

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

ВІСНИК

Харківського національного університету
імені В.Н. Каразіна

Серія

«Математичне моделювання.
Інформаційні технології.

Автоматизовані системи управління»

Випуск 54

Серія заснована 2003 р.

BULLETIN

of V.N. Karazin Kharkiv National University

Series

«Mathematical Modeling.
Information Technology.
Automated Control Systems»

Issue 54

First published in 2003

Харків
2022

Статті містять дослідження у галузі математичного моделювання та обчислювальних методів, інформаційних технологій, захисту інформації. Висвітлюються нові математичні методи дослідження та керування фізичними, технічними та інформаційними процесами, дослідження з програмування та комп'ютерного моделювання в наукоємних технологіях.

Для викладачів, наукових працівників, аспірантів, працюючих у відповідних або суміжних напрямках.

Наказом Міністерства освіти і науки України від 17.03.2020 № 409 наукове фахове періодичне видання Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління» включено до Категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України за наступними спеціальностями: 113 – Прикладна математика; 122 – Комп'ютерні науки та інформаційні технології; 123 – Комп'ютерна інженерія; 125 – Кібербезпека.

Затверджено до друку рішенням Вченої ради Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (протокол № 10 від 27.06.2022 р.)

Редакційна колегія:

Азаренков М.О. (гол. редактор),
д.ф.-м.н., академік НАН України, проф., ІВТ
ХНУ імені В.Н. Каразіна

Жолткевич Г.М. (заст. гол. редактора), д.т.н.,
проф. ФМІ ХНУ імені В.Н. Каразіна

Лазурик В.Т. (заст. гол. редактора), д.ф.-м.н.,
проф., ФКН ІВТ ХНУ імені В.Н. Каразіна

Споров О.Є. (відповідальний секретар), к.ф.-
м.н., доц. ФКН ІВТ ХНУ імені В.Н. Каразіна

Замула О. А., д.т.н., доц., ФКН ІВТ ХНУ імені
В.Н. Каразіна

Золотарьов В.О., д.ф.-м.н., проф., ФТІНТ
імені Б.І. Веркіна НАН України

Куклін В.М., д.ф.-м.н., проф., ФКН ІВТ ХНУ
імені В.Н. Каразіна

Мацевитий Ю.М., д.т.н., академік НАН
України, проф., фізико-енергетичний ф-т ХНУ
імені В.Н. Каразіна

Рассомахін С. Г., д.т.н., доц., ФКН ІВТ ХНУ
імені В.Н. Каразіна

Руткас А.Г., д.ф.-м.н., проф., ФМІ ХНУ імені
В. Н. Каразіна

Стервєдєв М.Г., к.т.н., доц., ФКН ІВТ ХНУ
імені В.Н. Каразіна

Толстолузька О. Г. д.т.н., с.н.с., доц., ФКН
ІВТ ХНУ імені В.Н. Каразіна

Угрюмов М. Л., д.т.н., проф., ІВТ ХНУ імені
В.Н. Каразіна

Шейко Т.І., д.т.н., проф., фізико-
енергетичний ф-т ХНУ імені В.Н. Каразіна

Шматков С. І., д.т.н., проф., ФКН ІВТ ХНУ
імені В.Н. Каразіна

Щербина В.А., д.ф.-м.н., проф., ФМІ ХНУ
імені В.Н. Каразіна

Раскін Л.Г., д.т.н., проф., Національний
технічний університет "ХПІ"

Стрельнікова О.О., д.т.н., проф. Ін-т
проблем машинобудування НАН України

Соколов О.Ю., д.т.н., проф., кафедра
прикладної інформатики, університет імені
Миколая Коперника, м. Торунь (Польща)

Prof. **Harald Richter**, Dr.-Ing., Dr. rer. nat.
habil. Professor of Technical Informatics and
Computer Systems, Institute of Informatics,
Technical University of Clausthal, Germany

Prof. **Philippe Lahire**, Dr. habil., Professor of
computer science, Dep. of C. S., University of
Nice-Sophia Antipolis, France

Адреса редакційної колегії: 61022, м. Харків, майдан Свободи, 6, ХНУ імені В. Н. Каразіна,
к. 534.

Тел. +380 (57) 705-42-81, Email: journal-mia@karazin.ua.

Мова публікації: українська, англійська, російська.

Статті пройшли внутрішнє та зовнішнє рецензування.

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 21578-11478 Р від 18.08.2015.

The articles are present research in the field of mathematical modeling and computing methods, information technologies, information security. New mathematical methods of research and management of physical, technical and information processes, research on programming and computer modeling in science-intensive technologies are covered.

For teachers, researchers, graduate students working in relevant or related fields.

By the order of the Ministry of Education and Science of Ukraine from 17.03.2020 № 409 scientific professional periodical Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University series "Mathematical modeling. Information Technologies. Automated control systems" is included in Category "B" of the List of scientific professional publications of Ukraine in the following specialties: 113 – Applied Mathematics, 122 – Computer Science and Information Technology; 123 – Computer engineering; 125 – Cybersecurity.

Approved for publication by the decision of the Academic Council of V.N. Karazin Kharkiv National University (Minutes № 710 of 27.06.2022).

Editorial Board:

Azarenkov M.O. (Chief Editor), Acad. Of the NAS of Ukraine, Dr. Sc., Prof., HTI V.N. Karazin Kharkiv National University

Zholtkevich G.M. (Deputy Editor), Dr. Sc, Prof. MCS V.N. Karazin Kharkiv National University

Lazurik V.T. (Deputy Editor), Dr. Sc, Prof. CSD HTI V.N. Karazin Kharkiv National University

Sporov O.E., (Executive Secretary), Ph.D. Assoc. Prof, CSD HTI V.N. Karazin Kharkiv National University

Zamula A.A., Ph.D. Assoc. Prof, CSD HTI V.N. Karazin Kharkiv National University

Zolotarev V.A., Dr. Sc, Prof. B. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine

Kuklin V.M., Dr. Sc, Prof. CSD HTI V.N. Karazin Kharkiv National University

Matsevity Yu.M., Acad. Of the NAS of Ukraine, Dr. Sc., Prof., DPE V.N. Karazin Kharkiv National University

Rossomakhin S.G., Dr. Sc, Prof. CSD HTI V.N. Karazin Kharkiv National University

Rutkas A.G., Dr. Sc, Prof. MCS V.N. Karazin Kharkiv National University

Styervoyedov N.G., Ph.D. Assoc. Prof, CSD HTI V.N. Karazin Kharkiv National University

Tolstoluzka O.G., Dr. Sc, Assoc. Prof. CSD HTI V.N. Karazin Kharkiv National University

Ugryumov M.L., Dr. Sc, Prof. HTI V.N. Karazin Kharkiv National University

Sheyko T.I., Dr. Sc, Prof. DPE V.N. Karazin Kharkiv National University

Shmatkov S.I., Dr. Sc, Prof. CSD HTI V.N. Karazin Kharkiv National University

Shcherbina V.A., Dr. Sc, Prof. MCS V.N. Karazin Kharkiv National University

Raskin L.G., Dr. Sc, Prof. National Technical University "Kharkiv Polytechnic institute"

Strelnikova E.A., Dr. Sc, Prof., NASU A. Pidgorny Institute of Engineering Problems

Sokolov O.Yu., Dr. Sc, Prof. Nicolaus Copernicus University, Torun, Poland

Prof. **Harald Richter**, Dr.-Ing., Dr. rer. nat. habil. Professor of Technical Informatics and Computer Systems, Institute of Informatics, Technical University of Clausthal, Germany

Prof. **Philippe Lahire**, Dr. habil., Professor of computer science, Dep. of C. S., University of Nice-Sophia Antipolis, France

Editorial Address: 61022, Kharkiv, Svobodi sq., 6, V.N. Karazin Kharkiv National University, r. 534.

Phone. +380 (57) 705-42-81, Email: journal-mia@karazin.ua.

Language of publication: Ukrainian, English, Russian.

The articles pass internal and external review.

Certificate of state registration: KV № 21578-11478P dated 18.08.2015

ЗМІСТ

- **Волошина К.І., Кізілова Н.М., Кіпоренко П.В.** 6
Дослідження динаміки чотирьох хвиль covid-19 в країнах Європи
- **Дейнега Т. С., Сватовський І. І.** 16
Дослідження застосування алгоритмів штучного інтелекту в системах виявлення/запобігання вторгнень
- **Лапідан К.Є., Лістрова Д.В., Руденко Т.М., Шелудько Г.А.** 27
Адаптивний гібридний метод оптимізації яружних функцій стосовно до задачі вагової мінімізації лопаті повітряної установки
- Мелкозьорова О. М., Рассомахін С. Г., Шлокін В. М.** 35
Застосування методу ортогонального розкладення в алгебраїчній сепарації
- **Ричак Н.Л., Кізілова Н.М.** 44
Математичне моделювання динаміки водних екосистем і можливостей їх самоочищення за умовами глобальних змін клімату
- **Чуб О.І., Новожилова М.В.** 51
Моделювання інформаційних потоків у середовищі Software Carpentry

CONTENTS

▪ Voloshyna K., Kizilova N., Kiporenko P.	6
Investigation of the dynamics of four waves covid-19 in European countries	
▪ Deineha T. S., Svatovskiy I. I.	16
Research of using the artificial intelligence algorithms in intrusion detection/prevention systems	
▪ Lapitan K. E., Listrova D. V., Rudenko T. M., Sheludko G. A.	27
Adaptive hybrid optimization method for valley functions in weight minimization problems for wind turbine blades	
▪ Melkozerova O. M., Rassomakhin S. G., Shlokin V. N.	35
The application of the orthogonal decomposition method for the algebraic solver separator	
▪ Rychak N., Kizilova N.	44
Mathematical modeling of the dynamics of aquatic ecosystems and the possibilities of their self-cleaning at the conditions of global climate change	
Chub O., Novozhylova M.	51
Modelling of information flows in the Software Carpentry environment	

УДК 001.891.572+004.942

Дослідження динаміки чотирьох хвиль covid-19 в країнах Європи

К.І. Волошина, Н.М. Кізілова, П.В. Кіпоренко

**Волошина
Катерина Ігорівна**

*студентка, кафедра прикладної математики, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, пл. Свободи, 4, Харків-22, Україна, 61022;
e-mail: Kate0410999@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-4218-8705>*

**Кізілова
Наталія Миколаївна**

*д.ф.-м.н., професор; професор кафедри прикладної математики, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, пл. Свободи, 4, Харків-22, Україна, 61022;
e-mail: n.kizilova@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-9981-7616>*

**Кіпоренко
Поліна Валеріївна**

*студентка, кафедра прикладної математики, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, пл. Свободи, 4, Харків-22, Україна, 61022;
e-mail: kipolly1006@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-4351-2957>*

Розглядаються особливості динаміки послідовних хвиль пандемії covid-19 в Україні та інших країнах Європи методами дослідження часових рядів. Для отриманих з відкритих джерел кривих щоденних нових випадків захворілих $I(t)$, померлих $D(t)$ і одужалих $R(t)$ були виділені осереднені і осцилюючі складові. Аналіз спектру показав наявність у всіх країн головної гармоніки з періодом $T=7$ діб, яка пов'язана з особливостями тижневої роботи медичних і статистичних закладів. В ряді країн виявлені ознаки хаотичної динаміки у вигляді значних амплітуд сусідніх гармонік та значних неочікуваних змін фазових зсувів між ними. Отримані статистично достовірні експоненціальні наближення кривих $I(t)$, $D(t)$ на стадіях швидкого і повільного зростання і швидкого і повільного зменшення числа випадків для кожної з чотирьох хвиль covid-19 в країнах Європи. Ці наближення були використані для валідації математичної моделі SEIRS розповсюдження епідемії в даній країні. Отримані специфічні для країни моделі у вигляді систем звичайних диференціальних рівнянь можуть бути використані для більш детального дослідження динаміки кожної з хвиль та прогнозування подальшої динаміки covid-19 в країні.

Ключові слова: математична епідеміологія, covid-19, аналіз «великих даних», гармонійний аналіз, стохастична динаміка

Investigation of the dynamics of four waves covid-19 in European countries

Voloshyna Kateryna

*student
V.N. Karazin Kharkov National University, 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022,
Ukraine*

Kizilova Nataliya

*Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor; Professor of the
Department of Applied Mathematics
V.N. Karazin Kharkov National University, 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022,
Ukraine*

Kiporenko Polina

*student
V.N. Karazin Kharkov National University, 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022,
Ukraine*

The peculiarities of the dynamics of successive waves of the covid-19 pandemic in Ukraine and other European countries have been considered by the methods of time series analyses. Both the oscillatory harmonic and growing non-harmonic dynamics have been detected. The curves of daily new cases of infected $I(t)$, deceased $D(t)$ and recovered $R(t)$ individuals have been obtained from open sources and the mean and oscillating components have been identified. For the most countries the mean components of the curves $I(t)$ and $D(t)$ exhibit a small shift in 1-3 weeks that corresponds to the incubation period of the disease. The analysis of the spectrum of the oscillating components has showed that all countries have a fundamental harmonic with a period of $T = 7$ days, associated with the specifics of the working week of medical and statistical institutions. The rest of the harmonics in most countries turns out to have been close to zero, which corresponds to random errors in the collection of statistical data for the country's institutions. In a number of countries, signs of chaotic dynamics in the form of large amplitudes of neighboring harmonics and significant unexpected changes in the phase shifts between them have been revealed. Statistically reliable exponential approximations of the $I(t)$ and $D(t)$ curves at the stages of the fast and slow growth as well as fast and slow decrease in the number of cases for each of the four covid-19 waves in European countries have been obtained. The obtained approximations have been used for validation of the SEIRS mathematical model of the epidemic spread for a given country. The

resulting country-specific models in the form of the systems of ordinary differential equations can be used for studying the dynamics of each wave in detail, and for predicting the further dynamics of covid-19 in the country.

Keywords: *mathematical epidemiology, covid-19, Big Data analysis, harmonic analysis, stochastic dynamics.*

1 Вступ

Пандемія covid-19 стала одним із важливіших викликів сучасності, який продовжує низку спалахів бактеріальних і вірусних інфекцій, які переслідують людство протягом всієї історії розвитку [1]. Нинішня пандемія почалася в Китаї в грудні 2019 р. і на наступний час охопила 223 країни і регіони. В більшості країн триває або розпочинається четверта хвиля, яка найчастіше пов'язана з модифікацією «дельта» початкового штаму, а також і з новим різновидом «омікрон». Налічується майже 248.5 млн. захворілих, більше 5 млн. померлих і більше 225 млн. одужалих, які можуть отримати повторне зараження новими штамми. Моніторинг і аналіз динаміки кожної з хвиль пандемії дозволяє проаналізувати особливості розповсюдження хвороби на території кожної країни або на таких замкнених локаціях, як острови. Протягом 2020-2021 рр. були опубліковані результати аналізу даних пандемії в Індонезії [2], Японії і Південній Кореї [3], Китаю [4], США [5], Канаді [6], країнах Європи [7] та ряду інших. Досліджений вплив загального індексу розвинення країни, ступеню фінансування медицини, здоров'я населення та рідку соціально-економічних факторів на динаміку кривих захворюваності в різних країнах [8].

Закономірності, які знайдені шляхом обробки інформації у вигляді часових рядів, використовуються для подальшої розробки більш точних математичних моделей динаміки епідемій, які враховують особливості даного захворювання, а також для прогнозування, стабілізації і контролювання динаміки [6]. В даній роботі проведений аналіз кривих динаміки covid-19 для України і ряду сусідніх країн Європи для виявлення спільної динаміки або різних типів динамічної поведінки, а також прогнозування подальшої динаміки на математичній моделі SEIRS з використанням даних статистичного аналізу.

2 Статистичний аналіз часових рядів

В роботі вивчаються дані щоденних вимірювань кількості нових випадків захворювань $I(t)$, у яких наявність covid-19 підтверджена тестуванням; кількості смертних випадків від ускладнень covid-19 $D(t)$, кількості одужалих $R(t)$, протестованих $T(t)$, вакцинованих $V(t)$, у порівнянні із загальною кількістю населення $S(t)$, країни, яке може захворіти на covid-19. Офіційна статистика пандемії по країнам Європи в цілому починається з 22 січня 2020 р., хоча початок постійної щоденної реєстрації в різних країнах відрізняється. Так, в Україні це 3 березня 2020 р. Для цілей порівняльного аналізу обиралися дані, нормалізовані на чисельність населення станом на 2019 р., до початку пандемії. Всі дані наявні у відкритих джерелах¹.

На Рис. 1а,б наведені для порівняння згладжені нормалізовані криві $I(t)$ (Рис. 1а) і $D(t)$ (Рис. 1б) для України і деяких країн Європи. Видно, що динаміка поширення епідемії в деяких країнах суттєво відрізняється. Максимуми другої і третьої «хвиль» практично збігаються у Франції, Італії, Польщі, Великобританії і трохи запізнюються – у Німеччині і Україні. Амплітуди хвиль значно вищі у Франції, Італії, Польщі, Великобританії і значно нижчі – в інших країнах. Загальна динаміка по країнам Європи відображує сумарний вклад всіх країн і тому має складнішу багато хвильову динаміку. Максимуми кривих $D(t)$ часто майже збігаються, наприклад для першої хвилі (максимуми припадали на 31.03 – 16.05.2020 р.), другої (18.11.2020 – 23.01.2021 р.) і третьої (8.04 – 28.04.2021 р.) хвиль. Порівняння кривих $I(t)$ і $D(t)$ для кожної з країн показує, що максимуми кривих під час деяких хвиль зсунуті на 1-3 тижні, що відповідає часу розвинення різних штамів covid-19 (інкубаційний період розвинення інфекційної хвороби) та деяким іншим факторам [8].

¹ <https://www.worldometers.info/coronavirus/>
<https://ourworldindata.org/coronavirus>
<https://covid19.who.int/>

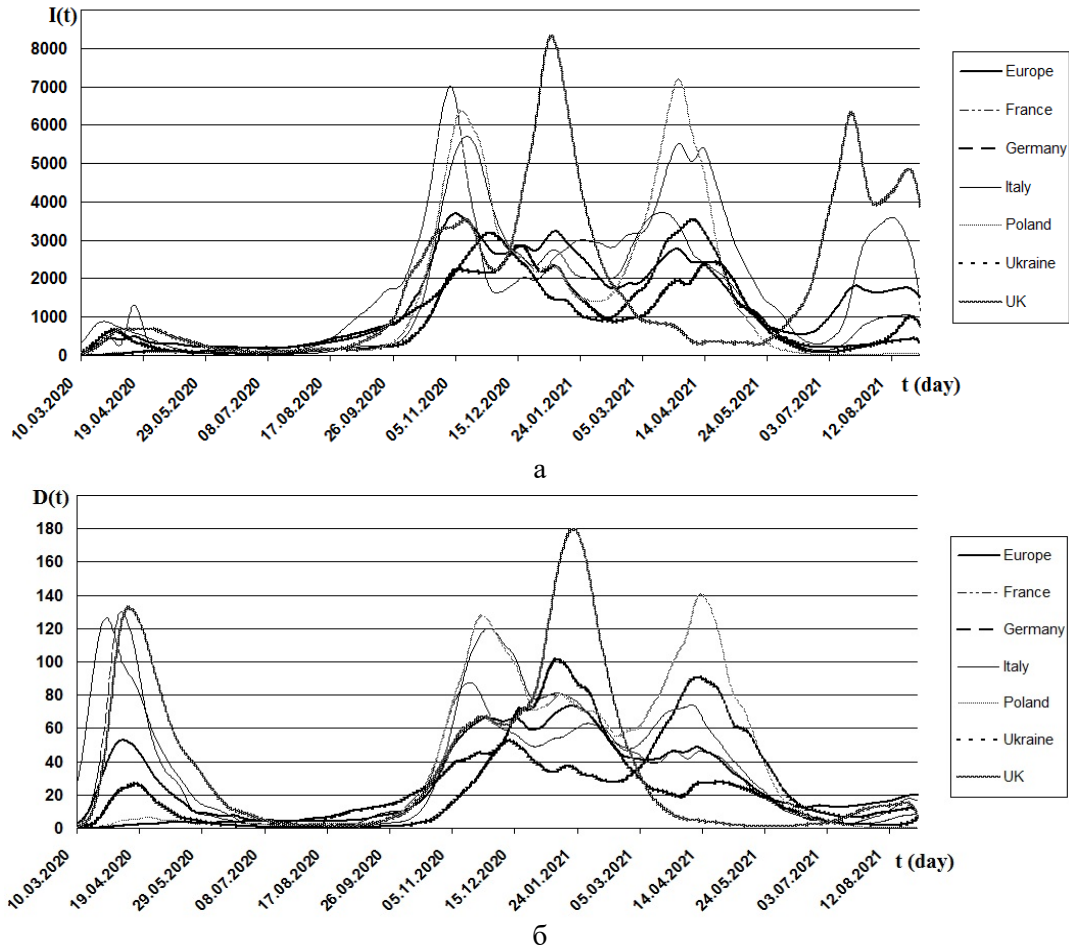


Рис.1 Різні типи динаміки кривих $I(t)$ (а) і $D(t)$ (б) в країнах Європи.

Порівняння початкових даних (щоденні дані) і відповідних кривих, згладжених методом ковзаючого середнього з вікном у 7 днів (загальноприйнятий підхід у відкритих джерелах даних¹) дозволяє обчислити відповідні осциляції

$$I_{osc}(t) = I(t) - \langle I(t) \rangle, \quad D_{osc}(t) = D(t) - \langle D(t) \rangle.$$

Приклад результатів обчислення наведений на Рис.2 для випадку України. Найбільш значні друга і третя хвилі мають чіткі максимуми, а швидкості зростання та зменшення числа нових випадків близькі (Рис.2а). Коливання чисельності нових випадків значно вище в третю хвилю, ніж у другу (Рис.2б), що може бути пов'язано як з недосконалістю або перевантаженістю системи контролю, так і з іншими чинниками.

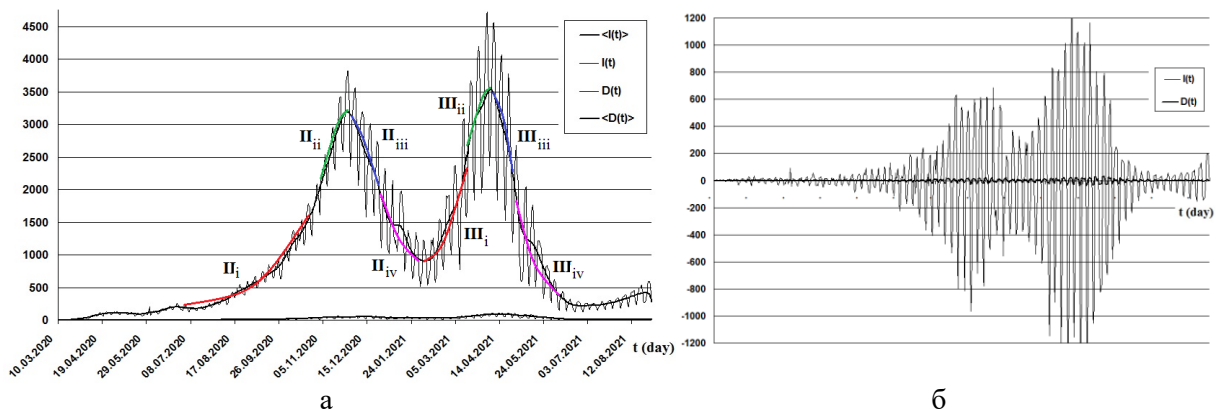


Рис.2 Вихідні і осереднені криві для нових випадків ($I(t)$, $\langle I(t) \rangle$) і для померлих ($D(t)$, $\langle D(t) \rangle$) (а) і відповідні хвильові компоненти (б); позначення i, ii, iii, iv відповідають різним стадіям хвилі.

Був проведений спектральний аналіз кривих $I_{osc}(t), D_{osc}(t)$ для України та сусідніх країн Європи. Коефіцієнти розкладення кривих в ряди Фур'є обчислювалися за формулами Ейлера для періодів коливань $T=2-21$ доби. Сезонні коливання з періодами >1 місяця не досліджувалися в силу недостатньо довгого періоду загальних спостережень. Результати розрахунків коефіцієнтів A_j, B_j розкладень по функціям $\cos(\omega_j t), \sin(\omega_j t)$ згладжених часових рядів $I_{osc}(t), D_{osc}(t)$ показали значно вищі амплітуди коливань для 2-4 хвиль і малі амплітуди, які знаходяться на межі погрішностей вимірювань, - для довгоперіодичних коливань з $T>10-14$ діб (Рис.3а).

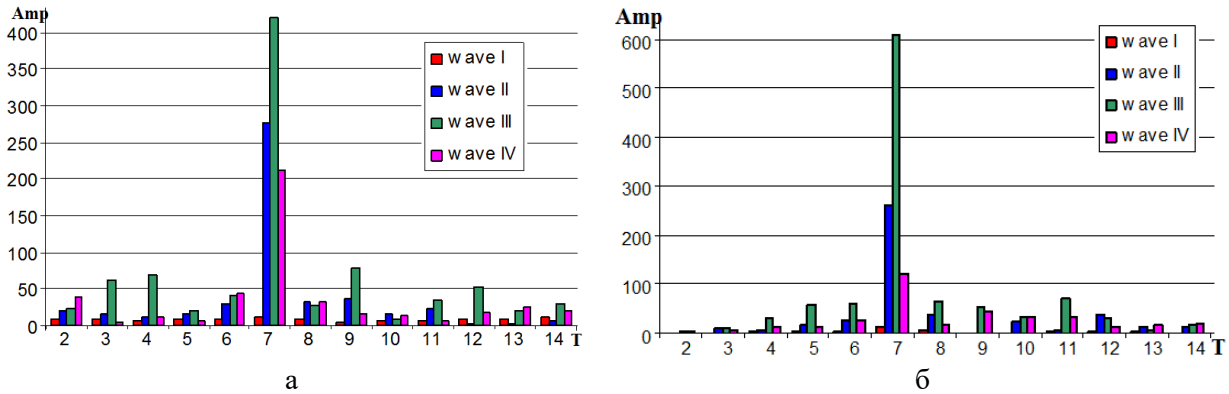
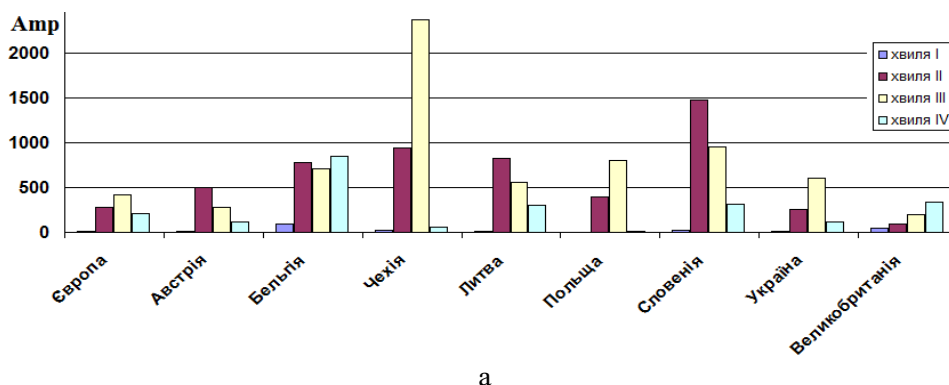


Рис.3 Спектр коливань кривих $I_{osc}(t)$ для Європи (а) і України (б).

Амплітуди коливань з періодом $T=7$ діб відрізняються не тільки в різних країнах Європи, але й протягом різних хвиль (I-IV хвилі) в одній країні (Рис.4), що вказує на різні рівні підготовленості і напруженості систем медичної допомоги і контролю в країнах. Слід відмітити, що значність 7-денної компоненти в коливаннях числа нових випадків хвороби схожа в більшості країн Європи та в Європі в цілому (Рис.4а), але в статистиці смертельних випадків може відрізнятись в деяких країнах як в бік збільшення, так і зменшення (Рис.4б). Ця компонента не має математичного обґрунтування і тому значно ускладнює аналіз статистичних даних з метою виявлення закономірностей і формулювання математичної моделі.

Для цілей аналізу даних, пов'язаних саме з розповсюдженням вірусу, а не з особливостями статистичної служби в різних країнах, ця компонента з відповідною амплітудою була видалена з нормалізованих осереднених рядів даних $I_{osc}(t), D_{osc}(t), T_{osc}(t), V_{osc}(t), R_{osc}(t)$. Спектральний аналіз амплітуд $Amp_j = \sqrt{A_j^2 + B_j^2}$ і фазових зсувів $\varphi_j = \arctg(B_j / A_j)$ отриманих осциляцій показав, що в більшості країн амплітуди і зсуви фаз інших компонентів $T_j = 2 - 6, 7, 8 - 21$ незначні, але в деяких країнах спостерігаються хаотичні стрибки обох параметрів від гармоніки до гармоніки, що відповідає можливості хаотичної динаміки. На Рис.5 наведений приклад такої динамічної поведінки для Словенії. Амплітуда окремих гармонік змінюється в різних хвилях (Рис.5а), а зсуви фаз немонотонно зростають з номером гармоніки для майже всіх значень $j=2-21$ (Рис.5б). Така динамічна поведінка може вказувати як на специфіку розповсюдженні вірусу, так і на недостатність соціально-економічних заходів протидії пандемії.



а

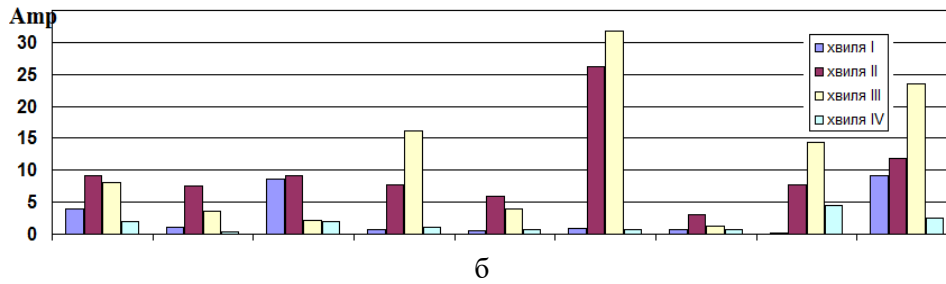


Рис.4 Амплітуди спектрів кривих $I_{osc}(t)$ (а) і $D_{osc}(t)$ (б) з періодом $T=7$ діб.

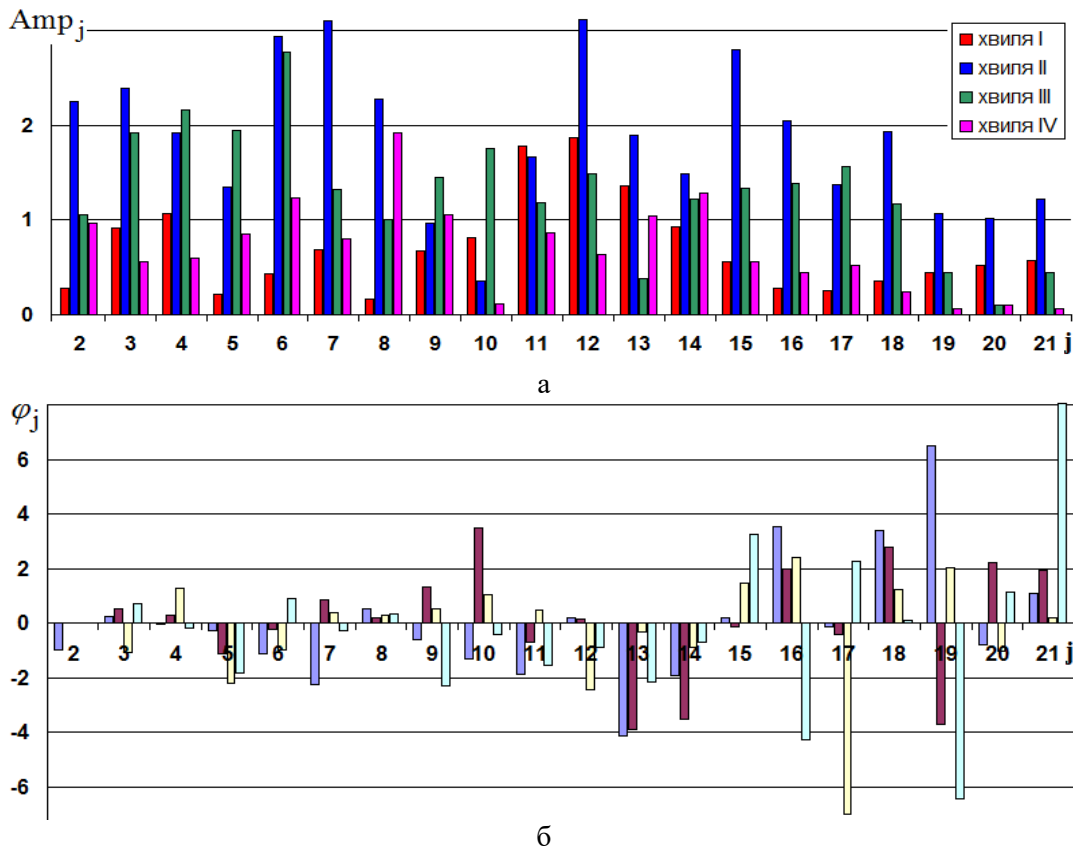


Рис.5 Амплітуди (а) і зсуви фаз (б) спектру кривих $D_{osc}(t)$ для Словенії.

Для кожної з хвиль I-III кожної з досліджених країн Європи були отримані статистичні апроксимації ділянок експоненціального зростання і спадання осереднених кривих $I(t)$ і $D(t)$, а саме стадій швидкого (i) і повільного (ii) зростання, швидкого (iii) і повільного (iv) зменшення числа випадків в кожній із хвиль (Рис.2а) у вигляді залежностей $I_k(t) = a_{1k} \exp(b_{1k}t)$, $D_k(t) = a_{2k} \exp(b_{2k}t)$, де $k = \{i, ii, iii, iv\}$, $a_{1k}, b_{1k}, a_{2k}, b_{2k} = \text{const}$. Отримані залежності будуть використані для валідації математичної моделі пандемії у кожній країні.

3 Математичні моделі динаміки популяцій

Ще в 1760-1766 рр. відомий математик і механік Д. Бернуллі вивчав можливість збільшення тривалості життя шляхом ліквідації віспи, яка на той час була однією з головних причин смерті [9]. Пізніше, в 1798 р. Т. Мальтус розробив математичну модель експоненціального зростання чисельності населення без обмежень ресурсів. В 1838 р П.-Ф. Ферхюльст запропонував логістичну криву, яка відповідала самообмеженого зростання колонії бактерій, коли швидкість розмноження пропорційна як чисельності популяції, так і кількості доступних ресурсів (тепла, світла, кисню, живильних речовин тощо).

В 1870-х рр. Р. Кох і Л. Пастер підтвердили, що інфекційні захворювання викликаються мікроорганізмами. Такі захворювання вивчали шляхом аналізу кривих захворілих та померлих.

На початку 1900-х рр. Дж. Сноу висунув гіпотезу, що епідемії закінчуються, коли доступність сприйнятливих осіб зменшується. В 1906 р. В. Хамер визначив дворічний період для міських спалахів захворювань на кір, і пояснив цю динаміку гіпотезою Сноу. В 1911 р. епідеміолог А. МакКендрік заново відкрив логістичну модель Ферхюльста для зростання бактерій і експериментально оцінив нелінійний параметр цієї моделі. З цього часу розпочався бурхливий розвиток математичної теорії епідемій. В 1916 р. Р. Росс вперше застосував теорію ймовірності до опису динаміки передачі інфекції. В 1925 р. А. Лотка заново відкрив логістичне рівняння і назвав його законом зростання населення, а в 1926 р. В. Вольтерра запропонував двокомпонентну модель динаміки популяцій вигляду «хижак-жертва». В 1927 р. Кермак і МакКендрік запропонували аналогічну трикомпонентну модель для динаміки поширення інфекційного захворювання у вигляді системи звичайних диференціальних рівнянь (ЗДР) [10]

$$\frac{dx}{dt} = -axy, \quad \frac{dy}{dt} = axy - by, \quad \frac{dz}{dt} = by, \quad (1)$$

з початковими умовами

$$x(0) = x_0, \quad y(0) = y_0, \quad z(0) = z_0, \quad (2)$$

де x – кількість здорових, y – хворих, z – вибули з класу y , тобто одужали або померли, причому $x + y + z = N$, де N - чисельність популяції (населення).

У цій моделі було вперше застосовано статистичну фізику та «закон діючих мас» для опису передачі інфекції в результаті соціального контакту між інфікованими (I) та сприйнятливими (S) людьми. МакКендрік висунув гіпотезу, що популяція поводить як сукупність «частинок» різних типів, які випадковим чином рухаються в навколишньому середовищі, де кожне «зіткнення» між частинками з груп S і I має однакову ймовірність того, що частинка S-типу перетвориться на частинку I-типу. Був отриманий розв'язок (1), (2) і порівняний з кривими епідемії грипу «іспанка» в різних країнах Європи. Буди визначені набори значень параметрів (a,b) моделі, які із задовільною точністю описували як зростання числа хворих і померлих, так і спад епідемії. Пізніше ця модель була названа SIR-model (Susceptible – Infected – Recovered), а число померлих обчислювалося як $D = N - S - I - R$.

Особливості динаміки covid-19 пов'язані з тим, що в результаті «зіткнень» з інфікованою людиною деякі з індивідів з групи S можуть бути носіями інфекції, які не мають жодної прояви захворювання, або перенести її в легкій формі. Крім того, індивіди, які перенесли ковід, можуть через деякий, навіть достатньо короткий час, бути інфікованими і захворіти повторно, тобто частина осіб з класу R знов попадає до класу S [11]. Для опису такої динаміки введена модифікація SEIR-model, яка включає додаткову групу експонованих осіб $E(t)$ (exposed). Система рівнянь моделі SEIR і початкові умови для неї мають вигляд [8,11]

$$\frac{dS}{dt} = \lambda - \beta SI + \delta R - \alpha S, \quad \frac{dE}{dt} = \beta SI - (\alpha + \psi)E, \quad (3)$$

$$\frac{dI}{dt} = \psi E - \gamma I - \phi I, \quad \frac{dR}{dt} = \gamma I - (\alpha + \delta)R, \quad (4)$$

$$S(0) = S_0, \quad E(0) = E_0, \quad I(0) = I_0, \quad R(0) = R_0,$$

де λ і α - природні народжуваність та смертність, які беруться для кожної області/регіону/країни з демографічних таблиць 2019 р., β , ψ і γ - коефіцієнти експозиції, захворюваності і одужання, ϕ - смертність від ковіду, δ - доля перехворілих, які можуть бути інфіковані повторно; усі значення обчислюються на 1 млн. населення країни.

Для чисельності померлих $D = N - S - E - I - R$ з (3) маємо

$$\frac{dD}{dt} = \alpha(S + E + R) + \phi I, \quad (5)$$

де другий доданок в правій частині відповідає смертності від ковіду, а перший – від інших причин.

Сума рівнянь (3), (5) дає для чисельності населення рівняння лінійного зростання $\frac{dN}{dt} = \lambda$.

Система (3) має дві стаціонарні точки

$$1) S^0 = \frac{\lambda}{\alpha}, \quad E^0 = I^0 = R^0 = 0,$$

(6)

$$2) \quad \begin{aligned} I^0 &= \frac{((\alpha + \psi)(\gamma + \alpha + \phi)\alpha - \lambda\psi\beta)(\alpha + \delta)}{\beta(\delta\gamma\psi - (\alpha + \delta)(\alpha + \psi)(\gamma + \alpha + \phi))}, & E^0 &= \frac{(\gamma + \alpha + \phi)I^0}{\psi}, & R^0 &= \frac{\gamma I^0}{(\alpha + \delta)}, \\ S^0 &= \frac{\lambda}{\alpha} + \left(\frac{\delta\gamma}{\alpha(\alpha + \delta)} - \frac{(\alpha + \psi)(\gamma + \alpha + \phi)}{\alpha\psi} \right) I^0, \end{aligned} \quad (7)$$

з яких перша відповідає випадку відсутності епідемії, а друга - постійному числу хворих і одужалих.

Стійкість і динамічну поведінку системи ЗДУ (3) навколо стаціонарної точки можна дослідити якщо знайти розв'язок (3) у вигляді

$$\begin{aligned} S(t) &= S^0 + S^t(t), & S^t(t) &= A_S \cos(\omega t) + B_S \sin(\omega t), \\ E(t) &= E^0 + E^t(t), & E^t(t) &= A_E \cos(\omega t) + B_E \sin(\omega t), \\ I(t) &= I^0 + I^t(t), & I^t(t) &= A_I \cos(\omega t) + B_I \sin(\omega t), \\ R(t) &= R^0 + R^t(t), & R^t(t) &= A_R \cos(\omega t) + B_R \sin(\omega t), \end{aligned} \quad (8)$$

де осцилюючі компоненти S^t, E^t, I^t, R^t можна знайти з лінеаризованої навколо стаціонарної точки системи (3) у вигляді

$$\begin{aligned} \frac{dS^t}{dt} &= -\beta(S^0 I^t + S^t I^0) + \delta R^t - \alpha S^t, & \frac{dI^t}{dt} &= \psi E^t - \gamma I^t - \phi I^t, \\ \frac{dE^t}{dt} &= \beta(S^0 I^t + S^t I^0) - (\alpha + \psi) E^t, & \frac{dR^t}{dt} &= \gamma I^t - (\alpha + \delta) R^t. \end{aligned} \quad (9)$$

Підстановка (8) в (9) дає систему 8 алгебраїчних рівнянь, з яких легко отримати вирази для $A_S, B_S, A_E, B_E, A_R, B_R$ як функцій A_I, B_I , а також вираз $B_I(A_I)$, звідки з початковими умовами (4) можна визначити всі коефіцієнти A_j, B_j .

Умова сумісності однорідної системи алгебраїчних рівнянь для випадку стаціонарної точки 2) має вигляд алгебраїчного рівняння 4-го порядку для ω^2

$$\omega^8 + A_1 \omega^6 + A_2 \omega^4 + A_3 \omega^2 + A_4 = 0, \quad (10)$$

де остаточні вирази для $A_1 - A_4$ не наводяться в силу їх громіздкості.

Для стаціонарної точки 1) умова сумісності – це рівняння 3-го порядку для ω^2 . Розв'язки цих рівнянь, а тому і тип динамічної поведінки системи (3), залежать від параметрів моделі. Таким чином, для (3), (4) можна обчислити коефіцієнти A_j, B_j коливань з різними періодами $T_j = 2\pi\omega_j$, частоти яких в загальному випадку задовольняють (10). Амплітуди відповідних коливань можна обчислити як $\text{Amp}_j = \left(A_j^2 + B_j^2 \right)^{1/2}$, а фазові зсуви – як $\varphi_j = \arctg(B_j / A_j)$, і дослідити амплітудний і фазовий спектри розв'язків моделі при різних значеннях частот, які задовольняють умові сумісності (10). Порівнюючи значення коефіцієнтів, які були розраховані для кожної країни з використанням статистичних методів (розділ 2) з обчисленими за допомогою математичної моделі, можна провести ідентифікацію параметрів моделі і її верифікацію. Для цього в роботі використовувався метод найменших квадратів. Сумарна «відстань» між статистичними F_{osc} і теоретичними F^t осцилюючими компонентами кривих $F = \{I(t), D(t), R(t)\}$ або інших є

$$\text{Dist}(F_{\text{osc}}(t), F^t(t)) = \left(m^{-1} \sum_{i=1}^{1+m} (F_{\text{osc}}(t_i) - F^t(t_i))^2 \right)^{1/2} \rightarrow \min, \quad (11)$$

де m - довжина вибірки із ряду статистичних даних, яка є функцією параметрів моделі, тобто $\text{Dist} = \text{Dist}(\alpha, \beta, \gamma, \delta, \psi, \phi, \lambda)$. Тоді з умови (11) для мінімальної відстані маємо

$$\frac{\partial}{\partial \chi} \text{Dist} = 0, \quad \frac{\partial^2}{\partial \chi^2} \text{Dist} \gg 0, \quad (12)$$

де $\chi = \{\alpha, \beta, \gamma, \delta, \psi, \phi, \lambda\}$, можна обчислити набір параметрів моделі.

Розрахунки за (12) проводилися для десяти випадкових сегментів з $m=100$ часових рядів, довжина яких складала $n > 600$, в залежності від початку безперервного запису даних в даній країні.

4 Чисельні розрахунки і обговорення результатів

Чисельні розрахунки за (11) з використанням експериментальних кривих $I^t(t), R^t(t), D^t(t)$ для України та різних країн Європи дозволили за допомогою методу найменших квадратів (11),(12) знайти наступні значення параметрів відповідних індивідуальних моделей SEIRS для досліджених країн (Таблиця 1). Обчислені значення відповідають аналогічним значенням, які були раніше отримані для Індонезії [2], Японії і Південній Кореї [3], Китаю [4], США [5], Канади [6] та деяких країн Європи [7]. Похибка розрахунків параметрів $\beta, \gamma, \delta, \psi, \varphi$ моделі не перевищувала 1.76%. Чутливість моделей SIRS і SEIRS до параметрів вивчалася раніше і був показаний значний розкид параметрів для країн Європи, Азії, Південної і Північної Америки, Австралії і Океанії [11]. Обчислені в Табл.1 значення узгоджуються з даними про фінансову підтримку медицини в досліджених країнах [8].

Таблиця 1. Результати ідентифікації параметрів моделі SEIRS.

	$\lambda (\cdot 10^{-3})$	$\alpha (\cdot 10^{-3})$	$\beta (\cdot 10^{-7})$	γ	$\varphi (\cdot 10^{-2})$	ψ	δ
Австрія	9.4	9.4	1.224	0.246	4.534	0.343	0.425
Франція	12.3	8.8	1.242	0.313	4.221	0.367	0.437
Норвегія	11.9	8.2	1.113	0.184	3.126	0.293	0.412
Іспанія	9.6	8.6	1.357	0.292	4.778	0.381	0.464
Україна	10.8	13.4	1.436	0.348	6.228	0.465	0.423
Німеччина	8.5	10.9	1.292	0.267	3.782	0.331	0.419
Італія	8.8	10.2	1.528	0.288	4.551	0.322	0.428
Великобританія	12.4	9.1	1.482	0.304	4.021	0.314	0.434
Польща	10	9.9	1.344	0.298	4.981	0.328	0.452
Бельгія	11.4	9.8	1.323	0.256	4.352	0.356	0.417
Чехія	10.4	10.3	1.427	0.321	4.781	0.367	0.422
Литва	10.4	13.5	1.455	0.309	5.025	0.376	0.432
Словенія	10.5	9.2	1.496	0.297	5.104	0.379	0.439

Після ідентифікації параметрів система ЗДР (3) може використовуватися для прогнозування динаміки кривих $I(t), R(t), D(t)$ в досліджених країнах (Табл.1) в найближчому часі, коли в більшості з країн Європи хвиля IV або закінчується, або знаходиться на максимумі (плато). Результати прогнозувань динаміки covid-19 для України при варіаціях параметрів моделі $\pm 10\%$ від обчислених в Табл.1 наведені на Рис.6. Такі варіації можуть з'явитися у зв'язку з непередбачуваними змінами метеорологічних, економічних, соціальних та інших факторів [11]. В результаті можуть спостерігатися зміни поведінки динамічної системи як в напрямку регулярної хвильової, так і хаотичної динаміки. Наведені результати дозволяють краще зрозуміти, які саме параметри моделі (3) потребують керування у вигляді змін параметрів $\beta, \gamma, \delta, \psi, \varphi$ за рахунок збільшення койко-місць, якості їх обладнання та медперсоналу у шпиталях, введення антиковідних обмежень, і т.д.

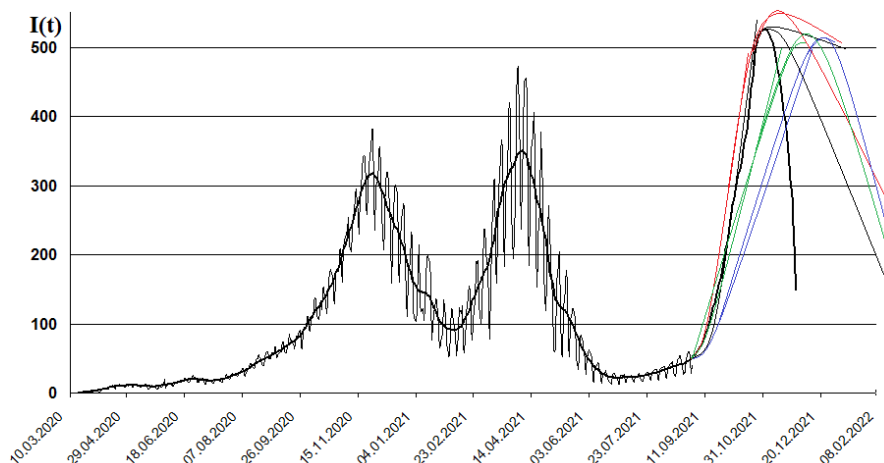


Рис.6 Результати прогнозу динаміки covid-19 в Україні при різних наборах параметрів моделі.

5 Висновки

Аналіз наявних даних по covid-19 дозволив провести ідентифікацію параметрів моделі SERIS для України та ряду сусідніх країн Європи. Спектральний аналіз даних динаміки числа нових захворювань виявив 7-денну періодичність, яка пов'язана як з меншою доступністю лабораторної діагностики covid-19 у вихідні дні, так і з психологією людей з першими симптомами хвороби. 7-денна періодичність, виявлена у всіх країнах, також відрізняється по амплітудному і фазовому спектрам. У більшості країн пік смертності відстає на 0.5-2.5 добу від піку захворюваності, але в деяких випадках (особливо хвиля I) спостерігалася і протилежна динаміка. Аналіз фазового спектру показує, що величина зсуву між піком захворюваності і смертності немонотонно збільшується зі зростанням періоду хвилі, причому в динамічних системах ряду країн може мати місце хаотична динаміка, яка повинна бути виявлена за допомогою вейвлет і фрактального аналізу часових рядів. Запропонована модель дозволяє прогнозувати динаміку кожної хвилі covid-19. Оцінка точності прогнозів буде проведена в наступних дослідженнях.

ЛІТЕРАТУРА

1. Baccarè N. *A Short History of Mathematical Population Dynamics*. Springer-Verlag, London. 2011. 160с.
2. Aldila D., Khoshnaw S.H.A., Safitri E., et al. A mathematical study on the spread of COVID-19 considering social distancing and rapid assessment: The case of Jakarta, Indonesia. *Chaos, Solitons and Fractals*. 2020. Vol. 139, 110042. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110042>
3. Duan X., Zhang X. ARIMA modelling and forecasting of irregularly patterned COVID-19 outbreaks using Japanese and South Korean data. *Data in Brief*. 2020. Vol. 31, 105779. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105779>
4. Li Q., Guan X., Wu P., et al. Early transmission dynamics in Wuhan, China, of novel coronavirus-infected pneumonia. *New England Journal of Medicine*, 2020. Vol. 382, 1199-1207. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2001316>
5. Asadi-Zeydabadi M., Buscema M., Lodwick W., et al. Analysis of COVID-19 pandemic in USA, using Topological Weighted Centroid. *Computers in Biology and Medicine*. 2021. Vol. 136, 104670. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2021.104670>
6. Sun J. Forecasting COVID-19 pandemic in Alberta, Canada using modified ARIMA model. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 2021. Vol. 22, 100029. <https://doi.org/10.1016/j.cmpbup.2021.100029>
7. James N., Menzies M. Trends in COVID-19 prevalence and mortality: A year in review. *Physica D*. 2021. Vol. 425, 132968. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2021.132968>
8. Захарова А.А., Кізілова Н.М. Дослідження кореляцій динаміки захворювання на COVID-19 з деякими соціально-економічними факторами. *Вісник Харківського національного університету серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»*. 2020. Вип. 47. С.49-56. <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2020-48-04>
9. Костецька В.В., Кізілова Н.М. Математичне моделювання динаміки пандемії COVID-19. *Вісник Харківського національного університету серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»*. 2020. Вип. 48. С.65-71. <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2020-48-06>
10. Kermack M., McKendrick A. Contributions to the mathematical theory of epidemics. *Proceedings of the Royal Society London*. 1927. v.115(5). P.700–721. <https://doi.org/10.1098/rspa.1927.0118>
11. Computational Modeling and Data Analysis in COVID-19 Research. Ed. by Ch.R.Panigrahi, B. Pati, M. Rath, R. Buyya. CRC Press. 2021.

REFERENCES

1. N. Bacaër, *A Short History of Mathematical Population Dynamics*. Springer-Verlag, London. 2011. 160c.
2. D. Aldila, S.H.A. Khoshnaw, E. Safitri, et al. “A mathematical study on the spread of COVID-19 considering social distancing and rapid assessment: The case of Jakarta, Indonesia”, *Chaos, Solitons and Fractals*. 2020. Vol. 139, 110042. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110042>
3. X. Duan, X. Zhang., “ARIMA modelling and forecasting of irregularly patterned COVID-19 outbreaks using Japanese and South Korean data”, *Data in Brief*. 2020. Vol. 31, 105779. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105779>
4. Q. Li, X. Guan, P. Wu, et al. “Early transmission dynamics in Wuhan, China, of novel coronavirus–infected pneumonia”, *New England Journal of Medicine*, 2020. Vol. 382, 1199-1207. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2001316>
5. M. Asadi-Zeydabadi, M. Buscema, W. Lodwick, et al. “Analysis of COVID-19 pandemic in USA, using Topological Weighted Centroid”, *Computers in Biology and Medicine*. 2021. Vol. 136, 104670. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2021.104670>
6. J. Sun, “Forecasting COVID-19 pandemic in Alberta, Canada using modified ARIMA model”, *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 2021. Vol. 22, 100029. <https://doi.org/10.1016/j.cmpbup.2021.100029>
7. N. James, M. Menzies, “Trends in COVID-19 prevalence and mortality: A year in review”, *Physica D*. 2021. Vol. 425, 132968. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2021.132968>
8. A. Zakharova, N. Kizilova, “Study on correlations of disease dynamics on COVID-19 with some socio-economic factors”, *Bulletin of Kharkiv National University, series "Mathematical modeling. Information Technology. Automated control systems"*, 2020, Vol. 47, P.49-56. <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2020-48-04>
9. V. Kostetzka, N. Kizilova, “Mathematical modeling of the dynamics of the COVID-19 pandemic”, *Bulletin of Kharkiv National University, series "Mathematical modeling. Information Technology. Automated control systems"*, 2020, Vol. 48, P.65-71. <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2020-48-06>
10. M. Kermack, A. McKendrick, “Contributions to the mathematical theory of epidemics”, *Proceedings of the Royal Society London*, 1927, v.115(5), P.700–721. <https://doi.org/10.1098/rspa.1927.0118>
11. *Computational Modeling and Data Analysis in COVID-19 Research*. Ed. by Ch.R.Panigrahi, B. Pati, M. Rath, R. Buyya. CRC Press. 2021.

УДК 004.891 : 004.9:33

Дослідження застосування алгоритмів штучного інтелекту в системах виявлення/запобігання вторгнень

Т. С. Дейнега, І. І. Сватовський

**Дейнега Тарас
Сергійович***студент**Харківський Національний Університет ім. В. Н. Каразіна**майдан Свободи 6, 61022, Харків**e-mail: xa11867679@student.karazin.ua ;**<https://orcid.org/0000-0002-7659-9721>***Сватовський Ігор
Іванович***к.т.н., доцент**Харківський Національний Університет ім. В.Н. Каразіна**майдан Свободи 6, 61022, Харків**e-mail: i.svatowsky@karazin.ua;**<https://orcid.org/0000-0002-1836-5599>*

Проведено аналіз необхідності та доцільності використання алгоритмів та технологій штучного інтелекту на основі нейронних мереж та нечіткої логіки у системах виявлення та запобігання вторгнень у мережу. Сучасні атаки на мережу відрізняються здатністю змінювати свої характеристики та способи дії майже у реальному часі. Застарілі експертні системи захисту мережі, які засновані на понятті «правило-дія», вже не можуть впоратися з даними видами атак, тому що їм потрібен певний час на обробку інформації про нову атаку та занесення її до своєї бази даних. У роботі пропонується модель системи виявлення/запобігання вторгнень на основі використання нейронної мережі, що навчається на тестовій вибірці, яка створюється за алгоритмами нечіткої логіки. Алгоритм навчання нейронної мережі заснований на методі навчання з вчителем та методі зворотного поширення помилки. Таким чином, повна процедура навчання нейронної мережі вимагає від користувача мати лише дампи перехопленого мережевого трафіку для його подальшої обробки згідно алгоритму створення тестової вибірки. Результати оцінки і практичного тестування запропонованої моделі показують, що подібна схема захисту мережі від атак може працювати досить надійно і використовуватись в якості системи виявлення/запобігання вторгнень для локальних та глобальних мереж.

Ключові слова: *штучний інтелект, системи виявлення/запобігання вторгнень, мережеві пакети, нейронна мережа, алгоритм навчання.*

Research of using the artificial intelligence algorithms in intrusion detection/prevention systems

T. S. Deineha, I. I. Svatovskiy

Taras Deineha*Student**V. N. Karazin Kharkiv National University**6 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine**e-mail: xa11867679@student.karazin.ua ;**<https://orcid.org/0000-0002-7659-9721>***Igor Svatovskiy***Ph.D., Associate Professor**V. N. Karazin Kharkiv National University**6 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine**e-mail: i.svatowsky@karazin.ua;**<https://orcid.org/0000-0002-1836-5599>*

The analysis of the necessity and expediency of using artificial intelligence algorithms and technologies based on neural networks and fuzzy logic in systems for detecting and preventing network intrusions has been carried out. Modern network attacks are distinguished by the ability to change their characteristics and modes of action almost in real time. Outdated expert network protection systems based on the concept of "rule-action" can no longer cope with these types of attacks, because they need a certain time to process information about a new attack and store it into their database. The paper proposes a model of an intrusion detection/prevention system based on the use of a neural network trained on a test sample created by using fuzzy logic algorithms.

The learning algorithm of the neural network is based on the method of learning with a teacher and the method of backpropagation of the error. Thus, for the complete neural network training procedure the user only needs to have a dump of the intercepted network traffic for further processing according to the test sample creation algorithm. The results of evaluation and practical testing of the proposed model show that such a network protection scheme can work quite reliably and can be used as an intrusion detection/prevention system for local and global networks.

Keywords: artificial intelligence, intrusion detection/prevention systems, network packets, neural network, learning algorithm.

1 Вступ

Аналіз стану безпеки у сфері інформаційно-комунікаційних технологій, який постійно проводиться відомими глобальними компаніями, свідчить про те, що світовий ландшафт загроз постійно змінюється. Так, у щорічному звіті Агентства ЄС з кібербезпеки (ENISA) Threat Landscape 2022 однією з головних загроз вважаються програми-вимагачі, а фішинг зараз визначено як найпоширеніший початковий вектор таких атак. Іншими найбільш суттєвими загрозами є атаки на доступність, які також називаються розподіленими атаками на відмову в обслуговуванні (DDoS). Окрім цього з'являється ширший спектр векторів атак, таких як експлойти нульового дня, дезінформація та глибокі фейки за допомогою штучного інтелекту (ШІ). У результаті з'являються ще більш зловмисні та поширені атаки, які мають і більший руйнівний вплив - розвинуті постійні загрози (APT).

Традиційна мережева безпека ґрунтується на застосуванні статистичного аналізу стану безпеки у вузлах на базі таких пристроїв, як брандмауери, системи виявлення вторгнень (IDS) і системи запобігання вторгненням (IPS), системи антивірусного забезпечення. Однак це є втіленням методології пасивного захисту, яка стає все менше придатною для захисту систем від нових загроз мережевій безпеці. Тому в сучасному світі з'явилися нові підходи до побудови систем захисту, які базуються на таких галузях, що швидко розвиваються, як технології штучного інтелекту. До них належать інтелектуальний аналіз даних, машинне навчання, нейронні мережі, нечітка логіка, генетичні алгоритми, опорні векторні машини, дерево рішень та ще інші [1,2].

Алгоритми ШІ можуть запобігти деяким новим загрозам завдяки своїй сутності аналізу загроз безпеці, зловмисного програмного забезпечення та методів протидії їм, та зазвичай розвиваються на основі консолідації та категорювання знань про попередні атаки, реалізації загроз і наслідків впливу зловмисного програмного забезпечення, що сталися. Такі інструменти ШІ як експертні системи, інтелектуальні агенти, штучні імунні системи, машинне навчання, розпізнавання образів, нечітка логіка, евристика тощо все частіше застосовуються для виявлення та протидії сучасним кібератакам [3].

Використання ШІ може допомогти розширити можливості та ефективність застосування і традиційних методів і засобів захисту, зокрема від складних мережевих атак. Однією з найдинамічніших технологій ШІ вважається технологія штучних нейронних мереж. Вони дозволяють вирішувати широкий спектр практичних технічних завдань з детектування різноманітних проявів мережевих атак [4].

2 Дослідження технологій нейронних мереж

Нейронна мережа імітує людський мозок, створюючи систему обробки інформації, яка складається з великої кількості взаємопов'язаних вузлів (нейронів), що взаємодіють один з одним для вирішення конкретного завдання [1]. Рішення про вихід кожного вузла мережі зважується і обробляється для подачі на вхід для всіх інших вузлів в наступному шарі. Процес навчання, який реалізується нейронною мережею, дозволяє виявляти складні і нелінійні відносини між даними [8]. На рисунку 1 показана типова архітектура нейронної мережі.

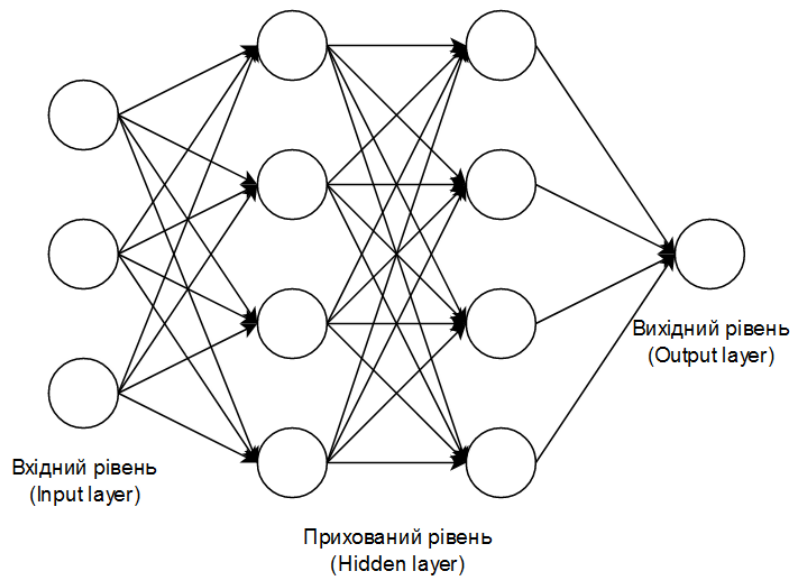


Рис. 1 Архітектура нейронної мережі

Нейронні мережі можуть аналізувати та виявляти відносини і закономірності в даних, а також навчатись на зібраних даних і отриманих знаннях. Для отримання поставлених завдань нейронна мережа повинна бути правильно спроектована. Головна перевага нейронної мережі - здатність робити висновки із зібраних даних без будь-яких попередніх знань про закономірності цих даних, а також її здатність узагальнювати вивчені дані, які дозволяють нейронній мережі виявляти і класифікувати невідомі атаки і різні типи відомих атак. Крім того, як тільки атака розпізнана, нейронна мережа не може бути схильна до цієї атаки у майбутньому. Висока швидкість обробки даних також є однією з переваг нейронної мережі. Щоб успішно впровадити цей метод для системи виявлення та запобігання вторгнень, дані, що представляють нормальну і ненормальну поведінку мережі, повинні бути введені в неї, щоб вона могла автоматично налаштувати мережеві коефіцієнти на етапі навчання [2, 3].

За останні кілька років було проведено багато досліджень застосування нейронних мереж для виявлення вторгнень [4]. Нейронна мережа зворотного поширення використовується для виявлення вторгнення в систему через її здатність швидкого розпізнавання шаблонних пакетів, отриманих з мережі. Особливості багатьох атак були витягнуті й проаналізовані з стандартних і незвичайних пакетів. Проаналізовані результати цих пакетів були використані для навчання нейронної мережі за зразком пакетів обох типів, використовуючи стандартний алгоритм зворотного поширення помилки.

Щоб подолати низький рівень виявлення, високу кількість помилкових спрацьовувань і інших дефектів, був розроблений новий алгоритм виявлення вторгнень на основі нечіткої нейронної мережі. Цей алгоритм класифікує об'єкти і розпізнає їх нормальну і ненормальну поведінку. В ході великої кількості експериментів продемонстровано, що запропонована модель ефективна і має краще узагальнення. Крім того, швидкість правильного виявлення вторгнень збільшується, а ймовірність помилкового виявлення знижується [1].

3 Практична реалізація технології нейронної мережі на мові програмування Java

Головною метою цієї роботи була реалізація алгоритму нейронної мережі для проведення класифікації мережевого трафіку у дослідній локальній мережі як загрозового, безпечного чи трафіку, що потребує додаткової перевірки людиною (середній рівень загрози між безпечним та загрозовим). Для дослідження було запропоновано використання алгоритму підготовки тестової вибірки даних для нейронної мережі, алгоритму навчання мережі та застосування навченої нейронної мережі на реальних даних з розрахунком відсотку правильних відповідей та кількості помилок у залежності від ітерації на тестовій вибірці даних [6].

Алгоритм підготовки тестової вибірки для нейронної мережі, заснований на алгоритмах нечіткої логіки (Fuzzy Logic), приймає на вхід текстовий файл з пакетною інформацією, яка була перехоплена у локальній мережі за допомогою сніфера пакетів WireShark [5] та видає на виході тестову вибірку для нейронної мережі у вигляді пар вхідних параметрів та правильної відповіді. Перше значення пари – це масив вхідних даних про мережевий пакет, його розмір дорівнює трьом. До цих даних відноситься: розмір пакету в кілобайтах, наявність у пакеті скриптів та використання мережевих утиліт у пакеті. Друге значення пари – правильна відповідь щодо загрози пакету.

Реалізація алгоритму створення тестової вибірки наведена далі (рис. 2 та 3):

```
private void addPairsToTdataset(final ArrayList<String> packets,|
                               final List<Pair<List<Double>, Integer>> dataset) {
    final Pattern pattern = Pattern.compile(PACKET_LENGTH_REGEX);

    for (Iterator<String> iterator = packets.iterator(); iterator.hasNext(); ) {
        final String packet = iterator.next();
        final Matcher matcher = pattern.matcher(packet);
        final List<Double> inputParameters = new ArrayList<>(Arrays.asList(0.0, 0.0, 0.0));
        int outputValue = 0;

        if (packet.contains(PASSWORD) || packet.contains(LOGIN) || packet.contains(CREDENTIALS)) {
            logger.logging( str: FORBIDDEN_WORDS_DETECTED + packet);
            inputParameters.set(0, 1.0);
            outputValue = 1;
        } else if (packet.contains(TCP_PROTOCOL) && packet.contains(SOURCE_AND_DESTINATION_IPS)
                   && packet.contains(PORT23) && !packet.contains(TELNET)
                   && !packet.contains(DUP) && !packet.contains(OUT_OFF)) {
            logger.logging( str: TELNET_REQUEST_DETECTED + packet);
            inputParameters.set(1, 1.0);
            outputValue = 2;
        } else if (packet.contains(TCP_PROTOCOL) && packet.contains(SOURCE_AND_DESTINATION_IPS) && !packet.contains(SSH)
                   && packet.contains(PORT22) && !packet.contains(DUP) && !packet.contains(OUT_OFF)) {
            logger.logging( str: SSH_REQUEST_DETECTED + packet);
            inputParameters.set(1, 1.0);
            outputValue = 2;
        }
    }
}
```

Рис. 2 Алгоритм створення тестової вибірки даних

```
} else if (packet.contains(TCP_PROTOCOL) && packet.contains(SOURCE_AND_DESTINATION_IPS) && !packet.contains(SSH)
           && packet.contains(PORT22) && !packet.contains(DUP) && !packet.contains(OUT_OFF)) {
    logger.logging( str: SSH_REQUEST_DETECTED + packet);
    inputParameters.set(1, 1.0);
    outputValue = 2;
} else if (packet.contains(TCP_PROTOCOL) && packet.contains(SOURCE_AND_DESTINATION_IPS) && !packet.contains(FTP)
           && packet.contains(PORT21) && !packet.contains(DUP) && !packet.contains(OUT_OFF)) {
    logger.logging( str: FTP_REQUEST_DETECTED + System.lineSeparator() + packet);
    inputParameters.set(1, 1.0);
    outputValue = 2;
}
}
while (matcher.find()) {
    final double data = Integer.parseInt(matcher.group());
    if (data > 500) {
        logger.logging( str: LARGE_LENGTH_DETECTED + packet);
        outputValue = 2;
    }
    if (outputValue == 0) {
        dataset.add(Pair.of(List.of(0.0, 0.0, data * BYTE_TO_KILOBYTE), outputValue));
    } else {
        dataset.add(Pair.of(List.of(inputParameters.get(0), inputParameters.get(1),
                                   data * BYTE_TO_KILOBYTE), outputValue));
    }
}
iterator.remove();
}
```

Рис. 3 Алгоритм створення тестової вибірки даних

Після того, як навчальна вибірка буде зібрана, запускається в роботу алгоритм навчання нейронної мережі. Даний алгоритм заснований на трьох частинах: пряме розповсюдження помилки (forward propagation), зворотне поширення помилки (backward propagation) та оновлення вагових коефіцієнтів зв'язку між нейронами [8]. Код програми для прямого розповсюдження помилки можна побачити на рисунках 4 – 6. Код програми для зворотного поширення помилки можна побачити на рисунках 7 - 9. Код програми для оновлення вагових коефіцієнтів можна побачити на рисунку 10. Шляхом проведення практичних експериментів було знайдено наступні гіпер-параметри для нейронної мережі (Табл. 1):

Табл.1 Гіпер-параметри дослідної нейронної мережі

Назва параметру	Значення
Кількість шарів нейронної мережі	3
Кількість нейронів на другому шарі	10
Кількість ітерацій по навчальній вибірці	1000
Швидкість навчання	0.001

```
final DoubleMatrix t1 = x.mmMul(W1).add(b1);
final DoubleMatrix h1 = RELU(t1);
final DoubleMatrix t2 = h1.mmMul(W2).add(b2);
final DoubleMatrix result = softMax(t2);
```

Рис.4 Частина коду forward propagation

```
2 usages
private static DoubleMatrix RELU(final DoubleMatrix t) {
    return t.maxi(v: 0, t);
}

2 usages
private static DoubleMatrix softMax(final DoubleMatrix t) {
    final DoubleMatrix out = MatrixFunctions.exp(t);
    return out.divi(out.sum());
}
```

Рис. 5 Функція активації RELU та softMax

```
1 usage
private static double sparseCrossEntropy(final DoubleMatrix result, final int y) {
    return -Math.log(result.get(rowIndex: 0, y));
}
```

Рис. 6 Розрахунок помилки за допомогою розрідженої крос-ентропії

```
private static DoubleMatrix toFull(final int y, final List<String> classification) {
    final DoubleMatrix yFull = DoubleMatrix.zeros(rows: 1, classification.size());
    yFull.put(rowIndex: 0, y, value: 1);
    return yFull;
}
```

Рис. 7 Функція toFull

```

final DoubleMatrix yFull = toFull(y, classification);
final DoubleMatrix dE_dt2 = result.sub(yFull);
final DoubleMatrix dE_dW2 = h1.transpose().mmul(dE_dt2);
final DoubleMatrix dE_db2 = dE_dt2;
final DoubleMatrix dE_dh1 = dE_dt2.mmul(W2.transpose());
final DoubleMatrix dE_dt1 = dE_dh1.mmul(relu_deriv(t1));
final DoubleMatrix dE_dW1 = x.transpose().mmul(dE_dt1);
final DoubleMatrix dE_db1 = dE_dt1;

```

Рис. 8 Частина коду *backward propagation*

```

1 usage
private static float relu_deriv(final DoubleMatrix vector) {
    return vector.sum() >= 0 ? 1 : 0;
}

```

Рис. 9 Похідна функція активації *relu_deriv*

```

W1 = W1.sub(dE_dW1.mul(LEARNING_SPEED));
b1 = b1.sub(dE_db1.mul(LEARNING_SPEED));
W2 = W2.sub(dE_dW2.mul(LEARNING_SPEED));
b2 = b2.sub(dE_db2.mul(LEARNING_SPEED));

```

Рис. 10 Оновлення вагових коефіцієнтів нейронної мережі

Повний фінальний код для навчання нейронної мережі заснований на методі навчання з учителем та на основі алгоритму зворотного поширення помилки представлено на рисунку 11:

```

for (int j = 0; j < 100; j++) {
    for (Pair<List<Double>, Integer> listIntegerPair : dataset) {
        final List<Double> inputVector = listIntegerPair.getLeft();
        double[] inputParameters = new double[]{inputVector.get(0), inputVector.get(1), inputVector.get(2)};
        final DoubleMatrix x = new DoubleMatrix( newRows: 1, newColumns: 3, inputParameters);
        final int y = listIntegerPair.getRight();
        System.out.println(x + System.LineSeparator() + y);

        final DoubleMatrix t1 = x.mmul(W1).add(b1);
        final DoubleMatrix h1 = RELU(t1);
        final DoubleMatrix t2 = h1.mmul(W2).add(b2);
        final DoubleMatrix result = softMax(t2);

        final double error = sparseCrossEntropy(result, y);

        final DoubleMatrix yFull = toFull(y, classification);
        final DoubleMatrix dE_dt2 = result.sub(yFull);
        final DoubleMatrix dE_dW2 = h1.transpose().mmul(dE_dt2);
        final DoubleMatrix dE_db2 = dE_dt2;
        final DoubleMatrix dE_dh1 = dE_dt2.mmul(W2.transpose());
        final DoubleMatrix dE_dt1 = dE_dh1.mmul(relu_deriv(t1));
        final DoubleMatrix dE_dW1 = x.transpose().mmul(dE_dt1);
        final DoubleMatrix dE_db1 = dE_dt1;

        W1 = W1.sub(dE_dW1.mul(LEARNING_SPEED));
        b1 = b1.sub(dE_db1.mul(LEARNING_SPEED));
        W2 = W2.sub(dE_dW2.mul(LEARNING_SPEED));
        b2 = b2.sub(dE_db2.mul(LEARNING_SPEED));
        errors.add(error);
    }
}

```

Рис. 11 Фінальний вигляд алгоритму навчання нейронної мережі

Отримана нейронна мережа має 3 шари (вхідний, другий шар з десяти нейронів та вихідний). Усі нейрони одного рівня пов'язані з нейронами наступного рівня. Схематично дану нейронну мережу можна зобразити наступним чином (рис. 12):

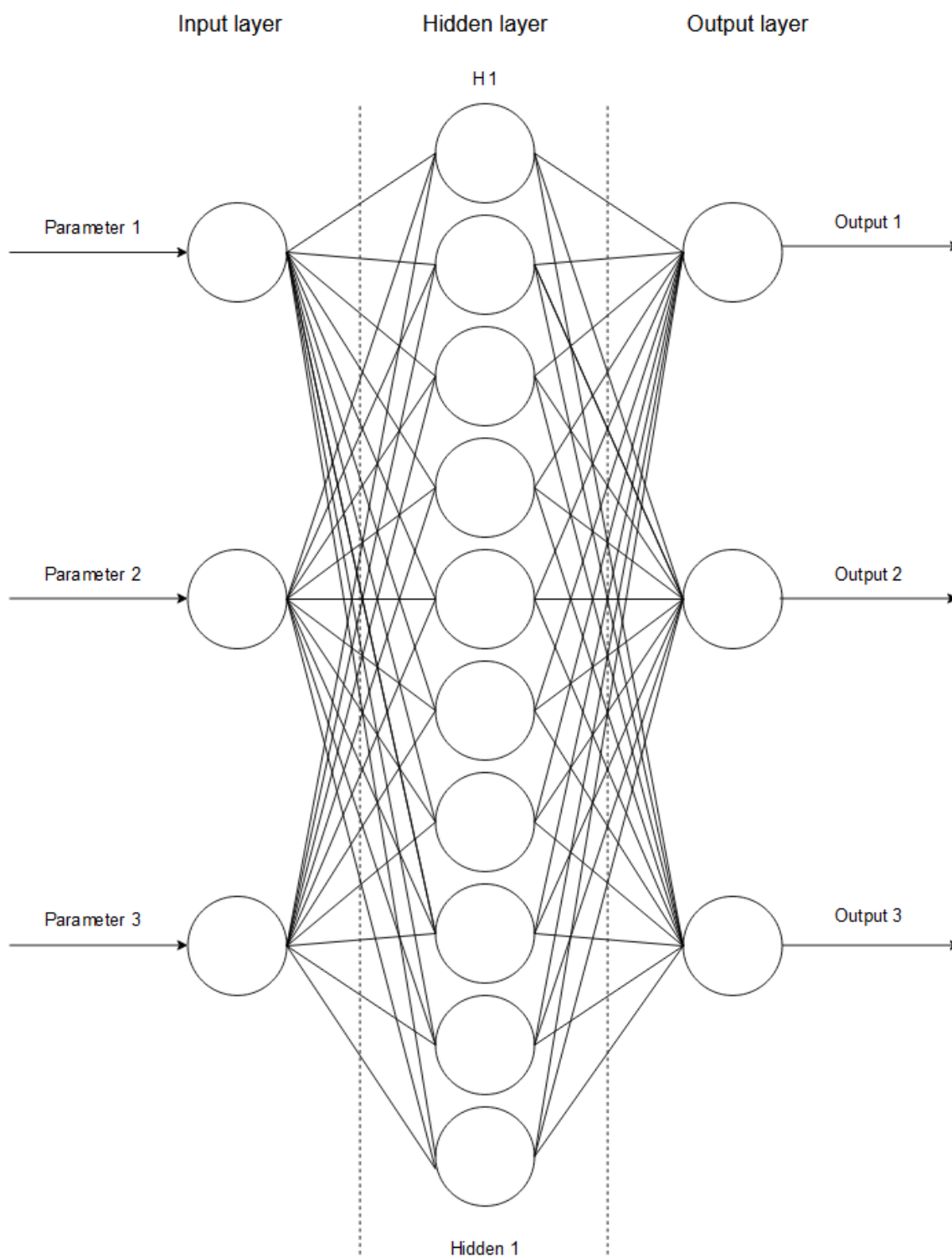


Рис. 12 Схеми дослідної нейронної мережі

Після завершення етапу навчання у консолі середовища розробки IntelliJ IDEA Community Edition 2021.3 можна отримати ітерацію по кожній парі навчальної вибірки, а також відсоток правильних відповідей нейронної мережі на останньому циклі проходження по навчальній вибірці (рис. 13), який розраховується таким чином:

```
[0.000000, 0.000000, 0.041016]
0
[0.000000, 0.000000, 0.041016]
0
[0.000000, 0.000000, 0.044922]
0
[0.000000, 0.000000, 0.044922]
0
[0.000000, 0.000000, 0.041016]
0
[0.000000, 0.000000, 0.041016]
0
[0.000000, 0.000000, 0.041016]
0
[0.000000, 0.000000, 0.041016]
0
[0.000000, 0.000000, 0.072266]
0
Ассурасу: 0.9844357976653697
```

Рис. 13 Відсоток правильних відповідей нейронної мережі на навчальній вибірці

Як можна бачити з рисунку 13 - відсоток правильних відповідей складає 98.44%, що характеризує мережу як достатньо ефективну. Також після виконання процедур згідно алгоритму навчання можна отримати залежності помилки відповіді від ітерації:

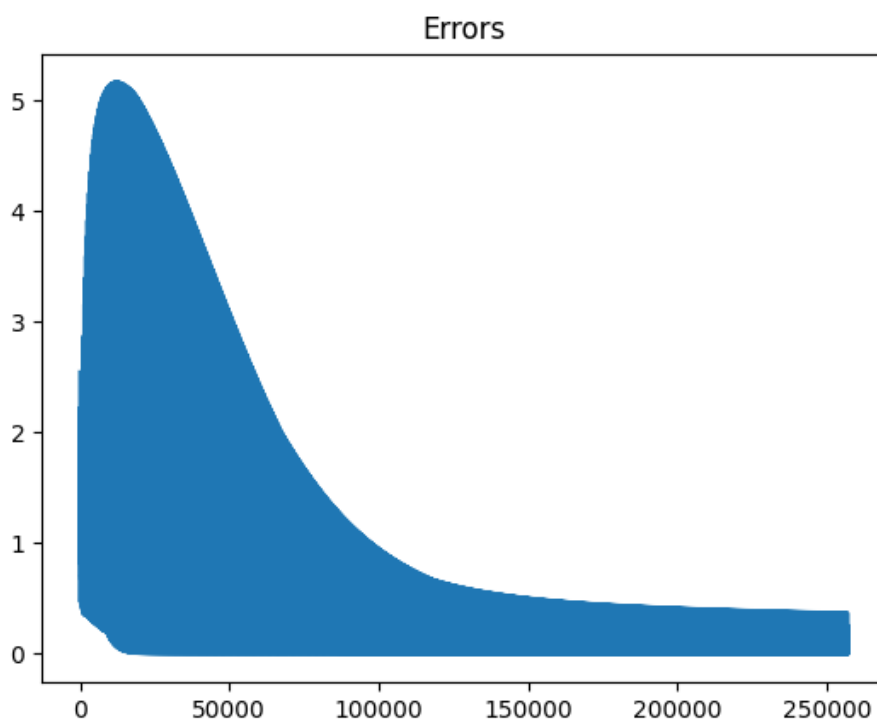


Рис. 14 Графік залежності помилки відповіді від ітерації

Як можна бачити з графіку на рисунку 14 - кількість помилок зменшується зі збільшенням числа пройдених ітерацій. Стрімке зниження кількості помилок спостерігається після 20000 ітерацій алгоритму.

Після того, як нейронна мережа була успішно навчена, у консоль виводяться матриці вагових коефіцієнтів $W1$ та $W2$. Їх значення наступні:

- $W1 = \{0.155353, 0.848620, -0.058468, 0.649779, 0.413327, 0.594318, 0.085725, 0.792108, -0.043930, 0.496328; -0.154272, 0.449024, 0.231025, -0.216459, 1.486742, 0.779725, 1.256136, 0.576876, 0.852188, 0.200115; 0.577778, 0.420876, 0.438282, 0.021567, 1.871525, 0.422121, 1.624109, 0.890067, 0.570674, 0.683717\}$
- $W2 = \{0.653276, 0.313120, 0.187101; 0.773230, 0.899240, 0.504340; 0.777735, 0.305611, 0.144749; 1.484853, 0.283755, 0.228076; -0.820227, 0.304082, 1.926313; 0.207484, 0.740289, 0.990918; -0.120909, 0.094986, 1.811141; 0.019589, 0.410993, 1.024896; 0.193575, -0.076539, 1.092565; 0.977203, 0.157549, 0.870955\}$

Коли система навчена та має правильні вагові коефіцієнти можна протестувати її на реальних даних (мережевих пакетах). У якості реальних пакетів було зібрано інформацію з 20 пакетів мережевого трафіку, у яких містяться і загрозливі пакети даних, і безпечні, і ті, які потребують додаткової перевірки адміністратором мережі (Табл. 2).

Табл.2 Набір параметрів реальних мережесих пакетів

Номер пакету	Перший вхідний параметр	Другий вхідний параметр	Третій вхідний параметр	Правильна відповідь
1	1.0	0.0	0.0546875	1
2	1.0	0.0	0.0566875	1
3	1.0	0.0	0.0786873	1
4	1.0	0.0	0.7046875	1
5	0.0	0.0	0.0125682	1
6	0.0	0.0	0.0855589	0
7	0.0	0.0	0.9858965	2
8	0.0	1.0	0.0458796	2
9	0.0	1.0	0.0745896	2
10	0.0	1.0	0.0546875	2
11	0.0	0.0	0.0658754	0
12	0.0	0.0	0.8546875	2
13	0.0	0.0	0.9658412	2
14	0.0	0.0	0.7485698	2
15	0.0	0.0	0.0658745	0
16	0.0	1.0	0.0452589	2
17	1.0	0.0	0.0745879	1
18	0.0	1.0	0.6857895	2
19	0.0	1.0	0.0546875	2
110	1.0	1.0	0.9856325	2


```
Predication: Need clarify - Correct
Predication: Need clarify - Correct
Predication: Need clarify - Correct
Predication: Not secure - Incorrect
Predication: Secure - Incorrect
Predication: Secure - Correct
Predication: Secure - Correct
Predication: Not secure - Correct
Predication: Not secure - Correct
Predication: Not secure - Correct
Predication: Secure - Correct
Predication: Secure - Correct
Predication: Not secure - Correct
Predication: Not secure - Correct
Predication: Not secure - Correct
Predication: Not secure - Correct
Predication: Not secure - Correct
Predication: Need clarify - Correct
Predication: Not secure - Correct
Predication: Not secure - Correct
Predication: Not secure - Correct
Real accuracy: 0.9
```

Рис. 15 Відсоток правильних відповідей нейронної мережі на реальній вибірці

Нейронною мережею було надано правильні відповіді для близько 90% мережевих пакетів (рис. 15). Даний показник трохи відрізняється від того, що був отриманий на тестовій вибірці через те, що у якості реальних даних були обрані також пакети даних, що містять у собі більше одного параметра, який вказує на потенційну загрозу у пакеті. Це суттєво відрізняється від тестової вибірки, яка містить у собі переважно пакети з одним таким параметром.

4 Висновки

Таким чином, у роботі розглянуто та практично реалізовано одну з технологій штучного інтелекту на основі використання нейронної мережі для класифікації мережевого трафіку. Можна з упевненістю сказати, що запропонована модель нейронної мережі продемонструвала достатню ефективність у виявленні та запобіганні мережевих атак. Дана модель має переваги перед традиційними експертними системами та перед системами, заснованими на інших технологіях штучного інтелекту, у швидкодії та відсотку правильних висновків. На реальних даних нейронна мережа показала оціночний результат на рівні близько 90% правильних відповідей та 98% - на тестових даних. Розглянута модель системи виявлення/запобігання вторгнень може буде вдосконалена шляхом додавання до навчальної вибірки більш складних випадків, що наближають склад аналізованого трафіку до умов передачі в реальних мережах. Для адаптації процесу навчання мережі до таких умов доцільно застосувати тестові вибірки, складені з пакетів, які мають декілька атрибутів, що можуть свідчити про наявність в них тих чи інших актуальних загроз.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ганеш К., Девараж Д. Виявлення вторгнень за допомогою штучної нейронної мережі зі зменшеними вхідними можливостями. URL: http://ictactjournals.in/paper/IJSC_V1_I1_PAPER_5_30_36.pdf. Коїмбатор, 2010. 36 с.
2. Кумар Г., Кумар К., Сачдева М. Використання методів на основі штучного інтелекту для виявлення вторгнень. Пенджаб: Springer Science + Business, 2010. 387 с.
3. Гупта Б., Сінг Б., Джейн В. Виявлення вторгнення за допомогою штучного інтелекту. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1701/1701.02145.pdf>. Нью Делі, 2014. 43 с.

4. Сікос Л. Ф. Штучний інтелект у кібербезпеці. Нью Йорк: Springer, 2018. 205 с.
5. Документація з офіційної сторінки «Wireshark»: веб сайт. URL: <https://www.wireshark.org/docs/>.
6. Тійгу Є. Штучний інтелект у кіберзахисті. Таллінн, 2011. 105 с. URL: <https://www.ccdcoe.org/uploads/2018/10/ArtificialIntelligenceInCyberDefense-Туугу.pdf>.
7. Сарати Бхаттачарджи П., Ара Бегум С. Нечіткий підхід для системи виявлення вторгнень. Агартала: Міжнародний журнал досліджень у галузі комп'ютерних наук та техніки (IJRSCSE), 2013. 108 с.
8. Шахріар Усман Хан, Фаріха Еусуфзай, Мад. Азхаруддін Редван, Мохіуддін Ахмед, Сайфур Рахман Сабудж. Штучний інтелект для кібербезпеки: аналіз продуктивності мережі по виявленню вторгнень. Кам: Springer, 2022. 140 с.

REFERENCES

1. Ganesh Kumar P., Devaraj D. Intrusion detection using artificial neural network with reduced input features. URL: http://ictactjournals.in/paper/IJSC_V1_I1_PAPER_5_30_36.pdf. Coimbatore, 2010. 36 p.
2. Kumar G., Kumar K., Sachdeva M. The use of artificial intelligence-based techniques for intrusion detection. Punjab: Springer Science + Business, 2010. 387 p.
3. Gupta B., Singh B., Jain V. Artificial Intrusion Detection Techniques. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1701/1701.02145.pdf>. New Delhi, 2014. 43 p.
4. Sikos L. F. AI in Cybersecurity. New York: Springer, 2018. 205 p.
5. Documentation from official page of «Wireshark»: web site. URL: <https://www.wireshark.org/docs/>.
6. Tyugu E. Artificial Intelligence in Cyber Defense. Tallin, 2011. 105 p. URL: <https://www.ccdcoe.org/uploads/2018/10/ArtificialIntelligenceInCyberDefense-Туугу.pdf>.
7. Sarathi Bhattacharjee P., Ara Begum S. Fuzzy Approach for Intrusion Detection System. Agartala: International Journal of Research Studies in Computer Science and Engineering (IJRSCSE), 2013. 108 p.
8. Shahriar Usman Khan, Fariha Eusufzai, Md. Azharuddin Redwan, Mohiuddin Ahmed, Saifur Rahman Sabuj. Artificial Intelligence for Cyber Security: Performance Analysis of Network Intrusion Detection. Cham: Springer, 2022. 140 p.

УДК 519.6

Адаптивний гібридний метод оптимізації яружних функцій стосовно до задачі вагової мінімізації лопаті повітряної установки

К.Є. Лапітан, Д.В. Лістрова, Т.М. Руденко, Г.А. Шелудько

**Лапітан Костянтин
Євгенович***Студент 5-го курсу навчально наукового інституту комп'ютерної фізики та енергетики;**Харківський національний університет ім. В.Н.Каразіна, майдан Свободи, 6, Харків, Україна, 61022;**e-mail: konstantinlapitan@gmail.com**<https://orcid.org/0000-0003-0050-405X>***Лістрова
Дар'я Вадимівна***Студентка 6-го курсу навчально наукового інституту комп'ютерної фізики та енергетики;**Харківський національний університет ім. В.Н.Каразіна, майдан Свободи, 6, Харків, Україна, 61022;**e-mail: dasha14.152@gmail.com**<https://orcid.org/0000-0002-3202-8150>***Руденко
Тетяна Миколаївна***аспірант;**Інститут проблем машинобудування ім. А.М.Підгорного НАНУ, вул. Пожарського, 2/10, Харків, Україна, 61046;**e-mail: dingata0206@gmail.com;**<https://orcid.org/0000-0003-1095-2331>***Шелудько
Гелій Артемович***Науковий співробітник;**Інститут проблем машинобудування ім. А.М.Підгорного НАНУ, вул. Пожарського, 2/10, Харків, Україна, 61046;**<https://orcid.org/0000-0003-4171-9591>*

Запропоновано адаптивний метод пошуку мінімуму нелінійної функції багатьох змінних. Метод був використаний для розв'язання оптимізаційної задачі функції у вигляді яру. Сформульовано задачу оптимізації, описано алгоритм адаптивного методу пошуку коренів функції Розенброка та проведено порівняння результатів роботи гібридного методу, методу Пауелла, Хука-Дживса та методу найкорішого спуску. Встановлено, що ефективність запропонованого методу більша за звичні алгоритми пошуку, але не позбавлена недоліків. Запропонований метод було використано для розв'язання задачі оптимізації лопаті повітряної установки, яку за допомогою методу штрафних функцій зведено до проблеми безумовної оптимізації, але при цьому функція мети мала суттєво яружну структуру. Отримані оптимальні значення товщин перерізів, до дало змогу побудувати лопать з покращеними характеристиками.

Ключові слова: *гібридний адаптивний метод, задача оптимізації, функція Розенброка, яружний пошук.*

Adaptive hybrid optimization method for valley functions in weight minimization problems for wind turbine blades

K.E. Lapitan, D.V. Listrova, T.M. Rudenko, G.A. Sheludko

Lapitan Konstantin*Student;**V.N. Karazin National University, 6 Svobody Square, Kharkiv, Ukraine, 61022***Listrova Daria***Student;**V.N. Karazin National University, 6 Svobody Square, Kharkiv, Ukraine, 61022***Rudenko Tetiana***Postgraduate;**Institute of Mechanical Engineering Problems A.N. Pidhorny NASU, st. Pozharsky, 2/10, Kharkiv, Ukraine, 61046*

Sheludko Geliy*Researcher;**Institute of Mechanical Engineering Problems A.N. Pidhorny NASU, st. Pozharsky, 2/10, Kharkiv, Ukraine, 61046*

The article proposes an adaptive method for finding the minimum of an arbitrary smooth multivariable function. The method has been used to solve the benchmark optimization problem of a valley function. The essence of the proposed algorithm lies in the sequential approach to the bottom of the valley and the subsequent movement in the direction of decreasing the objective function. The comparison of the results of calculating the minimum point of the function is performed by using both non-gradient and gradient methods, namely: Powell, Hook-Jeeves, the steepest descent method and the method developed. It has been found that the effectiveness of the proposed method is greater than the usual search algorithms, but it is not without its drawbacks. The method that represents a number of hybrid methods, which form a hybrid coalition is proposed. The proposed hybrid algorithm does not provide a satisfactory result in the "single" search. The search algorithm reaches a point where all the values of the function at the surrounding points are greater than the values at the obtained point, and the algorithm cannot overcome the barrier. To solve the problem, it is necessary to take the obtained point as a new starting point and repeat the algorithm for finding the minimum of the function, that is, use the multistart method. The proposed method has been used to solve the problem of optimizing the blade of a wind turbine, which was reduced to the problem of unconditional optimization by using the method of penalty functions, but the goal function had a significantly valley structure. The optimal values of section thicknesses have been obtained, which makes it possible to build a blade with improved characteristics.

Keywords: *hybrid adaptive method, optimization problem, Rosenbrock function, ravine search.*

1 Вступ

Інтенсифікація виробничих технологічних процесів у різних галузях пред'являє підвищені вимоги до конструктивної міцності та економічності машин та апаратів при забезпеченні їх високої продуктивності. Вимоги до підвищення техніко-економічних показників об'єктів і процесів при максимальному використанні міцності та жорсткості, зниженні матеріаломісткості, вартості та поліпшення інших важливих характеристик при дотриманні конструктивних обмежень часто виявляються суперечливими, а тому дуже проблемними у своїй реалізації. Проектування або вдосконалення об'єктів різного призначення передбачає обмежений перебір безлічі варіантів, що мають бажані властивості. Однак такий аналіз зазвичай утруднений і не завжди ефективний. У процесі проектування часто спливає задача визначення оптимальних параметрів функцій, що описують фізичні процеси. Такі задачі називають оптимізаційними задачами.

Нині жодна галузь техніки, будівництва не обходиться без вирішення задач оптимального проектування. До таких задач належать проблеми раціонального проектування кришок гідротурбін [1], лопатей повітряних установок [2], відстроювання від небажаних резонансних частот при русі оболонок та оболонкових конструкцій з рідиною [3], проблеми запобігання підтопленню міських територій [4], визначення оптимальних параметрів елементів аерокосмічної техніки [5]-[8].

За для розв'язання практичних задач розроблено велику кількість методів та алгоритмів [9]-[15]. Найбільш привабливі серед таких методів – аналітичні, через якісний аналіз отриманого розв'язання, але нажалі аналітичне розв'язання можливо отримати лише для простих задач. Конструювання сучасних технічних об'єктів, і навіть вдосконалення вже створених, ставить перед проектувальником численні проблеми, однією з яких є отримання у заданому сенсі оптимального проекту, тобто. найбільш вигідного варіанта з безлічі можливих. При цьому проектувана конструкція повинна успішно протистояти різним пошкодженням і задовольняти експлуатаційним умовам (надійність), забезпечувати безвідмовну роботу протягом певно встановленого терміну експлуатації (довговічність), доцільно враховувати можливості виготовлення, транспортування та монтажу, зручності експлуатації, відповідати сучасним вимогам щодо рівня витрат на матеріали та виготовлення (економічність) та ін.

2 Постановка задачі

У параметричному просторі X існуючих розв'язків, відповідаючих значенню певного функціоналу $F(X)$, шукається область G^* (або точка в ній), для котрої $F(X)$ приймає екстремальне значення $F^* = F(X^*)$. У загальному вигляді така екстремальна задача може бути записана формально у вигляді

$$X^* = \arg \operatorname{extr}_{X \in G} F(X), G = \{X \neq \emptyset, G_i(X) > 0, i = 1, \dots, m\} \quad (2.1)$$

де $G_i(X)$ – обмежуючі функції на змінну X . Компоненти вектору $X \in G$ визначають певний проект (наприклад, конструкцію з її геометричними характеристиками, а також незалежні змінні параметри та інше). Інакші параметри, що входять до функціоналу $F(X)$ та обмеження $G_i(X)$, можуть бути незмінними та заданими (навантаження, умови кріплення, фізико-механічні властивості матеріалу).

Через переваги комп’ютерного розрахунку оптимізаційні задачі розв’язують з застосуванням чисельних алгоритмів, але через це на них часто накладаються додаткові умови, в яких дані алгоритми здатні застосовуватися.

Але і з додатковими умовами не всі чисельні алгоритми здатні охопити всю сукупність практичних задач. Так розглядаючи задачу пошуку мінімуму функції Розенброка $f(x_1, x_2)$, можна зіштовхнутися з певними проблемами.

$$f(x_1, x_2) = 100(x_2 - x_1^2)^2 + (1 - x_1)^2 \quad (2.2)$$

Функція (2.2) задовольняє умові гладкості та ітераційні методи повинні бути ефективні, але точність отриманого результату сильно залежить від початкової точки наближення. Такі функції мають вигляд яру, що представлено на Рис. 1, та для пошуку мінімуму потрібно рухатись вздовж його дна.

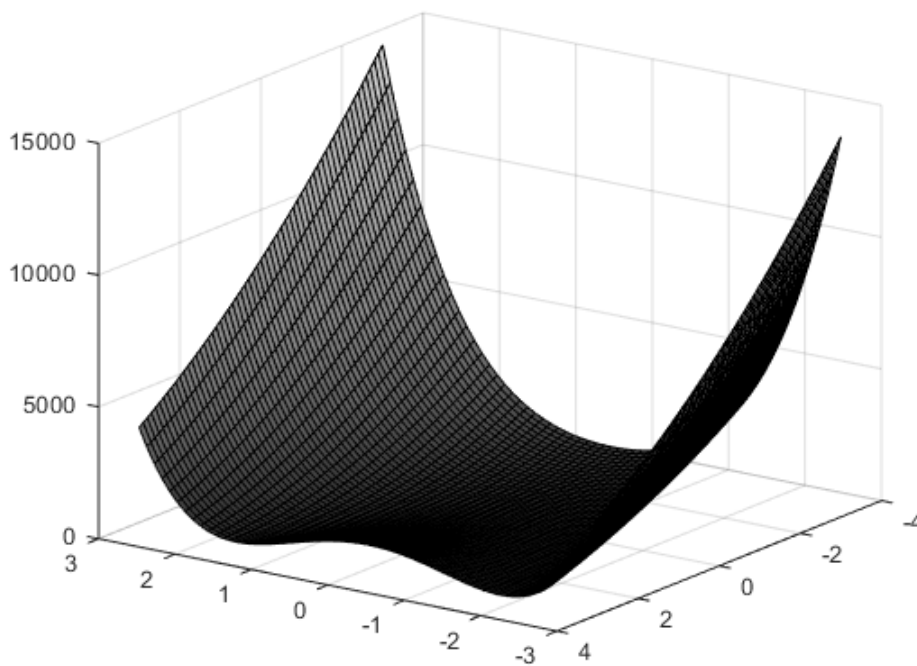


Рисунок 2.1. Графік функції $f(x_1, x_2)$

Більшість стандартних алгоритмів оптимізації розходяться на подібних функціях. Для прикладу розглянемо декілька найпопулярніших методів, що починають пошук з однакових точок та порівняємо їх.

Таблиця 1. Робота стандартних оптимізаційних методів у порівнянні із запропонованим гібридним варіантом

Метод	Хука-Дживса	Пауелла	Найшвидшого спуску	Гібридний метод
Початкова точка	(3;3)	(3;3)	(3;3)	(2,2) (3,3)
Кінцевий результат	(3; 9)	(3; 9)	(1.7851; 3.1888)	(1.001; 1.002)

Проведений аналіз оптимізаційних процедур і особливостей розв'язку задач оптимального проектування показує, що просте накоплення ефективних методів у бібліотеці математичного забезпечення та навіть введення діалогового режиму розв'язання не може забезпечити необхідних умов оптимізації. Це пов'язано з тим, що реалізована задача не має відповідного набору ознак, за якими керуюча метапрограма може ідентифікувати задачу та визначити необхідний метод.

3 Теоретична модель

Запропонований метод полягає у тому, що використовується ряд методів-гібридентів, які складають гібридну коаліцію $\{M_i\}$. Задається критерій $Q(\sigma)$, який визначає під час розв'язання, який з гібридентів найбільш ефективний у даній ситуації. Для цього вводиться функція $u = u(Q(\sigma))$, яка встановлює адаптивну стратегію введення конкретного гібридента $M_k \in \{M_i\}$, $i = 1, \dots, k, \dots, s$ (або групи гібридентів)

Взаємна робота гібридентів забезпечує більш ефективне досягнення цілі, ніж кожен з гібридентів окремо. Це досягається введенням спеціального адаптивного рівняння, яке отримує вектори мінімізуючих послідовностей $\{X_k^r\}$, напрямків пошуку $Dir X_k^r$ і пошукових адаптуючих кроків h_k^r , відповідно до змінної ситуації σ . В загальному вигляді адаптивне рівняння u можливо представити так

$$\begin{pmatrix} X_k^r \\ Dir X_k^r \\ h_k^r \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^s u_i(Q(\sigma_k)) \begin{pmatrix} X_k^{M_i} \\ Dir X_k^{M_i} \\ h_{ki} \end{pmatrix} \quad \sum_{i=1}^s u_i(Q(\sigma_k)) = 1 \quad (3.1)$$

де $u_i(Q(\sigma_k))$ – керуючі невід'ємні функції, задані на множині $\{\sigma_k\}$, $X_k^M, Dir X_k^M, h_{ki}$ – точка, напрямок, який виходить з цієї точки та адаптуючий крок пошуку, сгенеровані методом M_i відповідно, k – номер ітерації.

В якості гібридентів M_i для даного гібридного методу оптимізації обрано наступні модифікації методів [8,9]: адаптивний покроковий спуск, схема Абрамова, ярова модифікація, метод паралельних дотичних, перетинаючий рух вздовж межі області G .

В цій роботі застосовано модифікацію ярового пошуку, в якій з двох випадкових початкових точок всередині області G проводимо одновимірний пошук мінімуму будь яким локальним методом, в результаті чого маємо дві точки X_1, X_2 на дні яру. Вздовж прямої, що поєднує ці точки у напрямку зменшення цільової функції робимо крок та отримуємо точку X_3 , з якої повторюємо одновимірний пошук. Знаходимо точку X_4 , після чого використовуємо напрямок, що поєднує точки X_2 і X_4 . Далі процедура повторюється. Таким чином, на кожній ітерації відбувається багатократний спуск відносно цільової функції. Використано також метод мультистартау[16]

4 Вагова оптимізація лопатей повітряних енергетичних установок

Лопать моделюється тонкостінним природно закрученим стрижнем змінного поперечного перерізу довжиною L , закріпленим на колесі повітряної енергетичної установки (ПЕУ). Віднесемо її до глобальної декартової системи координат (рис. 4.1). Тут Z_G - вісь повороту перерізів, X_G збігається з віссю вітроколеса. Напрямок Y_G такий, що глобальна система координат є правою.

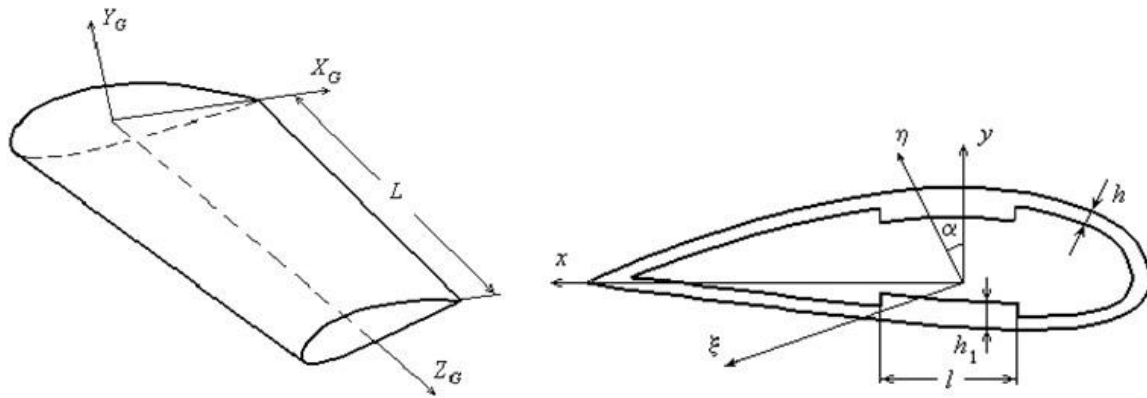


Рисунок 4.1. Схема лопаті повітряної енергетичної установки та її переріз

Геометрія лопаті подається набором перерізів, у кожному з яких задані такі параметри профілю: координати точок (x, y) зовнішнього контуру; товщина перерізу $h(z)$; товщина лонжерону $h_1(z)$; ширина лонжерону $l(z)$ (рис.4.1). Вважається, що лопать знаходиться під дією аеродинамічних навантажень та відцентрових сил. Обчислюване аеродинамічне навантаження зводиться до розподілених поперечних навантажень q_x, q_y і розподіленого крутного моменту m_z .

Опишемо одне з можливих формулювань задачі оптимізації лопаті вітроколеса. Потрібно знайти лопать мінімальної ваги за наступні умови. Під дією стаціонарного аеродинамічного навантаження та відцентрових сил нормальне переміщення w не повинно перевищувати заданої величини $[w]$, а напруження – величини $[\sigma]$.

$$|\max w^i| \leq [w], \quad |\max \sigma^i| \leq [\sigma], \quad i = \overline{1, N}. \quad (4.1)$$

Тут $[\sigma]$ – границя міцності, σ^i, w^i - згинальні напруження та переміщення в перерізах.

Функція мети - маса лопаті $m = \rho V$, де ρ - густина матеріалу, V – об'єм лопаті, що визначається за формулою

$$V = \sum_{i=1}^{N-1} \int_{z_i}^{z_{i+1}} S(z) dz, \quad (4.2)$$

де $S(z)$ - площа перерізу, $N - 1$ – кількість перерізів.

Параметрами, що варіюються тут є товщини лопаті і параметри лонжерону в різних перерізах $h^i(z), h_1^i(z), l^i(z), i = \overline{1, N}$, рис.4.1.

Сформульована задача (4.1),(4.2) є задачею умовної оптимізації. З використанням методу штрафних функцій [9] приводимо її до розв'язання задачі умовної оптимізації. Знайти мінімум штрафної функції

$$V_p = V + A_{p1}G_1 + A_{p2}G_2 \quad (4.3)$$

де A_{p1}, A_{p2} – штрафні коефіцієнти, $G_1 = ([w] - |\max w^i|)^2, G_2 = ([\sigma] - |\max \sigma^i|)^2$. Зазвичай обирають A_{pi} приблизно 10^3-10^4 . Тоді функція (4.3) набуває яружного характеру. Для мінімізації цієї функції використано модифікацію яружного алгоритму, описану вище.

Як приклад, розглянуто лопать ПЕУ з наступними параметрами: $L = 4$ м, модуль пружності $E = 5 \cdot 10^3$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0.3$, густина матеріалу $\rho = 1.6 \cdot 10^3$ кг/м³. У цьому розрахунку передбачалося, що лонжерон у перерізі відсутній, тобто $h_1 = h, l = 0$, рис.4.1. Ширина лопаті змінювалася від 1 м до 0.6 м. У процесі розв'язання задачі визначено поля переміщень та напружень у лопаті під дією аеродинамічних навантажень. Кількість перерізів приймалося рівною 7. Максимальні переміщення у площині обертання вітроколеса, нормальні

до осі OZ, склали 28.5см; максимальне згинальне напруження в кореновому перерізі лопаті становило 12.8МПа.

У табл. 4.1 наведено результати розв'язання задачі оптимізації: для перерізів Z_i подані початкові значення товщини в перерізах h_0 і оптимальні параметри h^* . У початковому варіанті маса лопаті дорівнювала 19.38 кг. В результаті оптимізації отримано лопату масою 16.41 кг.

При використанні методу штрафних функцій були обрані такі значення штрафних коефіцієнтів $A_{p1} = A_{p2} = 10^4$. Подальше збільшення цих коефіцієнтів не призвело до суттєвої зміни параметрів, що варіюються.

Таблиця 4.1 Початкові та оптимальні параметри лопаті

Номер перерізу	Координата Z, м	Початкова товщина, мм	Оптимальна товщина, мм
1	0.800	6.0	5.04
2	1.236	5.6	4.73
3	1.818	5.0	4.21
4	2.400	4.4	3.67
5	2.836	4.0	3.25
6	3.564	3.2	2.41
7	4.000	3.0	2.19

Єдиним активним обмеженням виявилось переміщення лопаті. Власна частота коливань у процесі рахунку змінилася незначно; ці зміна не призвели до порушення заданих обмежень.

5 Висновки

Проаналізовано різні методи оптимального пошуку мінімуму нелінійних функцій багатьох змінних. Запропоновано модифікацію яружного методу для пошуку мінімуму нелінійної функції багатьох змінних.

На обраному тестовому прикладі методи Пауелла та Хука-Дживса не дають точний розв'язок оптимізаційної задачі, а градієнтний метод дає розв'язок тільки лише в безпосередній близькості до мінімуму. Це відбувається через особливість вигляду функції Розенброка – ця функція має декілька мінімумів на різних координатах та суттєво виражену яружну структуру.

Через цю саме особливість запропонований нами гібридний алгоритм не надає задовільного результату при «одиночному» пошуку. Пошуковий алгоритм потрапляє до такої точки, в якій всі значення функції в оточуючих точках більші, ніж значення в отриманій точці, й алгоритм та не може подолати бар'єр. Для вирішення проблеми необхідно взяти отриману точку за нову початкову точку та повторити алгоритм пошуку мінімуму функції, тобто використати метод мультистарту.

Запропонований метод було надалі використано для розв'язання задачі оптимізації лопаті повітряної установки, яку за допомогою методу штрафних функцій зведено до проблеми безумовної оптимізації, але при цьому функція мети мала суттєво яружну структуру. Отримані оптимальні значення товщин перерізів, до дало змогу побудувати лопать з покращеними характеристиками.

ЛІТЕРАТУРА

1. Місюра С. Ю., Сметанкіна Н. В., Місюра Є. Ю. Рациональное моделирование кришки гидротурбины для анализа прочности. *Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПИ»*. Сер. Динаміка і міцність машин. 2019. № 1. С. 34–39. <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/44370>
2. Дегтярев К.Г., Стрельникова Е. А., Шелудько Г. А. Компьютерное моделирование лопастей ветроустановок с оптимальными параметрами / *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія: Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління*, No 19, 2012, С.81-86 <http://mia.univer.kharkov.ua/19/30251.pdf>
3. Strelnikova E., Gnitko V., Krutchenko D., Naumemko Y. Free and forced vibrations of liquid storage tanks with baffles *J. Modern Technology & Engineering* Vol.3, No.1, 2018, pp.15-52.

- <http://jomardpublishing.com/UploadFiles/Files/journals/JTME/V3No1/StrelnikovaE.pdf>
4. Serikova E., Strelnikova E., Yakovlev V. Mathematical model of dangerous changing the groundwater level in Ukrainian industrial cities. *Journal of Environment Protection and Sustainable Development*. 2015. Vol. 1, pp.86-90.
<https://www.researchgate.net/publication/281784323>
 5. Сметанкина Н.В. Нестационарное деформирование, термоупругость и оптимизация многослойных пластин и цилиндрических оболочек. Мiськдрук, Харьков, 2011, 376 с.
 6. Хозяинов Б.П. Испытание лопастей ветро - и гидротурбин с вертикальной осью вращения / Хозяинов Б.П., Костин И.Г. // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва*, 2010. Т.4. – №24, – С. 120-124.
<https://cyberleninka.ru/article/n/ispytanie-lopastey-vetro-i-gidroturbin-s-vertikalnoy-osyu-vascheniya>
 7. Makeev V.I., Strelnikova E.A., Trofimenko P.E., Bondar A. V. On Choice of Design Parameters for an Aircraft. *Int. Appl. Mech.* 2013. 49, No. 5, pp.588-596.
[DOI:10.1007/s10778-013-0592-8](https://doi.org/10.1007/s10778-013-0592-8)
 8. Shupikov A.N., Smetankina N.V., Sheludko H.A. Selection of optimal parameters of multilayer plates at nonstationary loading. *Meccanica*. Vol. 33. No 6, 1998, P. 553–564.
<https://doi.org/10.1023/A:1004311229316>
 9. Шелудько Г.А., Шупіков О.М., Сметанкіна Н.В., Угрімов С.В. Прикладний адаптивний пошук.- Харків: Око, 2001.-191 с. http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis.
 10. Шелудько Г.А., Стрельникова Е. А., Кантор Б.Я. Гибридные методы в задачах оптимального проектирования. 1. Поисквые методы. Харьков: Новое слово, 2008.- 188 с.
<http://irbis-nbuv.gov.ua>
 11. Wang Z., Tang K., and Yao X. Multi-objective approaches to optimal testing resource allocation in modular software systems. *IEEE Transactions on Reliability*, 59(3):pp. 563–575, 2010. [DOI: 10.1109/TR.2010.2057310](https://doi.org/10.1109/TR.2010.2057310)
 12. Meignan D., Knust S., Frayret J.-M, Pesant G., and Gaud N. A review and taxonomy of interactive optimization methods in operations research. *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems (TiiS)*, 5(3):pp.17-29, 2015. <https://doi.org/10.1145/2808234>
 13. J. M. Balera and V. A. de Santiago Ju'nior. A systematic mapping addressing hyper-heuristics within search-based software testing. *Information and Software Technology*, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.infsof.2019.06.012>
 14. Ghadimi, Euhanna et al. Optimal Parameter Selection for the Alternating Direction Method of Multipliers (ADMM): Quadratic Problems. *IEEE Transactions on Automatic Control* 60 , 2015: pp. 644-658. [DOI: 10.1109/TAC.2014.2354892](https://doi.org/10.1109/TAC.2014.2354892)
 15. Ma F., Hao J.K., Wang Y.: An effective iterated tabu search for the maximum bisection problem. *Comput. Oper. Res.* 81, pp. 78–89 (2017). [DOI: 10.1016/j.cor.2016.12.012](https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.12.012)
 16. Gyorgy A.,Koksis L.: Efficient Multi-Start Strategies for Local Search Algorithms. *Journal of Artificial Intelligence Research* 41 (2011) 407-444. [DOI:10.1613/jair.3313](https://doi.org/10.1613/jair.3313)

REFERENCES

1. Misyura S., Smetankina N., Misyura U. Rational modeling of a hydroturbine cover for strength analysis. *Bulletin of Kharkiv Polytechnic Institute, Dynamics and strength of machines*, no. 1, pp.34 – 39, 2019. [in Ukrainian]. <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/44370>
2. Degtyarev K. Strelnikova E. Sheludko G. Computer modeling of wind turbine blades with optimal parameters. *Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series: Mathematical modeling. Information Technology. Automated control systems*, no. 19, pp.81 – 86, 2012. URL: <http://mia.univer.kharkov.ua/19/30251.pdf> [in Russian]
3. Strelnikova E., Gnitko V., Krutchenko D., Naumemko Y. Free and forced vibrations of liquid storage tanks with baffles *J. Modern Technology & Engineering* Vol.3, No.1, 2018, pp.15-52.

- <http://jomardpublishing.com/UploadFiles/Files/journals/JTME/V3No1/StrelnikovaE.pdf>
4. Serikova E., Strelnikova E., Yakovlev V. Mathematical model of dangerous changing the groundwater level in Ukrainian industrial cities. *Journal of Environment Protection and Sustainable Development*. 2015. Vol. 1, pp.86-90.
<https://www.researchgate.net/publication/281784323>
 5. Smetankina, N.V.: Non-stationary deformation, thermal elasticity and optimisation of laminated plates and cylindrical shells. Miskdruk Publishers, Kharkiv, 2011, 376 p. [in Russian].
 6. Khozyainov B.P. Testing of blades of wind and hydro turbines with a vertical axis of rotation / Khozyainov B.P., Kostin I.G. // Bulletin of the S.P. Korolev Samara State Aerospace University. Academician, 2010. Vol. 4. - No. 24, - pp. 120-124. <https://cyberleninka.ru/article/n/ispytanie-lopastey-vetro-i-gidroturbin-s-vertikalnoy-osyu-vrascheniya>
 7. Makeev V.I., Strelnikova E.A., Trofimenko P.E., Bondar A. V. On Choice of Design Parameters for an Aircraft. *Int. Appl. Mech.* 2013. 49, No. 5, pp.588-596. [DOI:10.1007/s10778-013-0592-8](https://doi.org/10.1007/s10778-013-0592-8)
 8. Shupikov A.N., Smetankina N.V., Sheludko H.A. Selection of optimal parameters of multilayer plates at nonstationary loading. *Meccanica*. Vol. 33. No 6, 1998, P. 553–564. <https://doi.org/10.1023/A:1004311229316>
 9. Sheludko GA, Shupikov OM, Smetankina NV, Ugrimov SV Applied adaptive search.- Kharkiv: Eye http://irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbu.gov.ua/cgiirbis.
 10. Sheludko G.A., Strelnikova E.A., Kantor B. Ya. Hybrid methods in optimal design problems. Search methods. Kharkov: New Word, 2008.188 p. <http://irbis-nbu.gov.ua>
 11. Wang Z., Tang K., and Yao X. Multi-objective approaches to optimal testing resource allocation in modular software systems. *IEEE Transactions on Reliability*, 59(3):pp. 563–575, 2010. [DOI: 10.1109/TR.2010.2057310](https://doi.org/10.1109/TR.2010.2057310)
 12. Meignan D., Knust S., Frayret J.-M, Pesant G., and Gaud N. A review and taxonomy of interactive optimization methods in operations research. *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems (TiiS)*, 5(3):pp.17-29, 2015. <https://doi.org/10.1145/2808234>
 13. J. M. Balera and V. A. de Santiago Ju'nior. A systematic mapping addressing hyper-heuristics within search-based software testing. *Information and Software Technology*, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2019.06.012>
 14. Ghadimi, Euhanna et al. Optimal Parameter Selection for the Alternating Direction Method of Multipliers (ADMM): Quadratic Problems. *IEEE Transactions on Automatic Control* 60 , 2015: pp. 644-658. [DOI: 10.1109/TAC.2014.2354892](https://doi.org/10.1109/TAC.2014.2354892)
 15. Ma F., Hao J.K., Wang Y.: An effective iterated tabu search for the maximum bisection problem. *Comput. Oper. Res.* 81, pp. 78–89, 2017. [DOI: 10.1016/j.cor.2016.12.012](https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.12.012)
 16. Gyorgy A.,Koksis L.: Efficient Multi-Start Strategies for Local Search Algorithms. *Journal of Artificial Intelligence Research* 41 (2011) 407-444. [DOI:10.1613/jair.3313](https://doi.org/10.1613/jair.3313)

УДК 004.415.53

The application of the orthogonal decomposition method for the algebraic solver separator

O.M. Melkozerova, S. G. Rassomakhin, V.N. Shlokin

Melkozerova Olha M. *PhD; associate professor of Information systems and technologies security department*
V. N. Karasin Kharkiv National University, Svobody Sq 4, Kharkiv, Ukraine, 61022
e-mail:

olha.melkozerova@karazin.ua

<https://orcid.org/0000-0002-1134-2925>

Rassomakhin Sergiy G. *Doctor of technical science; head of Information systems and technologies security department*
V. N. Karasin Kharkiv National University, Svobody Sq 4, Kharkiv, Ukraine, 61022
e-mail:

rassomakhin@karazin.ua

<https://orcid.org/0000-0002-1134-2925>

Shlokin Volodymyr M. *Senior lecturer of Information systems and technologies security department*
V. N. Karasin Kharkiv National University, Svobody Sq 4, Kharkiv, Ukraine, 61022
e-mail:

vshlokin@karazin.ua

<https://orcid.org/0000-0001-5833-5346>

The method which is valid for improving the transmission of information and a clean separation of signal and noise is suggested in [1]. The basis of the proposed new way of developing the theory and methods of communication is the rejection of the probabilistic method for evaluating noisy signals according to the maximum likelihood rule. This method contains the mathematical procedure for absolutely accurate separation, as well as proving the absence of any fundamental theoretical limits [2,3] on the effectiveness of communications, including the absence of channel capacity limitations [4]. This approach includes the fundamentally new concept and the technical aspects of implementing telecommunication systems and uses systems of linear algebra equations (SLAE) to filter signals from noise. The SLAE matrix is the linear algebraic matrix (LSM) that separates and extracts the true values of informative signal parameters. Such a SLAE always has the solution, but obtaining this solution sometimes requires a particular method to be used, because its matrix is not always square, but can be rectangular as well. Therefore, the method of the orthogonal decomposition is proposed in this paper. For obtaining the matrices of orthogonal decomposition the Gram–Schmidt process, which is suitable for matrices of any size and composition, can be used. The method of solving a SLAE includes full description of solution and acceptable for matrices of any size. The example of solving the SLAE with a small matrix is presented in the paper. The MathCad Prime has been implemented for a bigger matrix. The implementation includes the functions that can be used in any other programming language. The solution has minimal norm and acceptable for linear algebraic matrices that separate signal and noise.

Key words: separation, systems of linear algebra equations, signal, noise, orthogonal decomposition.

Застосування методу ортогонального розкладення в алгебраїчній сепарації

О. М. Мелкозьорова, С. Г. Рассомахін, В. М. Шлокін

Мелкозьорова Ольга М. *Доктор філософії; доцент кафедри Безпеки інформаційних систем і технологій*
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, м. Свободи 4, Харків, Україна, 61022

Рассомахін Сергій Г. *Доктор технічних наук; завідувач кафедри Безпеки інформаційних систем і технологій*
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, м. Свободи 4, Харків, Україна, 61022

Шлокін Володимир М.*Старший викладач кафедри Безпеки інформаційних систем і технологій
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, м. Свободи 4,
Харків, Україна, 61022*

Винахід у роботі [1] пропонує метод, який пов'язано з системами для покращення передачі та чистого відділення шуму та сигналу. Базова ідея, яка підкреслюється у роботі для нового шляху розробки теорії та техніки комунікації, це відхилення методу, який побудовано на ймовірності, для оцінки сигналу згідно з правилом найбільшої ймовірності. Це математична процедура для абсолютно чіткого відокремлення сигналу та шуму та доказ відсутності будь-яких фундаментальних теоретичних обмежень [2,3] на ефективність комунікації, включно відсутність обмежень ємності каналу [4]. Такий підхід розглядає нову концепцію та технічні аспекти імплементації телекомунікаційних систем та використовує системи алгебраїчних рівнянь (СЛАР) для того, щоб відфільтрувати сигнал від шуму. Матриця СЛАР – це лінійна алгебраїчна матриця, що сепарує та виділяє правдиві значення інформативних параметрів сигналу. Такі СЛАР завжди мають рішення, але ці рішення потребують інколи особливого методу, щоб бути вирішеними, тому що їх розмір не завжди квадратний, іноді прямокутний. Таким чином у цій роботі пропонується метод ортогонального розкладення. Для отримання матриць з ортогональним розкладенням можна використовувати метод Грама Шмідта для матриць з будь-яким розміром навіть якщо є стовпці або строки, що повторюються у матриці. Метод для вирішення СЛАР містить повний опис рішення та придатний для довільного розміру матриць. У роботі є приклад з вирішення з малим розміром матриці. Також є приклад імплементації з матрицею набагато більшого розміру у середовищі MathCad Prime. Імплементація містить функції, які можна використовувати для інших мов програмування. Отримане рішення має мінімальну норму та придатне для лінійних алгебраїчних матриць, що сепарують сигнал від шуму.

Ключові слова: сепарація, системи лінійних алгебраїчних рівнянь, сигнал, шум, ортогональне розкладення.

1. Introduction

The possibility of a new method of improving the transmission of information and a clean separation of signal and noise is suggested by the discovery presented in [1]. This method uses systems of linear algebra equations (SLAE) to filter noise from signals. To correct errors the system is configured to carry out mixture $Y(t)$ at specific time T_0, \dots, T_{2M} and SLAE can be:

$$A \cdot X = B, \quad (1.1)$$

The algebraic solver separator is designed to separate the signal and noise into two independent processes that occur in time [1]. The QR decomposition method of solving such a SLAE is considered in the paper. This method allows solving a square and rectangular SLAE. The solution has a minimal norm, otherwise:

$$\|X\| = \sqrt{x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_{n_1}^2} \quad (1.2)$$

where coefficients of a matrix A are:

$$A = \underbrace{\left(\begin{array}{cccccccc} A_{0,0} & A_{0,1} & A_{0,2} & \dots & A_{0,M} & A_{0,M+1} & \dots & A_{0,2M} \\ A_{1,0} & A_{1,1} & A_{1,2} & \dots & A_{1,M} & A_{1,M+1} & \dots & A_{1,2M} \\ A_{2,0} & A_{2,1} & A_{2,2} & \dots & A_{2,M} & A_{2,M+1} & \dots & A_{2,2M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{2M,0} & A_{2M,1} & A_{2M,2} & \dots & A_{2M,M} & A_{2M,M+1} & \dots & A_{2M,2M} \end{array} \right)}_{2M+1} \Bigg\}^{2M+1} \quad (1.3)$$

In [1] a matrix A is square $(2M+1) \times (2M+1)$, but it can be possible to use matrices that are not square where: $n_1 > n_2$, $n_1 < n_2$, $n_1 = n_2$. n_1 and n_2 are possible sizes of a matrix A:

$$A = \underbrace{\left(\begin{array}{cccccccc} A_{0,0} & A_{0,1} & A_{0,2} & \dots & A_{0,n_1-1} & A_{0,n_1} & \dots & A_{0,n_2-1} \\ A_{1,0} & A_{1,1} & A_{1,2} & \dots & A_{1,n_1-1} & A_{1,n_1} & \dots & A_{1,n_2-1} \\ A_{2,0} & A_{2,1} & A_{2,2} & \dots & A_{2,n_1-1} & A_{2,n_1} & \dots & A_{2,n_2-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{n_1-1,0} & A_{n_1-1,1} & A_{n_1-1,2} & \dots & A_{n_1-1,n_1-1} & A_{n_1-1,n_1} & \dots & A_{n_1-1,n_2-1} \end{array} \right)}_{n_2} \Bigg\}_{n_1}. \quad (1.4)$$

And a vector-column of free members can be:

$$B = \begin{array}{l} \left| \begin{array}{l} Y(T_0) \\ Y(T_1) \\ Y(T_2) \\ Y(T_3) \\ \dots \\ Y(T_{n_1}) \end{array} \right| \begin{array}{l} \leftarrow \text{for } T_0 \\ \leftarrow \text{for } T_1 \\ \leftarrow \text{for } T_2 \\ \leftarrow \text{for } T_3 \\ \dots \\ \leftarrow \text{for } T_{n_1} \end{array} \end{array} \quad (1.5)$$

2 Introduction of SLAE matrices with the orthogonal decomposition

One of the most important variants of orthogonal decompositions is a so-called QR decomposition:

$$A = QR, \quad (2.1)$$

where A is a matrix from (1.1);

Q is an orthogonal matrix.

The matrix R can be obtained by the formula:

$$R = Q^T \cdot A \quad (2.2)$$

The variables $N_1 = n_1 - 1$, $N_2 = n_2 - 1$, $N_3 = |N_1 - N_2|$ are introduced for convenience. The size of a QR decomposition matrix is: $N_1 \times (N_1 + N_2)$ if $n_1 > n_2$ or $N_1 \times (2 \cdot N_1 + N_3)$ if $n_1 < n_2$.

For a rectangular matrix with size $n_1 \times n_2$ where $n_1 > n_2$, a QR decomposition matrix can be as shown in (2.3) or (2.4):

$$QR = \left(\begin{array}{cccccccccccccccc} Q_{0,0} & Q_{0,1} & Q_{0,2} & \dots & Q_{0,N_1} & R_{0,0} & R_{0,1} & R_{0,2} & \dots & R_{0,N_1} & E_{0,0} & E_{0,1} & E_{0,2} & \dots & E_{0,N_3-1} \\ Q_{1,0} & Q_{1,1} & Q_{1,2} & \dots & Q_{1,N_1} & 0 & R_{1,1} & R_{1,2} & \dots & R_{1,N_1} & E_{1,0} & E_{1,1} & E_{1,2} & \dots & E_{1,N_3-1} \\ Q_{2,0} & Q_{2,1} & Q_{2,2} & \dots & Q_{2,N_1} & 0 & 0 & R_{2,2} & \dots & R_{2,N_1} & E_{2,0} & E_{2,1} & E_{2,2} & \dots & E_{2,N_3-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Q_{N_1,0} & Q_{N_1,1} & Q_{N_1,2} & \dots & Q_{N_1,N_1} & 0 & 0 & 0 & \dots & R_{N_1,N_1} & E_{N_1,0} & E_{N_1,1} & E_{N_1,2} & \dots & E_{N_1,N_3-1} \end{array} \right) \quad (2.3)$$

$$QR = [Q(N_1 \times N_1) \quad R(N_1 \times N_1) \quad E(N_1 \times (N_1 - N_2 - 1))]. \quad (2.4)$$

If $n_1 < n_2$, a QR decomposition matrix can be as shown in (2.5) or (2.6):

$$QR = \left(\begin{array}{cccccccccccc} Q_{0,0} & Q_{0,1} & Q_{0,2} & \dots & Q_{0,N_1} & R_{0,0} & R_{0,1} & R_{0,2} & \dots & R_{0,N_2} \\ Q_{1,0} & Q_{1,1} & Q_{1,2} & \dots & Q_{1,N_1} & 0 & R_{1,1} & R_{1,2} & \dots & R_{1,N_2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 & R_{2,2} & \dots & R_{2,N_2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{N_2,N_2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Q_{N_1,0} & Q_{N_1,1} & Q_{N_1,2} & \dots & Q_{N_1,N_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right) \quad (2.5)$$

$$QR = \begin{bmatrix} Q(N_1 \times N_1) & R(N_2 \times N_2) \\ & 0(N_3 \times N_2) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

If $n_1=n_2$, then a QR decomposition matrix is:

$$QR = \begin{pmatrix} Q_{0,0} & Q_{0,1} & Q_{0,2} & \dots & Q_{0,N_1} & R_{0,0} & R_{0,1} & R_{0,2} & \dots & R_{0,N_1} \\ Q_{1,0} & Q_{1,1} & Q_{1,2} & \dots & Q_{1,N_1} & 0 & R_{1,1} & R_{1,2} & \dots & R_{1,N_1} \\ Q_{2,0} & Q_{2,1} & Q_{2,2} & \dots & Q_{2,N_1} & 0 & 0 & R_{2,2} & \dots & R_{2,N_1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Q_{N_1,0} & Q_{N_1,1} & Q_{N_1,2} & \dots & Q_{N_1,N_1} & 0 & 0 & 0 & \dots & R_{N_1,N_1} \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

$$QR = [Q(N_1 \times N_1) \quad R(N_1 \times N_1)] \quad (2.8)$$

Any SLAE can be represented by the following formulas (2.9), (2.10), (2.11) after obtaining a QR-decomposition matrix:

$$Q^T \cdot A = Q^T \cdot B \quad (2.9)$$

$$R = Q^T \cdot B. \quad (2.10)$$

$$R = QTB, \quad (2.11)$$

where $QTB = Q^T \cdot B$.

SLAE for (2.3) and (2.4) can be like (2.12):

$$\begin{aligned} R_{0,0} \cdot x_0 + R_{0,1} \cdot x_1 + R_{0,2} \cdot x_2 + \dots + R_{0,N_1} \cdot x_{N_1} &= QTB_0 - E_{0,0} \cdot x_{N_1+1} - E_{0,1} \cdot x_{N_1+2} - E_{0,2} \cdot x_{N_1+3} - \dots - E_{0,N_3-1} \cdot x_{N_1+N_3} \\ R_{1,1} \cdot x_1 + R_{1,2} \cdot x_2 + \dots + R_{1,N_1} \cdot x_{N_1} &= QTB_1 - E_{1,0} \cdot x_{N_1+1} - E_{1,1} \cdot x_{N_1+2} - E_{1,2} \cdot x_{N_1+3} - \dots - E_{1,N_3-1} \cdot x_{N_1+N_3} \\ R_{2,2} \cdot x_2 + \dots + R_{2,N_1} \cdot x_{N_1} &= QTB_2 - E_{2,0} \cdot x_{N_1+1} - E_{2,1} \cdot x_{N_1+2} - E_{2,2} \cdot x_{N_1+3} - \dots - E_{2,N_3} \cdot x_{N_1+N_3} \\ &\dots \\ R_{N_1,N_1} \cdot x_{N_1} &= QTB_{N_1} - E_{N_1,0} \cdot x_{N_1+1} - E_{N_1,1} \cdot x_{N_1+2} - E_{N_1,2} \cdot x_{N_1+3} - \dots - E_{N_1,N_3} \cdot x_{N_1+N_3} \end{aligned} \quad (2.12)$$

The norm of the solution vector looks like:

$$C = x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_{N_1}^2 + x_{N_1+1}^2 + x_{N_1+2}^2 + \dots + x_{N_1+N_3}^2. \quad (2.12)$$

The partial derivatives are equated to zero for calculating the minimum of C (2.12):

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial x_{N_1+1}} &= x_0 \cdot \frac{\partial x_0}{\partial x_{N_1+1}} + x_1 \cdot \frac{\partial x_1}{\partial x_{N_1+1}} + x_2 \cdot \frac{\partial x_2}{\partial x_{N_1+1}} + \dots + x_{N_1} \cdot \frac{\partial x_{N_1}}{\partial x_{N_1+1}} + x_{N_1+1} = 0 \\ \frac{\partial C}{\partial x_{N_2+2}} &= x_0 \cdot \frac{\partial x_0}{\partial x_{N_2+2}} + x_1 \cdot \frac{\partial x_1}{\partial x_{N_2+2}} + x_2 \cdot \frac{\partial x_2}{\partial x_{N_2+2}} + \dots + x_{N_1} \cdot \frac{\partial x_{N_1}}{\partial x_{N_2+2}} + x_{N_2+2} = 0 \\ &\dots \\ \frac{\partial C}{\partial x_{N_1+N_3}} &= x_0 \cdot \frac{\partial x_0}{\partial x_{N_1+N_3}} + x_1 \cdot \frac{\partial x_1}{\partial x_{N_1+N_3}} + x_2 \cdot \frac{\partial x_2}{\partial x_{N_1+N_3}} + \dots + x_{N_1} \cdot \frac{\partial x_{N_1}}{\partial x_{N_1+N_3}} + x_{N_1+N_3} = 0 \end{aligned} \quad (2.13)$$

N_1 variables can be derived from (2.12):

$$\begin{aligned}
 x_{N_1} &= \frac{QTB_{N_1}}{R_{N_1, N_1}} - \frac{E_{N_1, 0} \cdot x_{N_1+1}}{R_{N_1, N_1}} - \frac{E_{N_1, 1} \cdot x_{N_1+2}}{R_{N_1, N_1}} - \frac{E_{N_1, 2} \cdot x_{N_1+3}}{R_{N_1, N_1}} - \dots - \frac{E_{N_1, N_3-1} \cdot x_{N_1+N_3}}{R_{N_1, N_1}} \\
 &\dots \\
 x_2 &= \frac{QTB_2}{R_{2, 2}} - \frac{E_{2, 0} \cdot x_{N_1+1}}{R_{2, 2}} - \frac{E_{2, 1} \cdot x_{N_1+2}}{R_{2, 2}} - \frac{E_{2, 2} \cdot x_{N_1+3}}{R_{2, 2}} - \dots - \frac{E_{2, N_3-1} \cdot x_{N_1+N_3}}{R_{2, 2}} - \frac{R_{2, N_1} x_{N_1}}{R_{2, 2}} \\
 x_1 &= \frac{QTB_1}{R_{1, 1}} - \frac{E_{1, 0} \cdot x_{N_1+1}}{R_{1, 1}} - \frac{E_{1, 1} \cdot x_{N_1+2}}{R_{1, 1}} - \frac{E_{1, 2} \cdot x_{N_1+3}}{R_{1, 1}} - \dots - \frac{E_{1, N_3-1} \cdot x_{N_1+N_3}}{R_{1, 1}} - \frac{R_{1, 2} \cdot x_2}{R_{1, 1}} - \dots - \frac{R_{1, N_1} \cdot x_{N_1}}{R_{1, 1}} \\
 x_0 &= \frac{QTB_0}{R_{0, 0}} - \frac{E_{0, 0} \cdot x_{N_1+1}}{R_{0, 0}} - \frac{E_{0, 1} \cdot x_{N_1+2}}{R_{0, 0}} - \frac{E_{0, 2} \cdot x_{N_1+3}}{R_{0, 0}} - \dots - \frac{E_{0, N_3-1} \cdot x_{N_1+N_3}}{R_{0, 0}} - \frac{R_{0, 2} \cdot x_2}{R_{0, 0}} - \frac{R_{0, 1} \cdot x_1}{R_{0, 0}} - \dots - \frac{R_{0, N_1} \cdot x_{N_1}}{R_{0, 0}}
 \end{aligned}
 \tag{2.14}$$

Any lines of SLAE (2.14) can be represented like the expressions (2.15):

$$\begin{aligned}
 x_0 &= e_0 + d_0 \cdot x_{N_1+1} + c_0 \cdot x_{N_1+2} + b_0 \cdot x_{N_1+3} + \dots + a_0 \cdot x_{N_1+N_3} \\
 x_1 &= e_1 + d_1 \cdot x_{N_1+1} + c_1 \cdot x_{N_1+2} + b_1 \cdot x_{N_1+3} + \dots + a_1 \cdot x_{N_1+N_3} \\
 x_2 &= e_2 + d_2 \cdot x_{N_1+1} + c_2 \cdot x_{N_1+2} + b_2 \cdot x_{N_1+3} + \dots + a_2 \cdot x_{N_1+N_3} \\
 &\dots \\
 x_{N_1} &= e_{N_1} + d_{N_1} \cdot x_{N_1+1} + c_{N_1} \cdot x_{N_1+2} + b_{N_1} \cdot x_{N_1+3} + \dots + a_{N_1} \cdot x_{N_1+N_3}
 \end{aligned}
 \tag{2.15}$$

Then the expressions (2.13) will take the following form:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial C}{\partial x_{N_1+1}} &= x_0 \cdot d_0 + x_1 \cdot d_1 + x_2 \cdot d_2 + \dots + x_{N_1} \cdot d_{N_1} + x_{N_1+1} = 0 \\
 \frac{\partial C}{\partial x_{N_2+2}} &= x_0 \cdot c_0 + x_1 \cdot c_1 + x_2 \cdot c_2 + \dots + x_{N_1} \cdot c_{N_1} + x_{N_1+2} = 0 \\
 &\dots \\
 \frac{\partial C}{\partial x_{N_1+N_3}} &= x_0 \cdot a_0 + x_1 \cdot a_1 + x_2 \cdot a_2 + \dots + x_{N_1} \cdot a_{N_1} + x_{N_1+N_3} = 0
 \end{aligned}
 \tag{2.16}$$

The SLAE (2.16) is a system with a square matrix. According to (2.7) and (2.8) such systems are solved by the method of “direct run” because it can be represented in the form of the triangular matrix R. It is possible to obtain N3 variables. N1+1 variables are derived from (2.12).

3 An example of solving a SLAE by using QR decomposition matrices

For the demonstration of the solution, matrices A and B have been chosen:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 20 & 2 & 3 \\ 7 & 8 & 56 & 200 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 2 \\ 24 \end{bmatrix}.$$

The parameters of the A matrix $n_1=2$, $n_2=4$, $N_1=2-1=1$, $N_2=4-1=3$, $N_3=N_1-N_2=2$. The size of the QR matrix A is $N_1 \times (2 \cdot N_1 + N_3) = 2 \times (2 \cdot 2 + 2)$ at $2 < 4$:

$$AQR = \begin{pmatrix} 0.141 & -0.99 & 7.071 & 10.748 & 55.72 & 198.414 \\ 0.99 & 0.141 & 0 & -18.668 & 5.94 & 25.314 \end{pmatrix}.$$

The expression (2.3) will be represented in the form:

$$AQR = \begin{bmatrix} Q_{0,0} & Q_{0,1} & R_{0,0} & R_{0,1} & E_{0,0} & E_{0,1} \\ Q_{1,0} & Q_{1,1} & 0 & R_{1,1} & E_{1,0} & E_{1,1} \end{bmatrix}$$

$$QTB = Q^T \cdot B = \begin{bmatrix} QTB_0 \\ QTB_1 \end{bmatrix}.$$

According to (2.14) it is possible to present:

$$R_{0,0} \cdot x_0 + R_{0,1} \cdot x_1 = QTB_0 - E_{0,0} \cdot x_2 - E_{0,1} \cdot x_3 \quad (3.1)$$

$$R_{1,1} \cdot x_1 = QTB_1 - E_{1,0} \cdot x_2 - E_{1,1} \cdot x_3 \quad (3.2)$$

$$x_1 = \frac{QTB_1}{R_{1,1}} - \frac{E_{1,0}}{R_{1,1}} \cdot x_2 - \frac{E_{1,1}}{R_{1,1}} \cdot x_3$$

$$x_0 = \frac{QTB_0}{R_{0,0}} - \frac{E_{0,0}}{R_{0,0}} \cdot x_2 - \frac{E_{0,1}}{R_{0,0}} \cdot x_3 - \frac{R_{0,1}}{R_{0,0}} \cdot x_1$$

$$x_0 = \frac{QTB_0}{R_{0,0}} - \frac{E_{0,0}}{R_{0,0}} \cdot x_2 - \frac{E_{0,1}}{R_{0,0}} \cdot x_3 - \frac{R_{0,1}}{R_{0,0}} \cdot \left(\frac{QTB_1}{R_{1,1}} - \frac{E_{1,0}}{R_{1,1}} \cdot x_2 - \frac{E_{1,1}}{R_{1,1}} \cdot x_3 \right)$$

$$x_0 = \left(\frac{QTB_0}{R_{0,0}} - \frac{R_{0,1}}{R_{0,0}} \cdot \frac{QTB_1}{R_{1,1}} \right) - \left(\frac{E_{0,0}}{R_{0,0}} - \frac{R_{0,1}}{R_{0,0}} \cdot \frac{E_{1,0}}{R_{1,1}} \right) \cdot x_2 - \left(\frac{E_{0,1}}{R_{0,0}} - \frac{R_{0,1}}{R_{0,0}} \cdot \frac{E_{1,1}}{R_{1,1}} \right) \cdot x_3.$$

The variables x_1 and x_0 for the SLAE are possible to represent as in (2.3) and (2.4):

$$x_0 = c_0 + b_0 \cdot x_2 + a_0 \cdot x_3, \quad (3.3)$$

$$\text{where } c_0 = \frac{QTB_0}{R_{0,0}} - \frac{R_{0,1}}{R_{0,0}} \cdot \frac{QTB_1}{R_{1,1}}, \quad b_0 = \frac{E_{0,0}}{R_{0,0}} - \frac{R_{0,1}}{R_{0,0}} \cdot \frac{E_{1,0}}{R_{1,1}}, \quad a_0 = \frac{E_{0,1}}{R_{0,0}} - \frac{R_{0,1}}{R_{0,0}} \cdot \frac{E_{1,1}}{R_{1,1}}.$$

$$x_1 = c_1 + b_1 \cdot x_2 + a_1 \cdot x_3, \quad (3.4)$$

$$\text{where } c_1 = \frac{QTB_1}{R_{1,1}}, \quad b_1 = \frac{E_{1,0}}{R_{1,1}}, \quad a_1 = \frac{E_{1,1}}{R_{1,1}}.$$

The norm of the vector:

$$C = x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + x_3^2. \quad (3.5)$$

The partial derivatives are zero for calculating the minimum of (3.5):

$$\frac{\partial C}{\partial x_2} = x_0 \cdot \frac{\partial x_0}{\partial x_2} + x_1 \cdot \frac{\partial x_1}{\partial x_2} + x_2 = 0, \quad \frac{\partial C}{\partial x_3} = x_0 \cdot \frac{\partial x_0}{\partial x_3} + x_1 \cdot \frac{\partial x_1}{\partial x_3} + x_3 = 0.$$

Another way:

$$\frac{\partial C}{\partial x_2} = x_0 \cdot b_0 + x_1 \cdot b_1 + x_2 = 0, \quad \frac{\partial C}{\partial x_3} = x_0 \cdot a_0 + x_1 \cdot a_1 + x_3 = 0. \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial C}{\partial x_2} = -29.424 + 71.052 \cdot x_2 + 252.354 x_3 = 0,$$

$$\frac{\partial C}{\partial x_3} = -105.983 + 252.354 \cdot x_2 + 910.126 \cdot x_3 = 0.$$

Or:

$$262.166 \cdot x_2 + 944.457 \cdot x_3 = 29.424$$

$$3.781 \cdot x_3 = 0.401, \text{ then: } x_2 = 0.107, \quad x_3 = 0.034.$$

Other variables can be found from the following expressions:

$$R_{0,0} \cdot x_0 + R_{0,1} \cdot x_1 = QTB_0 - E_{0,0} \cdot x_3 - E_{0,1} \cdot x_4$$

$$R_{0,1} \cdot x_1 = QTB_1 - E_{1,0} \cdot x_3 - E_{1,1} \cdot x_4$$

$$7.071 \cdot x_0 + 10.748 \cdot x_1 = 0.912$$

$$-18.668 \cdot x_1 = -1.497, \text{ then } x_1 = 0.08, \quad x_0 = 0.007.$$

4. The implementation of MathCad Prime for solving a SLAE by using QR decomposition matrices

The matrix A of the size 190×324 (Fig. 4.1), and the matrix B (Fig. 4.2) with 189 elements have been used for demonstration.

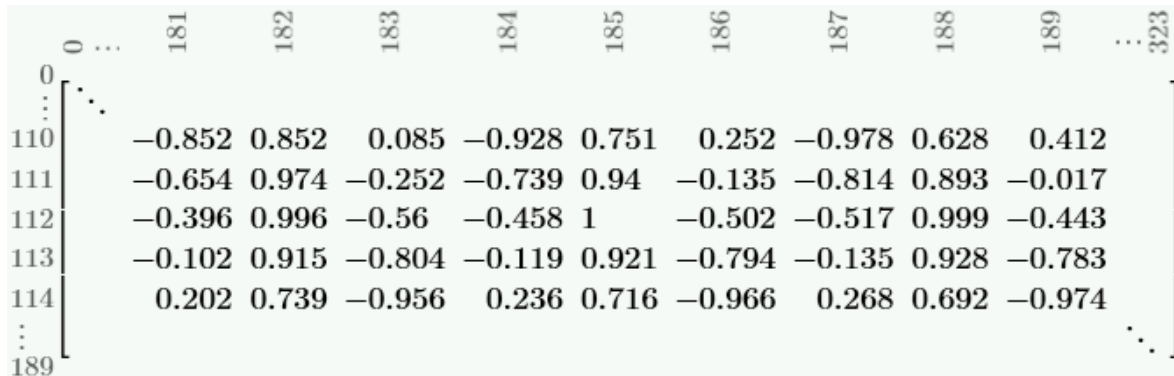


Fig. 4.1 The matrix A for a SLAE

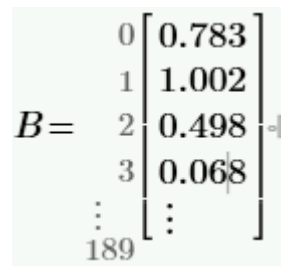


Fig. 4.2 The matrix B for a SLAE

(2.14) and (2.15) is presented in the block x (Fig. 4.3), where the matrix RTGR is the matrix R, described in the second part of the article. (2.16) is presented in the block C (Fig. 4.4). The method of “direct run” is presented in Fig. 4.5. The block of “direct run” implementation is shown in Fig. 4.6 and Fig. 4.7. The verification of obtained solution is shown in Fig. 4.8 where the result of multiplication AX_{qr} completely matches the matrix B.

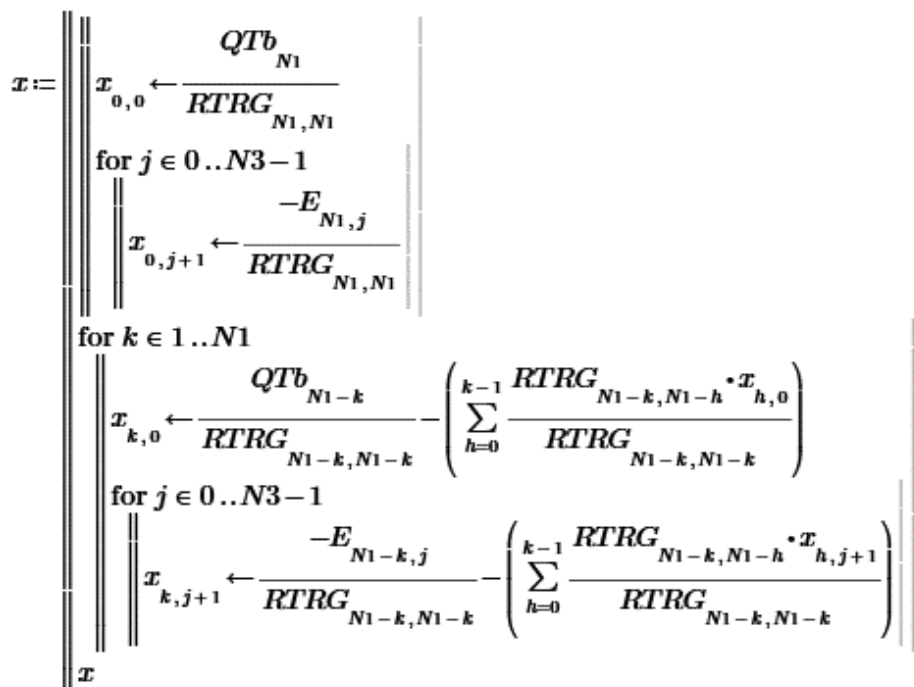


Fig. 4.3 The implementation of x

```

C := for z ∈ 0..N3-1
    for j ∈ 0..N3
        if z+1=j
            Cz,j ← ∑i=0N1 xi,j · xi,1+z + 1
        else
            Cz,j ← ∑i=0N1 xi,j · xi,1+z
    C
    
```

Fig. 4.4 The implementation of C.

```

trg(A, b) := N ← cols(A)
             bN-1
             xN-1 ←  $\frac{b_{N-1}}{A_{N-1,N-1}}$ 
             for i ∈ N-2..0
                 xi ←  $\frac{1}{A_{i,i}} \cdot \left( b_i - \sum_{j=i+1}^{N-1} A_{i,j} \cdot x_j \right)$ 
             x
    
```

Fig.4.5 The implementation of the “direct run” method

$$YQR := \text{trg}(CQR, -QQR^T \text{ submatrix}(C, 0, 133, 0, 0)) = \begin{bmatrix} 0.107 \\ -0.069 \\ 0.042 \\ 0.032 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

Fig. 4.6 The implementation of the “direct run” method

$$Xqr := \text{stack} \left(\text{trg} \left(RTRG, QTb - \sum_{i=0}^{\text{rows}(YQR)-1} \text{submatrix}(E, 0, N1, i, i) \cdot YQR_i \right), YQR \right) = \begin{bmatrix} 0.076 \\ -0.24 \\ 0.068 \\ -0.42 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

Fig. 4.7 The implementation of the “direct run” method for finding N1+1=190 variables

$$A \cdot Xqr = \begin{bmatrix} 0.783 \\ 1.002 \\ 0.498 \\ 0.068 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

Fig. 4.8 The verification of the solution, AX_{qr}=B

5. Conclusions

The possibility of a new method of improving the transmission of information and a clean separation of signal and noise is suggested by the discovery presented in [1]. The basis of the proposed new way of developing the theory and methods of communication is the rejection of the probabilistic method for evaluating noisy signals according to the maximum likelihood rule. This method contains the mathematical procedure for absolutely accurate separation, as well as proving the absence of any fundamental theoretical limits on the effectiveness of communications, including the absence of channel capacity limitations. This approach includes the fundamentally new concept and the technical aspects of implementing telecommunication systems and uses systems of linear algebra equations (SLAE) to filter signals from noise. The SLAE matrix is the linear algebraic matrix (LSM) that separates and extracts the true values of informative signal parameters. Such a SLAE always has the solution, but obtaining this solution sometimes requires a particular method to be used, because its matrix is not always square, but can be rectangular as well. Therefore, the method of the orthogonal decomposition is proposed in this paper. For obtaining the matrices of orthogonal decomposition the Gram–Schmidt process, which is suitable for matrices of any size and composition, can be used. The method of solving a SLAE includes full description of solution and acceptable for matrices of any size. The example of solving the SLAE with a small matrix is presented in the paper. The MathCad Prime has been implemented for a bigger matrix. The implementation includes the functions that can be used in any other programming language. The solution has minimal norm and acceptable for linear algebraic matrices that separate signal and noise.

REFERENCES

1. United States Patent. System and method for achieving a clean separation of signal and noise [text] / Joseph Brifman, Sergey Rassomakhin, Vladimir Shlokin, Patent № 11,394,415 B2, Date of patent Jul. 19, 2022.
2. Rassomakhin S. G. Mathematical and physical nature of the channel capacity. Telecommunications and Radio Engineering. DOI: 10.1615/TelecomRadEng. v76. i16.40 pages 1423-1451, 2017. <http://dl.begellhouse.com/journals/0632a9d54950b268,69741fd55cd51128,35cd933625b8086a.htm>
3. Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication. Bell Syst. Tech. J., July-Oct. 1948. – Vol. 27. – P. 379 – 423, 623 – 656.
4. Shannon C. E. Communication in the presence of noise. Proc. IRE., Jan. 1949. – Vol. 37. – P. 10 – 21.

ЛІТЕРАТУРА

1. United States Patent. System and method for achieving a clean separation of signal and noise [text] / Joseph Brifman, Sergey Rassomakhin, Vladimir Shlokin, Patent № 11,394,415 B2, Date of patent Jul. 19, 2022.
2. Rassomakhin S. G. Mathematical and physical nature of the channel capacity. Telecommunications and Radio Engineering. DOI: 10.1615/TelecomRadEng. v76. i16.40 pages 1423-1451, 2017. <http://dl.begellhouse.com/journals/0632a9d54950b268,69741fd55cd51128,35cd933625b8086a.htm>
3. Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication. Bell Syst. Tech. J., July-Oct. 1948. – Vol. 27. – P. 379 – 423, 623 – 656.
4. Shannon C. E. Communication in the presence of noise. Proc. IRE., Jan. 1949. – Vol. 37. – P. 10 – 21.

УДК 532.5+51-7

Математичне моделювання динаміки водних екосистем і можливостей їх самоочищення за умовами глобальних змін клімату

Н.Л. Ричак, Н.М. Кізілова

Ричак**Наталія Львівна***к.геогр.н., доцент; доцент, Навчально-науковий інститут екології, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, пл. Свободи, 6, Харків-22, Україна, 61022;**e-mail: rychak@ukr.net*<https://orcid.org/0000-0003-1620-3059>**Кізілова****Наталія Миколаївна***д.ф.-м.н., професор; професор кафедри прикладної математики, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, пл. Свободи, 4, Харків-22, Україна, 61022;**e-mail: n.kizilova@gmail.com*<https://orcid.org/0000-0001-9981-7616>

Приведений детальний огляд математичних моделей переносу забруднень в повітрі, воді і ґрунті. Моделі представлені системами диференціальних рівнянь і використовуються для менеджменту водними ресурсами на певних територіях. Розглянуті детальні тривимірні рівняння переносу маси, імпульсу і тепла; осереднені двовимірні моделі переносу на мапах місцевості; одновимірні моделі переносу в річкових системах та нульвимірні компартментальні моделі. Враховані біотична компонента та вплив наслідків поступових глобальних змін клімату. Розглядаються постановки задач зовнішнього керування якості води, повітря і ґрунту, а також можливості екосистеми до самокерування. Обговорюються проблеми нечітких даних для валідації і використання математичних моделей для практичних потреб.

Ключові слова: динамічні системи, водні об'єкти, екологія, математичне моделювання, самоочищення.

Mathematical modeling of the dynamics of aquatic ecosystems and the possibilities of their self-cleaning at the conditions of global climate change

Rychak Nataliya*PhD in Geographical Sciences, Docent, Educational and Scientific Institute of Ecology, V.N. Karazin Kharkov National University, 6, Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine***Kizilova Nataliya***Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor; Professor of the Department of Applied Mathematics V.N. Karazin Kharkov National University, 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine*

A detailed review of mathematical models of pollution dispersion in air, water and soil is presented in the article. The models are represented by the systems of differential equations and used for water resources management on urban landscapes. Detailed three-dimensional equations of mass, momentum and heat transfer, averaged two-dimensional dispersion models on terrain maps, one-dimensional dispersion models in river systems and zero-dimensional compartmental models have been considered. The biotic component and the impact of the effects of gradual global climate change have been taken into account. The tasks for external quality management of water, air and soil, as well as the possibilities of the ecosystem for self-management have been considered. The problems of fuzzy data for validation as well as the usage of mathematical models for practical purposes have been discussed.

Keywords: dynamical systems, water objects, ecology, mathematical modeling, self-cleaning.

1 Вступ

Забруднення атмосфери, яке пов'язане з господарською діяльністю людини, є важливим фактором, який впливає на якість поверхневих вод - річок, озер, ставків та інших джерел води. Викиди промислових підприємств і міського транспорту, змив органічних добрив із сільськогосподарських угідь приводять до переносу забруднень в атмосфері і поверхневих водах,

накопичення їх в підземних водах, ґрунтах і поверхневих водних об'єктах. Результатом є підвищення рівня забруднювачів, що в результаті впливає на склад флори і фауни водних екосистем, порушення водного балансу і біологічної рівноваги. Частково локальні порушення можуть відновитися за рахунок спроможності екосистем до самоочищення і відновлення, але часто для того потрібні локальні специфічні захисні заходи, які потребують планування, в тому числі з використанням математичних моделей [1]. В останні роки процеси переносу і накопичення забруднень прискорилися, а їх вплив на екосистеми, життя і здоров'я людини підсилюється за рахунок поступових процесів глобальних змін клімату [2-4]. В результаті підвищується середня температура повітря, тануть льодові щити і глетчери на різних континентах, підвищується солоність прісних вод, гинуть водні рослини і тварини, що викликає подальші ланцюги взаємопов'язаних негативних змін на рівні екосистем і ноосфери в цілому [5]. Робота присвячена огляду і порівняльному аналізу ефективності сучасних математичних моделей, які описують динаміку переносу, накопичення і розпаду забруднювачів, а також можливостей стабілізації і відновленню системи за рахунок як її самоочищення, так і спланованого керування її динамікою. Математичне моделювання якості води є важливим інструментом для планування та управління водними ресурсами, особливо на урбаністичних територіях.

2 Огляд математичних моделей

Інтерес до математичного моделювання процесів перенесення, накопичення та утилізації забруднень, які переносяться в атмосфері, ґрунтах, підземних та поверхневих водах, різко зріс наприкінці 1950-х – на початку 1960-х [1]. Це було пов'язано з вираженими змінами рівня забруднень навколишнього середовища відходами промисловості та інтенсивного сільського господарства, зафіксованим впливом екології на здоров'я та тривалість життя людини, а також зі зростанням продуктивності комп'ютерів і розробкою нових алгоритмів чисельного розв'язання систем алгебраїчних і диференціальних рівнянь. У рамках міжнародної програми International Biological Program з'явилися екологічні моделі (наприклад, CLEANER, 1974), засновані на рівняннях балансу забруднюючих речовин і розподілених джерел у вигляді можливостей самоочищення водою. Пізніше були розроблені детальніші моделі, які враховували фізичні процеси у водоймах, такі як циркуляція, стратифікація, змішування, осідання, а також температурні явища (модель LAKECO, 1974) та багатокомпонентні процеси (модель MS CLEANER, 1978). Уточнення таких моделей та їхня верифікація на основі екологічної інформації проводилася протягом 1970-80-х. Перші моделі відносилися до компартментальних (нульвимірних, 0D), в яких окремі тривимірні (3D) ділянки ландшафту замінювалися компартментами – водними, повітряними, ґрунтами, спорудами, і т.д. (Рис.1а). Процеси переносу маси (води, речовин, водоростей, бактерій та ін.) і тепла моделювалися відповідними дискретними рівняннями балансу компонент $C_{ij}(t)$ і температури $T(t)$ між компартментами $N_j(t)$ $i=1, \dots, k$, де $j=1, \dots, n$ - номер компоненти.

Поступовий прогрес в комп'ютерній техніці, математичному моделюванні, чисельним методам і методам вимірювань температур і концентрацій забруднень у відповідних пробах привели до переходу до одновимірних (1D) моделей зі змінними $C_{ij}(t, x)$, $T(t, x)$, де x – єдина просторова координата моделі, яка відлічується, наприклад, вздовж річки (Рис.1б). У цьому випадку теломасопереніс від припливів річки, від поверхових вод (дощ, сніг, і т.п.), від змиву з сільськогосподарських угідь, зливових стоків міст, викидів підприємств тощо можуть розглядатися як точкові джерела, які розташовані в деяких точках $\{x_1, \dots, x_p\}$ вздовж річки. Рівняння 1D математичної моделі являють собою системи звичайних диференціальних рівнянь (ЗДР) і для їх розв'язання використовувалися напіваналітичні методи або методи скінченних різниць.

Двовимірні (2D) моделі розглядають розподілення температури $T(t, x, y)$, водних мас і концентрацій $C_{ij}(t, x, y)$ забруднювачів і біологічних компонент на поверхні деякого ландшафту (Рис.1в). Рівняння 2D математичної моделі являють собою системи диференціальних рівнянь в часткових похідних (ДРЧП) і для їх розв'язання використовувалися методи сіток.

Значне зростання потужності комп'ютерних систем (кластерів, хмарних обчислень тощо) і розвинення методів скінченних/граничних елементів/об'ємів (МСЕ, МСО, МГЕ, МГО) дозволяє

проводити детальні розрахунки на 3D моделях (Рис.1г) з обчисленням розподілень температури $T(t, x, y, z)$, концентрацій $C_{ij}(t, x, y, z)$, відповідних потоків маси і тепла в довільних областях, структура і властивості яких відомі з попередніх геологічних (густина, пористості і проникливості ґрунтів), гідрологічних (підземні води, джерела), метеорологічних (погодні умови), кліматичних (особливості клімату місцевості) і екологічних (забруднювачі, якість води, біологічні складові) досліджень. На цьому підході засновані математичні моделі Water Quality Analysis Simulation Program (WASP) [6], модель EUTRO, яка включає рівняння наростання біомаси (евтрофікація) [7], та інші, частина з яких є у відкритому доступі [6,8].

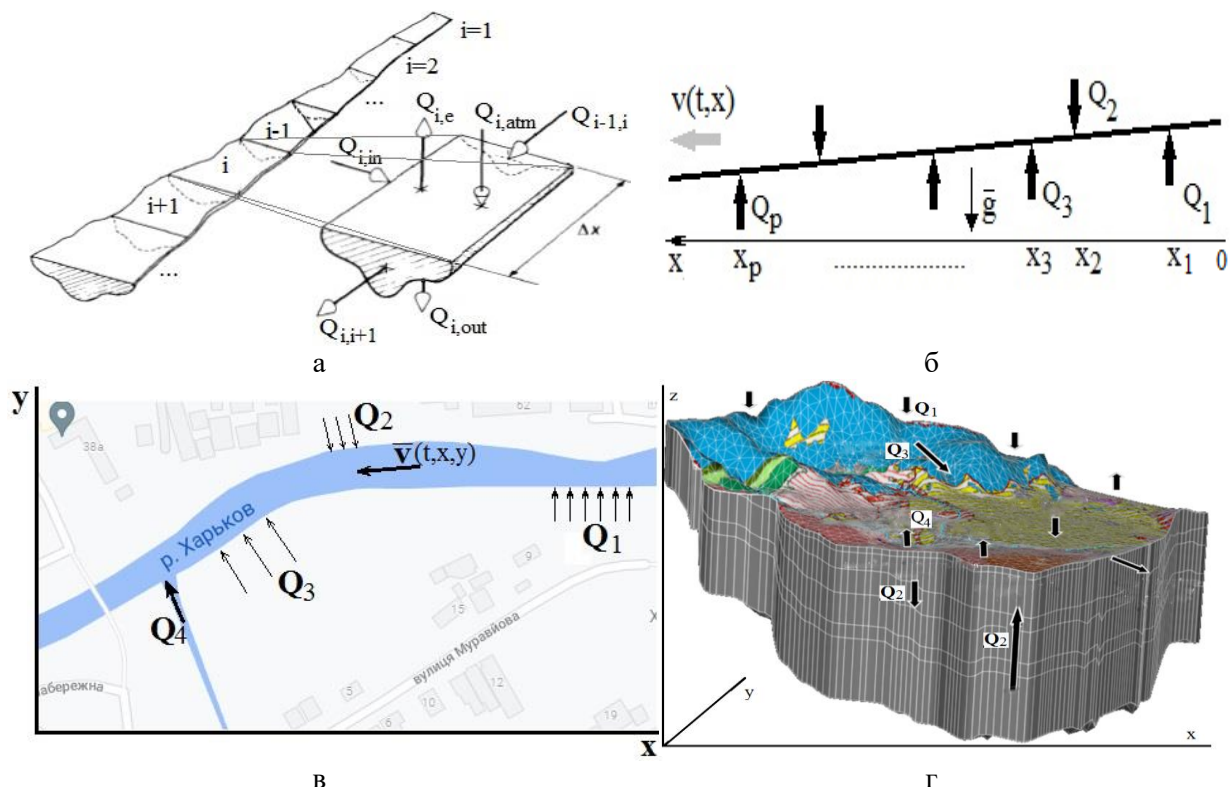


Рис.1. Різні типи математичних моделей екосистем: 0D(a), 1D (б), 2D (в), 3D (z).

Наявність великої кількості параметрів в таких математичних моделях вимагає дослідження релевантності і стійкості відповідних систем рівнянь, чутливості розв'язку до кожного з параметрів моделі, і валідації моделі шляхом порівняння розв'язку з результатами додаткових вимірювань значень розрахованих параметрів, тобто перевірка точності прогнозу, який дає відповідна математична модель.

3D математичні моделі базуються на рівняннях балансу маси, імпульсу і енергії, які у загальному вигляді для багатофазної (рідина, газ, ґрунти, біологічні складові) і багатокомпонентної (забруднюючі речовини, кисень, азот, і т.д.) системи мають вигляд [9]

$$\frac{\partial \rho^{\alpha\beta}}{\partial t} + \text{div}(\rho^{\alpha\beta} \vec{v}^{\alpha\beta}) = Q^{\alpha\beta} + M^{\beta} \sum_{\gamma} J_{\gamma}^{\alpha} v_{\gamma}^{\alpha\beta}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho^{\alpha\beta} \vec{v}^{\alpha\beta})}{\partial t} + \text{div}(\rho^{\alpha\beta} \vec{v}^{\alpha\beta} \oplus \vec{v}^{\alpha\beta}) = \text{div}(\hat{p}^{\alpha\beta}) + \vec{P}^{\alpha\beta} + \vec{F}^{\alpha\beta}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho^{\alpha\beta} e^{\alpha\beta})}{\partial t} + \text{div}(\rho^{\alpha\beta} e^{\alpha\beta} \vec{v}^{\alpha\beta}) = -\text{div}(\vec{J}_e^{\alpha\beta}) + \Theta^{\alpha\beta} + \vec{v}^{\alpha\beta} \cdot \vec{F}^{\alpha\beta}, \quad (3)$$

де $\rho^{\alpha\beta}$, $\vec{v}^{\alpha\beta}$, $Q^{\alpha\beta}$, M^{β} , J_{γ}^{α} , $v_{\gamma}^{\alpha\beta}$ - ефективна густина, швидкість, міцність джерела, молекулярна маса, швидкість хімічної реакції і стехіометричний коефіцієнт для компоненти β

фази α ; $\hat{p}^{\alpha\beta}$ - тензори напружень, $\bar{P}^{\alpha\beta}$ і $\bar{F}^{\alpha\beta}$ - міжфазні і зовнішні сили; $e^{\alpha\beta}$ - внутрішня енергія, $\bar{J}_e^{\alpha\beta}$ - потік тепла, $\Theta^{\alpha\beta}$ - міжфазний обмін енергією між компонентами.

Якщо підсумувати рівняння (1)-(3) за всіма компонентами β фази α , отримаємо 3D рівняння балансу між фазами (твердою, рідкою і газоподібною) у вигляді

$$\frac{\partial \rho^\alpha}{\partial t} + \text{div}(\rho^\alpha \bar{v}^\alpha) = Q^\alpha, \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho^\alpha \bar{v}^\alpha)}{\partial t} + \text{div}(\rho^\alpha \bar{v}^\alpha \oplus \bar{v}^\alpha) = \text{div}(\hat{p}^\alpha) + \bar{P}^\alpha + \bar{F}^\alpha, \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho^\alpha e^\alpha)}{\partial t} + \text{div}(\rho^\alpha e^\alpha \bar{v}^\alpha) = -\text{div}(\bar{J}_e^\alpha) + \Theta^\alpha + \bar{v}^{\alpha\beta} \cdot \bar{F}^{\alpha\beta}, \quad (6)$$

де $\rho^\alpha = \sum_\beta \rho^{\alpha\beta}$, $\bar{v}^\alpha = (\rho^\alpha)^{-1} \sum_\beta \rho^{\alpha\beta} \bar{v}^{\alpha\beta}$, $e^\alpha = (\rho^\alpha \bar{v}^\alpha)^{-1} \sum_\beta e^{\alpha\beta} \rho^{\alpha\beta} \bar{v}^{\alpha\beta}$, $\bar{F}^\alpha = \sum_\beta \bar{F}^{\alpha\beta}$.

Рівняння (1) і (4) можна записати у вигляді відповідних рівнянь дифузії

$$\rho \frac{dC^{\alpha\beta}}{dt} = -\text{div}(\bar{J}^{\alpha\beta}) + Q^{\alpha\beta} + M^\beta \sum_\gamma J_\gamma^{\alpha\beta}, \quad (7)$$

$$\rho \frac{dC^\alpha}{dt} = -\text{div}(\bar{J}^\alpha) + Q^\alpha, \quad (8)$$

де $C^{\alpha\beta}$ і C^α - концентрації компонент і фаз, $\bar{J}^{\alpha\beta} = \rho^{\alpha\beta} (\bar{v}^{\alpha\beta} - \bar{v}) C^{\alpha\beta}$, $\bar{J}^\alpha = \rho^\alpha (\bar{v}^\alpha - \bar{v}) C^\alpha$, $\bar{v} = (\rho)^{-1} \sum_\alpha \rho^\alpha \bar{v}^\alpha$.

У випадку перенесення забруднень в воді і повітрі головними фазами є вода і газ відповідно, а моделі (1)-(3) і (4)-(6) є системами рівнянь механіки рідини і газу. Перенесення і накопичення забруднень у ґрунті описується на основі рівнянь (1)-(6), записаних для руху рідини або газу в пористому середовищі. Для насичених ґрунтів це рівняння Дарсі, а для ненасичених – рівняння Річардсона. Рішення 3D рівнянь вигляду (1)-(6) можливе з використанням методів скінченних або граничних елементів [8,9]. Для отримання практично важливих розв'язків потрібні дані про склад і властивості ґрунтів (пористість, проникливість), детальну геометрію поверхневих і підземних резервуарів води, а також статистичні дані аналізу проб води, ґрунтів і повітря у вигляді часових рядів [1-4].

Сума рівнянь (4)-(6) за всіма фазами дає рівняння механіки суцільних середовищ, які записуються як рівняння механіки рідини для ґрунтових вод і річкових систем. Наприклад, для випадку руху поверхневих вод рівняння (4), (5) мають вигляд

$$\chi \frac{\partial H}{\partial t} + (\bar{v}, \nabla) H = q, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + (\bar{v}, \nabla) \bar{v} = g(\nabla H + b) + g(b - S_f), \quad (10)$$

де H - глибина річки, χ - пористість русла річки, q – розподілені джерела або стоки води, b - уклін дна, S_f - поверхнєве тертя русла, g - прискорення вільного падіння.

З рівняння (6) аналогічно отримуємо рівняння переносу тепла

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = -\text{div}(\lambda \nabla T) + q_T \quad (11)$$

де T – температура, q_T - джерела тепла, c_p і λ - коефіцієнти теплоємності і теплопровідності.

Рух повітря описується моделями турбулентних течій $k - \omega$ або Spalart–Allmaras з двома та одним додатковим рівнянням відповідно. Використовуються і прямі розрахунки турбулентних вихрів або large eddy simulation з урахуванням Рейнольдсових турбулентних флуктуацій в

осереднених рівняннях Нав'є-Стокса [9]. Дифузія забруднень описується шляхом додавання (7) або (8) до моделі (9)-(10) або рівнянь Дарсі. За умовами впливу глобальних змін температури важливим є розв'язання повної системи (8)-(10) в силу залежностей коефіцієнтів всіх рівнянь, а також швидкостей біохімічних реакцій в (1) і (7), від температури.

Якщо в рівняннях (9)-(11) $\vec{v} = v\vec{e}_x$, то отримаємо 1D (Рис.16) модель річкової системи, яка описує рух води вздовж русла із заданим нахилом. Підземні точкові джерела додають воду до басейну, а пористе дно – відводить воду до гранту і шару ґрунтових вод. Притоки річок і штучні канали описуються точковими джерелами маси у відповідних точках і можуть задаватися, наприклад, у вигляді δ -функції. Розподілені джерела води відповідають змиву води від дощу і таненню снігу з поверхонь навколо русла. Інтенсивність цих джерел залежить від типу і куту нахилу поверхні, а також рівню осадків і температури. Відповідні формули і коефіцієнти є в довідниках [9] та імплементовані у пакети програм [8]. Чисельні розрахунки можуть проводитися з достатньою точністю за допомогою методу скінченних різниць.

У випадку $\vec{v} = v_x\vec{e}_x + v_y\vec{e}_y$ (9)-(11) дають моделі 2D течій на географічних мапах із заданим нахилом місцевості $b(x, y)$. На відміну від 1D моделей, вони описують поперечний переніс води, забруднень і осадку вздовж русла, а також нерівномірну ерозію дна за рахунок сили Коріоліса в (5), які відсутні в 1D моделях.

Подальше осереднення рівнянь руху рідини і газу в атмосфері, пористих ґрунтах, поверхневих і підземних водоймах, дає рівняння 0D моделей переносу речовин, у тому числі забруднень, між компартментами, в якості яких можуть розглядатися окремі річки, пруди, підземні резервуари з будь-яким ступенем деталізації. Рівняння 0D моделей мають вигляд

$$V_w Z_w \frac{dM_w}{dt} = E_w + K_{aw} M_a + K_{sw} M_s - K_{ww} M_w, \quad (12)$$

$$V_a Z_a \frac{dM_a}{dt} = E_a + K_{wa} M_w + K_{sa} M_s - K_{aa} M_a, \quad (13)$$

$$V_s Z_s \frac{dM_s}{dt} = E_s + K_{ws} M_w + K_{as} M_a - K_{ss} M_s, \quad (14)$$

де індекси w, a, s відносяться до води, повітря і ґрунту або відповідної компоненти (наприклад, певного забруднювача в воді, повітрі і ґрунті відповідно; M позначає масу, Z і V – ємність і об'єм компартменту, K_{ij} - коефіцієнт переносу з компартменту i до j , а коефіцієнти типу K_{jj} включають акумуляцію, розкладання і хімічні перетворення в самій фазі.

В сучасних 0D моделях $E_{w,a,s}$ включає викиди забруднень до річкових вод, атмосфери та безпосередньо ґрунту (наприклад, речовин з автомобільних викидів); K_{aw} - атмосферні опади (до води), K_{sw} - ерозія ґрунтів і попадання твердих частинок до водойм, K_{wa} і K_{sa} - попадання аерозольних частинок і твердих частинок (наприклад, небезпечних мікрочастинок P_{10} , $P_{2.5}$) до атмосфери, K_{as} - атмосферні опади (до ґрунту), K_{ws} - осадження з води до придонних відкладень і ґрунту навколо русла.

3 Чисельні розрахунки і проблеми валідації математичних моделей

Чисельні розрахунки за 3D моделями потребують детальних даних геометрії шарів різних типів ґрунтів і води, а також геофізичних параметрів (густини, в'язкості, теплопровідності рідин з різними концентраціями завислих речовин; пористості, проникливості і термомеханічні параметри шарів ґрунтів), які обираються з відповідних довідників за типами ґрунту або формулами для густин і в'язкостей. Так само визначаються коефіцієнти поглинання і відбиття тепла, води і речовин твердими поверхнями, рослинними покривами тощо. Додавання до (14) рівнянь балансу для рослинного компартменту включає поглинання води коренями і випаровування кронами (транспірація) до атмосфери (K_{ws} і K_{sa} відповідно). Для 2D моделей дані про склад ґрунту не потрібні, тільки властивості поверхні області, включно з геометрією, пористістю і проникливістю дна водойм. Для 1D теж потрібні інтегральні дані, які описують поверхневий стік до річки води із забруднювачами. 0D моделі потребують інтегральних значень потоків маси і теплоти між компартментами атмосфери, ґрунту, придонних осадків, поверхневих і ґрунтових вод. В більш складних моделях враховуються кілька компартментів з однакової фази,

наприклад, чиста (питна) вода W_d (drinking water), технічна вода (для промисловості, сільського господарства) W_t (technical water), стічна (каналізаційна) вода W_w (waste water), оновлена (очищена) вода W_r (recycled water), втрачена вода W_l (lost water), підземні W_g і W_p поверхневі води. Тоді крім (12) маємо ще систему звичайних диференціальних рівнянь (ЗДР)

$$\begin{aligned} \frac{dW_p}{dt} &= J^+ + J_{ap} - J_{pg} - J_{pd}(N) - J_{pt}(N) - J_{pl} - J^-, & \frac{dW_g}{dt} &= J_{sg} + J_{sg} - J_{gd}(N) - J_{gt}(N), \\ \frac{dW_d}{dt} &= J_{pd}(N) + J_{gd}(N) + J_{dr} - J_{dl} - J_{dw}, & \frac{dW_w}{dt} &= J_{dw} + J_{tw} - J_{ws} - J_{wg} - J_{wr}, \\ \frac{dW_t}{dt} &= J_{pt}(N) + J_{gt}(N) + J_{tr} - J_{ind}(N) - J_{agr}(N) - J_{tl} - J_{tw}, & \frac{dW_r}{dt} &= J_{wr} + J_{lr} - J_{rt} - J_{rd}, \\ \frac{dW_l}{dt} &= J_{dl} + J_{tl} - J_{ls} - J_{lg} - J_{lr}, & M_w &= W_p + W_g - W_d - W_t - W_w + W_r - W_l, \end{aligned} \quad (15)$$

де J^+ , J^- - притік і відтік крізь границі області, J_{ij} - потік від компартменту і до j , функції $J_{ij}(N)$ - статистичні залежності між відповідними об'ємами води і чисельністю населення, а також типом промисловості, сільського господарства даного регіону.

Для замикання моделі (12)-(15) задається модель зростання чисельності населення

$$\frac{dN}{dt} = (k_b - k_d)N + m, \quad (16)$$

де k_b , k_d , m - коефіцієнти народжуваності, смертності і міграції, які залежать від індексів якості життя, якості і доступності води, в тому числі.

В системі ЗДР (12)-(16) деякі коефіцієнти обумовлені суто фізичними процесами переносу в природі (E_j, K_{ij}), тоді як інші можуть розглядатися як функції керування ($J_{dr}, J_{dl}, J_{dw}, J_{tr}, J_{tl}$ та ін.). Таким чином, зменшення втрат і підвищення якості і швидкості очищення і повторного використання води можуть привести до стійких циклічних розв'язків (12)-(16), що відповідає сталому розвиненню системи (sustainable development) і режимам самоочищення [1].

Для валідації моделі потрібні дані регулярних вимірювань вмісту забруднень в повітрі, водах і ґрунтах, рівней ґрунтових і поверхневих вод, які на жаль не наявні в деяких країнах [2-4].

5 Висновки

Рівень сучасної комп'ютерної техніки дозволяє проведення чисельних розрахунків на детальних 3D моделях масо- і тепло переносу водних екосистем, що потребує масиву гідрологічних і геофізичних даних. 1D і 0D моделі дозволяють проводити спрощені обчислення інтегральних параметрів (менеджмент водних систем, переніс і накопичення забруднень), що вимагає даних моніторингу ряду параметрів у вигляді часових рядів. Наведений детальний аналіз різних типів математичних моделей і їх програмних реалізацій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Mathematical modeling of water quality: Streams, lakes, and reservoirs. Ed. by G.T. Orlob. J. Willey&Sons. 1983. 518 p. <http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/2144/>
2. Кізілова Н.М., Ричак Н.Л., Чебукін Д.С., Лукієнко М.В. Екологічна оцінка якості поверхневих вод у бездошовий період в умовах міського водозбору. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, сер. «Геологія. Географія. Екологія»*. 2021. N54. P.289-305. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-54-22>
3. Ричак Н.Л., Кізілова Н.М. Моделювання якості поверхневих вод в умовах урболадшафтної геосистеми. "Advanced discoveries of modern science: experience, approaches and innovations." *Proceedings of I International Scientific and Theoretical Conference, April 9, 2021*. Amsterdam, the Netherlands: European Scientific Platform. 2021. Vol.1. P. 130-133. doi:10.36074/scientia-09.04.2021

4. Ричак Н.Л., Кізілова Н.М. Екологічні наслідки глобальних змін клімату на урбанізованих територіях. *Екологічні науки*. 2021. Вип.4(37). С.165-170. doi : 10.32846/2306-9716/2021.eco.4-37.25
5. *Climate Change 2021. The Physical Science Basis*. IPCC Report. WGI Press. 2021. 3949p. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf]
6. WASP [Електронний ресурс: <https://www.epa.gov/ceam/water-quality-analysis-simulation-program-wasp>]
7. Ambrose R.B. *A Hydrodynamic and Water Quality Model. Theory, User's Manual, and Programmer's Guide*. USEPA, Athens. 1988. <https://nepis.epa.gov/ZyPURL>
8. *OpenGeoSys. Open-source multi-physics* [Електронний ресурс: <https://www.opengeosys.org/>]
9. Kolditz O. *Computational methods in environmental fluid mechanics*. Springer. 2002. 378 p. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-04761-3>

REFERENCES

1. Mathematical modeling of water quality: Streams, lakes, and reservoirs. Ed. by G.T. Orlob. J. Willey&Sons. 1983. 518 p. <http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/2144/>
2. N. Kizilova, N. Rychak, D. Chebukin, M. Lukijenko, Ecological assessment of surface water quality in the rainless period in the conditions of urban catchment, *Bulletin of Kharkiv National University named after VN Karazina, Ser. "Geology. Geography. Ecology"*, 2021. N54. P.289-305. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-54-22>
3. N. Rychak, N. Kizilova, Modeling of surface water quality in the conditions of urban geosystem, "Advanced discoveries of modern science: experience, approaches and innovations." Proceedings of I International Scientific and Theoretical Conference, April 9, 2021. Amsterdam, the Netherlands: European Scientific Platform. 2021. Vol.1. P. 130-133. doi:10.36074/scientia-09.04.2021
4. N. Rychak, N. Kizilova, Environmental consequences of global climate change in urban areas, *Environmental sciences*, 2021, Vol.4(37), P.165-170. doi : 10.32846/2306-9716/2021.eco.4-37.25
5. *Climate Change 2021. The Physical Science Basis*. IPCC Report. WGI Press, 2021, 3949 p. [Електронний ресурс: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf]
6. WASP [Електронний ресурс: <https://www.epa.gov/ceam/water-quality-analysis-simulation-program-wasp>]
7. R.B. Ambrose, "A Hydrodynamic and Water Quality Model. Theory, User's Manual, and Programmer's Guide", USEPA, Athens. 1988. <https://nepis.epa.gov/ZyPURL>
8. *OpenGeoSys. Open-source multi-physics* [Електронний ресурс: <https://www.opengeosys.org/>]
9. O. Kolditz, *Computational methods in environmental fluid mechanics*. Springer. 2002. 378 p. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-04761-3>

УДК (UDC) 004.91

Chub Olga

*PhD in Economics, Associate Professor, Department of Theoretical and Applied System Engineering
V. N. Karazin Kharkiv National University
6 Svobody Sq., Kharkiv, Ukraine, 61022
e-mail: o.i.chub@karazin.ua
<https://orcid.org/0000-0002-1216-856X>*

Novozhylova Maryna

*Doctor of Sciences (Mathematics), Head of the Department of Computer Science and Information Technologies
O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv,
17, Marshal Bazhanov Street, Kharkiv, Ukraine, 61002
e-mail: marina.novozhilova@kname.edu.ua
<https://orcid.org/0000-0002-9977-7375>*

Modelling of information flows in the Software Carpentry environment

Introduction. The level and speed of development of modern information technologies, the aspiration of modern society to informational unification necessitate the creation and implementation of a new model of the educational and scientific community interaction to ensure free, operational and effective access to the information resources being required for the purpose of implementing innovative means of studying and utilizing information processing tools.

Key goals. The educational and scientific community is looking for new approaches that can ensure the necessary level of education efficiency under the condition of severe limitations of resources, where time is the first of them. Therefore, an urgent problem today is the formulation of the principles of construction, modelling, and systematization of the properties of the information environment as an interactive educational and scientific platform. In this work we consider the problem using the Software Carpentry as an example.

Methods and Materials. To solve the formulated problem, we have conducted an analysis of the paradigms of informational educational environments, classifying the most widespread and available in the Ukrainian educational and research community such as Coursera, edX, Prometheus, Udemy. Another interesting direction to consider is the so-called microlearning. At the same time, the use of the above types of educational online resources for the purposes of organizing and conducting scientific research, as well as selecting and implementing new tools for processing information about objects of scientific research is difficult or impossible.

Results. The ideology of Software Carpentry is considered as one of the most successful implementations in this direction. The authors are participating in the project implemented by University of St. Andrews (Scotland) on translation the «Python programming language» course from English to Ukrainian as volunteers.

Conclusion. We propose generalized set-theoretical model of such an information environment for educational and research community interaction.

Keywords: modeling, online learning, open science, effectivity of education, resourcing.

How to quote: M. Novozhylova, O. Chub, "Modelling of information flows in the Software Carpentry environment." *Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Mathematical modelling. Information technology. Automated control systems*, vol. 54, pp.51-58, 2022. <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2022-54-06>

Моделювання інформаційних потоків у середовищі Software Carpentry

Чуб Ольга Ігорівна

*кандидат економічних наук, доцент кафедри теоретичної та прикладної системотехніки
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна; майдан
Свободи, 6, м. Харків, Україна, 61022*

**Новожилова Марина
Володимирівна**

*доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри
комп'ютерних наук та інформаційних технологій
Харківський національний університет міського господарства імені
О.М. Бекетова; вул. Маршала Бажанова, 17, м. Харків, Україна, 61002*

Актуальність. Сучасний рівень і швидкість розвитку інформаційних технологій, прагнення суспільства до інформаційної уніфікації зумовлюють необхідність створення та впровадження нової моделі взаємодії освітньої та наукової спільноти для забезпечення вільного, оперативного та ефективного доступу до інформаційних ресурсів.

Мета. Освітня та наукова спільноти шукають нові підходи, які можуть забезпечити необхідний рівень ефективності навчання в умовах жорсткої обмеженості ресурсів, де на першому місці стоїть час. Тому актуальною проблемою сьогодення є формулювання принципів побудови, моделювання та систематизації властивостей інформаційного

середовища як інтерактивної навчально-наукової платформи. У даній роботі розглядається розв'язання цієї проблеми на прикладі Software Carpentry.

Методи дослідження. Автори використовують такі методи дослідження – системний аналіз, теоретико-множинний аналіз, багатокритеріальна оптимізація, методи обробки експертної інформації. Для розв'язання поставленої задачі проведений аналіз парадигм інформаційних освітніх середовищ та класифікація доступних та найбільш поширених в українському освітньому та дослідницькому середовищі: Coursera, edX, Prometheus, Udemu. Ще одним цікавим напрямком є так зване мікронавчання. Водночас використання вищезазначених типів освітніх онлайн-ресурсів для цілей організації та проведення наукових досліджень, а також відбору та впровадження нових інструментів обробки інформації про об'єкти наукових досліджень є ускладненим або неможливим.

Результати. Однією з найбільш вдалих реалізацій в цьому напрямку вважається ідеологія Software Carpentry. Автори на волонтерських засадах беруть участь у проєкті, який реалізує Університет Сент-Ендрюс (Шотландія) з перекладу курсу «Мова програмування Python» з англійської мови на українську.

Висновки. Запропоновано узагальнену теоретико-множинну модель такого інформаційного середовища взаємодії освітньої та наукової спільноти.

Ключові слова: моделювання, онлайн-навчання, відкрита наука, ефективність освіти, ресурсне забезпечення.

Як цитувати: Новожилова М.В., Чуб О.І. Моделювання інформаційних потоків у середовищі Software Carpentry. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н.Каразіна, сер. «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління».* 2022. т. 54. С.51-58. <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2022-54-06>

1 Introduction

The level and speed of development of modern information technologies, the aspiration of modern society to informational unification necessitate the creation and implementation of a new model of the educational and scientific community interaction to ensure free, operational and effective access to the information resources being required for the purpose of implementing innovative means of studying and utilizing information processing tools. That applies not only to non-formal education, or the implementation of the lifelong learning – LLL concept [1], so-called continuous education. In the last three years, when the whole world was fighting the Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) [2], and the war in Ukraine has started – the way of life of Ukrainians, the way of communication, thinking, and vision of the future have changed. Pandemic and war present drastic challenges to the education system including technical, cognitive, managerial, and behavioral ones. Under such external conditions, classical methods of teaching and scientific research cannot be fully implemented, thus the educational and scientific community is looking for new approaches that can ensure the necessary level of education efficiency under the condition of severe limitations of resources, where time is the first of them.

2 Statement of the problem

Taking into account constantly increasing attention to such field of human activities as an on-line learning, namely online IT education in recent years there have been a number of scientific publications devoted to modeling and optimization issues. The following studies can be highlighted.

In paper [10] a thorough empirical comparative analysis of the quality of online learning and a comparison between face-to-face and online learning on a statistical sample of Polish medical school students is provided. It has been discovered that there is no statistical difference between face-to-face and online learning in terms of opinions on the ability of the learning method to increase knowledge ($P = .46$). E-learning was rated as enjoyable by 73% of respondents.

In the study [11] the set of 729 Massive Open Online Courses (MOOCs) on Coursera has been examined by using such a modelling algorithm as Latent Dirichlet allocation (LDA). This research proposes some useful conclusions concerning two major themes such as MOOC delivery and subject matter.

The research [12] proposes comprehensive review of the 29 to analyze and describe the adaptation process from face-to-face to online education and the perceptions of faculty and students during the pandemic. The study has been developed following the methodology supported by the PRISMA statement and the PICoS strategy, retrieving scientific literature from Web of Science, Scopus, ERIC and PsycINFO.

Study [13] is devoted to studying the impact of online degree programs on students' educational investment decisions and career goals. Based on a human capital theory, and using data from a 2017 survey of students enrolled in an online master's degree program in computer science at a highly ranked US university, this study explores how motivation for seeking an online graduate degree in computer science varies by student demographics and professional background/preparation.

The problem of designing relational coordination system for coordination and integration of processes of online education into classic university education system by using structural equation modelling (SEM) technique has been considered in [14].

The study [15] examines phenomena of digitalization of education how it drives teachers to adjust their teaching methods. The latent profile and qualitative analyses have revealed different clusters of teacher responses, from strong resistance to online teaching to transformation of teaching practices.

The main result of the study [16] is that it is statistically proven on the basis of a large number of personal characteristics, that additional e-learning practice leads to better grades in university exams.

An analysis of these and other publications shows that the vast majority of studies consider the conceptual and applied issues of supporting formal school and university education by means of online learning, while for the field of Computer Sciences and Information Technologies it is no less important to study the issues of optimizing the process of retraining and obtaining additional knowledge for research and practical activities in different areas.

2 Objectives

Therefore, today an urgent problem is formulating principles of construction, modelling, and systematization of the properties of the information non-formal learning environment as an interactive educational and scientific platform that allows decision makers to use their extremely limited resources effectively and to acquire the necessary amount of knowledge suitable for direct practical usage.

In this work we consider the problem using the Software Carpentry as an example [3].

3 Results

To solve the formulated problem, we have conducted system analysis of the paradigms of the following informational educational environments, which are the most widespread and available in the Ukrainian educational and research community: Coursera [4], edX [5], Prometheus [6], Udemy [7].

Coursera was launched in 2012 with a mission to provide universal access to world-class learning. It is now one of the largest online learning platforms in the world, with 113 million registered learners as of September 30, 2022. Coursera partners with over 275 leading university and industry associates to offer a broad range of content and credentials, including guided projects, courses, specializations, certificates, as well as bachelor's and master's degrees. Institutions around the world use Coursera to upskill and reskill their employees, citizens, and students in many high-demand areas, including data science, technology, and business.

edX is an American massive open online course provider created by Harvard and Massachusetts Institute of Technology. It hosts online university-level courses in a wide range of disciplines to a worldwide student body, including some courses at no charge. It also conducts research into learning based on how people use its platform. edX runs on the free Open edX open-source software platform. 2U is the parent company, with edX operating as its global online learning platform and primary brand for products and services. edX has 3600+ courses, 42 million users and 160+ partners.

Prometheus is the leading online education platform in Ukraine with over 700 000 online registered students and over 90 online courses. The company is working in close cooperation with top Ukrainian universities, prominent professors, international organization, and government.

Prometheus obtained a license for Ukrainian translation and dubbing of massive open online courses for the teachers by the Massachusetts Institute of Technology, Columbia Teachers College, and Queensland Universities. The certificate of completion is officially recognized by the Ministry of Education as an official teachers' training.

Udemy Inc. is a global destination for teaching and learning online. It was founded in May 2010 by Eren Bali, Gagan Biyani, and Oktay Caglar. As of July 2022, the platform has more than 54 million students, 204,000 courses, and 71,000 instructors teaching courses in over 75 languages. There have been over 741 million course enrolments.

Students take courses primarily to improve job-related skills. Some courses generate credits toward technical certification. Udemy has made a special effort to attract corporate trainers seeking to create coursework for employees of their company.

These are large repositories of well-prepared popular training courses that have a meaningful content, are designed for several weeks and even months of training, support the classic distance learning paradigm and generally require significant resources from the user in order to master them.

Another interesting direction is the so-called microlearning [8]. Today, the traditional distance learning format, according to the multiple scientists' estimates, is losing its effectiveness. The development of a learning paradigm, which allows dynamically updating various, short-term training courses, is attracting considerable attention.

At the same time, using the listed types of educational online resources for the purposes of organizing and conducting scientific research, as well as selecting and implementing new tools for processing information about objects of scientific research is difficult or impossible.

The ideology of Software Carpentry can be considered as one of the most successful implementations in this direction. Software Carpentry is a platform that teaches «basic laboratory skills for research computing» [3]. The mission of this project is to unite specialists in nature protection, geographers, ecologists, zoologists and other scientists. The courses of Software Carpentry are master classes that teach how to manipulate data and information and analyze it in an effective, reproducible and collaborative way. Software Carpentry teaches how to use complex modern information technologies (R, RStudio and GitHub), analyze scenarios, create convincing visualizations and learn joint work processes, without requiring previous experience.

Software Carpentry Foundation is a volunteer non-profit organization dedicated to teaching researchers basic computing skills.

Since 1998, Software Carpentry teaches researchers to create purpose-built tools, whether it be a Unix shell script to automate repetitive tasks or software code in programming languages such as Python, R, or MATLAB. These enable researchers to build programs that can be read, re-used and validated, greatly enhancing the sharing and reproducibility of their research.

All Carpentry workshops are hands-on two-day training events during which the attendees gain practical skills and understanding how particular software development tools and methodologies can benefit their own work. The core curriculum taught at Software Carpentry workshops typically includes:

1. automating tasks using the Unix shell;
2. structured programming in Python or R;
3. version control using Git or Mercurial.

The list is not exhaustive – all training materials are freely available under the Creative Commons – Attribution License from the Software Carpentry's lesson repository. Materials can be reused in any way you wish, without asking for special permission, provided that the original source is cited.

It should be noted that the authors have their own successful experience of learning and cooperating with this platform. The authors are participating in the project implemented by University of St. Andrews (Scotland) on translation the «Python programming language» course from English to Ukrainian as volunteers. At the time this work being published, 80% of the course has already been translated (Fig.1). After its completion, all stakeholders will have access to educational materials.

python-novice-gapminder

python-novice-gapminder

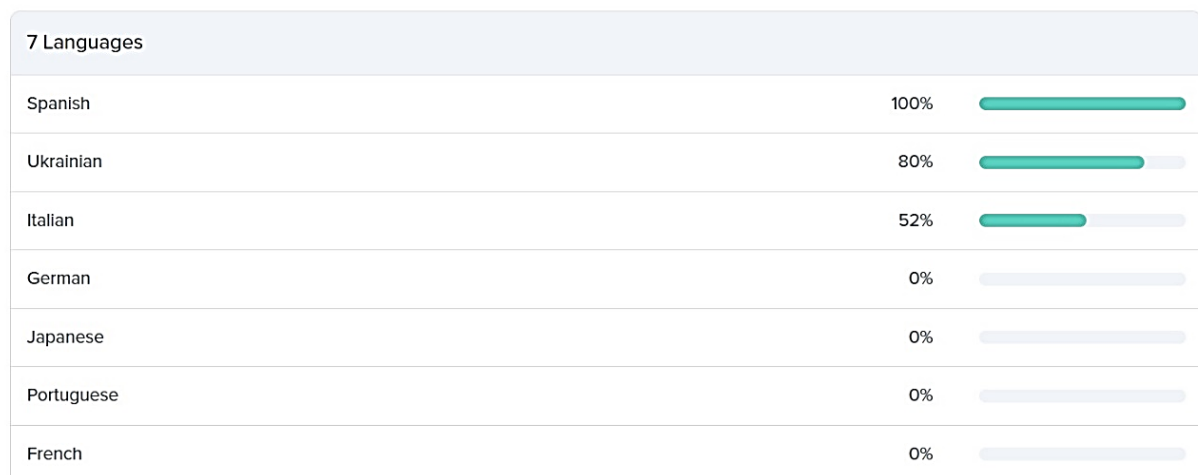


Fig. 1 General course translation statistics

As a generalized model of such an information environment for such a non-formal educational and research community interaction we can consider a system (1):

$$S = (\langle M, R \rangle, P) = (C, P), \quad (1)$$

where M – is a set of elements of the information environment, R – is a set of interlinks between elements from M , P – is a set of system S efficiency criteria, C – is a structure of the system S , so R – may be considered as tools of ordering elements of the set M into the structure C .

Each of the components of the system S has a hierarchical nature. Thus, a discrete set M of elements is a set of known online learning platforms $\{M_1, \dots, M_N\}$, from leading universities and companies, each i -th of them contains the set of various courses $\{M_{n_1}, \dots, M_{n_{K_n}}\}$, each one M_{n_k} of which, in turn, has a modular structure

$$M_{n_k} = \{M_{n_k}^1, \dots, M_{n_k}^{L_{n_k}}\}, n = 1, \dots, N, n_k = 1, 2, \dots, K_n, \quad (2)$$

For every online learning platform M_n , the discrete set P_n of its properties may be presented as some type of a tuple:

$$P_n = \{T_n, V_n, F_n, \{L_{n1}, L_{n2}\}, \{I_{n1}, I_{n2}\}, D_n, Re_n, OS_n\}, n = 1, 2, \dots, N, \quad (3)$$

where:

- T_n – is a training time;
- V_n – is an amount of acquired knowledge;
- F_n – is a possibility of further self-study;
- L_n – is a level of presentation:
 - L_{n1} – is an adequacy in terms of important concepts;
 - L_{n2} – is a possibility of direct application for the purposes of scientific research;
 - L_{n3} – is a viability of practical tasks.
- I_n – is an appearance of course:
 - I_{n1} – is a factor of interactivity;
 - I_{n2} – is an ease of perception;
- D_n – is a degree of openness (open source) of resources;
- Re_n – is a possibility of refactoring;
- OS_n – feature of supporting open science paradigm [9].

Note that the system has a hierarchical structure, and at the upper level of the hierarchy for $n=1, 2, \dots, N$, the elements of the system S are weakly connected, that is, we can assume that the system S at that level is disconnected, while at the lower levels of the hierarchy for each set S_n , the set R_n of interlinks forms a rigid structure C_n .

Some of properties (3) are inherent in the entire system S (S_n) as a whole, some are characteristics of the elements $\{M_{n_k}, R_{n_k}\}$.

Obviously, the system S (1) is an essentially dynamic one, that is, the states of all elements of the system S are functions of time t . However, in this study, we assume that the time interval Δt where the system state stays unchanging satisfies the condition $\Delta t > T$, so we will assume that all elements M, R, P of the system S during training time T are constant.

The quantitative definition of properties P_n allows forming a set of partial efficiency criteria of the kind:

$$\{Q_{1n}, Q_{2n}, \dots, Q_{10n}\}, \quad (4)$$

a scale of measurement of which in the general case must be established on the basis of expert knowledge processing. These partial criteria form a general criterion – the quality of education Q – in the world that is constantly changing.

The concept of quality of education has been considered in many scientific publications. Moreover, 17 Sustainable Development Goals (commonly known as the Global Goals) were formulated in 2015, where the fourth goal is to improve the quality of education.

According to [17] quality education specifically entails issues such as development of appropriate skills, gender parity, provision of relevant school infrastructure, equipment, educational materials and resources, scholarships, or teaching force.

Considering this generally accepted definition, the quality of education is primarily a characteristic of the equipment and accessibility of an education process and education system.

However, in this paper we consider another aspect of the quality of education, namely the degree of compliance of the goals and results of education with the requirements Q_{real} of practical activity in the IT sphere.

Thus, the problem of defining appropriate information learning environment is a multicriteria and multidimensional one:

$$(n^*, k^*) = \operatorname{argmin}_{S_{n_k}} \mu(Q_{real}, Q_{S_n}), \quad (5)$$

where $\mu(Q_{real}, Q_{S_n})$ – defines some kind of metrics as proximity measure for this pair of vector criteria (Q_{real}, Q_{S_n}) .

Thus, the quality of education Q is a generalized property of the system of non-formal education S to offer a set of skills and competencies that allow decision makers to find themselves in the labor market in IT field for an acceptable time τ , $\tau \ll T$.

For a formal representation of such a property, it is necessary to define the vector Q_{real} , which defines the definite point (usually such a point is called a pole) in multidimensional space of knowledge, skills and competencies required in practice.

That vector can be designed on the basis of an analysis of labor market requirements and measured by analyzing a number of widely known Internet resources such as Robotota.UA (<https://rabota.ua/ua/>), UA.Jooble.org (<https://ua.jooble.org/>) Novarobotota.UA (<https://novarobotota.ua/>), Freelance.ua (<https://freelance.ua/>), LinkedIn (<https://gb.linkedin.com/>), Indeed (<https://indeed.com/>), Glassdoor (<https://glassdoor.com/>) etc. Generally, to consider those resources we need to determine the weighting factors, which characterize their importance and reliability.

4 Conclusions

The tuple of criteria (4) considered above, can be applied in three different ways.

First, the criteria (4) can be classified as those that is important to evaluate the amount of necessary knowledge to solve a specific practical problem in the short term, for example, under estimating what amount of knowledge is necessary to perform data analysis in MS Excel.

Second, the subject of the assessment can be a certain volume of knowledge, which is the base for further growth. For example, a course on paradigms of object-oriented programming.

Currently, courses that have a dual nature are being rapidly developed. The main idea of such education and scientific direction lies in studying certain set of tools, for example, a programming language or tools to perform data analysis in order to solve practical problems from a definite subject area, so that criterion L_{n3} , viability of practical tasks, is implemented and generates an immediate synergistic effect. The design of the Carpentry information environment is based on this principle.

Moreover, another important Carpentry principle is «Docendo discimus» (by teaching, we learn) that is formulated by Lucius Annaeus Seneca. Following this principle, Carpentry supports and brings together wide community of practitioners and scientists, for example, proposing to translate education courses on different languages.

As directions for the further research, we are planning to build a description of the set of criteria in an explicit form and develop a decision support system for choosing an information learning environment.

ЖИТЕПАТЯПА

1. A Memorandum on Lifelong Learning. *Commission of the European Communities*. 2000. URL: https://arhiv.acs.si/dokumenti/Memorandum_on_Lifelong_Learning.pdf (last accessed: 20.01.2023).

2. Yao Y., Wang P., JunJiang Y., Li Q., Li Y. Innovative online learning strategies for the successful construction of student self-awareness during the COVID-19 pandemic: Merging TAM with TPB. *Journal of Innovation & Knowledge*. 2022. Vol. 7. Issue 4. URL: [Innovative online learning strategies for the successful construction of student self-awareness during the COVID-19 pandemic: Merging TAM with TPB | Elsevier Enhanced Reader](#) (last accessed: 20.01.2023).
3. Software Carpentry. *Software Carpentry*. URL: <https://software-carpentry.org/> (last accessed: 20.01.2023).
4. Coursera | Degrees, Certificates, & Free Online Courses. *Coursera*. URL: <https://www.coursera.org/> (last accessed: 20.01.2023).
5. edX | Free Online Courses by Harvard, MIT, & more. *edX*. URL: <https://www.edx.org/> (last accessed: 20.01.2023).
6. Prometheus – Онлайн-курси України. *Prometheus*. URL: <https://prometheus.org.ua/> (дата звернення 20.01.2023).
7. Udemy | Online Courses. *Udemy*. URL: <https://www.udemy.com/> (Last accessed: 20.01.2023).
8. Жмай О.В., Чепурна Л.В. Переваги мікронавчання в сучасних умовах online-освіти. *Сучасна молодь в світі інформаційних технологій* : Матеріали II Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф., м. Херсон, 14 травня 2021 р., / Херсонс. держ. аграрно-економ. ун-т, Херсон, 2021. – С. 115-116. URL: [Збірка конференції СМСІТ-2021.pdf \(ksau.kherson.ua\)](#) (дата звернення 20.01.2023).
9. Open innovation, Open Science, open to the world. A vision for Europe. *European Commission*. URL: [Open innovation, open science, open to the world | Shaping Europe's digital future \(europa.eu\)](#) (last accessed: 20.01.2023).
10. Cui Y., Ma Z., Wang L., Yanga A., Liu Q., Kong S., Wang H. A survey on big data-enabled innovative online education systems during the COVID-19 pandemic. *Journal of Innovation & Knowledge*. 2023. Vol. 8. Issue 1. URL: [A survey on big data-enabled innovative online education systems during the COVID-19 pandemic | Elsevier Enhanced Reader](#) (last accessed: 20.01.2023).
11. Wei X., Taecharungroj V. How to improve learning experience in MOOCs an analysis of online reviews of business courses on Coursera. *The International Journal of Management Education*. 2022. Vol. 20. Issue 3. URL: [How to improve learning experience in MOOCs an analysis of online reviews of business courses on Coursera | Elsevier Enhanced Reader](#) (last accessed: 20.01.2023).
12. Fernandez-Batanero J.M., Montenegro-Rueda M., Tadeu P. Online education in higher education: emerging solutions in crisis times. *Heliyon*. 2022. Vol. 20. Issue 3. URL: [Online education in higher education: emerging solutions in crisis times | Elsevier Enhanced Reader](#) (last accessed: 20.01.2023).
13. Ruthotto I., Kreth Q., Melkers J. Entering or advancing in the IT labor market: The role of an online graduate degree in computer science. *The Internet and Higher Education*. 2021. Vol. 51. URL: [Entering or advancing in the IT labor market: The role of an online graduate degree in computer science | Elsevier Enhanced Reader](#) (last accessed: 20.01.2023).
14. Sánchez M., De-Pablos-Heredero C., Medina-Merodio J., Robina-Ramírez R., Fernandez-Sanz R. Relationships among relational coordination dimensions: Impact on the quality of education online with a structural equations model. *Technological Forecasting and Social Change*. 2021. Vol. 166. URL: [Relationships among relational coordination dimensions: Impact on the quality of education online with a structural equations model | Elsevier Enhanced Reader](#) (last accessed: 20.01.2023).
15. Damşa C., Langford M., Uehara D., Scherer R. Teachers' agency and online education in times of crisis. *Computers in Human Behavior*. 2021. Vol. 121. URL: [Teachers' agency and online education in times of crisis | Elsevier Enhanced Reader](#) (last accessed: 20.01.2023).
16. Schwerter J., Dimpfl T., Bleher J., Murayama K. Benefits of additional online practice opportunities in higher education. *The Internet and Higher Education*. 2022. Vol. 53. URL: [Benefits of additional online practice opportunities in higher education | Elsevier Enhanced Reader](#) (last accessed: 20.01.2023).
17. Quality of education. *Inspiring Inquiry*. URL: <https://www.inspiringinquiry.com/sustainable-goals/4-quality-education> (last accessed: 20.01.2023).

REFERENCES

1. *A Memorandum on Lifelong Learning*. Commission of the European Communities. 2000. URL: https://arhiv.acs.si/dokumenti/Memorandum_on_Lifelong_Learning.pdf (last accessed: 20.01.2023).

2. Y. Yao, P. Wang, Y. JunJiang, Q. Li, Y Li, “Innovative online learning strategies for the successful construction of student self-awareness during the COVID-19 pandemic: Merging TAM with TPB”, *Journal of Innovation & Knowledge*, vol.7, issue 4, 2022. URL: [Innovative online learning strategies for the successful construction of student self-awareness during the COVID-19 pandemic: Merging TAM with TPB | Elsevier Enhanced Reader](#) (last accessed: 20.01.2023).
3. *Software Carpentry*. Software Carpentry. URL: <https://software-carpentry.org/> (last accessed: 20.01.2023).
4. *Coursera | Degrees, Certificates, & Free Courses*. Coursera. URL: <https://www.coursera.org/> (last accessed: 20.01.2023).
5. *edX | Free Online Courses by Harvard, MIT, & more*. edX. URL: <https://www.edx.org/> (last accessed: 20.01.2023).
6. *Prometheus – Courses of Ukraine*. Prometheus. [in Ukrainian]. URL: <https://prometheus.org.ua/> (дата звернення 20.01.2023).
7. *Udemy | Online Courses*. Udemy. URL: <https://www.udemy.com/> (Last accessed: 20.01.2023).
8. O.V. Zhmai, L.V. Cherpurna, “Advantages of microlearning in the modern conditions of online education”, in *Modern juveniles in the world of information technologies: Materials II All-Ukr. sci.-pract. internet-conf., Kherson, May 14, 2021*. Kherson, 2021, pp. 115-116. [in Ukrainian]. URL: [Збірка конференції СМСІТ-2021.pdf \(ksau.kherson.ua\)](#) (дата звернення 20.01.2023).
9. *Open innovation, Open Science, open to the world. A vision for Europe*. European Commission. URL: [Open innovation, open science, open to the world | Shaping Europe’s digital future \(europa.eu\)](#) (last accessed: 20.01.2023).
10. Y. Cui, Z. Ma, L. Wang, A. Yanga, Q. Liu, S. Kong, H. Wang, “A survey on big data-enabled innovative online education systems during the COVID-19 pandemic”, *Journal of Innovation & Knowledge*, vol. 8, issue 1, 2023. URL: [A survey on big data-enabled innovative online education systems during the COVID-19 pandemic | Elsevier Enhanced Reader](#) (last accessed: 20.01.2023).
11. X. Wei, V. Taacharungroj, “How to improve learning experience in MOOCs an analysis of online reviews of business courses on Coursera”, *The International Journal of Management Education*, vol. 20, issue 3, 2022. URL: [How to improve learning experience in MOOCs an analysis of online reviews of business courses on Coursera | Elsevier Enhanced Reader](#) (last accessed: 20.01.2023).
12. J.M. Fernandez-Batanero, M. Montenegro-Rueda, J. Fernandez-Cerero, P. Tadeu, “Online education in higher education: emerging solutions in crisis times”, *Heliyon*, vol. 20, issue 3, 2022. URL: [Online education in higher education: emerging solutions in crisis times | Elsevier Enhanced Reader](#) (last accessed: 20.01.2023).
13. I. Ruthotto, Q. Kreth, J. Melkers, “Entering or advancing in the IT labor market: The role of an online graduate degree in computer science”, *The Internet and Higher Education*, vol. 51, 2021. URL: [Entering or advancing in the IT labor market: The role of an online graduate degree in computer science | Elsevier Enhanced Reader](#) (last accessed: 20.01.2023).
14. M. Sánchez, C. De-Pablos-Heredero, J. Medina-Merodio, R. Robina-Ramírez, R. Fernandez-Sanz, “Relationships among relational coordination dimensions: Impact on the quality of education online with a structural equations model”, *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 166, 2021. URL: [Relationships among relational coordination dimensions: Impact on the quality of education online with a structural equations model | Elsevier Enhanced Reader](#) (last accessed: 20.01.2023).
15. C. Damşa, M. Langford, D. Uehara, R. Scherer, “Teachers’ agency and online education in times of crisis”, *Computers in Human Behavior*, vol. 121, 2021. URL: [Teachers’ agency and online education in times of crisis | Elsevier Enhanced Reader](#) (last accessed: 20.01.2023).
16. J. Schwerter, T. Dimpfl, J. Bleher, K. Murayama, “Benefits of additional online practice opportunities in higher education”, *The Internet and Higher Education*, vol. 53, 2022. URL: [Benefits of additional online practice opportunities in higher education | Elsevier Enhanced Reader](#) (last accessed: 20.01.2023).
17. *Quality Education*. Inspiring Inquiry. URL: <https://www.inspiringinquiry.com/sustainable-goals/4-quality-education> (last accessed: 20.01.2023).

**ВІСНИК ХАРКІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
імені В.Н. Каразіна**

серія **«Математичне моделювання. Інформаційні технології.
Автоматизовані системи управління»**

Випуски даної серії розповсюджуються у академічних та наукових колах України та за її межами з метою оперативного висвітлення досліджень у таких актуальних галузях: математичне та комп'ютерне моделювання, обчислювальний експеримент, теорія і прикладні методи обробки інформації, захист інформації, програмно-апаратні системи інформаційного або управляючого призначення, застосування математичного моделювання та системного аналізу у високих, наукоємних технологіях, враховуючи технології створення програмної продукції. Приймаються роботи, що відносяться до напрямів фізико-математичних і технічних наук (бажаний об'єм 6-18 сторінок). Усі рукописи рецензуються.

Примітка. Протягом 2023-24 рр. редакційна колегія при інших рівних умовах надаватиме перевагу роботам, що представлені англійською мовою, якщо стаття отримала схвалення при рецензуванні.

Офіційний сайт <http://periodicals.karazin.ua/mia>
<http://mia.univer.kharkov.ua>

Email: journal-mia@karazin.ua

Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University

series **«Mathematical modeling. Information technology. Automated control systems»**

This series are distributed in academic and scientific circles of Ukraine and abroad for the purpose of timely coverage of research in the following topical areas: mathematical and computer modeling, computational experiment, theory and applied methods of information processing, information protection, software and hardware systems of control and information management, applications of mathematical modeling and system analysis in high, science-intensive technologies, including technologies of software products creation. Articles belonging to the fields of physical, mathematical and technical sciences are accepted (recommended length 6-18 pages). All submissions are peer-reviewed.

Note. For the years 2023-24, all other conditions being equal, the Editorial Board will give preference to articles submitted in English and approved by the peer-review.

Official website <http://periodicals.karazin.ua/mia>
<http://mia.univer.kharkov.ua>
Email: journal-mia@karazin.ua

Наукове видання

**Вісник Харківського національного університету
імені В. Н. Каразіна**

Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології.
Автоматизовані системи управління»

Випуск 54

Збірник наукових праць

Українською та англійською мовами

Комп'ютерне верстання О.О. Афанасьєва

Підписано до друку 27.06.2022 р.
Формат 60x84/8. Папір офсетний. Друк цифровий.
Ум. друк. арк. – 5,6.
Обл.– вид. арк. – 7,07.
Наклад 50 пр. Зам. № 29/2022
Безкоштовно

Видавець і виготовлювач
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
61022, м. Харків, майдан Свободи, 4
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №3367 від 13.01.09

Видавництво Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
тел.: 705-24-32