecological State of the Water Environment. *Water Security*. 2016. P. 155-169.
2. Погребенник В.Д., Джумеля Е.А. Екологічний аспект створення стабільної території Роздільського державного гірничо-хімічного підприємства "Сірка". *Агроекологічні, соціальні та економічні аспекти створення й ефективного функціонування екологічно стабільних територій: колективна монографія*. 2016. С. 56-66.
3. Pohrebennyk V., Koszelnik P., Mitryasova O., Dzhumelia E. Zdeb M. Environmental monitoring of soils of post-industrial mining areas. *Journal of Ecological Engineering*. 2019. vol. 20. P. 53-61.
4. Бахарев В. С., Шевченко І. В., Коваль С. С., Корцова О. Л. Інформаційно-технологічні аспекти управління екологічною безпекою в системах муніципального моніторингу атмосферного повітря. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2017. Випуск 4. С. 68-73.
5. Karpinski M., V. Pohrebennyk V., Bernatska N., Ganczarchyk J., Shevchenko O. Simulation of Artificial Neural Networks for Assessing the Ecological State of Surface Water. *18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018*. 2 July – 8 July 2018, Albena, Bulgaria. P. 693-700.
6. Шпинковська М.І., Бакунова А.І. Інформаційна система візуалізації екологічного стану регіону. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2015. №7. P. 75-81
7. Spencer McDonald. Web-based decision support system tools: The Soil and Water Assessment Tool Online visualization and analyses (SWATOnline) and NASA earth observation data downloading and reformatting tool (NASAaccess). *Environmental Modelling & Software*. 2019. Volume 120. P. 1-12.
8. Srivastava S., Vaddadi S., Sadistap S. Smartphone based System for water quality analysis. *Applied Water Science*. 2018. P. 129-130
9. Horsburgh J., Reeder S., Jones A., Meline J. Open source software for visualization and quality control of continuous hydrologic and water quality sensor data. *Environmental Modelling & Software*. 2015. 70. P. 1-7
10. THIELE J. NUSKE R. Design and implementation of a web-based decision support system for climate change impact assessment on forests. *A web-based decision support system*. 2016. P. 11-23

11. Khalique S. Hossain A. A web-based decision support system for smart dam operations using weather forecasts. *Hydroinformatics*. 2019. P. 1-24.
12. Crimi A, Jones T. Sgalambro A. Designing a Web Spatial Decision Support System Based on Analytic Network Process to Locate a Freight Lorry Parking. *Sustainability*. 2019. v. 11. P. 1-14.
13. Безверхий О., Куценко О. Ефективність застосування бібліотеки React. *Інформаційні технології та суспільство*. 2022. 2 (4), с. 13-19.
14. Болотіна В. В. Огляд популярних javascript фреймворків. *Інформаційно-комп'ютерні технології*, 18-20 квітня 2019 р., С. 89-90.
15. А. І. Вінокуров, Г. І. Молчанов. Переваги динамічних веб-сторінок над статично-генерованими. *Інформаційні технології*. 2021, С. 63-66.
16. How To Create Maps With React And Leaflet. <https://www.smashingmagazine.com/2020/02/javascript-maps-react-leaflet/>
17. React Leaflet. <https://react-leaflet.js.org/docs/start-introduction/>
18. Качанов Ю.В. Бібліотека для побудови графіків та діаграм chart.js. *Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції «Free and open source software»* 17-19 листопада 2020 р., С. 69.
19. Проста побудова графіків за допомогою Chart.js <https://www.zmax.work/easy-plotting-with-chart-js/>

References:

1. Pohrebennyk V., Dzhumelia E. (2016). Evaluation of Impact of Mining and Chemical Enterprise on Ecological State of the Water Environment. *Water Security*. P. 155-169.
2. Pohrebennyk V.D., Dzhumelia E.A. (2016). Ekolohichniy aspekt stvorennia stabilnoi terytorii Rozdilskoho derzhavnogo hirnicho-khimichnogo pidpriemstva "Sirka" [Ecological aspect of creating a stable territory of Rozdil state mining and chemical enterprise "Sirka"]. *Ahroekolohichni, sotsialni ta ekonomichni aspekty stvorennia y efektyvnoho funktsionuvannia ekolohichno stabilnykh terytorii: kolektyvna monohrafiia* [Agroecological, social and economic aspects of the creation and effective functioning of ecologically stable territories: a collective monograph]. P. 56-66.
3. Pohrebennyk V., Koszelnik P., Mitryasova O., Dzhumelia E. Zdeb M. (2019). Environmental monitoring of soils of post-industrial mining areas. *Journal of Ecological Engineering*. vol. 20. P. 53-61.
4. Bakhariev V. S., Shevchenko I. V., Koval S. S., Kortsova O. L. (2017). Informatsiino-tekhnologichni aspekty upravlinnia ekolohichnoiu bezpekoiu v systemakh munitsypalnogo monitorynhu atmosferного povitria [Information technology aspects of environmental safety management in municipal air monitoring systems]. *Visnyk KrNU imeni Mykhaila Ostrohradskoho [Bulletin of Mykhailo Ostrogradsky KrNU]*. V. 4. P. 68-73.
5. Karpinski M., V. Pohrebennyk V., Bernatska N., Ganczarchyk J., Shevchenko O. Simulation of Artificial Neural Networks for Assessing the Ecological State of Surface Water. *18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018*. 2 July – 8 July 2018, Albena, Bulgaria. P. 693-700.
6. Shpynkovska M.I., Bakunova A.I. (2015). Informatsiina systema vizualizatsii ekolohichnoho stanu rehionu [Information system for visualization of the ecological state of the region]. *Avtomatyzatsiia tekhnologichnykh i biznes-protsesiv [Automation of technological and business processes]*. №7. P. 75-81
7. Spencer MCDonald. (2019). Web-based decision support system tools: The Soil and Water Assessment Tool Online visualization and analyses (SWATOnline) and NASA earth observation data downloading and reformatting tool (NASAaccess). *Environmental Modelling & Software*. Volume 120. P. 1-12.
8. Srivastava S., Vaddadi S., Sadistap S. (2018). Smartphone based System for water quality analysis. *Applied Water Science*. P. 129-130
9. Horsburgh J., Reeder S., Jones A., Meline J. (2015). Open source software for visualization and quality control of continuous hydrologic and water quality sensor data. *Environmental Modelling & Software*. V. 70. P. 1-7
10. Thiele J. Nuske R. (2016). Design and implementation of a web-based decision support system for climate change impact assessment on forests. *A web-based decision support system*. P. 11-23
11. Khalique S. Hossain A. (2019). A web-based decision support system for smart dam operations using weather forecasts. *Hydroinformatics*. P. 1-24.
12. Crimi A, Jones T. Sgalambro A. (2019). Designing a Web Spatial Decision Support System Based on Analytic Network Process to Locate a Freight Lorry Parking. *Sustainability*. v. 11. P. 1-14
13. Bezverkhyi O., Kutsenko O. (2022). Efektyvnist zastosuvannia biblioteki React [The efficiency of using the React library]. *Informatsiini tekhnologii ta suspilstvo [Information technologies and society]*. 2 (4), P. 13-19.
14. Bolotina V. V. (18-20 kvitnia 2019). Ohliad populiarnykh javascript freimvorkiv [Overview of popular javascript frameworks.]. *Informatsiino-kompiuterni tekhnologii [Information and computer technologies]*. P. 89-90.
15. А. І. Вінокуров, Г. І. Молчанов. (2021). Perevahy dynamichnykh veb-storinok nad statychno-henerovanymy [Advantages of dynamic web pages over statically generated ones]. *Informatsiini tekhnologii [Information Technology]*. P. 63-66.
16. How To Create Maps With React And Leaflet. <https://www.smashingmagazine.com/2020/02/javascript-maps-react-leaflet/>
17. React Leaflet. <https://react-leaflet.js.org/docs/start-introduction/>
18. Качанов Ю.В. (17-19 lystopada 2020 r.). Biblioteka dlia pobudovy hrafikiv ta diahram Chart.js [Chart.js library for building graphs and charts.]. *Materialy KhII Mizhnarodnoi nauково-praktychnoi konferentsii «Free and open source software» [Materials of the XII International scientific and practical conference "Free and open source software"]*. P. 69.
19. Simple charting with Chart.js <https://www.zmax.work/easy-plotting-with-chart-js/>

УДК 004.05:021

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.1.2>

Надія БОЛЮБАШ

кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри інтелектуальних інформаційних систем, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, вул. 68 Десантників, 10, Миколаїв, Україна, індекс 54003 (Nadiya.Bolubash@chmnu.edu.ua)

ORCID: 0000-0002-2274-2422

Михайло ОЛІЙНИК

магістрант, кафедра інтелектуальних інформаційних систем, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, вул. 68 Десантників, 10, Миколаїв, Україна, індекс 54003 (mischa.oleinik2016@gmail.com)

ORCID: 0009-0007-3144-6725

Nadiia BOLIUBASH

PhD in Education, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Intelligent Information Systems, Petro Mohyla Black Sea National University, 10 68 Desantnykiv str., Mykolaiv, Ukraine, postal code 54003 (Nadiya.Bolubash@chmnu.edu.ua)

Mykhailo OLIINYK

Master's Student at the Department of Intelligent Information Systems, Petro Mohyla Black Sea National University, 10 68 Desantnykiv str., Mykolaiv, Ukraine, postal code 54003 (mischa.oleinik2016@gmail.com)

Бібліографічний опис статті: Болубаш, Н., Олійник, М. (2023). Методи підвищення продуктивності прогресивного вебзастосування бібліотеки на основі моделі RAIL. *Інформаційні технології та суспільство*. Вип. 1 (7), 13–20. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.1.2>

Bibliographic description of the article: Boliubash, N., Oliinyk, M. (2023). Metody pidvyshchennia produktyvnosti prohresyvnogo vebzastosunku biblioteky na osnovi modeli RAIL [Methods for increasing the performance of the library's progressive web application based on the RAIL model]. *Informatsiini tekhnolohii ta suspilstvo* – Information technology and society, 1 (7), 13–20. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.1.2>

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ПРОГРЕСИВНОГО ВЕБЗАСТОСУНКУ БІБЛІОТЕКИ НА ОСНОВІ МОДЕЛІ RAIL

Анотація. У статті розглянуто напрями цифрової трансформації бібліотечної сфери та обґрунтовано підходи, спрямовані на оптимізацію продуктивності електронних бібліотек. **Метою статті** є дослідження методів підвищення продуктивності прогресивного вебзастосування бібліотеки у процесі його розробки з використанням орієнтованої на користувача моделі оптимізації продуктивності RAIL. **Методи дослідження.** Використано загальнонаукові методи аналізу та синтезу, методи розробки прогресивних вебзастосунків та методи оптимізації їх продуктивності, що базуються на оцінці архітектурних рішень з точки зору їх впливу на швидкість роботи застосування. **Наукова новизна дослідження** полягає у виявленні в умовах сучасної цифрової трансформації бібліотечної сфери методів підвищення продуктивності вебзастосування бібліотеки, адаптованого до роботи на різних апаратних та програмних платформах – прогресивного вебзастосування, який поєднує у собі властивості вебзастосування та нативного застосування. **Висновки.** Використання сучасних цифрових систем обробки інформації вимагає перегляду підходів до вибору архітектур вебзастосунків, які бібліотеки використовують як платформи для взаємодії з читачами, та до визначення їх продуктивності. Для забезпечення кросплатформеності та можливості роботи із бібліотечними ресурсами у режимі offline виявлено доцільність розробки вебзастосування бібліотеки з використанням технології PWA, архітектура якого включає маніфест застосування, Service Workers та Application Shell. Дослідження методів підвищення продуктивності прогресивного вебзастосування бібліотеки дозволило визначити стратегію застосування у процесі його розробки методів оптимізації продуктивності відповідно до вимог моделі RAIL: стиснення розміру зображень та задання їх розмірів явним способом через атрибути; зменшення JavaScript коду – оптимізувати функції та розділивши тривалі завдання на завдання з тривалістю не більшою за 50 мс шляхом впровадження асинхронного коду; реалізація плавної анімації за допомогою CSS5 із обробкою кожного кадру до 10 мс; групування завдань, які виконуються у фоновому режимі, у блоки, не більші за 50 мс.

Ключові слова: цифрова бібліотека, технологія PWA, технологія Service Workers, прогресивний вебзастосунок, прогресивна вебметрика, модель RAIL.

METHODS FOR INCREASING THE PERFORMANCE OF THE LIBRARY'S PROGRESSIVE WEB APPLICATION BASED ON THE RAIL MODEL

Abstract. The article examines the directions of digital transformation of the library sphere and substantiates the approaches aimed at optimizing the productivity of electronic libraries. **The purpose** of the article is to study the methods of improving the performance of a progressive web application of the library during its development using the RAIL user-oriented performance optimization model. **Research methods.** General scientific methods of analysis and synthesis, methods of developing progressive web applications and methods of optimizing their performance, based on the assessment of architectural solutions from the point of view of their impact on the speed of the application, are used. **The scientific novelty** of the research consists in identifying, in the conditions of modern digital transformation of the library sphere, methods of increasing the productivity of the library web application adapted to work on various hardware and software platforms - a progressive web application that combines the properties of a web application and a native application. **Conclusions.** The use of modern digital information processing systems requires a review of approaches to the selection of web application architectures that libraries use as platforms for interacting with readers, and to determining their performance. To ensure cross-platform compatibility and the possibility of working with library resources in offline mode, the expediency of developing a library web application using PWA technology, whose architecture includes an Web App Manifest, Service Workers and Application Shell, was found. The study of methods for improving the performance of the progressive web application of the library allowed to determine the application strategy in the process of its development of performance optimization methods in accordance with the requirements of the RAIL model: compressing the size of images and specifying their dimensions in an explicit way through attributes; JavaScript code reduction - by optimizing functions and splitting long tasks into tasks with a duration of no more than 50ms by implementing asynchronous code; implementation of smooth animation using CSS5 with processing of each frame up to 10 ms; grouping tasks that are performed in the background into blocks of no more than 50 ms.

Key words: Digital Library, technology PWA, technology Service Workers, Progressive Web App, Progressive Web Metrics, model RAIL.

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій. Високі темпи інформатизації сучасного суспільства супроводжуються розширенням взаємодії через web-інтерфейс у всіх галузях оточуючої дійсності. У процесі цифрової трансформації бібліотечної сфери здійснюється перехід до електронних бібліотек, які стали одним із найбільш перспективних каналів доступу до бібліотечних ресурсів завдяки більш швидкому обслуговуванню читачів, полегшенню доступу до інформації та її пошуку, наявності онлайн послуг, можливості працювати з ресурсами онлайн та скачувати їх у різних форматах [7; 10; 11; 12]. Надання електронних онлайн послуг впроваджують у свою діяльність усі сучасні бібліотеки – академічні, вузькоспеціалізовані та публічні, призначені для широкого кола читачів. Зростання обсягів цих послуг потребує більш прогресивних підходів до розробки вебзастосунків, які використовуються у цифрових бібліотеках для взаємодії з читачами [4]. Одним із таких підходів, спрямованих на покращення якості обслуговування читачів та підвищення їх залучення, є реалізація послуг цифрової бібліотеки з застосуванням технології PWA.

В умовах широкого розповсюдження мобільного Інтернету і мобільних пристроїв ключем до успіху вебзастосунку є його продуктивність та кросплатформеність. Проте далеко не усі цифрові бібліотеки мають задовільні показники продуктивності електронних платформ й адаптовані до роботи на мобільних пристроях. Впровадження у їх діяльність прогресивних web-застосунків (англ. Progressive Web App, PWA) дозволяє забезпечити високі показники продуктивності при доступі до бібліотечних ресурсів із різних апаратних та програмних платформ [8].

У процесі розробки вебзастосунку бібліотеки важливим є вибір методів, спрямованих на підвищення продуктивності з метою забезпечення оптимальних показників. Значна частина методів, які дозволяють виявити проблемні місця, націлена на оцінку та оптимізацію продуктивності уже розробленого вебзастосунку. А метрики, які застосовують для оцінки продуктивності, здебільшого характеризують продуктивність з технологічної точки зору без урахування її суб'єктивного сприйняття користувачем [1; 2]. Підхід, реалізований у моделі RAIL (англ. Response Animation Idle Load), є більш ефективним, оскільки вона надає можливість вимірювати та оптимізувати показники продуктивності, орієнтовані на користувача, у процесі розробки із забезпеченням розширених можливостей доступності [5]. Проте методи підвищення продуктивності вебзастосунку відповідно до основних показників моделі RAIL є не достатньо дослідженими й потребують подальшого опрацювання.

Виклад основного матеріалу. Проведене дослідження дозволило установити, що прогресивні вебзастосунки є новим поколінням застосунків, які можуть адаптивно переналаштовуватися під параметри пристрою, на якому їх відкрито (смартфоні, планшеті, десктопному ПК, ноутбукові, нетбуку) та працювати в усіх операційних системах і браузерях таким чином, що робота з сайтом схожа на роботу з нативним застосунком [13]. За рахунок завчасного кешування даних за технологією Service Workers прогресивний web-застосунок бібліотеки дозволяє взаємодіяти з електронним ресурсом у режимі offline незалежно від з'єднання з Інтернетом, отримувати доступ до апаратних засобів пристрою та

відправляти push-повідомлення. Основні переваги PWA, які роблять їх ефективними для користувачів електронної бібліотеки, полягають у швидкому завантаженні, прогресивності, адаптивності та можливості працювати з бібліотечними ресурсами незалежно від з'єднання з Інтернетом [3].

Технологія PWA є більш зручною альтернативою технології DRM – Digital Rights Management, яка забезпечує управління доступом до цифрових даних з метою захисту авторських прав у випадку платного чи обмеженого доступу до бібліотечних ресурсів. Зазвичай DRM використовують для обмеження копіювання, друку та викладання у загальний доступ електронних книг. Використання технології PWA дозволяє вебзастосунку бібліотеки працювати в автономному режимі, пропонуючи читання у режимі offline без необхідності встановлення додаткових програм DRM, використовуючи дані, кешовані під час попередніх сеансів роботи із застосунком у фоновому режимі [11].

Для створення вебзастосунку бібліотеки було обрано технологію PWA, до базових складових якої відносять [8]:

1) маніфест застосунку (англ. Web App Manifest), який застосовують для надання застосунку нативних функцій, таких як іконка на робочому столі, ім'я, стартова сторінка, колір теми тощо;

2) технологію Service Workers, яка є основою PWA, включає перш за все обробку кешованих ресурсів для забезпечення роботи в автономному режимі, здійснює обробку запитів браузера, фонову синхронізацію та push-повідомлення.

3) архітектуру Application Shell (оболонка застосунку), яка є оболонкою нативної програми, що зберігається на пристрої клієнта і за рахунок цього здійснює швидке завантаження з Service Workers.

Створення статичної оболонки користувальницького інтерфейсу PWA, яка кешується на пристрої користувача та забезпечує швидке завантаження, здійснено із використанням JavaScript та мови розмітки HTML5 і CSS3 як засобу стилізації. У процесі створення електронної бібліотеки було використано Google Books API, який дозволяє програмно виконувати операції в інтерактивному режимі на веб-сайті Google Books, що містить більше 10 млн книг у електронному форматі, безпосередньо у веб-застосунку бібліотеки.

Для розробки PWA бібліотеки використано середовище розробки Web-Storm, фреймворк AngularJS та мову TypeScript, що компілюється в JavaScript. Бібліотека RxJS застосовувалася для написання запитів і back-end частини з опорою на методики реактивного програмування. Це дало можливість відслідковувати асинхронні потоки даних, які генерують події, упорядковані у часі, та відповідним чином реагувати на них.

Дослідження існуючих підходів до оптимізації продуктивності вебзастосунків дозволило установити, що під продуктивністю розуміють швидкість відгуку застосунку на запити та дії користувача [2]. Підвищення продуктивності вебзастосунку вимагає складних інженерних рішень, які передбачають застосування методів оптимізації на різних рівнях абстракції, до яких відносять кешування об'єктів із використанням HTTP заголовків, зменшення кількості HTTP-запитів, оптимізацію завантаження JavaScript коду, стиснення текстового контексту та зображень, зменшення кількості DNS-запитів, скорочення та об'єднання файлів CSS, JavaScript і HTML, управління перенаправленням між сторінками та оптимізацію доставки CSS [6; 9]. Робота прогресивних вебзастосунків здійснюється по протоколу HTTPS, забезпечуючи безпечну передачу даних між сервером і клієнтом та має свою специфіку, яка обумовлює необхідність розробки адаптованих до неї методів оптимізації.

Вимірювання продуктивності прогресивного веб-застосунку є складним завданням, оскільки необхідно забезпечити оптимальні показники на різних апаратних та програмних платформах. З метою оцінювання продуктивності вебзастосунку в основному відслідковують такі події [5]:

1) DOMContentLoaded-подія, яка відбувається, коли сторінку – весь код HTML, завантажено та пройдено парсером не чекаючи завершення завантаження таблиць стилів, скрипти тільки почали виконуватися;

2) Load-подія, яка відбувається, коли сторінка повністю завантажена і відпрацювали всі скрипти, користувач може повноцінно взаємодіяти зі сторінкою.

Однак вказані метрики не завжди є оптимальними, час парсингу та виконання скриптів може бути занадто великим. Розробники разом із науковою спільнотою працюють над розробкою прогресивних вебметрик (англ. Progressive Web Metrics, PWM). Сукупність таких метрик, орієнтованих на користувача, містить модель RAIL, яка оцінює архітектурні рішення з точки зору їх впливу на швидкість роботи застосунку, установлюючи граничні значення для швидкості відгуку на дії користувача, затримки анімації, часу завантаження вмісту сторінки [5].

Застосування моделі RAIL при розробці прогресивного вебзастосунку бібліотеки дозволило задачу підвищення продуктивності впровадити у процес розробки. Модель RAIL передбачає наступний набір інструкцій для вимірювання продуктивності веб-застосунку, виділяючи основні аспекти у його життєвому циклі (рис. 1):

- 1) відповідь (англ. Response) на виконання дій користувача повинна становити не більше, ніж 100 мілісекунд;
- 2) анімація (англ. Animation) повинна мати затримку не більшу, ніж 60 кадрів у секунду;
- 3) очікування (англ. Idle) – простій між діями користувача використовується у роботі застосунку для виконання відкладеної роботи (зокрема завантаження частин, які ще не були завантажені);
- 4) завантаження (англ. Load) повинно становити не більше 1–2 секунд, тому при зверненні користувача до застосунку завантажується тільки його базова версія.

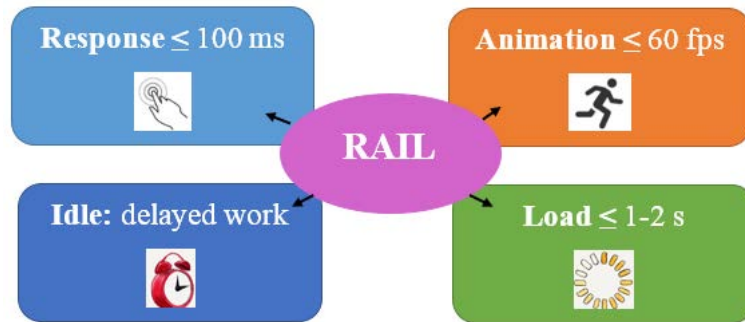


Рис. 1. Основні показники продуктивності моделі RAIL

Розроблений PWA бібліотеки є кросплатформним та має розширену функціональність у порівнянні зі звичайними web-застосунками з доступом до пристроїв користувача. Дозволяє працювати в автономному режимі, забезпечує легкість установки, простоту налаштувань інтерфейсу, більшу ефективність, продуктивність та надійність навіть у локальній мережі. Вікно застосунку відкривається у браузері, однак на робочому столі є іконка, яка також дозволяє її відкрити. Користувач може виконати пошук бажаної книги, відфільтрувати книги по жанрам, переглянути список відібраних книг, більш детально ознайомитися з інформацією про окрему книгу та перейти до її читання онлайн якщо доступ до неї є безкоштовним. Є ресурси, доступ до яких є платним (рис. 2).

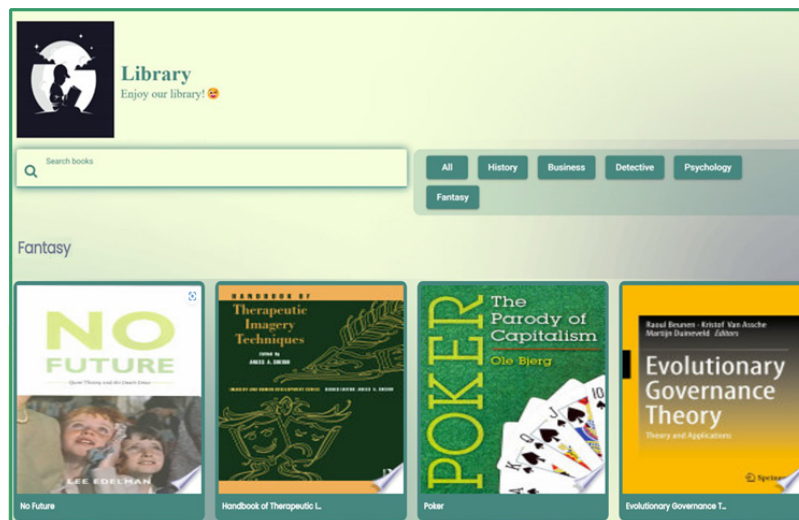


Рис. 2. Вікно створеного прогресивного вебзастосунку бібліотеки

У процесі розробки здійснювалася оцінка показників продуктивності вебзастосунку та їх оптимізація відповідно до моделі RAIL із використанням сервісів Chrome DevTools і Google PageSpeed Insights. Chrome DevTools, емулюючи різні пристрої, дозволяє адаптувати вебзастосунок під ПК, мобільні пристрої та екрани різних гаджетів. Це дає можливість оцінювати параметри продуктивності кросплатформного вебзастосунку та здійснювати адаптивну верстку з CSS, HTML і JavaScript-кодом у процесі його розробки.

Lighthouse дозволяє діагностувати підтримку сукупності компонентів технології PWA у вебзастосунку: реєстрацію Service Workers, роботу в режимі offline, використання HTTPS та перенаправлення HTTP-трафіку в HTTPS та інших. У таблиці 1 відображено, як змінювалася оцінка відповідності стандартам PWA розроблюваного вебзастосунку бібліотеки по мірі додавання базових компонентів цієї

технології. Отримані результати свідчать про те, що розроблений вебзастосунок бібліотеки на різних платформах має високий ступінь відповідності стандартам технології PWA, якому відповідає оцінка в балах у межах від 90 до 100.

Таблиця 1

Зміна відповідності стандартам PWA вебзастосунку бібліотеки під час його розробки

Етап розробки	Ступінь відповідності PWA, бали	
	Десктопна версія	Мобільна версія
До впровадження базових компонентів PWA	40	36
Написання маніфесту	65	55
Впровадження Service Worker	94	91
Впровадження Application Shell	98	96

Google PageSpeed Insights з використанням технології Lighthouse оцінює продуктивність вебзастосунку на десктопній і мобільній версії, допомагає визначити, чим визвана низька продуктивність – проблемами у коді чи конфігурації сайту та надає рекомендації по поліпшенню продуктивності. Під час першого тестування оцінка продуктивності вебзастосунку бібліотеки показала, що є параметри, які не відповідали граничним значенням моделі RAIL.

Оптимальними з точки зору продуктивності для десктопної та мобільної версій виявилися наступні показники (табл. 2).

1. First Contentful Paint – час, необхідний браузеру для відображення першої частини вмісту DOM (текст, фонові зображення) становив 0,6 і 0,9 сек.

2. Speed Index – час візуального відображення контенту під час завантаження сторінки виявився рівним 0,7 та 0,8 секунд.

3. Total Blocking Time – час, протягом якого відбувається блокування сторінки у відповідь на дії користувача: кліки мишею або натискання клавіш становив 82 і 100 мс.

4. Cumulative Layout Shift – візуальна стабільність, яка оцінюється в балах від 0 до 1, виявилася близькою до нуля і була оцінена в 0,05 та 0,065 балів. Такі значення свідчать про незначне зміщення макета через асинхронне завантаження ресурсів.

Таблиця 2

Показники продуктивності до оптимізації часу завантаження Load

Показники продуктивності	Десктопна версія	Мобільна версія
First Contentful Paint	0,6 сек	0,9
Speed Index	0,7 сек	0,8
Largest Contentful Paint	4,5 сек	5,6
Time to Interactive	3,1 сек	3,9
Total Blocking Time	82 мс	100
Cumulative Layout Shift	0,05	0,065

Показники, які не відповідали моделі RAIL та потребували коригування:

1) Largest Contentful Paint – час завантаження найбільшого елемента в області перегляду становив 4,5 і 5,6 секунд для десктопної та мобільної версій відповідно;

2) Time to Interactive – час, за який сторінка стане повністю інтерактивною, виявився рівним 3,1 для десктопної версії та 3,9 секунд для мобільної версії.

Google PageSpeed Insights дозволив виявити, що основний час завантаження прийшовся на графічні зображення, зокрема – фотографію фону.

Для налаштування часу завантаження Load із метою його прискорення було зменшено розмір зображень із використанням сервісу TinyPNG та задано їх розміри явним способом через атрибути. Розмір фонового зображення було зменшено майже на 80%. Застосування цих підходів дозволило зменшити час завантаження найбільшого елемента в області перегляду у 4 рази – значення Largest Contentful Paint із, змінилося із 4,5 до 1 секунди та із 5,6 до 1,4 секунди для десктопної версії мобільної версії. Час, за який сторінка стає повністю інтерактивною, зменшився у 3 рази – значення показника Time to Interactive змінилося із 3,1 до 1,1 секунди для десктопної версії та із 3,9 до 1,3 секунди для мобільної версії (табл. 3). Нові результати оцінки часу завантаження Load цілком задовольняють критерії моделі RAIL.

Таблиця 3

Показники продуктивності після оптимізації часу завантаження Load

Показники продуктивності	Десктопна версія	Мобільна версія
First Contentful Paint	0,6 сек	0,8
Speed Index	0,6 сек	0,7
Largest Contentful Paint	1,0 сек	1,4
Time to Interactive	1,1 сек	1,3
Total Blocking Time	78 мс	96
Cumulative Layout Shift	0,051	0,062

Для оцінки швидкості відгуку вебзастосунку Response на дії користувача у процесі його взаємодії із інтерфейсом (клацання мишею, натискання клавіш клавіатури тощо) було використано сервіс Chrome DevTools, який дозволяє перевіряти мережевий трафік, швидкістю сайту та інші показники продуктивності на різних апаратних платформах (рис. 3). Було виявлено, що швидкість відгуку на дії користувача вебзастосунку електронної бібліотеки становила від 72 до 128 мілісекунд. Значення, більші за 100 мілісекунд, не відповідали вимогам моделі RAIL. Для прискорення відповіді Response вебзастосунку на дії користувача було здійснено зменшення JavaScript коду – оптимізацію функцій та розділення тривалих завдань шляхом впровадження асинхронного коду. Тривалим є таке завдання, виконання якого займає більше 50 мс. Після внесених змін час виконання тривалих завдання було зменшено більше ніж вдвічі, а швидкість відгуку Response не перевищувала 100 мс.

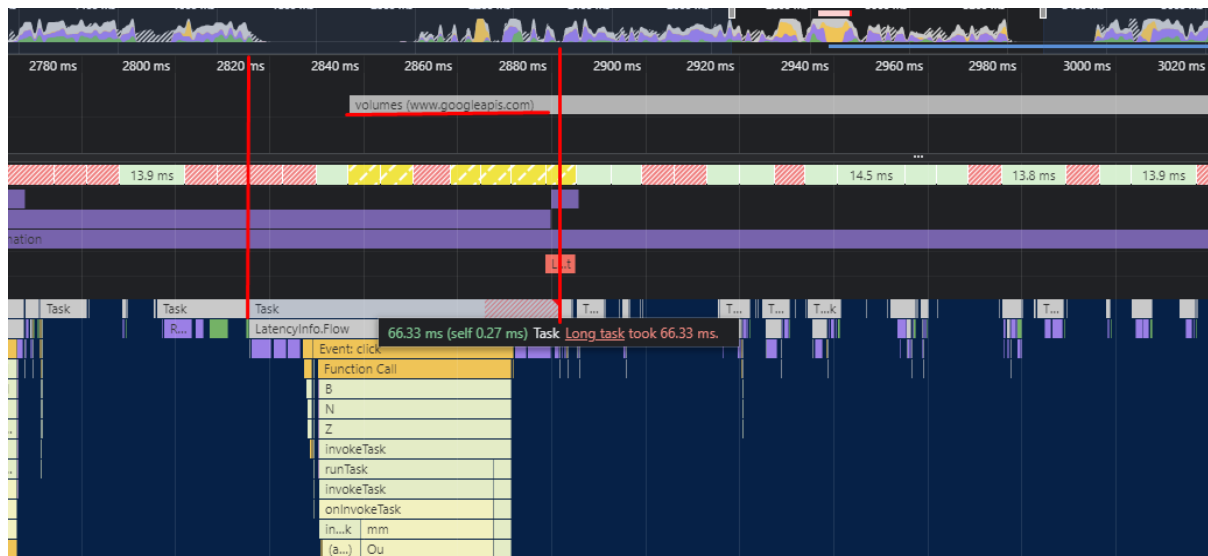


Рис. 3. Оцінка показників продуктивності вебзастосунку бібліотеки із використанням Chrome DevTools

Для перевірки показника Animation також було використано Chrome DevTools. Під анімацією, яка повинна бути неперервною, мають на увазі такі операції як скролінг, випадання списки, використання полос прокрутки та інші ефекти, пов'язані з тим, що вміст екрана повинен змінюватися протягом якогось часу. Chrome DevTools показує, скільки часу був активним той чи інший кадр.

Для правильного налаштування анімації відповідно до моделі RAIL кожен кадр повинен бути завершений за 16 мс (1/60 сек = 0,0166 мс). Проте оскільки браузеру потрібно близько 6 мс для рендерингу кожного кадру, кадр потрібно створити за 10 мс. Якщо час створення буде більшим, кадр буде пропущено а картинка на екрані буде перервною. У вебзастосунку бібліотеки анімацію було реалізовано з використанням CSS. При її перевірці на різних платформах не було виявлено проблем, анімація працювала плавно.

Відповідно до вимог моделі RAIL у той час, коли користувач не взаємодіє із інтерфейсом вебзастосунку, може бути виконана відкладена робота (англ. Idle Task) – ініціалізація різних компонентів, пошук і сортування даних, завантаження відкладених раніше елементів контенту, відправлення даних до сервісу аналітики тощо. При роботі з цифровою бібліотекою простій сторінки може бути у той час, коли користувач читає текст на екрані, не виконуючи ніяких дій. У цей час у фоновому режимі можуть завтажуватися ще не відкриті сторінки книги, із якою працює читач. Це дає можливість у подальшому отримувати доступ до сторінок книги навіть без підключення до мережі Інтернет.

Для правильного налаштування очікування Idle вебзастосунку – його роботи під час простою, було здійснено групування завдань, які виконуються у фоновому режимі, у блоки, не більші 50 мілісекунд (рис. 4). Це гарантує можливість відповіді на дії користувача у вікні відгуку 100 мілісекунд. Якщо користувач взаємодіє із сторінкою під час простою, взаємодія має вищий пріоритет і перериває фонову роботу під час простою.

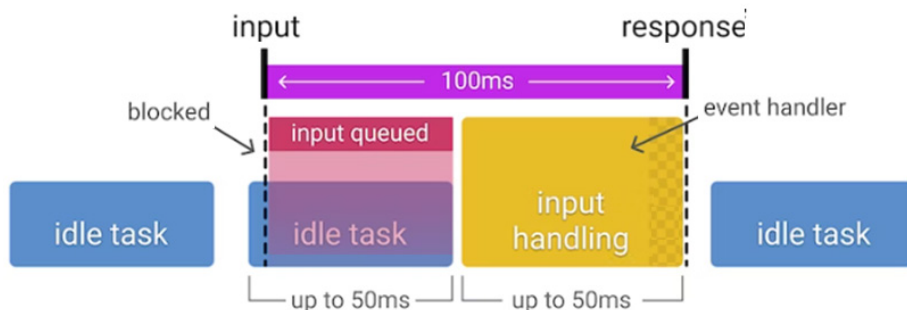


Рис. 4. Налаштування очікування Idle

Після здійснених налаштувань показники продуктивності вебзастосунку бібліотеки було оптимізовано у відповідності до вимог моделі RAIL. Створений PWA бібліотеки вирішує такі проблеми, як миттєвий відгук на дії користувача, плавну анімацію та інтерактивність, швидкий доступ до ресурсів на різних апаратних та програмних платформах навіть при низькій швидкості Інтернету.

Висновки. Підвищення продуктивності прогресивного вебзастосунку бібліотеки вимагає глибокого розуміння конкретних сценаріїв його роботи та ретельного планування під час розробки послідовності застосування методів, спрямованих на оптимізацію його продуктивності.

Виявлено наступні методи, спрямовані на підвищення продуктивності вебзастосунку відповідно до моделі RAIL: 1) для зменшення часу завантаження Load – стиснення розміру зображень та задання їх розмірів явним способом через атрибути; 2) для зменшення часу відгуку на дії користувача Response – оптимізація функцій та розділення тривалих завдань шляхом впровадження асинхронного коду на завдання, тривалість яких не перевищує 50 мс; 3) для налаштування показника Animation – реалізація анімації за допомогою CSS, спрямована на забезпечення створення кожного кадру не більше ніж за 10 мс; 4) для налаштування очікування Idle – групування завдань, які виконуються у фоновому режимі, у блоки, не більші за 50 мс. Застосування вказаних методів дозволило майже вдвічі скоротити час відгуку Response, втричі – час завантаження Load, забезпечити плавну роботу анімації на пристроях із різною частотою оновлення екрану та виконання відкладеної роботи у фоновому режимі.

Розроблений прогресивний вебзастосунок надає доступ до ресурсів Google Books. Базуючись на виявлених методах підвищення продуктивності, які відповідають вимогам орієнтованої на користувача моделі RAIL, може бути здійснена розробка прогресивного вебзастосунку бібліотеки, адаптована до цифрових ресурсів іншої бібліотеки. Що дасть можливість користувачам отримувати доступ до її ресурсів із високою продуктивністю на різних апаратних та програмних платформах у онлайн та offline режимах незалежно від наявності зв'язку з Інтернетом.

Список використаних джерел:

1. Гридин В.Н., Анисимов В.И., Васильев С.А. Методы повышения производительности современных веб-приложений. *Известия ЮФУ. Технические науки.* № 2(212). 2020. С. 193-200. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2020-2-193-200>.
2. Максимов А.Я., Мартышкин А.И. Обзор современных программных решений в области измерения производительности клиентской части веб-приложений. *Современные наукоемкие технологии.* № 12(2). 2021. С. 348-354. <https://doi.org/10.17513/snt.39001>.
3. Ткачук В. PWA, як перспективний напрямок об'єднання мобільних технологій. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво.* Вип. 46. 2022. С. 83-87. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2022-46-12>.
4. Gaffar S.A., Kishore Kumar Dr.S. Awareness and access to mobile applications in an Academic Library. *Library Philosophy and Practice* (e-journal). 2019. URL: <https://digitalcommons.unl.edu/libphilprac>.
5. Irish P., Lewis P. Introducing RAIL: a user-centric model for performance. 2015. URL: <https://www.smashingmagazine.com/2015/10/rail-user-centric-model-performance/>.
6. Jasper R., Malavolta I., Taher A. Optimize along the way: An industrial case study on web performance. *Journal of Systems and Software.* Vol. 198. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2022.111593>.
7. Kari H.K. Digital Transformation of Information and its Impact on Libraries. *World Journal of Innovative Research,* 9(1), P. 26-30. 2020. URL: https://www.wjir.org/download_data/WJIR0901033.pdf.

8. Majchrzak T.A., Andreas B.H., Grønli T.M. Progressive Web App: the Definite Approach to Cross-Platform Development? In *Processings of the 51st Hawaii International Conference on System Sciences*. 2018. pp. 5735-5744. <https://doi.org/10.24251/hicss.2018.718>.
9. Malavolta I. Beyond native apps: web technologies to the rescue. In: *Proceedings of the 1st International Workshop on Mobile Development*. 2016. P. 1–2. <https://doi.org/10.1145/3001854.3001863>.
10. Panda S. Digital Rights Management (DRM) in the Libraries of Digital-era: Concepts, IPR Issues & Concerns of LIS Community. *Library Philosophy and Practice* (e-journal). 2021. URL: <https://digitalcommons.unl.edu/libphilprac/6645>.
11. Panda S.A. Study of On-the-Go Reference Service Using Mobile Technology in Library. In *Re-Envisioning Roles and Responsibilities of Library Professionals in the New Normal*. Daryaganj, New Delhi, India: DPS Publishing House, 2021. P. 83-99. <http://doi.org/10.5281/zenodo.5091312>.
12. Rahane V.C. Mobile Technology using in Library services. *International Journal of Research in Library Science*. Vol. 4(2). 2018. P. 23-26. URL: <https://doi.org/10.26761/ijrls.4.2.2018.1294>.
13. Sheppard D. *Beginning Progressive Web App Development: Creating a Native App Experience on the Web*. CA: Pub. Apress Berceel. 2017. P. 266. <http://doi.org/10.1007/978-1-4842-3090-9>.

References:

1. Gridin V.N., Anisimov V.I., Vasil'ev S.A. Metody povysheniya proizvoditel'nosti sovremennykh veb-prilozheniy [Performance Techniques for Modern Web Applications]. *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki – Izvestiya SFedU. Technical science*. № 2(212). 2020. P. 193-200. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2020-2-193-200>.
2. Maksimov A.YA., Martyshekin A.I. Obzor sovremennykh programnykh reshenij v oblasti izmereniya proizvoditel'nosti klientskoj chasti veb-prilozhenij [Overview of modern software solutions in the field of measuring the performance of the client side of web applications] *Sovremennye naukoemkie tekhnologii – Modern high technologies*. № 12(2). 2021. P. 348-354. <https://doi.org/10.17513/snt.39001>.
3. Tkachuk V. PWA, yak perspektyvnyi napriamok obiednannia mobilnykh tekhnolohii [PWA, as a promising direction of combining mobile technologies] *Kompiuterno-intehrovani tekhnolohii: osvita, nauka, vyrobnytstvo – Computer-integrated technologies: education, science, production*. № 46. 2022. P. 83-87. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2022-46-12>.
4. Gaffar S.A., Kishore Kumar Dr.S. Awareness and access to mobile applications in an Academic Library. *Library Philosophy and Practice* (e-journal). 2019. URL: <https://digitalcommons.unl.edu/libphilprac>.
5. Irish P., Lewis P. Introducing RAIL: a user-centric model for performance. 2015. URL: <https://www.smashingmagazine.com/2015/10/rail-user-centric-model-performance/>.
6. Jasper R., Malavolta I., Taher A. Optimize along the way: An industrial case study on web performance. *Journal of Systems and Software*. Vol. 198. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2022.111593>.
7. Kari H.K. Digital Transformation of Information and its Impact on Libraries. *World Journal of Innovative Research*, 9(1), P. 26-30. 2020. URL: https://www.wjir.org/download_data/WJIR0901033.pdf.
8. Majchrzak T.A., Andreas B.H., Grønli T.M. Progressive Web App: the Definite Approach to Cross-Platform Development? In *Processings of the 51st Hawaii International Conference on System Sciences*. 2018. pp. 5735-5744. <https://doi.org/10.24251/hicss.2018.718>.
9. Malavolta I. Beyond native apps: web technologies to the rescue. In: *Proceedings of the 1st International Workshop on Mobile Development*. 2016. P. 1–2. <https://doi.org/10.1145/3001854.3001863>.
10. Panda S. Digital Rights Management (DRM) in the Libraries of Digital-era: Concepts, IPR Issues & Concerns of LIS Community. *Library Philosophy and Practice* (e-journal). 2021. URL: <https://digitalcommons.unl.edu/libphilprac/6645>.
11. Panda S.A. Study of On-the-Go Reference Service Using Mobile Technology in Library. In *Re-Envisioning Roles and Responsibilities of Library Professionals in the New Normal*. Daryaganj, New Delhi, India: DPS Publishing House, 2021. P. 83-99. <http://doi.org/10.5281/zenodo.5091312>.
12. Rahane V.C. Mobile Technology using in Library services. *International Journal of Research in Library Science*. Vol. 4(2). 2018. P. 23-26. URL: <https://doi.org/10.26761/ijrls.4.2.2018.1294>.
13. Sheppard D. *Beginning Progressive Web App Development: Creating a Native App Experience on the Web*. CA: Pub. Apress Berceel. 2017. P. 266. <http://doi.org/10.1007/978-1-4842-3090-9>.

UDC 003.26:004.056.55

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.1.3>

Nikolai VASILENKO

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Doctor of Law, Full Professor, Professor at the Department of Cybersecurity, National University "Odessa Law Academy", 28 Richelevskaya St., Odessa, Ukraine, postal code 65011 (vasylenko.it@journals.maup.kiev.ua)

ORCID: 0000-0002-8555-5712

Anton SYSOIENKO

Ph. D. Student at the Department of Information Security and Computer Engineering, Cherkasy State Technological University, 460 Shevchenko Blvd., Cherkasy, Ukraine, postal code 18006 (Ampere859@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-6154-8411

Микола ВАСИЛЕНКО

доктор фізико-математичних наук, доктор юридичних наук, професор, професор кафедри кібербезпеки, Національний університет «Одеська юридична академія», вул. Рішельєвська, 28, Одеса, Україна, індекс 65011 (vasylenko.it@journals.maup.kiev.ua)

Антон СИСОЄНКО

аспірант кафедри інформаційної безпеки та комп'ютерної інженерії, Черкаський державний технологічний університет, б-р Шевченка, 460, Черкаси, Україна, індекс 18006 (Ampere859@gmail.com)

Bibliographic description of the article: Vasilenko, M., Sysoienko, A. (2023). Metod pidvyshchennia stiikosti psevdovypadkovykh poslidovnostei, syntezovanykh na osnovi operatsii dodavannia za modulem [Method for increasing the stability of pseudorandom sequences synthesized on the basis of modulo addition operations]. *Informatsiini tekhnologii ta suspilstvo – Information technology and society*, 1 (7), 21–28. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.1.3>

Бібліографічний опис статті: Василенко, М., Сисоєнко, А. Метод підвищення стійкості псевдовипадкових послідовностей, синтезованих на основі операцій додавання за модулем. *Інформаційні технології та суспільство*. 2023. Вип. 1 (7), 21–28. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.1.3>

**METHOD FOR INCREASING THE STABILITY OF PSEUDORANDOM SEQUENCES
SYNTHESIZED ON THE BASIS OF MODULO ADDITION OPERATIONS**

Problems of security and integrity of information in computer systems and networks require special approaches to their solution. Data exchange processes have become much simpler, faster, and some of them are free. Making important decisions in industry, financial and government spheres is no longer possible without processing gigantic arrays of information. Due to the recent events in Ukraine and the world and the increase in the number of attacks on computer systems, it is necessary to solve new tasks of information protection, which are faced by relevant specialists. At the same time, the danger of interference in the operation of information systems for unauthorized reading of information begins to grow. Currently, there is a global transition to an information society, the development of which is inextricably linked with the intensification of information processes, the need to collect, process and transmit huge amounts of information. Informatization has affected all spheres of human activity as a whole: public administration, finance, economy, education, production, etc. A special place in the field of information protection is occupied by tasks, the solution of which has important scientific, technical and national importance. One of these tasks is to increase the efficiency of computer cryptography algorithms due to the development of new microcrypto primitives. Cryptography is one of the ways to combat cybercrime. Various cryptographic encryption methods, which are used to protect information resources that are processed, stored and transmitted in modern information and communication systems and networks, make it possible to sufficiently reliably and effectively protect information from unauthorized access and familiarization with it. Cryptographic protection, that is, the use of text encryption procedure with the help of complex mathematical algorithms, is gaining more and more popularity. The solution of this task will make it possible to improve the existing crypto algorithms and create new ones, the main advantages of which will be high speed and crypto resistance due to the increase in the variability of the encryption process. The paper provides a theoretical substantiation of the effect of improving the quality of statistical characteristics of the resulting pseudorandom sequence, built on the basis of modulo addition of the results of two-bit operations of cryptographic transformation of information. The obtained results are confirmed by statistical portraits of the testing of the studied pseudorandom sequences. The constructed portraits for various parameters of sequence generation have been analyzed.

Key words: pseudorandom sequence, modulo addition operations, cryptographic transformation, cryptanalysis.

МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ПСЕВДОВИПАДКОВИХ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ, СИНТЕЗОВАНИХ НА ОСНОВІ ОПЕРАЦІЙ ДОДАВАННЯ ЗА МОДУЛЕМ

Проблеми захищеності та цілісності інформації в комп'ютерних системах та мережах потребують особливих підходів до їх вирішення. Процеси обміну даними стали набагато простішими, швидшими, а деякі з них – безкоштовними. Прийняття важливих рішень у промисловості, фінансовій і державній сферах уже неможливе без обробки гігантських масивів інформації. У зв'язку з останніми подіями в Україні та світі, збільшенням кількості атак на комп'ютерні системи необхідно вирішувати нові задачі захисту інформації, які постають перед відповідними фахівцями. Водночас почала зростати небезпека втручання в роботу інформаційних систем для несанкціонованого зчитування інформації. Нині відбувається глобальний перехід до інформаційного суспільства, розвиток якого нерозривно пов'язаний з інтенсифікацією інформаційних процесів, необхідністю збору, обробки і передавання величезних обсягів інформації. Інформатизація торкнулася всіх сфер діяльності людини в цілому: державного управління, фінансів, економіки, освіти, виробництва та ін. Особливе місце у сфері захисту інформації посідають задачі, вирішення яких має важливе науково-технічне й загальнодержавне значення. Однією з таких задач є підвищення ефективності алгоритмів комп'ютерної криптографії за рахунок розробки нових мікрокриптопримітивів. Одним із шляхів боротьби з кіберзлочинністю є криптографія. Різноманітні криптографічні методи шифрування, які використовують з метою захисту інформаційних ресурсів, що обробляються, зберігаються та передаються в сучасних інформаційно-комунікаційних системах та мережах, дозволяють досить надійно та ефективно захищати інформацію від несанкціонованого доступу та ознайомлення з нею. Криптографічний захист, тобто використання процедури шифрування тексту за допомогою складних математичних алгоритмів, завойовує все більшу популярність. Вирішення цієї задачі дозволить вдосконалити існуючі криптоалгоритми та створити нові, основними перевагами яких будуть висока швидкість та криптостійкість, обумовлена збільшенням варіативності процесу шифрування. У роботі проведено теоретичне обґрунтування ефекту підвищення якості статистичних характеристик результуючої псевдовипадкової послідовності, побудованої на основі додавання за модулем результатів дворозрядних операцій криптографічного перетворення інформації. Отримані результати підтверджені статистичними портретами тестування досліджуваних псевдовипадкових послідовностей. Виконано аналіз побудованих портретів для різних параметрів формування послідовностей.

Ключові слова: псевдовипадкова послідовність, операції додавання за модулем, криптоперетворення, криптоаналіз.

The problem statement. Information today is considered as a strategic product. A significant increase in volumes of information flows in all areas of social relations, which are processed, transmitted and stored with the help of computer systems, is associated with the processing of gigantic arrays of information. Problems of security and integrity of information in computer systems and networks require special approaches to their solution.

Nowadays, technologies for processing and transmitting large volumes of information are gaining more and more importance. If this information belongs to the category of information with limited access, there is an additional requirement for the need to protect it. Cryptographic methods and means of information protection form the basis of ensuring information security in information and telecommunication systems. Uncontrolled distribution and use of software leads to the loss of confidentiality of information resources of citizens and the state as a whole. As a result, the development of information resources is inextricably linked with their security and protection.

It should be taken into account that the most reliable protection is provided only with the help of integrated approach, and the solution of the task of information security should be a set of organizational, technical and cryptographic measures. Thus, the urgency of the problem of ensuring information protection in all spheres of life of a person, society and the state (social, political, economic, military, ecological, scientific and technological, informational ones, etc.) serves as a basis for creating new developments in the field of information security and is considered one of the promising areas of scientific research.

Analysis of recent research and publications. Cryptographic protection is one of the promising areas of scientific research both in our country and abroad in the field of information protection.

A significant contribution to the improvement of existing and development of new methods and means of cryptographic protection of information has been made by the following foreign and domestic scientists: C.E. Shannon, B. Schneier, G. Brassard, J.L. Massey, W. Diffie, M.E. Hellman, R.L. Rivest, A. Shamir, N. Koblitz, O.A. Moldovian, M.A. Moldovian, V.M. Rudnytskyi, I.D. Horbenko, V.K. Zadiraka, M.A. Ivanov, A.N. Fionov, V.V. Yashchenko, O.O. Logachov, B.Ya. Riabko, A.M. Oleksiichuk, L.V. Kovalchuk, A.Ya. Biletskyi, O.H. Korchenko et al.

However, in connection with the development of computer systems, the tasks of increasing the level of information protection and reducing the encryption time have always been and will remain unsolved. The main characteristics of cryptographic systems are stability, speed and reliability of cryptographic transformation, which must be constantly improved. The use of the latest technologies increases the requirements for the quality of original sequences of pseudorandom numbers, which are the basis of ensuring data confidentiality in the development of new methods for cryptographic protection of information for computer cryptography systems [1, 2]. Pseudorandom sequence (PRS) is widely used in modern computer systems to solve such tasks as protection

of information from unauthorized access, control of information integrity, generation of signals that provide hidden data transmission, simulation of complex systems and objects [3–5]. The term "random sequence" will mean a sequence generated by a physical process, the result of which is unpredictable and cannot be reproduced. By a pseudorandom sequence of numbers, we will understand a reproducible sequence generated with the help of deterministic algorithm (regardless of the method of its implementation), which has statistical properties with a specified accuracy that repeat all or part of statistical properties of random sequences.

Currently, a number of methods for the synthesis of operations of direct, inverse and mutual cryptographic transformation have been developed [6, 7, 8]. The main advantage of cryptographic transformation is high speed of implementation of crypto algorithms. However, all the possibilities of increasing the stability of cryptographic systems based on cryptographic transformation operations have not been exhausted at the moment. Therefore, there is a need to conduct additional research aimed at developing algorithms for the synthesis of pseudorandom sequences based on the use of cryptographic transformation operations.

Based on quality indicators of pseudorandom sequences specified in [9–11], the assessment of the quality of a pseudorandom sequence synthesized on the basis of operations of cryptographic transformation of information and modulo two addition has been carried out.

In articles [3, 12–15], a study of a pseudorandom number generator based on the use of modulo addition operation of some number M of two or more pseudorandom sequences (the period of which is mutually simple), which shows that the combination of sequences leads to an increase in the period and improvement of statistical properties of the resulting pseudorandom sequence, has been conducted.

In articles [16–18], a procedure for the synthesis of pseudorandom sequences based on the use of modulo M {2;4} addition operation of $Q \in \{2;3;4;5\}$ results of random two-bit operations of cryptographic transformation of information is considered and experimentally investigated. As a result of these studies, the probability of degeneracy of the resulting transformation operation, which leads to an increase in the stability of cryptographic systems, is empirically determined, and a quantitative indicator of the assessment of the quality of pseudorandom sequence construction according to the specified principle is also proposed.

In works [10, 19, 20] based on quality indicators of pseudorandom sequences, an analysis of methods for assessing the quality of pseudorandom sequences, the synthesis of which was conducted based on the use of operations of modulo two addition for computer cryptography systems, has been carried out.

In [21, 22], it is shown that for practical implementation of a cryptographic algorithm based on the use of the proposed information-driven permutation operations, it is necessary to determine practical cryptographic stability of the algorithm, which directly depends on the password length and the number of operations used to encrypt information.

In [23], the entire sequence of mathematical transformations, which provides the synthesis of a formalized model of the operation, suitable for practical use in crypto primitives, is considered.

The study of the quality of a pseudorandom sequence synthesized on the basis of operations of cryptographic transformation of information is an urgent problem of the modern development of information technologies [24].

The purpose of the article is the theoretical substantiation of the effect of improving the quality of statistical characteristics of the resulting pseudorandom sequence, built on the basis of modulo addition of the results of two-bit operations of cryptographic transformation of information.

Results and discussion. After conducting an analysis of scientific studies of the received sequences for theoretical substantiation of the reasons for the change in their quality, let's formalize the obtained results. For this, we introduce the following notations.

Let $Z = \bigcup z_j$ be a binary information sequence that is divided into combinations of pairs of binary symbols $z_j, j = 1, 2, \dots, l$. Coding operations are determined by commands, the number Q and the sequence number i of which correspond to the number and sequence number of independent cryptographic transformations. Let's denote the operation of two-bit encoding of the j -th combination of information sequence for the i -th team by $F_{i,Q}^k(z_j)$. Then for $Q=2$ commands: $F_{1,2}^k(z_1)$ is an operation of two-bit encoding of the first sequence combination for the first command; $F_{2,2}^k(z_1)$ is an operation of two-bit encoding of the first sequence combination for the second command; $F_{1,2}^k(z_2)$ is an operation of two-bit encoding of the second sequence combination for the first command; $F_{2,2}^k(z_2)$ is an operation of two-bit encoding of the second sequence combination for the second command.

Based on the given notations, let's formalize the algorithm for constructing a pseudorandom sequence based on the use of operations of modulo two addition of two transformation results.

Let's denote the operation of two-bit decoding of the j -th combination of the sequence for the i -th command by $F_{i,Q}^d(z_j)$, and the operations of two-bit encoding and decoding of the j -th combination of the sequence by $F_Q^k(z_j)$ and $F_Q^d(z_j)$. Then for $Q=2$:

1) if $F_{1,2}^d(z_1) = F_{1,2}^{-k}(z_1): F_{1,2}^k(z_1) \times F_{1,2}^d(z_1) = E$, where E is an unary operator, and $F_{2,2}^d(z_1) = F_{2,2}^{-k}(z_1): F_{2,2}^k(z_1) \times F_{2,2}^d(z_1) = E$, then for $F_2^k(z_1) = F_{1,2}^k(z_1) \oplus F_{2,2}^k(z_1)$ and $F_2^d(z_1) = F_2^{-k}(z_1)$ it holds: $F_2^k(z_1) \times F_2^d(z_1) \neq E$;

2) if $F_{1,2}^d(z_2) = F_{1,2}^{-k}(z_2) : F_{1,2}^k(z_2) \times F_{1,2}^d(z_2) = E$, $F_{2,2}^d(z_2) = F_{2,2}^{-k}(z_2) : F_{2,2}^k(z_2) \times F_{2,2}^d(z_2) = E$, then for $F_2^k(z_2) = F_{1,2}^k(z_2) \oplus F_{2,2}^k(z_2)$ and $F_2^d(z_2) = F_{1,2}^d(z_2) \oplus F_{2,2}^d(z_2)$ it holds: $F_2^k(z_2) \times F_2^d(z_2) \neq E$;

3) if $F_{1,2}^d(z_3) = F_{1,2}^{-k}(z_3) : F_{1,2}^k(z_3) \times F_{1,2}^d(z_3) = E$, $F_{2,2}^d(z_3) = F_{2,2}^{-k}(z_3) : F_{2,2}^k(z_3) \times F_{2,2}^d(z_3) = E$, then for $F_2^k(z_3) = F_{1,2}^k(z_3) \oplus F_{2,2}^k(z_3)$ and $F_2^d(z_3) = F_{1,2}^d(z_3) \oplus F_{2,2}^d(z_3)$ it holds: $F_2^k(z_3) \times F_2^d(z_3) \neq E$, etc.

In general case, if $F_{1,2}^d(z_j) = F_{1,2}^{-k}(z_j) : F_{1,2}^k(z_j) \times F_{1,2}^d(z_j) = E$, $F_{2,2}^d(z_j) = F_{2,2}^{-k}(z_j) : F_{2,2}^k(z_j) \times F_{2,2}^d(z_j) = E$, then for $F_2^k(z_j) = F_{1,2}^k(z_j) \oplus F_{2,2}^k(z_j)$ and $F_2^d(z_j) = F_{1,2}^d(z_j) \oplus F_{2,2}^d(z_j)$ it holds: $F_2^k(z_j) \times F_2^d(z_j) \neq E$.

Let's formalize the algorithm for constructing a pseudorandom sequence based on the use of operations of modulo two addition of three transformation results. Then for $Q=3$:

1) if $F_{1,3}^d(z_1) = F_{1,3}^{-k}(z_1) : F_{1,3}^k(z_1) \times F_{1,3}^d(z_1) = E$, $F_{2,3}^d(z_1) = F_{2,3}^{-k}(z_1) : F_{2,3}^k(z_1) \times F_{2,3}^d(z_1) = E$, $F_{3,3}^d(z_1) = F_{3,3}^{-k}(z_1) : F_{3,3}^k(z_1) \times F_{3,3}^d(z_1) = E$, then for $F_3^k(z_1) = F_{1,3}^k(z_1) \oplus F_{2,3}^k(z_1) \oplus F_{3,3}^k(z_1)$ and $F_3^d(z_1) = F_{1,3}^d(z_1) \oplus F_{2,3}^d(z_1) \oplus F_{3,3}^d(z_1)$ it holds: $F_3^k(z_1) \times F_3^d(z_1) \neq E$;

2) if $F_{1,3}^d(z_2) = F_{1,3}^{-k}(z_2) : F_{1,3}^k(z_2) \times F_{1,3}^d(z_2) = E$, $F_{2,3}^d(z_2) = F_{2,3}^{-k}(z_2) : F_{2,3}^k(z_2) \times F_{2,3}^d(z_2) = E$, $F_{3,3}^d(z_2) = F_{3,3}^{-k}(z_2) : F_{3,3}^k(z_2) \times F_{3,3}^d(z_2) = E$, then for $F_3^k(z_2) = F_{1,3}^k(z_2) \oplus F_{2,3}^k(z_2) \oplus F_{3,3}^k(z_2)$ and $F_3^d(z_2) = F_{1,3}^d(z_2) \oplus F_{2,3}^d(z_2) \oplus F_{3,3}^d(z_2)$ it holds: $F_3^k(z_2) \times F_3^d(z_2) \neq E$;

3) if $F_{1,3}^d(z_3) = F_{1,3}^{-k}(z_3) : F_{1,3}^k(z_3) \times F_{1,3}^d(z_3) = E$, $F_{2,3}^d(z_3) = F_{2,3}^{-k}(z_3) : F_{2,3}^k(z_3) \times F_{2,3}^d(z_3) = E$, $F_{3,3}^d(z_3) = F_{3,3}^{-k}(z_3) : F_{3,3}^k(z_3) \times F_{3,3}^d(z_3) = E$, then for $F_3^k(z_3) = F_{1,3}^k(z_3) \oplus F_{2,3}^k(z_3) \oplus F_{3,3}^k(z_3)$ and $F_3^d(z_3) = F_{1,3}^d(z_3) \oplus F_{2,3}^d(z_3) \oplus F_{3,3}^d(z_3)$ it holds: $F_3^k(z_3) \times F_3^d(z_3) \neq E$, etc.

In general case, if $F_{1,3}^d(z_j) = F_{1,3}^{-k}(z_j) : F_{1,3}^k(z_j) \times F_{1,3}^d(z_j) = E$, $F_{2,3}^d(z_j) = F_{2,3}^{-k}(z_j) : F_{2,3}^k(z_j) \times F_{2,3}^d(z_j) = E$, $F_{3,3}^d(z_j) = F_{3,3}^{-k}(z_j) : F_{3,3}^k(z_j) \times F_{3,3}^d(z_j) = E$, then for $F_3^k(z_j) = F_{1,3}^k(z_j) \oplus F_{2,3}^k(z_j) \oplus F_{3,3}^k(z_j)$ and $F_3^d(z_j) = F_{1,3}^d(z_j) \oplus F_{2,3}^d(z_j) \oplus F_{3,3}^d(z_j)$ it holds: $F_3^k(z_j) \times F_3^d(z_j) \neq E$.

Let's formalize the algorithm for constructing a pseudorandom sequence based on operations of modulo two addition of Q transformation results:

1) if for $\forall i \leq Q$ $F_{i,Q}^d(z_1) = F_{i,Q}^{-k}(z_1) : F_{i,Q}^k(z_1) \times F_{i,Q}^d(z_1) = E$, then for $F_Q^k(z_1) = F_{1,Q}^k(z_1) \oplus F_{2,Q}^k(z_1) \oplus \dots \oplus F_{Q,Q}^k(z_1)$ and $F_Q^d(z_1) = F_{1,Q}^d(z_1) \oplus F_{2,Q}^d(z_1) \oplus \dots \oplus F_{Q,Q}^d(z_1)$ it holds: $F_Q^k(z_1) \times F_Q^d(z_1) \neq E$;

2) if for $\forall i \leq Q$ $F_{i,Q}^d(z_2) = F_{i,Q}^{-k}(z_2) : F_{i,Q}^k(z_2) \times F_{i,Q}^d(z_2) = E$, then for $F_Q^k(z_2) = F_{1,Q}^k(z_2) \oplus F_{2,Q}^k(z_2) \oplus \dots \oplus F_{Q,Q}^k(z_2)$ and $F_Q^d(z_2) = F_{1,Q}^d(z_2) \oplus F_{2,Q}^d(z_2) \oplus \dots \oplus F_{Q,Q}^d(z_2)$ it holds: $F_Q^k(z_2) \times F_Q^d(z_2) \neq E$;

3) if for $\forall i \leq Q$ $F_{i,Q}^d(z_3) = F_{i,Q}^{-k}(z_3) : F_{i,Q}^k(z_3) \times F_{i,Q}^d(z_3) = E$, then for $F_Q^k(z_3) = F_{1,Q}^k(z_3) \oplus F_{2,Q}^k(z_3) \oplus \dots \oplus F_{Q,Q}^k(z_3)$ and $F_Q^d(z_3) = F_{1,Q}^d(z_3) \oplus F_{2,Q}^d(z_3) \oplus \dots \oplus F_{Q,Q}^d(z_3)$ it holds: $F_Q^k(z_3) \times F_Q^d(z_3) \neq E$, etc.

In general case, if for $\forall i \leq Q$ $F_{i,Q}^d(z_j) = F_{i,Q}^{-k}(z_j) : F_{i,Q}^k(z_j) \times F_{i,Q}^d(z_j) = E$, then for $F_Q^k(z_j) = F_{1,Q}^k(z_j) \oplus F_{2,Q}^k(z_j) \oplus \dots \oplus F_{Q,Q}^k(z_j)$ and $F_Q^d(z_j) = F_{1,Q}^d(z_j) \oplus F_{2,Q}^d(z_j) \oplus \dots \oplus F_{Q,Q}^d(z_j)$ it holds: $F_Q^k(z_j) \times F_Q^d(z_j) \neq E$.

Thus, as a result of the formalization of algorithms for constructing pseudorandom sequences based on the use of operations of modulo M addition of Q results of the transformation, dependencies are obtained that confirm the degeneracy of the result regardless of Q and M values.

Experimental studies have shown that for $Q \in \{2;3;4;5\}$ the values of relative coefficient of the quality of pseudorandom sequence construction reach the values suitable for its practical use.

The essence of the method for increasing the stability of pseudorandom sequences to linear cryptanalysis is due to the following: $F_Q^k(z_j) \times F_Q^d(z_j) \neq E$, where $F_Q^k(z_j) = F_{1,Q}^k(z_j) \oplus F_{2,Q}^k(z_j) \oplus \dots \oplus F_{Q,Q}^k(z_j)$, $F_Q^d(z_j) = F_{1,Q}^d(z_j) \oplus F_{2,Q}^d(z_j) \oplus \dots \oplus F_{Q,Q}^d(z_j)$, and for $\forall i \leq Q$ $F_{i,Q}^d(z_j) = F_{i,Q}^{-k}(z_j) : F_{i,Q}^k(z_j) \times F_{i,Q}^d(z_j) = E$.

Let's check the quality of pseudorandom sequences for resistance to linear cryptanalysis attacks using the system for evaluation of NIST STS statistical properties [25].

Statistical portraits of the results of testing of pseudorandom sequences, obtained on the basis of independent two-bit random operations of the information sequence cryptotransformation followed by modulo two and four addition of the obtained results, are shown in Figures 1–2.

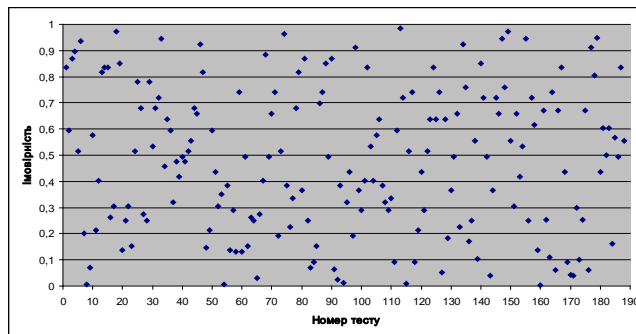


Fig. 1. Statistical portrait of the software implementation of the algorithm of pseudorandom sequence generation for $M=2$

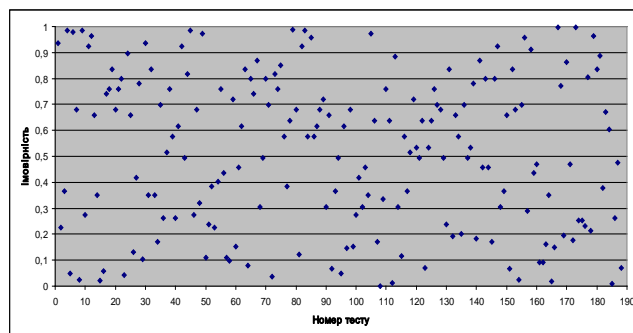


Fig. 2. Statistical portrait of the software implementation of the algorithm of pseudorandom sequence generation for $M=4$

The analysis of statistical portraits presented in Figures 1 and 2 shows that the pseudorandom sequence obtained on the basis of independent crypto transformation operations with subsequent modulo two addition of the obtained results has slight advantages in terms of resistance to linear cryptanalysis compared to the pseudorandom sequence obtained on the basis of modulo four addition of the results of independent two-bit operations of cryptographic transformation.

An increase in the number of crypto transformation operations leads to a sharp significant decrease in the share of degenerate resulting operations (for $Q=3$) followed by a gradual increase in this share (for $Q=4$ and $Q=5$).

Conclusions and prospects for further research. The presented research has made it possible to obtain the following results:

- algorithms for constructing pseudorandom sequences based on the use of modulo M addition operations of Q results of independent two-bit cryptographic transformations of the sequence have been formalized;
- dependences that confirm the degeneracy of the result of the synthesis of such sequences regardless of Q and M values have been obtained;
- the essence of the method for increasing the resistance of the obtained pseudorandom sequences to linear cryptanalysis has been presented, and their testing with the help of NIST tests has also been performed.

Further studies will be conducted to further confirm the improvement of the quality of the obtained result and the possibility of establishing the dependence between the input information and PRS results, as well as the possibility of establishing the dependence of PRS construction. If the dependence is not established, then the built PRS can be used as a damping sequence.

This method will be proposed to be used in further scientific research to solve the task of constructing a discrete model of the synthesis of pseudorandom sequence using available computing tools. In further research, the assessment of the quality of developed method of increasing the stability of pseudorandom sequences to linear cryptanalysis with additional damping and a given number of primary pseudorandom sequences of the transformation will be carried out.

Bibliography:

1. Рудницький В.М., Лада Н.В., Бабенко В.Г. Криптографічне кодування: синтез операцій потокового шифрування з точністю до перестановки: монографія / Черкас. держ. технол. ун-т. Харків: ДІСА ПЛЮС, 2018. 184 с.
2. Method for developing pseudo-random number generators for cryptographic applications in 5g networks / S. Gnatyuk, Y. Burmak, R. Berdibayev et al. *Cybersecurity: Education, Science, Technique*: Electronic scientific publication. 2021. No. 4 (12). P. 151–162. URL: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2021.12.151162>.
3. Фауре Э.В., Щерба А.И., Лавданский А.А. Анализ корреляционных свойств последовательностей (псевдо) случайных чисел. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2015. № 1 (18) С. 142–150. URL: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Nitps_2015_1_32.pdf.
4. Faure E., Myronets I., Lavdanskyy A. Autocorrelation criterion for quality assessment of random number sequences. *3rd International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2020)*, (Zaporizhzhia, Apr. 27, 2020 – May 1, 2020). P. 675–689. ISSN: 1613-0073. URL: <https://doi.org/10.32782/cmisis/2608-52>.
5. Faure E., Fedorov E., Myronets I., Sysoienko S. Method for generating pseudorandom sequence of permutations based on linear congruential generator. *Fifth International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2022)*, (Zaporizhzhia, May 12, 2022). P. 175–185. ISSN: 1613-0073. URL: <https://doi.org/10.32782/cmisis/3137-15>.
6. Рудницький В.М., Бабенко В.Г., Стабецька Т.А. Узагальнений метод синтезу обернених нелінійних операцій розширеного матричного криптографічного перетворення. *Системи обробки інформації: зб. наук. пр.* Харків: ХУПС ім. І. Кожедуба, 2014. Вип. 6 (122). С. 118–121.

7. Научные технологии в инфокоммуникациях: обработка и защита информации: кол. монография / под ред. В.М. Безрука, В.В. Баранника. Харьков: Компания СМІТ, 2013. 398 с.
8. Бабенко В.Г., Мельник О.Г., Стабейка Т.А. Построение нелинейных операций расширенного матричного криптографического преобразования. Криптографическое кодирование: кол. монография / под ред. В.Н. Рудницкого, В.Я. Мильчевича. Харьков: Щедрая усадьба плюс, 2014. С. 41–55.
9. Ferguson N., Schneier B., Kohno T. Cryptography Engineering: Design Principles and Practical Applications. March 2010. 384 p. ISBN: 978-0-470-47424-2.
10. L'Ecuyer P., Simard R., Chen E.J., Kelton W.D. An object-oriented random-number package with many long streams and substreams. *Operations research*. 2002. Vol. 50. No. 6. P. 1073–1075.
11. Буценко Ю., Розоринов Г., Савченко Ю. Общее и селективное тестирование псевдослучайных битовых последовательностей. *Сучасний захист інформації: наук.-техн. журн.* 2014. № 2. С. 16–21.
12. Лавданский А.А., Фауре Э.В. Оценка статистических свойств последовательностей на выходе комбинаторного генератора с помощью графических тестов. *Системні дослідження та інформаційні технології*. Київ, 2015. № 2. С. 39–50.
13. Лавданский А.А., Фауре Э.В. Комбинаторный метод формирования последовательности псевдослучайных чисел. *Системний аналіз та інформаційні технології (SAIT-2014)*: матеріали 16-ї Міжнар. наук.-техн. конф., (Київ, 26-30 трав. 2014 р.). Київ: ННК «ІПСА» НТУУ «КПІ», 2014. С. 403–404.
14. Фауре Э.В., Щерба А.И., Лавданский А.А. Оценка статистических характеристик последовательности псевдослучайных чисел, порожденной комбинаторным генератором. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2015. № 18. С. 165–171.
15. Лавданський А.О. Оцінка часу формування послідовності псевдовипадкових чисел. *Проблеми інформатизації: матеріали Четвертої міжнар. наук.-техн. конф., (Черкаси – Баку – Бельсько-Бяла – Полтава)*. Черкаси: ЧДТУ, 2016. С. 71.
16. Ланських Є.В., Сисоєнко С.В., Пустовіт М.О. Оцінка якості псевдовипадкових послідовностей на основі використання операцій додавання за модулем два. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2015. № 4 (21). С. 147–150.
17. Фауре Э.В., Сисоєнко С.В., Миронюк Т.В. Синтез і аналіз псевдовипадкових послідовностей на основі операцій криптографічного перетворення. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава: ПНТУ, 2015. № 4 (36). С. 130–133.
18. Фауре Э.В., Сисоєнко С.В. Оцінка якості псевдовипадкових послідовностей на основі додавання за модулем. *Вісник інженерної академії України*. Київ, 2016. № 3. С. 165–172.
19. Сисоєнко С.В., Сисоєнко А.А. Дослідження та аналіз псевдовипадкових послідовностей для систем комп'ютерної криптографії. *Проблеми інформатизації: тези доп. сьомої міжнар. наук.-техн. конф., (Черкаси: ЧДТУ; Харків: НТУ «ХПІ», ДП «ПД ПКНДІ АП»; Баку: ВА ЗС АР; Бельсько-Бяла: УТІГН, 13–15 листоп. 2019 р.)*. 2019. Т. 3: секції 5–7. С. 67.
20. Sysoienko A.A., Sysoienko S.V. Investigation of the quality of pseudorandom sequences synthesized on the basis of modulo two addition operations. *Десята міжнародна науково-технічна конференція: тези доп., (Черкаси: ЧДТУ; Харків: НТУ «ХПІ», ДП «ПД ПКНДІ АП»; Баку: ВА ЗС АР; Бельсько-Бяла, 24–25 листоп. 2022 р.)*. 2022. Т. 1. С. 85.
21. Бабенко В.Г., Миронюк Т.В., Кривоус Г.В. Алгоритми застосування операцій перестановок, керованих інформацією, для реалізації криптоперетворення інформації. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2021. № 3. С. 44–58. URL: <https://doi.org/10.24025/2306-4412.3.2021.247252>.
22. Захист інформації на основі операцій перестановок, керованих інформацією: монографія / Т.В. Миронюк, С.В. Сисоєнко, В.Г. Бабенко та ін.; Черкас. держ. технол. ун-т. Черкаси: видавець Гордієнко Є.І., 2021. С. 103–164. ISBN: 978-966-97302-2-0.
23. Synthesis of reverse two-bit dual-operated strictly straight cryptographic coding on the basis of another operation / V. Rudnitsky, R. Berdibayev, R. Breus et al. *Сучасні інформаційні системи*. 2019. Т. 3. № 4. С. 109–114. doi: 10.20998/2522-9052.2019.4.16.
24. Криптографічне кодування: обробка та захист інформації: кол. монографія / під ред. В.М. Рудницького; Черкас. держ. технол. ун-т. Харків: Діса Плюс, 2018. 139 с.
25. Богданов В.В., Паламарчук Н.А. Навчальний комплекс статистичної оцінки псевдовипадкових і текстових послідовностей. *Збірник наукових праць Військового інституту телекомунікацій та інформатизації Національного технічного університету України «КПІ»*. Київ: ВІТІ НТУУ «КПІ», 2007. Вип. 3. С. 17–26.

References:

1. Rudnitskyi, V.M., Lada, N.V., Babenko, V.H. (2018). Kryptohrafichne koduvannia: syntez operatsii potokovoho shyfruvannia z tochnistiu do perestanovky: monohrafiia [Cryptographic Coding: Synthesis of Stream Encryption Operations with Permutation Accuracy: monograph], Cherkasy State Technological University. Kharkiv: DISA PLIUS, 184 p. [in Ukrainian].
2. Gnatyuk, S., Burmak, Y., Berdibayev, R. et al. (2021). Method for developing pseudo-random number generators for cryptographic applications in 5g networks. *Cybersecurity: Education, Science, Technique*: Electronic scientific publication, 4 (12), 151–162. Retrieved from <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2021.12.151162>.
3. Faure, E.V., Shcherba, A.I., Lavdanskij, A.A. (2015). Analiz korrelyacionnyh svojstv posledovatel'nostej (psevido) sluchajnyh chisel [Analysis of correlation properties of sequences of (pseudo) random numbers]. *Nauka i tekhnika*

Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy – Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine, 1 (18), 142–150. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Nitps_2015_1_32.pdf

4. Faure, E., Myronets, I., Lavdanskyy, A. (2020). Autocorrelation criterion for quality assessment of random number sequences. *3rd International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2020)*, (Zaporizhzhia, Apr. 27 – May 1), 675–689. ISSN: 1613-0073. Retrieved from <https://doi.org/10.32782/cmisis/2608-52>.

5. Faure, E., Fedorov, E., Myronets, I., Sysoienko, S. (2022). Method for generating pseudorandom sequence of permutations based on linear congruential generator. *Fifth International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2022)*, (Zaporizhzhia, May 12), 175–185. ISSN: 1613-0073. Retrieved from <https://doi.org/10.32782/cmisis/3137-15>.

6. Rudnytskyi, V.M., Babenko, V.H., Stabetska, T.A. (2014). Uzahalnenyi metod syntezy obrabotky nelineynykh operatsii rozshyrenoho matrychnoho kryptografichnogo peretvorennia [Generalized method of synthesis of inverse nonlinear operations of extended matrix cryptographic transformation]. *Systemy obrobky informatsii – Information Processing Systems*. Kharkiv: KhUPS im. I. Kozheduba, 6 (122), 118–121 [in Ukrainian].

7. Naukoemkie tekhnologii v infokommunikatsiyah: obrabotka i zashchita informatsii: kol. monografiya [Science-Intensive Technologies in Infocommunications: Processing and Protection of Information: coll. monograph], V.M. Bezruk, V.V. Barannik (eds.) (2013). Kharkiv: Kompaniya SMIT, 398 p.

8. Babenko, V.G., Mel'nik, O.G., Stabec'kaya, T.A. (2014). Postroenie nelineynykh operatsiy rasshirenogo matrychnogo kriptograficheskogo preobrazovaniya. Kriptograficheskoe kodirovaniye: koll. monografiya [Construction of Non-Linear Operations of Extended Matrix Cryptographic Transformation. Cryptographic Coding: coll. monograph], V.N. Rudnitsky, V.Ya. Milchevich (eds.). Kharkov: Shchedraya usad'ba plyus, 41–55

9. Ferguson, N., Schneier, B., Kohno, T. (2010). *Cryptography Engineering: Design Principles and Practical Applications*. ISBN: 978-0-470-47424-2, March, 384 p.

10. L'Ecuyer, P., Simard, R., Chen, E.J., Kelton, W.D. (2002). An object-oriented random-number package with many long streams and substreams. *Operations research*, 50 (6), 1073–1075.

11. Bucenko, Yu., Rozorinov, G., Savchenko, Yu. (2014). Obshchee i selektivnoe testirovaniye psevdosluchajnykh bitovykh posledovatel'nostey [General and selective testing of pseudo-random bit sequences]. *Suchasnyi zakhyst informatsii – Modern Information Protection*, 2, 16–21

12. Lavdanskij, A.A., Faure, E.V. (2015). Ocenka statisticheskikh svoystv posledovatel'nostey na vyhode kombinatsionnogo generatorka s pomoshch'yu graficheskikh testov [Evaluation of statistical properties of sequences at the output of a combinational generator using graphic tests]. *Systemni doslidzhennia ta informatsiini tekhnologii – System Research and Information Technologies*, 2, 39–50.

13. Lavdanskij, A.A., Faure, E.V. (2014). Kombinatsionnyy metod formirovaniya posledovatel'nosti psevdosluchajnykh chysel [Combination method for generating a sequence of pseudo-random numbers]. *Systemnyi analiz ta informatsiini tekhnologii – System Analysis and Information Technologies: materials of the 16th Int. Sci. and Tech. Conf. (SAIT-2014)*, (Kyiv, May 26–30). Kyiv: NNK "IPSA" NTUU "KPI", 403–404.

14. Faure, E.V., Shcherba, A.I., Lavdanskij, A.A. (2015). Ocenka statisticheskikh harakteristik posledovatel'nosti psevdosluchajnykh chysel, porozhdennoj kombinatsionnym generatorkom [Estimation of statistical characteristics of a sequence of pseudorandom numbers generated by a combination generator]. *Kompiuterno-intehrovani tekhnologii: osvita, nauka, vyrobnytstvo – Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Manufacturing*, 18, 165–171.

15. Lavdanskyy, A.O. (2016). Otsinka chasu formuvannia poslidovnosti psevdovypadkovykh chysel [Estimation of the formation time of a sequence of pseudorandom numbers]. *Problemy informatyzatsii – Informatization Problems: Proc. of the Fourth Int. Sci. and Tech. Conf. (Cherkasy – Baku – Belsko-Biala – Poltava)*. Cherkasy: ChDTU, 71 [in Ukrainian].

16. Lanskykh, Ye.V., Sysoienko, S.V., Pustovit, M.O. (2015). Otsinka yakosti psevdovypadkovykh poslidovnostey na osnovi vykorystannia operatsii dodavannia za modulem dva [Evaluation of the quality of pseudorandom sequences based on the use of modulo two addition operations]. *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy – Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*, 4 (21), 147–150 [in Ukrainian].

17. Faure, E.V., Sysoienko, S.V., Myroniuk, T.V. (2015). Syntez i analiz psevdovypadkovykh poslidovnostey na osnovi operatsii kryptografichnogo peretvorennia [Synthesis and analysis of pseudorandom sequences based on cryptographic transformation operations]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku – Control, Navigation and Communication Systems*. Poltava: PNTU, 4 (36), 130–133 [in Ukrainian].

18. Faure, E.V., Sysoienko, S.V. (2016). Otsinka yakosti psevdovypadkovykh poslidovnostey na osnovi dodavannia za modulem [Quality assessment of pseudorandom sequences based on modulo addition]. *Visnyk inzhenernoi akademii Ukrainy – Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine*. 3, 165–172 [in Ukrainian].

19. Sysoienko, S.V., Sysoienko, A.A. (2019). Doslidzhennia ta analiz psevdovypadkovykh poslidovnostey dlia system komp'uternoi kryptografii [Research and analysis of pseudorandom sequences for computer cryptography systems]. *Problemy informatyzatsii – Problems of Informatization: abstracts of reports of the Seventh Int. Sci. and Tech. Conf. (Cherkasy: ChDTU; Kharkiv: NTU "KhPI", DP "PD PKNDI AP"; Baku: VA ZS AR; Belsko-Biala: UTiHN, Nov. 13–15)*, 3 (5–7), 67 [in Ukrainian].

20. Sysoienko, A.A., Sysoienko, S.V. (2022). Investigation of the quality of pseudorandom sequences synthesized on the basis of modulo two addition operations. *Deciata mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia – Tenth International Scientific and Technical Conference: abstracts*, (Cherkasy: ChDTU; Kharkiv: NTU "KhPI", DP "PD PKNDI AP"; Baku: VA ZS AR; Belsko-Biala, Nov. 24–25), 1, 85.

21. Babenko, V.H., Myroniuk, T.V., Kryvov, H.V. (2021). Alhorytmy zastosuvannya operatsii perestanolok, kerovanykh informatsiieiu, dlia realizatsii kryptoperetvorennia informatsii [Algorithms for the application of information-driven permutation operations for the implementation of cryptographic transformation of information]. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnolohichnogo universytetu – Bulletin of the Cherkasy State Technological University*, 3, 44–58. Retrieved from <https://doi.org/10.24025/2306-4412.3.2021.247252> [in Ukrainian].

22. Myroniuk, T.V., Sysoienko, S.V, Babenko, V.H. et al. (2021). Zakhyst informatsii na osnovi operatsii perestanolok, kerovanykh informatsiieiu: monohrafiia [Information Protection Based on Information-Driven Permutation Operations: a monograph]; Cherkasy State Technol. Univ. Cherkasy: vydavets Hordiienko Ye.I., 103–164. ISBN: 978-966-97302-2-0 [in Ukrainian].

23. Rudnitsky, V., Berdibayev, R., Breus, R. et al. (2019). Synthesis of reverse two-bit dual-operated strictly straight cryptographic coding on the basis of another operation. *Suchasni informatsiini systemy – Modern information systems*, 3 (4), 109–114. doi: 10.20998/2522-9052.2019.4.16.

24. Kryptohrafichne koduvannia: obrobka ta zakhyst informatsii: kol. monohrafiia, [Cryptographic Coding: Information Processing and Protection: coll. monograph] (2018). V.M. Rudnytskyi (ed.), Cherkasy State Technol. Univ. Kharkiv: Disa Plius, 139 p. [in Ukrainian].

25. Bohdanov, V.V., Palamarchuk, N.A. (2007). Navchalnyi kompleks statystychnoi otsinky psevdovypadkovykh i tekstovykh poslidoynosti [Educational complex of statistical evaluation of pseudo-random and textual sequences]. *Zbirnyk naukovykh prats Viiskovoho instytutu telekomunikatsii ta informatyzatsii Natsionalnoho tekhnichnogo universytetu Ukrainy «KPI» – Collection of scientific works of the Military Institute of Telecommunications and Informatization of the National Technical University of Ukraine "KPI"*. Kyiv: VITI NTUU "KPI", 3, 17–26 [in Ukrainian].

УДК 004.942

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.1.4>

Юлія КАЗИМИРЕНКО

доктор технічних наук, доцент, професор кафедри інформаційних управляючих систем і технологій Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, пр-т Героїв України, 9, м. Миколаїв, Україна, індекс 54025 (u.a.kazimirenko@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-7120-8226

Ігор МИХЕЛЄВ

кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри інформаційних управляючих систем і технологій Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, пр-т Героїв України, 9, м. Миколаїв, Україна, індекс 54025 (mihelevigor@gmail.com)

ORCID: 0000-0001-9579-6547

Микола МАТВЄЄВ

Провідний інженер-конструктор, ДПНВКГ «Зоря»-«Машпроект», м. Миколаїв, Україна, індекс 54018 (mnasoft@gmail.com)

ORCID: 0000-0001-8221-1693

Yuliia KAZYMYRENKO

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor Department of Information Control Systems and Technologies Admiral Makarov National University of Shipbuilding, 9, Heroes of Ukraine ave., Mykolaiv, Ukraine, postal code 54025 (u.a.kazimirenko@gmail.com)

Igor MYKHELIEV

Ph.D., Head of Department of Information Management Systems and Technologies Admiral Makarov National University of Shipbuilding, 9, Heroes of Ukraine ave., Mykolaiv, Ukraine, postal code 54025 (mihelevigor@gmail.com)

Mykola MATVYEYEV

Lead of Team Engineer of GTR&DC «Zorya»-«Mashproekt», Mykolaiv, Ukraine; postal code 54018 (mnasoft@gmail.com)

Бібліографічний опис статті: Казимиренко, Ю., Михелєв, І., Матвєєв, М. (2023). Систематизація та візуалізація експериментальних випробувань газотурбінних камер згоряння у середовищі Common Lisp. *Інформаційні технології та суспільство*. Вип. 1 (7), 29–35. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.1.4>

Bibliographic description of the article: Kazymyrenko, Yu., Mikheliev, I., Matvyeyev, M. (2023). Systematyzatsiia ta vizualizatsiia eksperymentalnykh vyprobuvan hazoturbinykh kamer zghoriannia u sere dovys hchi Common Lisp [Systematization and visualization of experimental tests of gas turbine combustion chambers in the Common Lisp environment]. *Informatsiini tekhnolohii ta suspilstvo – Information technology and society*, 1 (7), 29–35. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.1.4>

**СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ВИПРОБУВАНЬ
ГАЗОТУРБІННИХ КАМЕР ЗГОРЯННЯ У СЕРЕДОВИЩІ COMMON LISP**

Стаття присвячена вирішенню важливої науково-технічної **проблеми** створення нових моделей візуалізації розрахункових та експериментальних даних для енергетичного машинобудування. **Мета роботи** полягатиме у розробці науково-методичного підґрунтя з програмним забезпеченням для візуалізації вимірювань температур при випробуваннях газотурбінних камер згоряння та його адаптацією для постановки і розв'язання ситуаційних завдань у навчальному процесі вишу. **Методи дослідження.** В основу геометричної інтерпретації формування масиву даних покладено модель елементарної комірки; алгоритм побудови двовимірної поверхні розподілу температурних полів з ефектом згладжування складено методом Гауса. Для реалізації алгоритму розроблено програмне забезпечення на мові Common Lisp; проєкт інформаційної системи представлено у вигляді сукупності графів; вивід результатів обчислень здійснюється за допомогою графічної програми Gnuplot. Методом SWOT-аналізу досліджено доцільність використання розробки у навчальному процесі студентів із застосуванням кейс-методології. **Наукове значення** одержаних результатів полягають у розробці науково-методичного підґрунтя алгоритмічної автоматизації візуалізації результатів стендових випробувань газотурбінних камер згоряння. Результати досліджень впроваджено на виробництві та планується використати у наукових дослідженнях і навчальному процесі. **Висновки.** Для енергетичного машинобудування проаналізовано сучасний стан обробки експериментальних результатів з візуалізацією даних; визначена необхідність розробки програмного забезпечення з використанням середовища,

доступного для кола інженерів-конструкторів. Розроблене програмне забезпечення реалізує функції вибірки даних, їх осереднення, відсіву недійсних значень, відновлення значень у відокремлених точках з побудовою функції осереднення за методом Гауса та можливістю корегування даних у ручному режимі. Проект інформаційної системи містить сукупність графів: орієнтований *System-graph* описує залежність системи температурного поля від її складових систем. Розглянуто можливість застосування реальної практичної ситуації на машинобудівному підприємстві та у кейс-технологіях навчального процесу.

Ключові слова: модель елементарної комірки, Common Lisp, інформаційні технології, програмне забезпечення, кейс-метод, енергетичне машинобудування.

SYSTEMATIZATION AND VISUALIZATION OF EXPERIMENTAL TESTS OF GAS TURBINE COMBUSTION CHAMBERS IN THE COMMON LISP ENVIRONMENT

The article is devoted to the solution of an important scientific and technical **problem** of creating new visualization models of calculated and experimental data for power engineering. The **purpose of the work** will be the development of a scientific and methodological basis with software for visualization of temperature measurements during tests of gas turbine combustion chambers and its adaptation for setting and solving situational tasks in the educational process of higher education. **Research methods.** The geometric interpretation of the formation of the data array is based on the elementary cell model; the algorithm for constructing a two-dimensional surface of the distribution of temperature fields with a smoothing effect was made by the Gaussian method. Software in the Common Lisp language was developed to implement the algorithm; the information system project is presented in the form of a set of graphs; calculation results are displayed using the Gnuplot graphic program. Using the method of SWOT analysis, the expediency of using development in the educational process of students with the use of case methodology was investigated. **The scientific value** of the obtained results lies in the development of a scientific and methodological basis for the algorithmic automation of visualization of the results of bench tests of gas turbine combustion chambers. The research results have been implemented in production and are planned to be used in scientific research and the educational process. **Conclusions.** For power engineering, the current state of experimental results processing with data visualization was analyzed; the need to develop software using an environment accessible to a circle of design engineers is determined. The developed software implements the functions of data sampling, averaging, filtering out invalid values, restoring values at isolated points with the construction of Gaussian averaging functions and the possibility of manual data correction. The information system project contains a set of graphs: oriented *System-graph* describes the dependence of the temperature field system on its component systems. The possibility of applying a real practical situation at a machine-building enterprise and in case technologies of the educational process is considered.

Key words: unit cell model, Common Lisp, information technology, software, case method, power engineering.

Постановка проблеми та її зв'язок з важливими науково-практичними завданнями. Підготовка висококваліфікованих інженерних кадрів з технічних спеціальностей безпосередньо пов'язана зі вмінням ставити і розв'язувати вузькоспеціалізовані та міждисциплінарні задачі з використанням сучасних інформаційних технологій і методів системного аналізу. Проектування та експлуатація об'єктів енергетичного машинобудування (газотурбінних двигунів, двигунів внутрішнього згоряння, холодильних машин і установок, систем кондиціонування та життєзабезпечення тощо) вимагатиме кваліфікованої обробки багатовимірних даних з наочним поданням теоретичних та експериментальних результатів. Так, проектування газотурбінних камер згоряння можна розглядати як задачу з ознаками складної технічної системи [1, с. 180-184], де одночасно враховуються складні фізико-хімічні процеси сумішоутворення, аеродинаміки, згоряння, тепло- і масообміну. Тому побудова моделей графічної візуалізації і кореляція оброблених розрахункових та експериментальних даних є важливою науково-технічною проблемою, практична реалізація якої вимагатиме розробки програмного забезпечення з використанням середовища, доступного для кола інженерів-конструкторів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У науково-практичних публікаціях недостатньо уваги приділяється розробці нових методів візуалізації зображень розрахункових і експериментальних даних для об'єктів енергомашинобудування. Це пов'язано з інерційністю використання для вирішення інженерних задач традиційних CFD-пакетів як це показано в роботах [2, с. 27-33] і [3, с. 180-184]. Їх зручність обумовлена сприятливою для користувача кольоровою гамою, формування якої відбувається за генним принципом. Проте побудований таким чином числовий експеримент може застосовуватися лише на етапі конструкторської проробки проекту. Розвиток методів імітаційного моделювання з обробкою існуючих числових даних не можливий без застосування якісного інструментарію, якими є пакетні програми, такі як *MATLAB*. Перевага їх використання ґрунтується на побудові спеціальних та узагальнених сигнальних графів з визначеним напрямом потоків і мінімізацією кількості значень параметрів, як це показано у роботі [4, с. 75-82]. Такий підхід передбачає міждисциплінарність досліджень, характеризується доступністю та наочністю результатів, проте має складності з математичним описом специфіки фізико-хімічних процесів, які повинні враховуватися при проектуванні газотурбінних камер згоряння. Проблемним питанням є обробка результатів стендових випробувань камер згоряння та їх складових частин на натурних та (або) змодельованих режимах роботи, під час яких вимірюються температурні параметри.

Мета роботи полягатиме у розробці науково-методичного підґрунтя з програмним забезпеченням для візуалізації вимірювань температур при випробуваннях газотурбінних камер згоряння та його адаптацією для постановки і розв'язання ситуаційних завдань у навчальному процесі вишу.

Виклад основного матеріалу. Науково-методичним підґрунтям для досліджень є науково-практичні напрацювання з математичного забезпечення процесу візуалізації даних, поданих у вигляді графів у середовищі відкритих систем [5, с. 18–33]; основні положення комп'ютерної алгебри з їх інтеграцією у хмарні технології [6, с. 320–326]; власні напрацювання авторів з визначеної проблематики [7, с. 36–41]. Методологія дослідження наведена у табл. 1.

Таблиця 1

Методологія дослідження

Метод	Можливості і реалізація методу
Модель елементарної комірки [8, с. 81–89]	Застосовується для геометричної інтерпретації формування масиву даних з вимірених значень температур
Алгоритм обробки результатів експериментальних досліджень [7, с. 36–41]	Полягає у постановці експериментальних досліджень температур у секторі кільцевої камери згоряння, фіксації значень температур продуктів згоряння у реперних точках, відбракуванні даних з вибірки за критерієм Грубса, обробці результатів методом найменших квадратів з математичним моделюванням температурних полів та згладжуванням поверхні за методом Гауса
Мова програмування <i>Common Lisp</i> [9, с. 47–51]	Застосовуються для написання програмних кодів у наукових дослідженнях та при розв'язанні інженерних задач. Поставлену задачу можна розглядати як підхід «від даних до написання коду».
Графічна програма <i>Gnuplot</i> [8, с. 81–89]	<i>Gnuplot</i> має власну систему команд, може працювати інтерактивно та в режимі командної стрічки. Утиліта є зручною для візуалізації та глибокого аналізу різних наукових даних
Скінченноелементне програмне забезпечення [10, с. 165–191]	Поширене застосування для розробки програмного забезпечення для розв'язання інженерних задач з теплофізики
SWOT-аналіз [11, с. 281–285]	Застосовується як інструмент стратегічного управління для комплексної систематизації і оцінки факторів розвитку проектів, зокрема для системно-аналітичного дослідження ситуації розробки ситуаційних завдань
Кейс-метод (Case-metod) [12, с. 39–43]	Техніка навчання, яка використовує реальні ситуації щодо виробничих проблем та ініціює роботу з Замовником

Моделювання процесу оброблення результатів вимірювань показано на прикладі елементарної комірки, у межах якої обирається три точки (рис. 1а). Навколо кожної точки яких формуються прямокутники розміром 3×3 комірки, які й складають елементарну комірку. Послідовність обробки результатів відповідно у точках 1, 2, 3 графічно зображена на рис. 1б – рис. 1г.

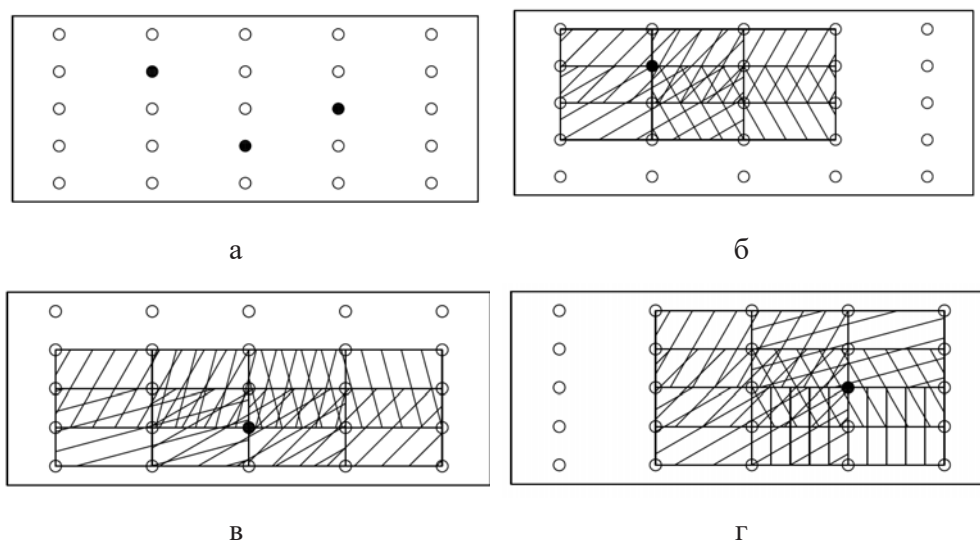


Рис. 1. Моделювання процесу оброблення результатів вимірювань у межах елементарної комірки

Алгоритм побудови двовимірної поверхні розподілу температурних полів з ефектом згладжування складено на підставі формул Гауса і наведено у табл. 2. У таблиці також розкрито функції і можливості користувача.

Таблиця 2

Алгоритм побудови двовимірної поверхні розподілу температурних полів, функції і можливості користувача

Робочі етапи	Сутність процесу
Розрахунок значень температури	$z = \frac{\sum_i \omega(d_i) \cdot z_i}{\sum_i \omega(d_i)}$ де z – значення температури; d_i – відстань до точки
Визначення відстані до точки	$z = \frac{\sum_i \omega(d_i) \cdot z_i}{\sum_i \omega(d_i)}$ де x – базова відстань
Функціональна залежність	$\omega(d) = \exp(-d^2)$
Функції користувача	Виконує роботу по занесенню значень вимірювань, створює та редагує данні, виконує розрахунки, будує ізотерми розподілу температурних полів
Можливості користувача	Автоматичний вибір показників – дає змогу вибору потрібних показників (з серії вибірки) Ручне коригування даних – надає можливості вручну здійснювати корегування експериментальних даних та роботи перевірку отриманих результатів Редагування інформації – визначає можливості побудови поверхні розподілу температур

Для роботи алгоритму розроблено програмне забезпечення на мові *Common Lisp*, яке реалізує функції вибірки даних, їх осереднення, відсіву недійсних значень, відновлення значень у відокремлених точках з побудовою функцій осереднення за методом Гауса та можливістю корегування даних у ручному режимі. Проєкт інформаційної системи реалізовано у вигляді сукупності графів. Орієнтований *System-graph* (рис. 2) описує залежність системи температурного поля *TEMPERATURE-FILD* від її складових систем.

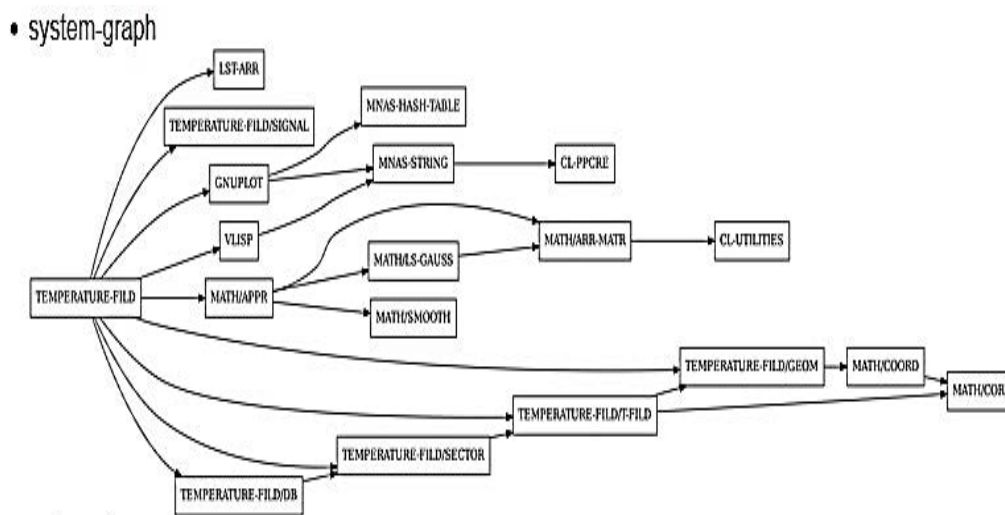


Рис. 2. System-graph

Система містить пакети, функції, методи, класи. Вивід результатів обчислень здійснюється за допомогою графічної програми *Gnuplot*; вбудована скриптова мова дає змогу гнучко задавати різні параметри візуалізації.

Удосконалення процесу обробки даних в результаті впровадження розробленого програмного забезпечення можна спостерігати на рис. 3, де наведено результати візуалізації даних вимірювання температурних полів до впровадження розробленого програмного забезпечення (рис. 3а) у робочій процес і під час його застосування (рис. 3б).

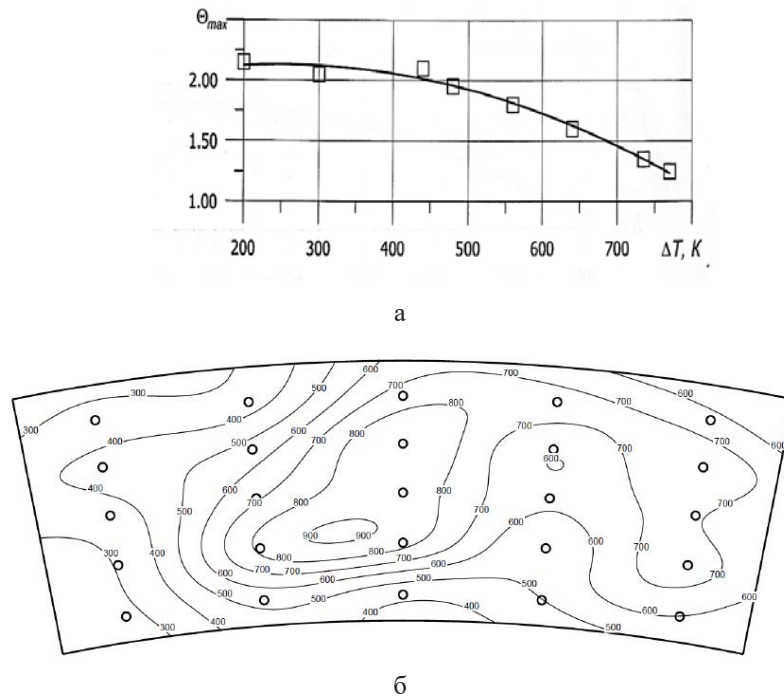


Рис. 3. Приклади оформлення температурних параметрів нерівномірності температурного поля продуктів згоряння

Наукове значення одержаних результатів полягають у розробці науково-методичного підґрунтя алгоритмічної автоматизації візуалізації результатів стендових випробувань газотурбінних камер згоряння.

Практична цінність включає у себе розробку спеціалізованого програмного забезпечення, розробленого на мові *Common Lisp*; результати роботи впроваджено у конструкторському відділенні ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект» та можуть бути цікавими для постановки і розв’язання ситуаційних завдань у навчальному процесі вишів. В табл. 3 за допомогою SWOT-аналізу розглянуто можливість застосування реальної практичної ситуації на машинобудівному підприємстві у кейс-технологіях навчального процесу. За характерними ознаками [12, с. 39-43] цей кейс (ситуаційне завдання) матиме чітко виражені мету, вирішуватиме певну виробничу ситуацію з необхідністю розробки інформаційної системи та програмного забезпечення.

Таблиця 3

SWOT-аналіз ситуації

Сильні сторони (Strengths)	Слабкі сторони (Weakness)
1. Опанування знаннями з незнайомої предметної області 2. Розгляд певної робочої ситуації на підприємстві 3. Можливість творчої реалізації з майбутнім працевлаштуванням	1. Перенасиченість даними 2. Складність у відокремленні проблеми 3. Обмеженість інформації
Можливості розвитку (Opportunities)	Загрози (Threats)
1. Набуття навичок практичного досвіду 2. Реалізація у змішаних формах освітньої діяльності 3. Професійний розвиток студента як фахівця	1. Скорочення обсягів проробки наукової і фахової літератури 2. Поява помилок через некомпетентність і брак часу 3. Вплив рівня складності

Результати досліджень планується використовувати для постановки наукових досліджень та у навчальному процесі Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, зокрема при викладанні авторського вибіркового курсу «Прикладний системний аналіз в транспортних технологіях, енергетиці, судно- та машинобудуванні».

Висновки. Для енергетичного машинобудування проаналізовано сучасний стан обробки експериментальних результатів з візуалізацією даних; визначена необхідність розробки програмного забезпечення з використанням середовища, доступного для кола інженерів-конструкторів.

Розроблене мовою *Common Lisp* програмне забезпечення реалізує функції вибірки даних, їх осереднення, відсіву недійсних значень, відновлення значень у відокремлених точках з побудовою функцій осереднення за методом Гауса та можливістю корегування даних у ручному режимі. Проєкт інформаційної системи містить сукупність графів: орієнтований *System-graph* описує залежність системи температурного поля *TEMPERATURE-FILD* від її складових систем.

За допомогою SWOT-аналізу розглянуто можливість застосування реальної практичної ситуації на машинобудівному підприємстві у кейс-технологіях навчального процесу.

Список використаних джерел:

1. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О. Теорія технічних систем: навчальний посібник. К. : ЦП «КОМПРИНТ». 2017. 291 с. URL: <https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u132>.
2. Діасамідзе Б. Т., Вілкул С. В., Сербін С. І. Теоретичні дослідження двопаливної низькоемісійної камери згоряння газотурбінного двигуна. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер.: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. 2019. 1. С. 27-33. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/44813>.
3. Кузьмін С. М., Грень В. М., Ляшенко В. О. Аналіз впливу конструктивних елементів основної камери згоряння авіаційного двигуна на температурне поле газів у її вихідному перерізі. *Зб. наук. праць Державного науково-дослідного інституту авіації*. 2013. Вип. 16. С. 180-184. URL: <http://www.irbis-nbuv.gov.ua>
4. Хоцькіна В. Б. Використання можливостей пакету Matlab для побудови імітаційних моделей. *Гірничий вісник*. 2014. Вип. 97. С. 75-82. URL: <http://ds.knu.edu.ua/jspui/handle/123456789/1145>
5. Басюк Т. М. Забезпечення процесу візуалізації даних у середовищі відкритих систем. *Інформаційні системи та мережі*. 2015. Вип. 832. С. 18-33. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPICM_2015_832_5
6. Мосіюк О. О. Огляд хмарних технологій систем комп'ютерної алгебри. *Актуальні питання сучасної інформатики*. 2018. С. 320-326. URL: <http://eprints.zu.edu.ua/id/eprint/28337>.
7. Казимиренко Ю., Міхелев, І., Матвеев М. Методи і моделі візуалізації розподілу температурних полів газотурбінних камер згоряння з використанням середовища Common Lisp. *Інформаційні технології та суспільство*. 2022. 2 (4). С. 36-41. URL: <http://journals.maup.com.ua/index.php/it/article/view/2099/2600>.
8. Корольський В. В., Шокалюк С. В., Мельниченко Ю. А. Теоретично-методичні засади геометричного моделювання числових рядів. *Фізико-математична освіта*. 2018. Вип. 4 (18). С. 81-89. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/fmo_2018_4_15
9. Марченко О. І., Хоптинєць В. А. Трансляція програм з процедурних мов програмування у функціональній мові з використанням графу залежності даних. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*, 2015. Вип. 20. С. 47-51. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Kitonv_2015_20_10
10. Береславський Д. В., Коритко Ю. М., Татарінова О. А. Проектування та розробка скінченно-елементного програмного забезпечення : монографія. Харків: Вид-во «Підручник НТУ «ХПІ». 2017. 232 с. URL: <http://library.kpi.kharkov.ua>.
11. Гуменюк О. Г. Використання SWOT-аналізу як основного інструменту стратегічного управління. *Глобальні та національні проблеми економіки*, 2017. Вип. 17. С. 281-285. URL: <http://global-national.in.ua/archive/17-2017/61.pdf>.
12. Ісаєва О., Шайнер Г., Розман І. Кейс-технологія як інноваційний підхід викладання дисциплін у кризових умовах. *Молодь і ринок*, 2021. 11-12 (197-198). С. 39-43. URL: <http://mir.dspu.edu.ua/article/view/252826/250117>.

References:

1. Loveikin, V. S., Romasevych, Yu. O. (2017). *Teoriia tekhnichnykh system: navchalnyi posibnyk [Theory of technical systems]*. K. : TsP "KOMPRINT" [in Ukrainian].
2. Diasamidze, B. T., Vilkul, S. V., Serbin, S. I. (2019). *Teoretychni doslidzhennia dvopalyvnoi nyzkoemisiinoi kamery zghoriannia hazoturbinnoho dvyhuna [Theoretical investigations of a dual-fuel low-emission gas turbine combustor]*. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Ser.: Enerhetychni ta teplotekhnichni protsesy y ustatkuvannia. – Bulletin of the National Technical University «KhPI». Ser. : Power and Heat Engineering Processes and Equipment 1*, 27-33 [in Ukrainian].
3. Kuzmin, S. M., Hren, V. M., Liashenko, V. O. (2013). *Analiz vplyvu konstruktivnykh elementiv osnovnoi kamery zghoriannia aviatsiinoho dvyhuna na temperaturne pole haziv u yii vykhidnomu pererizi [Analysis of the influence of structural elements of the main combustion chamber of an aircraft engine on the temperature field of gases in its initial cross section]*. *Zb. nauk. prats Derzhavnoho nauково-doslidnoho instytutu aviatsii. – Collection of scientific works State Research Institute of Aviation*, 16, 180-184 [in Ukrainian].
4. Khotskina, V. B. (2014). *Vykorystannia mozhlyvostei paketu Matlab dlia pobudovy imitatsiinykh modelei [Using the capabilities of the Matlab package to build simulation models]*. *Hirnychiy visnyk. – Mining bulletin*, 97, 75-82 [in Ukrainian].
5. Basiuk, T. M. (2015) *Zabezpechennia protsesu vizualizatsii danykh u seredovyshchi vidkrytykh system [Providing of process of visualization of data in the environment of open system]*. *Informatsiini systemy ta merezhi. – Information systems and networks*, 832, 18-33 [in Ukrainian].
6. Mosiiuk, O. O. (2018). *Ohliad khmarynykh tekhnolohii system kompiuternoї alhebry [An overview of cloud technologies in computer algebra systems]*. *Aktualni pytannia suchasnoi informatyky. – Current issues of modern computer science*, 320-326 [in Ukrainian].
7. Kazymyrenko, Yu., Mikheliev, I., Matvieiev, M. (2022) *Metody i modeli vizualizatsii rozpodilu temperaturnykh poliv hazoturbinnnykh kamer zghoriannia z vykorystanniam seredovyshcha Common Lisp [Methods and models for visualization of temperature field distribution of gas turbine combustion chambers using Common Lisp]*. *Informatsiini tekhnolohii ta suspilstvo – Informatsiini tekhnolohii ta suspilstvo*, 2 (4), 36-41 [in Ukrainian].

8. Korolskyi, V. V., Shokaliuk, S. V., Melnychenko, Yu. A. (2018). Teoretychno-metodychni zasady heometrychnoho modeliuvannia chyslovykh riadiv [Theoretical and methodological principles of geometric modeling of numerical series]. *Fyzyko-matematychna osvita. – Physical and mathematical education*, 4 (18), 81-89 [in Ukrainian].

9. Marchenko, O. I., Khoptynets, V. A. (2015). Transliatsiia prohram z protsedurnykh mov prohramuvannia u funktsionalnii movi z vykorystanniam hrafu zalezhnosti danykh [Translation of programs from procedural programming languages in a functional language using a graph of data dependence]. *Kompiuterno-intehrovani tekhnolohii: osvita, nauka, vyrobnytstvo.– Computer-integrated technologies: education, science, production*, 20, 47-51 [in Ukrainian].

10. Bereslavskiy, D. V., Korytko, Yu. M., Tatarinova, O. A. (2017). *Proektuvannia ta rozrobka skinchenno-elementnoho prohramnoho zabezpechennia [Design and development of finite element software]*. Kharkiv: Textbook of NTU "KhPI" [in Ukrainian].

11. Humeniuk, O. H. (2017). Vykorystannia SWOT-analizu yak osnovnoho instrumentu stratehichnoho upravlinnia [Using a swot-analysis as the main tool of strategic management]. *Hlobalni ta natsionalni problemy ekonomiky. – Global and national economic problems*, 17, 281-285 [in Ukrainian].

12. HIsaieva, O., Shainer, H., Rozman, I. (2021) Keis-tekhnolohiia yak innovatsiinyi pidkhid vykladannia dystsyplin u kryzovykh umovakh [Case technology as an updated approach to teaching disciplines in crisis]. *Molod i rynek. – Youth & market*, 11-12 (197-198), 39-43 [in Ukrainian].

УДК 519.683.2

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.1.5>

Василь КОСТИРКО

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук, Львівський торговельно-економічний університет, вул. Туган-Барановського, 10, Львів, Україна, індекс 79005 (vkostyrko@lute.lviv.ua)
ORCID: 0000-0002-6366-8695

Анатолій КОСТЕНКО

кандидат фізико-математичних наук, доцент, завідувач кафедри комп'ютерних наук, Львівський торговельно-економічний університет, вул. Туган-Барановського, 10, Львів, Україна, індекс 79005 (avak54@lute.lviv.ua)
ORCID: 0000-0002-2162-7852

Михайло ПЛЕША

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук, Львівський торговельно-економічний університет, вул. Туган-Барановського, 10, Львів, Україна, індекс 79005 (milan@lute.lviv.ua)
ORCID: 0009-0002-6496-1102

Vasyl KOSTYRKO

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Computer Sciences, Lviv University of Trade and Economics, 10 Tugan-Baranovskoho str., Lviv, Ukraine, postal code 79005 (vkostyrko@lute.lviv.ua)

Anatolij KOSTENKO

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Computer Sciences, Lviv University of Trade and Economics, 10 Tugan-Baranovskoho str., Lviv, Ukraine, postal code 79005 (avak54@lute.lviv.ua)

Mykhaylo PLESHA

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Computer Sciences, Lviv University of Trade and Economics, 10 Tugan-Baranovskoho str., Lviv, Ukraine (milan@lute.lviv.ua)

Бібліографічний опис статті: Костирко, В., Костенко, А, Пleshа, М. (2023). Застосування солверів z3 в системі верифікації Python-програм. *Інформаційні технології та суспільство*. Вип. 1 (7), 36–43. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.1.5>

Bibliographic description of the article: Kostyrko, V., Kostenko, A., Plesha, M. (2023). Navchannia prohramuvanniu z zastosuvanniam structurovanykh blok-skhem ta shabloniv proektuvannia [Application of z3 solvers in the Python program verification system]. *Informatsiini tekhnolohii ta suspilstvo – Information technology and society*, 1 (7). 36–43. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.1.5>

ЗАСТОСУВАННЯ СОЛВЕРІВ Z3 В СИСТЕМІ ВЕРИФІКАЦІЇ PYTHON-ПРОГРАМ

У роботі описана остання версія системи верифікації програм VerPro на мові Python. Для перевірки тотожної істинності умов верифікації вона доповнена застосуванням засобів популярної системи Z3 доведення теорем. **Метою статті** є опис нових можливостей системи VerPro, які їй надали солвери Z3. **Наукова новизна.** Система VerPro є сучасною системою верифікації анованих Python-програм, яка генерує умови коректності методом символного виконання. VerPro надає користувачу сучасний діалоговий графічний віконний інтерфейс, побудований з використанням бібліотеки PyQt5. Спрощення цих умов базується на еквівалентних перетвореннях, які реалізує бібліотека ExprLib. ExprLib – це наша власна бібліотека, яка побудована на мові Python і не має інших залежностей. Бібліотека перетворює вирази у внутрішнє представлення, побудоване на базі класів мови Python. Реалізовані в системі VerPro еквівалентні перетворення часто можуть самі встановити тотожну істинність умов верифікації. Якщо ні, тоді такі умови VerPro передає системі доведення теорем Z3, яка або встановлює їх тотожну істинність, або будує контрприклад для гіпотези про тотожну істинність такої умови. Наявність контрприкладу свідчить про те, що анотація невірно описує функціональні властивості програми. Аналізуючи знайдений системою контрприклад, користувач може знайти причину некоректності і виправити програму і/або її анотацію. Система Z3 підключається до VerPro через програмний інтерфейс Z3py. **Висновок.** Ідея побудови контрприкладів в системах верифікації програм реалізована вперше. Система доведення теорем Z3 раніше в таких системах не застосовувалася. Система VerPro надає приклад вдалого використання сучасної системи доведення теорем не лише для встановлення коректності анованої програми, але й для пошуку рішення при невдалій верифікації. Дальший розвиток системи передбачає типізацію значень символних параметрів та побудову інваріантів.

Ключові слова: верифікація програми; умова коректності; символне виконання; контрприклад; солвер Z3.

APPLICATION OF Z3 SOLVERS IN THE VERIFICATION SYSTEM FOR PYTHON PROGRAMS

The work describes the latest version of the VerPro program verification system in Python. In order to check the identical truth of the verification conditions, it was supplemented by the solvers of the popular Z3 theorem proving system. **The purpose of the article** is to describe the new capabilities of the VerPro system, provided by the Z3 solvers. **Scientific novelty.** The VerPro system is a modern verification system for annotated Python programs that generates correctness conditions by the method of symbolic execution. VerPro provides the user with a modern dialog graphical window interface built using the PyQt5 library. The simplification of these conditions is based on equivalent transformations implemented by the ExprLib library. ExprLib is our own library built in Python without no other dependencies. The library transforms expressions into an internal representation built on the Python language classes. Equivalent transformations implemented in the VerPro system can often establish the identical truth of the verification conditions themselves. If not, then VerPro passes such conditions to the Z3 theorem proving system, which either establishes their identical truth, or builds a counterexample for the hypothesis of the identical truth of such a condition. The presence of a counterexample indicates that the annotation incorrectly describes the functional properties of the program. Analyzing the counterexample found by the system, the user can find the cause of the incorrectness and change the program and/or its annotation. The Z3 system connects to the VerPro via the Z3py software interface. **Conclusion.** The idea of building counterexamples in program verification systems was implemented for the first time. The Z3 theorem proving system was not previously used in such systems. The VerPro system provides an example of a successful use of a modern theorem proving system not only to establish the correctness of an annotated program, but also to find a solution in case of failed verification. Further development of the system involves the assignment of types for symbolic parameter values and the construction of invariants.

Key words: program verification, correctness condition; symbol execution; counterexample; Z3 solver.

Актуальність проблеми

Система VerPro призначена для верифікації програм на невеликій підмножині мови Python [K1]. Ця підмножина включає як основні програми, так і функції мови Python. Сама система теж написана на мові Python і генерує логічні умови коректності та завершимості трас в програмах методом Флойда-Хоора [F1].

Система VerPro зводить проблему верифікації програм, анотованих інваріантами та варіантами, до проблеми перевірки тотожної істинності формул в деякій формальній логічній системі. Система VerPro має власні засоби перевірки таких логічних формул шляхом спрощенням їх за допомогою еквівалентних перетворень.

Однак, цей підхід виявився доволі обмеженим. Тому для перевірки логічних умов у новій версії системи VerPro використано механізм солверів популярної системи доведення теорем Z3 [Z3]. В арифметиці цілих чисел без структур даних система Z3 справляється практично з усіма логічними виразами, які ми можемо придумати.

За допомогою солверів Z3 система VerPro успішно верифікує правильно анотовані програми. Якщо ж певна логічна формула виявляється не тотожно істинною, тоді Z3 знаходить контрприклад для гіпотези про тотожну істинність формули.

Ідея пошуку контрприкладів при невдалій верифікації програми розглядається вперше, як і застосування для верифікації програм системи доведення теорем Z3.

В даній роботі описано роботу останньої версії системи. Нова версія системи VerPro реалізує віконний діалоговий інтерфейс [K2]. Для цього було використано розширення PyQt5 [Qt] інтерпретатора мови Python. Нова версія системи також дозволяє знаходити контрприклади для логічних умов, які не вдалося довести.

Основні результати даної статті такі: описано інтерфейс системи VerPro, яка дозволяє верифікувати програми з маленької підмножини сучасної мови програмування Python; для перевірки умов верифікації застосовано одна з найпотужніших систем доведення теорем Z3; реалізовано механізм для пошуку контрприкладів у випадку невдалої верифікації [z3py].

При розширенні цієї області на багатосортні алгебри та структури даних ситуація кардинально змінюється. У формулах з'являються квантори і навіть прості та зрозумілі функції описуються складними виразами. Наприклад, достатньо розглянути функцію LeftPad [LP]. Іншу проблему становить побудова інваріантів та варіантів програм. Дальший розвиток системи VerPro ведеться в напрямку подолання цих проблем.

Перспективи використання методу верифікації для встановлення функціональних властивостей програм активно обговорюються в наукових публікаціях [Br, St, Va].

СТРУКТУРА СИСТЕМИ VERPRO

Система VerPro складається з двох основних підсистем: підсистеми генерації умов коректності та підсистеми перевірки їх тотожної істинності. Для генерації умов коректності застосовується технологія символічного виконання.

Для перевірки умов верифікації застосовується механізм еквівалентного перетворення формул згідно відомих співвідношень з області арифметики та математичної логіки.

Для перевірки умов верифікації в системі *VerPro* було реалізовано три бібліотеки класів та функцій:

- *arilib* – бібліотека арифметичних функцій;
- *logilib* – бібліотека логічних функцій;
- *treelib* – бібліотека функцій над деревами.

Основні класи, які реалізовані в цих бібліотеках:

- *Tree* – клас деревовидних структур, який представляє вирази;
- *Monom* – клас одночленів, який представляє стандартизовані одночлени;
- *Polynom* – клас поліномів, який представляє стандартизовані поліноми;
- *Relation* – клас відношень, який представляє стандартизовані відношення поліномів;
- *Conjunct* – клас кон'юнкцій, який представляє стандартизовані кон'юнкції відношень;
- *Implication* – клас імплікацій, який представляє умови коректності.

Для посилення засобів перевірки умов верифікації програм у новій версії системи було реалізовано механізм солверів системи доведення теорем *Z3* [*Z3*, *Z3py*].

У новій версії системи окрім україномовного реалізовано також англomовний інтерфейс. Він включає назви діалогових елементів форм, надписи та повідомлення, спливаючі підказки тощо. Для переключення інтерфейсів, а також для налаштування параметрів системи застосовуються файли формату JSON.

Специфіка вхідної мови розширення *Z3py* та мови Python обумовила механізм реалізації підсистеми перевірки умов коректності трас програми. Ця підсистема реалізована за допомогою трьох основних програм:

- Програма *winMain*;
- Програма *winCheckZ3*;
- Програма *counterExample*.

Програма *winMain* генерує умови верифікації трас та спрощує їх застосуванням еквівалентних перетворень. Умови верифікації представляють собою вирази з логічними та арифметичними операціями, всі параметри яких є вільними змінними. Для використання солверів *Z3* програма *winMain* генерує спеціальний модуль *z3cond* з описом функції *checkcondsz3* на вхідній мові розширення *Z3py*.

Програма *winCheckZ3* викликає згенеровану функцію *checkcondsz3* з умовами верифікації, які не вдалося вивести програмі *winMain*. Функція *checkcondsz3* для перевірки умов верифікації застосовує солвери системи *Z3* [*Z3*]. Для кожної умови верифікації, тотожну істинність якої не вдалося вивести за допомогою солвера *Z3*, користувач зможе згенерувати контрприклад. Для цього програма генерує спеціальний модуль *z3counter*.

Програма *counterExample* викликає функції, опис яких розташовано в модулі *z3counter*, генеруючи контрприклад для умови, тотожну істинність якої не вдалося встановити ні програмі *winMain*, ні програмі *winCheckZ3*.

Програма *counterExample* викликає функції, опис яких розташовано в модулі *z3counter*, генеруючи контрприклад для умови, тотожну істинність якої не вдалося встановити ні програмі *winMain*, ні програмі *winCheckZ3*.

Рис. 1 демонструє структуру системи *VerPro*. В каталозі проекту розташовуються модулі основних програм та командні файли для їх виклику.

В підкаталозі *anprograms* знаходяться модулі анотованих програм. В підкаталозі *design* знаходяться ui-файли з описом віконного інтерфейсу програм системи та модулі її інтерфейсних класів.

Підкаталог *exprlib* містить згадані вище бібліотеки *arilib*, *logilib* та *treelib*. Підкаталог *z3py* містить модулі, призначені для взаємодії з розширенням *Z3py*.

Підкаталог *output* містить текстові файли зі звітами про етапи перетворення анотованої програми та її умов верифікації.

Підкаталог *verification* задає бібліотеку функцій, призначених для реалізації задач верифікації програм, написаних мовою Python.

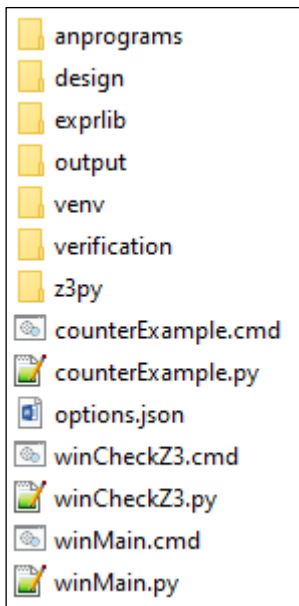


Рис. 1. Структура каталогу проекту

Підкаталог *venv* – це підкаталог віртуального оточення проекту, яке включає розширення *PyQt5* та *Z3py*.
ІНТЕРФЕЙС СИСТЕМИ VERPRO

Основна програма *winMain* для утворення інтерфейсу викликає модуль *verify* з описом інтерфейсного класу. Функціонування системи та її інтерфейс продемонструємо на прикладі функції *frac* обчислення частки та залишку від ділення двох цілих додатних чисел [F1].

Інтерфейсний файл *verify.ui* дизайнера розширення *PyQt5* визначає вікно форми *Verify*, у якому відображаються таблиці з результатами аналізу. На верхній панелі вікна відображаються кнопки, які стають доступними у відповідний момент аналізу. На нижній панелі можуть відображатися повідомлення користувачу.

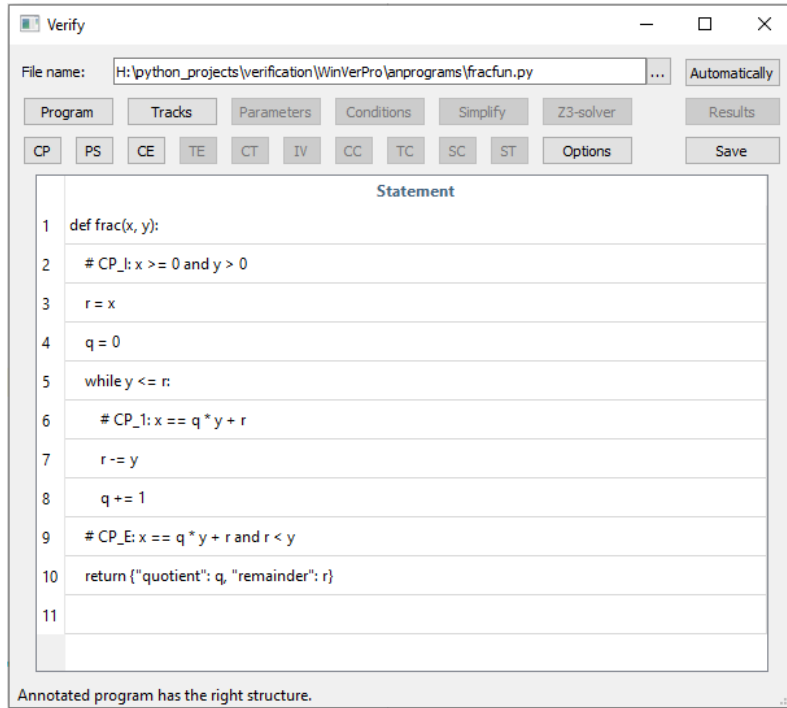


Рис. 2. Інтерфейс програми winMain

Поле вводу *File name* дозволяє вибрати програму для аналізу. Кнопка *Program* аналізує її та відображає в таблиці (рис. 2). Кнопка *CP* відображає таблицю з контрольними точками програми. До них відносяться точка входу програми та точка виходу з неї, а також точки циклів програми (рис. 3а).

Program CP	Type	CP	Condition
1 CP_I	Initial	1 CP_I	$x >= 0$ and $y > 0$
2 CP_1	Loop	2 CP_1	$x == q * y + r$
3 CP_E	Ending	3 CP_E	$x == q * y + r$ and $r < y$

a)

b)

Рис. 3. Контрольні точки програми та умови в них

Кнопка *PS* відображає в таблиці детальну структуру програми, яка полегшує розуміння помилок у структурі програми та її анотації

Кнопка *CE* відображає умови, асоційовані з контрольними точками програми, до яких відносяться початкова, кінцева умови та інваріанти циклів (рис. 3b).

Кнопка *Tracks* будує траси в програмі, які ведуть від однієї контрольної точки до іншої. А кнопка *TC* відображає траси та їх оператори й умови переходу (рис. 4).

Track	Statements
1 CP_I -> CP_1:	$r = x, q = 0, y <= r$
2 CP_I -> CP_E:	$r = x, q = 0, y > r$
3 CP_1 -> CP_1:	$r -= y, q += 1, y <= r$
4 CP_1 -> CP_E:	$r -= y, q += 1, y > r$

Рис. 4. Траси та їх оператори

Кнопка *Parameters* визначає необхідні символічні параметри для символічного виконання трас програми. Якщо значення змінної на трасі не змінюється, тоді вона сама буде позначати своє значення. Кнопка *IV* видає символічні позначення змінних для кожної траси програми (рис. 5).

	Track	Initialization of variables
1	CP_I -> CP_1:	
2	CP_I -> CP_E:	
3	CP_1 -> CP_1:	r = r0, q = q0
4	CP_1 -> CP_E:	r = r0, q = q0

Рис. 5. Параметри трас

	Track	Correctness condition
1	CP_I -> CP_1:	$x \geq 0 \text{ and } y > 0 \text{ and } x - y \geq 0 \rightarrow x - x == 0$
2	CP_I -> CP_E:	$x \geq 0 \text{ and } y > 0 \text{ and } -x + y > 0 \rightarrow x - x == 0 \text{ and } -x + y > 0$
3	CP_1 -> CP_1:	$-q0 * y - r0 + x == 0 \text{ and } r0 - y - y \geq 0 \rightarrow -q0 * y - r0 + x - y + y == 0$
4	CP_1 -> CP_E:	$-q0 * y - r0 + x == 0 \text{ and } -r0 + y + y > 0 \rightarrow -q0 * y - r0 + x - y + y == 0 \text{ and } -r0 + y + y > 0$

Рис. 6. Умови коректності трас

Кнопка *Conditions* будує умови коректності трас програми, а кнопка *CC* відображає їх у таблиці (рис. 6). Кнопка *Simplify* спрощує побудовані умови застосуванням до них еквівалентних перетворень. А кнопка *SC* відображає спрощені умови в таблиці (рис. 7).

	Track	Simplified correctness condition
1	CP_I -> CP_1:	True
2	CP_I -> CP_E:	True
3	CP_1 -> CP_1:	True
4	CP_1 -> CP_E:	True

Рис. 7. Спрощені умови коректності трас

Кнопка *Results* видає результат спрощення умов верифікації: "The program is correct". Таким чином, коректність функції *frac* системи *VerPro* вдалося вивести застосуванням еквівалентних перетворень. Кнопка *Automatically* виконує всі описані дії автоматично, відображаючи в таблиці лише загальний результат.

Розгляд властивостей програми доповнимо властивістю завершимості. Інваріант та варіант циклу візьмемо близькими до наведених в роботі [F1]. Для цього в контрольній точці циклу побудуємо такий коментар:

$$\# \text{CP}_1: x == q * y + r \text{ and } x - q \geq 0; x - q .$$

На цей раз еквівалентні перетворення системи *VerPro* успішно справилися з умовою завершимості, але не справилися з умовою коректності третьої траси. Кнопка *Results* видає повідомлення: "Failed to prove 1 correctness condition of program tracks".

	Track	Simplified correctness condition
1	CP_I -> CP_1:	True
2	CP_I -> CP_E:	True
3	CP_1 -> CP_1:	$q0 * y + r0 - x == 0 \text{ and } -q0 + x \geq 0 \text{ and } r0 - 2 * y \geq 0 \rightarrow -1 - q0 + x \geq 0$
4	CP_1 -> CP_E:	True

Рис. 8. Спрощені умови коректності трас

Кнопка *SC* видасть спрощені умови коректності трас (рис. 8). Оскільки не всі умови коректності системи *VerPro* вдалося перевірити власними засобами, вона робить доступною кнопку *z3-solver*. Ця кнопка утворює модуль *z3cond* і розташовує його в підкаталозі *z3ru*. В таблиці з'являються два рядки повідомлень про успішне утворення модуля виклику розширення *Z3ru* (рис. 9).

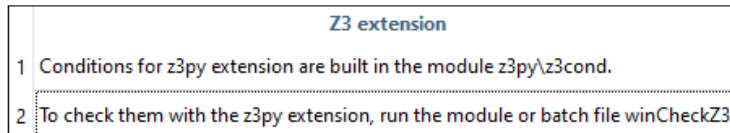


Рис. 9. Повідомлення про утворення модуля z3cond

ПЕРЕВІРКА ТОТОЖНОЇ ІСТИННОСТІ ЗА ДОПОМОГОЮ Z3PY

Для перевірки тотожної істинності умов, згенерованих в модулі *z3cond*, виклинемо програму *winCheckZ3*. Програма видасть вікно з такими 5 кнопками меню та таблицею з умовою коректності траси номер 3 (рис. 10).

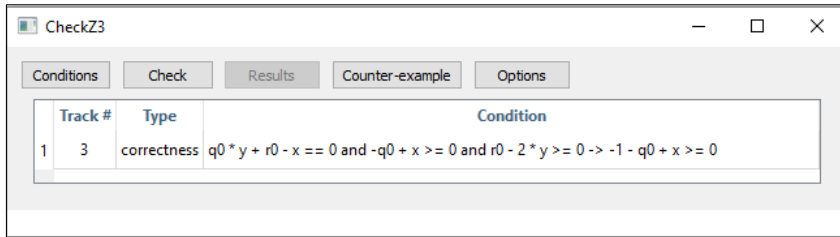


Рис. 10. Вікно програми winCheckZ3

Кнопка *Conditions* відображає умови верифікації, які не вдалося вивести застосуванням еквівалентних перетворень. Кнопка *Check* визначає (рис. 11), чи є умови верифікації тотожно істинними (*True*), чи ні (*False*).

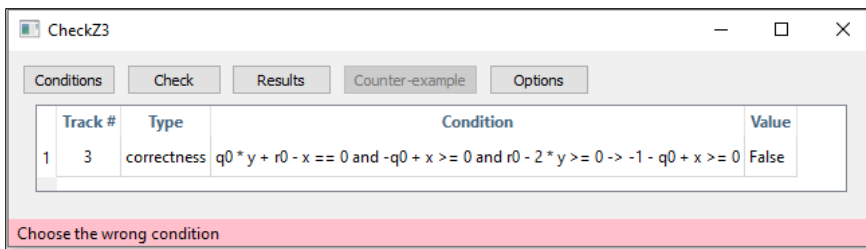


Рис. 11. Перевірка тотожної істинності умов верифікації

Якщо якась умова не є тотожно істинною, тоді її можна виділити і побудувати контрприклад – набір значень параметрів, який робить її фальшивою. Панель статусу відображає рекомендації про це користувачу (рис. 12).

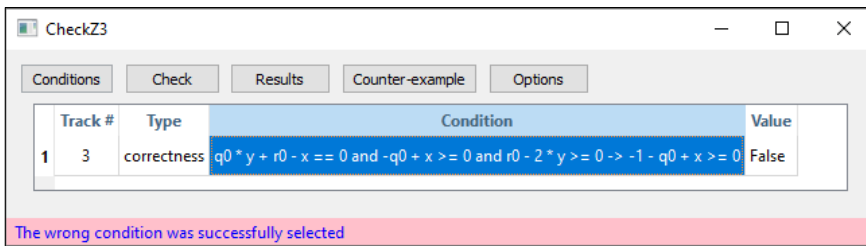


Рис. 12. Виділення сумнівної умови

Для побудови прикладу потрібно натиснути на кнопку *Counter-example*, яка в підкаталозі *Z3py* утворює модуль *z3Counter*. Цей модуль містить опис двох функцій: *z3countP* та *z3counterEx*.

Для виклику цих функцій потрібно запустити програму *counterExample*. Ця програма теж утворює кнопочне меню та відображає таблицю (рис. 13).

Кнопка *Condition* відображає в таблиці умову та пояснює її походження. Кнопка *Build* знаходить набір значень параметрів, які роблять її фальшивою (рис. 14).

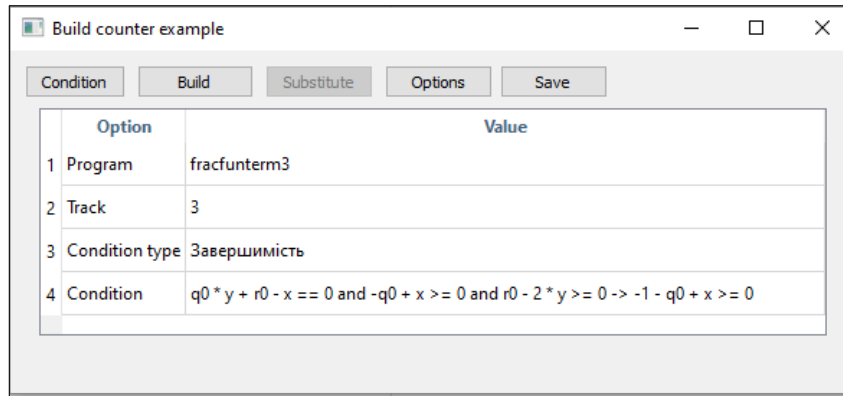


Рис. 13. Вікно програми counterExample

Parameter	Value
1 Condition	False
2 x	2
3 r0	6
4 y	-2
5 q0	2

Рис. 14. Значення параметрів у контрприкладі

Expression	Value
1 Program	fracfunterm3
2 Track number	3
3 Correctness condition	$q0 * y + r0 - x == 0 \text{ and } -q0 + x \geq 0 \text{ and } r0 - 2 * y \geq 0 \rightarrow -1 - q0 + x \geq 0$
4 Parameter values	$x = 2, r0 = 6, y = -2, q0 = 2$
5 The result of the substitution	$-2 * 2 - 2 + 6 == 0 \text{ and } -2 + 2 \geq 0 \text{ and } -2 * -2 + 6 \geq 0 \rightarrow -1 - 2 + 2 \geq 0$
6 Calculation of polynomials	$0 == 0 \text{ and } 0 \geq 0 \text{ and } 10 \geq 0 \rightarrow -1 \geq 0$
7 Calculation of polynomials	True and True and True -> False
8 Calculation of implication	True -> False
9 Value of the condition	False

Рис. 15. Покрокове обчислення значення умови

Кнопка *Substitute* підставляє знайдені параметри в умову і покроково обчислює її значення (рис. 15).

Причиною невдачі верифікації є помилковий інваріант та варіант циклу. В ролі варіанта візьмемо вираз r , а інваріант (рис. 2) доповнимо кон'юнктом $y > 0$, який допоможе забезпечити скінченість послідовності значень виразу. В результаті коментар з умовою в контрольній точці циклу прийме такий вигляд:

CP_1: $x == q * y + r \text{ and } y > 0; r$.

Кнопка TC видасть таку умову завершимості траси 3:

$-q0 * y - r0 + x == 0 \text{ and } y > 0 \text{ and } r0 - y - y \geq 0 \rightarrow y > 0$

Кнопка *Simplify* спростить побудовану умову до тотожної істини, а кнопка *Results* відобразить такий результат спрощення умов верифікації: "The program is totally correct".

Список використаних джерел:

1. Костирко В.С. Система верифікації python-програм. Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції. К.: Європейський університет. 2019. С. 75–78.

2. Floyd, R. W. Assigning meanings to programs. Proceedings of a Symposium on Applied Mathematics. American Mathematical Society. 19 Mathematical Aspects of Computer Science. 1967. 19–31.
3. Z3 API in Python. Retrieved from: <https://ericpony.github.io/z3py-tutorial/guide-examples.htm>.
4. Костирко, В. С., Плеша, В. І. (2021). Система верифікації програм VerPro. Сучасні напрями розвитку економіки, підприємництва, технологій та їх правового забезпечення: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Львів: Львівський торговельно-економічний університет. 287–288.
5. PyQt5 Reference Guide. Retrieved from: <https://www.riverbankcomputing.com/static/Docs/PyQt5/>.
6. Костирко, В.С., Плеша, В. І. Застосування бібліотеки Z3py для перевірки умов коректності та завершимості програм. Матеріали XXVI міжнародної науково-практичної інтернет-конференції. К.: Європейський університет. 2020. 80–83.
7. Wayne, H. Retrieved from: <https://github.com/hwayne/lets-prove-leftpad>.
8. Bruni, R., Giacobazzi, R., Gori, R., Ranzato, F. (2023). A Correctness and Incorrectness Program Logic. Journal of the ACM. 70. 1–45. DOI: <https://doi.org/10.1145/3582267>.
9. Stump, A. (2016). Verified Functional Programming in Agda. Association for Computing Machinery and Morgan & Claypool. DOI: <https://doi.org/10.1145/2841316>.
10. Vardi, M. Y. (2021). Program verification: vision and reality. Communications of the ACM (CACM). 64 (7). 5. DOI: <https://doi.org/10.1145/3469113>.

References:

1. Kostyrko, V. S., Plesha, V. I. (2019). Systema veryfikacii python-program. Система верифікації python-програм [The Verification System for Python programs]. Materialy XXV Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferenciyi. K.: Yevropejskyj universytet. 75–78. [in Ukrainian] [K1]
2. Floyd, R. W. (1967). Assigning meanings to programs. Proceedings of a Symposium on Applied Mathematics. American Mathematical Society. 19: Mathematical Aspects of Computer Science. 19–31. [in English] [Fl]
3. Z3 API in Python. Retrieved from: <https://ericpony.github.io/z3py-tutorial/guide-examples.htm>. [in English] [Z3]
4. Kostyrko, V. S. (2021). Systema veryfikaciyi prohram VerPro [The program verification system VerPro]. Suchasni napryamy rozvytku ekonomiky, pidpriemnyctva, tekhnolohij ta yikh pravovoho zabezpechennya: materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferenciyi. Lviv: Lvivskyj torhovelno-ekonomichnyj universytet. 287–288. [in Ukrainian] [K2]
5. PyQt5 Reference Guide. Retrieved from: <https://www.riverbankcomputing.com/static/Docs/PyQt5/>. [in English] [Qt]
6. Kostyrko, V. S., Plesha, V. I. (2020). Zastosuvannya biblioteki Z3py dlya perevirky umov korektnosti ta zavershylosti prohram [Application of the Z3py library to check the program correctness and termination conditions]. Materialy XXVI mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferenciyi. K.: Yevropejskyj universytet. 80–83. [in Ukrainian] [z3py]
7. Wayne, H. Retrieved from: <https://github.com/hwayne/lets-prove-leftpad>. [in English] [LP]
8. Bruni, R., Giacobazzi, R., Gori, R., Ranzato, F. (2023). A Correctness and Incorrectness Program Logic. Journal of the ACM. 70. 1–45. DOI: <https://doi.org/10.1145/3582267>. [in English] [Br]
9. Stump, A. (2016). Verified Functional Programming in Agda. Association for Computing Machinery and Morgan & Claypool. DOI: <https://doi.org/10.1145/2841316>. [in English] [St]
10. Vardi, M. Y. (2021). Program verification: vision and reality. Communications of the ACM (CACM). 64 (7). 5. DOI: <https://doi.org/10.1145/3469113>. [in English] [Va]

УДК 004.94:378

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.1.6>

Валентина МАКОЄДОВА

аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення та кібербезпеки, Державний торговельно-економічний університет, вул. Кіото, 19, Київ, Україна, індекс 02156 (makoiedova.valentyna@gmail.com)

ORCID: 0000-0001-7518-894X

Valentyna MAKOIEDOVA

PhD Student of the Department of Software Engineering and Cybersecurity, State University of Trade and Economics, 19 Kyoto str., Kyiv, Ukraine, postal code 02156 (makoiedova.valentyna@gmail.com)

Бібліографічний опис статті: Макоєдова, В. (2023). Моделювання супроводу вступної кампанії закладу вищої освіти. *Інформаційні технології та суспільство*. Вип. 1 (7), 44–49. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.1.6>

Bibliographic description of the article: Makoiedova, V. (2023). Modeliuvannia suprovodu vstupnoi kampanii zakladu vyshchoi osvity [Modeling of support for an introductory campaign of a higher education institution]. *Informatsiini tekhnolohii ta suspilstvo – Information technology and society*, 1 (7), 44–49. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.1.6>

МОДЕЛЮВАННЯ СУПРОВОДУ ВСТУПНОЇ КАМПАНІЇ ЗАКЛАДУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

У статті досліджується організація супроводу прийому на навчання до закладів вищої освіти. Оскільки прийом вступників є ключовим етапом для будь-якого закладу вищої освіти, постає необхідність у забезпеченні якісної та ефективної вступної кампанії для відбору найкращих студентів. У дослідженні деталізовано процеси, які є необхідними для підготовки, здійснення вступної кампанії та аналізу результатів проведеного прийому на навчання. Обґрунтовано потребу моделювання супроводу за допомогою засобів CASE-технологій. **Метою статті** є побудова структурно-функціональної моделі супроводу вступної кампанії в закладах вищої освіти для деталізації процесів з точки зору розробника інформаційної системи приймальної комісії. У дослідженні використовується **методологія** функціонального моделювання IDEF0 для моделювання бізнес-процесів. Застосовано функціональний підхід для визначення об'єктів супроводу вступної кампанії та з'ясування зв'язків між ними. **Наукова новизна.** У статті побудовано модель процесу «Супровід вступної кампанії у закладах вищої освіти», виконано декомпозицію моделі у нотації IDEF0. **Висновки.** Застосування IDEF0 для моделювання супроводу вступної кампанії дало змогу відобразити структурні зв'язки між процесами та об'єктами. Деталізовано та описано процеси, стрілки входу, виходу, контролю та механізму. Визначено складові супроводу вступної кампанії: аналіз вступної кампанії попереднього року, підготовка до прийому на навчання до закладу вищої освіти, проведення вступної кампанії, завершення вступної кампанії. Представлена модель дерева вузлів розкриває компоненти другого рівня декомпозиції. Спроектвана модель, що охоплює всі складові супроводу вступної кампанії, може бути застосована при розробці чи модифікації інформаційних систем чи модулів для автоматизації роботи приймальної комісії.

Ключові слова: супровід вступної кампанії, структурно-функціональна модель, IDEF0, заклад вищої освіти, приймальна комісія, інформаційна система.

MODELING OF SUPPORT FOR AN INTRODUCTORY CAMPAIGN OF A HIGHER EDUCATION INSTITUTION

The organization of support for admission to higher education institutions is analyzed in the article. Since admission of entrants is a key stage for any higher education institution, there is a need to ensure a qualitative and effective introductory campaign to select the best students. The study highlights the processes that are necessary for preparation, implementation of an introductory campaign and analysis of the results of the admission to study. The need for support modeling with the help of CASE technologies is justified. **The purpose** of the article is to build a structural and functional model of support for an introductory campaign of a higher education institution to detail the processes from the point of view of the developer of the information system of the admissions committee. The study uses the IDEF0 functional modeling **methodology** to model business processes. A functional approach is applied to determine the objects of support of the introductory campaign and to clarify the connections between them. **Scientific novelty.** In the article, a model of the process «Support for an introductory campaign of a higher education institution» was built, the model was decomposed in the IDEF0 notation. **Conclusions.** The use of IDEF0 for modeling the support of an introductory campaign made it possible to display the structural relationships between processes and objects. Processes, input, output, control and mechanism arrows are detailed and described. The components of an introductory campaign support are defined: analysis of the previous year's introductory campaign, preparation for admission to a higher education institution, conduct of an introductory campaign, completion of an introductory campaign. Presented node tree model reveals the components of the second level decomposition. The designed model, which covers all the components of an introductory campaign support, can be used in the development or modification of information systems or modules for automating the work of the admissions committee.

Key words: support of an introductory campaign, structural-functional modeling, IDEF0, higher education institution, admissions committee, information system.

Постановка проблеми. Прийом вступників є важливим етапом для будь-якого закладу вищої освіти (ЗВО). Необхідно забезпечити якість та ефективність вступної кампанії для відбору найкращих студентів. Без належного супроводу вступної кампанії може виникнути погіршення репутації закладу вищої освіти, втрата потенційних студентів через недостатню інформаційну підтримку та затримку надання послуг.

Ефективна модель супроводу вступної кампанії сприятиме оптимізації процесу прийому на навчання до закладів вищої освіти. За допомогою структурно-функціонального моделювання можна деталізувати всі процеси супроводу та їх складові. Відповідно виникає необхідність у створенні функціональної моделі супроводу вступної кампанії ЗВО. Побудована модель може бути використана як основа для розробки чи удосконалення інформаційної системи приймальної комісії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведений аналіз наукових досліджень показав, що здебільшого публікації науковців присвячені моделюванню процесів діяльності ЗВО в цілому. У статті [1] представлено діаграму функціональної моделі надання освітньої послуги ЗВО, у якій одним з компонентів є прийом на навчання. Автором визначено, що інформаційні потоки, які при цьому виникають, мають свої особливості. Необхідно здійснювати їх моніторинг у режимі реального часу, зокрема, інформацію про вступників, рейтингові списки. Інформаційні потоки повинні складатися з підтверженої інформації з надійних офіційних джерел або документів. Є необхідність зафіксувати інформаційні потоки на конкретний момент часу для надання їм офіційного статусу, що може відбуватися за допомогою протоколів приймальної комісії, офіційного веб-сайту закладу, паперових списків тощо. Інформаційні потоки можуть бути як постійними, що використовуються у інших процесах, так і тимчасовими, що слугують як допоміжна інформація, потреба в якій з часом зникає.

У монографії [2, с.78-79] описуються функції приймальної комісії та їх виконавці в інтегрованій інформаційній системі управління університетом (ІСУУ). Авторами представлено схему реалізації модуля «Приймальна комісія» як частини ІСУУ. Нетепчук В. у роботі [3] представив розроблену модель бізнес-процесу управління ЗВО згідно вимог нотації IDEF0. Січко Т. у [4] приділила увагу моделюванню інформаційної системи управління закладом вищої освіти. Завгородній В. та Ялова К. здійснили побудову функціональної моделі формування акредитаційної справи ЗВО засобами методології IDEF0 [5]. Запропоновано методологічні підходи до моделювання бізнес-процесів в закладах освіти, здійснено порівняння процесного та функціонального підходів у роботі [6].

Аналіз публікацій підтверджує актуальність проблеми супроводу вступної кампанії та необхідність її вирішення. Проте, питання моделювання процесів підготовки до прийому на навчання закладом вищої освіти є недостатньо дослідженим у згаданих вище роботах.

Мета статті – побудувати структурно-функціональну модель супроводу вступної кампанії у закладах вищої освіти для деталізації процесів з точки зору розробника інформаційної системи приймальної комісії.

Виклад основного матеріалу. Супровід вступної кампанії включає в себе всю сукупність процесів, починаючи з підготовчих заходів і закінчуючи аналізом результатів проведеного прийому на навчання. Для того, щоб здійснити моделювання необхідно обрати методологію, що дозволить деталізувати всі складові.

CASE-технологія методології проектування інформаційних систем побудована на основі структурного та об'єктно-орієнтованого аналізу бізнес-процесів у вигляді діаграм для опису зв'язків між моделями системи [7].

Серед CASE-технологій, компонентом, що найчастіше використовується, є IDEF0 – методологія функціонального моделювання, яка пропонує мову функціонального моделювання для аналізу, розробки, реконструкції та інтеграції інформаційних систем; бізнес-процеси; або аналіз програмної інженерії [8].

Діаграма IDEF0 відображає структурні зв'язки між процесами та об'єктами. Процеси зображуються у вигляді прямокутників. Для здійснення процесу необхідні вхідні елементи, що представлені стрілками ліворуч. Результати чи вихідні елементи процесу розміщуються праворуч. Механізми, необхідні для виконання процесу зображуються, що розміщені знизу. Обмеження або управління виконання процесу представлені стрілками, що розташовані зверху. Кожна зі стрілок поєднується з відповідною стороною прямокутника [9].

Моделювання процесу супроводу вступної кампанії у закладі вищої освіти дасть змогу деталізувати його ключові етапи, встановити послідовність виконання дій та зв'язки між ними, а також виділити ресурси, які необхідні для реалізації кожного етапу.

Для проектування інформаційної технології розроблено модель супроводу вступної кампанії ЗВО. Модель була створена за допомогою CASE-технології функціонального моделювання IDEF0. Для спрощення побудови розробка виконувалася в середовищі бізнес-моделювання BPWin (AllFusion Process Modeler 4.1). Контекстна діаграма супроводу вступної кампанії у закладах вищої освіти зображена на рис. 1.

Діаграма на найвищому рівні містить найбільш загальні описи представленого процесу. Ця діаграма може бути розділена на декілька дочірніх діаграм, які надають більше деталей [10].

Ціллю моделі є опис взаємодії між усіма компонентами супроводу вступної кампанії у ЗВО. Моделювання здійснювалося з точки зору розробника інформаційної системи приймальної комісії.

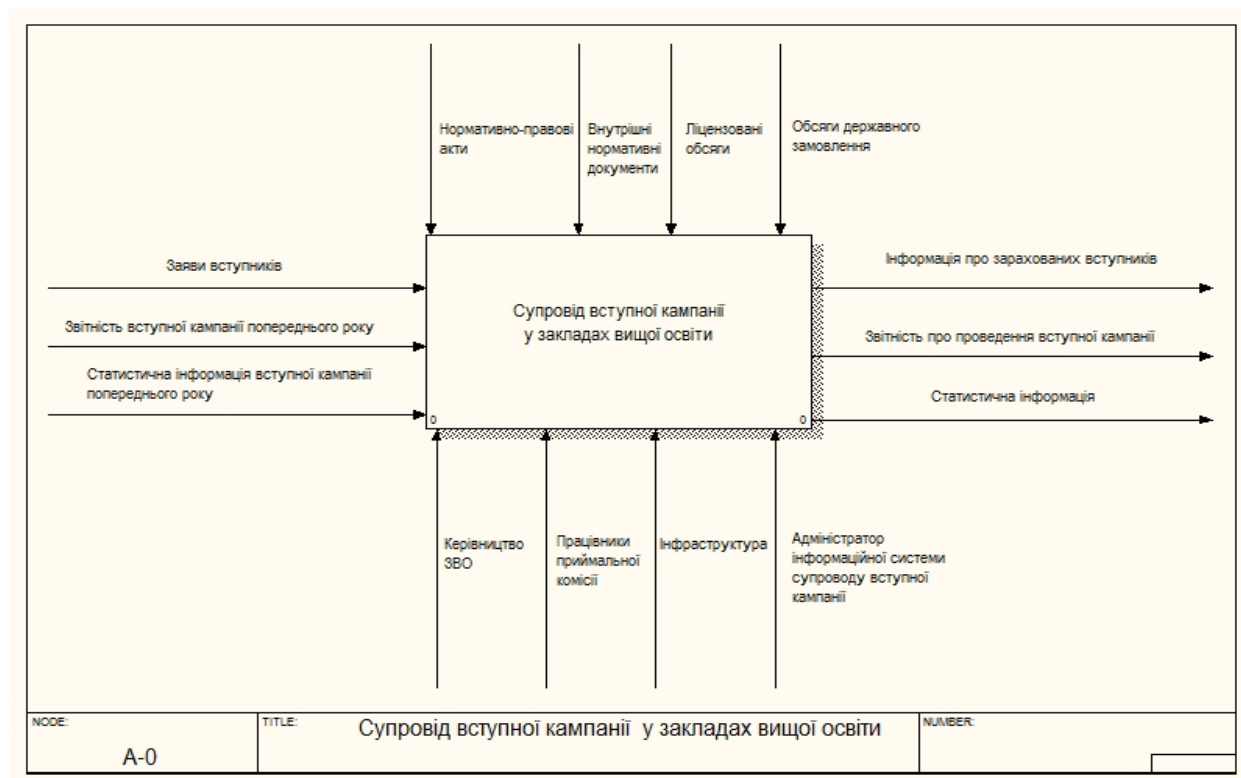


Рис. 1. Контекстна діаграма «Супровід вступної кампанії у закладах вищої освіти»

Джерело: побудовано автором в системі BPwin

Вхідними об'єктами супроводу вступної кампанії є заяви вступників, звітність вступної кампанії попереднього року, статистична інформація вступної кампанії попереднього року. Результатом є інформація про зарахованих вступників, звітність про проведення вступної кампанії, статистична інформація.

За виконання супроводу відповідають:

- керівництво ЗВО (ректор/ директор/ президент/ начальник, який здійснює управління діяльністю закладу вищої освіти, та його заступники);
- працівники приймальної комісії, які затверджені керівником ЗВО;
- адміністратор інформаційної системи супроводу вступної кампанії, який здійснює налаштування програмного забезпечення та обладнання, що використовуються в процесі вступної кампанії; адмініструє базу даних, що містить інформацію про вступників; вирішує технічні проблеми, пов'язані з інформаційними системами, що використовуються під час вступної кампанії; працює над захистом конфіденційної інформації, що стосується вступників та вступної кампанії;
- інфраструктура – інформаційна система приймальної комісії, робочі станції працівників приймальної комісії, база даних, допоміжне програмне забезпечення, сервер, мережеве обладнання, програми Microsoft 365 і т. ін., що забезпечують проведення вступної кампанії.

Обмеження супроводу обумовлені внутрішніми нормативними документами, що затверджуються закладом вищої освіти для регламентування процесу проведення вступної кампанії, нормативно-правовими актами, ліцензованими обсягами, обсягами державного замовлення.

Здійснено декомпозицію змодельованої контекстної діаграми «Супровід вступної кампанії у закладах вищої освіти» (рис. 2).

Основні компоненти діаграми, створеної після декомпозиції, наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Компоненти діаграми першої декомпозиції супроводу вступної кампанії у закладах вищої освіти

Назва 1	Характеристика 2
Аналіз вступної кампанії попереднього року	Оцінка інформації про результати вступної кампанії, що відбулася в попередньому році.
Підготовка до прийому на навчання до ЗВО	ЗВО розробляє та затверджує правила прийому, забезпечує вчасне внесення відкритих, фіксованих та не бюджетних конкурсних пропозицій до Єдиної бази, проводить оцінювання рівня знань потенційних вступників, здійснюється реєстрація вступників на участь у ЄВІ, ЄФВВ.
Проведення вступної кампанії	Процес прийому на навчання до закладу вищої освіти від обробки поданих заяв до зарахування вступників
Завершення вступної кампанії	Підведення підсумків вступної кампанії

Джерело: побудовано автором

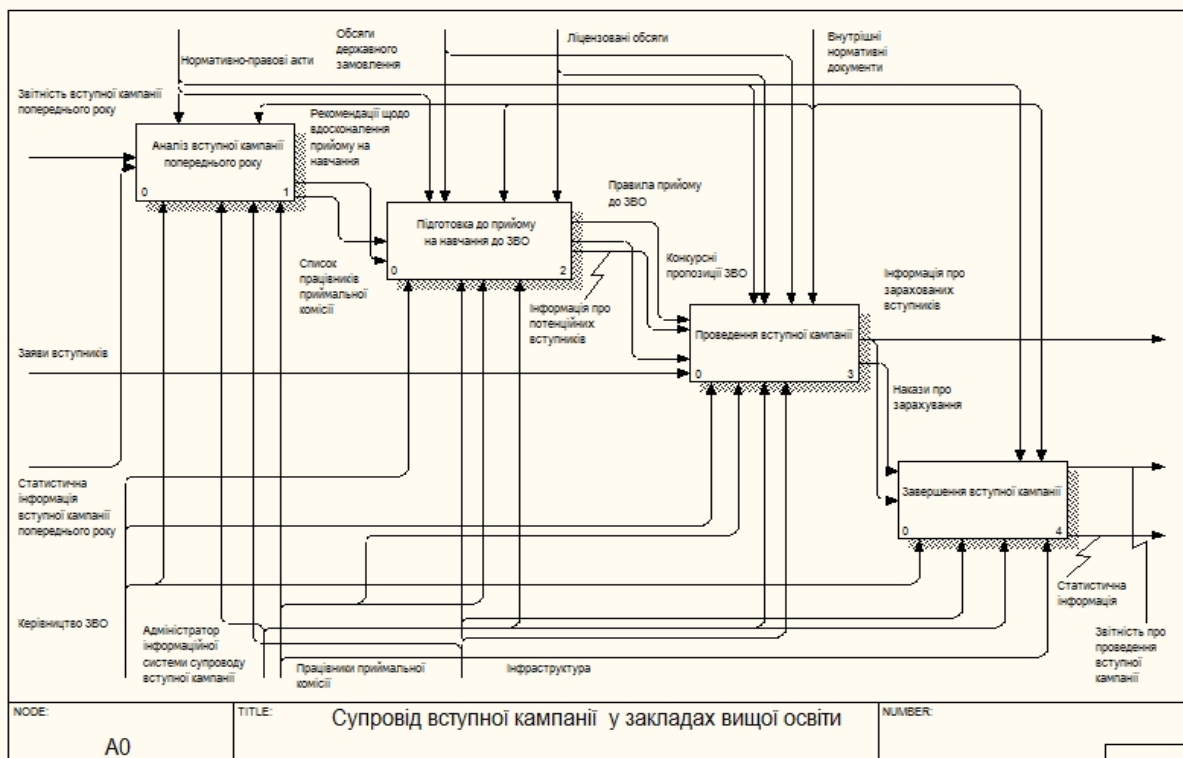


Рис. 2. Модель першої декомпозиції «Супровід вступної кампанії у закладах вищої освіти»

Джерело: побудовано автором в системі BPwin

На першому етапі «Аналіз вступної кампанії попереднього року» ректор, який є головою приймальної комісії, проректор, який є заступником голови комісії та інші посадові особи, що входять до складу керівних органів ЗВО, відповідальний секретар приймальної комісії та його заступники, уповноважена особа з питань прийняття та розгляду електронних заяв, декани факультетів, відповідальні за набір студентів на спеціальності факультетів, відповідальні за організацію роботи приймальної комісії в окремих корпусах ЗВО та інші члени приймальної комісії, адміністратор інформаційної системи супроводу вступної кампанії аналізують звітність та статистичну інформацію за результатами вступної кампанії попереднього року.

У результаті першого етапу формуються рекомендації щодо вдосконалення прийому на навчання та список працівників приймальної комісії, які будуть здійснювати роботу в ролі операторів інформаційної системи, працівників які будуть забезпечувати безпосередню взаємодію зі вступниками та інші працівники, залучені до процесу проведення вступної кампанії. Ці об'єкти є вхідними для процесу «Підготовка до прийому на навчання до ЗВО». У межах якого, керуючись нормативно-правовими актами, внутрішніми нормативними документами ЗВО, ліцензованими обсягами та обсягами державного замовлення.

На основі «Порядку прийому на навчання для здобуття вищої освіти» [11] керівництво ЗВО розробляє та затверджує «Правила прийому на навчання до ЗВО». Працівники приймальної комісії та адміністратор інформаційної системи супроводу за допомогою інфраструктури взаємодіють з потенційними вступниками, накопичуючи про них інформацію.

Третім етапом є «Проведення вступної кампанії», що триває від обробки заяв вступників, поданих у електронній і паперовій формах до видання наказів про зарахування. Адміністратор інформаційної системи супроводу вступної кампанії, використовуючи зібрану інформацію про потенційних вступників, здійснює для них розсилку повідомлень та листів з актуальною інформацією про порядок і терміни подання заяв, документів для вступу на бажану освітню програму. Крім того адміністратор відповідає за стабільність роботи інформаційної системи під час вступної кампанії. Здійснює централізований експорт даних до ЄДЕБО та відстежує цілісність інформації.

Інформаційна система приймальної комісії на даному етапі має забезпечувати супровід опрацювання заяв, проведення вступних випробувань, формування рейтингових списків вступників, надання рекомендацій до зарахування, формування особової справи вступника, видання наказів про зарахування.

Четвертою складовою супроводу вступної кампанії є «Завершення вступної кампанії». Інформація про зарахованих вступників використовується для створення звітів, підготовки статистичної інформації та надання інформації підрозділам ЗВО відповідно до їх запитів. Адміністратор забезпечує надання інформації у відповідності до потреб, відповідає за механізми подальшого зберігання накопиченої інформації. Обмеження обумовлені наказами, листами, що містять перелік форм для подання статистичної звітності, затвердженими формами державного статистичного спостереження, службовими записками із запитом про надання інформації про зарахованих вступників.

Складові елементи діаграми першої декомпозиції, в свою чергу були деталізовані. Загалом розроблена модель супроводу вступної кампанії складається з 18 процесів другого рівня декомпозиції (рис. 3).

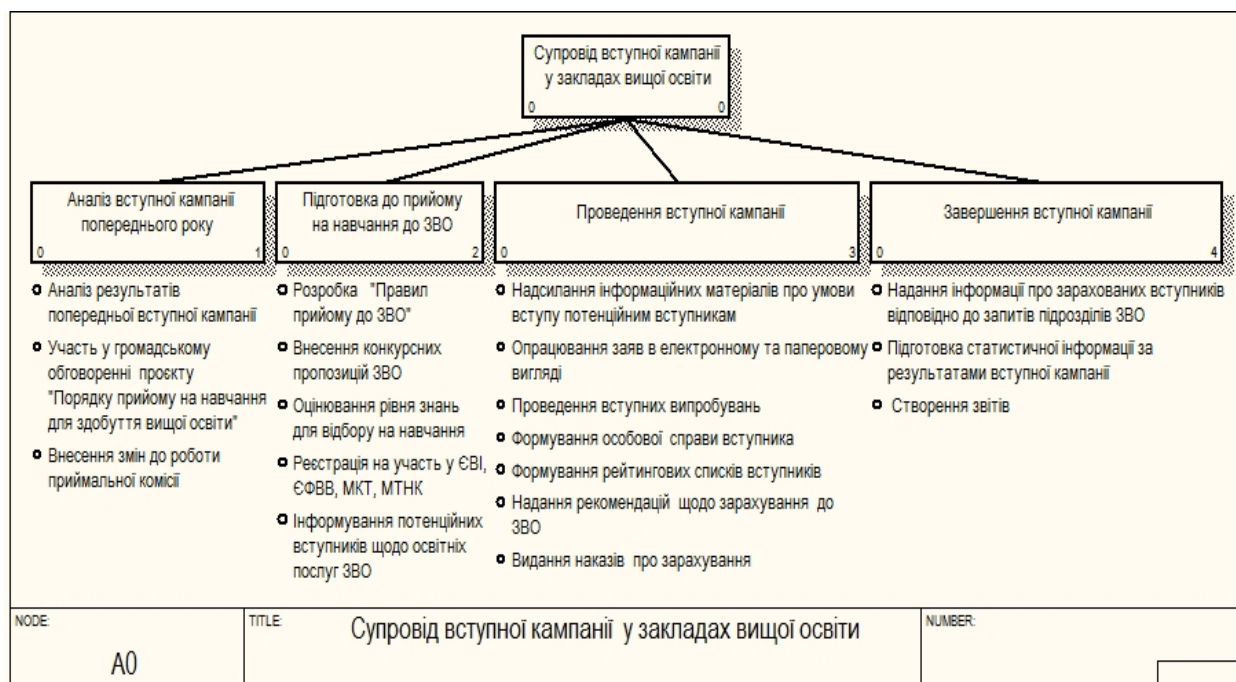


Рис. 3. Модель дерева вузлів супроводу вступної кампанії у ЗВО

Джерело: побудовано автором в системі BPwin

Висновки. У статті запропоновано структурно-функціональну модель супроводу вступної кампанії у закладах вищої освіти засобами CASE-технології BPwin у нотації IDEF0. Деталізовано та описано процеси, стрілки входу, виходу, контролю та механізму. Визначено складові супроводу вступної кампанії: аналіз вступної кампанії попереднього року, підготовка до прийому на навчання до закладу вищої освіти, проведення вступної кампанії, завершення вступної кампанії. Представлено модель дерева вузлів, що висвітлює компоненти другого рівня декомпозиції. Спроектвана модель, що охоплює всі складові супроводу вступної кампанії, може бути використана для розробки чи модифікації інформаційних систем чи модулів для автоматизації роботи приймальної комісії.

Список використаних джерел:

1. Ячменьов Є. Ф. Функціональна модель вищого навчального закладу в IDEF0. *Бізнес Інформ*. 2014. № 4. С. 91-99. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/binf_2014_4_16.
2. *Методологічні основи створення, впровадження і розвитку інтегрованої інформаційної системи управління університетом*: монографія/ ред.: С. В. Чернищенко, Ю. І. Воротницький. Суми: Сум. держ. ун-т, 2015. 333 с. URL: http://inure.nmu.org.ua/pdf/methodology_ua.pdf.
3. Нетепчук В. В. Розробка моделі системи управління закладом вищої освіти з використанням методик процесного менеджменту та стандарту ISO 9001–2015. *Вісник НУВГП. Економічні науки : зб. наук. праць*. 2021. Т. 2, № 94. С. 112. URL: <https://doi.org/10.31713/ve2202111>.
4. Січко Т. В. Основні підходи до моделювання інформаційної системи управління закладу вищої освіти. *Матеріали наукової конференції професорсько-викладацького складу, наукових працівників і здобувачів наукового ступеня за підсумками науково-дослідної роботи за період 2019–2020 рр. (квітень–травень 2021 р.)*: Матеріали наук. конф., м. Вінниця/ ред. П. Ф. Гринюк. Вінниця, 2021. С. 320–322. URL: <https://jpv.s.donnu.edu.ua/article/view/10407>.
5. Завгородній В. В. Функціональна модель процесу формування акредитаційної справи вищого навчального закладу. *Математичне моделювання*. 2015. № 1. С. 14–19. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mm_2015_1_6
6. Шліхта Г. О. Класифікація бізнес-процесів в освітніх установах. *Вісник Житомирського державного університету імені Івана Франка. Педагогічні науки*. 2018. Вип. 3. С. 107–114. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VZhDUP_2018_3_19.
7. Криворучко О., Костюк Ю. Структурно-функціональне моделювання технологічного процесу виробництва вершкового масла. *Інформаційні технології та сусільство*. 2022. Вип. 1 (3). С. 38–44. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2022.1.5>.
8. GuiMarket Specification Using the Unified Modeling Language / L. Ferreira et al. *Procedia Computer Science*. 2015. Vol. 64. P. 1263–1272. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.09.241>.
9. Automation of strategy using IDEF0 – A proof of concept/ G. R. Waissi et al. *Operations Research Perspectives*. 2015. Vol. 2. P. 106–113. URL: <https://doi.org/10.1016/j.orp.2015.05.001>.
10. Toba A.-L., Seck M. Modeling Social, Economic, Technical & Environmental Components in an Energy System. *Procedia Computer Science*. 2016. Vol. 95. P. 400–407. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.09.353>
11. Про затвердження Порядку прийому на навчання для здобуття вищої освіти в 2022 році: наказ Міністерства освіти і науки від 27.04.2022 р. № 392: станом на 5 лип. 2022 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0487-22#Text>.

References:

1. Yachmenov Ye. F. Funktsionalna model vyshchoho navchalnoho zakladu v IDEF0 [Functional model of a higher educational institution in IDEF0]. *Biznes Inform.* - *Business Inform* 2014. № 4. С. 91-99. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/binf_2014_4_16 [in Ukrainian].
2. Chernyshenko, S. V., & Vorotnytskyi, Yu. I. (Ed.). (2015). *Metodolohichni osnovy stvorennia, vprovadzhennia i rozvytku intehrovanoi informatsiinoi systemy upravlinnia universytetom* [Methodological foundations of the creation, implementation and development of an integrated information system of university management]. Sumskiy derzhavnyi universytet - Sumy State University. Retrieved from http://inure.nmu.org.ua/pdf/methodology_ua.pdf [in Ukrainian].
3. Netepchuk, V. V. (2021). Rozrobka modeli systemy upravlinnia zakladom vyshchoi osvity z vykorystanniam metodyky protsesnoho menedzhmentu ta standartu ISO 9001–2015 [Development of a model of management system of higher education institution using the procedure management methodology and ISO 9001–2015 standard]. *Bulletin National University of Water and Environmental Engineering*, 2(94), 112. <https://doi.org/10.31713/ve2202111> [in Ukrainian].
4. Sichko, T. V. (2021). Osnovni pidkhody do modeliuвання informatsiinoi systemy upravlinnia zakladu vyshchoi osvity [Basic approaches to the modeling of the information management system of a higher education institution]. *Materialy naukovoi konferentsii profesorsko-vykladatskoho skladu, naukovykh pratsivnykiv i zdobuvachiv naukovoho stupenia za pidsumkami nauково-doslidnoi roboty za period 2019–2020 rr. (kvitent–traven 2021 r.) - Materials of the scientific conference of professors and teaching staff, researchers and degree holders based on the results of research work for the period 2019–2020 (April–May 2021)* (p. 320–322). Donetskiy natsionalnyi universytet imeni Vasylia Stusa - Vasyl' Stus Donetsk National University. Retrieved from <https://jpv.s.donnu.edu.ua/article/view/10407> [in Ukrainian].
5. Zavorodnii, V. V. (2015). Funktsionalna model protsesu formuvannya akredytatsiinoi spravy vyshchoho navchalnoho zakladu [Functional model of the process of forming the accreditation case of a higher educational institution] *Matematychnе modeliuвання - Mathematical Modeling*, (1), 14–19. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mm_2015_1_6 [in Ukrainian].
6. Schlichta, G. O. (2018). Klyasifikatsiia biznes-protsesiv v osvithnikh ustanovakh [Classification of business processes in educational institutions] In: *Visnyk Zhytomyrskoho derzhavnoho universytetu imeni Ivana Franka. Pedagogichni nauky - Zhytomyr Ivan Franko State University Journal. Pedagogical Sciences*, (3), 107–114. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/VZhDUP_2018_3_19. [in Ukrainian].
7. Kryvoruchko, O., Kostyuk, Yu. (2022). Strukturno-funktsionalne modeliuвання tekhnolohichnoho protsesu vyrobnytstva vershkovoho masla [Structural and functional modeling of the technological process of butter production]. *Informatsiini tekhnolohii ta suspilstvo - Information echnology and society*, 1 (3), 38–44. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2022.1.5> [in Ukrainian].
8. Ferreira, L., Miranda, I., Simoes, R., & Cruz-Cunha, M. M. (2015). GuiMarket Specification Using the Unified Modeling Language. *Procedia Computer Science*, 64, 1263–1272. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.09.241> [in English].
9. Waissi, G. R., Demir, M., Humble, J. E., & Lev, B. (2015). Automation of strategy using IDEF0 — A proof of concept. *Operations Research Perspectives*, 2, 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.orp.2015.05.001> [in English].
10. Toba, A.-L., & Seck, M. (2016). Modeling Social, Economic, Technical & Environmental Components in an Energy System. *Procedia Computer Science*, 95, 400–407. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.09.353> [in English].
11. Pro zatverdzhennia Poriadku pryimu na navchannia dlia zdobuttia vyshchoi osvity v 2022 rotsi [On the approval of the Procedure for admission to higher education in 2022], Nakaz Ministerstva osvity i nauky Ukrainy - Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine № 392 (2022) (Ukraine). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0487-22#Text> [in Ukrainian].

УДК 517.977.5

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.1.7>

Андрій НЕСТЕРУК

аспірант кафедри інформаційних систем та технологій, асистент кафедри інформаційних систем та технологій, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», проспект Перемоги, 37, Київ, Україна, індекс 03056 (aonesterukr@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-1563-7245

Богдан КОРНІЄНКО

доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних систем та технологій, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», проспект Перемоги, 37, Київ, Україна, індекс 03056 (bogdanko@gmx.net)

ORCID: 0000-0002-2521-0878

Andrii NESTERUK

graduate student of the Department of Information Systems and Technologies, assistant of the Department of Information Systems and Technologies, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute", 37 Peremogy Avenue, Kyiv, Ukraine, postal code 03056 (aonesterukr@gmail.com)

Bogdan KORNIYENKO

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Information Systems and Technologies, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37 Peremogy Avenue, Kyiv, Ukraine, postal code 03056 (bogdanko@gmx.net)

Бібліографічний опис статті: Нестерук, А., Корнієнко, Б. (2023). Системи управління процесами зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі. *Інформаційні технології та суспільство*. Вип. 1 (7), 50–58. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.1.7>

Bibliographic description of the article: Nesteruk, A., Korniyenko, B. (2023). Sistemi upravlinnya protsesami znevodnennya ta granulyuvannya u psevdozridzhenomu shari [Control systems for dehydration and granulation processes in a fluidized bed]. *Informatsiini tekhnolohii ta suspilstvo – Information technology and society*, 1 (7), 50–58. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.1.7>

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ ЗНЕВОДНЕННЯ ТА ГРАНУЛЮВАННЯ У ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ

Розглянуто основні підходи до управління режимами псевдозрідження під час процесів нанесення покриттів і гранулювання в псевдозрідженому шарі. Розвиток систем управління гранулюванням у псевдозрідженому шарі повинен забезпечити роботу в стабільному режимі псевдозрідження, що посилює тепло- і масообмін, а також задану якість готового продукту (гранулометричний склад, низький вологовміст та хороша сипучість). Для управління режимами псевдозрідження використовується аналіз сигналу коливання тиску. Для управління гранулометричним складом застосовуються методи ближньої інфрачервоної спектроскопії та вимірювання відбиття сфокусованого променя. Для управління вологовмістом гранул розглядаються методи акустичної емісії, мікрохвильового резонансу і електроємнісна томографія. На основі контролю температури теплоносія та температури гранул створено систему управління процесом гранулювання у псевдозрідженому шарі.

Ключові слова: псевдозріджений шар, система управління, гранулювання, мінеральні добрива.

CONTROL SYSTEMS FOR DEHYDRATION AND GRANULATION PROCESSES IN A FLUIDIZED BED

The main approaches to control fluidization regimes during the processes of coating and granulation in a fluidized bed are considered. The development of granulation control systems in a fluidized bed should ensure operation in a stable fluidization mode, which enhances heat and mass exchange, as well as the specified quality of the finished product (granulometric composition, low moisture content and good flowability). Analysis of the pressure fluctuation signal is used to control fluidization modes. The methods of near-infrared spectroscopy and measurement of the reflection of a focused beam are used to control the particle size composition. The methods of acoustic emission, microwave resonance and electrocapacitive tomography are considered to control the moisture content of granules. Based on the control of the temperature of the coolant and the temperature of the granules, a control system for the fluidized bed granulation process has been created.

Key words: fluidized bed, control system, granulation, mineral fertilizers.

Постановка проблеми. Процес гранулювання частинок поширений у різних сегментах виробництва, в хімічній та фармацевтичній промисловості, оскільки значно покращує якість кінцевої продукції за рахунок підвищення механічної стійкості частинок, захист від мікроорганізмів і зовнішніх фізичних

факторів, таких як надмірне тепло, вологість і вплив світла. Крім того, забезпечуються кращі умови обробки за рахунок збільшення розміру та щільності частинок. Дуже важлива стабільність режиму псевдозрідження під час операцій нанесення покриттів і грануляції, що виконуються в псевдозрідженому шарі. Коли відбувається сушіння, з'являються зони без активності, відбувається агломерація частинок, коефіцієнти тепло- і масообміну знижуються, що може призвести до переривання процесу на лічені хвилини. У екстремальних ситуаціях це може призвести до повного руйнування шару. Вміст вологи та діаметр частинок є критичними параметрами, оскільки вони впливають на стабільність псевдозрідження; отже, їх необхідно як відстежувати, так і контролювати [1].

Необхідно щоб система управління в режимі реального часу забезпечувала стабільний режим зволоження, що призводить до однорідного розподілу характеристик твердого матеріалу - щільності, вмісту вологи, розподілу розмірів. Використання системи управління виробництвом мінеральних добрив у грануляторах із псевдозрідженим шаром забезпечує високу відтворюваність якості продукту, покращує функціональну безпеку технологічного процесу, знижує енерговитрати.

Аналіз попередніх досліджень. Розглянуто основні підходи до управління режимами псевдозрідження під час процесу гранулювання в псевдозрідженому шарі, що впливають на стабільність системи: аналіз сигналу коливання тиску використовується для управління режимами псевдозрідження, методи ближньої інфрачервоної спектроскопії та вимірювання відбиття сфокусованого променя можуть бути використані для управління гранулометричним складом, методи акустичної емісії, мікрохвильового резонансу і електроємнісна томографія розглядаються як методи для управління вологовмістом гранул, система управління температурою процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі.

Метою статті є системний аналіз механізмів та підходів до управління процесом гранулювання в псевдозрідженому шарі для забезпечення готового продукту заданої якості.

Виклад основного матеріалу.

Система управління режимом псевдозрідження у грануляторі з псевдозрідженим шаром

Стабільний режим псевдозрідження є важливим для забезпечення високої продуктивності процесів, що включають покриття та гранулювання твердих частинок, оскільки в цьому режимі посилюється тепло- та масообмін між твердою та рідкою фазами, що забезпечує контрольоване зростання розміру частинок. Залежно від умов всередині шару, коли вологі частинки стикаються та створюють рідкі з'єднання, і якщо є надмірна вологість, багато частинок можуть агломерувати та спричинити зневоднення шару [2].

Розроблено декілька методів для кількісної оцінки режимів псевдозрідження через необхідність оцінки якості циркуляції частинок. Для ідентифікації режимів псевдозрідження запропоновано декілька методів: візуальне спостереження, дослідження осьового профілю концентрації твердих речовин та інтерпретація коливань тиску шару [3]. Візуальне спостереження дуже важливе, хоча воно також дуже суб'єктивне. Потужні камери, які були розроблені для спостереження за поведінкою шару за долі секунд, сприяли дослідженням у цій галузі. Для оцінки якості режиму псевдозрідження та отримання інформації про розмір і вологість твердих частинок також використовували акустичні давачі, встановлені всередині шару [4–5].

Режими псевдозрідження можна описати кількісно на основі аналізу часових рядів коливань тиску. Такий опис залежить від адекватного методу вимірювання та методу аналізу, що застосовується до вимірюваних сигналів. Сигнали тиску можуть бути оброблені в часовій області (дисперсія або стандартне відхилення), в частотній області (спектральний аналіз) або в просторі станів з використанням нелінійних рядів (теорія хаосу) [3]. Сигнали тиску, виміряні в шарі, несуть інформацію про різні явища, які відбуваються під час псевдозрідження, такі як турбулентність, рух і виверження бульбашок [6].

Важливо зазначити, що існують інші методи моніторингу режимів псевдозрідження, які застосовуються до процесів покриття та гранулювання, а саме: падіння тиску в шарі, споживання електроенергії в системах гранулювання з перемішуванням та вимірювання сигналів флуктуації напруги частинок за допомогою напруги.

Управління за перепадом тиску є найпростішим, найдешевшим і найбільш поширеним методом на виробництвах. Тим не менш, було помічено, що ця змінна не створює раннього попередження щодо явища зневоднення, що ускладнює її застосування до автоматично керованої системи [7]. Незважаючи на це обмеження, розроблено багато систем управління для запобігання агломерації під час покриття частинок у шарі, що використовують падіння тиску шару як контрольовану змінну та потік рідини для покриття як змінну, що регулюється [8–9].

Метод, заснований на споживанні електроенергії системою перемішування, використовувався для управління процесом гранулювання, особливо для визначення кінцевої точки процесу [10–11]. Дослідження показують, що середнє споживання електроенергії в часовій області не здатне виявити рідко-динамічні нестабільності в початкові моменти, які виникають, але обробка сигналу споживання

потужності за допомогою стандартного відхилення або дисперсії, спектрального аналізу може призводити до більш надійної інформації про гідродинамічний режим.

Також досліджували процес гранулювання за допомогою давачів напруги для вимірювання коливань напруги в камері обладнання з псевдозрідженим шаром, яка складалася з двох концентричних циліндрів, де частинки розміщувалися в кільцевій області, а внутрішній циліндр обертався [12]. Спектральний аналіз і теорія хаосу (нелінійний аналіз – реконструкція атракторів), які аналізують статистику, були використані для опису, з точки зору якості та кількості, того, як формуються та ростуть гранули.

Проводились дослідження процесу покриття мікрокристалічної целюлози в псевдозрідженому шарі з метою моніторингу режимних переходів, які відбуваються під час процесу внаслідок розпилення водної полімерної суспензії [13]. Застосовано спектральний аналіз сигналів коливань тиску. Було помічено, що спектри потужності змінюються під час розпилення суспензії. Спектральні амплітуди зменшуються в міру нанесення покриття. Процес нанесення покриття розпочинався з ситуацій рідинно-динамічної стабільності, коли процес працював у режимі багаторазового барботування. Спектральні амплітуди були високими, а частота демонструвала домінуючу частоту. Коли почали виникати гідродинамічні нестабільності, було видно зміщення спектрів потужності, а візуальне спостереження за поведінкою шару показало ситуації високої нестабільності з утворенням каналів і агломерацією.

Розроблено методологію, засновану на вимірюванні сигналів коливань тиску та спектральному аналізі сигналів за допомогою перетворення Фур'є, спрямовану на ідентифікацію області зневоднення шару мікрокристалічної целюлози та піску [14]. Завдяки нелінійному пристосуванню спектрів тиску до експоненціальної функції, схожої на регулярну функцію розподілу Гауса, зневоднення можна проаналізувати через значні зміни в отриманих профілях середньої частоти Гауса. Гаусова середня частота та коефіцієнт псевдозрідження відображають характеристики кипіння в шарі, тобто вони відображають різні діапазони значень для режимів псевдозрідження, початкових моментів зневоднення та діапазону нерухомого шару. Дослідження, проведені з використанням мікрокристалічної целюлози, демонструють, що середня частота та коефіцієнт псевдозрідження не змінюють своїх діапазонів зміни за стабільних умов псевдозрідження в широкому діапазоні робочих умов процесу нанесення покриття (маса твердої речовини, швидкість потоку суспензії і швидкість потоку повітря) [15]. Зневоднення ідентифікується різкими змінами діапазонів, визначених як стабільні. Надзвичайно важливо, щоб змінні, якими керують у процесі, могли представляти такий процес у широкому діапазоні робочих умов для розробки системи управління. Методологія спектрального аналізу Гауса для виявлення змін у режимі псевдозрідження та реалізація стратегії управління, заснованої на вдосконаленому алгоритмі ПІД-регулятора для моніторингу та контролю в реальному часі процесу покриття та зволоження частинок, забезпечують покращені гідродинамічні умови порівняно з процесом без контролю.

Спектральний аналіз і теорія хаосу є точнішими та швидшими у генеруванні інформації про нестабільні ситуації в режимі псевдозрідження порівняно з моніторингом перепаду тиску в шарі та споживанням електроенергії у змішаному псевдозрідженому шарі. Спостереження спектрів потужності в частотній області та атракторів у багатовимірному просторі все ще є дуже суб'єктивним завданням. Оператор процесу нанесення покриття або гранулювання в псевдозрідженому шарі повинен бути дуже добре підготовлений визначити початкові моменти, коли виникає нестабільність, коли спектри та атрактори змінюються випадковим чином. У спектральному аналізі ідентифікація домінуючих частот також має бути дуже обережним процесом через випадковість динаміки псевдозрідженого шару, де не завжди можливо визначити домінуючі частоти. Таким чином, було б важко побудувати замкнений цикл керування, щоб налаштувати процес, лише аналізуючи спектри потужності через ідентифікацію домінуючих частот [16]. Статистична обробка спектрального розподілу тиску за допомогою спектрального аналізу Гауса [16] і обробки атракторів за допомогою статистики [17] виявилася дуже надійними та точними методами для визначення нестабільної поведінки в режимі псевдозрідження.

Системи управління гранулометричним складом у грануляторі з псевдозрідженим шаром

Прогнозування розподілу частинок за розміром для визначення кінцевої точки процесу у випадку гранулювання, а також виявлення утворення небажаних агломераційних грудок у випадку покриття частинок є дуже складними завданнями. Визначення точки зупинки процесів гранулювання або покриття все ще є великою проблемою. Для оцінки розміру частинок використано кілька методів, найвідомішими серед яких є просіювання, обробка зображень і лазерна дифракція. Ці методи є дуже точними, але не дають реальної інформації про розмір частинок всередині обладнання для покриття або грануляції в режимі реального часу.

Ближня інфрачервона спектроскопія

Ближня інфрачервона спектроскопія використовується для моніторингу розміру частинок і вмісту вологи, оскільки поглинання в області спектру ближньої інфрачервоної спектроскопії чутливе до коливань вмісту вологи та розміру частинок. Знайти хорошу кореляцію між даними поглинання та цими

критичними змінними є одним з найбільш складних завдань при впровадженні техніки ближньої інфрачервоної спектроскопії у виробничий процес, оскільки калібрування слід змінювати відповідно до природи продукту або робочих умов у гранулюванні. Дослідження, які відстежували розмір частинок у режимі реального часу за допомогою вимірювання поглинання ближньої інфрачервоної спектроскопії, показали значні труднощі з налаштуванням моделей для забезпечення росту частинок у процесі гранулювання, оскільки на вимірювання впливає вміст вологи, а метод калібрування повинен бути ретельно підібраний для перевірки прогнозу для всіх розмірів частинок [18].

Для прогнозування впливу вмісту вологи на розмір частинок у процесі гранулювання в псевдозрізному шарі використовують також нейронну мережу [19]. Вимірювання вмісту вологи контролювали за допомогою інфрачервоної спектроскопії, тоді як розмір частинок визначали просіюванням. Отримані результати показали, що методологія здатна адекватно виміряти масовий середній діаметр для кількох рівнів вологовмісту.

Вимірювання відбиття сфокусованого променя

Фізично метод вимірювання відбиття сфокусованого променя полягає у введенні зонда, який має лазерні промені та електронну схему всередині псевдозрізженого шару. Сильно сфокусовані лазерні промені проходять через обертові лінзи, які спрямовують їх на сапфірове вікно, проектуючи лазер на середовище з частинками. Коли лазерний промінь потрапляє на частинки, світло відбивається назад. Зворотне розсіювання обчислюється електронною схемою, яка розраховує час, який потрібен лазерному променю для переходу від однієї сторони частинки до іншої, що в поєднанні зі швидкістю лазера дозволяє обчислити розмір частинки [20].

Процес гранулювання у псевдозрізженому шарі досліджували з використанням вимірювання відбиття сфокусованого променя для моніторингу в мережі та проводили порівняння з вимірюваннями в автономному режимі за допомогою лазерної дифракції та просіювання [21]. Було проаналізовано вплив швидкості розпилення на ефективність моніторингу.

Проводились дослідження, що використовували одночасно три он-лайн методи вимірювання, щоб спробувати контролювати зростання частинок у грануляторі з псевдозрізженим шаром: акустичну емісію, вимірювання відбиття сфокусованого променя та ближню інфрачервону спектроскопію [22]. Усі три методи були чутливими до механізму росту частинок для грануляції (утворення зародків, індукції, консолідації та зростання, руйнування та стирання). Порівняння з вимірюваннями лазерної дифракції в автономному режимі не показало хорошої збігу в прогнозуванні розміру частинок. Наявні проблеми інкрустації давачів вимірювання відбиття сфокусованого променя та ближньої інфрачервоної спектроскопії, що є недоліком цих методів.

Велосиметрія

Велосиметрія – це техніка прямого моніторингу розміру частинок, яка привернула велику увагу дослідників, особливо у фармацевтичному секторі, у застосуванні до гранулювання. За допомогою методу велосиметрії можна збирати інформацію про розмір і швидкість частинок, коли вони перетинають лазерний промінь, а відтінок частинок реєструється набором оптичних волокон, які генерують сигнал.

Велосиметрію використовують для оцінки можливостей застосування процесу гранулювання в псевдозрізженому шарі [23]. Вплив умов експлуатації (температура повітря для сушіння) на рецептуру гранул вивчали за допомогою поточного моніторингу розміру гранул. Проведено вимірювання методом велосиметрії за допомогою лазерної дифракції.

Техніку велосиметрії застосували для моніторингу росту частинок в псевдозрізженому шарі, використовуючи багатофакторний аналіз для перевірки продуктивності, варіацій процесу та вивчення можливості впровадження системи управління [24]. Розмір частинок збільшувався під час періоду розпилення та зменшувався під час сушіння, ймовірно, через руйнування частинок. Швидкість циркуляції частинок показала поведінку режиму псевдозрізження. На початку розпилення швидкість циркуляції частинок збільшилася, в той же час спостерігався стабільний режим псевдозрізження. Через 6 хвилин розпилення цей параметр почав зменшуватися, що вказує на втрату якості псевдозрізження.

Методи отримання вимірювань розміру частинок за допомогою обробки зображень мають значні переваги, особливо коли потрібно спостерігати зростання твердої речовини всередині псевдозрізженого шару. Однак складність реалізації полягає в області засобів обробки зображень і необхідності калібрування для кожного продукту. Інфрачервоні або ближні інфрачервоні промені застосовувалося для моніторингу покриття частинок та гранулювання. Діапазон розмірів також обмежений через коротке проникнення інфрачервоної хвилі, що більше підходить для дрібних частинок. Вимірювання відбиття сфокусованого променя і вимірювання швидкості з просторовим фільтром широко застосовуються в дослідженнях і промисловості. Ці методи можуть працювати з висококонцентрованими системами частинок, високими температурами, системами з високою вологістю.

Системи управління вологовмістом гранул у грануляторі з псевдозрідженим шаром

Відомо, що вміст вологи є критичною контрольною змінною в процесах, що включають гранулювання у псевдозрідженому шарі. Попит на високоякісну продукцію призвів до поступової еволюції методів моніторингу вологості на цих установках. Вологовміст в частинках є однією з найбільш важливих змінних у стабільності режиму псевдозрідження і, поряд з діаметром, є параметром контролю якості, що стосується збереження таких властивостей, як: щільність, твердість, крихкість, час розпаду, міцність стиснення і захисний бар'єр від мікроорганізмів. Були застосовані різні методи моніторингу в режимі реального часу та контролю процесу псевдозрідження за вологовмістом в гранулах. Основними методами є інфрачервона або ближня інфрачервона спектроскопія, заснована на поглинанні або відображенні хвиль в інфрачервоному спектрі, методи, які вловлюють акустичні сигнали, наприклад, за допомогою акустичної емісії.

Акустична емісія

Акустику можна визначити як генерацію, передачу або прийом енергії у форматі коливальних хвиль [25]. Акустична емісія спричинена фізичними або хімічними подіями, коли вони включають рух твердих частинок (як у псевдозрідженому шарі). Акустична емісія може виникати через тертя або зіткнення між частинками та іншими об'єктами або стінкою апарату, і її можна зафіксувати, щоб зробити можливим отримання інформації про те, що відбувається в процесі [26]. Вимірювання акустичних випромінювань використовувалися як інструмент для моніторингу процесів гранулювання в псевдозрідженому шарі [4,5,27-28]. Моніторинг змін вологості за допомогою цієї методики все ще обмежений. Метод акустичної емісії застосували до моніторингу процесу псевдозрідження та досліджували вплив вологовмісту в частинці на середню амплітуду акустичної емісії [27].

Техніка мікрохвильового резонансу

Техніка, яка використовує мікрохвильовий резонанс для вимірювання вмісту вологи, заснована на взаємодії між молекулами води зі змінами електромагнітного поля, створеного індукцією електромагнітних хвиль із частотою від 300 МГц до 300 ГГц. Цей метод використовувався для моніторингу вологовмісту під час процесу гранулювання в псевдозрідженому шарі [28]. Вологовміст в гранулах вимірювали в режимі онлайн за допомогою мікрохвильового резонансного давача та порівнювали його з результатом, отриманим в автономному режимі за допомогою втрати вологи при висушуванні з використанням інфрачервоного випромінювання. Одержана подібність між результатами, головним чином, коли вологовміст був менше 10%.

Електроємнісна томографія

Вимірювання вологовмісту гранули за допомогою електроємнісної томографії базується на кореляції між вологовмістом та значенням діелектричної проникності, отриманим шляхом вимірювання ємності між парою електродів, загорнутих у матеріал, що підлягає вимірюванню.

Електроємнісна томографія використовує різницю між діелектричною проникністю газової та твердої фаз у псевдозрідженому шарі, щоб визначити розподіл цих фаз. Електроди розміщують таким чином, щоб вони розташовувалися зовні шару. Вимірювання ємності виконуються та перебудовуються за допомогою томограм, що надають розподіл діелектричної проникності [29].

Електроємнісну томографію застосували для виявлення змін гідродинаміки, які відбувалися протягом процесу сушіння фармацевтичних гранул у псевдозрідженому шарі, продемонструвавши, що варіації, пов'язані з втратою вологи, є більшими, коли вони знаходяться поблизу стінки шару, ніж у центрі. Також запропоновано використовувати електроємнісну томографію як техніку он-лайн моніторингу вологовмісту в гранулах у псевдозрідженому шарі [30].

Системи управління температурою у грануляторі з псевдозрідженим шаром

На процес гранулоутворення у грануляторі великий вплив мають такі параметри як: температура гранул, температура теплоносія та вологовміст гранул. Пропонується контролювати дані параметри, аби система керування змогла забезпечити ефективне використання ресурсів та високу якість готової продукції. Вологовміст гранул, температура теплоносія та температура гранул тісно пов'язані між собою, тому що якщо температура теплоносія буде перевищувати температурний діапазон, відбудеться надлишкове нагрівання гранул та критичне зниження вологовмісту в гранулі. В результаті чого буде використовуватися надлишкова кількість енергії на нагрівання повітря, що є не ефективним з точки зору енергоефективності, а зменшення кількості вологи у гранулах може призвести до їх крихкості, що негативно впливає на процес транспортування та використання мінеральних добрив. Для побудови системи управління процесом гранулювання у псевдозрідженому шарі пропонується використовувати температуру теплоносія та температуру гранул [31-55].

Висновки. Розглянуто найбільш поширені методи моніторингу критичних параметрів, які безпосередньо впливають на стабільність процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі. На основі запропо-

нованих підходів реалізовані системи управління на виробництві гранульованої продукції у апаратах із псевдозріженим шаром. Здійснено огляд систем управління грануляторами із псевдозріженим шаром, що управляють режимами псевдозрідження, вологовмістом гранул, гранулометричним складом готової продукції та температурою, та є найбільш поширеними для визначення поведінки псевдозрідження під час нанесення покриття та гранулювання та виявлення нестабільності. Побудова сучасної системи управління процесом гранулювання в апараті з псевдозріженим шаром потребує розробки математичної моделі, яка б адекватно описувала складний технологічний процес. Перспективним завданням є побудова інформаційної технології управління процесом гранулювання у псевдозріженому шарі із забезпеченням стабільної роботи обладнання, одержання готової продукції заданої якості та збільшення енергоефективності технологічного процесу.

Список використаних джерел:

1. Lipsanen T, Närvänen T, Räikkönen H., Antikainen O., Yliruusi J. Particle size, moisture, and fluidization variations described by indirect in-line physical measurements of fluid bed granulation. *AAPS PharmSciTech*. 2008. №9. P. 1070- 1077.
2. Maronga S. On the optimization of the fluidized bed particulate coating process. Ph.D. Thesis – Department of Chemical Engineering and Technology – Royal Institute of Technology. 1998. 78 p.
3. Johnsson F, Zijerveld R.C., Schouten J.C., van der Beek C.M., Leckner B. Characterization of fluidization regimes by time-series analysis of pressure fluctuations. *International Journal of Multiphase Flow*. 2000. №26. P. 663-715.
4. Halstensen M., de Bakker P., Esbensen K.H. Acoustic chemometric monitoring an industrial granulation production process – a PAT feasibility study. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2006. №84. P. 88-97.
5. Naelapää K., Veski P., Pedersen J.G., Anov D., Jørgensen P., Kristensen H.G., Bertelsen P. Acoustic monitoring of a fluidized bed coating process. *International Journal of Pharmaceutics*. 2007. №332. P. 90-97.
6. Shouten J.C., van den Bleek C.M., Monitoring the quality of fluidization using the short-term predictability of pressure fluctuations. *AIChE Journal*. 1998. №44. P. 48-60.
7. Silva C.A.M., Parise M.R., Silva F.V., Taranto O.P. Control of fluidized bed coating particles using Gaussian spectral pressure distribution. *Powder Technology*. 2011. №212. P. 445-458.
8. el Mafadi S., Hayert M., Poncelet D. Fluidization control in Wuster coating process. *Hemijska Industrija*. 2003. № 57. P. 641-644.
9. Terashita K., Watano S., Miyanami K. Determination of end-point by frequency analysis of power consumption in agitation granulation. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*. 1990. №38. P. 3120-3123.
10. Watano S., Terashita K., Miyanami K. Analysis of granulation process and determination of operational end point in a tumbling fluidized bed granulation. *Bulletin of University of Osaka prefecture. Series A*. 1993. №4. P. 47-56.
11. Talu I., Tardos G.I., van Ommen J.R. Use of stress fluctuations to monitor wet granulation of powders. *Powder Technology*. 2001. №117. P. 149-162.
12. Moris V.A.S., Visnadi C.B., Cunha R.L.G., Rocha S.C.S., Taranto O.P. Monitoring of fluidized bed coating process of microcrystalline cellulose. *XXXII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados*. Maringá. Paraná. Brazil. 2006.
13. Parise M.R., Taranto O.P., Kurka P.R.G., Benetti L.B. Detection of the minimum gas velocity region using Gaussian spectral pressure distribution in a gas-solid fluidized bed. *Powder Technology*. 2008. №182. P. 453-458.
14. Silva C.A.M. Application of the Gaussian spectral analysis methodology to monitor and control the defluidization in the particles coating process. *School of Chemical Engineering, University State of Campinas*. Campinas. 2009. 145 p.
15. Parise M.R., Silva C.A.M., Ramazini M.J., Taranto O.P. Identification of defluidization in fluidized bed coating using the Gaussian spectral pressure distribution. *Powder Technology*. 2011. №206. P. 149-153.
16. de Martín L., van den Dries K., van Ommen J.R. Comparison of three different methodologies of pressure signal processing to monitor fluidized-bed dryers/ granulators. *Chemical Engineering Journal*. 2011. №172. P. 487-499.
17. Nieuwmeyer F.J.S., Damen M., Gerich A., Rusmini F., van der K., Maarschalk V., Vromans H. Granule characterization during fluid bed drying by development of a near infrared method to determine water content and median granule size. *Pharmaceutical Research*. 2007. №24. P. 1854-1861.
18. Watano S., Takashima H., Miyanami K. Scale-up of agitation fluidized bed granulation by neural network. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*. 1997. №45. P. 1193-1197.
19. Scheibli D. The use of FBRM for on-line particle size analysis in a fluid bed granulator. *Master's Theses*. 2007. № 3576.
20. Hu X., Cunningham J.C., Winstead D. Study growth kinetics in fluidized bed granulation with at-line FBRM. *International Journal of Pharmaceutics*. 2008. № 347. P. 54-61.
21. Tok A., Goh X.P., Ng W., Tan R. Monitoring granulation rate processes using three PAT tools in a pilot-scale fluidized bed. *AAPS PharmSciTech*. 2008. №9. P. 1083-1091.
22. Burggraeve A., van den Kerkhof T., Hellings M., Remon J.P., Vervaet C., de Beer T. Evaluation of in-line spatial filter velocimetry as PAT monitoring tool for particle growth during fluid bed granulation. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*. 2010. №76. P. 138-146.
23. Huang J., Goolcharran C., Utz J., Hernandez-abad P., Ghosh K., Nagi A. A PAT Approach to enhance process understanding of fluid bed granulation using inline particle size characterization and multivariate analysis. *Journal Pharmaceutical Innovation*. 2010. №5. P. 58-68.
24. Kinsler L.E., Frey A.R., Coppens A.B., Sanders J.V. *Fundamentals of Acoustics* // forth ed., John Wiley & Sons. New York. 2000.

25. Boyd J.W.R., Varley J. The uses of passive measurement of acoustic emissions from chemical engineering processes. *Chemical Engineering Science*. 2001. № 56. P. 1749-1767.
26. Tsujimoto H., Yokoyama T., Huang C.C., Sekiguchi I. Monitoring particle fluidization in a fluidized bed granulator with an acoustic emission sensor. *Powder Technology*. 2000. № 113. P. 88-96.
27. Book G., Albion K., Briens L., Briens C., Berruti F. On-line detection of bed fluidity in gas-solid fluidized beds with liquid injection by passive acoustic and vibrometric methods. *Powder Technology*. 2011. № 205. P. 126-136.
28. Buschmüller C., Wiedey W., Döscher C., Dressler J., Breitzkreutz J. In-line monitoring of granule moisture in fluidized-bed dryers using microwave resonance technology. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*. 2008. №69. P. 380-387.
29. Dyakowski T., Jeanmeure L.F.C., Jaworski A.J. Applications of electrical capacitance tomography for gas-solids and liquid-solids flows - a review. *Powder Technology*. 2000. № 112. P. 174-192.
30. Wang H.G., Senior P.R., Mann R., Yang W.Q. Online measurement and control of solids moisture in fluidized bed dryers. *Chemical Engineering Science*. 2009. № 64. P. 2893-2902.
31. Корнієнко Б.Я. Інформаційні технології оптимального управління виробництвом мінеральних добрив. Київ. 2014. 288 с.
32. Korniyenko B.Y. The two phase model of formation of mineral fertilizers in the fluidized-bed granulator. *The Advanced Science Journal*. 2013. № 4. P. 41-44.
33. Корнієнко Б.Я. Двохфазна модель процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження»*. 2012. № 2(10). С. 31-35.
34. Корнієнко Б.Я. Математичне моделювання динаміки процесів переносу при зневодненні та гранулюванні у псевдозрідженому шарі. *Науковий журнал «Вісник Національного авіаційного університету»*. 2012. № 4(53). С. 84-90.
35. Korniyenko B.Y. Modeling of transport processes in disperse systems. *The Advanced Science Journal*. 2013. № 1. P. 7-10.
36. Корнієнко Б.Я. Мінеральні добрива. Двохфазна модель утворення в грануляторі із псевдозрідженим шаром. *Хімічна промисловість України*. 2013. № 1. С. 39-43.
37. Корнієнко Б.Я., Ладієва Л.Р., Снігур О.В. Гранулювання у псевдозрідженому шарі. Дослідження детермінованого хаосу процесу. *Хімічна промисловість України*. 2013. № 2. С. 20-23.
38. Korniyenko B.Y. Research modes of a fluidized bed granulator. *The Advanced Science Journal*. 2013. № 5. P. 12-15.
39. Корнієнко Б.Я. Ідентифікація процесу гранулювання мінеральних добрив у апараті з псевдозрідженим шаром. *Наукоємні технології*. 2013. № 3(19). С. 280-284.
40. Korniyenko B.Y., Osipa L. Identification of the granulation process in the fluidized bed. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. № 13(14). P. 4365-4370.
41. Korniyenko B., Ladieva L. Mathematical Modeling Dynamics of the Process Dehydration and Granulation in the Fluidized Bed. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 1247 AISC. 2021. P. 18-30.
42. Korniyenko B., Ladieva L., Galata L. Control system for the production of mineral fertilizers in a granulator with a fluidized bed. 2020 2nd IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory. 2020. №9349344. P. 307-310.
43. Korniyenko B.Y., Borzenkova S.V., Ladieva L.R. Research of three-phase mathematical model of dehydration and granulation process in the fluidized bed. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019. № 14(12). P. 2329-2332.
44. Korniyenko B.Y., Ladieva L.R. Mathematical modeling dynamics of the process dehydration and granulation in the fluidized bed. *Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту*. Херсон. 2019. P. 86-88.
45. Корнієнко Б.Я. Мінеральні добрива. Оптимізація процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі. *Хімічна промисловість України*. 2013. № 4. С. 69-73.
46. Korniyenko B.Y. Static and dynamic characteristics of transport processes in disperse systems. *Наукоємні технології*. 2013. № 2(18). P. 166-170.
47. Корнієнко Б.Я. Мінеральні добрива. Статична оптимізація процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі. *Хімічна промисловість України*. 2013. № 5. С. 36-40.
48. Корнієнко Б.Я. Ідентифікація процесу гранулювання мінеральних добрив у апараті з псевдозрідженим шаром. *Наукоємні технології*. 2013. № 3(19). С. 280-284.
49. Корнієнко Б.Я. Задачі оптимізації зневоднення та гранулювання мінеральних добрив у псевдозрідженому шарі. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження»*. 2014. № 1(12). С. 28-31.
50. Korniyenko B.Y., Liubeka A.M., Sachok R.V., Korniyenko B.Y. Modeling of heat exchangement in fluidized bed with mechanical liquid distribution. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019. № 14(12). P. 2203-2210.
51. Korniyenko B., Galata L., Ladieva L. Security Estimation of the Simulation Polygon for the Protection of Critical Information Resources. *CEUR Workshop Proceedings, Selected Papers of the XVIII International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Security" (ITS 2018)*. Kyiv, Ukraine. 2018. № 2318. P. 176-187.
52. Корнієнко Б.Я. Дослідження моделі взаємодії відкритих систем з погляду інформаційної безпеки. *Наукоємні технології*. 2012. № 3(15). С. 83-89.
53. Korniyenko B., Yudin O., Novizkij E. Open systems interconnection model investigation from the viewpoint of information security. *The Advanced Science Journal*. 2013. № 8. P. 53-56.
54. Zhulynskiy A.A., Ladieva L.R., Korniyenko B.Y. Parametric identification of the process of contact membrane distillation. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences Volume 14*. 2019. № 17. P. 3108-3112.
55. Bieliatynskiy A., Osipa L., Korniyenko B. Water-saving processes control of an airport. Paper presented at the MATEC Web of Conferences. 2018. № 239.

References:

1. Lipsanen, T., T. Närvänen, H. Räikkönen, O. Antikainen, J. Yliruusi (2008). Particle size, moisture, and fluidization variations described by indirect in-line physical measurements of fluid bed granulation. *AAPS PharmSciTech*, 9, 1070-1077.
2. Maronga, S. (1998). On the optimization of the fluidized bed particulate coating process. *Department of Chemical Engineering and Technology – Royal Institute of Technology*, 78.
3. Johnsson, F., R.C. Zijerveld, J.C. Schouten, C.M. van der Beek, B. Leckner (2000). Characterization of fluidization regimes by time-series analysis of pressure fluctuations. *International Journal of Multiphase Flow*, 26, 663-715.
4. Halstensen, M., P. de Bakker, K.H. Esbensen (2006). Acoustic chemometric monitoring an industrial granulation production process. *a PAT feasibility study, Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 84, 88-97.
5. Naelapää, M., P. Veski, J.G. Pedersen, D. Anov, P. Jørgensen, H.G. Kristensen, P. Bertelsen (2007). Acoustic monitoring of a fluidized bed coating process. *International Journal of Pharmaceutics*, 332, 90-97.
6. Shouten, J.C., C.M. van den Bleek (1998). Monitoring the quality of fluidization using the short-term predictability of pressure fluctuations. *AIChE Journal*, 44, 48-60.
7. Silva, C.A.M., M.R. Parise, F.V. Silva, O.P. Taranto (2011). Control of fluidized bed coating particles using Gaussian spectral pressure distribution. *Powder Technology*, 212, 445-458.
8. el Mafadi, S., M. Hayert, D. Poncelet (2003). Fluidization control in Wuster coating process. *Hemijaska Industrija*, 57, 641-644.
9. Terashita, K., S. Watano, K. Miyanami (1990). Determination of end-point by frequency analysis of power consumption in agitation granulation. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, 38, 3120-3123.
10. Watano, S., K. Terashita, K. Miyanami (1993). Analysis of granulation process and determination of operational end point in a tumbling fluidized bed granulation. *Bulletin of University of Osaka prefecture. Series A*, 41, 47-56.
11. Talu, I., G.I. Tardos, J.R. van Ommen (2001). Use of stress fluctuations to monitor wet granulation of powders. *Powder Technology*, 117, 149-162.
12. Moris, V.A.S., C.B. Visnadi, R.L.G. Cunha, S.C.S. Rocha, O.P. Taranto (2006). Monitoring of fluidized bed coating process of microcrystalline cellulose. *XXXII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados*, Maringá.
13. Parise, M.R., O.P. Taranto, P.R.G. Kurka, L.B. Benetti (2008). Detection of the minimum gas velocity region using Gaussian spectral pressure distribution in a gas-solid fluidized bed. *Powder Technology*, 182, 453-458.
14. Silva, C.A.M. (2009). Application of the Gaussian spectral analysis methodology to monitor and control the defluidization in the particles coating process. *School of Chemical Engineering, University State of Campinas*, 145.
15. Parise, M.R., C.A.M. Silva, M.J. Ramazini, O.P. Taranto (2011). Identification of defluidization in fluidized bed coating using the Gaussian spectral pressure distribution. *Powder Technology*, 206, 149-153.
16. de Martín, L., K. van den Dries, J.R. van Ommen (2011). Comparison of three different methodologies of pressure signal processing to monitor fluidized-bed dryers/ granulators. *Chemical Engineering Journal*, 172, 487-499.
17. Nieuwmeyer, F.J.S., M. Damen, A. Gerich, F. Rusmini, K. van der, V. Maarschalk, H. Vromans (2007). Granule characterization during fluid bed drying by development of a near infrared method to determine water content and median granule size. *Pharmaceutical Research*, 24, 1854-1861.
18. Watano, S., H. Takashima, K. Miyanami (1997). Scale-up of agitation fluidized bed granulation by neural network. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, 45, 1193-1197.
19. Scheibli, D. (2007). The use of FBRM for on-line particle size analysis in a fluid bed granulator. 3576.
20. Hu, X., J.C. Cunningham, D. Winstead (2008). Study growth kinetics in fluidized bed granulation with at-line FBRM. *International Journal of Pharmaceutics*, 347, 54-61.
21. Tok, A., X.P. Goh, W. Ng, R. Tan (2008). Monitoring granulation rate processes using three PAT tools in a pilot-scale fluidized bed. *AAPS PharmSciTech*, 9, 1083-1091.
22. Burggraave, A., T. van den Kerkhof, M. Hellings, J.P. Remon, C. Vervaet, T. de Beer (2010). Evaluation of in-line spatial filter velocimetry as PAT monitoring tool for particle growth during fluid bed granulation. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 76, 138-146.
23. Huang, J., C. Goolcharran, J. Utz, P. Hernandez-abad, K. Ghosh, A. Nagi (2010). A PAT Approach to enhance process understanding of fluid bed granulation using inline particle size characterization and multivariate analysis. *Journal Pharmaceutical Innovation*, 5, 58-68.
24. Kinsler, L.E., A.R. Frey, A.B. Coppens, J.V. Sanders (2000). Fundamentals of Acoustics. *John Wiley & Sons*.
25. Boyd, J.W.R., J. Varley (2001). The uses of passive measurement of acoustic emissions from chemical engineering processes. *Chemical Engineering Science*, 56, 1749-1767.
26. Tsujimoto, H., T. Yokoyama, C.C. Huang, I. Sekiguchi (2000). Monitoring particle fluidization in a fluidized bed granulator with an acoustic emission sensor. *Powder Technology*, 113, 88-96.
27. Book, G., K. Albion, L. Briens, C. Briens, F. Berruti (2011). On-line detection of bed fluidity in gas-solid fluidized beds with liquid injection by passive acoustic and vibrometric methods. *Powder Technology*, 205, 126-136.
28. Buschmüller, C., W. Wiedey, C. Döscher, J. Dressler, J. Breitreutz (2008). In-line monitoring of granule moisture in fluidized-bed dryers using microwave resonance technology. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 69, 380-387.
29. Dyakowski, T., L.F.C. Jeanmeure, A.J. Jaworski (2000). Applications of electrical capacitance tomography for gas-solids and liquid-solids flows - a review. *Powder Technology*, 112, 174-192.
30. Wang, H.G., P.R. Senior, R. Mann, W.Q. Yang (2009). Online measurement and control of solids moisture in fluidized bed dryers. *Chemical Engineering Science*, 64, 2893-2902.
31. Korniyenko B.Y. (2014). Informatsiini tekhnolohii optimalnoho upravlinnia vyrobnystvom mineralnykh dobryv [Information technologies for optimal management of mineral fertilizer production], 288.

32. Korniyenko B.Y. (2013). The two phase model of formation of mineral fertilizers in the fluidized-bed granulator. *The Advanced Science Journal*, 4, 41-44.
33. Korniyenko B.Y. (2012). Dvokhfazna model protsesu znevodnennia ta hranuliuvannia u psevdozridzhenomu shari [Two-phase model of the process of dehydration and granulation in a fluidized bed]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut», Seria «Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozberezhennia», 2(10)*, 31-35.
34. Korniyenko B.Y. (2012). Matematychni modeliuvannia dynamiky protsesiv perenosu pry znevodnenni ta hranuliuvanni u psevdozridzhenomu shari [Mathematical modeling of the dynamics of transfer processes during dehydration and granulation in a fluidized bed]. *Naukovyi zhurnal «Visnyk Natsionalnoho aviatsiinoho universytetu», 4(53)*, 84-90.
35. Korniyenko B.Y. (2013). Modeling of transport processes in disperse systems. *The Advanced Science Journal*, 1, 7-10.
36. Korniyenko B.Y. (2013). Mineralni dobryva. Dvokhfazna model utvorennia v hranuliatori iz psevdozridzhenym sharom [Mineral fertilizers. Two-phase model of formation in a fluidized bed granulator]. *Khimichna promyslovist Ukrainy*, 1, 39-43.
37. Korniyenko B.Y., Ladieva L.R., Snihur O.V. (2013). Hranuliuvannia u psevdozridzhenomu shari. Doslidzhennia determinovanoho khaosu protsesu [Granulation in a fluidized bed. Study of deterministic process chaos]. *Khimichna promyslovist Ukrainy*, 2, 20-23.
38. Korniyenko B.Y. (2013). Research modes of a fluidized bed granulator. *The Advanced Science Journal*, 5, 12-15.
39. Korniyenko B.Y. (2013). Identyfikatsiia protsesu hranuliuvannia mineralnykh dobryv u aparati z psevdozridzhenym sharom [Identification of the granulation process of mineral fertilizers in a fluidized bed apparatus]. *Naukoiemni tekhnologii*, 3(19), 280-284.
40. Korniyenko B.Y., Osipa L. (2018). Identification of the granulation process in the fluidized bed. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13(14), 4365-4370.
41. Korniyenko B., Ladieva L. (2021). Mathematical Modeling Dynamics of the Process Dehydration and Granulation in the Fluidized Bed. *Advances in Intelligent Systems and Computing. 1247 AISC*, 18-30.
42. Korniyenko B., Ladieva L., Galata L. (2020). Control system for the production of mineral fertilizers in a granulator with a fluidized bed. *2020 2nd IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory*, 9349344, 307-310.
43. Korniyenko B.Y., Borzenkova S.V., Ladieva L.R. (2019). Research of three-phase mathematical model of dehydration and granulation process in the fluidized bed. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 14(12), 2329-2332.
44. Korniyenko B.Y., Ladieva L.R. (2019). Mathematical modeling dynamics of the process dehydration and granulation in the fluidized bed. *Intelektualni systemy pryiniattia rishen i problemy obchyslivalnoho intelektu*, 86-88.
45. Korniyenko B.Y. (2013). Mineralni dobryva. Optyimizatsiia protsesu znevodnennia ta hranuliuvannia u psevdozridzhenomu shari [Mineral fertilizers. Optimization of the process of dehydration and granulation in a fluidized bed]. *Khimichna promyslovist Ukrainy*, 4, 69-73.
46. Korniyenko B.Y. (2013). Static and dynamic characteristics of transport processes in disperse systems. *Naukoiemni tekhnologii*, 2(18), 166-170.
47. Korniyenko B.Y. (2013). Mineralni dobryva. Statychna optyimizatsiia protsesu hranuliuvannia u psevdozridzhenomu shari [Mineral fertilizers. Static optimization of the granulation process in a fluidized bed]. *Khimichna promyslovist Ukrainy*, 5, 36-40.
48. Korniyenko B.Y. (2013). Identyfikatsiia protsesu hranuliuvannia mineralnykh dobryv u aparati z psevdozridzhenym sharom [Identification of the granulation process of mineral fertilizers in a fluidized bed apparatus]. *Naukoiemni tekhnologii*, 3(19), 280-284.
49. Korniyenko B.Y. (2013). Zadachi optyimizatsii znevodnennia ta hranuliuvannia mineralnykh dobryv u psevdozridzhenomu shari [Problems of optimization of dehydration and granulation of mineral fertilizers in a fluidized bed]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut», Seria «Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozberezhennia», 1(12)*, 28-31.
50. Korniyenko Y.M., Liubeka A.M., Sachok R.V., Korniyenko B.Y. (2019). Modeling of heat exchangement in fluidized bed with mechanical liquid distribution. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 14(12), 2203-2210.
51. Korniyenko B., Galata L., Ladieva L. (2018). Security Estimation of the Simulation Polygon for the Protection of Critical Information Resources. *CEUR Workshop Proceedings, Selected Papers of the XVIII International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Security" (ITS 2018)*, 2318, 176-187.
52. Korniyenko B.Y. (2012). Doslidzhennia modeli vzaiemodii vidkrytykh system z pohliadu informatsiinoi bezpeky [Study of the interaction model of open systems from the point of view of information security]. *Naukoiemni tekhnologii*, 3(15), 83-89.
53. Korniyenko B., Yudin O., Novizkij E. (2013). Open systems interconnection model investigation from the viewpoint of information security. *The Advanced Science Journal*, 8, 53-56.
54. Zhulynskiy A.A., Ladieva L.R., Korniyenko B.Y. (2019). Parametric identification of the process of contact membrane distillation. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences Volume 14*, 17, 3108-3112.
55. Bieliatynskiy, A., Osipa, L., Kornienko, B. (2018). Water-saving processes control of an airport. *Paper presented at the MATEC Web of Conferences*, 239.

UDC 004.8

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.1.8>

Олег ОСАДЧИЙ

здобувач ступеня доктора філософії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, проспект Перемоги 37, 02000 (oleosadchiy@gmail.com)

ORCID: 0009-0006-4575-254X

Oleh OSADCHYI

Postgraduate Student, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv city, Peremohy avenue 37, 02000 (oleosadchiy@gmail.com)

Бібліографічний опис статті: Осадчий О. (2023). Використання штучного інтелекту в діагностиці психологічного стану. *Інформаційні технології та суспільство*, 1 (7), 59–65. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.1.8>

Bibliographic description of the article: Osadchyi O. (2023). Vykorystannia shtuchnoho intelektu v diahnozytsi psykhologichnoho stanu [Using artificial intelligence in mental health diagnosis]. *Informatsiini tekhnolohii ta suspilstvo – Information technology and society*, 1 (7), 59–65. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.1.8>

ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ДІАГНОСТИЦІ ПСИХОЛОГІЧНОГО СТАНУ

Метою цього дослідження є огляд існуючих способів діагностики розладів психічного здоров'я (зокрема, депресії та посттравматичного стресового розладу). Пропонується зануритися в різні літературні джерела на цю тему, включаючи дослідження, які вже проводилися в цій галузі. Для розуміння актуальності питання дане дослідження також включатиме серію інтерв'ю та опитувань з психотерапевтами, психіатрами, та психологами з різним досвідом, щоб отримати уявлення про їхні погляди на потенційне застосування штучного інтелекту в діагностиці психічного здоров'я а також дізнатися про процес діагностики і лікування пацієнтів. Сучасні умови створюють нові тенденції в розвитку аналізу психологічного стану людей, варто розуміти ефективність існуючих методів, враження практикуючих спеціалістів наскільки теперішні умови змінюють підходи до аналізу психологічного стану людини і пошук ідей як штучний інтелект може спростити їх роботу і покращити результати. Результати цього дослідження нададуть огляд теми, та підтвердять чи спростують можливості використання технологій штучного інтелекту для спрощення процесу діагностики, також створено набір критеріїв, які можна використовувати для оцінки ефективності різних методів штучного інтелекту в діагностиці психічного здоров'я. Це може включати різні кількісні показники, пов'язані з точністю, ефективністю та етичними міркуваннями. Додатковим результатом могло б стати краще розуміння потенційних переваг і недоліків використання штучного інтелекту в цьому контексті, що могло б стати основою для майбутніх досліджень і розробок у цій галузі. Зрештою, це дослідження має на меті зробити внесок у поточну дискусію про те, як технології штучного інтелекту можна використовувати для покращення і спрощення діагностики психічного стану здоров'я та процесу лікування.

Ключові слова: депресія, психометрія, машинне навчання, шаблони програмної інженерії, штучний інтелект, психотерапія, посттравматичний стресовий розлад.

USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN MENTAL HEALTH DIAGNOSIS

The purpose of this study is to review existing ways of diagnosing mental health disorders (specifically depression and post-traumatic stress disorder). We will dive deeper into the literature about the topic, including studies already conducted in this area and their results. To understand how up-to-date this question is, the research will also involve a series of interviews and surveys with psychotherapists, psychologists, and other mental health professionals with various years of experience to gain insights about their views on the potential applications of artificial intelligence in mental health diagnostics and learn more about the existing process of diagnosing different mental health issues. Modern conditions create new trends in the development of the analysis of the psychological state of people, and it is worth understanding the effectiveness of existing methods, the impressions of practicing specialists to what extent current conditions change approaches to the analysis of the psychological state of a person and the search for ideas on how artificial intelligence can simplify their work and improve results. The findings of this study will provide an overview of the topic and give the proof or disproof of the concept of using the artificial intelligence methods for the diagnostic process and speeding up the treatment process. Besides, the study could provide a set of criteria that can be used to evaluate the effectiveness of different methods of artificial intelligence for these purposes. This could include metrics related to the accuracy, efficiency, and ethical considerations. An additional outcome could be a better understanding of the potential benefits and drawbacks of using artificial intelligence in this context, which could inform future researchers and developers in this field. Ultimately, this study aims to contribute to the ongoing conversation about how technology can be used to improve mental health care and outcomes.

Key words: Depression, Psychometrics, Machine Learning, Software Engineering Patterns, Artificial Intelligence, Psychotherapy, Post-traumatic stress disorder.

Introduction. The natural variability of the mental state and susceptibility to various destabilizing influences limits the effectiveness of traditional methods of analyzing a person's mental state.

According to WHO's World mental health report [1], which was published in June 2022, only for the last year, based on their report, depression and anxiety as the most common disorders rose 25%, bringing the total number of people living with a mental disorder to nearly 1 billion people.

For example, in 2017, depression was diagnosed for 3.4% (Table 1) of the global population [3].

Table 1

Stats on mental disorders share in global population in 2017

Disorder	Share of global population with disorder (difference across countries)	Number of people with disorder	Share of males:females with disorder
Any mental health disorder	10.7%	792 million	9.3% males 11.9% females
Depression	3.4% (2-6%)	264 million	2.7% males 4.1% females
Anxiety disorder	3.8% (2.5-7%)	284 million	2.8% males 4.7% females
Bipolar Disorder	0.6% (0.3-1.2%)	46 million	0.55% males 0.65% females
Eating disorders (clinical anorexia & bulimia)	0.2% (0.1-1%)	16 million	0.13% males 0.29% females
Schizophrenia	0.3%(0.2-0.4%)	20 million	0.26% males 0.25% females
Any mental or substance use disorder	13% (11-18%)	970 million	12.6% males 13.3% females
Alcohol use disorder	1.4%(0.5-5%)	107 million	2% males 0.8% females
Drug use disorder (excluding alcohol)	0.9% (0.4-3.5%)	71 million	1.3% males 0.6% females

Moreover, as WHO mentioned, those numbers are growing faster from year to year, and in 2023, for example, in Ukraine, it is up to 6.3% (Fig. 1). [2]

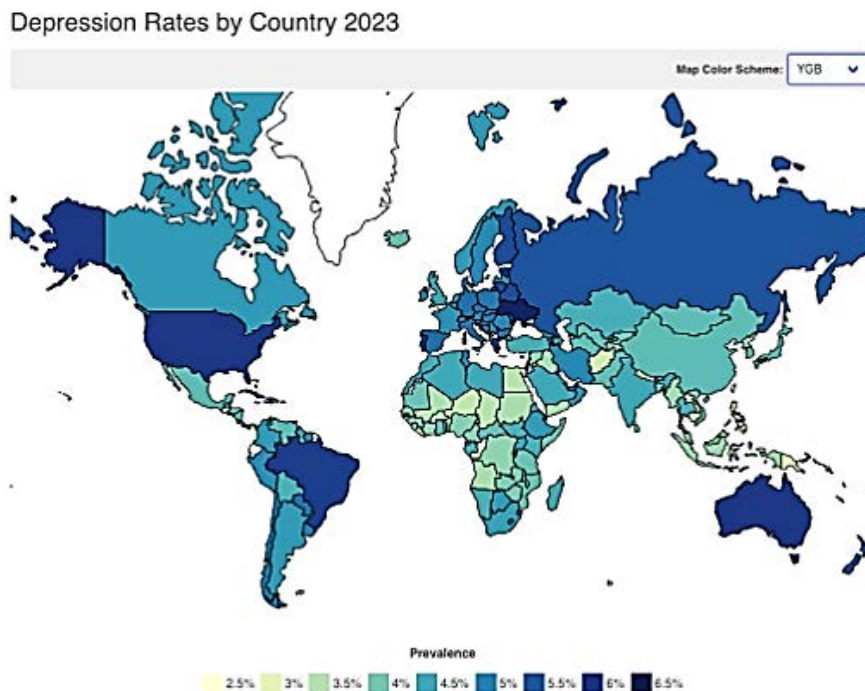


Fig. 1. Diagram of Depression Rates by Country in 2023

Another common mental health issue that has been shared around the globe for the last couple of years is PTSD. Armed conflicts worldwide grew in 2021 (Alert2021! Report, 2021 [4]). In 2022 the full-scale war started in Ukraine, and all these armed conflicts have caused many people that suffer from PTSD. It should be mentioned that PTSD usually is a delayed disorder. Psychotherapists explain that the symptoms could be shown six months after trauma. But in 2021, NeuRA Foundation shared an article [5] that shows that around 3.9% of the global population could have PTSD by the end of the year. And now, in 2023, because of the full-scale war in Ukraine and other military conflicts around the globe, different research agencies expect to grow to 5.6%.

In addition, access to mental health care varies greatly depending on the country. Some countries have more resources and funding allocated to mental health care than others. For example, in countries with lower income, based on the WHO's report from June 2022 [1], there may be long wait times to see a mental health professional or limited options for treatment. Mental health care may be more readily available and affordable in more developed countries. These disparities can significantly impact individuals' ability to receive the care they need.

At the same time, the number of people seeking medical treatment is growing, and some of them, as explained earlier, can't afford it. Therefore, the study of new methods that could speed up the diagnostic process, find new ways to make early diagnostic is relevant.

Literature review and problem statement. Many articles explaining the process cover the mental health diagnostic process. Mental health diagnosis is a complex process with many different variables the therapist should rely on. Besides, it has numerous ways to work with patients.

The mental health diagnostic process involves a comprehensive evaluation of a patient's mental state, including their symptoms, medical history, and personal background [6]. Mental health professionals typically interview patients to gather information about their experiences and any symptoms they may be experiencing. They may also use standardized questionnaires or assessments to help diagnose specific mental health disorders.

Additionally, imaging studies, such as MRI or CT scans, may be used to rule out other conditions that could be causing the patient's symptoms.

These interviews and medical data are good starting points to make an early diagnosis of mental health diseases. However, it's mostly processing with manual human work, while this data could be good starting points for different artificial intelligence models that could speed up the process.

At the same time, we need a valid proof of concept that AI could be helpful at some tasks with mental health diagnostics.

The aim and objectives of the study. The aim of this study is to find the most common problems psychotherapists, psychiatrists, and psychologists struggle within mental health diagnostic processes, and find how AI could be helpful for them. To accomplish the aim, the following tasks have been set:

- Determine the main tasks professionals do within the diagnostic of mental health diseases;
- To form a structure of diagnostic process for two of the most important and common mental health diseases in Ukraine (PTSD and depression);
- Look for different studies and methods already developed for mental diseases diagnostic;
- Find a proof of concept that AI can be helpful in psychotherapy and mental health diagnostic process.

The study materials and methods. While searching for different materials about the usage of AI within psychotherapy - could easily be found the first insight about it. The chatterbot, Eliza [8], is a 1960s natural language processing program created to simulate conversations and give users an illusion of understanding. It is a very important and successful experiment, followed by several other bots. However, such software aimed to mimetic a psychologist interacting with a patient and was never supposed to perform recommendations about a patient's problems. It was during the 1980s that many reports were published describing the support of computers for clinical use [9; 10; 11]

These papers proved that logic-based AI could be used as an approach to computerized therapy, particularly to brief cognitive and behavioral therapies. By then, automatic theorem proving and deduction systems were not mature enough to support such applications, which may explain the lack of publishing concerning this theme over the following years.

In 2019, de Mello, F. L., & de Souza, S. A. published a study that explains when a psychotherapist tries to map and understand the phenomenon that generates a conflict in a patient with depression or other mental health issues [12], there is an attempt to project the theoretical concepts of psychotherapy on the specific situation presented by the individual.

The projection of these concepts into the real world is the reification operation of Knowledge Geometry, a process of inference whose resources are analogies and isomorphism. By identifying the *modus operandi* and the functional pattern of the family (or conjugal system), it becomes possible to intervene and propose new alternatives to the system. This calls attention to the option to deconstruct the addictive mechanisms of feedback and maintenance that prevent the system from admitting new experiences and learnings, thus hampering its development or the resolution of the conflict in question.

In AI, this situation is known as Case-Based Reasoning (Figure 2) and is usually modeled by first-order logic. What this means is when the psychotherapist tries to identify and understand how the patient’s individual symptom is connected to the broader interactional system, that is, how the particular situation is related to the general scenario, it represents the intuition operation of Knowledge Geometry.

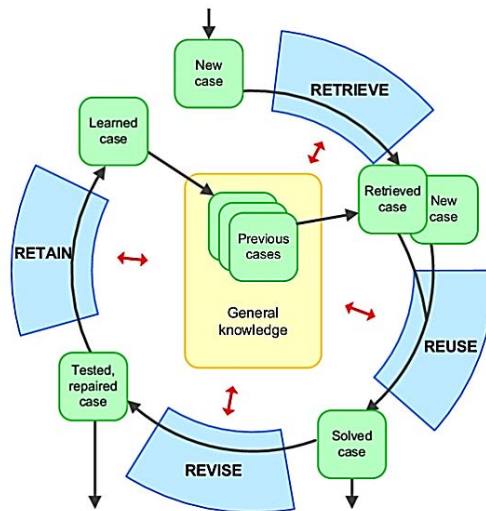


Fig. 2. Case-Based Reasoning

From this point of view, de Mello and de Souza said the patient manifests symptomatology projected onto the family or conjugal system. In other words, the particular phenomenon is used to support understanding a broader pattern.

Baihan Lin, Guillermo Cecchi, and Djallel Bouneffouf [13] published that each therapy session has its own pipeline of how in communication between the therapist and the patient therapists (Figure 3) can diagnose the different mental health issues in earlier steps.

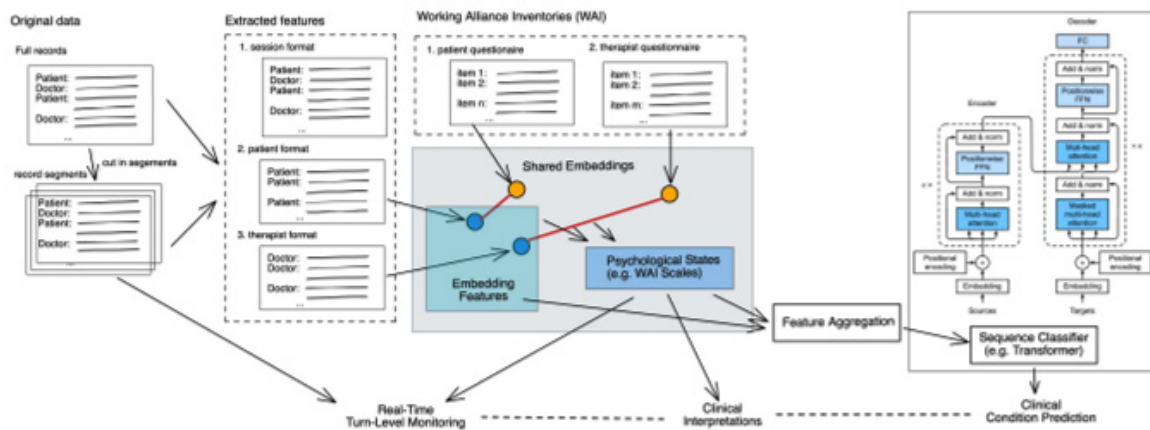


Fig. 3. Communication pipeline between therapist and a patient

Based on this pipeline, they proposed a Working Alliance Transformer (WAT), a classification model that utilized an inference module that informed the downstream classifier where the current state is with respect to the therapeutic trajectory or landscape in the psychotherapy treatment of the patient. The algorithm they proposed outlined the classification process. After the classification is done, they also added an analytical feature that allows an algorithm to do not only classification but other downstream tasks such as predictive modeling and real-time analytics.

Then, following the model architecture introduced above in the Figure, they evaluated three classifier backbones. Classical transformer model: for the multi-head attention module, they set the number of heads to be 4 and the dimension of the hidden layer to be 64. The dropout rates for the positional encoding layer and the transformer

blocks are both set to 0.5. The second sequence classifier is a single-layer Long Short-Term Memory (LSTM) network with 64 neurons. And the last one is a single-layer Recurrent Neural Network (RNN) with 64 neurons.

As a result, they ran 50,000 iterations of training. They improved the classification accuracy of mental health diseases from 26% to 32%. To make it possible, they used a dataset with highly imbalance clinical conditions (495 anxiety sessions, 373 depression sessions, 71 schizophrenia sessions, and 12 suicidal sessions). They mentioned that if they directly train models on this dataset, the classifier will likely be highly biased towards the majority class. To correct this imbalance issue, the sampling technique was used. Instead of going through the entire training data in epochs, they trained the models in sampling iterations. In each iteration, a class was randomly chosen, and then a random sample of one session from the class pool. Before they sampled the sessions, they splitted the dataset into 20/80 as a test set and a training set. It showed a great result during the training process.

In contrast to previous authors, there are some concerns about what we can reach with AI in psychotherapy. Anna Melnik, Konstantyn Marchenko, and their colleagues [14] argue that it could be decomposed easily. They tell us that there are different risks in this process.

For example, they assume that the absolute reliability of computer systems and the results of information processes that run in them can not be guaranteed. So, the main problems with introducing artificial intelligence in computer systems are the inability to predict all real situations and program the machine's behavior adequately to them, lack of reliability, and software errors. The research task is to identify critical areas where such mistakes and failures are unacceptable.

The input on which artificial intelligence is taught may be incorrect. Melnik and Marchenko are questioning their developers' way of thinking and values, as they are not always familiar with psychology, sociology, and other humanities. These shortcomings during the use of artificial intelligence systems have led to many incidents, including fatal ones.

However, a weakness of this argument is that it assumes that AI will do the whole work instead of the psychotherapists. The AI could use data and suggestions from the therapists. They could review the data before the learning process, and it could speed up the process to highlight the most valuable findings in the diagnostic to help therapists find the correct treatment for the patients. In the future, it could also cover some parts of their job. 37% of interviewed therapists described the possibility of transferring part of the diagnostic job to the AI assistant.

In support of this point, Chao, Y., Wu, C., Lai, Y., Hsu, H., Cheng, Y., Wu, H., Huang, S., & Chen, W. (2022) [15] displays that they worked in collaboration with a therapist to run different tests on the effectiveness of existing methods. They have shown that only 35.71% correctly indicated the diagnoses represented by the test equations.

If you can test the effectiveness of existing methods with collaboration with therapists and real data from their clients, we can also use it to create a more effective expert system for therapists on what diagnosis a person could have.

To learn more about depression and PTSD diagnosis, it seems necessary to learn it from professionals themselves.

For this study, numerous anonymous interviews and surveys were conducted with psychotherapists, psychologists, and psychiatrists from Ukraine to gather more information about the process behind the diagnosis. In interviews participated professionals with various years of experience (up to 16 years of practice). There mostly were open questions to gather more explanations of psychological terms and to use them as criteria in future research.

Based on their answers, we found that to assume that a person has depression, a therapist should learn more about the person's: current mood state, how well and for how long the person sleeps, the amount of day-to-day stress, and the problems with focusing on the task. Most of these questions use quantitative numbers to understand the level of depression the person might have. A similar process applied to PTSD.

Besides in these interviews, we gathered their experience on what changes in a person's behavior and emotional state are the first symptoms of depression or PTSD. Mostly they highlighted and focused on: feeling hopeless and helpless, anxious or worried, suicidal thoughts and thoughts of harming themselves as psychological symptoms, and loss of libido, lack of energy, and unexpected aches and pains as physical symptoms of depression. Or nightmares, flashbacks, and physical sensations for PTSD.

Also, they explained how often these symptoms usually repeat. For this question, responses were splited in almost halves that a person should start therapy when symptoms are repeating every day or a couple of days in a week. The other half explained that even if such symptoms repeat themselves at least once in a month, it is better to start reaching for psychological support and help from professionals.

In addition to that, it was helpful to learn when usually first symptoms could be shown. For PTSD, most professionalssaythatthefirstsymptoms could be visible in a period between 4 weeks to 6 months after the traumatic event happened. For depression, it has a progression and could be visible after a month of traumatic event happened. That information uncovers the primary flags that mental health professionals look for when diagnosing these

conditions and gain insight into the time and effort it takes to understand a person's mental profile and create a personalized healing plan.

As a final touch, after the interviews, we gathered information about how they analyze the level of depression or PTSD. Usually, therapists run different screening tests, but based on their experience, since the number of traumatic events has grown due to the war in Ukraine, these tests started to show less efficiency and personal sessions work more effectively for complexity analysis. In addition, each of these tasks, even running tests, is time-consuming. Analyzing them is even more time-consuming. Based on the survey, 43% of the therapists admit that today they should always rewatch the whole case independently to ensure they are making the correct diagnosis.

The main problems in these tests right now that professionals are struggling with a phenomenon that the amount of symptoms is growing, and those tests do not cover all of them. Some of these symptoms could be the same for different mental diseases. Analyzing data from screening tests is time-consuming and could be not efficient. Screening tests are less personal than a conversation, so people might cheat in them because they are afraid of being "not normal." Besides, to make them effective, they should be regular, on a daily or weekly basis, to track progression.

To cover all questions that tests cannot cover, they often ask for individual medical data such as hormone level, sleep records, and other biomedical data. Analysis of these data is even more time-consuming than analysis of tests. They also mentioned that sometimes people's interactions with strangers in social media could be a small hint into their progress in healing from mental disease, so some of them also check patients' social media.

Once a diagnosis has been made, the mental health professional will work with the patient to develop a treatment plan that may include therapy, medication, or a combination of those. All of these depend on the level of depression or PTSD.

Based on it, we can assume that people need to start reaching for mental support and help from professionals as early as possible, and therapists recommend making it in person instead of online screening. However, at the same time, based on the Institute of Psychology, in their Public Attitudes Toward Guided Internet-Based Therapies: Web-Based Survey Study in 2018 [7], we know that nowadays, almost 60% of people first will try to find answers to their problems around the web or social media, instead asking help from psychotherapists directly.

As people are afraid of seeking help directly, and the diagnostic process starts to become even harder from day to day, we can think of ways how using AI could speed up the diagnostic process and maybe improve existing methods and their efficiency, and make the lives of people easier. For example, with AI, we can focus on speeding up the analysis process of test data, improving tests, and making it regular to make a picture clearer for therapists and let them focus on patients instead of creating a report based on all data. Also, it seems possible to analyze biomedical data and notify people about possible mental diseases they could have to motivate them to reach for help or at least consult with professionals.

It is also interesting how therapists analyze their patients' social media for some hints on the healing progress. Analyzing social media with AI is not new, but it could be helpful to focus it on tracking possible mental diseases.

Results of the research. In the previous section, a list of possible options to improve the diagnostic process was reviewed. Mainly it's speeding up the classification job, improving the accuracy of existing tests, and focusing on highlighting the possibility of symptoms of the patient.

For example, as was mentioned in the first section of this study, therapists outlined that for diagnosis of PTSD, there could be a delay between the first symptoms showing up and the situation that causes it, around 6 months.

The Nov 2020 Ann-Maria Bucur study from the University of Bucharest showed that they could find the first symptoms before a person asked for help from a therapist based on what they post on social media [16]. From the interviews arranged with therapists, it shows that almost half of the therapists review the social media of their patients as a part of the "first interaction" with the patient. It helps them to understand the patients better. But, based on this study, while using the app with such an algorithm, if a therapist has a link to a social-media profile, the algorithm can gather the information from the person's social posts and create a profile with possible symptoms a person might have to ask the therapist to pay attention to them.

In close work with therapists and with training a model similar to what Baihan Lin, Djallel Bouneffouf, and Guillermo Cecch did in their research with analysis of sessions between therapists and patients, we could also analyze tests and even go further and make a chatbot, for businesses for example to track the regularly mental state of their employees, or for therapists to ask about mental health on a regular basis their patients, we can gather more up to date information about each patient and algorithm could classify those patients who might need a different or adjusted treatment program based on their answers. As mentioned earlier, regular state tracking is the key to better understanding a patient's needs and making treatment more efficient.

Also, the same algorithm could be adjusted or reworked to work with biomedical data (heart rates, sleep tracking, hormones level) to gather even more information on patients' states. And improve results they reached even more.

Discuss the results. After the research, a second round of interviews was conducted with professionals to ask them about their thoughts on how their work could be simplified or even improved with AI. Only 13% of them at the beginning said that AI could help them, on a barely minimal level, speed up the process of gathering data. After we reviewed those findings together, more than 30% of therapists agreed that AI could actually speed up their work on analysis data if it could create an effective report for each patient they have. It is still around 70% of skeptical people, but that is because they have yet to work in pairs with any tools that could do this job.

Conclusion. These abstracts show that psychology can find support for specific tasks in computation. From this perspective, AI can play a role as an add-on resource for therapeutic work in addition to those that already exist.

The different tools could speed up the process of gathering information about the patients, and it could be a separate application or an option to gather this data through chat-bots and social media.

But when the data is gathered, the correct AI model could classify the data, find patterns and create a list of possible diseases for each patient with a full picture of possible or existing symptoms that could also speed up finding the correct treatment for each patient.

Besides, with enough data set, it seems possible to create a recommendation system for those people who do not want to reach for direct help from therapists at the beginning and suggest different options before they are ready to make their life easier. The same recommendation system could also help therapists to focus on real tasks while working closely on solving mental health issues each person could feel. In this case, we can focus on these tasks to solve:

- Search for new data sources that can be used to analyze a person's mental state. Combine them with existing ones.
- Development of an algorithm based on the means of artificial intelligence, which can predict the mental state of a person or groups of people and create a list of recommendations for a person and psychotherapists
- Also, start working on correct models to analyze different biomedical data to help therapists fill gaps in knowledge about the patient's state and adjust the treatment process.

Those studies also prove that the future of diagnosis could relate to the new technologies to make diagnostics affordable and faster with the help of Artificial Intelligence

References:

1. June 2022, World Health Organisation, World mental health report: Transforming mental health for all, ISBN: 9789240049338 Available at: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240049338>
2. World Health Organisation, Depression and Other Common Mental Disorders - Global Health Estimates Available at: <https://www.who.int/publications/i/item/depression-global-health-estimates>
3. Institute for Health Metrics and Evaluation, University of Washington, Available at: <https://vizhub.healthdata.org/gbd-results?params=gbd-api-2019-permalink/04bcfdf396df48249c628c8bb536cd85>
4. 2021, Alert 2021! Report on conflicts, human rights and peacebuilding, Available at: <https://reliefweb.int/attachments/cd4aec95-0b64-38dd-a050-9e06767de8c0/alerta21i.pdf>
5. October 2021, NeuRA (Neuroscience Research Australia) Foundation, POST-TRAUMATIC STRESS DISORDER Factsheet Available At: https://library.neura.edu.au/wp-content/uploads/sites/3/2021/10/Factsheet_spatial-variation.pdf
6. Maung HH. Diagnosis and causal explanation in psychiatry. *Stud Hist Philos Biol Biomed Sci.* 2016 Dec;60:15-24. doi: <https://doi.org/10.1016%2Fj.shpsc.2016.09.003>
7. Apolinário-Hagen J, Harrer M, Kählke F, Fritsche L, Salewski C, Ebert DD. Public Attitudes Toward Guided Internet-Based Therapies: doi: <https://doi.org/10.2196/10735>
8. Joseph Weizenbaum.(1966) ELIZA—a computer program for the study of natural language communication between man and machine. *Commun. ACM* 9, 36–45. <https://doi.org/10.1145/365153.365168>
9. Hartman, D. E. (1986). On the use of clinical psychology software: Practical, legal, and ethical concerns. *Professional Psychology: Research and Practice*, 17(5), 462–465. <https://doi.org/10.1037/0735-7028.17.5.462>
10. Sampson, J. P. (1986). Computer Technology and Counseling Psychology: Regression Toward the Machine? *The Counseling Psychologist*, 14(4), 567–583. <https://doi.org/10.1177/0011000086144006>
11. Marks, I., Shaw, S., & Parkin, R. (1998). Computer-aided treatments of mental health problems. *Clinical Psychology: Science and Practice*, 5(2), 151–170. <https://doi.org/10.1111/j.1468-2850.1998.tb00141.x>
12. de Mello, F. L., & de Souza, S. A. (2019). Psychotherapy and artificial intelligence: A proposal for alignment. *Frontiers in Psychology*, 10, Article 263. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.00263>
13. Baihan Lin, Djallel Bouneffouf, and Guillermo Cecchi. (2022) Predicting human decision making in psychological tasks with recurrent neural networks. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0267907>.
14. Konstantyn Marchenko, Anna Melnick, Anzhelyka Marchenko (2022) Risks of Implementing Artificial Intelligence in Computer Systems doi: [http://dx.doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.119-124](http://dx.doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.119-124)
15. Chao, Y., Wu, C., Lai, Y., Hsu, H., Cheng, Y., Wu, H., Huang, S., & Chen, W. (2022). Why Mental Illness Diagnoses Are Wrong: A Pilot Study on the Perspectives of the Public. *Frontiers in Psychiatry*. doi: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.860487>
16. Ana-Maria Bucur, Liviu P. Dinu, Detecting Early Onset of Depression from Social Media Text using Learned Confidence Scores (2020). doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2011.01695>

UDC 65.012

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.1.9>

Yelyzaveta RACHENKO

PhD Student of Computer Science, O.M. Beketov National University of Urban Economy, Kharkiv, st. Marshal Bazhanov 17, Ukraine, 61002 (rachenko.yelyzaveta@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-8376-7308

Nataliia DOTSENKO

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of Project Management in Municipal Economy and Construction, O.M. Beketov National University of Urban Economy, Kharkiv, st. Marshal Bazhanov 17, Ukraine, 61002 (nvdotsenko@gmail.com)

ORCID: 0000-0003-3570-5900

Єлизавета РАЧЕНКО

аспірантка комп'ютерних наук, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків, вул. Маршала Бажанова 17, Україна, 61002 (rachenko.yelyzaveta@gmail.com)

Наталія ДОЦЕНКО

доктор технічних наук, доцент, професор кафедри управління проектами в міському господарстві і будівництві, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, м. Харків, вул. Маршала Бажанова 17, Україна, 61002 (nvdotsenko@gmail.com)

Бібліографічний опис статті: Раченко, Є., Доценко, Н. (2023). Застосування штучного інтелекту при формуванні проектної команди в галузі аерокосмічних комунікацій. *Інформаційні технології та суспільство*. Вип. 1 (7), 66–72. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.1.9>

Bibliographic description of the article: Rachenko, Y., Dotsenko, N. (2023). Zastosuvannya shtuchnoho intelektu pry formuvanni proektnoi komandy v haluzi aerokosmichnykh komunikatsii [Application of artificial intelligence in the formation of a project team in the field of aerospace communications]. *Informatsiini tekhnologii ta suspilstvo – Information technology and society*, 1 (7), 66–72. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.1.9>

**APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE FORMATION OF A PROJECT TEAM
IN THE FIELD OF AEROSPACE COMMUNICATIONS**

The purpose of the study is to develop methodical support for team formation in aerospace projects. The use of modern information technologies will allow to automate the stages of selecting applicants for the team, to exclude the influence of the subjective factor. The article proposes a team formation method in aerospace communications projects. The process of selecting applicants, which takes into account the specifics of the industry, is considered, and the main stages of the method are defined. The developed method involves the use of artificial intelligence. Artificial intelligence tools are applied in the first step, machine learning is applied in the second step, while voice recognition algorithms and analysis are applied in the fourth and final step of the proposed method. The first step in this method involves an automated search for potential team members. In this part, the web application presented in this article searches several social networking websites such as LinkedIn and other websites where applicants can submit their resumes and communicate with other professionals and potential employees to find the best for determined by the criteria of candidates on the Internet. It also determines whether a candidate would hypothetically be interested in applying for a particular job. The second step consists of an automated test that will be distributed to all possible candidates through the app, the app will validate the tests and select candidates based on the automatic evaluation of the tests. In the third phase of the voice recognition interview, candidates will undergo a question and answer interview with the help of artificial intelligence. At the last, fourth stage of the method, which is called a live conversation, candidates are interviewed by company representatives. The peculiarities of the application of the proposed method were considered, and the prospects and limitations of its use were determined. The proposed methodical and instrumental support is of practical importance for the automation of applicant selection processes when forming a project team.

Key words: artificial intelligence, team formation, project team, aerospace communications, algorithm.

**ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ПРИ ФОРМУВАННІ ПРОЕКТНОЇ КОМАНДИ
В ГАЛУЗІ АЕРОКОСМІЧНИХ КОМУНІКАЦІЙ**

Метою дослідження є розробка методичного забезпечення формування команди в проєктах аерокосмічної галузі. Застосування сучасних інформаційних технологій дозволить автоматизувати етапи відбору претендентів у команду, виключити вплив суб'єктивного чиннику. В статті пропонується метод формування команди в проєктах аерокосмічних комунікацій. Розглянуто процес відбору претендентів, який враховує специфіку галузі, визначені

но основні етапи методу. Розроблений метод передбачає використання штучного інтелекту. На першому етапі застосовуються інструментарій штучного інтелекту, машинне навчання застосовується на другому етапі, тоді як алгоритми розпізнавання голосу та аналіз застосовуються на четвертому та останньому кроці запропонованого методу. Перший крок у цьому методі передбачає автоматизований пошук потенційних членів команди. У цій частині веб-додаток, представлений у цій статті, здійснює пошук у кількох веб-сайтах соціальних мереж, таких як LinkedIn та інших веб-сайтах, де заявники можуть надіслати свої резюме та спілкуватися з іншими професіоналами та потенційними працівниками, щоб знайти найкращих за визначеними критеріями кандидатів в Інтернеті. Він також визначає, чи буде кандидат гіпотетично зацікавлений в тому, щоб претендувати на певну роботу. Другий крок складається з автоматизованого тесту, який розповсюджуватиметься всім можливим кандидатам через додаток, додаток перевірятиме тести та проводить відбір кандидатів на підставі автоматичного оцінювання тестів. На третьому етапі співбесіди з розпізнаванням голосу кандидати проходять співбесіду із запитаннями та відповідями за допомогою штучного інтелекту. На останньому четвертому етапі методу, який називається живою розмовою, кандидати проходять співбесіду з представниками компанії. Розглянуто особливості застосування запропонованого методу та визначено перспективи та обмеження його використання. Запропоноване методичне та інструментальне забезпечення має практичне значення для автоматизації процесів відбору претендентів при формуванні команди проектів.

Ключові слова: штучний інтелект, формування команди, проектна команда, аерокосмічні комунікації, алгоритм.

Introduction. Problem statement. The aerospace communications industry is known to have one the toughest requirements when it comes to forming a project team. The candidates, potential future teammates, have to undergo a thorough selection process which determines if they have the qualifications necessary to be a valuable part of the aerospace communications team. However, the method proposed in this article will not only determine the most qualified candidates to join such a team but also evaluate how well the candidates are expected to perform in a particular team based on the named team's dynamic.

As of now, team formation in the aerospace communications industry is a long and difficult process, conducted primarily with the use of the hiring or the "main" company's resources. The novel method proposed in this paper will, however, analyze that the current methods used in team formation can be greatly improved and propose a new method using artificial intelligence and machine learning. The proposed method is expected to greatly decrease the use of human resources and time consumption.

Analysis of the latest research. The current method used in the industry is a combined model to explore individual attributes, relational attributes, and previous structural ties as determinants of work partner choice [1]. In the current method of selecting team members, based on the data collected in [1], the selection process is based on a combination of individual and relationship traits. On the one hand, being in the same group, which is considered a structural trait, did not influence future work group member decisions much. Working with a person, which is referred to as a relational attribute, in the same group, considered a structural attribute, on the other hand, was a substantial predictor of future work group member preferences. In that sector, structural qualities appear to be essential to the extent that individuals are forced together and given the opportunity to establish stronger relationships. However, the current method as described in [2] does not include a fully automated team formation method which is proposed in this paper.

It is important to touch base on the different requirements for team formation specifically for aerospace communications. Artificial intelligence can be of great use in the process to save time and resources.

An example of formula design and explanation of its components:

$$x_{opt} = \mathbf{z}^t \mathbf{A} \mathbf{z} + \varepsilon, \quad (1)$$

where x_{opt} – clarification 1 (variable, denoted by a Latin letter, – italics; the abbreviation of the English word is used as an index – regular font);

\mathbf{z} – clarification 2 (vector – bold; the superscript t denotes the transposition operation, that is, the abbreviation written in Latin letters);

\mathbf{A} – clarification 3 (matrix – bold);

ε – clarification 4 (variable denoted by a lowercase Greek letter – italic).

Building a successful team entails more than just identifying expertise; it entails assembling a group of individuals who play various but complementary roles. Team members offer diverse experience, information, and social connections to the team, which benefits the team; nonetheless, persons must have a certain amount of overlapping knowledge and viewpoints to operate well together. If you bring together a group of specialists from various disciplines, but their perspectives are so far apart that they can't even discuss the topic due to different language or point of view, it will be difficult for them to establish common ground. On the other hand, bringing together a group of specialists who all agree with each other and have the same abilities and expertise might damage diversity of opinion and the capacity to confront unknown difficulties.

This research analyzes the origins and performance consequences of shared versus diversified information

using a unique data set of observed email content from 1382 executive recruitment teams and extensive accounting data on their productivity. A striking inverted-U shaped association is discovered between mutual information and team productivity. A large level of information overlap among team members is connected with improved performance, but extremes of too little or too much mutual information are detrimental to performance. The data shows that geographic dispersion and social network distance are important predictors of mutual knowledge failures in the data, although demographic dissimilarity and organizational distance do not.

We constrain ω such that in order to reflect the tradeoff between variety and mutual knowledge and to limit the values of the parameter that adjusts for their relative relevance across work settings,

$$0 < \omega < \frac{\pi\angle}{2}, \tag{2}$$

$$\text{Performance} = \kappa * \text{Cos}(\omega\angle) * \text{Sin}(\omega\angle) \tag{3}$$

The cosine term captures the advantage of mutual knowledge and scales it by a parameter ω that reflects how relevant mutual knowledge or information diversity is to team performance in a specific work context. The diversification advantage is reflected by the sine term and scaled by the same parameter. As grows, so does the importance of knowledge diversity in determining team effectiveness. Conversely, as declines, the importance of mutual knowledge for team success grows [3]. Based on the formulas above, the graph below, and the data provided in [1], the hypothesis is that when teams have too little information overlap, communication and cooperation are difficult, but when teams have too much mutual information, team members' contributions become redundant, diminishing problem solving efficiency and productivity.

The parameter κ simply measures the size of the influence of either information diversity or mutual knowledge on team performance to account for the likelihood that information distribution among team members is more relevant in certain settings than in others.

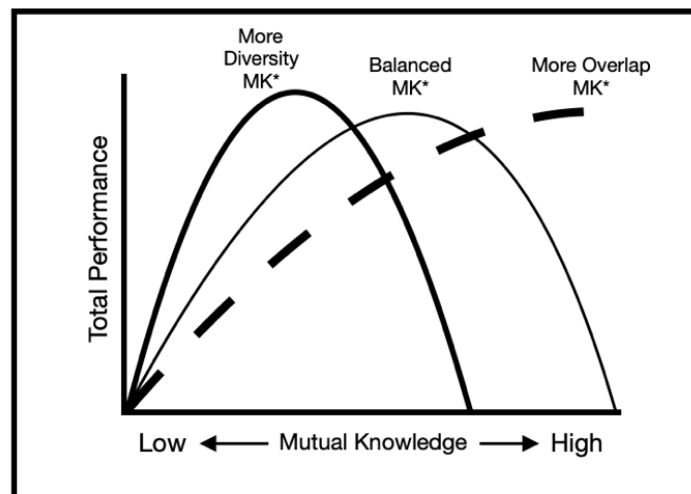


Fig. 1. An inverted U-shaped connection demonstrates the value of mutual knowledge in team effectiveness

Figure 1 graph depicts the composite advantages of (information overlap) * (information diversity), which are characterized as $\text{Cos}[\angle] * \text{Sin}[\angle]$ for the angle between knowledge profiles. This type of connection suggests optimal information overlap in teams (MK^*), in which best performing teams have neither too little nor too much mutual information among team members [4]. The appropriate degree of knowledge overlap in teams may vary depending on the work setting. The ideal information overlap (MK^*) shifts to the left as the relevance of information variety for team performance grows (rising), showing that higher diversity is better. The optimal information overlap (MK^*) moves to the right as the importance of mutual information for team performance increases (decreases), implying that greater mutual knowledge is beneficial. These many settings illustrate the link between mutual knowledge and team performance in typical team situations such as innovation teams, regular operations and production teams, and so on [5]. From this figure it can be seen that information diversity may be more significant for teams whose success is linked to creativity and invention, whereas mutual knowledge may be more important for teams whose performance is linked to effective exploitation of known organizational processes or tasks.

Search expansion. Expanding the potential aerospace communications team members to the international

market can be challenging when done manually but becomes possible while utilizing the artificial intelligence method described in this paper. Based on the evidence provided in [6], such international market search expansion can be very useful and even contribute to better team bonding in the future projects of an aerospace company. An experiment in team capstone design education conducted in [6] that began with the addition of engineering freshmen to standard senior design groups has grown to include freshmen, sophomores, juniors, and seniors in a big, interdisciplinary design team. The project has been expanded to incorporate an international design experience, with American design students collaborating with counterparts from European schools. This interdisciplinary, worldwide design approach has resulted in a useful experience for its participants, who are considerably more equipped for today's team environment in industry and for global aerospace programs.

Article purpose. All the above aspects of the search for the most suitable team members can be significantly improved by applying the described below method of artificial intelligence.

Step 1: Automated potential team members' search. In this step, a web-based application proposed in this paper's method finds the most suitable candidates online by searching different social media websites such as LinkedIn and other websites where candidates can post their resumes and interact with other professionals and prospective employees. As this method implements machine learning, every time this method is applied in the search, the web-based application learns how to conduct the search better using AI [7]. For example, in the first round of applying this method, the proposed application would search the future team members based only on their resumes, education, and work experience, posted on the Internet. However, in the second round, the application would not only do that, but also analyze the potential team member interactions on social media such as LinkedIn and other websites, thus helping determine if the communication style of the candidate is suitable for the team. As mentioned prior, work qualifications are not the only things that matter how a person would fit in a particular team matters as well. The proposed artificial intelligence method hopes to expand on that and find the most suitable candidates all around.

Future team member interest. The next point of interest in the proposed method is to determine whether a potential candidate is interested in the job. There could be some caveats here, but since the application does not use human resources to conduct this process, it can be run in the background without requiring any attention from the current company staff. Thus, if after searching the Internet, the application finds a number of candidates, for instance one hundred people, who the application believes can be a good fit for the job indicated, the application will then attempt to predict if the candidate would be interested in applying for and acquiring the said job. If the application determines that yes, the candidate would be interested, the application will then reach out to the candidate with the job details and ask the candidate to complete a fifteen-to-thirty-minute test which can be completed remotely.

Step 2: Automated test. The proposed test may be developed by both artificial intelligence and humans, albeit it is recommended that the test be monitored in the first few rounds of testing the application for a specific company. The test would be given to all potential candidates via the application and, after the applicants answer the test's questions, the application would then review the tests in order to determine which candidates passed the test and which did not. The passing of the test would be determined on a percentage scale as further discussed in Fig. 2. The first priority would be given to candidates who scored in the top 10th percentile; for those candidates who scored in the 85-90th percentile, a shorter second test would be given. Those who score in the top 5th percentile on the second test would be given the second priority level and will also move up to the next team building round.

An example of automated testing was applied in high school students where after a series of tests, the application system recommended which high school students should be accepted to which university [6]. This example shows a hybrid neural network and decision tree classifier model that acts as the foundation for a university entrance recommender system. In addition to the high forecast accuracy rate, the system's flexibility allows it to anticipate potential universities that match the students' profiles as well as relevant techniques via which the students should enter. Based on the students' histories, the recommender may be extended to make other types of predictions.

Based on the instance above, automated testing with artificial intelligence analysis can be applied while searching for the best candidates in the aerospace communications industry. As seen in Fig. 2, the testing process can be fully automated with the help of the application proposed in this paper. From a pool of potential candidate, the application would estimate what score would each candidate get on this future test based on each candidate's history. Such history can include but is not limited to: education, work experience, volunteer experience, previous employers reviews, indicated candidate's interests. This extra step is needed so that the application could, in the future, conduct a more optimal search in the first step of this proposed method [8].

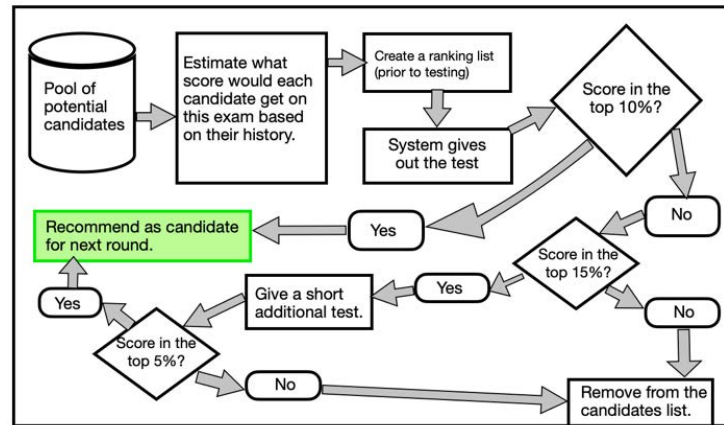


Fig. 2. The passing of the automated test algorithm

Test grading. The newly proposed method would create a ranking list that would rank all candidates right away, even before giving out the test. Short after that, however, the test is given out to candidates; this process is fully automated with humans only monitoring the process in the early versions of the application. Depending on the individuals scores, they can either move up in the team formation process, be disqualified from the process, or get a second chance on another, shorter, test. The percentages of correct answers are what gives the people their scores. The second chance test is given out as another opportunity to make sure every candidate is being vetted thoroughly and no excellent candidates are missed by the application. It is worth noting that because of the automatic nature of this test, there would be no discrimination and no human factors, as there are no humans involved in the test except for the actual candidates attempting to pass the test.

Step 3. Voice recognition interview. This method proposes using artificial intelligence to collect data and analyze it in order to increase the speed of the team building process, decrease the use of human and financial resources, and to avoid discrimination. However, question answering (QA) is perhaps one of the most difficult jobs in natural language processing. It necessitates search engines capable of retrieving succinct, precise text fragments containing an answer to a question provided by the user. The addition of voice interfaces to QA systems gives these systems a more natural and engaging perspective [9].

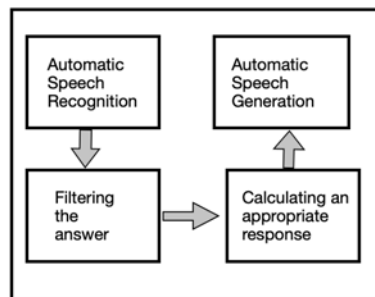


Fig. 3. Process of the proposed question-answer system

As described in Fig. 3, the proposed question-answer system would have 4 main steps. The first step would be the speech recognition. The application would determine if the candidate actually answered the given question. In the second step, the application will research options on what to say next [10]. Thus, it will compare the answer given by a candidate with a few most suitable options of what to say back. In the third step, the application would calculate an appropriate response by deciding which answer option is most appropriate to say. In the fourth and final step, the application will produce the response out loud, thus concluding the cycle of generating a reply. In Fig. 3, the system tries to answer a spoken question correctly by first filtering out the many possible ill-formed questions from the word lattice, and if that fails, it performs lexical and semantic alternations on the remaining questions in the reduced word lattice. If the solution cannot be identified by employing keyword variations, the questions will be answered using an interactive Questions & Answer approach [9].

Step 4. Live conversation. In-person or online in real time final interview. In the final fourth step of the method called a live conversation, the candidates would be interviewed by humans with the assistance of the

application. Even though this interview is conducted by a real person, its audio and video are recorded by the application and analyzed at a later time so that the application can learn how to conduct the interviews and, in the future, even the fourth step can be conducted by the application. The fact that step 4 is the only step in this application life cycle requiring human intervention significantly saves human time and resources. With the hope of automating even the fourth step in the future as more versions of the proposed application come out, humans in the team building aerospace communications company will only need to supervise the process.

Conclusions. Discussion. The novel method proposed in this paper analyzed that the current methods used in team formation can be greatly improved and proposed a new method using artificial intelligence and machine learning. The results confirm that the method proposed in this article will not only determine the most qualified candidates to join such a team but also evaluate how well the candidates are expected to perform in a particular team based on the named team's dynamic. The method's initial stage involves searching several social media networks for the most qualified persons online. The second phase is administering an automated test to all potential candidates via the application, and after the applicants answer the test's questions, the application examines the tests to determine who passed and who did not. Candidates would go through an artificial intelligence question-answer discussion in the third phase of a voice recognition interview, which would be totally automated by the application presented in this research. The applicants would be interviewed by humans with the aid of the application in the last part of the procedure, known as a live conversation. The conclusions about the usability and benefits of this method have been made, based on saving human and financial resources. The hope is that in the future versions of the application, all steps will be done with artificial intelligence with minimum human intervention.

Bibliography:

1. Арал, Сінан і Бриньольфссон, Ерік і Ван Алстайн, Маршалл В., Передумови та наслідки взаємного знання в командах (10 листопада 2008 р.), <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1299260>.
2. Організаційна поведінка та процеси прийняття людських рішень Том. 81, № 2, березень, стор. 226–251, 2000 doi:10.1006/obhd.1999.2875, https://www.heinz.cmu.edu/faculty-research/profiles/krackhardt-davidm/_files/2000-choosing-workgroup-members.pdf.
3. Асатурян, Гарен; Марамот, Кінгслі; Рейес, Діана Мехія; Сейф, Джавад. Проблема формування мультидисциплінарної команди для проектів в аерокосмічній промисловості. Щорічна конференція МІО. провадження; Норкрос (2021): 914-919. <https://www.proquest.com/openview/defde9ceabafbcc9e124a5d00b84134a/1?pq-origsite=gscholar&cbl=51908>
4. Раченко Ю., Доценко Н. (січень 2021). «Використання комп'ютеризованої системи для визначення більшості Відповідні професійні навички для аерокосмічної промисловості». 6-а Міжнародна науково-практична конференція; Бостон, США, VoScience Publisher, pp. 69-72, [https://sci-conf.com.ua/wpcontent/uploads/2021/01/FUNDAMENTAL-AND-APPLIED-RESEARCH-IN-THE-MODERN-WORLD-20-22 січня 2021.pdf](https://sci-conf.com.ua/wpcontent/uploads/2021/01/FUNDAMENTAL-AND-APPLIED-RESEARCH-IN-THE-MODERN-WORLD-20-22%20січня%202021.pdf)
5. Oihab Allal-Chérif, Alba Yela Aránega, Rafael Castaño Sánchez, Intelligent recruitment: How to identify, select, and retain talents from around the world using artificial intelligence, Technological Forecasting and Social Change, Том 169, 2021, 120822, ISSN 0040 -1625, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120822>.
6. Саймон Фонг і Роберт П. Б'юк-Агай. Автоматизований консультант щодо вступу до університету Система для учнів середньої школи. 6-та Міжнародна конференція з інформаційних технологій та додатків (ICITA 2009).
7. Юрій Кубрак, Дмитро Плечистий, Ігор Толстой. Формування комплексної системи моніторингу сучасних БПЛА на базі штучного інтелекту. Наукові праці Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. Кременчук: КРНУ, 2022. Випуск 2(133), <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2022.2.5>.
8. П. Росо, Л. -Ф. Хуртадо, Е. Сегарра та Е. Санчіс, «Про голосові відповіді на запитання», у IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), vol. 42, вип. 1, стор. 75-85, січень 2012 р., doi: 10.1109/TSMCC.2010.2089620, <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5672612>.
9. Раченко Єлизавета. «Чи варто нам використовувати штучний інтелект для найму співробітників в аерокосмічній галузі». VII Міжнародна науково-практична конференція. Велика Британія, Лондон. 2021. https://scholar.google.com/scholar?hl=en&as_sdt=0,5&cluster=4148719248741376041
10. С. Харабагіу, Д. Молдован, Я. Піконе. Відповіді на запитання з голосовою активацією відкритого домену. Матеріали 19-ї міжнародної конференції з комп'ютерної лінгвістики, том 1, серпень 2002 р., сторінки 1–7 <https://doi.org/10.3115/1072228.10723>

References:

1. Aral, Sinan and Brynjolfsson, Erik and Van Alstyne, Marshall W., Antecedents and Consequences of Mutual Knowledge in Teams (November, 10 2008), <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1299260>.
2. Organizational Behavior and Human Decision Processes Vol. 81, No. 2, March, pp. 226–251, 2000 doi:10.1006/obhd.1999.2875, https://www.heinz.cmu.edu/faculty-research/profiles/krackhardt-davidm/_files/2000-choosing-workgroup-members.pdf.
3. Asaturian, Garen; Maramot, Kingsley; Reyes, Diana Mejia; Seif, Javad. A Multidisciplinary Team Formation Problem for Projects in the Aerospace Industry. IIE Annual Conference. Proceedings; Norcross (2021): 914-919. <https://www.proquest.com/openview/defde9ceabafbcc9e124a5d00b84134a/1?pq-origsite=gscholar&cbl=51908>

4. Rachenko, Y., Dotsenko N. (January 2021). "Using a Computerized System to Determine the Most Suitable Job Skills for Aerospace Industry." 6th International Scientific and Practical Conference; Boston, USA, BoScience Publisher, pp. 69-72, <https://sci-conf.com.ua/wpcontent/uploads/2021/01/FUNDAMENTAL-AND-APPLIED-RESEARCH-IN-THE-MODERN-WORLD-20-22jan2021.pdf>
5. Oihab Allal-Chérif, Alba Yela Aránega, Rafael Castaño Sánchez, Intelligent recruitment: How to identify, select, and retain talents from around the world using artificial intelligence, Technological Forecasting and Social Change, Volume 169, 2021, 120822, ISSN 0040-1625, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120822>.
6. Simon Fong and Robert P. Biuk-Aghai. An Automated University Admission Recommender System for Secondary School Students. The 6th International Conference on Information Technology and Applications (ICITA 2009).
7. Yuri Kubrak, Dmytro Plechystyy, Ihor Tolstoi. Formation Of A Complex System For Monitoring Modern Uavs Based On Artificial Intelligence. Transactions Of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. – Kremenchuk: KRNU, 2022. – Issue 2(133), <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2022.2.5>.
8. P. Rosso, L. -F. Hurtado, E. Segarra and E. Sanchis, "On the Voice-Activated Question Answering," in IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), vol. 42, no. 1, pp. 75-85, Jan. 2012, doi: 10.1109/TSMCC.2010.2089620, <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5672612>.
9. Rachenko, Yelyzaveta. "Should we use artificial intelligence to recruit employees in the aerospace industry." VII International Scientific and Practical Conference. United Kingdom, London. 2021. https://scholar.google.com/scholar?hl=en&as_sdt=0,5&cluster=4148719248741376041
10. S. Harabagiu, D. Moldovan, J. Picone. Open-Domain Voice-Activated Question Answering. Proceedings of the 19th international conference on Computational linguistics, Volume 1, August 2002, Pages 1–7 <https://doi.org/10.3115/1072228.1072397>.

УДК 519.6: 004.94

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.1.10>

Володимир ТИХОХОД

кандидат технічних наук, доцент кафедри цифрових технологій в енергетиці, навчально-науковий інститут атомної і теплової енергетики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», проспект Перемоги, 37, Київ, 03056 (v.tikhokhod@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-1525-4770

Лариса КУБЛІЙ

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри цифрових технологій в енергетиці, навчально-науковий інститут атомної і теплової енергетики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», проспект Перемоги, 37, Київ, 03056 (kublil_i@ukr.net)

ORCID: 0000-0002-1015-3209

Андрій ОНИСЬКО

кандидат військових наук, доцент, доцент кафедри цифрових технологій в енергетиці, навчально-наукового інституту атомної і теплової енергетики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», проспект Перемоги, 37, Київ, 03056 (oniskoandrij2020@gmail.com)

ORCID: 0000-0001-7178-1471

Volodymyr TYKHOKHOD

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Digital Technologies in Energy, Heat Power Engineer Department, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37, Prosp. Peremohy, Kyiv, 03056, Ukraine (v.tikhokhod@gmail.com)

Larysa KUBLII

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Digital Technologies in Energy, Heat Power Engineer Department, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37, Prosp. Peremohy, Kyiv, 03056, Ukraine (kublil_i@ukr.net)

Andrii ONYSKO

Candidate of Military Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Digital Technologies in Energy, Heat Power Engineer Department, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37, Prosp. Peremohy, Kyiv, 03056, Ukraine (oniskoandrij2020@gmail.com)

Бібліографічний опис статті: Тихоход, В., Кублій, Л., Онисько, А. (2023). Дослідження багатозв'язних динамічних систем шляхом розв'язання систем інтегральних рівнянь Вольтера і роду методом колокацій. *Інформаційні технології та суспільство*. Вип. 1 (7). 73–79. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.1.10>

Bibliographic description of the article: Tykhokhod, V., Kublii, L., Onysko, A. (2023). Doslidzhennia bahatozv'iaznykh dynamichnykh system shliakhom rozv'iazannia system intehralnykh rivnian Voltera i rodu metodom kolokatsii [Research of multiconnected dynamic system by solving of systems of Volterra integral equations of the first kind by the method of colocations]. *Informatsiini tekhnolohii ta suspilstvo – Information technology and society*, 1 (7), 73–79. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.1.10>

ДОСЛІДЖЕННЯ БАГАТОЗВ'ЯЗНИХ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ ШЛЯХОМ РОЗВ'ЯЗАННЯ СИСТЕМ ІНТЕГРАЛЬНИХ РІВНЯНЬ ВОЛЬТЕРА І РОДУ МЕТОДОМ КОЛОКАЦІЙ

Багатозв'язні динамічні системи характеризуються великою кількістю взаємопов'язаних вхідних та вихідних величин, що визначає складність їхнього математичного опису. Числове моделювання таких систем у вигляді систем інтегральних рівнянь Вольтера є ефективним підходом, проте вимагає реалізації операторів Вольтера. Їх особливістю є накопичення обчислень на кожному наступному кроці апроксимації. Як наслідок зменшення кроку апроксимації призводить до значного зростання кількості обчислювальних операцій. Це висуває особливі вимоги до простоти та швидкодії відповідних алгоритмів. В роботі досліджено ефективність застосування методу колокації на основі кусково-гладких поліномів до розв'язання такого класу рівнянь. Метод колокації заснований

на отриманні рішення на ділянках, довжина яких вибирається, і на кожному з них застосовується апроксимуючий вираз з невеликим числом координатних функцій. Великою перевагою алгоритмів на основі методу колокацій є велика гнучкість при виборі параметрів заміни функцій кусково-гладкими поліномами. Запропоновані алгоритми реалізовано в системі комп'ютерної математики MATLAB у вигляді функції `slvie1colloc`. Складові частини системи інтегральних рівнянь (ядра, праві частини) передаються аргументами програми у виді анонімних функцій або у табличному виді числових значень функцій в вузлах апроксимації. Додатковими аргументами є числові значення вузлів апроксимаційної сітки, степені поліному та початкових умов інтегрального рівняння. Програма виконує перевірку вхідних даних, при некоректних значеннях виводиться код помилки та переривання роботи програми. Проведено апробацію комп'ютерної програми за допомогою обчислювальних експериментів. Описані результати продемонстрували ефективність запропонованих рішень. Абсолютна похибка обчислень для розглянутої моделі у вигляді системи інтегральних рівнянь Вольтера I роду з ядром загального виду при заданих параметрах не перевищила $3,5 * 10^{-3}$.

Ключові слова: інтегральні рівняння Вольтера, багатозв'язні динамічні системи, метод колокації.

RESEARCH OF MULTICONNECTED DYNAMIC SYSTEM BY SOLVING OF SYSTEMS OF VOLTERRA INTEGRAL EQUATIONS OF THE FIRST KIND BY THE METHOD OF COLOCATIONS

Multiconnected dynamic systems are characterized by a large number of interconnected input and output values, which determines the complexity of their mathematical description. Modeling of such systems in the form of systems of Volterra integral equations is an effective approach, but requires the implementation of Volterra operators. Their feature is the accumulation of calculations at each next approximation step. As a result, the reduction of the approximation step leads to a significant increase in the number of computational operations. This puts special demands on the simplicity and speed of the corresponding algorithms. The efficiency of applying the collocation method based on piecewise smooth polynomials to the solution of this class of equations is studied. The collocation method is based on obtaining a solution on sections whose length is selected, and on each of them an approximating expression with a small number of coordinate functions is applied. A great advantage of algorithms based on the method of collocations is great flexibility in choosing parameters for replacing functions with piecewise smooth polynomials. The proposed algorithms are implemented in the MATLAB computer mathematics system in the function called `slvie1colloc`. The constituent parts of the system of integral equations (kernels, right-hand parts) are transmitted by program arguments in the form of anonymous functions or in the form of a table of numerical values of the functions in the approximation nodes. Additional arguments are the numerical values of the nodes of the approximation grid, the degree of the polynomial, and the initial conditions of the integral equation. The program checks the input data, in case of incorrect values, an error code is displayed and the program is interrupted. The computer program was tested using computational experiments. The described results demonstrated the effectiveness of the proposed solutions. The absolute error of calculations for the considered model in the form of a system of Volterra integral equations of the first kind with a kernel of the general form under the given parameters did not exceed $3,5 * 10^{-3}$.

Key words: Voltaire's integral equations, multiconnected dynamical systems, collocation method.

Постановка проблеми. Багатозв'язні динамічні системи (БДС) характеризуються великою кількістю взаємопов'язаних вхідних та вихідних величин, що визначає складність їхнього математичного опису.

Числове моделювання БДС у вигляді систем інтегральних рівнянь Вольтера (СІРВ) є ефективним підходом у цій задачі, проте вимагає реалізації операторів Вольтера. Їх особливістю є накопичення обчислень на кожному наступному кроці апроксимації. Як наслідок зменшення кроку апроксимації призводить до значного зростання кількості обчислювальних операцій. Це висуває особливі вимоги до простоти та швидкодії алгоритмів.

Напрямок досліджень застосування числових методів до розв'язання систем інтегральних рівнянь Вольтера розвинутий недостатньо і потребує розвитку, оскільки ці моделі мають свої особливості, що вимагають розробки специфічних алгоритмів та дослідження їх ефективності.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В існуючих публікаціях [1-2] висвітлено ряд методів дослідження інтегральних моделей Вольтера, але розглядаються інтегральні моделі Вольтера переважно у вигляді скалярних рівнянь. Застосування методу колокації до розв'язання скалярних інтегральних рівнянь досліджено в роботах [1-4]. Існує невелика кількість публікацій, що розглядають застосування числових методів до розв'язання систем інтегральних рівнянь Вольтера [5-9].

Мета дослідження. Розробка алгоритмів розв'язання систем інтегральних рівнянь Вольтера I роду на основі методу колокації з застосуванням кусково-гладких поліномів, реалізація програмних засобів дослідження багатозв'язних динамічних систем, що реалізують розроблені алгоритми. Аналіз ефективності застосування розроблених алгоритмів та програм.

Основний матеріал дослідження. Алгоритми на основі методу колокації мають достатню простоту і швидкодію. Метод колокації заснований на отриманні рішення на ділянках, довжина яких вибирається, і на кожному з них застосовується апроксимуючий вираз з невеликим числом координатних функцій. Великою перевагою алгоритмів на основі методу колокацій є велика гнучкість при виборі параметрів заміни функцій кусково-гладкими поліномами. Застосування методу колокації до розв'язання систем інтегральних рівнянь Вольтера при моделюванні БДС потребує розробки відповідних алгоритмів, їх програмній реалізації та дослідження їх ефективності.

Метод колокації стосовно до систем інтегральних рівнянь Вольтера I роду. У роботі [1] розглянуто загальну схему методу колокації стосовно розв'язання рівнянь типу Вольтера I роду. Скористаємося цією схемою для розв'язання системи інтегральних рівнянь типу Вольтера I роду. У компактній формі система інтегральних рівнянь n -го порядку типу Вольтера I роду у загальному вигляді записується наступним чином

$$\sum_{j=1}^n \int_a^x K_{ij}[x, s, y_j(s)] ds = f_i(x), \quad i = \overline{1, n}, \quad x \in [a, b]. \quad (1)$$

Проміжок $[a, b]$ розбиваємо на M ділянок, на кожному з яких шукані розв'язки $y_i, i = \overline{1, n}$ представляються у вигляді функцій виду

$$\tilde{y}_i(x) = \Phi_i(x, C_{i,1}, C_{i,2}, \dots, C_{i,m}), \quad i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

що залежать від вільних параметрів.

Система рівнянь, що розв'язується, на кожній $(k+1)$ -й ділянці $x_k \leq x \leq x_{k+1}, k = \overline{0, M-1}$ приймає наступний вид

$$\sum_{j=1}^n \int_{x_k}^x K_{ij}[x, s, \tilde{y}_j(s)] ds = f_i(x) - \psi_{i,k}(x), \quad x \in [x_k, x_{k+1}], \quad i = \overline{1, n} \quad (3)$$

де

$$\psi_{i,k}(x) = \sum_{j=1}^n \int_a^{x_k} K_{ij}[x, s, \tilde{y}_j(s)] ds, \quad s \in [a, x_k], \quad x \in [x_k, x_{k+1}], \quad (4)$$

що завжди може бути обчислений за відомим на проміжку $a \leq x \leq x_k$ наближеним розв'язком $\tilde{y}_i(x), i = \overline{1, n}$, що отриманий попередньо для $k-1$ ділянок. Початкові значення $\tilde{y}_i(x), i = \overline{1, n}$, шуканого розв'язку знаходяться яким-небудь допоміжним способом або вважаються заданими.

Для розв'язання рівнянь (3) використовується вираз (2), а вільні параметри $C_{i,r}, i = \overline{1, n}, r = \overline{1, m}$, визначаються з умов перетворення в нуль нев'язок

$$\varepsilon(C_{i,r}, x_{k,v}) = \sum_{j=1}^n \int_{x_k}^{x_{k,v}} K[x_{k,v}, s, \Phi_j(s, C_{j,1}, C_{j,2}, \dots, C_{j,m})] ds - f_i(x_{k,v}) + \psi_{i,k}, \quad (5)$$

де $x_{k,v}, v=1, 2, \dots, l$ - вузли, що відповідають розбиттю відрізка $[x_k, x_{k+1}]$ на l частин (підвідрізків). Вираз (5) представляє собою систему m рівнянь відносно $C_{i,1}, C_{i,2}, \dots, C_{i,m}$.

Для зручності обчислень шуканий розв'язок на ділянці доцільно представляти у виді деякого поліному

$$\tilde{y}_i(x) = \sum_{j=1}^m C_{i,j} \phi_{i,j}(x),$$

де $\phi_{i,j}(x)$ - лінійно незалежні координатні функції.

Застосування кусково-гладких поліномів до розв'язання СІРВ I роду. Розглянемо варіант методу колокації з використанням кусково-гладких поліномів стосовно розв'язання системи інтегральних рівнянь Вольтера першого роду.

На проміжку інтегрування $[a, b]$ виділені вузли $x_{k,v} = (kl + v)h + a, v = \overline{0, l}, k = \overline{0, M-1}$, де індекс k відповідає $(k+1)$ -ій ділянці (відрізка $x_k \leq x \leq x_{k+1}$), а індекс j - підвідрізка всередині ділянки; $l \geq 1$ - кількість підвідрізків; при цьому $x_{k,l} = x_{k+1,0}; x_{0,0} = a$.

Обчислення наближених значень функцій будемо шукати за допомогою кусково-гладких поліномів, що застосовуються на ділянках з поліномів виду

$$P_{i,k+1}(x) = P_{i,k}(x_{k,0}) + \sum_{j=1}^l \frac{C_{i,k,j}}{j!} (x - x_{k,0})^j, \quad k = 0, 1, \dots, M-1. \quad (6)$$

Вважаючи $P_i(x) \in C[a, b]$, отримаємо:

$$P_{i,k}(x_{k,0}) = P_{i,k-1}(x_{k-1,l}).$$

Будемо вважати відомими значення $P_{i,0}(x_{0,0}) = y_{i,0} (y_{i,0} = y_i(a)), i=1, 2, \dots, n$. Тоді на першій ділянці наближений розв'язок рівняння (1) приймає вигляд

$$P_{i,0}(x) = P_{i,0}(x_{0,0}) + \sum_{j=1}^l \frac{C_{i,0,j}}{j!} (x - x_{0,0})^j. \quad (7)$$

Підставивши (7) в рівняння (1) для фіксованих значень, отримаємо систему

$$\sum_{j=1}^n \int_a^{x_{0,v}} K_{ij}[x_{0,v}, s, P_{i,0}(s)] ds = f_i(x_{0,v}), \quad i = \overline{1, n}, j = \overline{1, l}, \quad (8)$$

яка після обчислення інтегралів представляє собою систему в загальному випадку нелінійних рівнянь відносно коефіцієнтів $C_{i,0,1}, \dots, C_{i,0,m}$, знаходження яких дозволяє отримати $P_{i,0}(x)$.

Наближений розв'язок на другій ділянці знаходимо за формулою

$$P_{i,1}(x) = P_{i,1}(x_{1,0}) + \sum_{j=1}^l \frac{C_{i,j}}{j!} (x - x_{1,0})^j, \quad (9)$$

де значення $P_{i,1}(x_{1,0})$ відомі з обчислень на попередньому кроці:

Після підстановки (9) в систему рівнянь (3), отримуємо систему рівнянь

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \int_{x_{1,0}}^{x_{1,1}} K_{ij}[x_{1,1}, s, P_{j,1}(s)] ds &= f_i(x_{1,1}) - \sum_{j=1}^n \int_a^{x_{1,0}} K_{ij}[x_{1,1}, s, P_{j,0}(s)] ds, \\ \sum_{j=1}^n \int_{x_{1,0}}^{x_{1,2}} K_{ij}[x_{1,2}, s, P_{j,1}(s)] ds &= f_i(x_{1,2}) - \sum_{j=1}^n \int_a^{x_{1,0}} K_{ij}[x_{1,2}, s, P_{j,0}(s)] ds, \end{aligned} \quad (10)$$

де $i = \overline{1, n}$, що дозволяє знайти значення $C_{i,k,1}, C_{i,k,2}, \dots, C_{i,k,m}$, $k = \overline{1, M-1}$, в загальному випадку використовується вираз

$$\sum_{j=1}^n \int_{x_{k,0}}^{x_{k,v}} K_{ij}[x_{k,v}, s, P_{j,k}(s)] = f_i(x_{k,v}) - \psi_{i,k}(x_{k,v}), \quad (11)$$

де

$$\psi_{i,k}(x_{k,v}) = \sum_{j=1}^n \int_a^{x_{1,0}} K_{ij}(x_{k,v}, s, P_{j,0}(s)) ds + \sum_{j=1}^n \int_a^{x_{1,0}} K_{ij}(x_{k,v}, s, P_{j,1}(s)) ds + \dots + \sum_{j=1}^n \int_{x_{k-1,0}}^{x_{k,0}} K_{ij}(x_{k,v}, s, P_{j,k-1}(s)) ds, k = \overline{1, M-1}, v = \overline{1, l}. \quad (12)$$

Для системи лінійних інтегральних рівнянь типу Вольтера (СЛІРВ) II роду

$$\sum_{j=1}^n \int_a^x K_{ij}(x, s) y_j(s) ds = f_i(x), i = \overline{1, n} \quad (13)$$

обчислювальний вираз (11) приймає вигляд

$$\sum_{j=1}^n \int_{x_{k,0}}^{x_{k,v}} K_{rj}(x_{k,v}, s) P_{j,k}(s) ds = f_{r,i}(x_{k,v}) - \psi_{r,i,k}(x_{k,v}), \quad (14)$$

де

$$\begin{aligned} \psi_{r,i,k}(x_{k,v}) &= \sum_{j=1}^n \int_a^{x_{1,0}} K_{rj}(x_{k,v}, s) P_{j,0}(s) ds + \\ &+ \sum_{j=1}^n \int_{x_{1,0}}^{x_{2,0}} K_{rj}(x_{k,v}, s) P_{j,1}(s) ds + \dots + \\ &+ \sum_{j=1}^n \int_{x_{k-1,0}}^{x_{k,0}} K_{rj}(x_{k,v}, s) P_{j,k-1}(s) ds, k = \overline{1, M-1}, v = \overline{1, l}. \end{aligned}$$



Рис. 1. Алгоритм розв'язання СЛІРВ I роду методом колокації з використанням кусково-гладких поліномів

Алгоритмічне та програмне забезпечення. На рис. 1 наведено алгоритм розв'язання СЛІРВ I роду методом колокації з використанням кусково-гладких поліномів.

Вхідними параметрами алгоритму є:

- x – вузли апроксимаційної сітки,
- mm – степінь полінома,
- K – ядра інтегрального рівняння,
- f – праві частини інтегрального рівняння,
- y_0 – початкові умови.

Реалізацію алгоритму виконано в системі комп'ютерної математики MATLAB у вигляді функції *slvie1colloc*.

Можливі інтерфейси програми *slvie1colloc*:

1. $y = \text{slvie1colloc}(x, mm, K, f)$.
2. $y = \text{slvie1colloc}(x, mm, K, f, y_0)$.

Вхідними параметрами програми є:

- x – вектор чисел, що задають вузли апроксимаційної сітки,
- mm – число, що задає степінь полінома,
- K – ядра інтегрального рівняння, що можуть бути задані в двох формах: а) двовимірний масив аналітичних виразів функцій у вигляді анонімних функцій MATLAB, що представляють ядра інтегрального рівняння, б) чотирьох-вимірний масив значень ядер інтегрального рівняння у вузлах x_i апроксимаційної сітки;
- f – праві частини інтегрального рівняння, що можуть бути задані в двох формах: а) вектору аналітичних виразів функцій у вигляді анонімних функцій MATLAB, б) двовимірному масиву, що містить числові значення функцій f_i у вузлах x_i .

y_0 (опціонально) – вектор чисел, що задають значення початкових умов (за замовчанням вектор містить нулі).

Програма виконує перевірку вхідних даних. При некоректних значеннях виводиться помилка з кодом та робота програми припиняється. Можливі коди помилок зображені в таблиці 1.

Таблиця 1

Коди помилок в програмі *slvie1colloc*

Код помилки	Умова	Повідомлення
1	Перевіряється, чи вихідний параметр x є вектором, використовуючи вбудовану функцію <code>isvector</code> системи MATLAB	x повинен бути вектором
2	Перевіряється, чи вихідний параметр y_0 є вектором, використовуючи вбудовану функцію <code>isvector</code> системи MATLAB	y_0 повинен бути вектором
3	Порівнюється розмірність масиву K за виміром 1 та виміром 2 з допомогою виразу: $size(K,1) \sim size(K,2)$, де <code>size</code> – функція MATLAB, що повертає розмірність масиву за заданим виміром.	K повинна бути квадратною матрицею
4	Порівнюється розмірність масивів K та F за першим виміром: $size(K,1) \sim size(F,1)$	Вимірність масиву K повинна співпадати з довжиною вектору f
5	Порівнюється розмірність масивів y_0 та F за першим виміром: $size(y_0,1) \sim size(F,1)$	Вимірність масиву y_0 повинна співпадати з довжиною вектору f

В результаті виконання програми повертається масив u чисел, що є значеннями шуканих функцій y_r . Масив має розмірність $[m, n]$ де m – розмірність системи інтегральних рівнянь (кількість невідомих функцій), n – довжина вектору x (кількість вузлів апроксимаційної сітки).

Обчислювальний експеримент. Розглянемо систему лінійних інтегральних рівнянь Вольтера I роду:

$$\begin{cases} \int_0^x (x-s)y_1(s)ds + \int_0^x (x+s)y_2(s)ds = \\ (2x-1)\sin x + \cos x + x - 1; \\ \int_0^x (x-2s)y_1(s)ds + \int_0^x (2x-s)y_2(s)ds = \\ (x-1)\cos x + (x-2)\sin x + x + 1; \end{cases} \quad (13)$$

з точним розв’язком

$$y_1^T(x) = \sin x, y_2^T(x) = \cos x. \quad (14)$$

Визначимо наступні вхідні дані: $[0, 4\pi]$ – інтервал інтегрування, 40 – кількість підвідділків, 2 – степінь поліному. Графіки точного та обчисленого розв’язків системи показані на рисунках 2, 3. Похибки обчислень зображено на рисунках 4, 5.

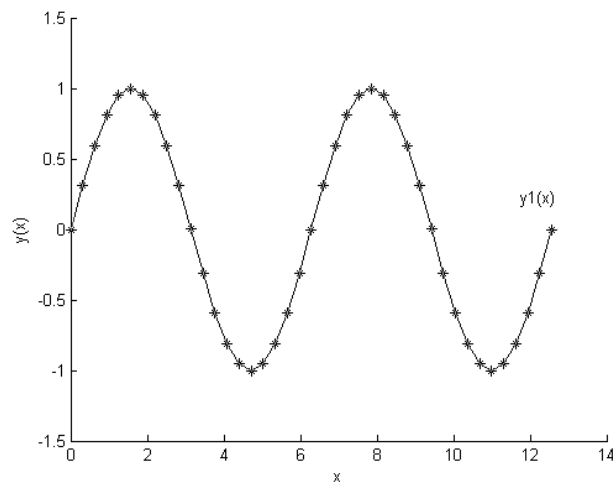


Рис. 2. Графіки точного (–) та обчисленого (*) розв’язків рівняння (13) методом колокації за формулами (11)–(12) (функція 1)

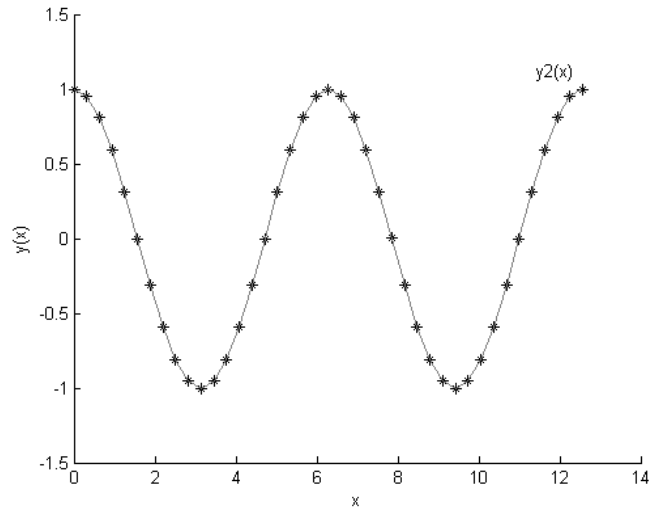


Рис. 3. Графіки точного (–) та обчисленого (*) розв’язків рівняння (13) методом колокації за формулами (11)–(12) (функція 2)

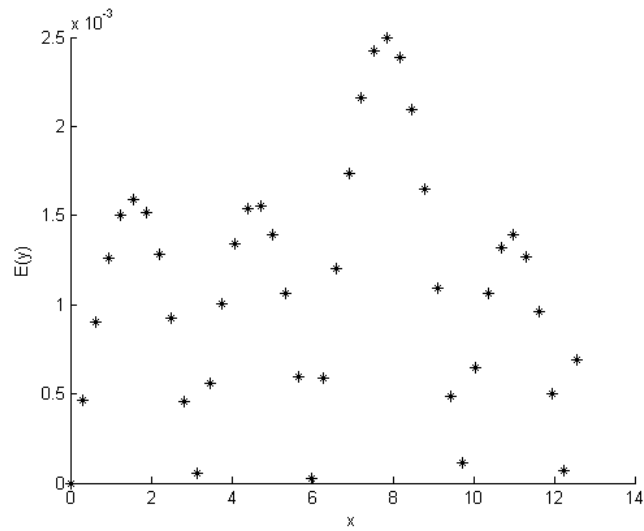


Рис. 4. Абсолютна похибка розв’язання системи (13) за формулою (11) (функція 1)

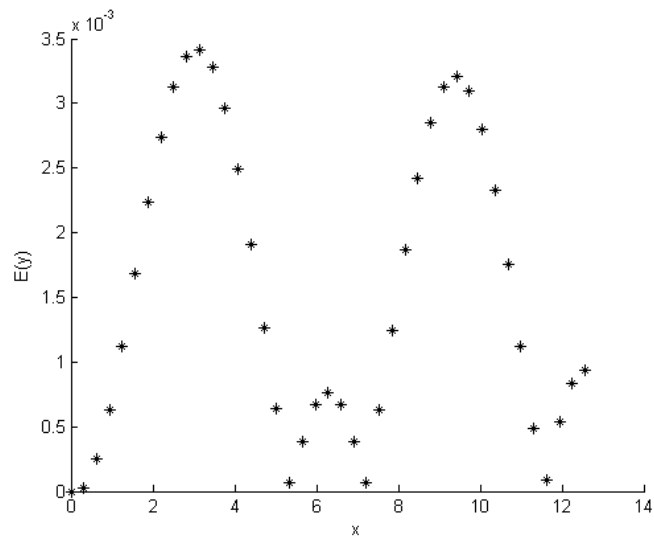


Рис. 5. Абсолютна похибка розв’язання системи (13) за формулою (11) (функція 2)

Висновки. Розглянуто застосування методу колокації до розв'язання систем інтегральних рівнянь Вольтера I роду. Даний тип моделей може бути ефективно використано при дослідженні багатозв'язних динамічних систем. Запропонований алгоритм та його програмна реалізація в системі MATLAB для наближеного числового розв'язання використовує кусково-гладкі поліноми. Проведений обчислювальний експеримент продемонстрував дієвість запропонованих рішень. Абсолютна похибка обчислень для розглянутої моделі у вигляді системи інтегральних рівнянь Вольтера I роду з ядром загально-го виду при заданих параметрах на перевищила $3,5 * 10^{-3}$.

Список використаних джерел:

1. Верлань А.Ф., Сизиков В.С. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы. Київ: Наукова думка, 1986. 544 с.
2. Hermann Brunner. Collocation Methods for Volterra Integral and Related Functional Differential Equations. Cambridge University Press, 2004. 597 p.
3. Верлань А.А., Волощенко А.Б., Сагатов М.В. Коллокационный алгоритм решения уравнения Вольтерры I рода. *Зб. наук. праць ІПМЕ НАНУ*. Вип. 13. Київ: 2001. С. 97–100.
4. Понеділок В.В., Грищук В.А. Розв'язування нелінійних інтегральних рівнянь Вольтерри методом колокацій. *Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації*: тези доповідей 9-ї Міжнародної наукової конференції. Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка. 2020. 136 с.
5. Дячук О.А., Костьян Н.Л. Коллокационные алгоритмы решения уравнений Вольтерры. *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки*, 2008. Випуск 17. 49-62
6. Armand A., Gouyandeh Z. Numerical solution of the system of Volterra integral equations of the first kind. *Int. J. Industrial Mathematics*. Vol. 6, No. 1, 2014. DOI:10.35629/5252-0501801807.
7. Padmanabha A. Reddy, Manjula S. H., Sateesha3 C. Haar wavelet method for solving the system of linear Volterra integral equations with variable coefficients. *Malaya Journal of Matematik*. 2021. Vol. 9, No. 1, P. 1-8. DOI: 10.26637/MJM0901/0001
8. Fawziah M. Al-Saar, Ahmed A. Hamoud, Kirtiwant P. Ghadle. Some Numerical Methods to Solve a System of Volterra Integral Equations. *Int. J. Open Problems Compt. Math.* 2019. Vol. 12, No. 4. P. 22-35.
9. Biazar J., Babolian E., Islam R. Solution of a system of Volterra integral equations of the first kind by Adomian method. *Applied Mathematics and Computation*. 2004. Vol. 147(3). P. 713-719. DOI:10.1016/S0096-3003(02)00806-8.
10. Biazar J., Babolian E., Islam R. Solution of a system of Volterra integral equations of the first kind by Adomian method. *Applied Mathematics and Computation*. 2003. Vol. 139. Issues 2–3. P. 249–258. DOI: 10.1016/S0096-3003(02)00173-X.

References:

1. Verlan A.F., Sizikov V.S. (1986) *Intehralnye uravneniya: metody, alhoritmy, prohramy [Integral Equations: Methods, Algorithms, Programs]*. Kyiv: Naukova dumka [in Ukrainian].
2. Hermann Brunner. (2004). Collocation Methods for Volterra Integral and Related Functional Differential Equations. Cambridge University Press.
3. Verlan A.A., Voloshchenko A.B., Sahatov M.V. (2001). Kollokatsyonnyi alhoritm reshenija uravnenija Volterry I roda [Collocation algorithm for solving the Volterra equation of first kind]. *Collection of scientific works of G.E. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering*. (Vol. 13). (pp. 97–100). Kyiv. [in Ukrainian].
4. Ponedilok V.V., Hryshchuk V.A. (2020). Rozv'iazuvannia neliniinykh intehralnykh rivnian Volterry metodom kolokatsii [Solving nonlinear integral equations of Volterra by the method of collocations]. *IX Mizhnarodna naukovoї konferentsii "Suchasni problemy matematychnoho modeliuvannia, prohnozuvannia ta optymizatsii" — IX International Scientific Conference "Modern Problems of Mathematical Modeling, Forecasting and Optimization"*. Kamianets-Podilskyi. [in Ukrainian].
5. Dyachuk O.A., Kostyan N.L. (2008). Kollokatsionnye algoritmy resheniya uravnenij Volterry [Collocation algorithms for solving the Volterra equations]. *Mathematical and computer modeling. Series: Technical sciences — Mathematical and computer modeling*. Series: Technical sciences. (Vol. 17). (pp. 49-62).
6. Armand A., Gouyandeh Z. (2014). Numerical solution of the system of Volterra integral equations of the first kind. *Int. J. Industrial Mathematics*. (Vol. 6). (No. 1). DOI:10.35629/5252-0501801807.
7. Padmanabha A. Reddy, Manjula S. H., Sateesha3 C. Haar wavelet method for solving the system of linear Volterra integral equations with variable coefficients. *Malaya Journal of Matematik*. 2021. Vol. 9, No. 1, P. 1-8. DOI: 10.26637/MJM0901/0001
8. Fawziah M. Al-Saar, Ahmed A. Hamoud, Kirtiwant P. Ghadle. Some Numerical Methods to Solve a System of Volterra Integral Equations. *Int. J. Open Problems Compt. Math.* 2019. Vol. 12, No. 4. P. 22-35.
9. Biazar J., Babolian E., Islam R. Solution of a system of Volterra integral equations of the first kind by Adomian method. *Applied Mathematics and Computation*. 2004. Vol. 147(3). P. 713-719. DOI:10.1016/S0096-3003(02)00806-8.
10. Biazar J., Babolian E., Islam R. Solution of a system of Volterra integral equations of the first kind by Adomian method. *Applied Mathematics and Computation*. 2003. Vol. 139. Issues 2–3. P. 249–258. DOI: 10.1016/S0096-3003(02)00173-X.

УДК 004.414.2

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.1.11>

Володимир ТОКАР

доктор економічних наук, професор, професор кафедри інженерії програмного забезпечення та кібербезпеки, Державний торговельно економічний університет, вул. Кіото, 19, Київ, Україна, індекс 02000 (V.Tokar@knute.edu.ua)

ORCID: 0000-0002-1879-5855

Станіслав ДУБИКІВСЬКИЙ

кандидат економічних наук, провідний спеціаліст відділу міжнародних зв'язків, Державний торговельно економічний університет, вул. Кіото, 19, Київ, Україна, індекс 02000 (S.Dubukivskiy@knute.edu.ua)

ORCID: 0000-0003-4901-6372

Катерина ПАЛАГУТА

кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення та кібербезпеки, Державний торговельно економічний університет, вул. Кіото, 19, Київ, Україна, індекс 02000 (palaguta@knute.edu.ua)

ORCID: 0000-0003-1167-9509

Юлія САМОЙЛЕНКО

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерних технологій систем управління, Національний університет харчових технологій, вул. Володимирська, 68, Київ, Україна, індекс 01033 (y.samoilenko@knute.edu.ua)

ORCID: 0000-0003-3787-1435

Валерій ПАШОРІН

кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних систем, програмування та кібербезпеки, Європейський університет, бульвар Академіка Вернадського, 16В, Київ, Україна, 03115 (vpashorin@knute.edu.ua)

Volodymyr TOKAR

Doctor of Economic Sciences, Professor, Professor at the Department of Software Engineering and Cybersecurity, State University of Trade and Economics, 19 Kyoto str., Kyiv, Ukraine, postal code 02000 (V.Tokar@knute.edu.ua)

Stanislav DUBYKIVSKYI

Candidate of Economic Sciences, Leading Specialist at the International Relations Department, State University of Trade and Economics, 19 Kyoto str., Kyiv, Ukraine, postal code 02000 (S.Dubukivskiy@knute.edu.ua)

Kateryna PALAGUTA

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Software Engineering and Cybersecurity, State University of Trade and Economics, 19 Kyoto str., Kyiv, Ukraine, postal code 02000 (palaguta@knute.edu.ua)

Yuliia SAMOILENKO

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Automation and Computer Technologies of Control Systems, National University of Food Technologies, 68 Volodymyrska str., Kyiv, Ukraine, postal code 01033 (y.samoilenko@knute.edu.ua)

Valery PASHORIN

Candidate of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Information Systems, Programming and Cybersecurity, European University, 16B Akademika Vernadskyi Boulevard, Kyiv, Ukraine, postal code 03115 (vpashorin@knute.edu.ua)

Бібліографічний опис статті: Токар В., Дубиківський С., Палагута К., Самойленко Ю., Пашорін В. (2023). Архітектура інтелектуальних систем прийняття рішень інформаційної інфраструктури ЗВО з урахуванням вимог ЄС. *Інформаційні технології та суспільство*. Вип. 1 (7), 80–87, DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.1.11>

Bibliographic description of the article: Tokar V., Dubykyivskiy S., Palaguta K., Samoilenko Y., Pashorin V. (2023). Arkhitektura intelektualnykh system pryiniattia rishen informatsiinoi infrastruktury ZVO z urakhuvanniam vymoh YeS [The architecture of intelligent decision-making systems of the information infrastructure of higher education institutions considering EU requirements]. *Informatsiini tekhnologii ta suspilstvo – Information technology and society*, 1 (7), 80–87. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.1.11>

АРХІТЕКТУРА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЗВО З УРАХУВАННЯМ ВИМОГ ЄС

Анотація. Цифрове суспільство, як новий етап розвитку цивілізації, характеризується зростаючим значенням інформаційних технологій в усіх сферах життєдіяльності, в тому числі й в освітній. Стаття присвячена проблематиці вирішення питань розвитку сучасних інформаційних технологій в системі навчання. Інтелектуальний аналіз успішності студентів на всіх етапах навчання відіграє одну з основних ролей при пошуку рішень у цілком різних напрямках – від підтримки вирішення питань відносно окремого студента до коригування освітніх траєкторій і, відповідно, до кардинальної зміни навчального плану, а також при формуванні ресурсного потенціалу освітніх закладів різного рівня. Метою дослідження є створення прообразу простої та доступної інформаційно-аналітичної системи підтримки прийняття рішень, що базується на обліку успішності студентів для закладів освіти всіх рівнів. Завдяки використанню загальнонаукових методів пізнання – аналізу, синтезу, порівняння, у дослідженні було вирішено ряд поставлених завдань. У статті проаналізовано досвід використання різних блоків інтелектуальних систем прийняття рішень на основі інформаційних технологій, розглянуто технології обробки даних OLAP і Data Mining, а також окреслено на теоретичному та апаратному рівнях концептуальні засади моделі функціонування інформаційно-аналітичної системи в ЗВО, що базується на обліку успішності студентів. Отримані результати дослідження в подальшому можуть бути удосконалені і реалізовані ІТ-спеціалістами на практиці в межах не лише ЗВО, але й у рамках освітніх закладів інших рівнів, які наразі не в змозі використовувати існуючі недешеві системи, наближаючи вітчизняну систему освіти до діючих стандартів освітнього простору ЄС.

Ключові слова: інтелектуальні системи прийняття рішень, інформаційна інфраструктура, заклади освіти, технології, управління, OLAP, Data Mining.

THE ARCHITECTURE OF INTELLIGENT DECISION-MAKING SYSTEMS OF THE INFORMATION INFRASTRUCTURE OF HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS CONSIDERING EU REQUIREMENTS

Abstract. The digital society, as a new stage of civilization development, is characterized by the growing importance of information technology in all spheres of life, including education. The article sheds light on solving the issues of development of modern information technology in the learning system. Intellectual analysis of student performance at all stages of education plays a major role in finding solutions in completely different directions – from supporting the resolution of issues related to an individual student to adjusting educational trajectories and, accordingly, to a radical change in the curriculum, as well as in shaping the resource potential of educational institutions of different levels. The purpose of the study is to create a prototype of a simple and accessible information and analytical decision support system based on student performance for educational institutions of all levels. Through the use of general scientific methods of cognition – analysis, synthesis, comparison, the study solved a number of tasks. The article analyzes the experience of using various blocks of intelligent decision-making systems based on information technology, considers OLAP and Data Mining data processing technologies, and outlines the conceptual foundations of the model of functioning of an information and analytical system in a higher education institution based on student performance at the theoretical and hardware levels. The obtained results of the study can be further improved and implemented by IT specialists in practice not only within higher education institutions, but also within educational institutions of other levels, which are currently unable to use existing expensive systems, bringing the national education system closer to the current standards of the EU educational space.

Key words: intelligent decision-making systems, information infrastructure, educational institutions, technologies, management, OLAP, Data Mining.

Вступ

Відповідно до національного законодавства та стандартів ЄС, в Україні діє дворівнева система вищої освіти, згідно з якою кваліфікації «бакалавр» і «магістр» розглядаються як самостійні освітні рівні з окремими державними освітніми стандартами, вступними іспитами і самостійною підсумковою атестацією [7]. Однією з передумов приєднання України до розбудови європейського освітнього простору в рамках європейського стратегічного співробітництва у сфері освіти і навчання. стало забезпечення високої якості навчального процесу, внаслідок чого було сформульовано низку показників, що регламентують його ефективність. На сьогоднішній день стає дедалі актуальнішим розробка нових механізмів планування та організації навчального процесу в ЗВО з метою підтримки встановлених освітніх стандартів. Ці механізми побудовані на основі методів ефективного планування та управління ресурсним потенціалом вишу, збільшення якого веде до підвищення якості функціонування всього закладу в цілому, а отже, і забезпечення необхідних стандартів якості.

Одним із важливих етапів організації навчального процесу є контроль за успішністю студентів на кожному освітньому рівні. Інтелектуальний аналіз даних успішності студентів на всіх рівнях освіти

ЗВО окреслює загальний контингент і зацікавленість студентів ЗВО, від якого залежить кількість спеціальностей і освітніх напрямків, груп і потоків, загальне навантаження викладачів, кількість аудиторій, обсяг бюджетного фінансування та коштів, що надходять від студентів, які навчаються на комерційній основі тощо. Таким чином, інтелектуальний аналіз успішності студентів на всіх курсах навчання відіграє одну з основних ролей при пошуку рішень у цілком різних напрямках – від підтримки вирішення питань відносно окремого студента до кардинальної зміни навчального плану, а також при формуванні ресурсного потенціалу ЗВО. Виходячи з цього, в якості критерію ефективності коригування внесення зміни до навчального процесу і планування ресурсного потенціалу ЗВО, було обрано облік успішності студентів усіх рівнів навчання.

Проблематикою питань становлення і розвитку сучасних інформаційних технологій в системі навчання займаються такі вчені і дослідники, як В. Гогунський, Б. Голуб, Р. Кветний, В. Костяк, Т. Мазурок, Є. Паламарчук, Й. Петрович, Ю. Римар, С. Титенко та інші. Проте залишається актуальним питання щодо створення для закладів освіти всіх рівнів простої та доступної інформаційно-аналітичної системи підтримки прийняття рішень, що базується на обліку успішності студентів.

Загалом розвиток інформаційних технологій з урахуванням освітніх тенденцій вимагає використання в навчально-освітніх системах інтелектуалізації контролю знань [11, с. 54]. Комп'ютеризовані інформаційні системи дають можливість впорядкувати та автоматизувати освітню сферу діяльності, що допоможе відповідати освітнім стандартам ЄС [4; 5; 6] та дозволить позбавитися від зайвого паперового документообігу, що позитивно позначиться на продуктивності праці співробітників.

Метою цієї статті є окреслення концептуальних засад моделі функціонування інформаційно-аналітичної системи ЗВО, що базується на обліку успішності студентів.

Для вирішення поставленої мети будуть вирішені наступні завдання:

- розгляд архітектури інтелектуальних систем прийняття рішень (ІСПР);
- проведення аналізу технологій обробки даних;
- окреслення концептуальних засад моделі функціонування інформаційно-аналітичної системи підтримки прийняття рішень в ЗВО, що базується на обліку успішності студентів.

Архітектура інтелектуальних систем прийняття рішень (ІСПР)

У роботі [2] запропоновано загальну архітектуру інтелектуальної системи прийняття рішень, яка складається з таких трьох основних компонент, як блок вводу даних, блок зберігання інформації та блок аналізу (рис. 1). Ці складові блоки ІСПР виконують досить чіткі завдання, а саме – зручного і ефективного завантаження даних, зберігання (СУБД) і накопичення даних, та аналізу даних (сервіс звітності, OLAP- сервіс, Data Mining, та ін.).

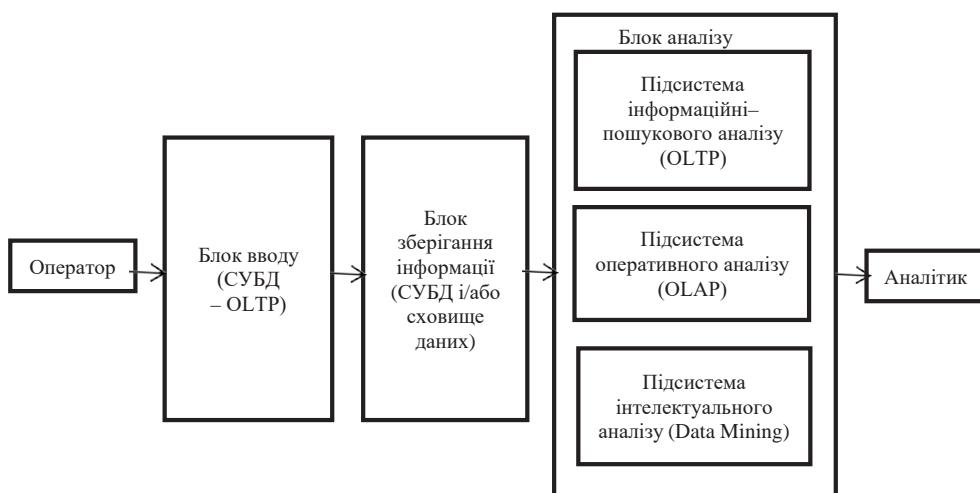


Рис. 1. Загальна архітектура інтелектуальної системи прийняття рішень (ІСПР) [2, с. 32]

Функції, що виконує ІСПР полягають в наступному:

- допомагають провести оцінку обстановки (ситуацій), здійснити вибір критеріїв та оцінити їхню відносну важливість;
- генерують можливі рішення (сценарії дій);
- здійснюють оцінку сценаріїв (дій, рішень) та обирають найкращий з них;

- забезпечують постійний обмін інформацією про обстановку рішень що приймаються та допомагають узгодити відповідні групові рішення;
- моделюють прийняті рішення (у випадках, коли це можливо);
- здійснюють динамічний комп'ютерний аналіз можливих наслідків прийнятих рішень;
- здійснюють збір даних про результати реалізації прийнятих рішень та здійснюють оцінку результатів.

Оперативний, ефективний, стратегічний та якісний аналіз забезпечується за допомогою системи підтримки прийняття рішень на основі накопиченої інформації з різних джерел. У блоці введення (OLTP) реалізується операційна обробка та реєстрація даних. Джерела отримання інформації можуть бути представлені документами в рукописному варіанті, електронними таблицями, локальними базами даних, автоматизованою системою управління ЗВО, єдиною державною електронною базою з питань освіти (ЄДЕБО). Таку інформацію необхідно інтегрувати в єдине сховище даних для прийняття рішення за показниками ефективності [2, с. 31].

Для реалізації зберігання інформації використовують бази даних (СУБД), а також концепцію сховища даних. Сховище даних – це предметно-орієнтований, інтегрований набір даних, який підтримує хронологію та організований з метою підтримки прийняття рішень.

Блок аналізу може бути представлений у вигляді:

- блоку інформаційно-пошукового аналізу на базі реляційних СУБД та статичних запитів SQL (Structured Query Language));
- блоку оперативного аналізу на основі використання технології оперативної аналітичної обробки даних у режимі реального часу OLAP;
- блоку інтелектуального аналізу даних, який використовує методи та алгоритми видобування даних або знань (Data/Knowledge Mining).

Технології обробки даних OLAP і Data Mining

Функцію підтримки інтелектуального прийняття рішень в ІСПР виконують блоки OLAP і Data Mining.

OLAP (Online Analytical Processing) є процесом оперативного аналізу і, водночас, є класом програмного забезпечення, що надає користувачеві можливість миттєво, в режимі реального часу отримувати відповіді на будь-які аналітичні запити. До класу OLAP відносять лише ті програми, які в якості зовнішнього інтерфейсу надають користувачеві багатовимірну керовану таблицю, а також обов'язково формують графічне відображення даних. OLAP системи покликані використовувати багатовимірні дані для допомагати аналітикам у перевірці гіпотез, які виникли у них під час аналітичної роботи. Це можуть буди перевірки гіпотез щодо перспективності освітніх програм, напрямків та спеціальностей, або, відповідно, їх безперспективність [3, с. 339].

Використання методів Data/Knowledge Mining для інформаційно-інтелектуальної підтримки прийняття рішень передбачає більш спрощену архітектуру, виключаючи з блоку аналізу тривіальну інформаційно-пошукову та оперативну обробку, оскільки підходи до її функціонування не можуть бути використані при реалізації алгоритмів видобутку даних і знань, тому що не відповідають їх принципам. Інакше кажучи, блок оперативного аналізу використовує відносно невелику кількість інформації з бази даних, як наприклад місячний чи квартальний звіти, в той час як системи з блоком інтелектуального аналізу обробляють накопичену інформацію мінімум за п'ять-десять років і використовують зовсім інший підхід, що допомагає значно прискорювати аналітичну обробку не зважаючи на об'єм фізичної пам'яті.

Data Mining – пошук неочевидних закономірностей. Інструменти Data Mining можуть знаходити такі закономірності і будувати гіпотези про взаємозв'язки самостійно. Оскільки формулювання гіпотези щодо залежностей є найскладнішим завданням, перевага Data Mining в порівнянні з іншими методами аналізу є очевидним [9, с. 4]. Для прикладу це можуть гіпотези про взаємозв'язки між тим з яких регіонів приїжджають студенти як з найгіршою, так і з найкращою успішністю.

Метод Data Mining виконує такі три основні функції: Data Base Mining (видобування даних), Knowledge Discovery (виявлення знань) та Intelligent Analysis Data (інтелектуальний аналіз даних).

Блок інтелектуального аналізу розв'язує наступні класи завдань:

- аналітичні – обчислення заданих показників та статистичних характеристик діяльності на основі ретроспективної (історичної) інформації з баз даних;
- візуалізація даних – наочне графічне та табличне подання наявної інформації;
- видобування знань – визначення взаємозв'язків та взаємозалежностей процесів на основі існуючої інформації;
- імітаційні – проведення на ЕОМ експериментів з математичними моделями, що описують поведінку складних систем протягом заданого або формованого інтервалу часу;
- синтез управління – використовується для визначення допустимих впливів управління, які забезпечують досягнення поставленої цілі;

– оптимізаційні – засновані на інтеграції імітаційних, управлінських, оптимізаційних та статичних методів моделювання та прогнозування [9, с. 16].

Data Mining – це процес підтримки прийняття рішень, що базується на пошуку в величезному масиві даних прихованих глибоких закономірностей. При цьому накопичені відомості автоматично узагальнюються до інформації, яка може бути охарактеризована як знання.

Процес інтелектуальної обробки даних складається з трьох стадій:

- виявлення закономірностей (вільний пошук);
- прогнозування – використання виявлених закономірностей для передбачення невідомих значень;
- аналіз винятків – виявлення та тлумачення аномалій у знайдених закономірностях.

Існують п'ять типів закономірностей, а саме – асоціація, послідовність, класифікація, кластеризація і прогнозування. Розглянемо їх більш детально [3, с. 337].

Асоціація (Associations) має місце тоді, якщо кілька подій пов'язані одна з одною.

Якщо існує ланцюжок пов'язаних у часі подій, то говорять про послідовність (Sequence).

За допомогою класифікації (Classification) виділяються ознаки, що характеризують групу, до якої належить той чи інший об'єкт. Це робиться у вигляді аналізу вже класифікованих об'єктів і формулювання деякого набору правил.

Кластеризація (Clustering) відрізняється від класифікації тим, що групи заздалегідь не задані. За допомогою кластеризації засобу Data Mining самостійно виділяють різні однорідні групи даних.

Основою для всіляких систем прогнозування (Forecasting) служить історична інформація, що зберігається у БД як тимчасових рядів. Якщо вдається побудувати шаблони, адекватно відбивають динаміку поведінки цільових показників, є можливість, що з допомогою можна передбачити і поведінка системи у майбутньому.



Рис. 2. Класи систем міждисциплінарної області Data Mining [3, с. 335]

Технологія Data Mining вивчає процес знаходження нових, дійсних і потенційно корисних знань в базах даних. Data Mining лежить на перетині кількох наук, головні з яких – це системи баз даних, статистика, штучний інтелект та ін. (рис. 2).

Хоча перевага Data Mining в порівнянні з іншими методами аналізу є безумовною, проте інтегрована технологія на основі поєднання OLAP і Data Mining зможе одночасно організувати як багатовимірний доступ, так і пошук закономірностей.

Концептуальні засади функціонування моделі інформаційно-аналітичної системи в ЗВО

На сьогоднішній день на ринку існує чимало готових платформ призначених для адаптивної аналітичної обробки різноманітних даних, таких як Microsoft Dynamic CRM, Analytic Workspace та багато інших, які вирізняються своєю багатофункціональністю але й високою вартістю (~ від 500 до 10 000 дол. США / міс.), а умовно безкоштовні аналоги не задовольняють необхідним потребам і критеріям. В декількох українських ЗВО впроваджується система електронного управління освітніми процесами JetIq, проте це не носить масового характеру, до того ж вона також вимагає суттєвого доопрацювання [8; 12]. Саме ці чинники стали поштовхом для пошуку шляхів розробки подібної надійної і відносно дешевої системи підтримки прийняття рішень для потреб ЗВО та закладів освіти інших рівнів.

Як зазначалося вище, облік успішності студентів усіх рівнів навчання є основним в ланцюгу «оцінка-студент-викладач-дисципліна-спеціальність-кафедра-факультет» і саме тому його було обрано в якості базового критерію ефективності коригування внесення змін до навчального процесу і планування ресурсного потенціалу ЗВО. В цьому випадку введення даних і наповнення відповідного сховища може відбуватися як вручну, так і автоматизовано у випадку проведення контролю успішності в комп'ютерному класі чи дистанційно.

Дані у сховищі можна структурувати у спосіб, який називається «зірка». Схема «зірка» має централизоване сховище даних, яке зберігається в таблиці фактів. Схема розбиває таблицю фактів на ряд денормалізованих таблиць вимірів. Таблиця фактів містить агреговані дані, які будуть використовуватися для складання звітів, а таблиці вимірів описують збережені дані (рис. 3). Денормалізовані проекти доволі не складні, тому що дані згруповані. Таблиця фактів використовує тільки одне посилання для приєднання до кожної таблиці вимірювань. Доволі проста конструкція зіркоподібної схеми значно спрощує написання складних запитів, і повинна виглядати наступним чином. [3, с. 338].

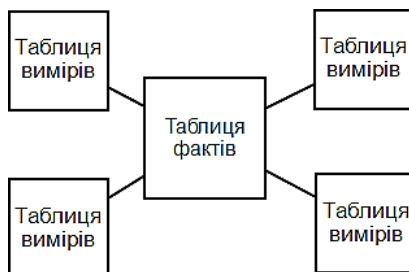


Рис. 3. Схема структурування сховища даних по типу «Зірка» [3, с. 338]

У нашому випадку таблиця Score є таблицею фактів, яка включатиме в себе такі виміри: «Студент» (Stud), «Вид контролю» (тестування, контрольна робота чи екзамен) (Type), «Дисципліна» (Disc), «Дата» (Date), «Викладач» (той хто проводив оцінювання) (Teach). В свою чергу, одержані студентами оцінки (Score) є факторами таблиці Score. Деякі з вимірів матимуть свою ієрархічну структуру. Так, п'ятирівневий вимір Stud виглядатиме як «Студент-Група-Потік-Спеціальність-Факультет». Дворівневий вимір Disc – як «Тип дисципліни (природничий, філологічний, ІТ, економічний, тощо)-Дисципліна». Дворівневий вимір Teach – як «Викладач-Кафедра» (рис. 4):

Традиційні методи аналізу даних в основному орієнтовані на перевірку наперед сформульованих гіпотез (статистичні методи) і на «грубий розвідувальний аналіз», що становить основу оперативної аналітичної обробки даних (Online Analytical Processing, OLAP) [3, с. 338].

Як було вище зазначено, OLAP (Online Analytical Processing) – це система аналітичної обробки даних, яка призначена для підготовки звітів, побудови прогностичних сценаріїв і виконання статистичних розрахунків на базі великих інформаційних масивів, що мають складну структуру [1]. Головна ідея даної системи полягає в побудові багатовимірних таблиць (так званих гіперкубів), які можуть бути доступними для запитів користувачів. Ці гіперкуби будуються на основі початкових і агрегованих даних, які можуть зберігатися як в реляційних, так і в багатовимірних базах даних [3, с. 339].

Існує три види архітектури OLAP-серверів:

- MOLAP (Multidimensional OLAP) – початкові і багатовимірні дані зберігаються в багатовимірній БД або в багатовимірному локальному кубі;
- ROLAP (Relational OLAP) – початкові дані зберігаються в реляційних БД або в плоских локальних таблицях на файл-сервері. Агрегатні дані можуть поміщатися в службові таблиці в тій же БД;
- HOLAP (Hybrid OLAP) – початкові дані залишаються в реляційній базі, а агрегати розміщуються в багатовимірній [10].

У нашому випадку для реалізації сховища даних доцільно застосовувати методології ROLAP використовуючи систему управління реляційними базами даних Microsoft SQL Server (2009-2019). Виходячи з необхідності вирішення поставлених завдань, дана система прийняття рішень може бути апаратно втілена з використанням середовища Microsoft .NET 4.8 в якості програмної платформи.

Створена за такими принципами система матиме досить широкі аналітичні можливості. Безпосередньо вона зможе візуалізувати одержані аналітичні дані у найрізноманітніших порівняльних графіках і статистичних діаграмах. Наприклад, система демонструватиме процентний вклад циклу дисциплін на загальний рейтинг студентів, класифікуватиме профорієнтацію студентів відповідно до областей тих наук, в яких вони успішні, вибудовуватиме необхідні освітні траєкторії, робитиме певні висновки про роботу викладачів, прогнозуватиме проблемні та бажані предмети для студентів, допомагатиме батькам краще орієнтуватися в освітніх тенденціях дітей тощо.

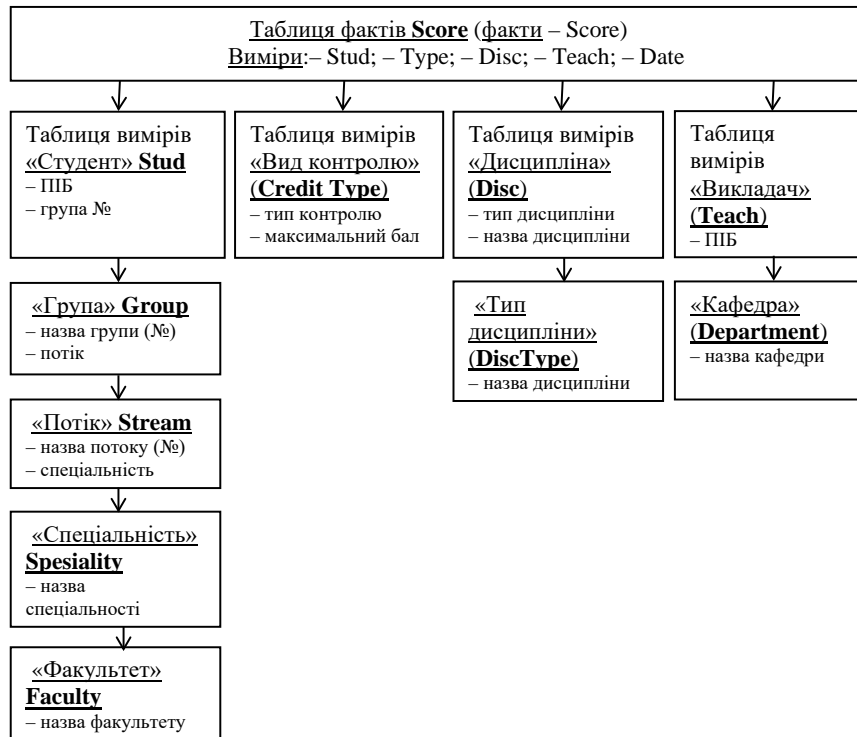


Рис. 4. Ієрархічна структура сховища даних. Джерело: складено авторами

Висновки

Окреслені на теоретичному та апаратному рівнях концептуальні засади моделі функціонування інформаційно-аналітичної системи підтримки прийняття рішень в ЗВО, що базується на обліку успішності студентів, дозволить кількісно оцінювати якість функціонування системи освіти. Облік успішності студентів усіх рівнів навчання є базовим в ланцюгу «оцінка-студент-викладач-дисципліна-спеціальність-кафедра-факультет», тому його було обрано в якості базового критерію ефективності коригування внесення змін до навчального процесу і планування ресурсного потенціалу ЗВО. Отримані результати дослідження в подальшому можуть бути удосконалені і реалізовані ІТ-спеціалістами на практиці в межах не лише ЗВО, але й у рамках освітніх закладів інших рівнів, які наразі не в змозі використовувати існуючі недешеві системи, наближаючи вітчизняну систему освіти до діючих стандартів освітнього простору ЄС.

Список використаних джерел:

1. Барсегян А. А., Куприянов М. С., Степаненко В. В., Холод И. И. Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining. 2004. 336 с.
2. Голуб Б.Л., Яшук Д.Ю. Загальні засади побудови системи підтримки прийняття рішень для ВНЗ. *Інформаційні управляючі системи у природничих університетах*. 2017. № 3. С. 29–35. URL: https://www.researchgate.net/publication/317229259_Zagalni_zasadi_pobudovi_sistemi_pidtrimki_prijnatta_risen_dla_VNZ#fullTextFileContent
3. Дубенко М.В., Кулаківський В.М Основні принципи Data Mining. *Інструментальне матеріалознавство*. 2021. № 1. Т. 24. С. 335–342. URL: <http://altis-ism.org.ua/index.php/ALTIS/issue/view/4>
4. Євроінтеграційний портал. Електронний ресурс. URL: <https://eu-ua.kmu.gov.ua/yevrointehratsiia/osvita>
5. Європейський простір вищої освіти: параметри якості та експертизи: *навчальний посібник*. Укладачі: Батченко Н. Г., Бульвінська О.І., Локшина О.І., та ін. За ред. Сисоєвої С.О. Київ. 2020. 152 с.
6. Європейський простір вищої освіти та Болонський процес: *Навчально-методичний посібник*. Димань Т.М., Боньковський О.А, Вовкогон А.Г. БНАУ. Одеса.: НУ «ОМА», 2017. 106 с.
7. Закон України “Про вищу освіту”. *Відомості Верховної Ради*. 2014. № 37–38. Стаття 2004 (зі змінами і доповненнями). Електронний ресурс. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1556-18>.
8. Концепція сучасного університету на основі інструментів електронної екосистеми управління освітніми процесами JETIQ ВНТУ. Р.Н. Кветний, Є.А. Паламарчук, О.В. Бісікало. О.О. Коваленко. *Вісник Національної академії педагогічних наук України*. 2022. 4 (2). URL: <https://doi.org/10.37472/v.naes.2022.4.220>
9. Марченко О.О., Россада Т.В. Актуальні проблеми Data Mining: *Навчальний посібник для студентів факультету комп’ютерних наук та кібернетики*. Київ. 2017. 150 с. URL: http://csc.knu.ua/media/filer_public/38/03/3803002b-e068-4a08-8a6c-a4edc183892a/datamining20170917.pdf
10. Миронов А.А., Мордвінов В.А., Скуратов А.К. Семантико-энтропийное управление OLAP и модели интеграции xOLAP в SemanticNET (ONTONET). *Информатизация образования и науки*. 2009. № 2. С. 21–29.

11. Титенко С.В. Комплекс моделей для побудови Web-системи безперервного навчання. *Наукові вісті НТУУ "КПІ"*. 2008. № 5. С. 54–66.

12. Y.A. Palamarchuk. Methods of building microservice architecture of E-learning systems. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2022. 1. С. 42–54.

References:

1. Barsehian, A.A., Kupryianov, M.S., Stepanenko, V.V., Kholod, Y.Y. (2004) *Metody y modely analiza dannykh: OLAP y Data Mining [Methods and models of data analysis: OLAP and Data Mining]*. BKhV-Petersburg, 2004, 336 p.

2. Holub B.L., Yashchuk D.Iu. (2017) *Zahalni zasady pobudovy systemy pidtrymky pryiniattia rishen dla VNZ [General principles of building a decision support system for universities]*. *Informatsiini upravliaiuchi systemy u pryrodnychkh universytetakh – Information management systems in universities of natural sciences*. 2017, 3. P. 29–35. URL: https://www.researchgate.net/publication/317229259_Zagalni_zasadi_pobudovi_sistemi_pidtrimki_prijnatta_risen_dla_VNZ#fullTextFileContent

3. Dubenko M.V., Kulakivskiy V.M. (2021) *Osnovni pryntsyipy Data Mining [Basic principles of Data Mining]*. *Instrumentalne materialoznavstvo – Instrumental material science*, 2021, 1, T. 24. P. 335–342. URL: <http://altis-ism.org.ua/index.php/ALTIS/issue/view/4>

4. *Yevrointehratsiinyi portal [European integration portal]*. *Elektronnyi resurs – Electronic resource*. URL: <https://eu-ua.kmu.gov.ua/yevrointehratsiia/osvita>

5. (2020) *Yevropeiskiyi prostir vyshchoi osvity: parametry yakosti ta ekspertyzy: navchalnyi posibnyk [The European Higher Education Area: parameters of quality and expertise: a study guide]*. Compilers: N. G. Batchenko, O. I. Bulvinska, O. I. Lokshina, and others. Under the editorship Sysoeva S.O. Kyiv. 2020. 152 p.

6. (2017) *Yevropeiskiyi prostir vyshchoi osvity ta Bolonskyyi protses: Navchalno-metodychniyi posibnyk [The European area of higher education and the Bologna process: Educational and methodological guide]*. Dyman T.M., Bonkovskiyi O.A, Vovkogan A.H. BNAU. Odesa.: NU "OMA", 2017. 106 p.

7. (2014) *Zakon Ukrainy "Pro vyshchu osvitu". Vidomosti Verkhovnoi Rady [Law of Ukraine "On Higher Education". Verkhovna Rada information]*. 2014. N. 37–38. Article 2004 (as amended). Electronic resource. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1556-18>.

8. (2022) *Kontseptsiia suchasnoho universytetu na osnovi instrumentiv elektronnoi ekosystemy upravlinnia osvitnimy protsesamy JETIQ VNTU [The concept of a modern university based on the JETIQ VNTU electronic ecosystem tools for managing educational processes]*. R.N. Kvyetny, E.A. Palamarchuk, O.V. Bisicalo O.O. Kovalenko. *Visnyk Natsionalnoi akademii pedahohichnykh nauk Ukrainy – Bulletin of the National Academy of Pedagogical Sciences of Ukraine*. 2022, 4 (2). URL: <https://doi.org/10.37472/v.naes.2022.4220>

9. (2017) *Aktualni problemy Data Mining: Navchalnyi posibnyk dla studentiv fakultetu kompiuternykh nauk ta kibernetiky [Current problems of Data Mining: Study guide for students of the Faculty of Computer Science and Cybernetics]* Marchenko O.O., Rossada T.V. Kyiv, 2017. 150 p. URL: http://csc.knu.ua/media/filer_public/38/03/3803002b-e068-4a08-8a6c-a4edc183892a/datamining20170917.pdf

10. Myronov A.A., Mordvynov V.A., Skuratov A.K. (2009) *Semantyko-entropiynoe upravlenye OLAP y modely yntehratsyy xOLAP v SemanticNET (ONTONET)*. [Semantic-entropy management of OLAP and xOLAP integration models in SemanticNET (ONTONET)]. *Ynformatyzatsiia obrazovanyia y nauky –Informatization of education and science*. 2009, N 2. P. 21–29.

11. Tytenko S.V. (2008) *Kompleks modelei dla pobudovy Web-systemy bezperernoho navchannia [A complex of models for building a Web-system of continuous learning]*. *Naukovi visti NTUU "KPI" – Scientific news of NTUU "KPI"*. 2008, N 5. P. 54–66.

12. Y.A. Palamarchuk (2022) *Methods of building microservice architecture of E-learning systems*. *Informatsiini tekhnolohii ta kompiuterna inzheneriia – Information technology and computer engineering*. 2022, 1. P. 42–54.

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ
ТА СУСПІЛЬСТВО**

**INFORMATION TECHNOLOGY
AND SOCIETY**

**ВИПУСК 1 (7)
ISSUE 1 (7)**

2023

*Коректура
Ірина Чудеснова*

*Комп'ютерна верстка
Наталія Кузнецова*

Формат 60x84/8. Гарнітура Cambria.
Папір офсет. Цифровий друк. Ум. друк. арк. 10,23. Замов. № 0723/475. Наклад 300 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»
65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглєзі, 6/1
Телефон +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК No 7623 від 22.06.2022 р.