

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 49

Серія заснована 2003 р.

BULLETIN

of V.N. Karazin Kharkiv National University

Series

«Mathematical Modeling.
Information Technology.
Automated Control Systems»

Issue 49

First published in 2003

Харків
2021

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 № 4 від 29.03.2021 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

Стервєдов 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

Целуйко О.Ф., к.ф.-м.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"

Стрельникова 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 № 4 of 29.03.2021).

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

Tseluyko A.F., Ph.D. 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

▪ О.П. Алексієв, В.О. Алексієв, О.Б. Маций, М.Є. Маций	6
Наскрізне проектування мехатронних промислових та автомобільних комп'ютерних систем	
▪ І.О. Верушкін, Є.С. Кононенко	16
Дослідження гідропружних коливань елементів конструкцій з використанням методів скінченних та граничних елементів	
▪ І.В. Гарячевська, Д.О. Протектор, Е.О. Усатенко	29
Система комп'ютерного моделювання нелінійної теплопровідності	
▪ Л.С. Глоба, В.В. Гасвий, А.М. Бакай	38
Побудова робочих процесів на основі онтологій	
▪ В.В. Живага, М.О. Малахова, Д.О. Шевченко	49
Система моніторингу якості повітря на базі IoT	
▪ М.А. Костюк	58
Інтеграція адаптивного мобільного навчального середовища в освітній процес та оцінка її ефективності	
▪ А.І. Меркулова, Д.О. Меркулов, Є.Ю. Місюра	76
Розрахунок термонапруженого стану багат шарових пластин неканонічної форми	
▪ К. В. Шацький, В.В. Яновський	83
Еволюція мемів	

CONTENTS

▪ Aleksiev O., Aleksiev V. O., Matsyi, M. Matsyi	6
End-to-end design of mechatronic industrial and automotive computer systems	
▪ I.A. Vierushkin, Y.S. Kononenko	16
Simulation of hydroelastic vibrations of structure elements using finite and boundary element methods	
▪ I. Hariachevska, D. Protektor, E. Usatenko	29
Computer Simulation System of Nonlinear Thermal Conductivity	
▪ L. Globa, V. Gaievyi, A. Bakai	38
Development of workflows based on ontologies	
▪ V.V. Zhivaga, M.O. Malakhova, D.O. Shevchenko	49
Air monitoring system based on IoT	
▪ M. Kostiuk	58
Integration of adaptive mobile educational environment into the educational process and evaluation of its effectiveness	
▪ A.I. Merkulova, D.O. Merkulov, Ie.Yu. Misiura, O.V. Postnyi	76
The calculation of the thermal stressed state of multilayer plates of a non-canonical shape	
▪ K.V. Shatsky, V.V. Yanovsky	83
Evolution of memes	

УДК 656:004.75

Наскрізне проектування мехатронних промислових та автомобільних комп'ютерних систем

О.П. Алексієв¹, В.О. Алексієв², О.Б. Маций³, М.Є. Маций⁴

Алексієв Олег Павлович *д.т.н., професор; професор кафедри комп'ютерних технологій і мехатроніки Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого 25, м. Харків, 61002*
e-mail: o.p.alekseev@gmail.com;
<https://orcid.org/0000-0002-9503-825>

Алексієв Володимир Олегович *д.т.н., професор; професор, професор кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, проспект Науки, 9А, м. Харків, 61166*
e-mail: aleksiyev@gmail.com;
<https://orcid.org/0000-0001-6767-7524>

Маций Ольга Борисівна *к.т.н., доцент кафедри комп'ютерних технологій і мехатроніки Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого 25, м. Харків, 61002*
e-mail: olga.matsiy@gmail.com;
<https://orcid.org/0000-0002-1350-9418>

Маций Михайло Євгенійович *аспірант кафедри комп'ютерних технологій і мехатроніки Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого 25, м. Харків, 61002*
e-mail: michael.matsiy@gmail.com;
<https://orcid.org/0000-0001-7143-4269>

Робота містить результати досліджень щодо наскрізного проектування мехатронних промислових та автомобільних комп'ютерних систем як цільової попередньо упорядкованої множини агрегатів зі зв'язками, що динамічно функціонує в часі і просторі і взаємодії із її середовищем існування як єдине ціле. Метою дослідження є створення програмного та апаратного забезпечення для віртуального управління, його інтелектуалізація на основі використання віртуальної логістики транспортних процесів, інструментів віртуального управління, свого роду віртуальної логістики транспортної системи.

Ключові слова: транспортна інфраструктура, мехатронна система, бортовий обчислювальний комплекс, комп'ютерні системи, автоматизоване проектування, веб-технології, навігація.

End-to-end design of mechatronic industrial and automotive computer systems

Aleksiev Oleh *Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Computer Technologies and Mechatronics Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslava Mudryho str, 25, Kharkiv, 61002*

Aleksiev Volodymyr *Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Cybersecurity and Information Technologies Semyon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Ukraine, 9A Nauki Avenue, Kharkiv, 61166, Ukraine*

Matsyi Olha *Ph.D. in Technology, Associate Professor of the Department of Computer Technologies and Mechatronics
Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslava Mudryho str, 25,
Kharkiv, 61002*

Matsyi Michael *Graduate student of the Department of Computer Technologies and Mechatronics
Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslava Mudryho str, 25,
Kharkiv, 61002*

Due to the constant development of society and industry, the modern transport systems and vehicles have reached a high level of information complexity. Accordingly, there is a discrepancy between the rapid development of tools and the methods of informatization of complex objects and systems, the development of transport telematics (internal for cars and other vehicles and external for the transport control systems) and the heterogeneous nature of current subsystems and the components of the Ukrainian transport system. Resolving this problem will allow improving quality of transport services, optimizing transport processes at all levels of transport infrastructure, as well as avoiding negative consequences such as, traffic disruptions, unsatisfactory road conditions, and irrational use of restoration funds. That will help to improve traffic safety, the quality of services to the city residents, and ensure people's comfort and cargo safety. The goal of the study is to create the software and hardware for virtual management of logistic processes. Developing intellectual system is based on the use of virtual logistics of transportation processes and the tools of virtual management. The problem of stating and proving new rules and concepts for providing knowledge and skills for the developers of the transport control applications has been considered. The process of acquiring knowledge and skills for the workers who want to improve their professional level in road transport management has been described. The obtained results can be used for road transport organizations in the interests of both personal and commercial users of Ukrainian transport system.

Keywords: *transport infrastructure, mechatronic system, on-board computing complex, computer systems, computer-aided design, web technologies, navigation.*

Комплексное проектирование мехатронных промышленных и автомобильных компьютерных систем

Алексієв Олег Павлович *д.т.н., професор, професор кафедри комп'ютерних технологій і мехатроніки
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул.
Ярослава Мудрого 25, м. Харків, 61002*

Алексеев Владимир Олегович *д.т.н., профессор, профессор кафедры кибербезопасности и
информационных технологий, Харьковский национальный экономический
университет имени Семена Кузнецца, проспект Науки, 9А., г. Харьков, 61166*

Маций Ольга Борисовна *к.т.н., доцент кафедры компьютерных технологий и мехатроники
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, ул.
Ярослава Мудрого 25, г. Харьков, 61002*

Маций Михаил Евгеньевич *аспирант кафедры компьютерных технологий и мехатроники
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, ул.
Ярослава Мудрого 25 г. Харьков, 61002*

Работа содержит результаты исследований сквозного проектирования мехатронных промышленных и автомобильных компьютерных систем как целевой предварительно упорядоченного множества агрегатов со связями динамично функционирует во времени и пространстве и взаимодействия с ее средой обитания как единое целое. Целью исследования является создание программного и аппаратного обеспечения для виртуального управления, его интеллектуализация на основе использования виртуальной логистики транспортных процессов, инструментов виртуального управления, своего рода виртуальной логистики транспортной системы.

Ключевые слова: *транспортная инфраструктура, мехатронная система, бортовой вычислительный комплекс, компьютерные системы, автоматизированное проектирование, веб-технологии, навигация.*

1 Постановка проблемы

Сьогодні завдяки широкому застосуванню результатів досліджень з мехатроніки на автотранспорті можна визначити, як спеціальний напрям розвитку цієї області науки, саме автомобільну мехатроніку (automotive mechatronics). Вона присвячена аналізу проблем сполучення та організації взаємодії автомобільних електромеханічних, електронних вузлів, агрегатів та інформаційних приладів у процесі експлуатації та безпосередньо руху автомобіля для отримання синергетичного ефекту. Слід визначити мехатронний об'єкт, що синтезується завдяки синергетичному об'єднанню вузлів точної механіки з електронними, електротехнічними і комп'ютерними компонентами, які забезпечують проектування і виробництво якісно нових

модулів, систем, машин з інтелектуальним керуванням їх функціональними станами. Мехатронний об'єкт – це узагальнююче поняття, що містить у собі мехатронні систему, агрегат, модуль або вузол. Мехатронний модуль – це уніфікований мехатронний об'єкт, що має автономну документацію і призначений, як правило, для реалізації рухів по одній координаті. При цьому мають на увазі мехатронний модуль руху. Виділимо мехатронний вузол, який принципово відрізняється від мехатронного модуля тим, що він не є уніфікованим. Інше поняття – мехатронний агрегат, він складається з декілька модулів.

Таким чином, можна виділити мехатронну систему (mechatronic system) – яка складається з декількох агрегатів або агрегату і ряду окремих модулів, тобто з об'єктів однакових або різних нижчих рівнів. Система – сукупність компонентів, деяким чином зв'язаних між собою: підлеглих визначеному відношенню, залежності або закономірності; діючих як одне ціле. Мехатронна система цілком відповідає цьому визначенню як сукупність механічних, електронних і управляючих компонентів, що утворюють синергетичну єдність, що діє як одне ціле. Розглянемо її наскрізне проектування як цільової попередньо упорядкованої множини агрегатів з зв'язками, що динамічно функціонують в часі і просторі і взаємодії із середовищем їх існування як єдине ціле.

2 Аналіз літератури

У дослідженнях [1, 2] пропонується розвинуте трактування поняття мехатроніки – як галузь науки, що присвячена аналізу виконавчих станів мехатронних об'єктів і функціональної взаємодії механічних, енергетичних і інформаційних процесів між ними та з зовнішнім середовищем. Отримання при цьому синергетичного ефекту або синергія цієї галузі науки знайшла ретельне відбиття у статтях [3, 4]. У монографіях [5, 6] висвітлено саме наукове, термінологічне уявлення трактування мехатроніки на промисловому рівні.

У автомобільній мехатроніці до мехатронних технологій, перш за все, слід віднести так звану технологію X-by-Wire. Згідно простого перекладу «управління по проводам» можна затверджувати, що це є звичайна сучасна автомобільна електронна технологія [7-9]. Поєднує механічну і електронну (електричну) технології, процеси взаємодії механічних і електричних пристроїв [10, 11]. модифікації, аналіз або оптимізації проектних рішень [12-15]. Безпосередньо програмний пакет описано у таких статтях та роботах (http://www.ci.ru/inform01_02/p_22-23.htm) [16, 17]. Сучасні системи саме наскрізного проектування дозволяють розробити схему не тільки електронного пристрою, а і виконати моделювання, тестування та валідацію роботи мехатронної системи взагалі [18-20]. У XXI сторіччі керування промисловим та технологічним процесами вийшло на новий рівень за рахунок використання технологій IoT та Industry 4.0. Web-орієнтовані SCADA-системи [21] є актуальною архітектурою для традиційних АСУ та АСУ ТП за рахунок використання поширеного обладнання із промисловим діапазоном параметрів, але при цьому охоплює ринок середнього та малого бізнесу, для яких традиційні АСУ є недоступними за своєю вартістю. Також поширенню подібних систем сприяє розвиток хмарних технологій і можливість відмови від використання власної інфраструктури серверного обладнання. Перед прийняттям рішення про використання подібних систем потрібно мати моделі та інструменти для аналізу можливих ризиків, пов'язаних із забезпеченням питань конфіденційності та безпеки [22].

3 Мета статті

Мехатронна система об'єднує властивості електромеханічних компонентів з новітньою силовою електронікою, керування якими ведеться за допомогою мікроконтролерів, комп'ютерів або інших обчислювальних пристроїв. При цьому система в істинно мехатронному підході, незважаючи на використання стандартних компонентів, базується як можна більш монолітно. Наприклад, застосування убудованих безпосередньо в мікроконтролери аналого-цифрового перетворювача, інтелектуальних силових перетворювачів й дає скорочення ваго-габаритних показників, підвищення надійності системи та інші переваги. Саме це і є метою проведення такого наукового дослідження безперервного процесу створення. Відповідна цільова настанова передбачає прискорення та аналітичні, цифрові підходи до своєрідної цифровізації створення мехатронних систем, перш-за-все у автомобільній галузі, автомобільному трансфері пасажирів та вантажу. Це і є метою наскрізного проектування мехатронних промислових та автомобільних комп'ютерних систем – АКС.

4 Automotive mechatronic system

Для автомобільної галузі можна стверджувати, що автомобільна мехатронна система (automotive mechatronic system) – спеціальна упорядкована множина агрегатів, які умонтовуються в автомобіль як сукупність електромеханічних, електронних та мікропроцесорних приладів та пристроїв, які забезпечують його рух.

Мехатронна система об'єднує властивості електромеханічних компонентів з новітньою силовою електронікою, керування якими ведеться за допомогою мікроконтролерів, комп'ютерів або інших обчислювальних пристроїв. При цьому система в істинно мехатронному підході, незважаючи на використання стандартних компонентів, базується як можна більш монолітно. Наприклад, застосування убудованих безпосередньо в мікроконтролери аналого-цифрового перетворювача, інтелектуальних силових перетворювачів й дає скорочення ваго-габаритних показників, підвищення надійності системи та інші переваги.

У автомобільній мехатроніці до мехатронних технологій перш за все слід віднести так звану технологію X-by-Wire. Згідно простого перекладу «управління по проводам» можна затверджувати, що це є звичайна сучасна автомобільна електронна технологія [7-9].

Технологія X-by-Wire пропонується для розробки електронних систем забезпечення безпеки на автомобілі без використання механічних систем резервування. За літерою – «x» у «x-by-wire» розуміються системи забезпечення безпеки, наприклад, рульове керування (steering), гальмування (braking), автоматична трансмісія (power train control), управління підвіскою (suspension control), або системи подушок-безпеки (multi-airbag systems). На прикладі системи забезпечення керування автомобілем – Steering-by-Wire можна зрозуміти концепцію «управління по проводам» (рис. 1). (<http://www.vmars.tuwien.ac.at/projects/xbywire/projects/tuwien.html>. X-By-Wire. Safety Related Fault Tolerant Systems in Vehicles. Final Report. Project No. BE 95/1329. Authors: X-By-Wire Team., 1998).

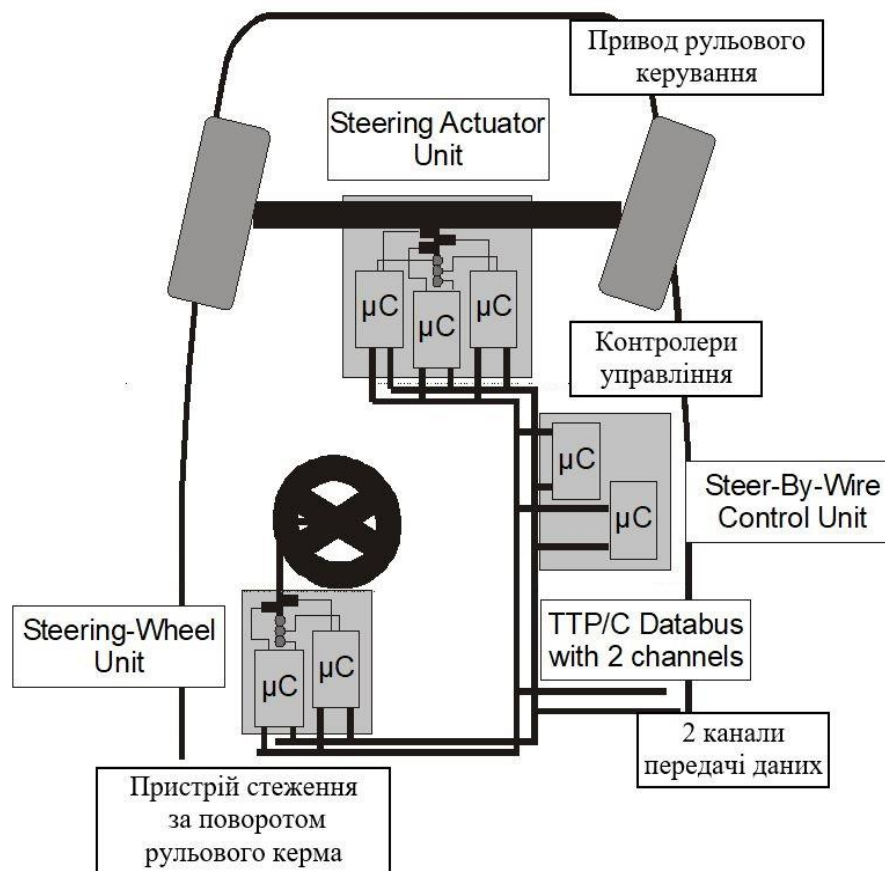


Рис. 1. Рульове керування (Steer)-by-Wire

На рис 1. мікроконтролерні системи позначені символами « μC » – від скорочення мікроконтролер (microcontroller). Всі системи об'єднує послідовна шина передачі даних (вона може резервуватися). Зараз у якості шин передачі даних на автомобілях частіше використовують інтерфейс- CAN (controller area network). Але в продовження технології X-Bu-Wire, де розглядається управління мережі контролерів тільки в обмеженні певної системи, можна запропонувати об'єднання всіх мереж систем X-Bu-Wire на автомобілі до єдиної. Це надасть можливість розглядати автомобіль дійсно, як мережевий транспортний засіб (network vehicle). Але на рівні сучасних технологій можна говорити тільки про передачу телеметричних даних від системи до системи. Це продиктовано складністю організації взаємодії інформаційно-керуючих потоків та необхідністю надання найвищого рівня безпеки для людей, що будуть експлуатувати цей транспортний засіб, та навколишнього середовища.

Таким чином, мехатронні системи, що базуються на реалізації технології X-Bu-Wire, призначені для вирішення задач підтримки безпеки на автомобілі та стають підставою для втілення мережевих транспортних засобів.

4 Мехатроніка промисловості та транспортних застосувань

Теоретичними підставами мехатроніки промисловості та транспортних застосувань служать такі дисципліни як теорія систем, теорія керування, які на інформаційній основі дозволяють узагальнити, виконати моделювання і досліджувати схемотехнічні рішення по створенню конкретного мехатронного комплексу. Мехатроніка на транспорті є продовженням автоматизації керування, удосконалювання підсистем і ланок транспортних засобів, втілення гнучких комп'ютеризованих систем транспортного комплексу. Зараз транспортний засіб і транспортна система ґрунтуються на використанні як механічних, так і електронних та інформаційних технологій. Тому рішення задач аналізу і синтезу транспортного комплексу в цілому, складових його елементів повинні ґрунтуватися саме на транспортній мехатроніці: науці, що розглядає основні принципи раціонального сполучення цих трьох складових практично всіх сучасних транспортних машин та систем.

Транспортний комплекс складається з різних складових. Однак, його основною частиною є транспортний засіб, що забезпечує переміщення людей і вантажів у просторі, а в загальному випадку і часі. Сучасний транспортний засіб є своєрідним транспортним роботом, відмінною особливістю якого є наявність гнучкої комп'ютеризованої системи, що забезпечує навігацію і власне керування процесом руху транспортних засобів.

Тому основна проблема аналізу і синтезу транспортного комплексу в цілому і його підсистем і ланок полягає в раціональному сполученні різних за своєю фізичною природою складових частин: складних динамічних механізмів, електромеханічних, електронних приборів і пристроїв, різних чутливих елементів, датчиків, бортової обчислювальної мережі.

Мехатронні системи знаходять широке застосування на транспорті. Це відноситься, насамперед, до удосконалювання транспортних засобів, розвиткові транспортних комплексів і роботизації промислового виробництва транспортних засобів. Відмінною рисою всякої мехатронної системи є те, що вона спрямована на удосконалювання робочих процесів машин і механізмів, що призначені для реалізації механічних технологій.

Для транспортного засобу – це процес переміщення в просторі. Для автомобіля – рух по автомобільній дорозі з метою перевезення людей і вантажів. Для того щоб забезпечити механічне пересування транспортного засобу, роботу його механізмів і агрегатів не можна обійтися без електротехнологій. Особливо це відноситься до сучасних транспортних засобів, у яких робота різних агрегатів і вузлів пов'язана з використанням електричних, електромеханічних і електронних приладів і пристроїв. Для автотранспортних засобів електротехнологія є основою, як електронних систем автомобільних двигунів, так і інших агрегатів автомобілів, зчеплення, коробки передач, кермових приводів, гальмових пристроїв, підвіски. Поєднує механічну і електронну (електричну) технології, процеси взаємодії механічних і електричних пристроїв [9-11]. Ця взаємодія ґрунтується на реалізації процесів керування, застосуванні обчислювальних пристроїв, мікрокомп'ютерів.

Практично раціональне сполучення механічних і електротехнологій знаходить своє відбиття в інформаційній технології на логічному і фізичному рівні керування агрегатами, підсистемами і ланками транспортних засобів. Так, бортовий обчислювальний комплекс сучасного автомобіля

(АБОК) дозволяє визначити необхідні терміни обслуговування його вузлів і агрегатів, забезпечує діагностику несправностей відповідної транспортної машини. Маршрутний комп'ютер і навігаційна система, що входять до складу сучасного АБОК, дозволяють раціонально керувати рухом автомобіля.

Автомобільний парк нашої країни досить різноманітний і вимагає спеціальних заходів щодо удосконалення його експлуатації. Задача раціональної навігації, створення гнучких комп'ютеризованих комплексів для вирішення задач управління рухом автомобілів різних типорозмірів актуальні для України. Тому сьогодні усі виробники автомобільних електронних приладів і пристроїв розробляють нові автомобільні комп'ютери.

Вони умонтовуються в автомобільні керуючі системи, які можна визначити як гнучкі комп'ютеризовані комплекси. Такі комплекси іноді називають телематичними (telematics) системами (<http://www.computerra.ru/online/firstpage/newsofday/8602/>). Вони доповнюють саме мехатронні системи та забезпечують своєрідний зв'язок між автомобільними механікою, електронікою, інформатикою. Телематичні системи є засіб організації телекомунікаційних зв'язків як усередині так і поза автомобілю. Завдяки телематиці сучасний транспортний засіб стає ланцюгом як транспортної інфраструктури міста або регіону, так і її промислової складової.

Для мехатронного пристрою дуже важливим є використання САПР та систем моделювання. Так, від правильного вибору необхідних засобів проектування буде залежати подальша доля виробу. Так грамотне вибране середовище проектування дозволить виконати розробку мехатронної системи в найкоротші строки. Що надасть економію як ресурсів на розробку виробу так і надасть належної якості за рахунок моделювання роботи пристрою ще до впровадження у виробництво. Тому розглянемо більш детально САПР для автомобільної галузі та безпосередньо для проектування мехатронних систем.

5 Автомобільна телематика CAD/CAM/CAE

Автоматизоване проектування (Computer-Aided Design, CAD) – застосування обчислювальної техніки для проектування певних виробів або для проектування взагалі. Автоматизоване проектування можна визначити як технологію використання обчислювальних систем для надання допомоги проектувальникам у виробництві, модифікації, аналізі або оптимізації проектних рішень [12, 13]. Безпосередньо програмний пакет САПР (http://www.ci.ru/inform01_02/p_22-23.htm) [14, 15].

Сучасні системи автоматизованого проектування в електроніці (EDA – Electronic Design Automation) дозволяють розробити схему електронного пристрою, виконати моделювання його роботи й розробити друковану плату [18]. системи автоматизованого проектування (САПР) є програмно-апаратними комплексами, призначеними для рішення задач проектування.

Апаратна платформа таких систем будується на базі потужних робочих станцій і, як правило, є розподіленою обчислювальною мережею. До апаратної частини необхідно додати пристрої виводу результатів проектування, наприклад: принтери, плоттери, фотоплоттери або тривимірні принтери (апаратні засоби, що дозволяють шляхом дії лазерного променя на спеціальний фото-чуйний пластик створити тривимірну копію механічного пристрою, що розроблено із-за допомогою САД- систем) і т. п.

Програмна платформа САПР базується на стандартних операційних системах, наприклад: Unix або Windows та безпосередньо на пакеті прикладних програм (тобто самої САД-системі). Таким чином, можна виділити дві складові комплексу: платформа – апаратна реалізація до якої (певною мірою) можна включити й операційну систему, і безпосередньо програмний пакет САПР (http://www.ci.ru/inform01_02/p_22-23.htm) [16, 17].

Інший напрямок – САПР для розробки електронних пристроїв. Сучасні системи автоматизованого проектування в електроніці (EDA – Electronic Design Automation) дозволяють розробити схему електронного пристрою, виконати моделювання його роботи й розробити друковану плату [18].

Але варто виділити, як складову програмної частини САПР – службове програмне забезпечення, наприклад системи управління базами даних (СУБД), системи керування конструкторської документації. У залежності від масштабів проектних робіт, що виконуються для кінцевого розроблювача основним критерієм вибору необхідного інструмента проектування, може стати безпосередньо програмний пакет САПР. При розгортанні САПР в масштабах

підприємства, важливим стає крім апаратної й програмної складових системи, взаємодія відділу виконання проектних робіт із системою керування на рівні підприємства – з одного боку, а з іншого боку – інтегрування проектних робіт з автоматизованим процесом виробництва.

Системи автоматизованого проектування можна розділити на наступні типи по сфері застосування. САПР – машинобудівного профілю. Наприклад, перелічимо деякі системи цього профілю: система конструкторської графіки й автоматизованого проектування AutoCAD фірми Autodesk, Inc. (<http://www.autodesk.com/>).

Розробка російської фірми АСКОН (<http://www.ascon.ru/>) КОМПАС 5 – інтегроване середовище проектування різних виробів, що включає вискоєфективний креслярсько-конструкторський редактор, готові бібліотеки для різних сфер застосування, а також могутні інструментальні параметричні засоби розробки додатків.

Параметризація означає заміну конкретного розміру або координат у геометричній моделі деталі на символічне ім'я або «параметр», що дозволяє породжувати безліч деталей зміною одного розміру-параметра.

SolidWorks є системою що дозволяє створювати керовані розмірами твердотільні моделі і може служити ядром для рішення множини різних інженерних задач. Вона здатна автоматично створювати креслення асоційовані з моделлю так, що зміни зроблені в моделі відбивають і в кресленні, або навпаки за бажанням конструктора. SolidWorks підтримує режим формування складальних одиниць по посиланнях на складову зборку деталі і дозволяє редагувати ці деталі в контексті зборки.

Результатом роботи системи SolidWorks є просторова твердотільна параметрична модель деталі або зборки, що потім передається до систем інженерних розрахунків, проектування технологічного оснащення або системи генерації керуючих програм для верстатів із ЧПУ (числове програмне управління), також саме закінчене робоче креслення деталі або повний опис складальної одиниці. Розроблювачем системи SolidWorks є американська корпорація SolidWorks Corp. (<http://www.solidworks.com>, <http://www.solidworks.ru>), що з 1997 року є частиною французької компанії Dassault Systemes, що розробляє відому CAD/CAM систему CATIA (<http://www.catia.com>). Компанія SolidWorks має свою незалежну технічну політику стосовно Dassault Systemes і EDS.

Фірма Parametric Technology Corporation (США) розробляє систему ProEngineer (<http://www.ptc.com>) – САПР моделювання великомасштабних складальних виробів з параметризацією на всіх рівнях моделювання.

6 Розумний будинок

Наступним напрямком можна вважати САПР для будівництва й архітектури. Деякі системи машинобудівного профілю, наприклад AutoCAD або КОМПАС можуть використовуватися в цій сфері, як засоби виконання креслярських робіт. Однак існує цілий клас САПР для рішення задач будівництва й архітектури, наприклад деякі продукти фірми Autodesk, Inc. (<http://www.autodesk.com/>).

Зазначимо, що зараз є актуальним поняття – «розумний будинок». Це має на увазі інтеграцію до єдиної інфраструктури всіх електричних, електронних та електро – механічних систем будинку в єдину комп'ютерну мережу.

Таким чином дім стає мехатронною системою. Для автотранспортної галузі це стає більш важливішим, якщо розглядати диспетчерські центри та інші споруди, що мають високий рівень інтеграції як електронних так і механічних складових. Але не тільки архітектурні САПР грають останню роль при проектуванні «розумного дому» тут стають потрібні і системи для проектування електронної начинки споруди.

Інший напрямок – САПР для розробки електронних пристроїв. Сучасні системи автоматизованого проектування в електроніці (EDA – Electronic Design Automation) дозволяють розробити схему електронного пристрою, виконати моделювання його роботи й розробити друковану плату [18].

Так само, існує велике число програмного забезпечення, що реалізує ряд додаткових можливостей. Наприклад, програми перенесення даних про розташування компонентів на друкованій платі в САПР механічних пристроїв, для наступної розробки конструктивного

виконання пристрою; системи аналізу цілісності ланцюгів на друкованій платі, системи розрахунку теплових характеристик пристрою і т.п. (<http://www.rodnik.ru>).

Наприклад, одним з найпотужніших та дорогих рішень для проектування друкованих плат є пакет компанії Cadence – PCB Design Studio (www.pcb.cadence.com). У якості редактора друкованої плати в ньому використовується програма Allegro, що дозволяє виконувати розробку багатопшарових й високошвидкісних плат з високою щільністю розміщення компонентів. У якості штатного модуля авторозміщення компонентів на платі й автотрасування ланцюгів друкованої плати використовується програма SPECCTRA (www.specctra.com).

Власних засобів аналізу цілісності сигналів в пакеті немає – цю функцію виконує окремий модуль SPECCTRAQuest SI, що постачається окремо. У якості засобів побудови проектів пропонується: OrCAD Capture CIS для порівняно простих задач Concept HDL для складних ієрархічних або багатоваріантних проектів [19]

Інший, менш потужний пакет наскрізного проектування компанії Cadence є OrCAD – система моделювання і наскрізного проектування аналого-цифрових електронних (www.orcad.com). Основним модулем OrCAD є редактор схем електричних принципових. Проектування в системі починається з введення принципової схеми, її моделювання й оптимізації і закінчується розробкою друкованої плати і виводом керуючих файлів для технологічного обладнання.

7 Висновки

Таким чином, системи наскрізного проектування можна розділити на дві великі групи: механічні (CAD) і САПР електронних пристроїв (EDA). Слід зазначити, що для спеціальних галузей застосування розроблено САПР для вирішення архітектурних задач, або спеціалізовані пакети розробки електронних пристроїв і т. п.

Також зазначимо, що розробка тільки друкованої плати в сучасних умовах бурхливого розвитку ринку електронних пристроїв частіше виконується не окремо, а при взаємодії як розробників електронної начинки пристрою, так і дизайнерів та інженерів, що працюють над корпусом електронного пристрою. Так розробив друковану плату, наприклад, у OrCad Layout інженер-електронник імпортує параметри габаритних розмірів плати, та елементів, що встановлені на неї в пакет САПР – машинобудівного профілю, наприклад, ProEngineer або SolidWorks – де інженери та дизайнери будуть проводити розробку тривимірної моделі корпусу пристрою.

Таким чином, при використанні САПР значно скорочується шлях від ідеї та проектування пристрою до створення його моделі, тестового зразка та безпосередньо випуску готової продукції. В цьому циклі САПР займає основну позицію, навколо котрої виконуються інші проектні роботи: виконання інженерних розрахунків, моделювання роботи пристрою, що розробляється та безпосередньо підготовка його до виробництва.

Слід зазначити, що сучасні програмні пакети САПР, у своєму складі містять засоби, що дозволяють виконувати інженерні розрахунки міцності конструкцій, проводити моделювання й оптимізацію роботи систем, що проектуються і т. п. Так само, існує спеціалізовані засоби, призначені для рішення задач автоматизації інженерних розрахунків і аналізу проектних рішень. Такі засоби звичайно називають Computer-Aided Engineering (CAE). Зараз збільшилася тенденція сумісного використання засобів автоматизованого проектування і виконання інженерного аналізу (CAD/CAE), що завершується етапом автоматизованого виробництва [20].

ЛІТЕРАТУРА

1. Алексієв В. О., Волков В. П., В.І. Калмиков В. І. Мехатроніка транспортних засобів та систем: Навчальний посібник. Харків: ХНАДУ, 2004. 176 с.
2. Шалобаєв Е. В. Теоретические и практические проблемы развития мехатроники. Современные технологии. СПб, 2001. С. 46-67.
3. Alekseyev O.P., Matsiy M.E. Monitoring of transport communications. Автомобиль и электроника. Современные технологии. 14/18, 2018. С. 44-48. DOI: 10.30977/VEIT.2018.14.0.44.
4. Алексеев В.О. Информационный анализ и синтез мехатронных систем. Вестник ХГАДТУ. №12-13, 2000. С. 199-201.

5. Исии Т., Симояма И., Иноуэ Х. и др. Мехатроника. Москва: Мир, 1988. 318 с.
6. Сига Х., Мидзутани С. Введение в автомобильную электронику. Москва: Мир, 1997. 232 с.
7. Автомобильный справочник Bosh. Москва: За рулем, 1999. 896 с.
8. Зубинский А. Автомобиль в сети или сеть в автомобиле. Компьютерное обозрение. №37, 1998. С. 29-31.
9. Данов Б. А., Титов Е. И. Электронное оборудование иностранных автомобилей. Системы управления оборудованием салона. Москва: Транспорт, 1998. 59 с.
10. Алексеев В.О. Информационный анализ и синтез мехатронных систем. Вестник ХГАДТУ. №12-13, 2000. С. 199-201.
11. Matsiy M., Voronova Ye. Interactive Monitoring of Vehicle Traffic. Conditions. Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. Сборник научных трудов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». № 79, 2018, С. 105-108.
12. Грувер М., Зиммерс Э. САПР и автоматизация производства. М.: Мир, 1987. 528 с.
13. Толковый словарь по вычислительным системам / Под ред. В. Иллинуорта и др.: Пер. с англ. А.К. Белоцкого и др.; Под ред. Е.К. Масловского. М.: Машиностроение, 1991. 560 с.
14. Matsiy O. V., Morozov A. V., Panishev A. V. Recurrent Method to Solve the Assignment Problem. Cybernetics and Systems Analysis. November. 51(6), 2015. P. 939-946.
15. О.Б. Маций. Перестановочно-матричный подход к построению оптимального назначения. Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". № 28 (1353), 2019. С. 69 – 77. DOI: 10.20998/2411-0558.2019.28.04.
16. Маслов Е., Зубинский А. Аппаратно-программная платформа САПР. Компьютерное обозрение. №39, 1998. С. 17-20.
17. Зубинский А. Программные комплексы САПР. Компьютерное обозрение. № 39, 1998. С. 21-24.
18. Стешенко В. Б. EDA. Практика автоматизированного проектирования радиоэлектронных устройств. М.: Издатель Молгачева С.В. Издательство «Нолидж», 2002. 768 с.
19. Потапов Ю. Российский рынок САПР печатных плат. Электронные компоненты. №5, 2001. С. 58-60.
20. Alekseyev O., Klets D., Khabarov V. Development of automotive computer systems based on the virtualization of transportation processes management. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 6. N 3 (90), 2017. P. 14-25.
21. Savchenko V. and Mnushka O., High-Sensitive Sensors Based on QCR for Smart Devices. 2020 IEEE XVI-th International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH). Lviv. Ukraine, 2020. P. 72-75. DOI: 10.1109/MEMSTECH49584.2020.9109435.
22. Мнушка О. В. Архітектура веб-орієнтованої SCADA-системи. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інформатика та моделювання. Харків: НТУ «ХПІ». № 24 (1300), 2018. С. 117-128. DOI: 10.20998/2411-0558.2018.24.10.

REFERENCES

1. V. O. Alekseyev, V. P. Volkov, V. I. Kalmikov. *Mechatronics of transport systems: Navchalnyy posibnik*. Kharkiv: KhNADU, 2004, 176 p. [in Ukrainian]
2. E. V. Shalobaev. *Theoretical and practical problems of mechatronics development*, Modern technologies, St. Petersburg, 2001, P. 46-67. [in Russian]
3. O. P. Alekseyev, M. E. Matsiy. *Monitoring of transport communications*, Automobile and electronics. Modern technologies. 14/18, 2018, P. 44-48. DOI: 10.30977 / VEIT.2018.14.0.44. [in English]
4. V. O. Alekseev. *Information analysis and synthesis of mechatronic systems*, Bulletin of KhSADTU. No. 12-13, 2000, P. 199-201. [in Russian]
5. T. Ishii, I. Shimoyama, H. Inou, et al. *Mechatronics*, Moscow: Mir, 1988, 318 p. [in Russian]
6. H. Shiga, S. Mizutan. *Introduction to automotive electronics*. Moscow: Mir, 1997, 232 p. [in Russian]
7. Automobile directory Bosh Moscow: Behind the wheel, 1999, 896 p. [in Russian]

8. A. Zubinsky. *Car in a network or a network in a car*. Computer review. No. 37, 1998, P. 29-31. [in Russian]
9. B. A. Danov, E. I. Titov. *Electronic equipment of foreign cars. Cabin equipment control systems*. Moscow: Transport, 1998, 59 p. [in Russian]
10. V. O. Alekseyev. *Information analysis and synthesis of mechatronic systems*. Bulletin of KSADTU. No. 12-13, 2000, P. 199-201. [in Russian]
11. M. Matsiy, Ye. Voronova. *Interactive Monitoring of Vehicle Traffic. Conditions*, Open information and computer integrated technologies. Collection of scientific papers of the National Aerospace University Zhukovsky «KhAI». No. 79, 2018, P. 105-108. [in English]
12. M. Grover, I. E. Zimmers. *CAD and production automation*. M.: Mir, 1987, 528 p. [in Russian]
13. Ed. V. Illingworth and al. *Explanatory Dictionary of Computing Systems*, Moscow: Mashinostroenie, 1991, 560 p. [in English]
14. O. B. Matsiy, A. V. Morozov, A. V. Panishev. *Recurrent Method to Solve the Assignment*. *Cybernetics and Systems Analysis*. 51(6), 2015, P. 939-946. [in English]
15. O. B. Matsiy. *Permutation-matrix approach to constructing the optimal assignment*. Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series of «Informatics and Modeling». Kharkiv: NTU «KhPI». № 28 (1353), 2019, P. 69-77. DOI: 10.20998/2411-0558.2019.28.04. [in Ukrainian]
16. E. Maslov, A. Zubinsky. *Hardware and software platform CAD*. Computer review. No. 39, 1998, P. 17-20. [in Russian]
17. A. Zubinsky. *Software systems CAD*, Computer review. No. 39, 1998, P. 21-24. [in Russian]
18. V. A. Steshenko. *EDA. The practice of computer-aided design of electronic devices*. M.: Publisher Molgacheva S.V. Publishing House «Knowledge», 2002, P. 768. [in Russian]
19. Y. Potapov. *Russian market of CAD of printed circuit boards*, Electronic components. No. 5, 2001, P. 58-60. [in Russian]
20. O. Alekseyev, D. Klets, V. Khabarov. *Development of automotive computer systems based on the virtualization of transportation processes management*. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 6, N 3 (90), 2017, P. 14-25. [in English]
21. V. Savchenko, O. Mnushka. *High-Sensitive Sensors Based on QCR for Smart Devices*, 2020 IEEE XVIth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), Lviv. Ukraine, 2020, P. 72-75. DOI: 10.1109/MEMSTECH49584.2020.9109435. [in English]
22. O. Mnushka. *The architecture of a web-based SCADA system*. Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series of «Informatics and Modeling». Kharkiv: NTU «KhPI». № 24 (1300), 2018, P. 117–128. DOI: 10.20998/2411-0558.2018.24.10. [in Ukrainian]

УДК 539.3

Дослідження гідропружних коливань елементів конструкцій з використанням методів скінчених та граничних елементів

І.О. Верушкін, Є.С. Кононенко

**Верушкін Іван
Олексійович**

*аспірант
Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАНУ, вул.
Пожарського, 2/10, Харків, 61046, Україна
e-mail: ivanveruskin86@gmail.com;
<http://orcid.org/0000-0002-3837-5567>*

**Кононенко Єгор
Сергійович**

*аспірант
Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАНУ, вул.
Пожарського, 2/10, Харків, 61046, Україна
e-mail: yehorkononenko@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6221-3608>*

Для дослідження частот та форм коливань елементів конструкцій, які функціонують при взаємодії з рідиною, запропоновано підхід, заснований на сумісному використанні методів скінчених та граничних елементів. Для опису руху як конструктивного елемента, так і рідини використовуються основні співвідношення механіки суцільного середовища. При дослідженні елементів конструкцій прийняті лінійні співвідношення між напруженнями та деформаціями, тобто розглядаються пружні елементи. Для опису руху рідини застосовані співвідношення між компонентами тензорів напружень та швидкостей деформацій. Вважається, що рідина є ідеальною та нестисливою. Отримано рівняння Лапласа відносно тиску рідини на змочені поверхні елементів конструкцій та сформульовані відповідні граничні умови при однобічному та двобічному контакті елемента конструкції з рідиною. Побудовані інтегральні рівняння для визначення тиску. У випадку двобічного контакту елемента конструкції з рідиною отримано гіперсингулярне інтегральне рівняння. Якщо контакт з рідиною є однобічним, то побудовані сингулярні інтегральні рівняння, що мають логарифмічні особливості та особливості типу Коші. За наявності аксіальної симетрії конструкції отримані інтегральні рівняння зводяться до одновимірних. Розглянуто круглу пружну пластинку за різні умови закріплення. Побудовані форми вільних коливань цього конструктивного елемента, які слугують базисними функціями при вивченні коливань пластинки з урахуванням приєднаних мас рідини. При цьому використовувався метод скінчених елементів. Для знаходження тиску рідини на пластинку побудовано одновимірне гіперсингулярне інтегральне рівняння. Отримані частоти та форми коливань пластинки з урахуванням приєднаних мас рідини. Проведено дослідження точності та вірогідності запропонованого методу.

Ключові слова: методи скінчених та граничних елементів, ідеальна нестислива рідина, гідропружні коливання, гіперсингулярне інтегральне рівняння.

Simulation of hydroelastic vibrations of structure elements using finite and boundary element methods

I.A. Vierushkin, Y.S. Kononenko

Vierushkin Ivan

*PhD student
A. Podgorny Institute of Mechanical Engineering Problems NASU, Pozharsky,
st. 2/10, Kharkiv, 61046, Ukraine
e-mail: ivanveruskin86@gmail.com;
<http://orcid.org/0000-0002-3837-5567>*

Kononenko Yehor

*PhD student
A. Podgorny Institute of Mechanical Engineering Problems NASU, Pozharsky,
st. 2/10, Kharkiv, 61046, Ukraine
e-mail: yehorkononenko@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6221-3608>*

The approach for studying the vibration frequencies and modes of structural elements that operate in interaction with a liquid has been proposed. The approach is based on the usage of both the finite and boundary element methods. To describe the motion of both structural elements and the fluid, the basic relations of the continuous medium mechanics have been used. While studying structural elements, the linear relations between stresses and strains have been assumed, i.e. elastic elements have been considered. The relations between the components of stress tensors and strain rates are used to describe fluid motion. The fluid is considered to be ideal and incompressible. The Laplace equations for the fluid pressure on the wetted surfaces of structural elements have been obtained. The corresponding boundary conditions have been formulated for one-sided, as well as, two-sided

contact of a structural element with a liquid. The integral equations for pressure determination have been received. In the case of a two-sided contact of a structural element with a liquid, the hypersingular integral equation has been obtained. If the contact with the liquid is one-sided, then the indicated singular integral equations have logarithmic singularities and Cauchy-type singularities. In the presence of axial symmetry of the structure, these hypersingular integral equations are reduced to one-dimensional ones. A round elastic plate under different fastening conditions has been considered. Modes of free oscillations of this structural element have been received and they serve as basic functions in the study of plate oscillations taking into account the added liquid masses. The finite element method has been used. A one-dimensional hypersingular integral equation is implemented to find the fluid pressure on the plate. The frequencies and oscillation forms of the plate taking into account the added liquid masses have been obtained. Accuracy and reliability of the proposed method have been ascertained.

Key words: *finite and boundary element method, ideal incompressible fluid, hydroelastic vibrations, hypersingular integral equation*

Исследование гидроупругих колебаний элементов конструкций с использованием методов конечных и граничных элементов

И.А. Верушкин, Е.С. Кононенко

**Верушкин Иван
Алексеевич**

аспирант

*Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАНУ, ул. Пожарского,
2/10, Харьков, 61046, Украина*

e-mail: ivanveruskin86@gmail.com;

<http://orcid.org/0000-0002-3837-5567>

**Кононенко Егор
Сергеевич**

аспирант

*Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАНУ, ул. Пожарского,
2/10, Харьков, 61046, Украина*

e-mail: yehorkononenko@gmail.com;

<http://orcid.org/0000-0001-6221-3608>.

Для исследования частот и форм колебаний элементов конструкций, функционирующих при взаимодействии с жидкостью, предложен подход, основанный на совместном использовании методов конечных и граничных элементов. Для описания движения как конструктивного элемента, так и жидкости используются основные соотношения механики сплошной среды. При исследовании элементов конструкций приняты линейные соотношения между напряжениями и деформациями, то есть рассматриваются упругие элементы. Для описания движения жидкости применены соотношения между компонентами тензоров напряжений и скоростей деформаций. Считается, что жидкость является идеальной и несжимаемой. Получены уравнения Лапласа относительно давления жидкости на смоченные поверхности элементов конструкций, и сформулированы соответствующие граничные условия при одностороннем и двустороннем контакте элемента конструкции с жидкостью. Построены интегральные уравнения для определения давления. В случае двустороннего контакта элемента конструкции с жидкостью получено гиперсингулярное интегральное уравнение. Если контакт с жидкостью является односторонним, то указанные сингулярные интегральные уравнения имеют логарифмические особенности и особенности типа Коши. При наличии аксиальной симметрии конструкции сингулярные интегральные уравнения сводятся к одномерным. Рассмотрена круглая упругая пластинка с различными условиями закрепления. Были построены формы свободных колебаний этого конструктивного элемента, которые служат базисными функциями при изучении колебаний пластинки с учетом присоединенных масс жидкости. При этом использовался метод конечных элементов. Для нахождения давления жидкости на пластинку построено одномерное гиперсингулярное интегральное уравнение. Определены частоты и формы колебаний пластинки с учетом присоединенных масс жидкости. Проведено исследование точности и достоверности предложенного метода.

Ключевые слова: *методы конечных и граничных элементов идеальная несжимаемая жидкость, гидроупругие колебания, гиперсингулярное интегральное уравнение*

1 Вступ

Значна кількість сучасного енергетичного, машинобудівного та нафтохімічного обладнання працює в умовах підвищених технологічних навантажень. Елементи конструкцій піддаються дії короточасних силових та температурних впливів, функціонують при взаємодії з оточуючим середовищем. Актуальними питаннями сьогодення залишаються проблеми обчислення міцносних та динамічних характеристик вказаного обладнання з метою уточнення залишкового ресурсу та забезпечення надійності та безпеки конструкцій при експлуатації. Одним з таких питань є визначення частот та форм вільних коливань конструктивних елементів при врахуванні взаємодії з водним або повітряним середовищем [1-2]. Зауважимо, що при врахуванні гідро пружних ефектів відбувається значний вплив на частоти коливань. Тобто, якщо ці явища не враховувати, то важко відстроюватись від небажаних резонансних частот [3]. Елементи конструкцій, що функціонують за наявності рідкого середовища, є або повністю зануреними в рідину, або мають

контактуючі з рідиною поверхні. Таким чином, є два класи проблем гідро пружної взаємодії. До першого відносяться проблеми вивчення динамічної поведінки конструкцій при однобічному контакті з рідиною або газом. До таких конструкцій відносяться кришки гідротурбін [2], посудини високого тиску [1], баки ракет-носіїв [4-5], резервуари для збереження рідини [6]. Такі елементи конструкцій, як лопаті зворотно - лопатевих та радіально - вісьових гідротурбін [7], лопаті повітряних установок [8], крила літаків [9] та ін. Зауважимо, що з математичної точки зору, опис однобічного та двобічного контакту з рідиною потребує різних рівнянь, але математичні моделі мають й багато спільних рис. Задачі стосовно двобічного контакту пружної тонкої пластинки або оболонки з рідиною зазвичай розв'язують за використанням методів теорії потенціалу та гіперсингулярних інтегральних рівнянь [10-11]. Для числового розв'язання задач гідропружної взаємодії зазвичай використовують потужні методи скінченних та граничних елементів [12-13].

В даному дослідженні розроблено підхід, заснований на сумісному використанні методів скінченних (МСЕ) та граничних елементів (МГЕ). При цьому, МСЕ використовується для опису поведінки пружного деформованого тіла, а МГЕ для визначення характеристик рідкого середовища.

2 Основні співвідношення та формулювання задач

Для опису руху як пружної конструкції, так і рідини використовуються основні співвідношення механіки суцільного середовища. Нехай є пружне тіло, що займає область Ω з границею Γ . Припустимо, що на тіло діють задані об'ємні та поверхневі сили. Крім того, частина поверхні тіла Γ_l контактує з рідиною, рис.1.

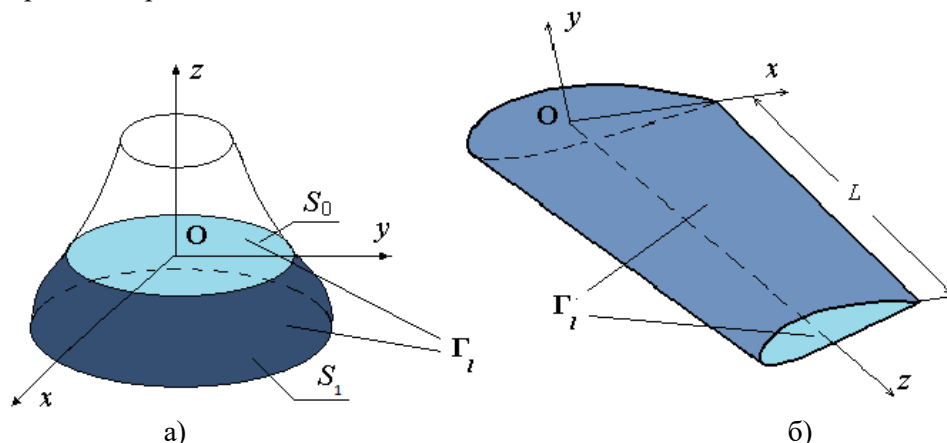


Рисунок 2.1 Схеми конструкцій, що взаємодіють з рідиною: а)- однобічний контакт, б)- двобічний контакт

Всі моделі суцільного середовища [14] передбачають визначення полів напружень σ_{ij} , деформацій ε_{ij} , переміщень u_i , а також температури T , тиску p та густини ρ в залежності від часу. Для знаходження цих полів застосовують такі основні співвідношення [14]:

рівняння руху в напруженнях

$$\sigma_{ij,j} + X_i = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}; \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (2.1)$$

співвідношення Коші для малих деформацій

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}), \quad (2.2)$$

а також умови сумісності деформацій, граничні та початкові умови й рівняння стану, що пов'язують тиск, густину та температуру середовища.

Рівнянь (2.1)-(2.2) недостатньо для однозначного визначення σ_{ij} , ε_{ij} , u_j ($i, j = 1, 2, 3$). Тому задають додаткові співвідношення між напруженнями та деформаціями, або між напруженнями та швидкостями деформацій. Якщо вивчається пружне тіло, то компоненти тензорів напружень є лінійними функціями від компонентів деформацій. Зв'язок між деформаціями та напруженнями описується законом Гука у формі

$$\sigma_{ij}^e = \delta_{ij} \lambda \operatorname{div} \mathbf{u}^e + \mu \left(\frac{\partial u_j^e}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i^e}{\partial x_j} \right) \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (2.3)$$

де $\mu = E[2(1+\nu)]^{-1}$ – модуль зсуву, $\lambda = E\nu[(1+\nu)(1-2\nu)]^{-1}$ – коефіцієнт Ламе, E, ν – модуль пружності та коефіцієнт Пуассона, відповідно.

Вважаємо, що на частині межі Γ_1 задані переміщення тіла, а на частині Γ_2 – зусилля; $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2$. Зусилля виражаються за формулою

$$\mathbf{p}^e(\mathbf{x}, t) = \mathbf{T}^n(\partial_x, \mathbf{n}(\mathbf{x}, t)) \mathbf{u}^e(\mathbf{x}, t) = 2\mu \frac{\partial \mathbf{u}^e}{\partial \mathbf{n}} + \lambda \mathbf{n} \operatorname{div} \mathbf{u}^e + \mu (\mathbf{n} \times \operatorname{rot} \mathbf{u}^e). \quad (2.4)$$

Тобто граничні умови мають вигляд

$$\mathbf{u}^e(\mathbf{x}, t)|_{\Gamma_1} = \mathbf{U}(t), \quad \mathbf{p}^e(\mathbf{x}, t)|_{\Gamma_2} = \mathbf{P}(t). \quad (2.5)$$

Задаються також початкові умови, якщо розглядається динамічний стан

$$\mathbf{U}^e(\mathbf{x}, 0) = 0, \quad \frac{\partial \mathbf{u}^e(\mathbf{x}, 0)}{\partial t} = 0. \quad (2.6)$$

З урахуванням рівності (2.3) рівняння руху (2.1) набувають вигляду

$$\mu \Delta u_j^e + (\lambda + \mu) \frac{\partial \vartheta^e}{\partial x_j} + X_j = \rho \frac{\partial^2 u_j^e}{\partial t^2}, \quad j = 1, 2, 3. \quad (2.7)$$

де $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2}$, $\vartheta^e = \operatorname{div} \mathbf{u}^e = \frac{\partial u_1^e}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2^e}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3^e}{\partial x_3}$.

Для розв'язання рівнянь руху (2.7) застосовуємо метод зважених нев'язок, невідомі подаємо у вигляді рядів за базисом з фінітних функцій $\{\psi_n\}_{n=1}^{N_1}$; як пробні використовуємо функції з цього ж базису. Після інтегрування отриманого співвідношення по об'єму та зведення частки об'ємних інтегралів до поверхневих отримуємо скінченно-елементне формулювання зазначеної задачі у вигляді

$$[\mathbf{M}_s] \ddot{\mathbf{u}}^e + [\mathbf{K}_s] \mathbf{u}^e = \{\mathbf{f}_s\} + \{\mathbf{f}_{pr}\} \quad (2.8)$$

де $[\mathbf{M}_s], [\mathbf{K}_s]$ – матриці мас та жорсткості, відповідно, $\{\mathbf{f}_s\}$ – вектор заданих зусиль, що діють на пружне тіло, $\{\mathbf{f}_{pr}\}$ – вектор зусиль, що характеризують тиск рідини на змочені поверхні пружного тіла, який буде визначено далі.

Для визначення означеного вектору $\{\mathbf{f}_{pr}\}$ перейдемо до формулювання початково-крайової задачі з механіки рідини. Для опису рідини використовуємо співвідношення (2.1)-(2.2). Також задається зв'язок між напруженнями та швидкостями деформацій. Зробимо такі припущення відносно рідкого середовища. Вважаємо, що рідина є стисливою та нев'язкою, а її рух безвихровий. Припускаємо, що збурення тиску рідини внаслідок руху пружного тіла є малими, тобто розв'язуємо зв'язану задачу в лінійному формулюванні. Використовуємо загальні закони механіки рідини, а саме: закон збереження маси (рівняння нерозривності)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\operatorname{div}(\rho \mathbf{V}_f) + Q, \quad (2.9)$$

де \mathbf{V}_f – вектор швидкості, ρ – густина рідини, Q – джерела, t – час.

Далі використовуємо рівняння руху (2.1) у напруженнях (наслідок закону збереження імпульсу) з врахуванням об'ємних сил \mathbf{b}

$$\rho \frac{d\mathbf{V}_f}{dt} = \rho \mathbf{b} + \operatorname{div}(\boldsymbol{\sigma}_f).$$

Для визначення компонент тензору напружень приймаємо гіпотезу

$$\boldsymbol{\sigma}_f = -p\mathbf{I} + \mathbf{T}; \quad \mathbf{T} = 2\mu \left(\dot{\mathbf{S}} - \frac{1}{3}(\operatorname{div} \mathbf{V}_f) \right), \quad (2.10)$$

де $\dot{\mathbf{S}}$ – девіатор швидкостей деформації.

З використанням рівняння стану з (2.9) та (2.10) маємо наближені рівності

$$\operatorname{div} \mathbf{V}_f = -\frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{Q}{\rho_0}, \quad \frac{\partial \mathbf{V}_f}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p + \frac{4\mu}{3\rho_0} \left(-\frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{Q}{\rho_0} \right). \quad (2.11)$$

Надалі вважаємо, що рідина нестислива та нев'язка, а джерела відсутні. Тоді маємо $Q = 0$, $\mu = 0$, $\rho_0 = \text{const}$, $c \rightarrow \infty$. При цьому (2.11) набувають вигляду

$$\operatorname{div} \mathbf{V}_f = 0, \quad \rho_0 \frac{\partial \mathbf{V}_f}{\partial t} = -\nabla p \quad (2.12)$$

Обчислив дивергенцію від другого співвідношення в (2.12), отримуємо, що тиск p є гармонічною функцією, тобто задовольняє рівнянню Лапласа, а саме

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = 0. \quad (2.13)$$

Саме тиск, або його перепад входить в праву частину рівнянь (2.8).

Припустимо, що має місце таке розкладення для невідомих переміщень

$$\mathbf{u}^e(x, y, z, t) = \sum_{k=1}^N c_k(t) \mathbf{u}_k(x, y, z), \quad (2.14)$$

де $c_k(t)$ – невідомі коефіцієнти, які залежать лише від часу;

$\mathbf{u}_k(x, y, z)$ – відомі базисні функції.

Функції часу $c_k(t)$ зазвичай розглядають як узагальнені координати. З огляду на (2.14), рівнянням (2.8) надаємо таку форму

$$\sum_{k=1}^N \{ \ddot{c}_k(t) [\mathbf{M} \mathbf{u}_k] + c_k(t) [\mathbf{K} \mathbf{u}_k] \} = \{ \tilde{\mathbf{f}}_s \} + \{ \tilde{\mathbf{f}}_{pr} \}. \quad (2.15)$$

Надалі використовуємо метод зважених нев'язок [13], що в даному випадку еквівалентно виконанню скалярного добутку рівнянь (2.15) послідовно на функції $\mathbf{u}_l(x, y, z)$. Отримуємо

$$[\mathbf{M}][\ddot{\mathbf{c}}] + [\mathbf{K}][\mathbf{c}] = \{ \tilde{\mathbf{f}}_s \} + \{ \tilde{\mathbf{f}}_{pr} \},$$

де $[\mathbf{M}] = \{ \mathbf{M} \mathbf{u}_k, \mathbf{u}_l \}$, $[\mathbf{K}] = \{ \mathbf{K} \mathbf{u}_k, \mathbf{u}_l \}$.

Якщо $\{ \tilde{\mathbf{f}}_s \} = \{ \tilde{\mathbf{f}}_{pr} \} = 0$, то маємо задачу на визначення частот та форм вільних коливань елемента конструкції без врахування приєднаних мас рідини, при лише $\{ \tilde{\mathbf{f}}_s \} = 0$ приходимо до задачі на визначення частот та форм вільних коливань елемента конструкції з врахуванням приєднаних мас рідини.

3 Визначення тиску на контактуючі з рідиною поверхні елемента конструкції

3.1. Двобічний контакт елемента конструкції з рідиною

Треба знайти праву частину в співвідношенні

$$[\tilde{\mathbf{M}}][\ddot{\mathbf{c}}] + [\tilde{\mathbf{K}}][\mathbf{c}] = \{ \tilde{\mathbf{f}}_{pr} \}. \quad (3.1)$$

Якщо вивчається двобічний контакт елемента конструкції з рідиною, то на змочених поверхнях розглядається перепад тиску. Як було зазначено вище, тиск задовольняє рівнянню Лапласа (2.13). Для однозначного розв'язку цього рівняння треба сформулювати граничні умови. Вважаємо, що елемент конструкції досить тонкий, тому згідно з [15], вважаємо, що граничні умови можна задавати та серединній поверхні елемента, що розглядається. Сформулюємо граничну умову непротікання, яка для нев'язкої рідини полягає у рівності нормальних складових швидкостей рідини та конструктивного елемента, тобто

$$(\dot{\mathbf{u}}^e, \mathbf{n}) = (\mathbf{V}_f, \mathbf{n}).$$

З другого з рівнянь (2.12) здобудемо

$$\frac{\partial p}{\partial \mathbf{n}}^\pm = -\rho_l (\dot{\mathbf{u}}^e, \mathbf{n}) = -\rho_l \sum_{k=1}^N \ddot{c}_k(t) (\mathbf{u}_k, \mathbf{n}). \quad (3.2)$$

Нормальна похідна від тиску має бути неперервною, але ж на поверхні елементу тиск має перепад, при чому функція, що описує тиск, є гармонічною.

Крім того, вказана гармонічна функція має задовольняти умові Зоммерфельда на нескінченності, а саме

$$\nabla p|_{\infty} = 0.$$

Як відомо, такі властивості має потенціал подвійного шару [16]

$$p(\mathbf{P}_0) = \frac{1}{4\pi} \iint_S \Gamma(\mathbf{P}) \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} \frac{1}{|\mathbf{P} - \mathbf{P}_0|} dS, \quad \mathbf{P} \in S, \quad (3.3)$$

де S - область, зайнята елементом конструкції;

\mathbf{n} – одинична нормаль до поверхні S ;

\mathbf{P} і \mathbf{P}_0 - точки тривимірного простору з координатами (x, y, z) та (x_0, y_0, z_0) , відповідно;

$|\mathbf{P} - \mathbf{P}_0| = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}$ - декартова відстань між \mathbf{P} і \mathbf{P}_0 ;

$\Gamma(\mathbf{P})$ - густина потенціалу задана на поверхні S .

Функція, що визначена формулою (3.3), задовольняє рівнянню Лапласа (2.13), має неперервну нормальну похідну, а при перетині поверхні S вздовж нормалі має скінченний розрив, а саме [16]

$$p^+(\mathbf{P}_0) - p^-(\mathbf{P}_0) = \Gamma(\mathbf{P}_0), \quad \mathbf{P}_0 \in S.$$

Тому використовуємо подання (3.2) для визначення тиску. Зауважимо, що для визначення перепаду тиску треба знайти невідому густину $\Gamma(\mathbf{P})$ на поверхні пластини. Треба задовольнити граничну умову (3.2). Це призводить до інтегрального рівняння у вигляді

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{n}_0} \frac{1}{4\pi} \iint_S \Gamma(\mathbf{P}) \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} \frac{1}{|\mathbf{P} - \mathbf{P}_0|} = -\rho_l(\mathbf{u}^e, \mathbf{n}), \quad \mathbf{P}, \mathbf{P}_0 \in S. \quad (3.4)$$

З рівняння (3.4) бачимо, що функція $\Gamma(\mathbf{P})$ може бути подана у вигляді такого ряду

$$\Gamma(\mathbf{P}) = \sum_{k=1}^N \ddot{c}_k(t) \Gamma_k(\mathbf{P}), \quad (3.5)$$

де функції $\Gamma_k(\mathbf{P})$ задовольняють таким гіперсингулярним рівнянням

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{n}_0} \frac{1}{4\pi} \iint_S \Gamma_k(\mathbf{P}) \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} \frac{1}{|\mathbf{P} - \mathbf{P}_0|} = -\rho_l(\mathbf{u}_k, \mathbf{n}), \quad \mathbf{P}, \mathbf{P}_0 \in S$$

Якщо ввести позначення для оператора, що дає розв'язки означених гіперсингулярних рівнянь у вигляді

$$\Gamma_k(\mathbf{P}) = -\rho_l \mathbf{H}_k(\mathbf{u}_k),$$

то отримаємо вираз для матриці приєднаних мас для рівняння (3.1)

$$\{\tilde{\mathbf{f}}_{pr}\} = -\rho_l [\mathbf{H}] \{\ddot{\mathbf{c}}\}, \quad [\mathbf{H}] = \{\mathbf{H}\mathbf{u}_k, \mathbf{u}_l\}. \quad (3.6)$$

Таким чином, отримані рівняння для визначення частот та форм вільних коливань елементу конструкції при двобічному контакті з рідиною – диференціальні рівняння (3.1), в яких $\{\tilde{\mathbf{f}}_{pr}\}$ обчислюється за формулою (3.6).

Зауважимо, що для обчислення тиску рідини використовується пряме формулювання методу граничних елементів.

3.2. Однобічний контакт елементу конструкції з рідиною

Якщо розглядається однобічний контакт елементу конструкції з рідиною, то в рівнянні (3.1) при обчисленні $\{\tilde{\mathbf{f}}_{pr}\}$ треба використовувати саме тиск p . Ця функція задовольняє рівнянню (2.13), для якого треба сформулювати граничні умови. Відзначимо, що в цьому випадку поверхня розрахункової області складається з двох поверхонь: змоченої поверхні σ та вільної поверхні S_0 . На змоченій поверхні ставимо умову непротікання, а саме

$$\left. \frac{\partial p}{\partial \mathbf{n}} \right|_{\sigma} = -\rho_l (\ddot{\mathbf{u}}^e, \mathbf{n}) = -\rho_l \sum_{k=1}^N \ddot{c}_k(t) (\mathbf{u}_k, \mathbf{n}). \quad (3.7)$$

Спочатку розглянемо задачу, де не враховується сила тяжіння, тобто на вільній поверхні не відбувається хвиле утворення. Тоді динамічна гранична мова, що полягає в рівності тиску рідини на вільній поверхні, приймає вигляд:

$$p|_{S_0} = 0. \quad (3.8)$$

Таким чином, маємо мішану крайову задачу (2.13), (3.7), (3.8) для рівняння Лапласа. Тоді найбільш прийнятним є використання методу граничних елементів у прямому формулюванні [13] х використанням другої тотожності Гріна

$$2\pi p(\mathbf{P}_0) = \iint_S \frac{\partial p(\mathbf{P})}{\partial \mathbf{n}} \frac{1}{|\mathbf{P} - \mathbf{P}_0|} dS - \iint_S p(\mathbf{P}) \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} \frac{1}{|\mathbf{P} - \mathbf{P}_0|} dS, \quad S = \sigma \cup S_0. \quad (3.9)$$

Функція $p(\mathbf{P}_0)$, описана рівнянням (3.9). Застосуємо до рівняння (3.9) граничні умови (3.7) та (3.8). Приходимо до такої системи сингулярних інтегральних рівнянь:

$$2\pi p(\mathbf{P}_0) + \iint_{\sigma} p(\mathbf{P}) \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} \frac{1}{|\mathbf{P} - \mathbf{P}_0|} d\sigma - \iint_{S_0} q(\mathbf{P}) \frac{1}{|\mathbf{P} - \mathbf{P}_0|} dS_0 = \rho_l \iint_{\sigma} \frac{1}{|\mathbf{P} - \mathbf{P}_0|} \sum_{k=1}^N \ddot{c}_k(t)(\mathbf{u}_k, \mathbf{n}) d\sigma, \quad \mathbf{P}_0 \in \sigma, \quad (3.10)$$

$$\iint_{\sigma} p(\mathbf{P}) \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} \frac{1}{|\mathbf{P} - \mathbf{P}_0|} d\sigma - \iint_{S_0} q(\mathbf{P}) \frac{1}{|\mathbf{P} - \mathbf{P}_0|} dS_0 = \rho_l \iint_{\sigma} \frac{1}{|\mathbf{P} - \mathbf{P}_0|} \sum_{k=1}^N \ddot{c}_k(t)(\mathbf{u}_k, \mathbf{n}) d\sigma, \quad \mathbf{P}_0 \in S_0.$$

З лінійності інтегральних операторів, що фігурують в рівняннях (3.10), отримуємо

$$p(\mathbf{P}) = \sum_{k=1}^N \ddot{c}_k(t) p_k(\mathbf{P}), \quad q(\mathbf{P}) = \sum_{k=1}^N \ddot{c}_k(t) q_k(\mathbf{P}). \quad (3.11)$$

Введемо інтегральні оператори

$$\mathbf{A}(\sigma_1, \sigma_2) f(\mathbf{P}) = \iint_{\sigma_1} \frac{f(\mathbf{P})}{|\mathbf{P} - \mathbf{P}_0|} d\sigma_1, \quad \mathbf{P}_0 \in \sigma_2, \quad \mathbf{B}(\sigma_1, \sigma_2) f(\mathbf{P}) = \iint_{\sigma_1} f(\mathbf{P}) \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} \frac{1}{|\mathbf{P} - \mathbf{P}_0|} d\sigma_1, \quad \mathbf{P}_0 \in \sigma_2. \quad (3.12)$$

Тоді з рівнянь (3.10) з використанням (3.11) будемо мати

$$2\pi \mathbf{I} p_k(\mathbf{P}_0) + \mathbf{B}(\sigma, \sigma) p_k(\mathbf{P}) - \mathbf{A}(S_0, \sigma) q_k(\mathbf{P}) = \rho_l \mathbf{A}(\sigma, \sigma)(\mathbf{u}_k, \mathbf{n}), \quad (3.13)$$

$$\mathbf{B}(\sigma, S_0) p_k(\mathbf{P}) - \mathbf{A}(S_0, S_0) q_k(\mathbf{P}) = \rho_l \mathbf{A}(\sigma, S_0)(\mathbf{u}_k, \mathbf{n}).$$

Припустимо, що на поверхнях σ, S_0 розташовано M_1, M_2 граничних елементів, відповідно. Введемо такі матриці та вектори

$$\{\mathbf{q}\}_{i=1}^{M_2} = \{q_k(\mathbf{P}_i)\}, \quad \{\mathbf{p}\}_{i=1}^{M_1} = \{p_k(\mathbf{P}_i)\}, \quad \{\mathbf{u}\}_{i=1}^{M_1} = \{\mathbf{u}_k(\mathbf{P}_i), \mathbf{n}\}, \quad \{\mathbf{A}_{21}\}_{i=1, j=1}^{M_2, M_2} = \mathbf{A}(S_0, \sigma),$$

$$\{\mathbf{A}_{11}\}_{i=1, j=1}^{M_1, M_1} = \mathbf{A}(\sigma, \sigma), \quad \{\mathbf{A}_{22}\}_{i=1, j=1}^{M_2, M_2} = \mathbf{A}(S_0, S_0), \quad \{\mathbf{B}_{11}\}_{i=1, j=1}^{M_1, M_1} = \mathbf{B}(\sigma, \sigma), \quad \{\mathbf{B}_{12}\}_{i=1, j=1}^{M_1, M_2} = \mathbf{B}(\sigma, S_0).$$

Отримаємо дискретну форму співвідношень (3.13)

$$(2\pi \{\mathbf{I}\} + \{\mathbf{B}_{11}\}) \{\mathbf{p}\} - \{\mathbf{A}_{21}\} \{\mathbf{q}\} = \rho_l \{\mathbf{A}_{11}\} \{\mathbf{u}\}, \quad (3.14)$$

$$\{\mathbf{B}_{12}\} \{\mathbf{p}\} - \{\mathbf{A}_{22}\} \{\mathbf{q}\} = \rho_l \{\mathbf{A}_{12}\} \{\mathbf{u}\} \quad (3.15)$$

Зі співвідношення (3.15) здобудемо

$$\{\mathbf{q}\} = \rho_l \{\mathbf{A}_{22}\}^{-1} \{\mathbf{A}_{12}\} \{\mathbf{u}\} - \{\mathbf{A}_{22}\}^{-1} \{\mathbf{B}_{12}\} \{\mathbf{p}\}$$

і підставимо отриману рівність в співвідношення (3.14). Знайдемо

$$\left[(2\pi \{\mathbf{I}\} + \{\mathbf{B}_{11}\}) + \{\mathbf{A}_{21}\} \{\mathbf{A}_{22}\}^{-1} \{\mathbf{B}_{12}\} \right] \{\mathbf{p}\} = \rho_l \left(\{\mathbf{A}_{11}\} + \{\mathbf{A}_{21}\} \{\mathbf{A}_{22}\}^{-1} \{\mathbf{A}_{12}\} \right) \{\mathbf{u}\}.$$

Введемо позначення

$$\{\mathbf{G}\} = \left[(2\pi \{\mathbf{I}\} + \{\mathbf{B}_{11}\}) + \{\mathbf{A}_{21}\} \{\mathbf{A}_{22}\}^{-1} \{\mathbf{B}_{12}\} \right]^{-1} \left(\{\mathbf{A}_{11}\} + \{\mathbf{A}_{21}\} \{\mathbf{A}_{22}\}^{-1} \{\mathbf{A}_{12}\} \right) \quad (3.16)$$

та отримаємо

$$\{\mathbf{p}\} = \rho_l \{\mathbf{G}\}\{\mathbf{u}\}.$$

З використанням першої за рівностей в (3.11) знаходимо вираз для тиску рідини на змочені поверхні елементу конструкції

$$\{\tilde{\mathbf{f}}_{pr}\} = -\rho_l [\mathbf{H}]\{\ddot{\mathbf{c}}\}, \quad [\mathbf{H}] = \{\mathbf{G}\mathbf{u}_k, \mathbf{u}_l\},$$

де матриця \mathbf{G} визначається формулою (3.16).

4 Побудова базисних функцій – форм коливань круглої пластинки без врахування приєднаних мас рідини

Як приклад числової реалізації запропонованого підходу розглянемо задачу визначення частот та форм круглої пластинки, зануреної в рідину.

Розглянуто кругову пружну пластинку радіуса R . Нехай $w(x, y, t)$ - прогин пластини, ρ_p - густина матеріалу пластини, $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ - циліндрична жорсткість. Розглянуті вільні коливання круглої пластинки в двох випадках граничних умов, а саме: жорсткого закріплення та шарнірного обпирання.

Умови жорсткого закріплення мають вигляд [17]

$$w|_{\rho=R} = 0, \quad \left. \frac{dw}{dr} \right|_{\rho=R} = 0. \quad (4.1)$$

Умови шарнірного обпирання є такими:

$$w|_{\rho=R} = 0, \quad M|_{\rho=R} = 0, \quad (4.2)$$

де M – момент згину [17].

Розглянуто кругову пластинку за такими параметрами: модуль пружності $E = 2.06 \cdot 10^8$ кПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0.3$, густина матеріалу $\rho = 7850$ кг/м³, товщина пластинки $h = 0.01$ м, радіус пластинки $R = 1.0$ м. Пластинка розглядалась за різні умови закріплення (4.1) та (4.2).

Частоти та форми коливань пластинки визначені за допомогою методу скінченних елементів.

Використовувались скінченні елементи Shell181, використовувався програмний комплекс ANSYS. Обиралась різна кількість скінченних елементів. На рис. 4.1 зображено скінченно-елементну сітку.

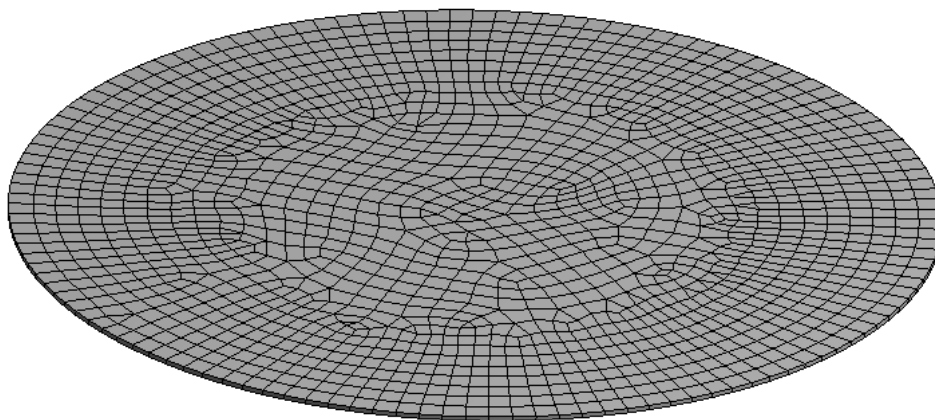


Рисунок 4.1. Скінченно-елементна сітка

В таблиці 4.1 наведені дані щодо впливу кількості елементів та їх розмірів на точність результатів обчислення частот шарнірно-обпертої пластинки.

Табл.4.1. Частоти коливань пластинки в залежності від кількості елементів, Гц

Розмір, мм	110	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
Частота\Кількість	352	371	458	584	804	1021	1520	2374	4163	9285	3590 2
1	25.40	25.41	25.36	25.32	25.278	25.27	25.2 4	25.2 3	25.2 1	25.20	25.20
2	53.51 6	53.470	53.24 1	53.043	52.880	52.80	52.6 8	52.5 9	52.5 2	52.46	52.44
3	53.61 4	53.574	53.27 7	53.092	52.902	52.81	52.6 9	52.5 9	52.5 2	52.46	52.44
4	88.62 0	88.589	87.93 2	87.438	87.006	86.83	86.5 8	86.3 4	86.1 9	86.06	86.00
5	88.84	88.790	88.19	87.639	87.127	86.96	86.6 3	86.3 9	86.2 1	86.08	86.00
6	102.6	102.22	101.3	100.61 0	99.868	99.44	99.0	98.6 8	98.3 8	98.19	98.07
Похибка макс, %		0.382	0.868	0.726	0.743	0.430	0.42 3	0.34 6	0.29 9	0.198	0.122

Аналогічні результати отримані й при аналізі пластинки за умови жорсткого обпирання В таблиці 4.2 наведені частоти коливань круглих пластин.

Табл.4.2. Частоти коливань круглих пластин за різні умови закріплення, Гц

номер частоти t	жорстке закріплення		шарнірне обпирання	
	аналітичний розв'язок	числовий розв'язок	аналітичний розв'язок	числовий розв'язок
1	25.2047	25.20	100.8186992	100.74
2,3	52.4540	52.44	209.8161805	209.52
4,5	86.0492	86.00	344.1970592	343.37
6	98.1241	98.07	392.4964410	391.67

Розрахунки довели, що результати, отримані запропонованим методом, гарно корелюють з аналітичним розв'язком [17].

На рис. 4.2 показані перші форми коливань жорстко-закріпленої пластинки

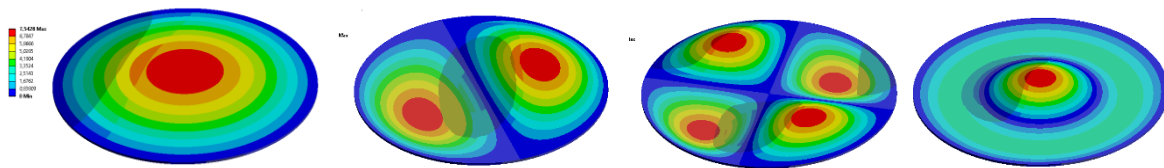


Рис. 4.2 Форми коливань круглої пластинки

Зробимо таке зауваження. Форми коливань круглої пластинки можуть бути зображені у вигляді

$$u_{nm}(\rho, \theta) = w_{nm}(\rho) \cos n\theta,$$

де n – кількість вузлових діаметрів, m – номер форми коливань, що відповідає n -тій гармоніці.

5 Числове розв'язання гіперсингулярного рівняння

Для знаходження матриці приєднаних мас проведено числове розв'язання гіперсингулярного інтегрального рівняння (3.4). Це рівняння було зведено до одновимірного гіперсингулярного рівняння у вигляді

$$\frac{1}{\pi} \int_0^R \Gamma_{nm}(\rho) \frac{\rho E_n(k) d\rho}{(\rho + \rho_0)(\rho - \rho_0)^2} = -w_{nm}(\rho_0), \quad (5.1)$$

де $E_n(k) = (-1)^n (1 - 4n^2) \int_0^{\pi/2} \cos 2n\psi \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \psi} d\psi$, $k'^2 = 1 - k^2$ - узагальнений еліптичний інтеграл другого роду [18];

$w_m(\rho)$ - форми вільних коливань, отримані вище.

Числові розв'язки рівняння (5.1) із заданими правими частинами отримані за допомогою методу, розробленого в [19,20].

На рис. 5.1 зображені функції $w_m(\rho)$ та відповідні їм $\Gamma_m(\rho)$, $m = 0,1,2$, що є розв'язками гіперсингулярних інтегральних рівнянь (5.1).

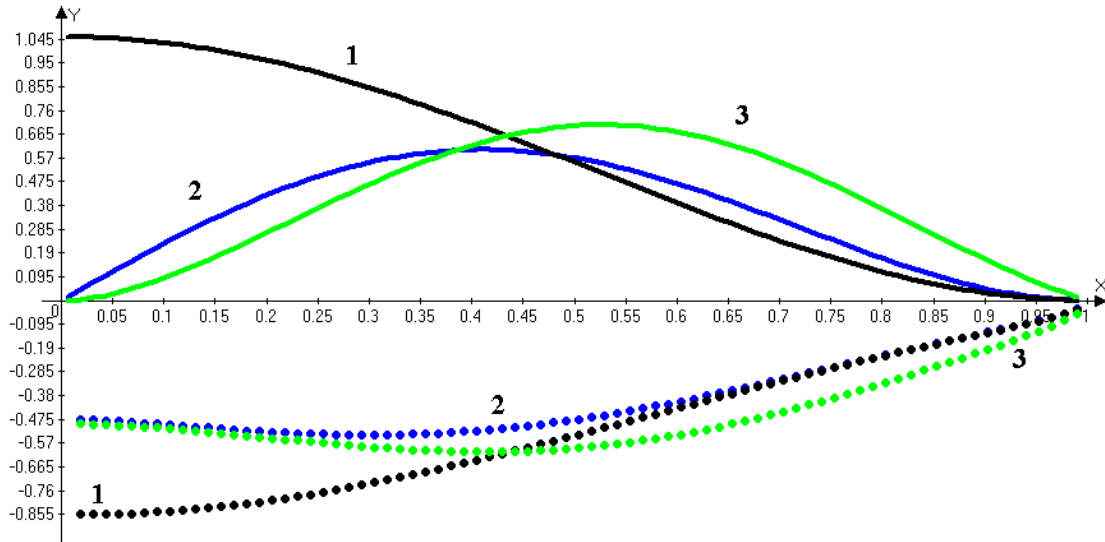


Рис. 5.1 Форми коливань та розв'язки гіперсингулярних рівнянь

Тут цифри 1-3 відповідають значенням $m = 0,1,2$, штрихові лінії зображають праві частини $w_m(\rho)$, а пунктирні відповідають функціям $\Gamma_m(\rho)$, $m = 0,1,2$. Бачимо, що згідно з властивостями гіперсингулярного оператора, функції $\Gamma_m(\rho)$ відновлюють характер функцій $w_m(\rho)$.

Після отримання розв'язків гіперсингулярних рівнянь переходимо до побудови матриці приєднаних мас.

6 Вільні коливання круглої пластинки з урахуванням приєднаних мас рідини

Оскільки попередній аналіз виявив, що найнижчі частоти відповідають формам коливань $w_{01}, w_{02}, w_{11}, w_{21}$ «сухої» пластинки, то форми коливань пластинки з урахуванням приєднаних мас рідини зобразимо у вигляді [18,21]

$$w(\rho, \theta, t) = c_1(t)w_{01}(\rho) + c_2(t)w_{11}(\rho)\cos\theta + c_3(t)w_{11}(\rho)\sin\theta + c_4(t)w_{21}(\rho)\cos 2\theta + c_5(t)w_{21}(\rho)\sin 2\theta.$$

Згідно з властивостями оператора (5.1), [15] та формулою (3.5) маємо аналогічне зображення для густини потенціалу подвійного шару

$$\Gamma(\rho, \theta, t) = \ddot{c}_1(t)\Gamma_{01}(\rho) + \ddot{c}_2(t)\Gamma_{11}(\rho)\cos\theta + \ddot{c}_3(t)\Gamma_{11}(\rho)\sin\theta + \ddot{c}_4(t)\Gamma_{21}(\rho)\cos 2\theta + \ddot{c}_5(t)\Gamma_{21}(\rho)\sin 2\theta.$$

З отриманих зображень для форм коливань круглої пластинки та відповідних густин бачимо, що внаслідок ортогональності будемо мати лише діагональні ненульові значення матриці приєднаних мас. А саме, після розв'язку гіперсингулярного рівняння (5.1), для побудови матриці приєднаних мас круглої пластинки в рідині необхідно обчислити лише значення скалярних добутоків $a_{01} = (w_{01}, \Gamma_{01})$, $a_{11} = 0.5(w_{11}, \Gamma_{11})$, $a_{21} = 0.5(w_{21}, \Gamma_{21})$.

Зауважимо, що як і у випадку «сухої» пластинки, при врахуванні приєднаних мас рідини наявні кратні частоти, що відповідають формам $w_{11}(\rho)\cos\theta$, $w_{11}(\rho)\sin\theta$ та $w_{21}(\rho)\cos 2\theta$, $w_{21}(\rho)\sin 2\theta$.

В результаті обчислень знайдено $a_{01} = 0.09492724$, $a_{11} = 0.03145319$, $a_{21} = 0.04968878$.

В таблиці 6.1 подані значення частот для вказаних форм коливань для «сухої» пластинки Ω_{i1} та пластинки, зануреної в рідину ω_{i1} , за умови жорсткого закріплення.

Таблиця 6.1 Частоти коливань круглої пластинки, Гц

i	0	1	2
Ω_{i1}	25.20	52.44	86.00
ω_{i1}	7.241	12.69	16.80

Зазначимо, що форми коливань пластики, що занурена в рідину, практично збігаються з формами вільних коливань «сухої» пластинки. Врахування наявності рідкого середовища приводить до суттєвого зменшення частот вільних коливань.

7 Висновки

Побудовано метод розв'язання задачі визначення частот і форм коливань елементів конструкцій при однобічному та двобічному контакті з рідиною. З використанням методів зважених нев'язок та заданих форм задачі, що розглядаються, зведено до систем звичайних диференціальних рівнянь другого порядку. При вивченні вільних коливань враховується відповідна залежність невідомих коефіцієнтів від часу, і задачі зводяться до проблем власних значень. Використано поєднання методів скінченних та граничних елементів. Методи скінченних елементів використовуються при пошуку частот і форм вільних коливань елементів конструкцій, що не взаємодіють з рідиною. Це дає змогу використання спеціальних програмних комплексів, що дозволяє дослідити елементи конструкцій складної просторової форми. Для визначення тиску рідини використовуються методи теорії потенціалу, що має суттєві переваги у порівнянні з іншими методами, оскільки вимірність задачі зменшується на одиницю. Проведено тестування алгоритму та методів на прикладі круглої пластинки, зануреної в рідину, що довело вірогідність та ефективність запропонованого підходу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Еселева Е.В. Собственные колебания сосудов высокого давления при взаимодействии с жидкостью / Е.В. Еселева, В.И. Гнитко, Е.А. Стрельникова // *Пробл. машиностроения*. – 2006. Т. 9. – №1, – С.105 - 118. <http://journals.uran.ua/jme/issue/archive>
2. Medvedovskaya T. Free Hydroelastic Vibrations of Hydroturbine Head Covers / Т. Medvedovskaya, Е. Strelnikova, К. Medvedyeva // *Intern. J. Eng. and Advanced Research Technology (IJEART)*. – 2015. – Vol. 1, No 1. – P. 45 - 50. – DOI 10.13140/RG.2.1.3527.4961 <https://www.researchgate.net/publication/282868308>
3. 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
4. Gnitko, V., Naumenko, V., Rozova, L., Strelnikova, E. Multi-domain boundary element method for liquid sloshing analysis of tanks with baffles. *Journal of Basic and Applied Research International*, 17(1), pp.75-87, 2016 <https://www.researchgate.net/publication/301655238>
5. Degtyarev, K., Glushich, P., Gnitko, V., Strelnikova, E. Numerical Simulation of Free Liquid-Induced Vibrations in Elastic Shells. // *International Journal of Modern Physics and Applications*. Vol. 1, No. 4, pp. 159-168, 2015. DOI: 10.13140/RG.2.1.1857.5209 <https://www.researchgate.net/publication/280728146>
6. 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>
7. Ганчин Е.В., Ржевская И.Е., Стрельникова Е.А. Исследование динамических характеристик лопастей рабочих колес поворотного-лопастных гидротурбин при взаимодействии с жидкостью. *Вісник Харківського національного університету*, 2009. – № 847. – С. 79-86. <http://mia.univer.kharkov.ua/11/30078.pdf>
8. 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>
9. Ишмуратов Ф.З. Применение полиномиального метода Рунге для расчета характеристик динамической аэроупругости с учетом гироскопических сил / Ишмуратов Ф.З., Кузнецов А.Г., Мосунов В.А. // *Ученые записки ЦАГИ*, 2017. Т.48. – №6, – С. 64-74. http://www.tsagi.ru/institute/publications/memoirs/archive_annotations/.
10. Стрельникова Е. А. Гиперсингулярные интегральные уравнения в двумерных краевых задачах для уравнения Лапласа и уравнений Ламе // *Доп. НАН України*. 2001. – №3. – С. 27-31 <https://www.dopovidi-nanu.org.ua/uk/archive>

11. Гандель Ю.В. Введение в методы вычисления сингулярных и гиперсингулярных интегралов. – Харьков: Изд. Харьк. национального ун-та им. В.Н. Каразина, 2000. – 92 с. <http://ekhnuir.univer.kharkov.ua/handle/123456789/247>
12. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов – М.: Мир, 1979. – 392 С. <https://studizba.com/files/show/djvu/1936-1-segerlind-1--primeneniye-metoda.html>
13. Brebbia, C.A, Telles, J.C.F & Wrobel, L.C., Boundary element techniques: theory and applications in engineering. Springer-Verlag: Berlin and New York, 1984. <https://studizba.com/files/show/djvu/1932-1-brebbiya-k-telles-zh-vroubel-1--metody.html>
14. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Том 1 М.: Наука, 1970., 492 с. <http://lib.brsu.by/sites/default/files/books>
15. Кантор Б.Я. Гиперсингулярные интегральные уравнения в задачах механики сплошной среды / Б.Я. Кантор, Е.А. Стрельникова. – Харьков: Новое слово, 2005. – 252 с. <http://mia.univer.kharkov.ua/11/30090.pdf>
16. Гюнтер Н.М. Теория потенциала и ее применение к основным задачам математической физики. –М.: Гостехтеориздат, 1953. – 416 с. http://publ.lib.ru/ARCHIVES/G/GYUNTER_Nikolay_Maksimovich/Gyunter_N.M.html#0003
17. M. K. Kwak. Axisymmetric vibration of circular plates in contact with fluid. Journal of Sound and Vibration (1991) 146(3), 381-389. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0022460X9190696H>
18. Karaiev A., Strelnikova E. Axisymmetric polyharmonic spline approximation in the dual reciprocity method ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, pp. e201800339. DOI: 10.1002/zamm.201800339 URL <https://scholar.google.com/citations?user=5d87MvoAAAAJ&hl=de>
19. Karaiev A. Singular integrals in axisymmetric problems of elastostatics / A. Karaiev, E. Strelnikova //International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing. 2020– Vol. 11, № 1, – 2050003 . DOI: 10.1142/S1793962320500038. URL: <https://www.worldscientific.com/doi/10.1142/S1793962320500038>
20. V. Gnitko, K. Degtyariov, A. Karaiev, and E. Strelnikova, “Multi-domain boundary element method for axisymmetric problems in potential theory and linear isotropic elasticity“ WIT Transactions on Engineering Sciences, Vol. 122, WIT Press, pp.13-25, 2019. DOI: 10.2495/BE410021 <https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-engineering-sciences/122/37070>
21. Strelnikova E., Kriutchenko D., Gnitko V. and Degtyarev K. Boundary element method in nonlinear sloshing analysis for shells of revolution under longitudinal excitations. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2020, Vol. 111, p. 78-87. Available from: doi: 10.1016/jenganabound.2019.10.008 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0955799719306149>

REFERENCES

1. Eseleva E.V., Gnitko V.I., Strelnikova E.A. Natural vibrations of pressure vessels when interacting with liquid. *Problems of Mechanical Engineering*, vol. 9, no 1, pp.105 – 118, 2006. <http://journals.uran.ua/jme/issue/archive> [in Russian]
2. Medvedovskaya T. Free Hydroelastic Vibrations of Hydroturbine Head Covers / T. Medvedovskaya, E. Strelnikova, K. Medvedyeva // *Intern. J. Eng. and Advanced Research Technology (IJEART)*. – 2015. – Vol. 1, No 1. – P. 45 - 50. – DOI 10.13140/RG.2.1.3527.4961 <https://www.researchgate.net/publication/282868308>
3. Sheludko GA, Shupikov OM, Smetankina NV, Ugrimov SV Applied adaptive search.- Kharkiv: Eye http://irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbu/cgiirbis
4. Gnitko, V., Naumenko, V., Rozova, L., Strelnikova, E. Multi-domain boundary element method for liquid sloshing analysis of tanks with baffles. *Journal of Basic and Applied Research International*, 17(1), pp.75-87, 2016 <https://www.researchgate.net/publication/301655238>
5. Degtyarev, K., Glushich, P., Gnitko, V., Strelnikova, E. Numerical Simulation of Free Liquid-Induced Vibrations in Elastic Shells. // *International Journal of Modern Physics and Applications*. Vol. 1, No. 4, pp. 159-168, 2015. DOI: 10.13140/RG.2.1.1857.5209 <https://www.researchgate.net/publication/280728146>

6. 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>
7. Ganchin E.V., Rzhetskaya I.E., Strelnikova E.A. Investigation of the dynamic characteristics of impeller blades of Kaplan hydraulic turbines when interacting with a liquid. *Bulletin of Kharkiv National University*, no. 847, pp.79-86, 2009. URL:
<http://mia.univer.kharkov.ua/11/30078.pdf> [in Russian]
8. 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]
9. Ishmuratov F.Z., Kuznetsov A.G., Mosunov V.A. Application of the Ritz polynomial method for calculating the characteristics of dynamic aeroelasticity taking into account gyroscopic forces. *Uchenye zapiski CAGI*, vol. 48, no. 6, pp.64 – 74, 2017. URL:
http://www.tsagi.ru/institute/publications/memoirs/archive_annotations/ [in Russian]
10. Strelnikova E.A., Hypersingular integral equations in two-dimensional boundary value problems for the Laplace equation and the Lamé equations, *Dopovidi NAN Ukraini*. no. 3, pp.27-31, 2001.
<https://www.dopovidi-nanu.org.ua/uk/archive>
11. Gandel Yu.V. Introduction to methods for calculating singular and hypersingular integrals. - Kharkov: *Ed. Kharkiv national university*, 92 p., 2010. URL:
<http://ekhnuir.univer.kharkov.ua/handle/123456789/247>
12. Segerlind L. Applied finite element method - M.: Mir- 392 p., 1979. URL:
<https://studizba.com/files/show/djvu/1936-1-segerlind-l--primenenie-metoda.html> [in Russian]
13. Brebbia, C.A., Telles, J.C.F & Wrobel, L.C., Boundary element techniques: theory and applications in engineering. Springer-Verlag: Berlin and New York, 1984.
<https://studizba.com/files/show/djvu/1932-1-brebbiya-k-telles-zh-vroubel-l--metody.html>
14. Sedov L.I. Mechanics of a continuous medium. Volume 1 M.: Nauka, 1970., 492 p.
<http://lib.brsu.by/sites/default/files/books>
15. Kantor B.Ya. Strelnikova E.A. Hypersingular integral equations in problems of continuum mechanics. *Kharkov: Novoe Slovo*, 252 p., 2005. URL: <https://www.twirpx.com/file/1394980/>
16. Gunther N.M. Potential theory and its application to the main problems of mathematical physics. – M.: Gostekhteorizdat, 1953. - 416 p. URL:
http://publ.lib.ru/ARCHIVES/G/GYUNTER_Nikolay_Maksimovich/_Gyunter_N.M..html#0003
17. M. K. Kwak. Axisymmetric vibration of circular plates in contact with fluid. *Journal of Sound and Vibration* (1991) 146(3), 381-389.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0022460X9190696H>
18. Karaiev A., Strelnikova E. Axisymmetric polyharmonic spline approximation in the dual reciprocity method ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, pp. e201800339. DOI: 10.1002/zamm.201800339
URL <https://scholar.google.com/citations?user=5d87MvoAAAAJ&hl=de>
19. Karaiev A. Singular integrals in axisymmetric problems of elastostatics / A. Karaiev, E. Strelnikova // *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*. – 2020– Vol. 11, № 1, – 2050003 . DOI: 10.1142/S1793962320500038. URL:
<https://www.worldscientific.com/doi/10.1142/S1793962320500038>
20. V. Gnitko, K. Degtyariov, A. Karaiev, and E. Strelnikova, “Multi-domain boundary element method for axisymmetric problems in potential theory and linear isotropic elasticity“ *WIT Transactions on Engineering Sciences*, Vol. 122, WIT Press, pp.13-25, 2019. DOI: 10.2495/BE410021
<https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-engineering-sciences/122/37070>
21. Strelnikova E., Kriutchenko D., Gnitko V. and Degtyarev K. Boundary element method in nonlinear sloshing analysis for shells of revolution under longitudinal excitations. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2020, Vol. 111, p. 78-87. Available from: doi: 10.1016/j.enganabound.2019.10.008
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0955799719306149>

УДК 519.6

Система комп'ютерного моделювання нелінійної теплопровідності

І.В. Гарячевська, Д.О. Протектор, Е.О. Усатенко

**Гарячевська Ірина
Василівна**

*к.т.н., доцент; директор навчально-наукового інституту комп'ютерної фізики та енергетики
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
площа Свободи 4, Харків, Україна, 61022
e-mail: i.garyachevskaya@karazin.ua
<https://orcid.org/0000-0002-4630-9519>*

**Протектор Денис
Олегович**

*асистент
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
площа Свободи 4, Харків, Україна, 61022
e-mail: d.protector@karazin.ua
<https://orcid.org/0000-0003-3323-7058>*

**Усатенко Емілія
Олександрівна**

*студент
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
площа Свободи 4, Харків, Україна, 61022
e-mail: emiliya-foxdnep@ukr.net
<https://orcid.org/0000-0002-6500-6775>*

В статті розглядається система комп'ютерного моделювання процесів, які описуються одновимірним нестационарним рівнянням теплопровідності зі степеневу нелінійністю. Розв'язок нелінійного рівняння теплопровідності реалізується за безсітковою схемою, яка заснована на комбінації методу колокації та радіальних базисних функцій. Радіальні базисні функції використовуються для апроксимації розв'язку диференціального рівняння з частинними похідними, а метод колокації застосовується для знаходження невідомих коефіцієнтів. Система комп'ютерного моделювання дозволяє використовувати наступні радіальні базисні функції: Гаусова, мультиквадратична, зворотна квадратична та зворотна мультиквадратична функції. В системі комп'ютерного моделювання передбачено завдання граничних та початкових умов крайової задачі, а також таких параметрів розв'язку як показник степеня у нелінійному рівнянні теплопровідності, коефіцієнт теплопровідності, щільність, питома теплоємність при сталому тиску, розмір області крайової задачі, відстань між інтерполяційними вузлами, часовий інтервал нестационарної крайової задачі, крок за часом, а також параметр форми радіальної базисної функції. Візуалізація наближеного розв'язку одновимірного нестационарного рівняння теплопровідності зі степеневу нелінійністю в системі комп'ютерного моделювання реалізується у вигляді тривимірної поверхні. Система надає можливість візуалізації наближених розв'язків на окремих часових інтервалах у вигляді тривимірних графіків. Результати чисельних розрахунків демонструються на прикладі тестової задачі, що моделює зупинку фронту теплової хвилі в нелінійному рівнянні теплопровідності.

Ключові слова: система комп'ютерного моделювання, нелінійна теплопровідність, радіальні базисні функції, нестационарна крайова задача, безсітковий метод.

Computer Simulation System of Nonlinear Thermal Conductivity

I. Hariachevska, D. Protektor, E. Usatenko

Hariachevska Iryna

*PhD of Technical Sciences, Associate Professor; Head of the Education and Research Institute of Computer Physics and Energy
V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody Sq., Kharkiv, Ukraine,
61022*

Protektor Denys

*Assistant Lecturer
V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody Sq., Kharkiv, Ukraine,
61022*

Usatenko Emiliia

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

The computer simulation system of nonlinear processes described by the one-dimensional nonstationary heat equation with power-law nonlinearity has been examined in the article. The solution of the nonlinear heat equation is realized by a meshless scheme, which is based on combination of the collocation method and radial basis functions. Radial basis functions are used to approximate the solution of a partial differential equation, while the collocation method is used to determine unknown coefficients. The computer simulation system allows us to use the following radial basis functions: Gaussian, multiquadric, inverse quadratic, and inverse multiquadric. The computer simulation system allows setting the initial and boundary conditions of the boundary-value problem. In the computer simulation system, it is possible to set such parameters of the solution as the exponent in the nonlinear heat equation, the coefficient of thermal conductivity, the density, the specific heat at constant pressure, the size of the domain of the boundary-value problem, the distance between interpolation nodes, the time interval of the nonstationary boundary-value problem, the time step, and the shape parameter of the radial basis function. The visualization of an approximate solution of the one-dimensional nonstationary heat equation with power-law nonlinearity is realized in the form of the three-dimensional surface in the computer simulation system. The computer simulation system allows visualization of the solution at chosen time steps as three-dimensional plots. The results of numerical calculations are demonstrated by solving the benchmark problem that simulates the stopping of a heat wave front in a heat equation with power-law nonlinearity.

Keywords: *computer simulation system, nonlinear thermal conductivity, radial basis functions, nonstationary boundary-value problem, meshless method.*

Система компьютерного моделирования нелинейной теплопроводности

**Гарячевская
Ирина Васильевна**

*к.т.н., доцент; директор учебно-научного института компьютерной физики и энергетики
Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,
площадь Свободы 4, Харьков, Украина, 61022*

**Протектор
Денис Олегович**

*ассистент
Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,
площадь Свободы 4, Харьков, Украина, 61022*

**Усатенко
Эмилия
Александровна**

*студент
Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,
площадь Свободы 4, Харьков, Украина, 61022*

В статье рассматривается система компьютерного моделирования процессов, которые описываются одномерным нестационарным уравнением теплопроводности со степенной нелинейностью. Решение нелинейного уравнения теплопроводности реализуется по бессеточной схеме, которая основана на комбинации метода коллокации и радиальных базисных функций. Радиальные базисные функции используются для аппроксимации решения дифференциального уравнения в частных производных, а метод коллокации применяется для нахождения неизвестных коэффициентов. Система компьютерного моделирования позволяет использовать следующие радиальные базисные функции: функция Гаусса, мультиквадратичная, обратная квадратичная и обратная мультиквадратичная функции. В системе компьютерного моделирования предусмотрено задание граничных и начальных условий краевой задачи, а также таких параметров решения как показатель степени в нелинейном уравнении теплопроводности, коэффициент теплопроводности, плотность, удельная теплоемкость при постоянном давлении, размер области краевой задачи, расстояние между интерполяционными узлами, временной интервал нестационарной краевой задачи, шаг по времени, а также параметр формы радиальной базисной функции. Визуализация приближенного решения одномерного нестационарного уравнения теплопроводности со степенной нелинейностью в системе компьютерного моделирования реализуется в виде трехмерной поверхности. Система предоставляет возможность визуализации приближенных решений на отдельных временных интервалах в виде трехмерных графиков. Результаты численных расчетов демонстрируются на примере тестовой задачи, моделирующей остановку фронта тепловой волны в нелинейном уравнении теплопроводности.

Ключевые слова: *система компьютерного моделирования, нелинейная теплопроводность, радиальные базисные функции, нестационарная краевая задача, бессеточный метод.*

1 Вступ

Нелінійні параболічні рівняння другого порядку є основою багатьох математичних моделей, що використовуються у фізиці, механіці, біології, хімії та екології. Наприклад, нелінійне рівняння теплопровідності при певних умовах описує процеси електронної та іонної теплопровідності в плазмі, адіабатичній фільтрації газів і рідин в пористих середовищах, течії крові в кровоносних судинах, дифузії нейтронів і альфа-частинок в реакторних матеріалах, хімічної кінетики та біологічної активності.

Нелінійні процеси теплопровідності вперше вивчалися в роботі Я. Б. Зельдовича та А. С. Компанійця [1]. Авторами розглянуто процес поширення тепла за допомогою механізму променевої теплопровідності з миттєвого точкового джерела для плоскої задачі. Розв'язок цієї задачі було отримано в аналітичному вигляді.

Серед рівнянь зазначеного типу особливо часто зустрічається рівняння теплопровідності зі степеневою нелінійністю. Його універсальний характер дає підставу стверджувати, що чисельний розв'язок крайових задач, які описуються рівнянням теплопровідності зі степеневою нелінійністю залишається й понині досить актуальною темою дослідження.

Останнє десятиліття ознаменувалося значним інтересом до безсіткових методів, заснованих на використанні радіальних базисних функцій. На відміну від методу скінченних елементів, безсіткові методи не потребують побудови інтерполяційної сітки всередині області крайових задач, що робить їх обчислювально ефективнішими за скінченно-різницеві методи.

Едвард Канса [2] запропонував без сітковий метод, який був заснований комбінації методу колокації та радіальних базисних функцій. В цьому методі, радіальні базисні функції використовуються для апроксимації розв'язку диференціального рівняння з частинними похідними, а метод колокації застосовується для знаходження невідомих коефіцієнтів. Дана схема була успішно застосована для розв'язку нелінійних крайових задач, зокрема для чисельного розв'язку рівняння Бюргерса [3] та рівняння Кортевега-де Фріза сьомого порядку [4].

Метою дослідження є розробка та програмна реалізація системи комп'ютерного моделювання процесів, які описуються одновимірним нестационарним рівнянням теплопровідності зі степеневою нелінійністю. Чисельний розв'язок в системі комп'ютерного моделювання реалізується за безсітковою схемою з використанням радіальних базисних функцій. Для апроксимації розв'язку в системі використовуються Гаусова, мультикватратична, зворотна кватратична та зворотна мультикватратична радіальні базисні функції.

2 Ітераційна схема

Розглянемо одновимірне нестационарне рівняння теплопровідності зі степеневою нелінійністю:

$$\rho c_p \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = k \frac{\partial}{\partial x} \left(u^\sigma(x,t) \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \right) \quad (1)$$

де $x \in [a,b]$, $t \in [0,T]$, ρ – щільність, c_p – питома теплоємність при сталому тиску, k – коефіцієнт теплопровідності, $\sigma > 0$ – відомий коефіцієнт.

Початкові умови мають наступний вид:

$$u(x,0) = u_0(x), \quad x \in [a,b] \quad (2)$$

Граничні умови Діріхле задаються у вигляді:

$$\begin{cases} u(a,t) = g_1(t) \\ u(b,t) = g_2(t) \end{cases}, \quad t \in [0,T] \quad (3)$$

Зробивши заміну $u(x,t) = v^{1/\sigma}(x,t)$ в рівнянні (1), отримаємо рівняння

$$\rho c_p \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} = \frac{k}{\sigma} \left(\frac{\partial v(x,t)}{\partial x} \right)^2 + kv(x,t) \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} \quad (4)$$

з початковими

$$v(x,0) = v_0(x), \quad x \in [a,b] \quad (5)$$

та граничними умовами

$$\begin{cases} v(a,t) = h_1(t) \\ v(b,t) = h_2(t) \end{cases}, \quad t \in [0,T] \quad (6)$$

Застосуємо θ -схему для дискретизації рівняння (4) за часом, отримаємо:

$$v(x,t) \approx \theta v^{n+1} + (1-\theta)v^n \quad (7)$$

$$\nabla v(x,t) \approx \theta \nabla v^{n+1} + (1-\theta)\nabla v^n \quad (8)$$

$$\Delta v(x, t) \approx \theta \Delta v^{n+1} + (1 - \theta) \Delta v^n \quad (9)$$

$$\frac{\partial v(x, t)}{\partial t} \approx \frac{v^{n+1} - v^n}{\tau} \quad (10)$$

де $v^n = v(x, t^n)$, $t^n = n\tau$, τ – крок за часом, n – номер ітерації, $0 \leq \theta \leq 1$ – ваговий коефіцієнт,

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x}, \quad \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2}.$$

Підставимо рівняння (7)-(10) в рівняння (4):

$$\rho c_p \frac{v^{n+1} - v^n}{\tau} = \frac{k}{\sigma} \left(\theta \nabla v^{n+1} + (1 - \theta) \nabla v^n \right)^2 + k \left(\theta v^{n+1} \Delta v^{n+1} + (1 - \theta) v^n \Delta v^n \right) \quad (11)$$

Поклавши $\theta = 0$ в рівнянні (11), отримуємо:

$$\rho c_p \frac{v^{n+1} - v^n}{\tau} = \frac{k}{\sigma} \left(\nabla v^n \right)^2 + k v^n \Delta v^n \quad (12)$$

Перепишемо рівняння (12) в наступній формі:

$$v^{n+1} = v^n + \frac{\tau k}{\rho c_p} \left(\frac{1}{\sigma} \left(\nabla v^n \right)^2 + v^n \Delta v^n \right) \quad (13)$$

Розподілимо рівномірно $N - 2$ точки колокації $\{x_i\}_2^{N-1}$ всередині області (a, b) та дві точки на кордоні області $x_1 = a$ і $x_n = b$. Будемо шукати наближений розв'язок рівняння (4) за допомогою лінійної комбінації радіальних базисних функцій $\varphi(r_{ij})$:

$$v^n(x_i) \approx \sum_{j=1}^N \alpha_j^n \varphi(r_{ij}) \quad (14)$$

де $r_{ij} = \|x_i - x_j\|$ – евклідова відстань між вузлами, α_j^n – невідомі коефіцієнти, які потребують визначення.

Підставимо рівняння (14) в рівняння (13), та отримуємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь для точок всередині області

$$\sum_{j=1}^N \alpha_j^{n+1} \varphi(r_{ij}) = \sum_{j=1}^N \alpha_j^n \varphi(r_{ij}) + \frac{\tau k}{\rho c_p} \left[\frac{1}{\sigma} \left(\sum_{j=1}^N \alpha_j^n \varphi'(r_{ij}) \right)^2 + \sum_{j=1}^N \alpha_j^n \varphi(r_{ij}) \sum_{j=1}^N \alpha_j^n \varphi''(r_{ij}) \right] \quad (15)$$

та систему для точок на границях області

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^N \alpha_j^{n+1} \varphi(r_{1j}) = h_1(t) \\ \sum_{j=1}^N \alpha_j^{n+1} \varphi(r_{Nj}) = h_2(t) \end{cases} \quad (16)$$

В даній роботі використовуються наступні радіальні базисні функції:

$$\varphi(r_{ij}) = e^{-(cr_{ij})^2} \text{ – Гаусова функція}$$

$$\varphi(r_{ij}) = \sqrt{r_{ij}^2 + c^2} \text{ – мультикватрична функція}$$

$$\varphi(r_{ij}) = \frac{1}{r_{ij}^2 + c^2} \text{ – зворотна квадратична функція}$$

$$\varphi(r_{ij}) = \frac{1}{\sqrt{(r_{ij}^2 + c^2)^3}} \text{ – зворотна мультикватрична функція}$$

де $c \neq 0$ – параметр форми радіальної базисної функції.

Будемо розв'язувати рівняння (13) крок за кроком, починаючи з початкових умов (5). Запишемо рівняння (14) разом з граничними умовами (6) в матричній формі:

$$[v]^n = A[\alpha]^n \quad (17)$$

де $[v]^n = [v_1^n, v_2^n, \dots, v_N^n]^T$, $[\alpha]^n = [\alpha_1^n, \alpha_2^n, \dots, \alpha_N^n]^T$ і $A = [\varphi(r_{ij})]$, $1 \leq i, j \leq N$.

Розділимо матрицю A в рівнянні (17) на дві матриці A_d і A_b , які відповідають внутрішнім і граничним точкам області крайової задачі:

$$A = A_d + A_b \quad (18)$$

де

$$A_d = \begin{cases} \varphi(r_{ij}), & \text{якщо } 2 \leq i \leq N-1, 1 \leq j \leq N \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}$$

$$A_b = \begin{cases} \varphi(r_{ij}), & \text{якщо } i = 1, N, 1 \leq j \leq N \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}$$

Запишемо разом рівняння (15) і (16), з урахуванням рівняння (18), в матричній формі:

$$A[\alpha]^{n+1} = A_d[\alpha]^n + \frac{\tau k}{\rho c_p} \left(\frac{1}{\sigma} (B_d[\alpha]^n) \cdot (B_d[\alpha]^n) + (A_d[\alpha]^n) \cdot (C_d[\alpha]^n) \right) + [H]^{n+1} \quad (19)$$

де

$$B_d = \begin{cases} \varphi'(r_{ij}), & \text{якщо } 2 \leq i \leq N-1, 1 \leq j \leq N \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}$$

$$C_d = \begin{cases} \varphi''(r_{ij}), & \text{якщо } 2 \leq i \leq N-1, 1 \leq j \leq N \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}$$

$[H]^{n+1} = \left[h_1^{n+1}, \underbrace{0, 0, \dots, 0}_{N-2}, h_2^{n+2} \right]^T$, “ \cdot ” – покомпонентний добуток двох векторів.

Позначимо праву частину в рівнянні (19) наступним чином:

$$M = A_d[\alpha]^n + \frac{\tau k}{\rho c_p} \left(\frac{1}{\sigma} (B_d[\alpha]^n) \cdot (B_d[\alpha]^n) + (A_d[\alpha]^n) \cdot (C_d[\alpha]^n) \right) + [H]^{n+1} \quad (20)$$

Тоді рівняння (19) можна переписати у вигляді

$$A[\alpha]^{n+1} = M \quad (21)$$

Рівняння (21) може бути розв'язане відносно невідомих коефіцієнтів $[\alpha]^{n+1}$ наступним чином:

$$[\alpha]^{n+1} = A^{-1}M \quad (22)$$

Наближений розв'язок рівняння (4) на $n+1$ кроці може бути знайдений за формулою:

$$[v]^{n+1} = A[\alpha]^{n+1} \quad (23)$$

Наведений ітераційний метод було програмно реалізовано в створеній системі комп'ютерного моделювання.

3 Опис системи комп'ютерного моделювання

Інтерфейс системи комп'ютерного моделювання процесів, які описуються одновимірним нестационарним рівнянням теплопровідності зі степеневою нелінійністю представлено на Рис. 1.

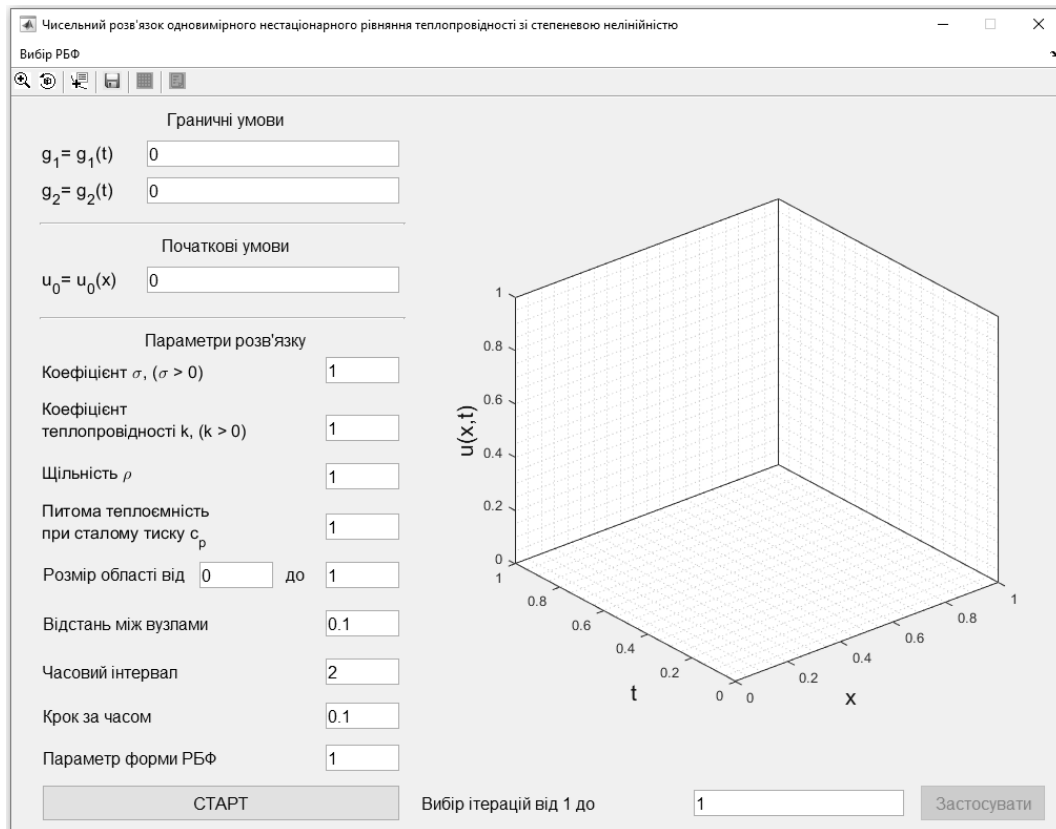


Рис. 1. Інтерфейс системи комп'ютерного моделювання

На Рис. 2 зображена панель інструментів, яка розташована в верхній частині головного вікна програми.

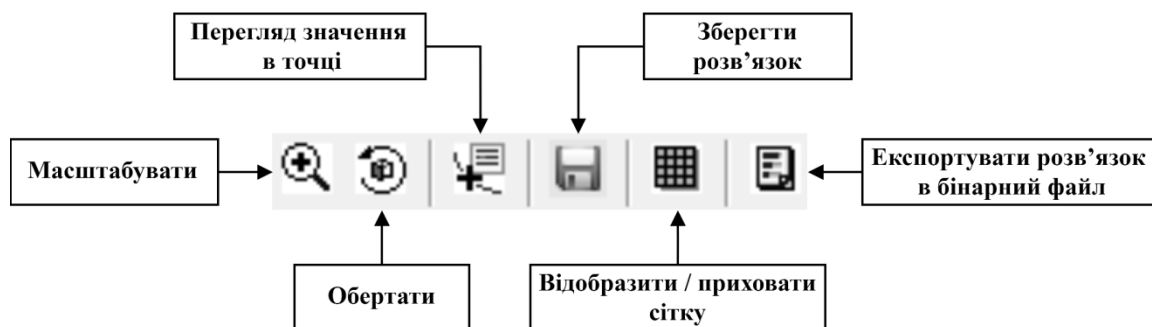


Рис. 2. Панель інструментів

На панелі інструментів розміщені кнопки, які дозволяють масштабувати графічну область та обертати її в тривимірному просторі, зберігати наближений розв'язок в растрові та векторний графічні формати, відображати числове значення отриманого розв'язку в окремих точках, відображати та приховувати сітку на тривимірній поверхні, а також експортувати розв'язок в бінарний файл.

В системі комп'ютерного моделювання передбачено завдання граничних та початкових умов крайової задачі. Початкові умови можуть набувати константного значення, або бути функцією, що залежить від координат. Граничні умови задаються в числовому виді, або як функція, що залежить від часу.

Система комп'ютерного моделювання дає можливість налаштовувати наступні параметри розв'язку крайової задачі: показник степеня у нелінійному рівнянні теплопровідності, коефіцієнт теплопровідності, щільність, питома теплоємність при сталому тиску, розмір області крайової задачі, відстань між інтерполяційними вузлами, часовий інтервал нестационарної крайової задачі, крок за часом, а також параметр форми радіальної базисної функції.

Розв'язок одновимірного нестационарного рівняння теплопровідності зі степеневою нелінійністю в системі комп'ютерного моделювання візуалізується у вигляді тривимірної поверхні (Рис. 3).

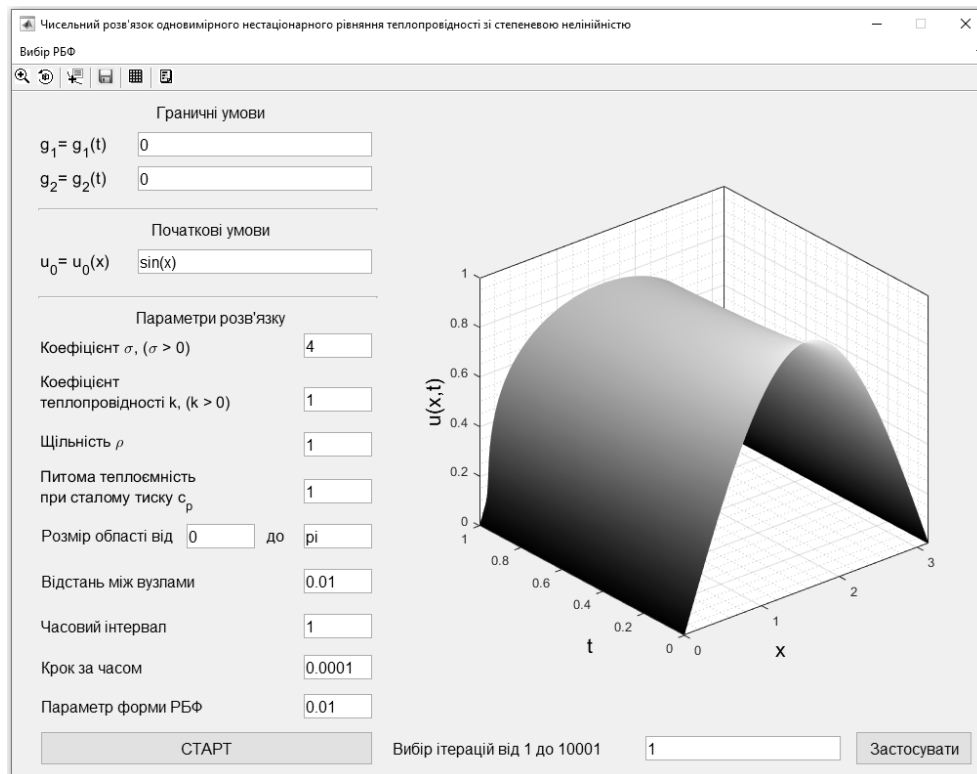


Рис. 3. Візуалізація наближеного розв'язку у вигляді тривимірної поверхні

Система комп'ютерного моделювання дозволяє візуалізувати отриманий наближений розв'язок на окремих проміжках часу у вигляді тривимірних графіків (Рис. 4).

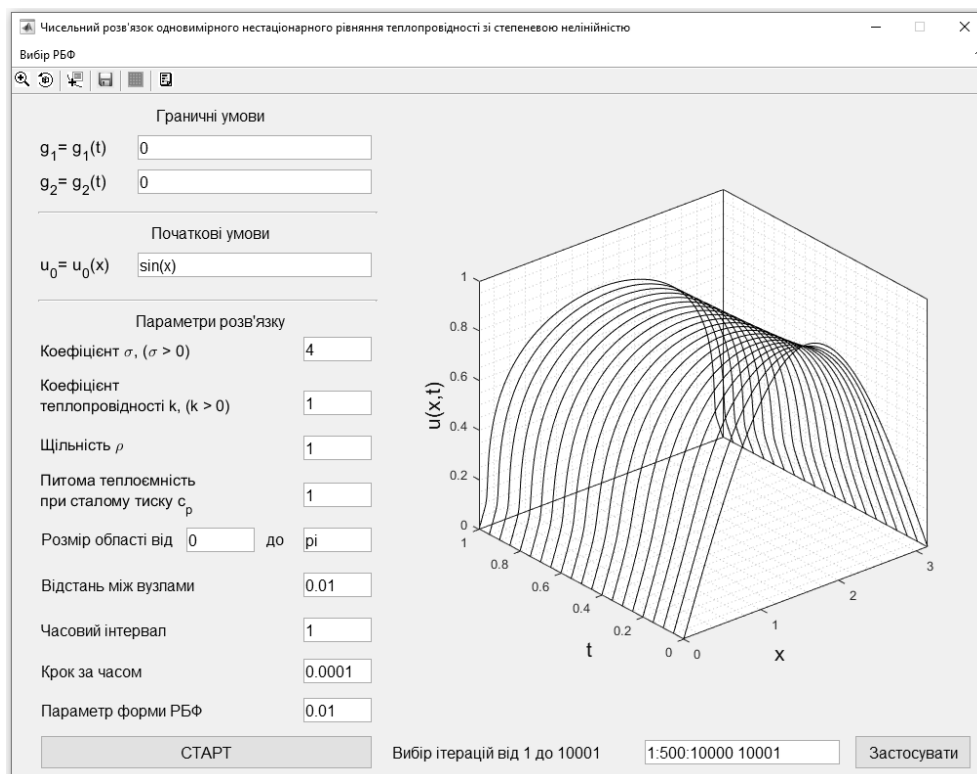


Рис. 4. Візуалізація наближеного розв'язку на окремих проміжках часу

4 Числові результати

В цьому розділі демонструються результати чисельних розрахунків на прикладі тестової задачі, що моделює зупинку фронту теплової хвилі в нелінійному рівнянні теплопровідності.

Постановка задачі

Розглянемо одновимірне нестационарне рівняння теплопровідності зі степеневою нелінійністю:

$$\rho c_p \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = k \frac{\partial}{\partial x} \left(u^\sigma(x,t) \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \right) \quad (24)$$

де $x \in [0,1]$, $d_x = 0.01$, $\tau = 0.0001$, $\rho = 1$, $c_p = 1$, $k = 1$, $\sigma = 4.5$.

Початкові умови задані наступним рівнянням:

$$u(x,0) = \frac{1}{2} \left(4 \left| x - \frac{1}{4} \right| - 8 \left| x - \frac{1}{2} \right| + 4 \left| x - \frac{3}{4} \right| \right) \quad (25)$$

Граничні умови мають вид:

$$\begin{cases} u(a,t) = 0 \\ u(b,t) = 0 \end{cases} \quad (26)$$

На Рис. 5 представлена візуалізація наближеного розв'язку даної крайової задачі.

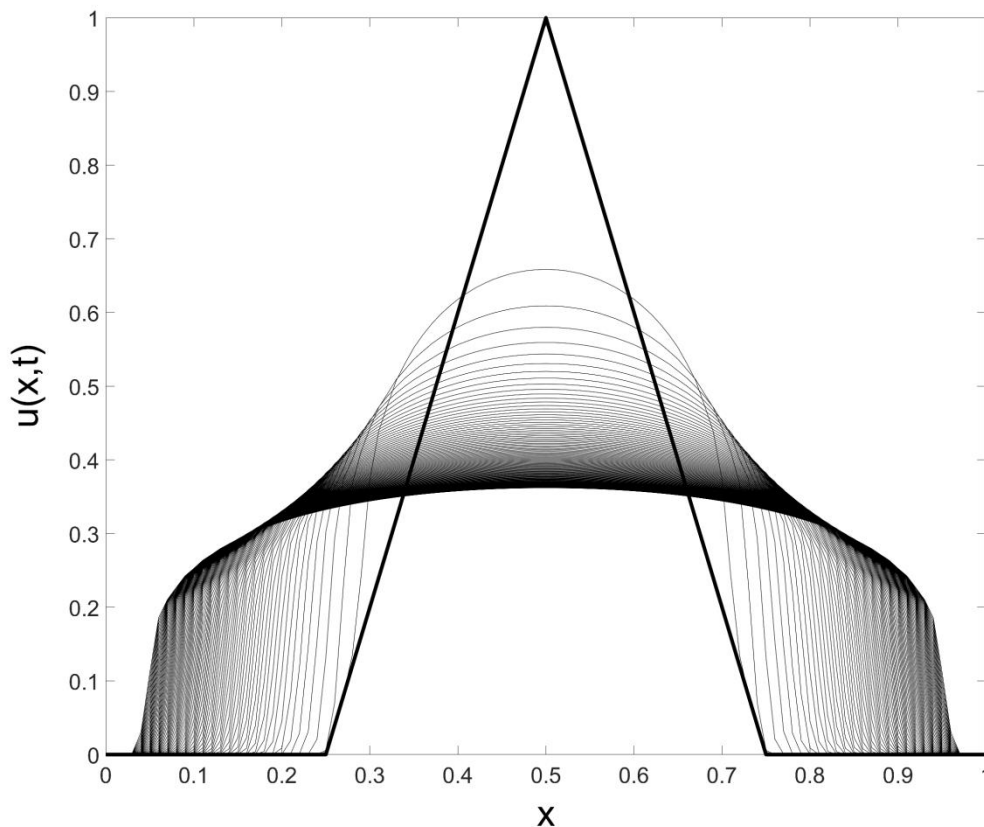


Рис. 5. Візуалізація наближеного розв'язку тестової задачі

Дана задача моделює процес зупинки фронту теплової хвилі в нелінійному рівнянні теплопровідності. Жирною лінією на Рис. 5 зображено початковий розподіл температури.

5 Висновки

Розроблена система комп'ютерного моделювання процесів, які описуються одновимірним нестационарним рівнянням теплопровідності зі степеневою нелінійністю. Розв'язок нелінійного рівняння теплопровідності реалізується за безсітковою схемою, яка заснована на комбінації методу колокації та радіальних базисних функцій. В системі комп'ютерного моделювання

передбачено завдання граничних та початкових умов, а також низки параметрів розв'язку крайової задачі. Наближений розв'язок нестационарної крайової задачі візуалізується у вигляді тривимірної поверхні, або у вигляді тривимірних графіків. Результати чисельних розрахунків продемонстровані на прикладі тестової задачі, що моделює зупинку фронту теплової хвилі в нелінійному рівнянні теплопровідності. Отриманий результат чисельний розрахунків корелюється з експериментальними даними.

ЛІТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б., Компанец А. С. К теории распространения тепла при теплопроводности, зависящей от температуры. *Сборник посвященный 70 -летию академика А.Ф. Иоффе*. 1950. С. 61–71. URL: <http://books.e-heritage.ru/book/10081565> (дата звернення: 25.02.2021).
2. Kansa E. J. Multiquadrics – A scattered data approximation scheme with applications to computational fluid-dynamics – I surface approximations and partial derivative estimates. *Computers & Mathematics with Applications*. 1990. Vol. 19. P. 127-145. DOI: 10.1016/0898-1221(90)90270-T. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/089812219090270T?via%3Dihub> (Last accessed: 25.02.2021).
3. Гарячевська І. В., Протектор Д. О. Система комп'ютерного моделювання для числового вирішення одновимірного нестационарного рівняння Бюргерса. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»*. 2019. Вип. 43. С. 11–19. DOI: 10.26565/2304-6201-2019-43-02. URL: <https://periodicals.karazin.ua/mia/article/view/14807/13856> (дата звернення: 25.02.2021).
4. Гарячевська І. В., Протектор Д. О. Безсітковий метод для числового вирішення рівняння Кортевега-де Фріза сьомого порядку. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»*. 2020. Вип. 45. С. 10–20. DOI: 10.26565/2304-6201-2020-45-02. URL: <https://periodicals.karazin.ua/mia/article/view/15819/14634> (дата звернення: 25.02.2021).

REFERENCES

1. Ya. B. Zel'dovich, A. S. Kompaneets, "On the theory of heat propagation with temperature-dependent thermal conductivity". *Collection Devoted to 70th Birthday of Academician A. F. Ioffe*, pp. 61–71, 1950. [in Russian] URL: <http://books.e-heritage.ru/book/10081565> (Last accessed: 25.02.2021).
2. E. J. Kansa, "Multiquadrics – A scattered data approximation scheme with applications to computational fluid-dynamics – I surface approximations and partial derivative estimates". *Computers & Mathematics with Applications*, Vol. 19, pp. 127-145, 1990. DOI: 10.1016/0898-1221(90)90270-T. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/089812219090270T?via%3Dihub> (Last accessed: 25.02.2021).
3. I. V. Garyachevskaya, D. O. Protektor, "Computer modeling system for the numerical solution of the one-dimensional non-stationary Burgers' equation". *Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University, Series «Mathematical Modeling. Information Technology. Automated Control Systems»*, Vol. 43, pp. 11–19, 2019. DOI: 10.26565/2304-6201-2019-43-02. URL: <https://periodicals.karazin.ua/mia/article/view/14807/13856> (Last accessed: 25.02.2021).
4. I. V. Garyachevskaya, D. O. Protektor, "A meshless method for the numerical solution of the seventh-order Korteweg-de Vries equation". *Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University, Series «Mathematical Modeling. Information Technology. Automated Control Systems»*, Vol. 45, pp. 10–20, 2020. DOI: 10.26565/2304-6201-2020-45-02. URL: <https://periodicals.karazin.ua/mia/article/view/15819/14634> (Last accessed: 25.02.2021).

УДК 004.04

Побудова робочих процесів на основі онтологій

Л.С. Глоба, В.В. Гаєвий, А.М. Бакай

**Глоба
Лариса Сергіївна**

д.т.н., професор; завідувачка кафедрою інформаційно-телекомунікаційних систем

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
проспект Перемоги 37, Київ-56, Україна, 03056
e-mail: lgloba@its.kpi.ua;*

<https://orcid.org/0000-0003-3231-3012>

**Гаєвий
Вадим Володимирович**

аспірант

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
проспект Перемоги 37, Київ-56, Україна, 03056
e-mail: vadim.gayevoy@outlook.com*

<https://orcid.org/0000-0001-7855-3957>

**Бакай
Андрій Миколайович**

студент

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
проспект Перемоги 37, Київ-56, Україна, 03056
e-mail: andruha.bakay1997@gmail.com*

Сучасне суспільство є неможливим без цифрової економіки, яка все більше надає значний обсяг послуг, гарантуючи технологічну ефективність та інновації, постійно оновлюючи технології та сервіси, адаптуючи їх до потреб кінцевого користувача, реконфігуруючи складні програмні системи. Все це вимагає постійного реінженірингу бізнес-процесів в предметних областях, а відповідно підвищення рівня їх автоматизації. Разом з тим, ефективних рішень, які б дозволили виконувати автоматизований реінженіринг робочих процесів, на даний момент не існує. У статті представлений підхід до побудови обчислювальних робочих процесів, який заснований на чітко визначених онтологічних моделях предметної області, онтологічній моделі набору правил побудови зв'язків між функціональними сервісами, і онтологічній моделі самих робочих процесів, що динамічно генеруються. Проведено експериментальні дослідження даного підходу та розроблено прототип інструментарію автоматизованої побудови обчислювальних робочих процесів. Застосування запропонованого підходу дозволить підвищити рівень автоматизації побудови обчислювальних робочих процесів, генерувати робочі процеси "на льоту" базуючись на заздалегідь підготовленому пулі функціональних сервісів і обмежень, накладених онтологією предметної області.

Ключові слова: онтологія, обчислювальні робочі процеси, функціональні сервіси, автоматизація робочих процесів.

Development of workflows based on ontologies

Globa Larisa

Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of Information and Telecommunication Systems

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37 Peremohy Ave., Kyiv-56, Ukraine, 03056

e-mail: lgloba@its.kpi.ua;

<https://orcid.org/0000-0003-3231-3012>

Gaievyi Vadym

PhD student

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37 Peremohy Ave., Kyiv-56, Ukraine, 03056

e-mail: vadim.gayevoy@outlook.com

<https://orcid.org/0000-0001-7855-3957>

Bakai Andrii

student

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37 Peremohy Ave., Kyiv-56, Ukraine, 03056
e-mail: andruha.bakay1997@gmail.com*

Modern society is impossible without the digital economy, which ensures an ever-increasing number of services and guarantee technological efficiency and innovation, constantly updating technologies and services, adapting them to user needs, and reconfiguring complex software systems. That requires constant reengineering of the workflows for the subject areas, and, accordingly, an increase in the level of the automation. At the same time, currently there are no efficient solutions for automated reengineering of the workflows. This article presents an approach to the computational creation of the workflows based on well-defined ontological models of the domain, an ontological model of a set of rules for building connections between functional services, and an ontological model of the workflows that are generated dynamically. The research of this approach has been carried out and the prototype of the tools for the automated creation of the computational workflows has been developed. Using the approach proposed will increase the level of automation of the construction of the computational workflows, and allow generating workflows "on the fly" basing on a previously prepared pool of functional services and restrictions imposed by the ontology domain.

Keywords: *ontology, computational workflows, functional services, workflow's automation.*

Построение рабочих процессов на основе онтологий

Глоба

Лариса Сергеевна

д.т.н., профессор; заведующий кафедрой информационно-телекоммуникационных систем

*Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского",
проспект Победы 37, Киев-56, Украина, 0306
e-mail: lgloba@its.kpi.ua;*

<https://orcid.org/0000-0003-3231-3012>

Гаевой

Вадим Владимирович

аспирант,

*Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского",
проспект Победы 37, Киев-56, Украина, 03056*

e-mail: yadim.gayevoy@outlook.com

<https://orcid.org/0000-0001-7855-3957>

Бакай

Андрей Николаевич

студент,

*Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского",
проспект Победы 37, Киев-56, Украина, 03056*

e-mail: andruha.bakay1997@gmail.com

Современное общество невозможно без цифровой экономики, которая все больше оказывает значительный объем услуг, гарантируя технологическую эффективность и инновации, постоянно обновляя технологии и сервисы, адаптируя их к потребностям конечного пользователя, реконфигурируя сложные программные системы. Все это требует постоянного реинжиниринга бизнес-процессов в предметных областях, а соответственно повышения уровня их автоматизации. Вместе с тем, эффективных решений, позволяющих выполнять автоматизированный реинжиниринг рабочих процессов, на данный момент не существует. В статье представлен подход к построению вычислительных рабочих процессов, который основан на четко определенных онтологических моделях предметной области, онтологической модели набора правил построения связей между функциональными сервисами, и онтологической модели самых рабочих процессов, динамически генерируемые. Проведены экспериментальные исследования данного подхода и разработан прототип инструментария автоматизированного построения вычислительных рабочих процессов. Применение предложенного подхода позволит повысить уровень автоматизации построения вычислительных рабочих процессов, генерировать рабочие процессы "на лету" основываясь на заранее подготовленном пуле функциональных сервисов и ограничений, наложенных онтологией предметной области.

Ключевые слова: *онтология, вычислительные рабочие процессы, функциональные сервисы, автоматизация рабочих процессов.*

1 Вступ

Розвиток інформаційних технологій спричиняє трансформацію всіх сфер життєдіяльності суспільства. Сучасне суспільство є неможливим без цифрової економіки, формування якої є в даний час одним з пріоритетних напрямків. Для широкого загалу "цифрова економіка" буде означати новий рівень цифрових сервісів, коли в онлайн переходять оплати комунальних

платежів, покупки і т.п., а для промисловості та бізнесу перехід в цифрову економіку отримав визначення в світі як Industry 4.0 - четверта індустріальна революція.

Сучасне бізнес середовище все більше надає значний обсяг послуг в цифровому просторі, тому телеком-оператори та провайдери онлайн-послуг мають гарантувати технологічну ефективність та інновації, постійно оновлюючи свої технології та послуги, адаптуючи та реконфігуруючи складні програмні системи, які функціонують в глобальному середовищі, надаючи послуги безперервно кінцевим користувачам.

Значну кількість робіт присвячено питанням автоматизації побудови робочих процесів, зокрема роботи [1, 2, 3, 4, 5]

Обчислювальні незалежні робочі процеси розробляють з використанням графічних стандартів, дозволяючи виконувати їх формалізацію з відображенням їх можливих потоків і переходів у схематичному вигляді. Аналіз показав, що на практиці обчислювальні незалежні робочі процеси зазвичай розробляються з використанням графічних позначень засобами, такими як BPMN 2.0, UML AD (UML Діаграма Дій), USLD та інструменти, такі як CA ERwin Process Modeler та Enterprise Architect [6].

Недоліки BPMN 2.0 чітко описані в [7]. Центральний аргумент проти використання регулярного BPMN полягає в тому, що керування ресурсами може бути виражено лише через певні абстракції (актори, ролі тощо) або виконання завдань в діалозі.

Тим не менш, BPMN, забезпечуючи можливість обчислювальної незалежної від обчислювальних робочих процесів трансформації (Business Process Execution Language (BPEL)), широко поширена в промисловості.

Короткий огляд методів та інструментів аналізу робочих процесів показав, що існують два типи аналізу, які враховують обчислювальний процес:

1. Аналіз часу проектування (моделювання та перевірка). Можуть бути використані засоби моделювання Монте-Карло, а також аналіз мереж Петрі, оскільки існують підходи трансформації для BPMN, UML AD, EPC, BPEL до мереж Петрі з їх подальшим аналізом. Діаграми USLD можуть бути проаналізовані за допомогою онтологічного аналізу послуг [8]

2. Аналіз часу виконання (наприклад, процес видобутку на основі журналів виконання) [9]

Для таких областей аналізу використовуються такі програмні засоби, як Pegasus, Cactus, ASKALON, GLUE і т.д.. Всі згадані та проаналізовані поточні можливості для цього етапу завдання дуже обмежені. Недоліки методів та інструментів аналізу робочих процесів чітко описані в [10]. Центральною критикою є те, що етап аналізу вимог застосовується в основному вручну.

В роботі [6] також розглянуто алгебру побудови робочих процесів, але це більш складний підхід, бо потребує детальної структуризації всіх даних та сервісів, встановлення повного переліку зв'язків, що утворює додаткову складність побудови алгебраїчної структури, особливо, коли система є територіально розподіленою та має значну постійно змінювану кількість сервісів та робочих процесів.

В роботі [11] запропоновано інструментарій для побудови та аналізу робочих процесів, але все ж таки запропонований підхід не достатньо автоматизує саме формування послідовності обчислень в залежності від умов та обмежень предметної області.

В роботі [12] представлена модель обчислювальних робочих процесів і приведений огляд різних обчислювальних архітектур, таких як обчислювальний кластер, Grid, Cloud Computing і SOA для їх побудови в розподіленому середовищі. Проведено порівняльний аналіз можливостей архітектур для реалізації обчислювальних робочих процесів, в ході якого визначено, що робочі процеси доцільно реалізовувати на основі SOA, оскільки вона відповідає всім вимогам до базової інфраструктури і забезпечує високу ступінь розподіленості обчислювальних вузлів, а також їх міграції та інтеграції з іншими системами в гетерогенному середовищі.

Таким чином, можна зробити висновок, що стратегії адаптації систем під постійні зміни вимог користувачів за рахунок автоматизованого проектування та реінжинірингу послуг (тобто проектування та модифікацій існуючих бізнес-процесів) погано формалізовано та перевірено, вимагається декілька ітерацій за участі аналітиків, системних архітекторів, значних витрат часу та ресурсів.

Таким чином, можна констатувати, що існує доволі багато інструментальних засобів для опису та побудови робочих процесів, але всі вони слабо автоматизовані та потребують безпосередньої участі людини. Рішень, які б дозволили виконувати автоматизований реінжиніринг робочих процесів у зв'язку зі зміною мета-описів функціональних сервісів, на даний момент не існує.

Підхід, запропонований у цьому дослідженні, може дозволити вирішити цю проблему завдяки використанню чітко визначених моделей робочого процесу, сервісів, предметної області, визначеного набору правил побудови зв'язків між функціональними сервісами у вигляді онтологічної моделі, яку легко корегувати, а також запропонованих інструментальних засобів побудови та модифікації бізнес процесів.

Ця стаття структурована наступним чином: в розділі 2 описується загальна постановка задачі дослідження. В розділі 3 приводиться опис моделі представлення сервісів для побудови обчислювальних робочих процесів. В розділі 4 надається формалізований опис інфраструктури підтримки виконання робочих процесів. В розділі 5 демонструється автоматизована побудова робочого процесу із застосуванням онтології.

2 Постановка задачі досліджень

Онтологічна модель робочих процесів дозволяє будувати формальні описи процесів, поєднуючи функціональні сервіси зв'язками у вигляді обмежень предметної області, які відображатимуть взаємодію між ними, а онтологічна модель функціональних сервісів зберігатиме їх формальні мета-описи, з'являється можливість утворення деякого інтелектуального середовища, на основі якого можливо автоматично будувати робочі процеси в залежності від стану даних предметної області.

Перевагою онтологічного підходу є те, що онтологічна модель будується із застосуванням зв'язків у вигляді графів, дозволяючи застосовувати математичний апарат теорії графів для генерації робочих процесів в режимі реального часу, базуючись на описі вхідних та вихідних параметрів кожного функціонального сервісу [13].

Обчислювальним робочим процесом (workflow) будемо називати певний опис послідовності обчислювальних дій (етапів обробки даних), представлених у вигляді окремих структурних програмних компонент, що відповідають за конкретну функціональність і працюють автономно.

Модель обчислювальних робочих процесів служить для подання ланцюжка реальних обчислювальних задач, оцінки та аналізу їх ефективності, а також опису часто повторюваної послідовності операцій обробки даних.

Для відображення потоку робіт застосовують блок-схему або граф, який складається із операцій (функціональних сервісів), символів логіки, зв'язків. Послідовність виконання обчислень позначається стрілками.

Потік робіт з інформаційної точки зору – спосіб подання інформації до різних об'єктів, які приймають участь в робочому процесі.

Зазвичай робочий процес може бути описаний з використанням формальних або неформальних методів потокових діаграм, які показують спрямовані потоки між етапами обробки. Окремі кроки обробки або компоненти робочого процесу можуть бути в основному визначені трьома параметрами [14]:

- Опис входу: інформація, дані та ресурси, необхідні для робочого процесу.
- Правила перетворення: алгоритми, які можуть виконуватися людиною, програмою, чи обома.
- Опис виходу: інформація, дані та ресурси, оброблені робочим процесом та готові для передачі в сервіси для подальшої обробки.

Компоненти можуть бути поєднані лише за умови, якщо вихідна інформація одного компоненту відповідає вхідній інформації наступного компоненту, а також задовольняє умовам предметної області. Таким чином, семантичний опис має включати обов'язково опис вхідних, вихідних даних та мета-опис функціональних сервісів, що виконуються в даному робочому процесі. Якщо існує кілька методів (функціональних сервісів) обробки одних і тих же даних, то потрібно додати мета-опис алгоритмів, які виконують задану функцію, а також бажано вказати характеристики ефективності виконання заданих функцій, такі як: точність, швидкість, та інші.

Це пов'язано з тим, що інформація, якою оперує робочий процес, є слабко зв'язною різноструктурованою і може бути оброблена різними методами в залежності від характеристик потоку вхідних даних. Але з точки зору обробки даних, інформацію потрібно структурувати та навчити систему на конкретних даних для можливості більш ефективного використання різних методів.

Система керування робочим процесом – це програмна система, яка слугує для підготовки, виконання та моніторингу визначеного порядку робочих процесів та задач для підвищення продуктивності та зменшення витрат, потрібних для виконання робочого процесу.

3 Опис моделі представлення сервісів для побудови обчислювальних робочих процесів

В багатьох випадках одну й ту ж задачу можна вирішити різними методами. Характер обробки даних визначається імовірнісними властивостями спостережень, проведених на деяких даних, тому для опису всіх правил встановлення зв'язків на основі вхідних даних з метою визначення найбільш ефективного методу вирішення однієї і тієї ж задачі може бути використано онтологію.

Розглянемо запропонований підхід щодо автоматизації побудови онтології предметних областей, робочих процесів та всіх компонентів (функціональних сервісів, зв'язків та правил), за допомогою яких формується робочий процес.

Функціональний сервіс (S) – сервіс, що приймає на вхід набір даних, виконує операцію над ними та віддає на вихід нові дані. Мета-описи функціональних сервісів знаходяться в базі даних. Всі мета-описи функціональних сервісів кожної предметної області зберігаються в окремих колекціях бази даних. Сервіси можуть бути простими та комплексними.

Розглянемо модель простого сервісу: $S = \{Code, M, P\}$, де:

$Code$ – програмний код функціонального сервісу

M – мета-опис функціонального сервісу

P – фізичний шлях до функціонального сервісу

Мета-опис функціонального сервісу (M) – це опис функції, її вхідних та вихідних параметрів для подальшого відображення в користувацькому інтерфейсі та для врахування обмежень при побудові зв'язків у робочому процесі.

Мета-опис простого сервісу може бути представлено у вигляді:

$$M = \{ID, F, \{I_1, \dots, I_n\}, \{O_1, \dots, O_n\}, T\},$$

де:

M – мета-опис, що включає такі параметри:

ID – ідентифікатор мета-опису, наприклад: $ObjectID("5cdd4fd0598ec622d023e048")$

$F = \{N, D, R, P\}$ – множина параметрів для опису функціонального сервісу;

$I_i = \{N_i, D_i, R_i, T_i\}$ – множина параметрів для опису вхідних параметрів;

$O_i = \{N_i, D_i, R_i, T_i\}$ – множина параметрів для опису вихідних параметрів, де:

N – назва об'єкту (функціонального сервісу, вхідного/вихідного параметрів), наприклад «*checkBankAccount*»

D – опис об'єкту; характеристика обчислювальних операцій функціонального сервісу, наприклад: «Сервіс перевіряє, чи існує дана картка в банку призначення»

R – зручна для розуміння людини назва об'єкту «Перевірка наявності рахунку в банку отримувача»

P – шлях до функціонального сервісу «./bank/checkBankAccount.js»

T – тип сервісу: «function», «process»; тип змінної «number», «string» ...

$$Proc = \{CPU, R, t_{max}, \dots\}$$

де:

$Proc$ – опис нефункціональних параметрів сервісу;

C – кількість обчислювальних ядер, що потрібні для виконання сервісу;

R – кількість оперативної пам'яті;

t_{max} – максимальний час для виконання сервісу;

... – інші параметри.

Мета-описи функціонального сервісу зберігаються в базі даних в такому вигляді:

```
{
  _id,
  function: {name, description, readable_name, path},
  input: [{name, description, readable_name, type}],
  output: [{name, description, readable_name, type}],
  proc: {cpu, ram, tmax, ...}
  type
}
```

Складні сервіси можуть бути представлені на рисунку нижче (див. Рис.1).

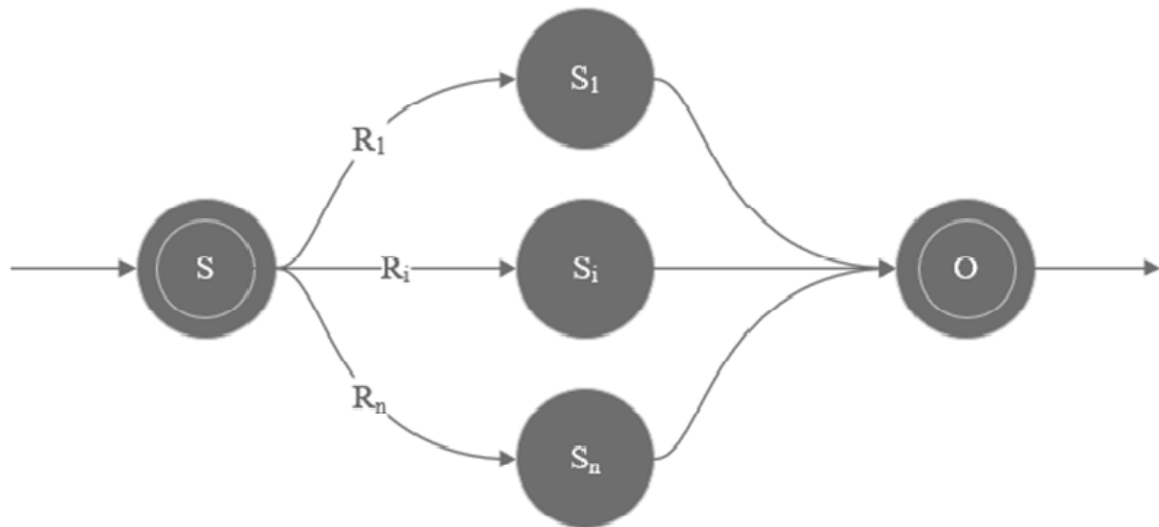


Рис.1 Приклад складного сервісу

В алгебраїчному вигляді складний сервіс може бути записано:

$S_{complex} = \{I, \{R_1, \dots, R_n\}, \{S_1, \dots, S_n\}, O, Proc\}$, де:

$S_{complex}$ – набір параметрів, що описують комплексний сервіс

I – вхідні дані сервісу

R_i – правило вибору методу

$S_i = \{I \cap R_i\}$ – метод обробки даних або простий сервіс, що може бути вибрано при застосуванні

R_i правила до вхідних параметрів

O – вихідні дані сервісу

$Proc = \{CPU, R, t_{max}\}$ – набір нефункціональних параметрів, які набувають значення вибраного методу обробки

Формалізований опис робочих процесів

Онтологія робочих процесів складається із функціональних сервісів, та зв'язків між ними, що побудовані з врахуванням обмежень предметної області.

Предметна область – множина всіх об'єктів, класів та атрибутів, що пов'язані між собою логічними зв'язками.

Робочий процес – процес, що складається із одного або декількох функціональних сервісів, що пов'язані між собою предметною областю та логічними зв'язками.

Робочий процес представляється у такому вигляді:

$P = \{I, \{F_1, \dots, F_n\}, O, Proc\}$, де:

P – робочий процес, що включає такі параметри:

I – опис вхідних параметрів

F_i – використані функціональні сервіси

O – опис вихідних параметрів

$Proc = \{CPU_{max}, R_{max}, t_{max}\}$ – нефункціональні параметри робочого процесу, де:

CPU_{max} – максимально потрібна кількість обчислювальних ядер

R_{max} – максимально потрібна кількість оперативної пам'яті

t_{max} – максимально допустимий сумарний час виконання робочого процесу, що складається із суми t_{max} всіх функціональних сервісів.

Зв'язки між сервісами (L) – логічні зв'язки, що вказують на порядок обробки даних, встановлюють порядок передачі параметрів із одного сервісу в інший, можуть бути встановлені лише за умови, що два сервіси є логічно зв'язними та хоча б один із вихідних параметрів першого сервісу відповідає хоча б одному вхідному параметру іншого сервісу.

4 Формалізований опис інфраструктури підтримки виконання робочих процесів

В автоматизованих системах виконання робочих процесів виконується за допомогою систем керування робочими процесами та можуть бути описані за допомогою діаграм потоку даних.

Формально система керування робочими процесами може бути представлена у вигляді:

$$WfMS = \{ S_r, S_d, S_c, S_a, S_{ai} \},$$

де: S_r – система маршрутизації, виконує маршрутизацію потоку інформації або документообігу, передає інформацію від попереднього робочого елемента до наступного;

S_d – система розподілу, виявляє виняткові обставини і передає інформацію призначеним компонентам системи;

S_c – система координації, координує одночасну діяльність, запобігаючи конфліктам ресурсів (виділення процесорного часу та оперативної пам'яті) або конфліктам пріоритетів;

S_a – система агентів, автоматично запускає сервіс, контролює його виконання та отримує від нього дані;

S_{ai} – система помічників, здійснює регулювання виборів наступних методів та надає пропозиції, який з методів може бути використаний наступним.

Компоненти діаграми потоку даних може бути записано у вигляді:

$$DFD = \{ D_p, D_{df}, D_w, D_t \},$$

де: D_p – процес, частина системи, яка перетворює входи у виходи;

D_{df} – потік даних, показує передачу інформації з однієї системи на іншу;

D_w – склад даних, використовується для зберігання даних для подальшого використання;

D_t – термінал доступу, інтерфейс взаємодії системи із зовнішнім середовищем.

5 Автоматизована побудова робочих процесів із застосуванням онтології

Для побудови робочого процесу потрібно виконати операцію перетину кожний з кожним для всіх сервісів за умови існування логічного зв'язку, а також зв'язку по даним між ними. При цьому вхідні дані визначатимуть той сервіс, з якого починаються обчислення за умови співпадіння даних з їх мета-описами в сервісі.

Формально побудова робочого процесу може бути представлено у вигляді:

$$P = \{ \forall M_{вик,i} \cap \forall M_{вик,j} \mid \exists L_{ij} \}, \text{ де:}$$

P – згенерований робочий процес, що складається з:

$$M_{вик} = \{ M_{зад} \cap M_{обл} \} \text{ – вибір сервісів, що використані в робочому процесі,}$$

де:

$M_{вик}$ – функціональні сервіси, що використані в робочому процесі

$M_{зад}$ – задані користувачем функціональні сервіси

$M_{обл}$ – функціональні сервіси даної предметної області

$$L_{ij} = \{ M_{вик,i} \cdot O = M_{вик,j} \cdot I \} \text{ – визначення зв'язків робочого процесу за правилом сумісних вхідних}$$

та вихідних параметрів, де:

L_{ij} – зв'язки робочого процесу

$M_{вик,i} \cdot O$ – вихідний параметр i -того функціонального сервісу;

$M_{вик,j} \cdot I$ – вхідний параметр j -того функціонального сервісу

$$M_{обл} = \{ M_{всі} \in SA \} \text{ – вибір всіх сервісів, що належать предметній області,}$$

де:

$M_{обл}$ – функціональні сервіси заданої предметної області

$M_{всі}$ – всі, доступні в репозиторії, функціональні сервіси

SA – задана предметна область

Збереження робочих процесів забезпечено за допомогою мови опису онтологічних моделей – OWL. Кожен робочий процес зберігається в окремій онтології.

Приклад опису фрагменту онтологічної моделі засобами мови OWL наведено на рисунку нижче (див. Рис.2).


```
<?xml version="1.0"?>
<Ontology xmlns="http://www.w3.org/2002/07/owl#"
  xml:base="http://www.semanticweb.org/andriy2/ontologies/2019/4/name"
  ontologyIRI="http://www.semanticweb.org/andriy2/ontologies/2019/4/name">
  <Prefix IRI="http://www.semanticweb.org/andriy2/ontologies/2019/4/name"/>
  <Declaration>
    <Class IRI="#F1"/>
  </Declaration>
  <DisjointClasses>
    <Class IRI="#F1"/>
  </DisjointClasses>
</Ontology>
```

Рис.2 Фрагмент представлення онтологічної моделі засобами мови OWL

Даний метод дозволяє будувати робочі процеси, враховуючи всі обмеження предметної області та використовуючи мета-описи функціональних сервісів для встановлення зв'язків.

Використовуючи базу даних як джерело метаданих та онтологію предметних областей як правила для встановлення зв'язків між функціональними сервісами може бути побудовано робочі процеси та встановлено зв'язки між ними в автоматизованому вигляді. Такий підхід дозволяє пришвидшити створення нових процесів без детального знання мови опису онтології OWL та мови самих функціональних сервісів JavaScript. Робочий процес буде згенеровано автоматично завдяки застосуванню запропонованого підходу.

Реалізація прототипу робочого процесу на основі онтологій

Для проведення експерименту щодо побудови робочого процесу було використано:

- Інтегроване середовище розробки WebStorm;
- мову програмування JavaScript у вигляді серверного компоненту на Node.js для генерації онтології робочого процесу в автоматизованому вигляді
- базу даних MongoDB для збереження метаданих функціональних сервісів
- Protege для перегляду та редагування онтології

Фрагмент програмного коду для формування онтологічної моделі засобами JavaScript наведено на рисунку нижче (див. Рис.3).

```
let arr = await funs.find({
  'function.name': {
    $in: [
      'F1', 'F2', 'F3', 'F4', 'F5', 'F6'
    ]
  }
}).toArray();
arr.forEach(a => owl.addBundle(a));
```

Рис.3 Вибір функціональних сервісів з бази даних

Фрагмент програмного коду для формування зв'язків між онтологічними об'єктами предметної області, що визначаються вхідними та вихідними параметрами функціональних сервісів наведено на рисунку нижче (див. Рис.4):

```

arr.forEach(fun1 => {
  arr.forEach(fun2 => {
    fun1.output.forEach(var1 => {
      if (!vars_o[var1.name]) {
        vars_o[var1.name] = {f: fun1.function.name, v: false};
      }
      fun2.input.forEach(var2 => {
        if (!vars_i[var2.name]) {
          vars_i[var2.name] = {f: fun2.function.name, v: false};
        }
        if (var1.name === var2.name && var1.type === var2.type) {
          vars_o[var1.name].v = true;
          vars_i[var2.name].v = true;
          owl.addLink(fun1.function.name, 'output', var1.name);
          owl.addLink(var2.name, 'input', fun2.function.name);
        }
      }
    }
  })
})
});

```

Рис.4 Встановлення зв'язків між функціональними сервісами

Фрагмент згенерованого робочого процесу із застосуванням запропонованого підходу наведено на рисунку нижче (див. Рис.5)

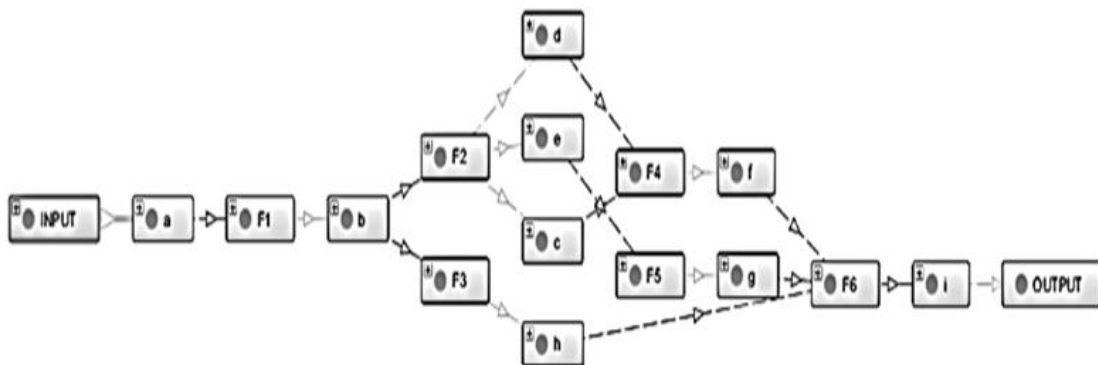


Рис.5 Автоматично згенерована онтологія робочого процесу

Таким чином запропонований підхід дозволяє автоматизувати формування обчислювального робочого процесу на основі функціональних сервісів та обмежень, накладених онтологією предметної області, а також дозволяє керувати процесом обчислень в залежності від вхідних даних.

6 Висновки

Проведений огляд технологій побудови обчислювальних робочих показав, що наявною є необхідність постійного реінженірингу бізнес-процесів в предметних областях, а відповідно підвищення рівня їх автоматизації. Разом з тим, ефективних рішень, які б дозволили виконувати автоматизований реінжиніринг обчислювальних робочих процесів, на даний момент не існує.

В роботі запропоновано формалізований опис онтологічних моделей предметної області, функціонального сервісу та робочих процесів, а також операції автоматизованого формування робочого процесу за допомогою зв'язків, що встановлюються між онтологічними моделями.

У статті представлений підхід до побудови обчислювальних робочих процесів, який заснований на чітко визначених онтологічних моделях предметної області, онтологічній моделі набору правил побудови зв'язків між функціональними сервісами, і онтологічній моделі самих робочих процесів, що динамічно генеруються. Проведено експериментальні дослідження даного

підходу та розроблено прототип інструментарію автоматизованої побудови обчислювальних робочих процесів.

Використання запропонованого підходу щодо побудови обчислювального робочого процесу із застосуванням онтології предметних областей та мета-описів функціональних сервісів дозволяє автоматизувати процес їх побудови, зокрема вибір методу (функціонального сервісу) обробки вхідних даних із множини аналогічних сервісів, який найбільше відповідає умовам зв'язків, що визначається цим потоком та є дуже важливим фактором в системах реального часу. В залежності від даних може бути вибраний найбільш ефективний метод для їх найшвидшої обробки.

Подальші дослідження будуть присвячені більш детальному розгляду процесу автоматизованої побудови робочих процесів із наборів функціональних сервісів, зокрема, автоматизованої генерації програмного коду виконання робочого процесу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Workflow Patterns: веб-сайт. URL: <http://www.workflowpatterns.com>.
2. Globa L., Popova M., Yushko N. Improved Approach to Quality Control of Telecommunication Service Providers. Materials of the 8th International Conference on Applied Innovations in IT, (ICAИТ), March 2020. Keten, Germany: 2020. P. 29–34. URL: <https://opendata.uni-halle.de/handle/1981185920/32929>
3. Luntovskyy A., Globa L. Performance, Reliability and Scalability for IoT. 2019 International Conference on Information and Digital Technologies (IDT), 25-27 June 2019. Zilina, Slovakia: IEEE Digital Library, 2019. T.1. P. 316–322. DOI: 10.1109/DT.2019.8813679 URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8813679>
4. Workflow Automation. Веб-сайт. URL: https://web.archive.org/web/20130907014418/http://nocsmart.com/index.php?option=com_content&view=article&id=17&Itemid=135.
5. Новогрудська Р.Л. Інформаційна технологія створення та підтримки порталів інженерних знань : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.13.06. Київ, 2015. 20 с.
6. Börger E. Approaches to modeling business processes: a critical analysis of BPMN, workflow patterns and YAWL. In *Software and Systems Modeling*. Springer, 2011. P. 305–318.
7. Modern Business Process Automation: YAWL and its Support Environment / Adams M., ter Hofstede A.H.M., Russell N. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2010. 616 p.
8. Globa L., Kot T., Schill A., Strunk A. Method of IBIS design and workflow realization. "Polish J. of Environ. Stud " 2009. Vol. 18, № 4a. P. 35-38.
9. Globa L., Kot T., Schill A. Applying business process modeling method when Telecommunication services development. *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии*: 2011 год: материалы 121-й Международной Крымской конференции (КрыМиКо), 2011 г. Севастополь, Крым, Украина: IEEE Catalog Number СП 1788, 2011. T.1. С. 457 – 458. ISBN 978-966-335-352-4
10. Kot T., Reverchuk A., Globa L., Schill A. (2012): A novel approach to increase efficiency of OSS/BSS workflow planning and design. Materials of the 15th International Conference Business Information Systems, 21–23 May 2012. Vilnius; Lithuania: Springer, 2012. Vol. 117. P. 142-152. DOI: 10.1007/978-3-642-30359-3_13
11. Abdukalykov R., Hussain I., Kassab M., Ormandjieva O. Quantifying the Impact of Different Non-functional Requirements and Problem Domains on Software Effort Estimation. 2011. Ninth International Conference on Software Engineering Research, Management and Applications: materials of the 2011 Ninth International Conference, 10-12 Aug. 2011, Baltimore, MD, USA, 2011. DOI: 10.1109/SERA.2011.45. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6065634>
12. Гаевой В.В., Глоба Л.С. Анализ архитектур для построения вычислительных рабочих процессов в распределённой среде . Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління». 2020 Вип. 46. С. 7-16.
13. Globa L., Novogrudska R., Koval A., Senchenko V. Ontology for Application Development. *Ontology in Information Science* / за ред. Ciza Thomas. IntechOpen, 2018. P. 29 – 53

DOI: 10.5772/intechopen.74042 URL: <https://www.intechopen.com/books/ontology-in-information-science/ontology-for-application-development>

14. Business process execution language for Web services: веб-сайт. URL: <http://docs.oasis-open.org/wsbpel/2.0/wsbpel-v2.0.pdf>.

REFERENCES

1. Workflow Patterns Resource. [Online]. Available: <http://www.workflowpatterns.com/>
2. L. Globa, M. Popova, N. Yushko, "Improved Approach to Quality Control of Telecommunication Service Providers", in *Proc. 8th International Conference on Applied Innovations in IT, (ICAIIIT)*, Keten, Germany, 2020, pp. 29-34, URL: <https://opendata.uni-halle.de/handle/1981185920/32929>
3. A. Luntovskyy, L. Globa, "Performance, Reliability and Scalability for IoT", in *Proc. 2019 International Conference on Information and Digital Technologies (IDT)*, Zilina, Slovakia, 2019, pp.316-322, DOI: 10.1109/DT.2019.8813679, URL:<https://ieeexplore.ieee.org/document/8813679>
4. Workflow Automation. [Online]. Available: https://web.archive.org/web/20130907014418/http://nocsmart.com/index.php?option=com_content&view=article&id=17&Itemid=135.
5. R. Novogradskaya. "Information technology for creating and maintaining engineering knowledge portals": PhD thesis, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kiev, 2015. [in Ukrainian]
6. E. Börger. "Approaches to modeling business processes: a critical analysis of BPMN, workflow patterns and YAWL", in *Software and Systems Modeling*, Börger E., Eds. Springer-Verlag 2011, pp. 305–318. DOI 10.1007/s10270-011-0214-z
7. M. Adams, A.H.M. ter Hofstede, N. Russell. *Modern Business Process Automation: YAWL and its Support Environment*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2010.
8. L. Globa, T. Kot, A. Schill, A. Strunk. "Method of IBIS design and workflow realization", *"Polish J. of Environ. Stud "*, Vol. 18, no. 4a, pp. 35-38, 2009.
9. L. Globa, T. Kot, A. Schill, "Applying business process modeling method when Telecommunication services development", in *Proc. 21st International Crimean Conference "Microwave and Telecommunication Technology" (CriMiCo'2011)*, Sevastopol, Crimea, Ukraine, 2011, pp. 457 - 458. ISBN 978-966-335-352-4 URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6069007>
10. Kot, T., Reverchuk, A., Globa, L., Schill, A., "A novel approach to increase efficiency of OSS/BSS workflow planning and design", in *Proc. 15th International Conference Business Information Systems*, Vilnius; Lithuania, 2012, pp. 142-152.
11. R. Abdulkalykov, I. Hussain, M. Kassab, O. Ormandjieva, "Quantifying the Impact of Different Non-functional Requirements and Problem Domains on Software Effort Estimation", in *Proc. 2011 Ninth International Conference on Software Engineering Research, Management and Applications*, Baltimore, MD, USA, 2011. DOI: 10.1109/SERA.2011.45. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6065634>
12. V. Gaievyi, L. Globa, "Analysis of architectures for building computational workflows in a distributed environment" , *Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University, series «Mathematical modeling. Information technology. Automated systems»*, Vol. 46, pp.7-16, 2020. [in Russian].
13. L. Globa, R. Novogradskaya, A. Koval, V. Senchenko, *Ontology for Application Development*, Ciza Thomas, Eds. IntechOpen, 2018, pp. 29 – 53, DOI: 10.5772/intechopen.74042, 2018, URL: <https://www.intechopen.com/books/ontology-in-information-science/ontology-for-application-development>
14. Business process execution language for Web services. [Online]. Available: <http://docs.oasis-open.org/wsbpel/2.0/wsbpel-v2.0.pdf>.

УДК 004.4:004.5:62.51

Air monitoring system based on IoT

V.V. Zhivaga, M.O. Malakhova, D.O. Shevchenko

Malakhova Maryna

Candidate of Engineering Sciences; associated professor of Electronics and Control Systems Department

V. N. Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq 6, Kharkiv, Ukraine, 61022

e-mail: maryna.malakhova88@gmail.com;

<https://orcid.org/0000-0001-5082-5279>

Zhivaga Vladlen

student

V. N. Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq 6, Kharkiv, Ukraine, 61022

e-mail: vladonstar@gmail.com;

<https://orcid.org/0000-0002-7117-4468>

Shevchenko Dmytro

student

V. N. Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq 6, Kharkiv, Ukraine, 61022

e-mail: dimyich24@gmail.com;

<https://orcid.org/0000-0002-7897-250X>

A number of researches shows the correlation between the COVID-19 coronavirus lethality and the air pollution. Therefore, the research and development of the air quality monitoring systems for domestic, industrial, and municipal use, as well as collecting and processing data for those systems are of great importance. The aim of this work is to develop a budget, intuitive, integrated Internet of Things (IoT) "Smart House" system. The IoT system for monitoring air quality and controlling its parameters has been designed. The analysis of scientific and technical information, design, hardware, and software development of IoT "Smart House" system and an appropriate web application has been performed to achieve this goal. Mathematical modeling, system programming, computer and microprocessor architecture, robotics, and the methods of network communication have been used. The integrated IoT system evaluates and analyzes the node for measuring the parameters of the environment in the room and the rules of fuzzy control according to experimental data, conducts a questionnaire to summarize the work. The main focus of the research has been on the system integration, the ability to connect a large number of sensors, air quality control, and effective control of the loading devices so that people can feel comfortable. The IoT system analyzes the indoor, as well as outdoor environmental data using a certain algorithm, and determines the node for measurement, using the minimum change and the minimum mean deviation. This algorithm allows us to stabilize the system management, to reduce the impact of erroneous or pseudo-erroneous data, etc. The functionality of the Smart House system ensures indoor comfort and safety, increases energy efficiency, and simplifies the management of various automated control systems in the household. In the following work, we are planning to improve the system by updating user-friendly interface, improving algorithms, expanding the functionality of the system, and performing in-depth study of the processes of measuring and controlling air quality parameters.

Keywords: *IOT, air monitoring, Smart House, control system.*

Система моніторингу якості повітря на базі IoT

В. В. Живага, М. О. Малахова, Д. О. Шевченко

**Малахова Марина
Олегівна**

*к.т.н., доцент кафедри Електроніки і управляючих систем
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан
Свободи, 6, Харків, Україна, 61022*

**Живага Владлен
Володимирович**

*студент
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан
Свободи, 6, Харків, Україна, 61022*

**Шевченко Дмитро
Олександрович**

*студент, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,
майдан Свободи, 6, Харків, Україна, 61022;*

Ряд досліджень вказують на зв'язок летальності коронавірусу COVID-19 із забрудненістю повітря. В умовах пандемії багато людей перебувають на карантині та сидять у своїх домівках. Тож актуальними є дослідження та розробка систем моніторингу якості повітря для побутового, промислового та муніципального використання, а також роботи щодо збору та обробки даних цих систем. Тож метою даної роботи є розробка бюджетної інтуїтивно зрозумілої інтегрованої IoT системи «розумного будинку», яку можна було б застосувати для широкого спектру завдань з моніторингу якості повітря у приміщенні та керування його параметрами для підвищення його безпечності для життєдіяльності споживача. Розроблена інтегрована Internet of Things (IoT) система дозволяє інтегрування велику кількість датчиків, проводити моніторинг якості повітря та ефективно керувати виконуючими пристроями у приміщенні для поліпшення його стану. Ця система аналізує дані про навколишнє середовище в приміщенні та за його межами, використовуючи розроблений алгоритм, що дозволяє стабілізувати управління системою, зменшити вплив помилкових або псевдо помилкових даних та врахувати вподобання споживача. У майбутньому планується поліпшення системи за рахунок створення більш зручного інтерфейсу для користувача, покращення алгоритмів роботи та розширення функціональності системи та поглибленого дослідження процесів вимірювання та контролю параметрів якості повітря.

Ключові слова: Інтернет речей, моніторинг якості повітря, «розумний будинок», система керування

Система моніторингу якості повітря на базі IoT

В. В. Живага, М. О. Малахова, Д. О. Шевченко

**Малахова Марина
Олеговна**

*к.т.н., доцент кафедри Електроніки і управляючих систем
Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, площадь
Свободы, 6, Харьков, Украина, 61022*

**Живага Владлен
Владимирович**

*студент
Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, площадь
Свободы, 6, Харьков, Украина, 61022*

**Шевченко Дмитрий
Александрович**

*студент
Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, площадь
Свободы, 6, Харьков, Украина, 61022*

Ряд исследований указывают на связь летальности коронавируса COVID-19 с загрязненностью воздуха. В условиях пандемии много людей находится на карантине и сидят в своих домах. Поэтому актуальными являются исследования и разработка систем мониторинга качества воздуха для бытового, промышленного и муниципального использования, а также работы по сбору и обработке данных этих систем. Поэтому целью данной работы является разработка бюджетной интуитивно понятной интегрированной IoT системы «умного дома», которую можно было бы применить для широкого спектра задач по мониторингу качества воздуха в помещении и управления его параметрами для повышения его безопасности для жизнедеятельности потребителя. Разработана интегрированная Internet of Things (IoT) система позволяет интегрировать большое количество датчиков, проводить мониторинг качества воздуха и эффективно управлять исполнительными устройствами в помещении для улучшения его состояния. Система анализирует данные об окружающей среде в помещении и за его пределами, используя разработанный алгоритм, позволяющий стабилизировать управления системой, уменьшить влияние ложных или псевдо ложных данных, а также учесть предпочтения потребителя. В будущем планируется развитие системы за счет создания более удобного пользовательского интерфейса, улучшение алгоритмов работы и расширения функциональности системы и углубленного исследования процессов измерения и контроля параметров качества воздуха.

Ключевые слова: Интернет вещей, мониторинг качества воздуха, «умный дом», система управления

The pandemic caused by COVID-19 presents new challenges for the humanity. A number of studies around the world (e.g. [1]) indicates the strong correlation between coronavirus lethality and air pollution. Higher mortality has been observed in the regions with poor air exchange and the high level of nitrogen dioxide in the air. It is a common belief that the air at the metropolis streets is polluted [2], but the global lockdown has led to the significant reduction of the environmental pollution [3]. But the situation is completely different in the dwellings where people have to stay for long periods of time due to the quarantine caused by the pandemic. Modern building materials, interior decoration, home appliances, furniture, etc. release a significant amount of toxic substances. Dust and mold often appear in poorly ventilated rooms, such as bathrooms and kitchens. The natural ventilation is often impaired by the pursuit of energy efficiency. According to some estimates, the air toxicity in a hermetically closed room can be ten times higher than outdoors. Air quality monitoring makes it possible to determine air

quality, as well as to decide on the appropriate measures for its cleaning. For example, the recuperators, air cleaning, ventilation, dehumidification or humidification, and disinfection systems could be installed. Researches related to the monitoring of indoor and outdoor air and its impact on human's health have become very actual and vital [4-6]. Air quality monitoring systems for domestic, industrial and municipal use are being actively developed [7]. The air quality monitoring system should collect and process a lot of data that characterize air safety [8].

Being an accessible and intuitive, integrated Internet of Things (IoT) systems are one of the keys to solving this problem. Almost all systems and infrastructure of any buildings can be integrated into the network through the miniaturization of sensors, their availability and diversity. However, IoT-based systems require a well-built infrastructure and the usage of artificial intelligence for working in optimized and offline mode.

The functionality of the Smart House systems allows us to ensure the comfort and safety of occupants, to increase the building energy efficiency and simplify the management of various automated control systems that are part of our lives. Moreover, such systems can increase quality of life for the people with disabilities. Increasing the technological literacy of consumers and reducing the cost of such equipment due to the expansion of the digital industry lead to the popularization of such systems and their spread in residential and commercial real estate. However, misinterpretation of "Smart House" concept sometimes leads to the fears of its excessive intelligence among consumers. But in reality a "Smart House" is nothing more than an automation system that combines control and monitoring of all processes in apartments, houses, offices, cottages, etc.

The aim of this work is to develop the integrated "Smart House" IoT system, which could be used for a wide range of tasks for monitoring air quality and controlling its parameters.

To achieve this goal a number of tasks are to be solved.

Formulation of the problem:

1. To analyze a scientific and technical literature and information concerning similar systems.
2. To design IOT system.
3. To develop "Smart House" hardware and software, including a server for the interaction of individual subsystems.
4. To create a web application.

There are three main options for the "Smart House" automation systems:

- Centralized or decentralized;
- With an open or closed protocol;
- Wired or wireless.

Various combinations of these parameters are possible, such as, "Smart House" wired, decentralized with an open protocol or "Smart House" wireless, centralized with a closed protocol, for example. Therefore, the following architectures and options have been considered.

a) Centralized automation systems.

The centralized control system provides programming of one central element, i.e. the logical module, with many outputs. This element can often be a controller that uses a specially designed program for a particular object. It can control the actuators and other subsystems. It allows using multitasking scenarios and working with a wide variety of equipment. Centralized automation systems can be wired or wireless.

The advantages of centralized automation systems are:

- the single interface for the system management.
- the ability to create multitasking scripts.
- the ability to connect any equipment to the system;

The disadvantages of centralized systems are:

- vulnerability, the whole system stops working if the central module fails.
- low flexibility, i.e. equipment configuration changes are expensive and sometimes unprofitable. Usually it is much cheaper to completely redesign the system.

b) Decentralized automation systems.

The decentralized system controls each actuator by a separate microprocessor which has its own independent memory. This approach ensures high reliability of such systems. When one of devices is

broken, other devices will continue to work and system remains operational. Smart houses built on the KNX protocol is an example of a decentralized system.

The advantages of decentralized automation systems are:

- *reliability*, which is guaranteed by the independence of the system devices;
- *prevalence*. The popularity of the KNX standard simplifies installing and servicing due to the significant number of certified specialists in our country;
- *design*. A great number of various electrical accessories and sensors ensures simplicity of designing and provides for wide range functionality.

The main feature of the decentralized system is a large amount of available equipment.

c) Open protocol automation systems.

KNX protocol is open, therefore, a huge number of smart house equipment manufacturers offer devices based on it. The KNX Association tests all the devices it produces. The KNX logo on the device guarantees the high quality of the product. Although the cost of such systems is higher than for the system based on the closed protocols. Strict compliance with the standards of the association leaves little place for the implementation of the creative ideas when designing new devices as well.

e) Closed protocol automation systems.

These systems are implemented on their own closed protocols. The development process is much easier and development costs are lower, because there is no need to pay for the product approval. The equipment based on a closed protocol can be manufactured only by a protocol owner, therefore, the consumer is completely dependent on the single manufacturer.

Thus, the modern world of home automation systems is developing rapidly and gaining the popularity becoming extremely wide and diverse.

The basic concept of the Internet of Things (IoT) consists in the integration of virtuality and reality, and the interconnection of all things, that is, all things in the world: "people", "things", "time", "places" or "objects" can be connected to the Internet. The European Telecommunications Standards Institute (ETSI) defines IoT as a three-tier hierarchy, each of which is inextricably linked to its functions. There are three layers (Fig. 1).

1. **Sensor Layer:** this layer consists of components that can receive, control and identify. It is mainly responsible for getting information, such as RFID (radio frequency identification), temperature and humidity sensors.
2. **Network Layer:** this layer consists of components that can communicate and transmit. The information is transmitted to the appropriate devices for the communication and exchange by wire or wireless means, such as TCP / IP, Wi-Fi and Bluetooth.
3. **Application layer:** this layer mainly consists of hardware devices that process information tangible or intangible to the user, respectively. In the first case, information is displayed on computer software interfaces, so that users are able to assess the current situation and react accordingly. In the second case, for example, if the temperature is too high, the air conditioner will be turned on and the temperature will be set to the level comfortable for a user.

IoT has evolved from the initial P2P to P2M and then to M2M, and although it is widely used IoT still faces many challenges. Currently, problems occur at all levels.

1. **Sensor level.** IoT is so extensible that you can connect many different devices, each of which processes data differently. Without an universal standard for receiving, processing, and formatting the data, the effectiveness of IoT can never be improved.
2. **Network layer.** Due to the limitations of wired transmission many customers do not want to use it, so most of IoT transmissions are wireless currently. However, wireless transmission faces a specific set of its own problems such as architecture, bandwidth, anti-interference, security and efficiency, which cannot be solved by a standardized method. A single standard will be the key to the success of IoT promotion in the future.

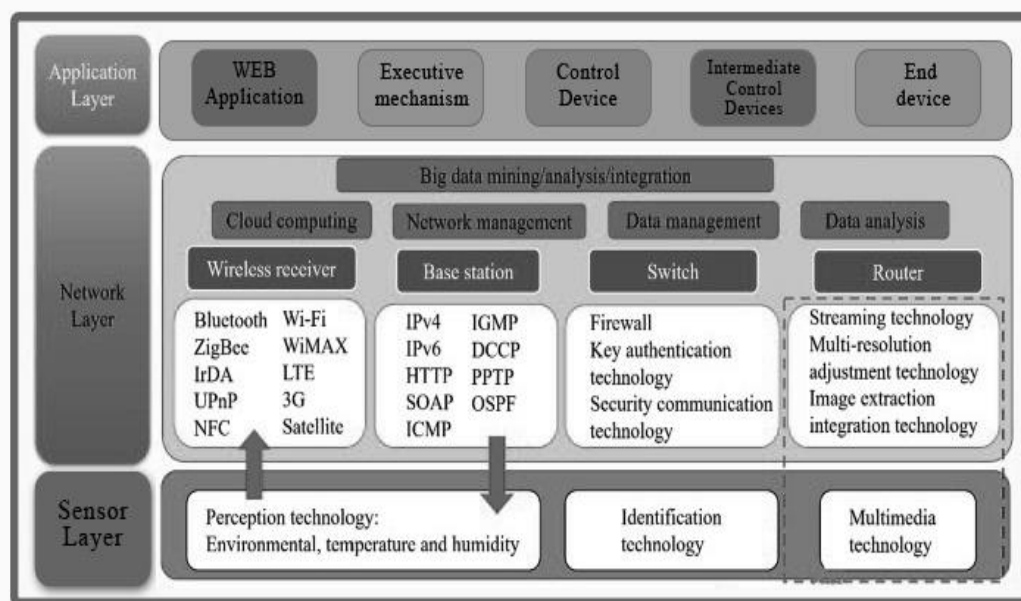


Fig. 1 - IoT system architecture.

3. Application level. IoT development brings a big data, such as data accuracy, application frequency and individual benefits. In times of an explosion of information that needs to be effectively processed, analyzed and forecasted, data will increase the value of data and prevent depreciation over time. With realisation of the self-planning, self-analysis, self-forecasting and self-repair for the IoT another milestone will be achieved. The Artificial Intelligence (AI) is not just a theoretical concept, but something that can be realized.

The architecture of the system is presented in four parts.

1. The first part is responsible for environment monitoring. It is part of an indoor monitoring equipment group. This equipment is represented by sensors, actuators and an Arduino analyzer [10]. The probe is responsible for data collection and enforcement.

2. The second part is the wireless transmission which provided by ZigBee transmission. Its main purpose is to transmit processed Arduino signals analyzed on a single-board computer.

3. The third part is responsible for analyzing and storing information. The analysis is based on the implementation of the indicators and standards mentioned in Part 2. The data are analyzed, processed, stored and displayed by the software.

4. The fourth part is a control qualitative management of the internal environment loading devices based on the received analysis. Loading devices, such as a buzzer, an electric fan, a humidifier, a conditioner and others are used for this purpose.

The automatic system control [11] can be based on the environmental situation or user preferences. The single-board computer sends a signal to the Arduino, which will regulate the temperature by controlling an air conditioner, fan and humidifier or turn on a fire alarm (in case of emergency) according to the signal received by ZigBee [12]. When the CO₂ concentration is too high or exceeds the norm, a buzzer is activated by the node to alert the user which can take appropriate actions basing on the information provided. The complete system architecture is shown in Fig. 2.

The software architecture consists of three parts.

1. The final node. It is an indoor monitoring equipment that receives an analog signal for a certain period of time. The Arduino processes signals using a noise minimization algorithm to increase accuracy. After that, the processed data is transmitted through ZigBee to the coordinator. The data exchange process can be performed through each ZigBee node. The first node is the main control node. As soon as the single-board computer analyzes the received signal, the software node will determine a proper action scenario.

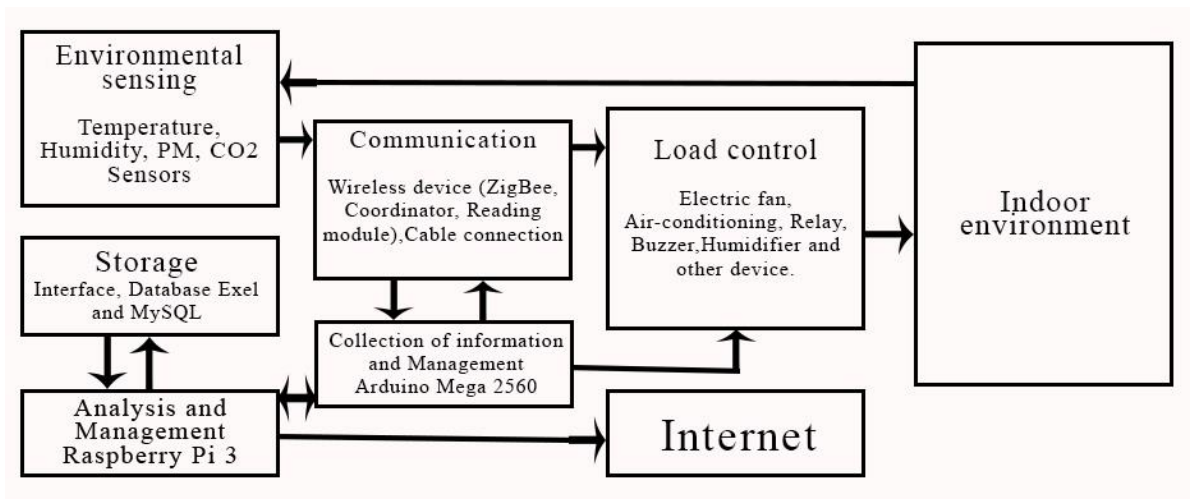


Figure 2. Scheme of data transmission architecture and control signals.

2. Single board computer. The data from each node is integrated for processing and analysis. The obtained results are stored in a database and form a knowledge base. If the result of the analysis of the internal environment is abnormal, then the correcting commands for an appropriate action are sent back to each node through the ZigBee coordinators. The usage of a single-board computer provides a significant advantage over other devices, because it offers sufficient system efficiency and high performance while processing large amounts of data.

3. The final computer. The end device processes received corrective commands and directly controls the loading devices.

As the platform for the system the single-board computer RaspberryPi 3 and Arduino Mega 2560 have been chosen. This choice is based on the fact that a single-board computer performs calculations quickly, as well as has the ability to operate network systems and control other devices. Arduino is a very efficient tool that allows unexpensive implementation of any solutions for the device integration (sensors, servos, electric motors, etc.) and is widely used to solve problems of the automation and control. The connection between a single-board computer and Arduino complements each other and has great potential for IoT.

Integration is the main feature of our system. It is an ability to connect a large number of sensors and effective control of loading devices to ensure people's comfort and improve the quality of life.

HTML, CSS, and JavaScript are implemented to develop a human-machine monitoring interface. The human-machine monitoring interface receives and displays node data and provides system control. The interface is presented in Fig. 3. The obtained data is stored in the Microsoft Excel and MySQL database for further analysis and a single-board computer uses the relevant indicators and standards as a basis for evaluation.

Arduino Mega 2560 (AM 2560) software for collecting sensor information about temperature, humidity, wind speed, CO2 level, and particulate matter has been implemented with ArduinoStudio. The data from the AM 2560 is processed and analyzed on a single-board computer using software implemented with C/C ++. Communication between the computer and AM 2560 is realized as the ZigBee structure, where a single-board computer is the ZigBee server and AM 2560 is the ZigBee client. As soon as data from the sensor has been received, Arduino processes it and sends it to a single-board computer. The decision based on the received data is made and data is stored in the database. Afterwards the command to Arduino is sent, and Arduino controls the loading device.

The choice of the correct evaluation criteria is the most crucial; because if there is a huge discrepancy between the data measured at the node and the environmental conditions it can indicate that the node does not reflect the general situation correctly. In contrast, when the discrepancy is insignificant, the reliability of the node is much higher. The minimum variation and the minimum mean deviation can represent the stability and reliability of the node, respectively.

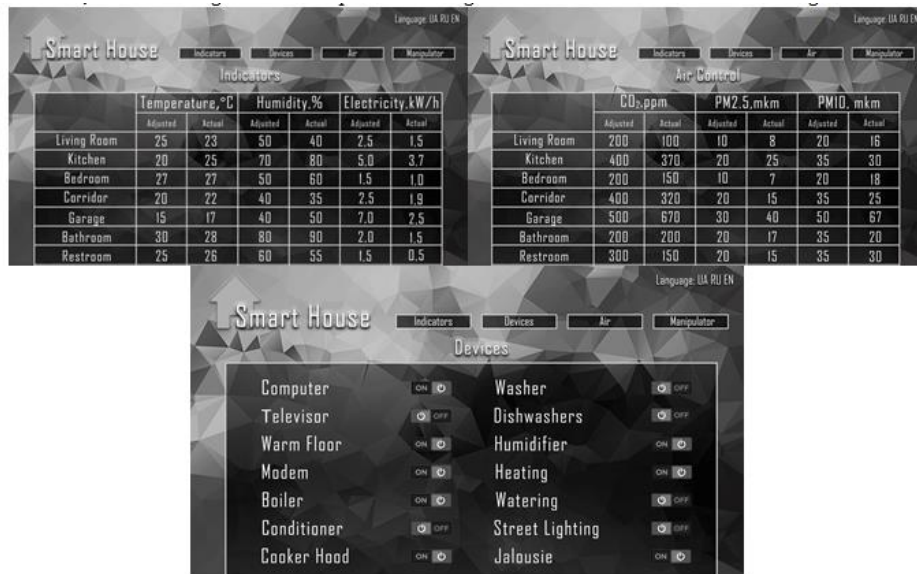


Figure 3. WEB interface.

It should be noted that the deviation of some parameters in the room might affect the values of parameters which are not obviously related. For example, when the relative humidity exceeds 70%, the sensors that are monitoring the concentration of solid particles will perceive the water particles as pollution as well [13]. That can be overcome by heating the air nearby the sensor or by intelligent processing of the sensor output.

The system that uses the IoT capabilities and intelligent algorithms for processing data from various devices in order to create and control favorable and secure environment for a user has been developed. The system integration is provided by the possibility of expanding the system easily and customizing each device to users preferences due to the capabilities of the selected platform. The database for the data storage and its further statistical analysis has been provided. The environmental data stored in tables can be used for forecasting and preventing undesirable events. This system is fast enough for swift data processing and management, and shows a good efficiency. This is realized by using a single-board computer as the main device that controls the system. The user interacts with the system through a web page. It is possible to configure the system, have access to all information and perform certain actions to ensure comfort and safety.

As a result of performed work we have obtained:

- the intelligent system management algorithm, which takes user needs into account;
- the databases and tables for the data storage;
- the web page for the system management;
- the integrated IoT system that can be used for a wide range of environment monitoring and managing tasks.

The developed integrated Internet of Things (IoT) system evaluates and analyzes the node data for measuring the environmental parameters. It performs a fuzzy control according to experimental data and conducts a questionnaire to summarize the work. The main focus of research is on system integration, the ability to connect a large number of sensors, air quality control and effective control of loading devices to ensure people's safety and comfort, and improve the quality of life.

The system analyzes the indoor and outdoor environmental data using a certain algorithm and determines stability and reliability of the node measurement, using the minimum change and the minimum mean deviation.

To provide the control of CO₂ and PM level in the environment the system are equipped with the corresponding sensors.

The system has been designed to facilitate monitoring and management of the performance of a particular room. It provides a comfortable environment for the user and increases safety by means of automatic control of critical situations.

In the following work, we are planning to improve the system by updating user-friendly interface, improving algorithms, expanding the functionality of the system, and performing in-depth study of the processes of measuring and controlling air quality parameters.

ЛІТЕРАТУРА

1. Y. Ogen, "Assessing nitrogen dioxide (NO₂) levels as a contributing factor to coronavirus (COVID-19) fatality", *Science of The Total Environment*, vol. 726, p. 138605, 2020. Available: 10.1016/j.scitotenv.2020.138605 [Last accessed: 7.05.2020].
2. "Монитор качества воздуха в помещении", *M.habr.com*, 2017. [Online]. Available: <https://m.habr.com/ru/post/322080/>. [дата звернення: 11.05.2020].
3. S. Muhammad, X. Long and M. Salman, "COVID-19 pandemic and environmental pollution: A blessing in disguise?", *Science of The Total Environment*, vol. 728, p. 138820, 2020. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720323378>. [Last accessed: 28.04.2020].
4. C. Vornanen-Winqvist et al., "Exposure to indoor air contaminants in school buildings with and without reported indoor air quality problems", *Environment International*, vol. 141, p. 105781, 2020. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412019338838>. [Last accessed: 27.04.2020].
5. R. Chen, K. Ho, G. Hong and K. Chuang, "Houseplant, indoor air pollution, and cardiovascular effects among elderly subjects in Taipei, Taiwan", *Science of The Total Environment*, vol. 705, p. 135770, 2020. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719357651>. [Last accessed: 25.04.2020].
6. J. Madureira, K. Slezakova, C. Costa, M. Pereira and J. Teixeira, "Assessment of indoor air exposure among newborns and their mothers: Levels and sources of PM₁₀, PM_{2.5} and ultrafine particles at 65 home environments", *Environmental Pollution*, vol. 264, p. 114746, 2020. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749120310551>. [Last accessed:30.04.2020].
7. S. Kephelopoulos, S. Bopp, S. Costa, A. Cusinato, D. Lipsa and O. Geiss, "Indoor air monitoring: Sharing and accessing data via the Information Platform for chemical monitoring (IPCHEM)", *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, vol. 227, p. 113515, 2020. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1438463919310752>. [Last accessed: 29.04.2020].
8. H. McDermott, "Air Monitoring for Toxic Exposures", 2004. Available: 10.1002/0471670588 [Last accessed:05.05.2020].
9. "2019 Insight Intelligent Technology Index", *itWeek*, 2020. [Online]. Available: <https://www.itweek.ru/digitalization/article/detail.php?ID=210977>. [Last accessed:18.05.2020].
10. "Arduino:Libraries/OneWire", *Wikihandbk*, 2020. [Online]. Available: <http://wikihandbk.com/wiki/>. [Last accessed:22.09.2019].
11. G. Mois, S. Folea and T. Sanislav, "Analysis of Three IoT-Based Wireless Sensors for Environmental Monitoring", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 66, no. 8, pp. 2056-2064, 2017. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7887698>. [Last accessed:19.12.2019].
12. F. Montori, L. Bedogni and L. Bononi, "A Collaborative Internet of Things Architecture for Smart Cities and Environmental Monitoring", *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 2, pp. 592-605, 2018. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7961139>. [Last accessed:05.01.2020].
13. "Eco-City FAQ", *Eco-city.org.ua*, 2020. [Online]. Available: <https://eco-city.org.ua/faq>. [Last accessed:03.05.2020].

REFERENCES

1. Y. Ogen, "Assessing nitrogen dioxide (NO₂) levels as a contributing factor to coronavirus (COVID-19) fatality", *Science of The Total Environment*, vol. 726, p. 138605, 2020. Available: 10.1016/j.scitotenv.2020.138605 [Accessed 7 May 2020].

2. "Indoor air quality monitor", *M.habr.com*, 2017. [Online]. Available: <https://m.habr.com/ru/post/322080/>. [Accessed: 11- May- 2020].
3. S. Muhammad, X. Long and M. Salman, "COVID-19 pandemic and environmental pollution: A blessing in disguise?", *Science of The Total Environment*, vol. 728, p. 138820, 2020. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720323378>. [Last accessed: 28.04. 2020].
4. C. Vornanen-Winqvist et al., "Exposure to indoor air contaminants in school buildings with and without reported indoor air quality problems", *Environment International*, vol. 141, p. 105781, 2020. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412019338838>. [Last accessed: 27.04.2020].
5. R. Chen, K. Ho, G. Hong and K. Chuang, "Houseplant, indoor air pollution, and cardiovascular effects among elderly subjects in Taipei, Taiwan", *Science of The Total Environment*, vol. 705, p. 135770, 2020. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719357651>. [Last accessed: 25.04.2020].
6. J. Madureira, K. Slezakova, C. Costa, M. Pereira and J. Teixeira, "Assessment of indoor air exposure among newborns and their mothers: Levels and sources of PM10, PM2.5 and ultrafine particles at 65 home environments", *Environmental Pollution*, vol. 264, p. 114746, 2020. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749120310551>. [Last accessed:30.04.2020].
7. S. Kephelopoulos, S. Bopp, S. Costa, A. Cusinato, D. Lipsa and O. Geiss, "Indoor air monitoring: Sharing and accessing data via the Information Platform for chemical monitoring (IPCHEM)", *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, vol. 227, p. 113515, 2020. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1438463919310752>. [Last accessed: 29.04.2020].
8. H. McDermott, "Air Monitoring for Toxic Exposures", 2004. Available: 10.1002/0471670588 [Last accessed:05.05.2020].
9. "2019 Insight Intelligent Technology Index", *itWeek*, 2020. [Online]. Available: <https://www.itweek.ru/digitalization/article/detail.php?ID=210977>. [Last accessed:18.05.2020].
10. "Arduino:Libraries/OneWire", *Wikihandbk*, 2020. [Online]. Available: <http://wikihandbk.com/wiki/>. [Last accessed:22.09.2019].
11. G. Mois, S. Folea and T. Sanislav, "Analysis of Three IoT-Based Wireless Sensors for Environmental Monitoring", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 66, no. 8, pp. 2056-2064, 2017. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7887698>. [Last accessed:19.12.2019].
12. F. Montori, L. Bedogni and L. Bononi, "A Collaborative Internet of Things Architecture for Smart Cities and Environmental Monitoring", *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 2, pp. 592-605, 2018. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7961139>. [Last accessed:05.01.2020].
13. "Eco-City FAQ", *Eco-city.org.ua*, 2020. [Online]. Available: <https://eco-city.org.ua/faq>. [Last accessed:03.05.2020].

УДК 004.051

Інтеграція адаптивного мобільного навчального середовища в освітній процес та оцінка її ефективності

М.А. Костюк

**Костюк
Михайло
Анатолійович**

*аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення та кібербезпеки
Київський національний торговельно-економічний університет
Kyoto, 19, Київ-156, Україна, 02156
e-mail: hell.gunshe@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-0159-8289>*

У статті розглянуто питання особливостей використання комп'ютерних технологій в навчальному процесі закладів вищої освіти, зокрема в системі мобільного навчання, відмінністю якого є здійснення навчального процесу на основі використання мобільних телефонів. Зміст статті є продовженням попередньої роботи автора, присвяченій проектуванню високотехнологічного адаптивного мобільного навчального середовища; розробки загальної функціональної структури адаптивного мобільного навчального середовища, визначення особливостей її застосування. В роботі представлено результати впровадження адаптивного мобільного навчального середовища у навчальний процес, продемонстровано дослідження щодо ефективності використання системи мобільного навчання на основі опитування студентів. За результатами опитування підтверджено доцільність використання мобільного навчального середовища під час вивчення студентами дисципліни «Експертні системи» освітньої програми бакалавр спеціальності 122 «Комп'ютерні науки» та позитивне відношення до автоматизованої системи аналізу практичних завдань. На основі отриманих результатів запропонована система адаптивного мобільного навчального середовища для інтеграції у навчальний процес. Наведено користувацький інтерфейс мобільного додатку зі сторони викладача та студента. За рахунок постійного доступу до матеріалів навчальної дисципліни, можливості покращити оцінку через виконання додаткових завдань, а також за необхідністю, швидкою комунікацією із викладачем, система допомагає краще засвоювати матеріали, що в свою чергу позитивно відображається на фінальних оцінках студентів. Для проведення дослідження за допомогою якісних методів, використано методологічне опитування на платформі UXReality. За результатами якісних методів досліджень виявлено мотиваційні аспекти поведінки респондентів та персональні очікування від користування системою адаптивного мобільного навчального середовища. Для тестування зручності роботи з мобільним додатком, під час дослідження використано так званий нейротест із застосуванням технології айтрекінгу.

Ключові слова: комп'ютерні технології, дистанційне навчання, мобільний додаток, аналіз графічного інтерфейсу екрану, автоматизована система аналізу, система комунікації, технології айтрекінгу.

Integration of adaptive mobile educational environment into the educational process and evaluation of its effectiveness

Kostiuk Mykhailo

*graduate student of the Department of Software Engineering and Cybersecurity
Kyiv National University of Trade and Economics
Kyoto, 19, Kiev-156, Ukraine, 02156
e-mail: hell.gunshe@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-0159-8289>*

The article considers the peculiarities of the use of computer technologies in the educational process of higher education institutions, the system of mobile learning in particular, the main idea of which is the implementation of the educational process based on the use of mobile phones. The article is a continuation of the previous work dedicated to the design of high-tech adaptive mobile educational environment, the development of the general functional structure of the adaptive mobile educational environment, and the definition of features of its application. The paper presents the results of the introduction of an adaptive mobile educational environment in the learning process, and demonstrates research on the effectiveness of the mobile educational system based on student surveys. According to the results of the survey, the expediency of using a mobile educational environment for students in the bachelor's degree program 122 "Computer Science" of the "Expert Systems" discipline and a positive attitude to the automated system of analysis of practical tasks have been ascertained. On the base of the results obtained, the system of adaptive mobile educational environment is proposed for integration into the learning process. The user interface for both the teacher and student is presented. It is proved that the dynamics of improving the learning process is positive, because the system of adaptive educational environment affects all stages of the initial process. Due to constant access to the learning materials, the ability to improve assessment through additional tasks, as well as, the teacher's quick response, the system helps to master the material better, which in turn has a positive effect on students' final grades. In addition to the main functionality the communication between students of the group and the student-teacher

communication are available, as well as displaying the system notifications. To conduct research with qualitative methods, a methodological survey on the UXReality platform has been used. According to the results of qualitative research methods, the motivational aspects of respondents' behavior and personal expectations for the system of adaptive mobile educational environment have been revealed. To test the usability of the mobile application, the so-called neurotest with the use of eye tracking technology has been used. The correctness of the chosen direction of the research has been proved. That confirms the practicality of the implementation of the system of adaptive mobile educational environment in the learning process.

Keywords: *computer technologies, distance learning, mobile application, graphical screen interface analysis, automated analysis systems, communication systems, eye-tracking technologies.*

Интеграция адаптивной мобильной учебной среды в образовательный процесс и оценка ее эффективности

**Костюк
Михаил
Анатольевич**

*аспирант кафедры инженерии программного обеспечения и
кибербезопасности
Киевский национальный торгово-экономический университет
Киото, 19, Киев-156, Украина, 02156
e-mail: hell.gunshe@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-0159-8289>*

В статье рассмотрены вопросы особенностей использования компьютерных технологий в учебном процессе высших учебных заведений, в частности в системе мобильного обучения, отличительной чертой которого является осуществление учебного процесса на основе использования мобильных телефонов. Содержание статьи является продолжением предыдущей работы автора, посвященной проектированию высокотехнологичной адаптивной мобильной учебной среды; разработке общей функциональной структуры адаптивной мобильной учебной среды, определению особенностей ее применения. В работе представлены результаты внедрения адаптивной мобильной учебной среды в образовательный процесс, продемонстрировано исследования по эффективности использования системы мобильного обучения на основе опроса студентов. По результатам опроса подтверждена целесообразность использования мобильной учебной среды при изучении студентами дисциплины «Экспертные системы» образовательной программы бакалавр специальности 122 «Компьютерные науки» и положительное отношение к автоматизированной системе анализа практических задач. На основе полученных результатов предложена система адаптивного мобильного учебной среды для интеграции в образовательный процесс. Приведены интерфейс мобильного приложения со стороны преподавателя и студента. За счет постоянного доступа к материалам учебной дисциплины, возможности улучшить оценку через выполнение дополнительных задач, а также при необходимости быстрой коммуникацией с преподавателем, система помогает лучше усваивать материалы, в свою очередь положительно отражается на финальных оценках студентов. Для проведения исследования с помощью качественных методов, использовано методологический опрос на платформе UXReality. По результатам качественных исследований выявлено мотивационные аспекты поведения респондентов и персональные ожидания от пользования системой адаптивной мобильной учебной среды. Для тестирования удобства работы с мобильным приложением, в ходе исследования использованы так называемый нейротест с применением технологии айтрекингу.

Ключевые слова: *компьютерные технологии, дистанционное обучение, мобильное приложение, анализ графического интерфейса экрана, автоматизированная система анализа, система коммуникации, технологии айтрекингу.*

Вступ

Одним із важливих першочергових напрямків розвитку інформатизації вищої освіти України є використання нових сучасних комп'ютерних технологій. При цьому інформатизація освіти спрямовується на формування та розвиток інтелектуального потенціалу держави, удосконалення форм і змісту навчального процесу, впровадження комп'ютерних методів навчання та тестування, що надає можливість вирішувати проблеми вищої освіти з урахуванням світових вимог та викликів.

Сьогодні застосування комп'ютерних технологій потребує перегляду форм і методів навчальної діяльності. Актуальність питання визначається важливістю підготовки викладача до використання комп'ютерно-орієнтованих методичних систем навчання у професійній діяльності; потребою широкого впровадження засобів інформаційних технологій у навчально-виховний процес; впливом комп'ютерних засобів на результати навчальної діяльності; залежністю відповідно сформованого мобільного навчального середовища з результатами навчання студентів; визначенням місця і ролі комп'ютерних технологій у структурі особистісно-орієнтованого навчального середовища [1].

На сьогоднішній день значно зросла кількість досліджень, предметом яких стало використання інформаційно-комунікаційних технологій у навчальному процесі. Цій темі в

Україні присвячені дослідження таких науковців, як В.Ю. Биков, Я.В. Бондаренко, В.Ф. Заболотний, Г.О. Козлакова, О.А. Міщенко, О.П. Пінчук, О.В. Шестопад та інші [2-8].

Швидкі темпи зростання комп'ютерних та інформаційно-комунікаційних технологій призвели до появи інтенсивного розвитку та використання портативних мультимедійних технологій. Портативні електронні мультимедійні технології створюють колосальні можливості для адаптації навчального середовища до потреб і вимог сучасного суспільства. Внаслідок стрімкого розвитку індустрії мобільної телефонії та її інтенсивного проникнення в навчально-педагогічну діяльність виникло та здобуло поширення мобільне навчання, відмінністю якого є здійснення навчального процесу на основі використання мобільних телефонів [9].

Саме тому на сьогодні в науковій та практичній сфері стає актуальною проблематика аналізу використання мультимедійних компонентів в сучасних технологіях мобільного навчання. Серед дидактичних засобів ЗВО, що використовуються в процесі навчання, питому вагу займає контроль. Значення контролю зростає у зв'язку зі скороченням частки аудиторних занять паралельно зі збільшенням самостійної роботи студентів. Перевірка і оцінка знань, умінь і навичок студентів є важливим компонентом процесу навчання і здійснюється протягом всього навчального року. На сучасному етапі розвитку освітніх технологій на зміну традиційним формам контролю знань приходять нові, збудовані на застосуванні комп'ютерних технологій.

Зміст статті є продовженням попередньої роботи автора [10], присвяченій проектуванню високотехнологічного адаптивного мобільного навчального середовища; розробки загальної функціональної структури адаптивного мобільного навчального середовища, визначення особливостей її застосування.

Метою цієї роботи є дослідження результатів впровадження адаптивного мобільного навчального середовища у навчальний процес та оцінка його ефективності.

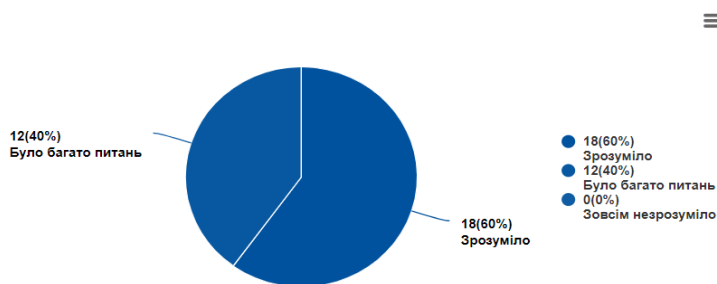
Впровадження адаптивного мобільного навчального середовища у навчальний процес

Впровадження новітніх технологій та рішень у навчальний процес в першу чергу потребує певних досліджень, результати яких зможуть чітко відобразити поточну ситуацію з навчанням тих чи інших дисциплін.

Дослідження щодо ефективності використання системи мобільного навчання у Київському національному торговельно-економічному університеті проводилися на основі опитування студентів. Для цього використовували платформу для опитувань CoolTool, за допомогою якої розроблено анкету для студентів освітньої програми бакалавр спеціальності 122 «Комп'ютерні науки», які вивчали дисципліну «Експертні системи».

На основі зібраних даних, можна зробити висновок, що дисципліна «Експертні системи» є досить складною в розумінні студентів, оскільки велика кількість студентів відповіли, що мали багато питань до лекційних матеріалів (40%), а також до завдань практичних робіт (57%). Про це свідчать графіки відповідей студентів, що побудовані на основі питань q3 та q5 (рис 1 та рис.2).

q3 Наскільки зрозуміло викладався матеріал на лекціях?



Base: 30
All respondents

Created in CoolTool

Рис. 1. Графік засвоєння лекційних матеріалів студентами за даними опитування

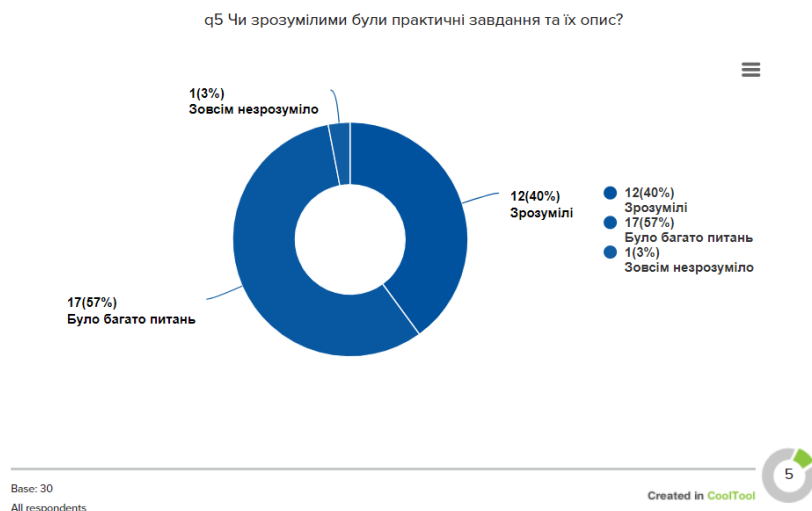


Рис. 2. Графік розуміння практичних завдань студентами за даними опитування

Як наслідок складності дисципліни слід зазначити, що більшість студентів відповіли про недостачу часу для взаємодії із викладачем для виконання (63%) та здачі (60%) практичних завдань. Про це свідчать графіки відповідей студентів, що побудовані на основі питань q6 та q7 (рис. 3 та рис. 4).

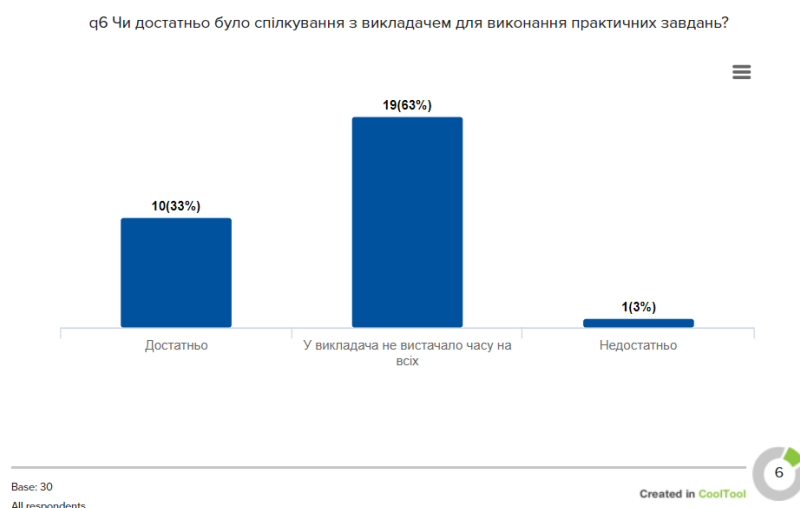


Рис. 3. Графік необхідності спілкування з викладачем

q7 Чи достатньо було часу на практичних заняттях для здачі практичних завдань викладачеві?

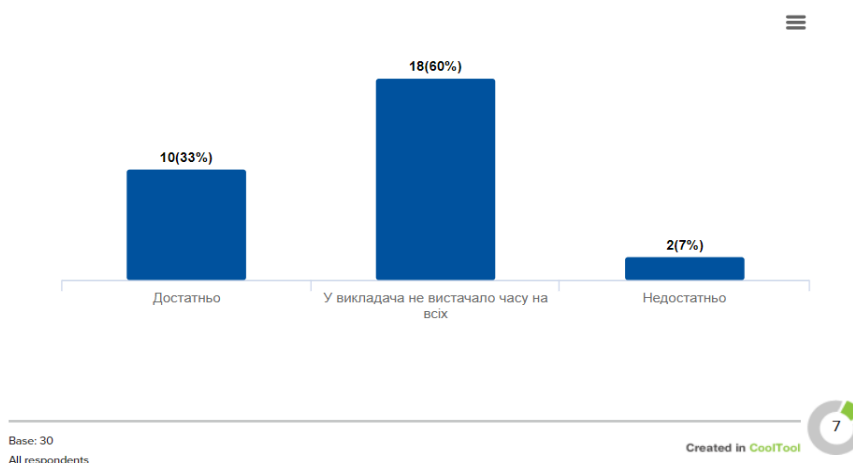


Рис. 4. Графік взаємодії з викладачем на практичних заняттях

Під час опитування студентам задано питання (q10) щодо системи оцінювання, а також можливостей покращення оцінки. Із запропонованих варіантів найбільшу кількість отримав варіант (100%) – виконання додаткових завдань за додаткові бали. Слід відзначити, що цей варіант був обраний кожним опитаним студентом. Ці дані дають змогу зрозуміти, що для кращого засвоєння матеріалу, студентам необхідно більше практичних та додаткових завдань.

На питання q12, щодо додаткового використання мобільного додатку при вивченні дисципліни всі студенти відповіли позитивно. Лише 10% опитуваних хочуть здавати практичні завдання виключно викладачу, проте 30% відзначили, що хотіли б перевіряти практичні завдання через автоматизовану систему. Інші обрали варіант «не має значення». При цьому вагома кількість студентів (30%) виявила бажання спробувати автоматизовану систему для перевірки практичних завдань (рис.5).

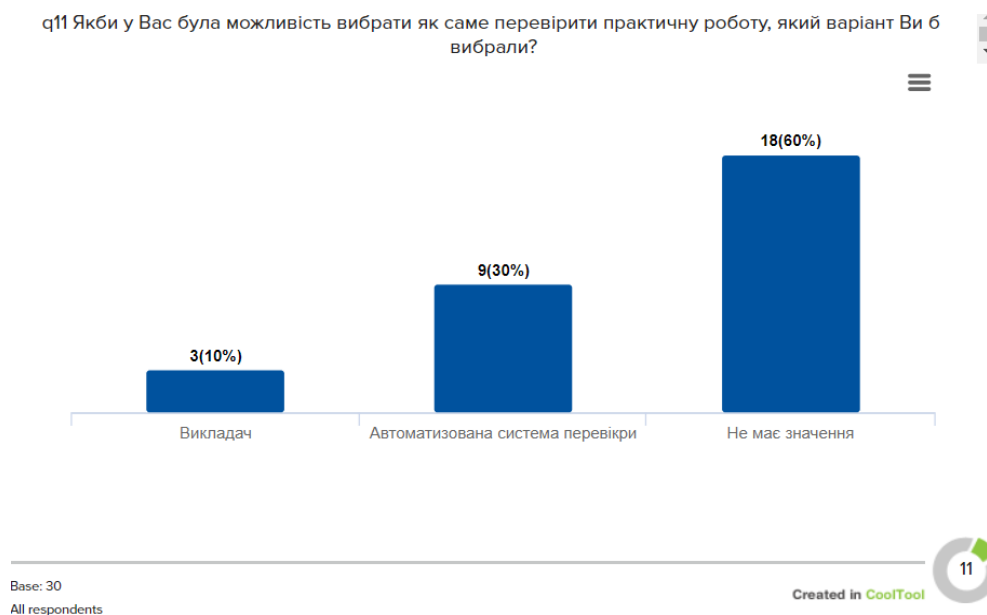


Рис. 5. Графік побажань студентів щодо способів перевірки практичних робіт

За результатами опитування можна зробити висновок, що студенти не проти використання мобільного навчального середовища під час вивчення дисципліни, а також позитивно налаштовані на тестування автоматизованої системи аналізу практичних завдань.

На основі отриманих результатів запропонована система адаптивного мобільного навчального середовища для інтеграції у навчальний процес.

Інтеграція мобільного навчального середовища у навчальний процес відбувалася у Київському національному торговельно-економічному університеті для груп ФІТ-3.8 та ФІТ-3.9 під керівництвом завідувача кафедри інженерії програмного забезпечення та кібербезпеки, доктора технічних наук, професора Криворучко Олени Володимирівни при вивченні дисципліни «Експертні системи».

Для цього, в базу даних системи адаптивного мобільного навчального середовища зареєстровано всіх студентів обраних груп і викладача, а також занесені всі лекційні матеріали та завдання з описом для практичних робіт. На додаток до кожної практичної роботи створено набір додаткових практичних завдань з описом для підвищення оцінки. Матеріали лекційних та практичних занять заповнювалися відповідно до програми та робочої програми з дисципліни «Експертні системи».

Додатково, для повноцінної роботи мобільного додатку, заповнено системний календар, в який внесено всі лекції та практичні заняття студентів обраної групи та викладача згідно їх розкладу. Таким чином, користувацький інтерфейс мобільного додатку зі сторони викладача та студента став повноцінним та функціональним.

Головні екрани мобільного додатку для викладача та студента проілюстровано на рис.6. Відповідно для кожної ролі користувачів (студента та викладача) календар відображається по різному, згідно зареєстрованих подій.

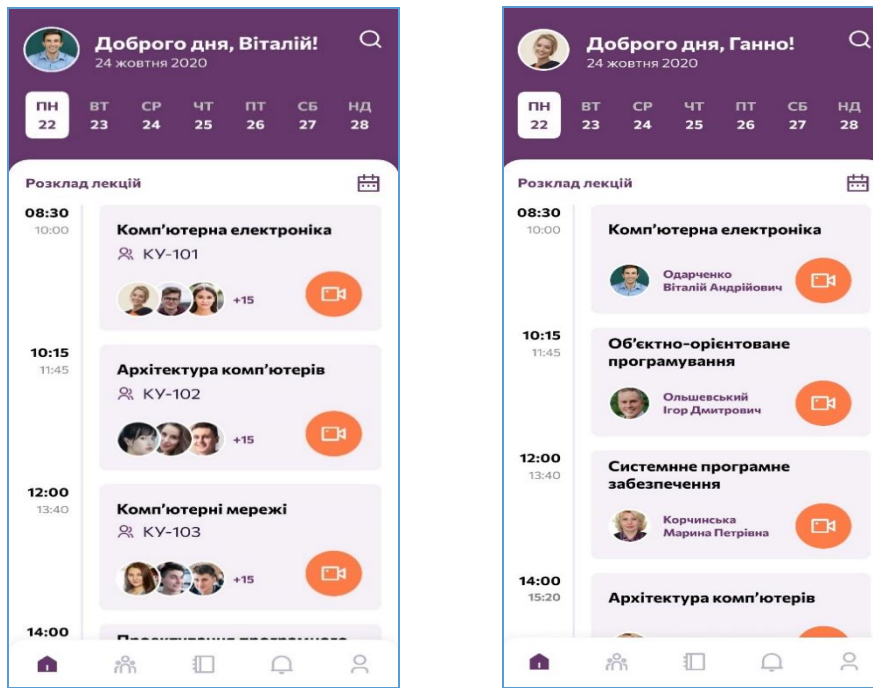


Рис. 6. Головні екрани викладача та студента

З головного екрану викладач та студент мають змогу доєднатися до заняття онлайн (звісно, якщо є така можливість) натиснувши на календарі вибрану подію. Так як в Київському національному торговельно-економічному університеті є повний доступ до системи Office-365 для внутрішнього користування, вся онлайн взаємодія організована за допомогою Microsoft Teams.

Інформація по дисципліні для викладача та студента відображається однаково у вигляді списку тем, при переході на вибрану тему відображається текстова та медійна інформація у вигляді опису теми, а також прикріплені до неї файли з додатковою інформацією, що можна завантажити безпосередньо на мобільний пристрій. Крім того, кожна тема включає в себе певну кількість практичних завдань.

Описані екрани мобільного додатку проілюстровано на рис 7.

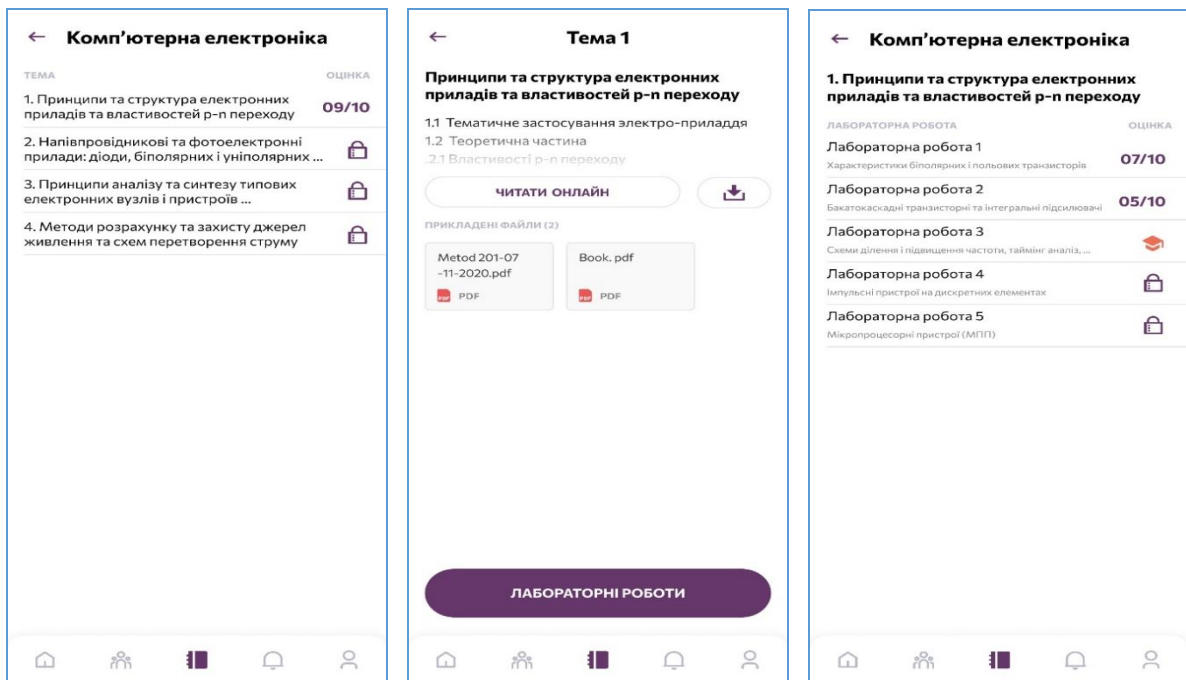


Рис. 7. Екрани тем навчальної дисципліни

Кожна онлайн лекція автоматично записується системою та зберігається. За необхідністю, записи лекцій можна додати до додаткових матеріалів навчальних тем, проте ця функція доступна лише для викладача за допомогою CMS системи.

Практичні роботи по кожній темі відкриваються одна за одною, оскільки вивчений практичний матеріал залежить від попереднього, тому, аби вивчення матеріалу було поступовим на повноцінним, доступ до наступного завдання відкривається лише після позитивного оцінювання попереднього.

В свою чергу кожна практична робота містить в собі додаткові завдання для підвищення оцінки, якщо робота з першого разу не була прийнята успішно.

Екран з описом практичної роботи, по аналогії з екраном складається з текстового опису, який можна завантажити на мобільний пристрій, додатково прикладених файлів, та шаблону, за допомогою якого можна в подальшому виконати практичну роботу і завантажити її в систему для автоматичного аналізу.

Слід зазначити, що студенти так само мали можливість здавати практичні роботи напряму викладачеві, тому у викладача була можливість виставляти оцінки в системі за допомогою інтерфейсу в CMS. Таким чином в системі вручну відзначається виконані роботи, і студентам надається доступ до наступних практичних робіт.

Більш детально графічний інтерфейс екрану практичної роботи у різних статусах проілюстровано на рис. 8.

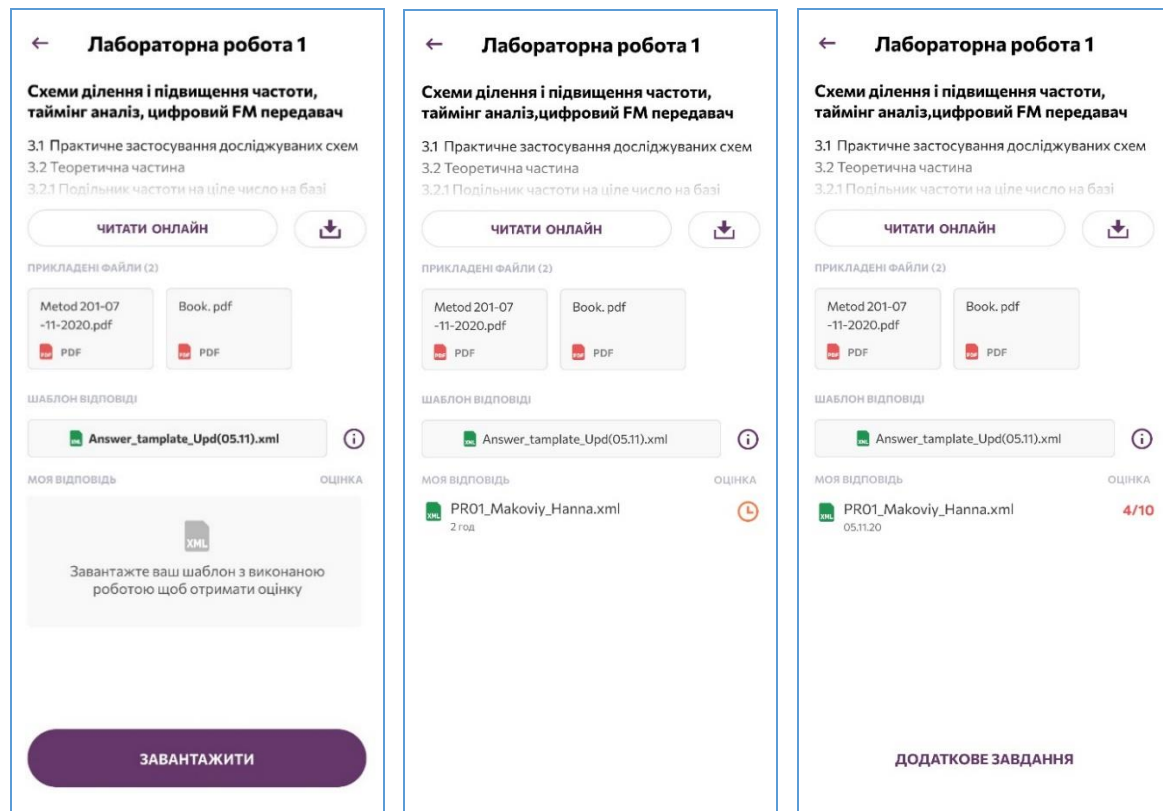


Рис. 8 Екран опису лабораторної та практичної роботи у різних статусах

Після завантаження заповненого шаблону з виконаними завданнями, аналіз відбувається не миттєво, оскільки процес обробки інформації складається з багатьох кроків та побудований асинхронно. Результат перевірки приходить по закінченню опрацювання за допомогою Push-повідомлення, при цьому, якщо екран з практичною роботою був відкритий, дані на ньому оновляються, та відобразиться оцінка. Якщо оцінка досить низька, відображається додаткова кнопка, що веде до екрану з описом додаткового практичного завдання, виконавши яке можливо підняти оцінку за практичну роботу.

Додаткові завдання розраховані таким чином, щоб сумарна оцінка за них не перевищувала максимально допустиму оцінку за практичну роботу.

Більш детально графічний інтерфейс екрану додаткової практичної роботи у різних статусах проілюстровано на рис.9.

Окрім основного функціоналу, що направлений на вивчення дисципліни в мобільному додатку також передбачено можливість для комунікації між студентами групи, для комунікації студентів з викладачем, а також екран для відображення системних сповіщень.

Графічний інтерфейс екранів комунікації показано на рис. 10.

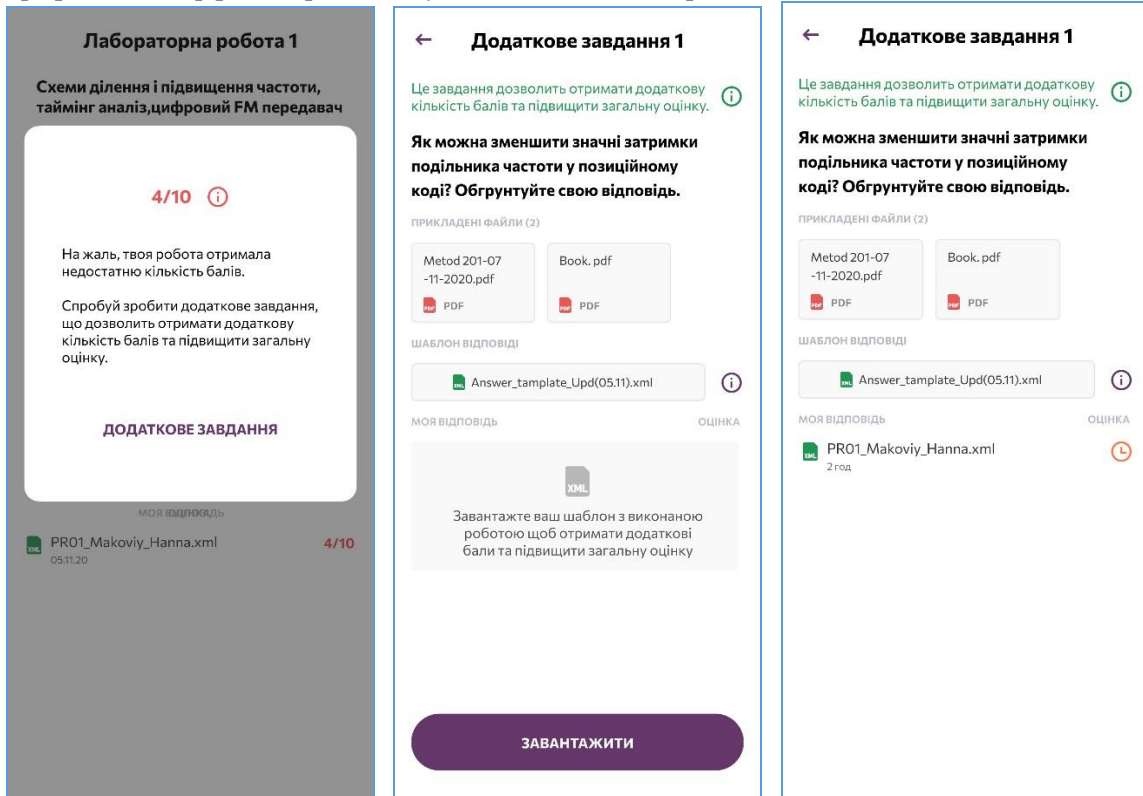


Рис. 9. Екран опису додаткової практичної роботи у різних статусах

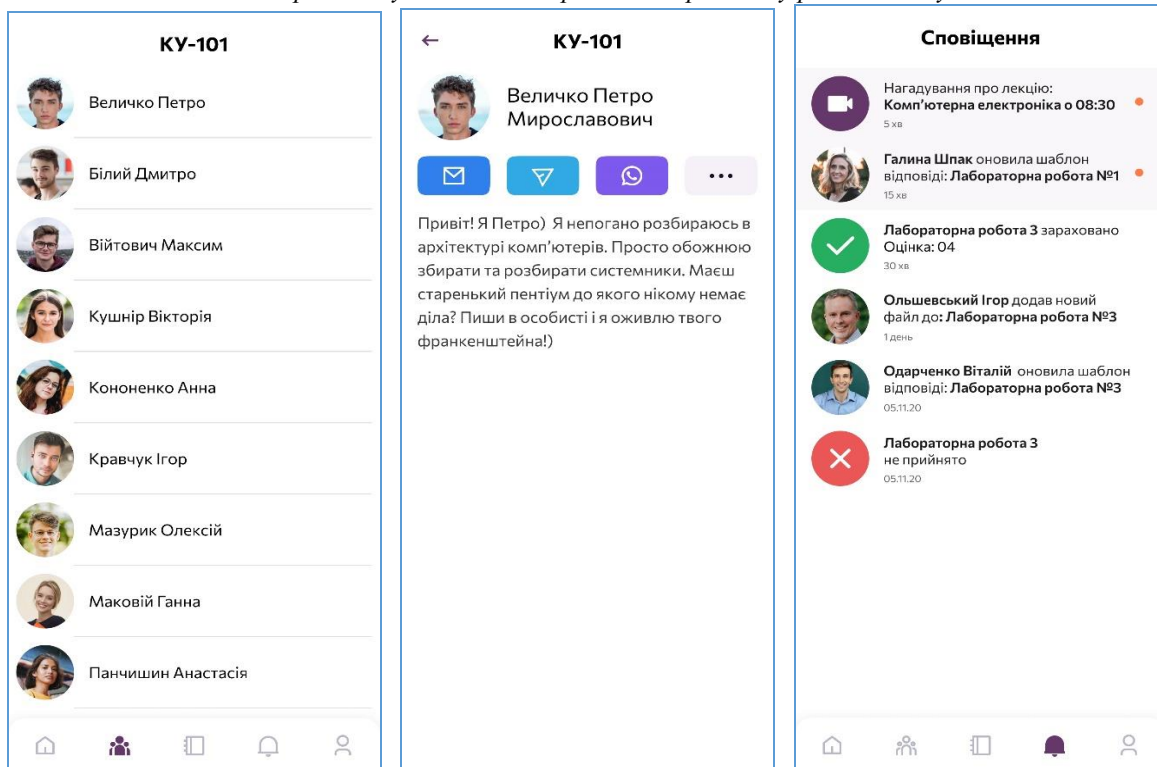


Рис. 10. Екрани комунікації в мобільному додатку

Таким чином, система адаптивного мобільного навчання надала можливість студентам в повному обсязі навчатися дисципліні з використанням автоматизованого системного аналізу, а також надала додатковий спосіб комунікації з викладачем у зручний спосіб за допомогою мобільного додатку.

Кількісні методи оцінки ефективності системи

Для оцінки ефективності системи мобільного навчального середовища проводили опитування студентів та викладача, які під час навчального процесу, вивчення (викладання) дисципліни «Експертні системи», використовували мобільний додаток. Дослідження проводилися з використанням засобів опитувальних платформ CoolTool та UXReality.

Слід зазначити, що дослідження, яке проводилося перед інтеграцією мобільного навчального середовища у навчальний процес, та дослідження, що проводилися після використання мобільного додатку під час навчання, відбувалися на різних групах студентів. Такий підхід обумовлений тим, що студенти не вивчають одну і ту саму дисципліну декілька разів.

Результати опитування проаналізовані вбудованими засобами платформи для опитувань CoolTool. На основі зібраних даних можна зробити висновок, що система мобільного адаптивного навчання з легкістю інтегрувалася у навчальний процес та стала зручним інструментом для викладача та студентів.

Порівнюючи результати опитування, зібрані перед інтеграцією мобільного навчального середовища в навчальний процес (рис. 1 та рис. 2), з тими, що отримані від студентів, які використовували мобільний додаток під час навчального процесу, повністю підтверджується складність дисципліни, оскільки студенти так само визначили, що до лекційного (70%) та практичного матеріалів (43%) виникало досить багато питань. Про це свідчать графіки відповідей студентів, що побудовані на основі питань q1.1 та q5 (рис 11 та рис. 12).

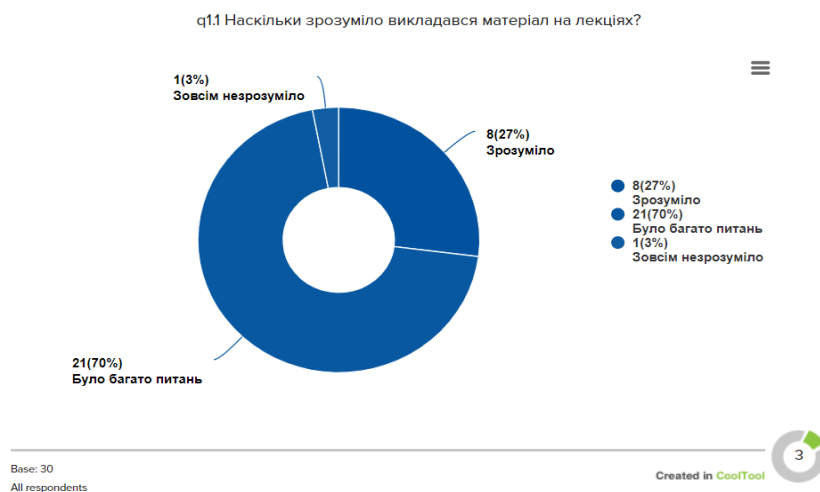


Рис. 11. Графік засвоєння лекційних матеріалів студентами з використанням мобільного додатку

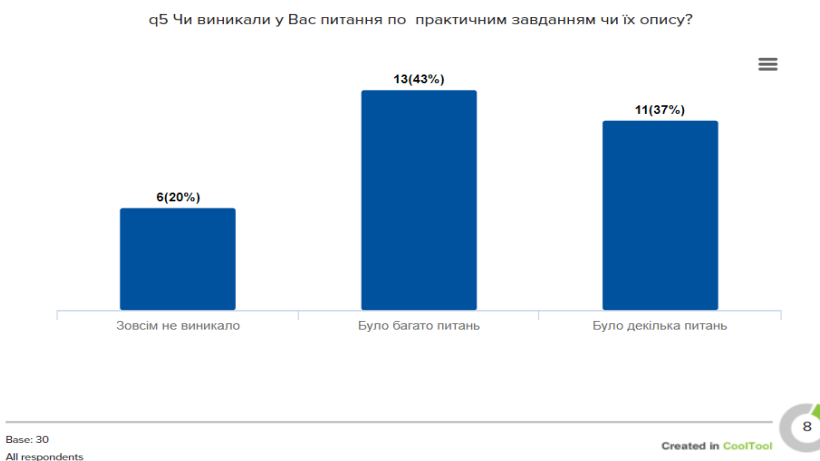


Рис. 12. Графік розуміння практичних завдань студентами з використанням мобільного додатку

У зв'язку з пандемією COVID-19, більша частина занять відбувалася дистанційно за допомогою онлайн засобів комунікації. Це дало змогу використовувати функціонал запису лекцій, а викладач в свою чергу публікував записані лекції як додаткові матеріали до тем у мобільному додатку. Таким чином у студенти мали можливість переглядати лекції за допомогою записів, що додатково за необхідністю допомагало в розумінні викладених матеріалів. Про це свідчать графіки відповідей студентів, що побудовані на основі питань q1.1.1 та q1.2 (рис 13 та рис. 14).

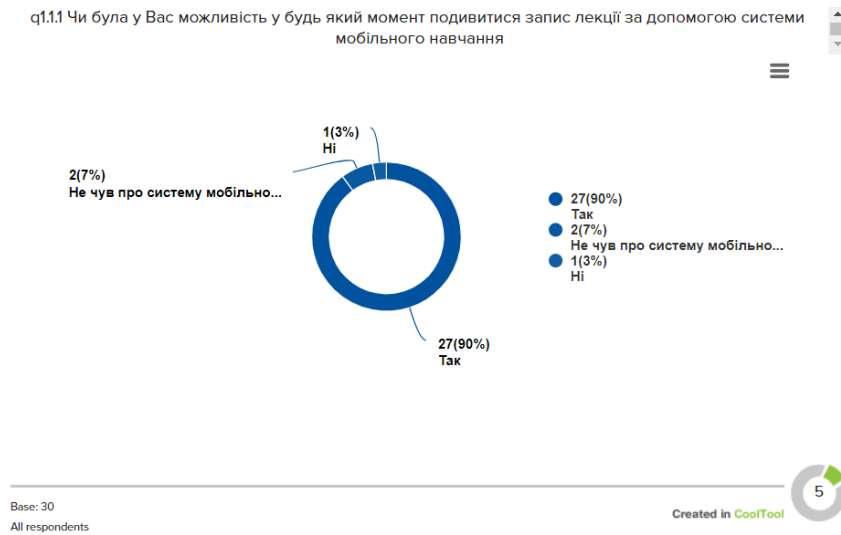


Рис. 13. Графік доступності записів лекційних занять з використанням мобільного додатку

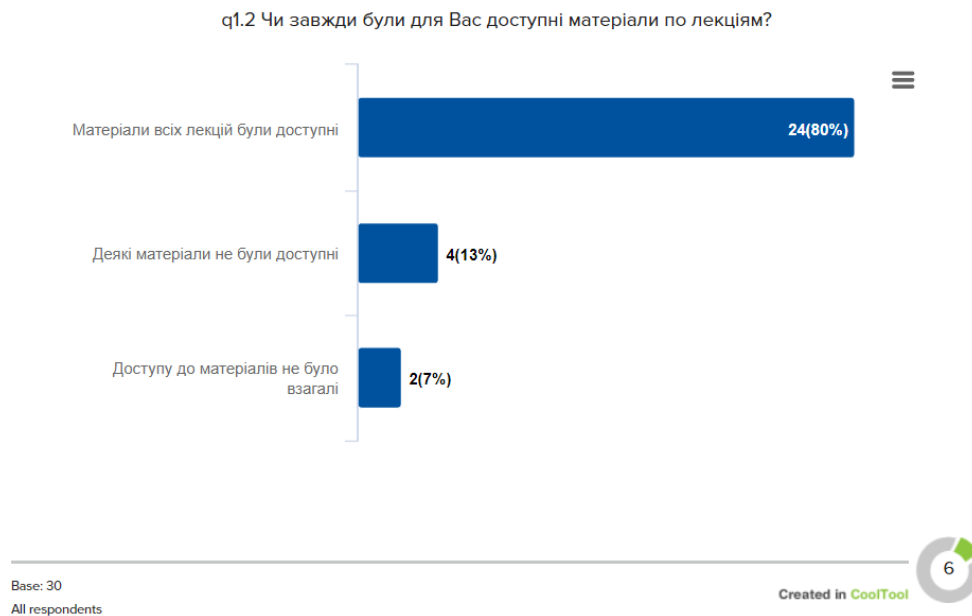


Рис. 14. Графік доступності лекційних матеріалів через мобільний додаток

Оскільки система поки що не має власного вбудованого засобу комунікації, вся взаємодія відбувалася за рахунок інтеграції адаптивного мобільного навчального середовища з існуючими системами, такими як Microsoft Teams, Viber, тощо. Так як у Київському національному торговельно-економічному університеті є доступ до системи Office 365, це в свою чергу підштовхнуло до більш тісної взаємодії системи адаптивного мобільного навчального середовища з Microsoft Teams.

За допомогою опитування, студентам задано питання (q7) щодо зручності такої комунікації з викладачем. Як і очікувалося, такий підхід створив деякі розбіжності у відповідях студентів щодо зручності використання такого способу комунікації. Тому можна зробити припущення, що розробка вбудованої системи комунікації зможе вирішити питання зручності. Більш детально результати опитування щодо комунікації зображено на графіку (рис. 15).

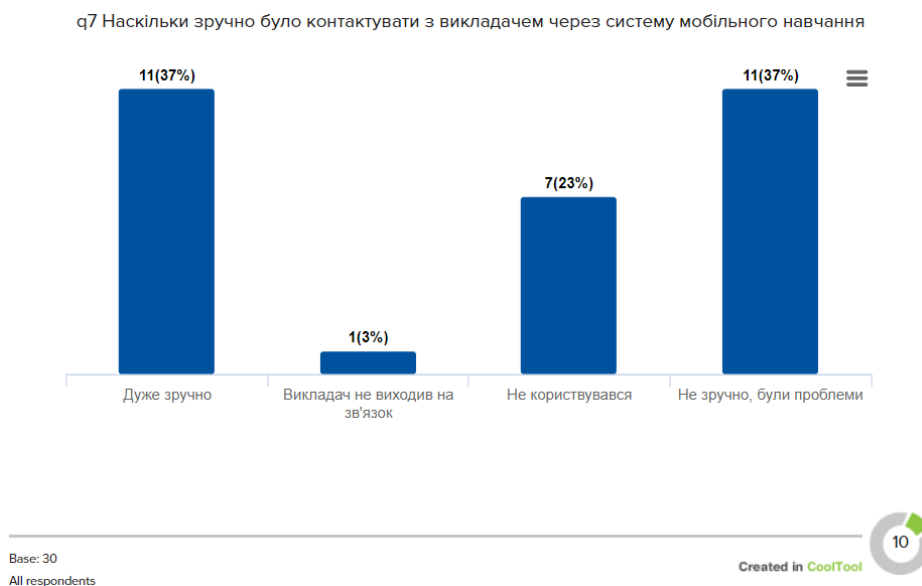


Рис. 15. Графік зручності комунікації через систему адаптивного мобільного навчального середовища

Незважаючи на проблеми з комунікацією, система адаптивного мобільного навчання в першу чергу направлена на покращення засвоєння матеріалів дисципліни, а тому основним напрямком опитування став автоматизований аналіз, та зручність його використання у навчальному процесі.

За даними опитування, 90% студентів використовували у своєму навчанні автоматизований спосіб перевірки виконаних практичних завдань за допомогою системи адаптивного мобільного навчального середовища (рис. 16).

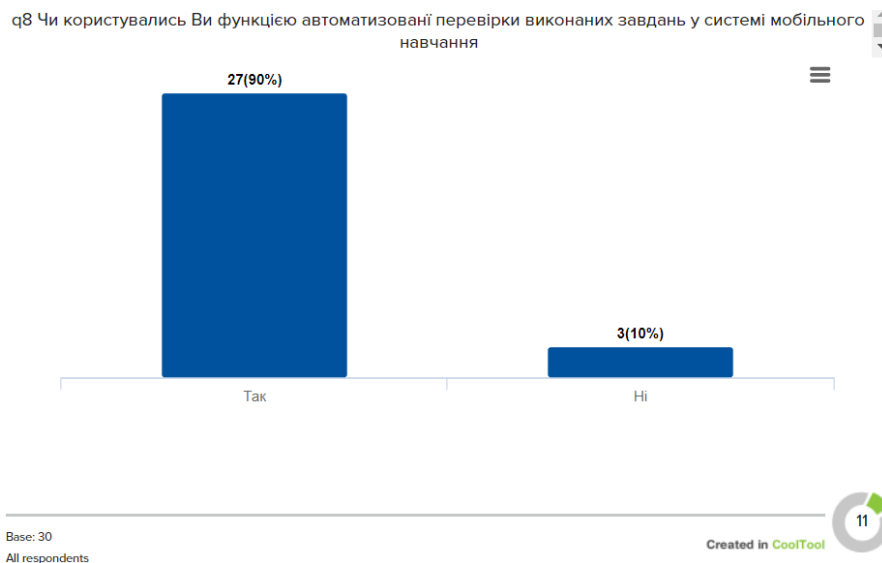


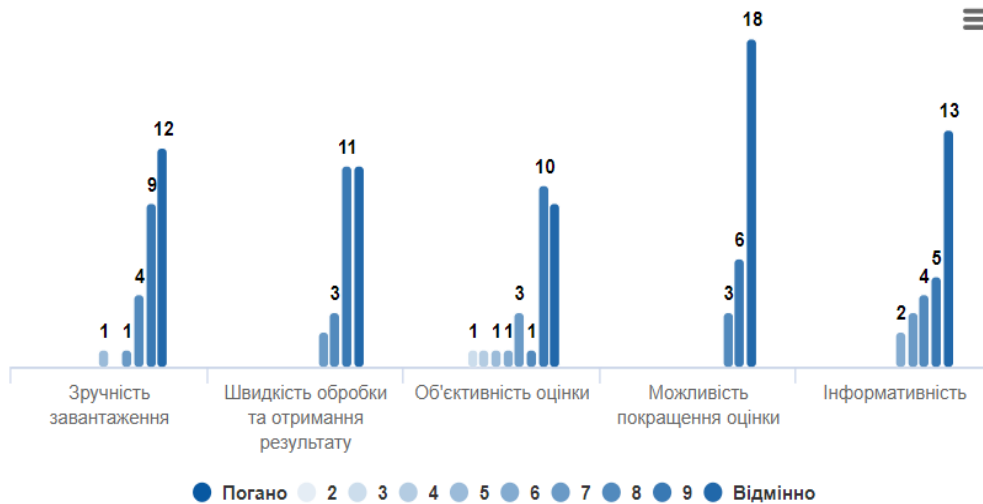
Рис. 16. Графік використання автоматизованої перевірки практичних завдань через систему адаптивного мобільного навчального середовища

Зручність використання автоматизованої перевірки практичних завдань оцінювалася за допомогою рейтингового питання (q9). Респондентами цього питання були лише ті студенти, які на питання q8 відповіли «Так». Результати опитування показали досить високий рівень задоволеності студентів при роботі з механізмом автоматизованої перевірки практичних завдань, проте, були деякі розбіжності у відповідях студентів щодо об'єктивності оцінки, яку визначала система. За рахунок цього, можна зробити висновок, що з подальшим використанням, та додатковим навчанням нейронної мережі, яка є ядром автоматизованої перевірки, можна досягти досить високого рівня об'єктивності оцінки.

Викладач зі свого боку, при виниканні ситуацій з необ'єктивністю оцінки, персонально перевіряв виконані роботи, та за необхідності коригував оцінку. Слід зазначити, що під час навчального процесу таких ситуацій було 10-15% від усіх перевірених практичних завдань. Тому

цей показник можна вважати досить позитивним. Більш детально графік оцінки автоматизованої перевірки практичних завдань проілюстровано на рис. 17. Відсоткове співвідношення результатів даного питання додатково показано на рис. 18.

q9 Оцініть якість роботи автоматизованої перевірки виконаних завдань



Base: 27
All respondents

Created in CoolTool

12

Рис. 17. Графік оцінки автоматизованої перевірки практичних завдань

q9 Оцініть якість роботи автоматизованої перевірки виконаних завдань

	Зручність завантаження	Швидкість обробки та отримання результату	Об'єктивність оцінки	Можливість покращення оцінки	Інформативність
	%	%	%	%	%
Погано	0%	0%	0%	0%	0%
2	0%	0%	0%	0%	0%
3	0%	0%	3.7%	0%	0%
4	0%	0%	3.7%	0%	0%
5	3.7%	0%	3.7%	0%	0%
6	0%	0%	3.7%	0%	7.4%
7	3.7%	7.4%	11.1%	0%	11.1%
8	14.8%	11.1%	3.7%	11.1%	14.8%
9	33.3%	40.7%	37%	22.2%	18.5%
Відмінно	44.4%	40.7%	33.3%	66.7%	48.1%

Base: 27
All respondents

Created in CoolTool

12

Рис. 18. Відсоткове співвідношення оцінки автоматизованої перевірки практичних завдань

Як наслідок такої оцінки функцій системи 93% опитуваних відповіли, що хотіли б і надалі використовувати систему мобільного навчального середовища під час навчального процесу. Про це свідчить графік відповідей студентів, що побудований на основі питань q10 (рис. 19).

q10 Чи хотіли б Ви надалі використовувати систему мобільного навчання у під час учбового процесу

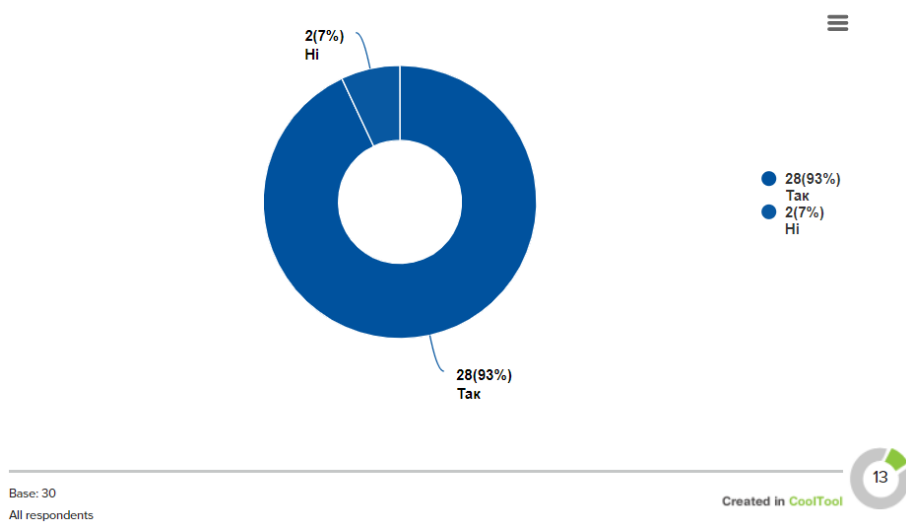


Рис. 19. Графік побажання студентів щодо подальшого використання системи

Підводячи підсумки, студентам в опитуванні запропонували в цілому оцінити якість роботи системи адаптивного мобільного навчання. Оцінювання проводилося за допомогою рейтингового питання q2.1.

В цілому, систему адаптивного мобільного навчання оцінили досить високими оцінками по шкалі від 1 до 10: найнижча середня оцінка становить 7.7 за якість взаємодії з викладачем (через те, що в системі відсутнє вбудоване середовище комунікації, а зв'язок відбувається лише за рахунок інтеграцій зі сторонніми системами).

Найвищі бали в свою чергу отримали зручність використання, швидкість взаємодії мобільного додатку, та наповненість. Ці пункти отримали найвищу середню оцінку – 8.5 балів. Більш детально узагальнена статистика зображена на рис. 20.

q2.1 Оцініть якість роботи системи мобільного навчання

	Av
Зручність	8.5
Швидкість роботи та взаємодії	8.5
Наповненість	8.5
Функціонал	8.2
Інформативність	8.2
Взаємодія з одногрупниками	8.1
Взаємодія з викладачем	7.7

Base: 30
All respondents

Created in CoolTool

Рис. 20. Узагальнена статистика оцінки якості системи студентами

Додатково, для визначення ефективності та визначення впливу системи адаптивного навчального середовища на успішність студентів під час навчального процесу, студентам задавали питання щодо їх фінальної оцінки по дисципліні «Експертні системи».

За результатами першого та другого опитувань можна зробити висновок, що система адаптивного навчального середовища позитивно впливає на успішність студентів незважаючи на деякі свої недоліки. Кількість відміток «Добре» та «Відмінно» суттєво збільшилася, а кількість відміток «Задовільно» зменшилася. Більш детально графіки фінальних оцінок (зліва – до використання системи, з правої сторони – після використання системи під час навчання) проілюстровано на рис 21.

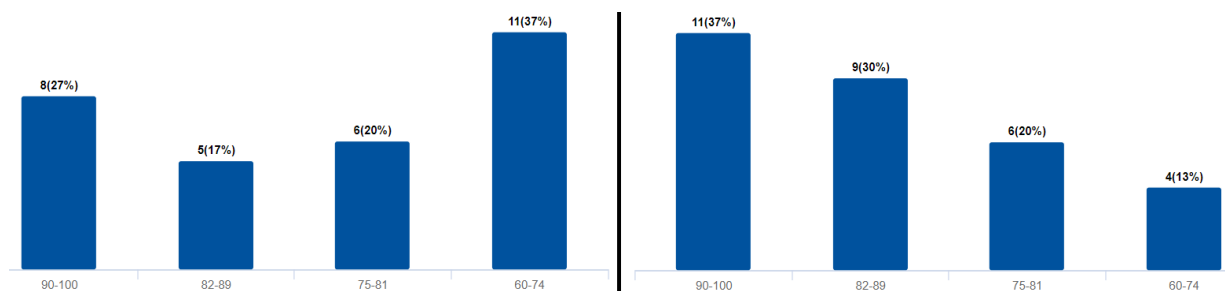


Рис. 21. Графіки фінальних оцінок (зліва – до використання, праворуч – після використання)

Таким чином, динаміка покращення навчального процесу є позитивною, оскільки система адаптивного навчального середовища впливає на всі етапи начального процесу. За рахунок постійного доступу до матеріалів навчальної дисципліни, можливості покращити оцінку через виконання додаткових завдань, а також за необхідністю, швидкою комунікацією із викладачем, система допомагає краще засвоювати матеріали, що в свою чергу позитивно відображається на фінальних оцінках студентів. Тому, на основі зібраних даних, можна зробити висновок, що використання системи є важливим елементом розвитку навчального процесу.

Якісні методи оцінки ефективності системи

Для проведення дослідження за допомогою якісних методів, використовували методологічне опитування на платформі UXReality.

За результатами якісних методів досліджень виявили мотиваційні аспекти поведінки респондентів та персональні очікування від користування системою адаптивного мобільного навчального середовища.

На відміну від кількісних методів, що ґрунтуються на статистичних процедурах, якісні дослідження носять нестандартизований характер. Вони направлені на вивчення широкого спектра проявів об'єкта і відстежують не його кількісні закономірності, а орієнтуються на розкриття причинно-наслідкових зв'язків. Основним напрямком якісного дослідження стала зручність використання мобільного додатку для викладача та студента. Тому для тестування зручності роботи з мобільним додатком, під час дослідження використовували спеціальний тип питання – так званий нейротест з використанням технології айтрекінгу.

Айтрекінг – це технологія досліджень, що дозволяє розпізнавати та відстежувати рухи та фіксації зіниці ока респондента, при спостереганні деякого візуального стимулу. Основним інструментом технології є спеціальний прилад айтрейкер, або, як у випадку з платформою UXReality, звичайна фронтальна камера мобільного телефону, та спеціальний мобільний додаток який дозволяє зібрати дані, аналізувати поведінку людського ока, будувати «карти уваги» та інші види звітів.

Айтрекінг в інтернет-маркетингу зазвичай застосовується при тестуванні на юзабіліті. Технологія допомагає виявити найбільш відвідувані місця в рамках мобільного додатку чи веб сайту, а також виділити їх мертві зони.

Крім того, за допомогою айтрекінгу можна визначити, наскільки зручна і зрозуміла навігація в мобільному додатку, які елементи привертають найбільшу увагу, емоційну реакцію відвідувача на той чи інший структурний елемент (на основі розпізнання емоції по фото з фронтальної камери). Тому для аналізу зручності використання мобільного додатку системи адаптивного мобільного навчального середовища, такий підхід з використанням технології айтрекінгу, без необхідності прив'язки до додаткового апаратного забезпечення, виявився найбільш відповідним.

Якісні дослідження відбувалися у дві фази. Перша фаза направлена на аналіз зручності використання мобільного додатку зі сторони викладацького складу кафедри. Основним завданням для викладачів було перейти на екран з практичними роботами, та подивитися, хто із студентів вже успішно їх виконав.

Друга фаза дослідження в свою чергу направлена на аналіз зручності використання мобільного додатку зі сторони студентів, що використовували його під час навчального процесу. Основним завданням для студентів було перейти на екран з практичною роботою, завантажити

додаткове завдання, та отримати оцінку за допомогою системи автоматизованого аналізу практичних завдань.

Обидві фази відбувалися у форматі фокус групи. За результатами дослідження можна зробити висновок, що мобільний додаток має інтуїтивно простий та зрозумілий інтерфейс, зручний у використанні, та надає можливість дуже швидко отримати доступ до необхідної інформації. Це підтверджується інформаційною панеллю, що побудована на основі зібраних даних за допомогою вбудованих засобів аналізу на платформі UXReality.

Перший ряд інформаційної панелі показує основні кількісні показники, які описують відображають найголовніший елемент опитування – нейротест. Слід зазначити, що середній час проходження нейротесту не перевищує 1 хвилини 20 секунд (при встановлених 3 хвилинах на виконання завдання), а це в свою чергу означає, що додаток дуже швидко реагує на дії користувача, та має зручний та інформативний користувацький інтерфейс навігації. Темп успішного завершення проходження тестування при цьому максимальний.

Другий ряд інформаційної панелі відображає залучення до процесу проходження. Інформація відображає досить високі візуального контакту та позитивне залучення до процесу. Слід зазначити, що у більшості респондентів, як зі сторони викладачів, так і зі сторони студентів, переважають позитивні емоції під час проходження нейротестів, при цьому у решти емоції трималися на рівні нейтралі. А це в свою чергу позитивно впливає на психологічний стан студента та викладача під час роботи із системою, за рахунок відсутності факторів негативного збудження.

Третій ряд описує зручність використання у числових показниках. Всі показники знаходяться в рамках 85-95%, що є відмінним результатом.

Останній ряд описує оцінку сприйняття респондентами поставленої перед ними завдання. Значення цього рядку також показують досить високий рівень сприйняття системи. Більш детально інформаційні панелі тестування викладачів та студентів проілюстровано на рис. 22 та рис .23.

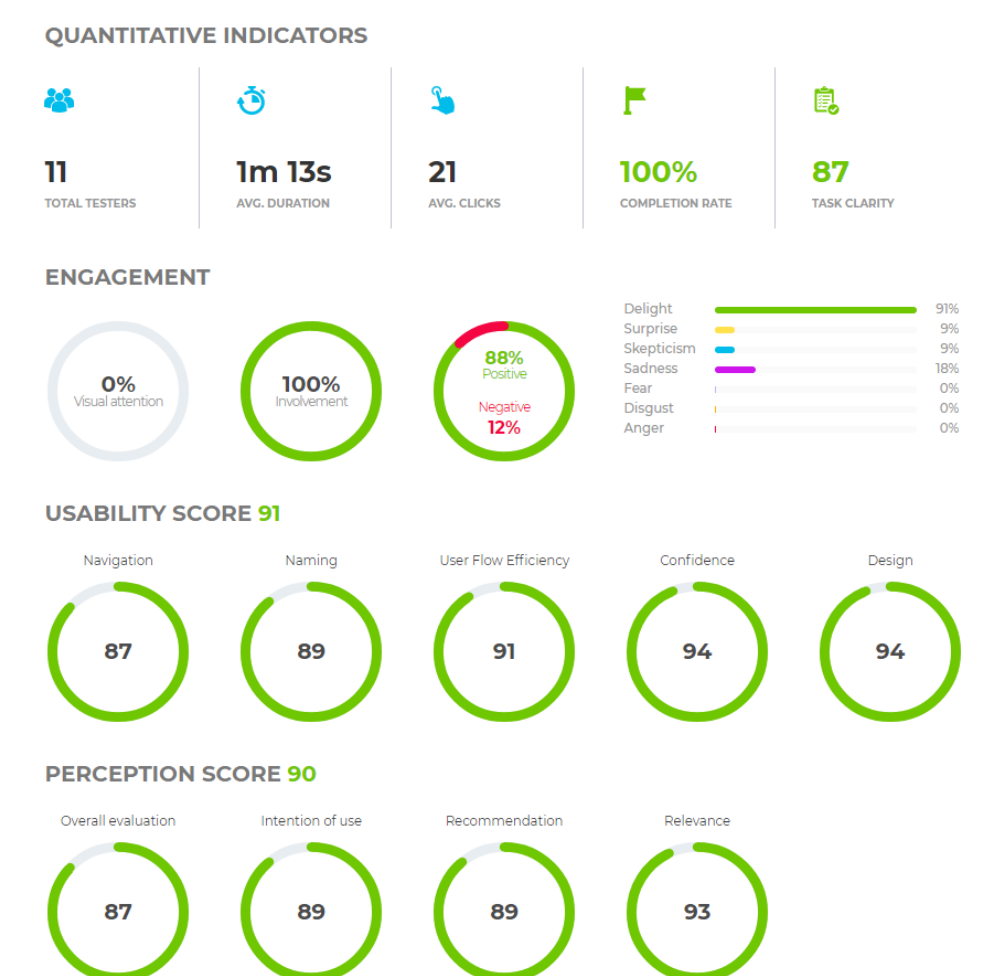


Рис. 22. Інформаційна панель результатів тестування студентів

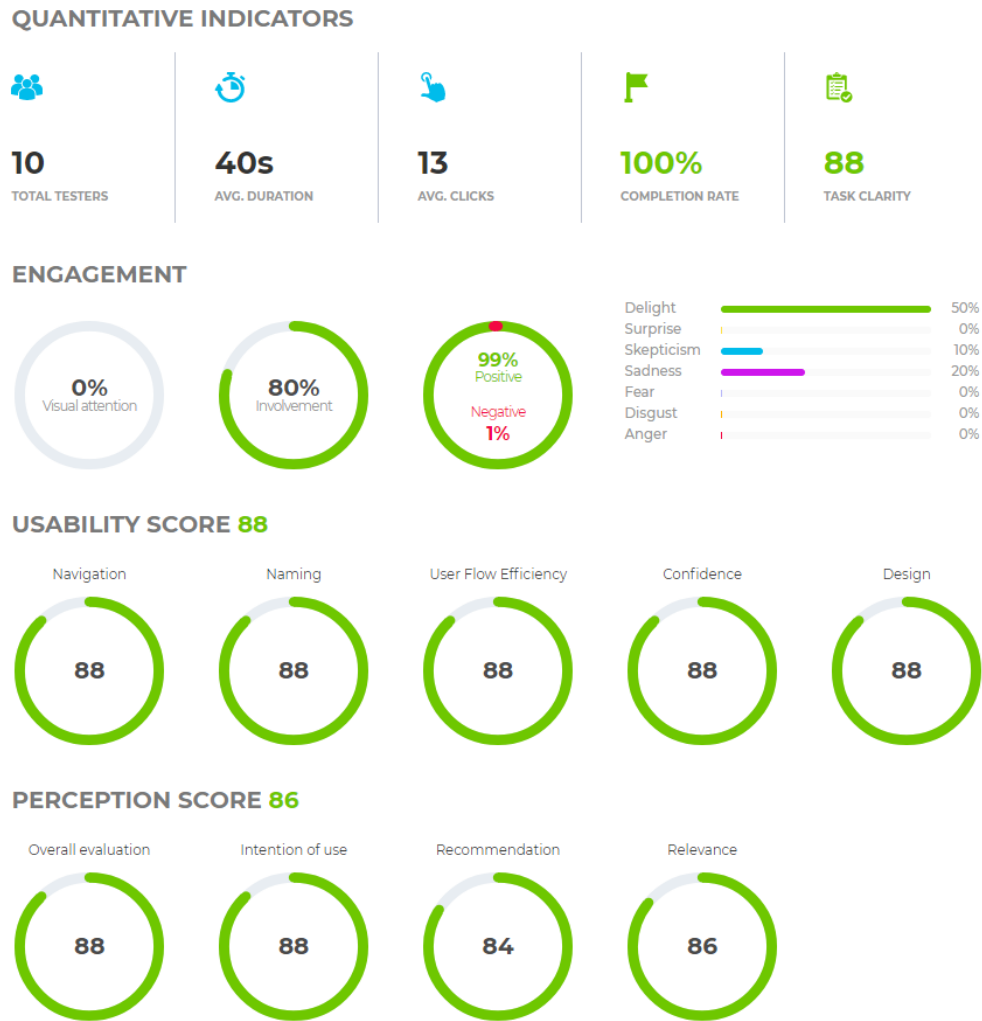


Рис. 23. Інформаційна панель результатів тестування викладачів

Особливу увагу слід приділити результатам, які зібрані за допомогою спеціальних нейротестів з використанням айтрекінгу. На основі цих питань, для кожного респондента згенеровано відео з тепловою картою, яка показує напрямок зорового контакту під час тестування інтерфейсу мобільного додатку.

За результатами згенерованого відео з тепловою картою можна зробити висновок, що більшість респондентів дуже швидко знаходять необхідні елементи навігації під час роботи з додатком, а тому можуть досить швидко переміщуватися до необхідних функціональних екранів. Крім того, різні респонденти на одних і тих самих екранах мають приблизно однакові фіксації (яскраві плями теплової карти) в одних і тих самих місцях (рис. 24).



Рис. 24. Теплова карта тестування графічного інтерфейсу

Таким чином, у процесі проведених досліджень встановлена правильність обраного напрямку досліджень і практичне впровадження системи адаптивного навчального середовища в навчальний процес це підтверджує. Новий підхід до навчання отримав високу оцінку зі сторони студентів та викладача і рекомендований до подальшого впровадження та вдосконалення.

Висновки

Отже, проведені апробації показали, що використання системи адаптивного мобільного навчального середовища позитивно впливає на освітній процес за рахунок забезпечення доступності інформації через мобільний додаток. Кількісні соціологічні дослідження показали високий рівень задоволеності студентів від роботи з системою адаптивного мобільного навчального середовища. Ефективність роботи системи під час освітнього процесу підтверджена покращеною якісною успішністю студентів (показник якісної успішності збільшився з 63% до 87%).

При цьому якісні соціологічні дослідження довели, що розроблена система володіє швидкою взаємодією з користувачем, має інформативний та інтуїтивно-зрозумілий користувацький інтерфейс, зручна у використанні. Спроектвана система показує високі показники додаткових можливостей, які необхідні для організації сучасного навчального процесу.

Впровадження алгоритму автоматизованого аналізу практичних завдань сприяє покращенню розуміння інформаційних матеріалів дисципліни за рахунок визначення додаткових завдань та їх виконання. Алгоритм показує досить високий показник якісного оцінювання та задоволеності студентів від можливостей своєї роботи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Криворучко О.В. Сучасні тенденції інформатизації освітнього процесу / О.В. Криворучко, М.А. Костюк // Science and Education a new Dimension. Natural and Technical Sciences, VI(20), Issue: 172, Budapest 2018. – С. 29-32. – Режим доступу: <https://seanewdim.com/uploads/3/4/5/1/34511564/httpsdoi.org10.31174send-nt2018-172vi20-07.pdf>
2. Ветчанін Є. Використання віртуальної реальності в освітньому процесі та профорієнтаційній роботі на прикладі програмного продукту vanalytics / Є. Ветчанін, Д. Горбатовський // Освітологічний дискурс. – 2020. – № 1. – С. 80-93. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/osdys_2020_1_9
3. Мамута М. С. Створення електронних освітніх ресурсів для студентів технічних ЗВО засобами SharePoint Designer [Електронний ресурс] / М. С.Мамута // Проблеми інженерно-педагогічної освіти. – 2020. – № 66. – С. 64-73. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pipo_2020_66_8
4. Грабовський Є. М. Аналіз використання мультимедійних компонентів в сучасних технологіях мобільного навчання [Електронний ресурс] / Є. М. Грабовський // ScienceRise. – 2019. – № 4. – С. 46-50. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/text_2019_4_12
5. Половая Н. О. Віртуальне навчання як головний вектор нової інформаційної епохи [Електронний ресурс] / Н. О. Половая // Грані. – 2018. – Т. 21, № 3. – С. 57-62. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Grani_2018_21_3_10
6. Ткачук Г. В. Досвід використання віртуальної стіни Padlet у процесі проведення дистанційного практичного заняття [Електронний ресурс] / Г. В. Ткачук, Т. В. Бондаренко // Науковий часопис НПУ імені М. П. Драгоманова. Серія 2 : Комп'ютерно-орієнтовані системи навчання. – 2018. – № 20. – С. 102-107. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nchnpu_2_2018_20_19
7. Береза І. С. Впровадження технології комп'ютерного тестування для оцінювання знань студентів ВНЗ [Електронний ресурс] / І. С. Береза // Педагогіка вищої та середньої школи. – 2017. – Вип. 1. – С. 3-12. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/PVSSh_2017_1_3
8. Постернак Н. О. Використання інтернет-технологій у роботі викладача вищого навчального закладу [Електронний ресурс] / Н. О. Постернак // Молодий вчений. – 2017. – № 4. – С. 425-428. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/molv_2017_4_102
9. Криворучко О.В. Теоретико-методологічні вимоги до проектування адаптивного мобільного навчального середовища [Текст] / О.В. Криворучко, М.А. Костюк, М.І. Цюцюра //

Управління розвитком складних систем. – 2019. – № 38. – С. 179-185, dx.doi.org\10.6084/m9.figshare.9788708. – Режим доступу: <http://repository.knuba.edu.ua/bitstream/handle/987654321/2556/30.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

10. Костюк М.А. Проектування алгоритму автоматизованого аналізу виконаних завдань в системі мобільного навчання [Текст] / М.А.Костюк // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2020. – № 5-6. – С. 79-86. – Режим доступу: http://visnikkrnu.kdu.edu.ua/statti/2020_5_2020-5-6-79.pdf

REFERENCES

1. O.V. Kryvoruchko, M.A. Kostiuk Modern tendencies of informatization of educational process: Science and Education a new Dimension. Natural and Technical Sciences, VI(20), Issue: 172, Budapest 2018. P. 29-32. URL: <https://seanewdim.com/uploads/3/4/5/1/34511564/httpsdoi.org10.31174send-nt2018-172vi20-07.pdf> [in Ukrainian]
2. E. Vetchanin, D. Gorbatovsky The use of virtual reality in the educational process and career guidance work on the example of a software product: vranalytics, Educational discourse. – 2020. – № 1. – P. 80-93. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/osdys_2020_1_9 [in Ukrainian]
3. M. S.Mamuta Creation of electronic educational resources for students of technical free economic by means of SharePoint Designer: Problems of engineering and pedagogical education. – 2020. – No 66. – P. 64-73. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pipo_2020_66_8 [in Ukrainian]
4. E. M. Grabovsky Analysis of the use of multimedia components in modern mobile educational technologies : ScienceRise. – 2019. – No 4. – P. 46-50. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/textc_2019_4_12 [in Ukrainian]
5. N. O. Polovaya Virtual learning as the main vector of the new information age : Edges. – 2018. - T. 21, No 3. – P. 57-62. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Grani_2018_21_3_10 [in Ukrainian]
6. G. V. Tkachuk, T. V. Bondarenko Experience of using the virtual wall Padlet in the process of conducting a remote practical lesson : Scientific journal of NPU named after MP Drahomanov. Series 2: Computer-based learning systems – 2018. – No 20. – P. 102-107. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nchnpu_2_2018_20_19 [in Ukrainian]
7. I. S. Bereza Introduction of computer testing technology for assessing the knowledge of university students : Higher and secondary school pedagogy - 2017. – Issue. 1. – P. 3-12. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/PVSSh_2017_1_3 [in Ukrainian]
8. N.O. Posternak The use of Internet technologies in the work of a teacher of higher education : A young scientist – 2017. – No 4. – P. 425-428. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/molv_2017_4_102 [in Ukrainian]
9. O. V. Kryvoruchko, M. A. Kostiuk, M. I. Tsyutsyura Theoretical and methodological requirements for the design of adaptive mobile learning environment : Management of complex systems development. – 2019. – № 38. – P. 179-185, dx.doi.org\10.6084/m9.figshare.9788708. – URL: <http://repository.knuba.edu.ua/bitstream/handle/987654321/2556/30.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [in Ukrainian]
10. M. A. Kostiuk Designing an algorithm for automated analysis of completed tasks in the mobile learning system : Bulletin of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradsky National University. – 2020. – № 5-6. – P. 79-86. – URL: http://visnikkrnu.kdu.edu.ua/statti/2020_5_2020-5-6-79.pdf [in Ukrainian]

UDC 539.3

The calculation of the thermal stressed state of multilayer plates of a non-canonical shape

A. I. Merkulova, D. O. Merkulov, Ie. Yu. Misiura, O. V. Postnyi

Merkulova Alyona*PhD student*

A. Pidhornyi Institute for Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2/10 Pozharsky Street, Kharkiv, Ukraine, 61046
e-mail: alyonamalukhina@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-9659-2562>

Merkulov Dmytro*PhD student*

A. Pidhornyi Institute for Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2/10 Pozharsky Street, Kharkiv, Ukraine, 61046
e-mail: kulmerov@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-5697-200X>

Misiura Ievgeniia*Assistant professor*

Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, 9a Nauky Avenue, Kharkiv, Ukraine, 61166
e-mail: misuraeu@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-5208-0853>

Postnyi Oleksii*PhD student*

A. Pidhornyi Institute for Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2/10 Pozharsky Street, Kharkiv, Ukraine, 61046
e-mail: alex.po@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-3151-3891>

The solution of the problem of stationary thermal elasticity of multilayer plates of a non-canonical shape in a plane is proposed. It is based on the immersion method, where a complex non-canonical shape is merged into the canonical shape. Therefore, a plate of a non-canonical shape with arbitrary boundary conditions is "immersed" into a canonical one. To ensure that the specified boundary conditions are met compensating loads distributed along the contour of the initial structure are added to the auxiliary structure. The intensities of compensating loads are determined from a system of integral equations. Deformation of the layers of the plates are described within the framework of the first-order theory, taking into account a transverse shear strain in each layer. The field of temperature loads is obtained by solving the non-stationary problem of thermal conductivity of a multilayer plate. The temperature stresses in a five-layer plate when heated by a film heat source have been investigated.

Keywords: *multilayer plate, complex shape, heat source, temperature, thermal elasticity*

Розрахунок термонапруженого стану багатoshарових пластин неканонічної форми

Меркулова*аспірант***Альона Ігорівна**

Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України, вул. Пожарського, 2/10, м. Харків, Україна, 61046

Меркулов*аспірант***Дмитро Олександрович**

Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України, вул. Пожарського, 2/10, м. Харків, Україна, 61046

Місюра*доцент***Євгенія Юрївна**

Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, просп. Науки, 9а, м. Харків, Україна, 61166

Постний*аспірант***Олексій Віталійович**

Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України, вул. Пожарського, 2/10, м. Харків, Україна, 61046

Однією з актуальних задач в сучасній техніці є достовірне визначення температурних полів і напружень в елементах конструкцій. Огляд моделей і методів розв'язання задач і термопружності показав, що найбільш досліджені однорідні конструкції. Пропонується метод розв'язання задачі стаціонарної термопружності багат шарових пластин неканонічної форми в плані, який базується на прийомі занурення складної області в область канонічної форми. Задана пластина неканонічної форми з довільними граничними умовами «занурюється» в пластину канонічної форми. Найпростіший розв'язок задачі в аналітичному вигляді можна отримати, коли у якості допоміжної застосовується шарнірно оперта пластина прямокутної форми у плані з тією ж композицією шарів. Умови навантаження допоміжної конструкції збігаються з умовами навантаження вихідної конструкції. Для забезпечення виконання заданих граничних умов до допоміжної конструкції додаються додаткові компенсуючі навантаження, що розподілені вздовж контуру вихідної конструкції. Інтенсивності компенсуючих навантажень визначаються з системи інтегральних рівнянь, в основі якої лежать вихідні граничні умови. Розв'язок системи одержано шляхом розвинування шуканих функцій у тригонометричні ряди у допоміжній області і вздовж контуру вихідної конструкції та подальшого розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь відносно коефіцієнтів розвинувань. Після знаходження значень компенсуючих навантажень визначаються переміщення та напруження у шарах вихідної конструкції. Деформації шарів пластин описуються у рамках теорії першого порядку, що враховує деформації поперечного зсуву в кожному шарі. Рівняння термопружної рівноваги та граничні умови одержані з варіаційного принципу. Поле температурних навантажень отримано з розв'язку нестационарної задачі теплопровідності багат шарової пластини. На верхній та нижній поверхнях пластини відбувається конвективний теплообмін, а бічна поверхня вважається ідеально теплоізолюваною. Досліджено температурні напруження у п'ятишаровій пластині складної форми при нагріванні плівковим джерелом тепла.

Ключові слова: багат шарова пластина, складна форма, джерело тепла, температура, термопружність.

Расчет термонапряженного состояния многослойных пластин неканонической формы

**Меркулова
Алёна Игоревна**

*аспирант,
Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного Национальной академии наук Украины, ул. Пожарского, 2/10, Харьков, Украина, 61046*

**Меркулов
Дмитрий
Александрович
Мисюра
Евгения Юрьевна**

*аспирант
Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного Национальной академии наук Украины, ул. Пожарского, 2/10, Харьков, Украина, 61046
доцент,
Харьковский национальный экономический университет имени Семёна Кузнецца, просп. Науки 9а, Харьков, Украина, 61166*

**Постный
Алексей Виталиевич**

*аспирант
Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного Национальной академии наук Украины, ул. Пожарского, 2/10, Харьков, Украина, 61046*

Предлагается метод решения задачи стационарной термоупругости многослойных пластин неканонической формы в плане, который базируется на приеме погружения сложной области в область канонической формы. Пластина неканонической формы с произвольными граничными условиями «погружается» в пластину канонической формы. Для обеспечения выполнения заданных граничных условий к вспомогательной конструкции добавляются дополнительные компенсирующие нагрузки, распределенные вдоль контура исходной конструкции. Интенсивности компенсирующих нагрузок определяются из системы интегральных уравнений. Деформации слоев пластин описываются в рамках теории первого порядка, учитывает деформации поперечного сдвига в каждом слое. Поле температурных нагрузок получено в результате решения нестационарной задачи теплопроводности многослойной пластини. Исследованы температурные напряжения в пятислойной пластине при нагревании пленочным источником тепла.

Ключевые слова: многослойная пластина, сложная форма, источник тепла, температура, термоупругость.

1. Introduction

Widespread usage of multilayer structural elements in various fields of technology is associated with the need to develop the methods for their calculation at different loads, such as thermal effects. The analysis of literature sources shows that the homogeneous structures are the most studied ones [1–5]. The models and methods of solving heat conduction and thermal elasticity problems are reviewed in [6, 7]. The problems of thermal elasticity of multilayer plates and shells are most often solved for objects of canonical shape, and the law of temperature distribution over the thickness and surface of the structure is usually given, but not obtained from solving the problem of thermal conductivity of these structural elements [6–12].

In this work, we propose a method for solving the problem of thermal elasticity of multilayer plates of noncanonical shape in the plane under the influence of temperature fields, which are determined from the solution of the problem of stationary thermal conductivity.

2. Unresolved issues and goals of the work

From the analysis of publications on thermoelastic deformation of multilayer structural elements we can conclude that each of these research methods has its advantages and disadvantages which limit their scope. In addition, the deformation of multilayer plates is often considered by using the classical theory, although the plate may consist of layers whose physical and mechanical characteristics differ significantly. Therefore, the development of new methods and improvement of existing methods for calculating multilayer plates of a complex shape is of great importance.

3. Basic relations

Let us consider a multilayer plate assembled from I layers of constant thickness and assigned to the Cartesian coordinate system, which is connected to the outer surface of the first layer. On the coordinate surface the plate occupies an area G bounded by the contour L . The plate is subjected to a system of force and heat loads.

The behavior of the plate is described within the framework of a refined first-order theory that takes into account the shear strains [5, 13]. It is assumed that the contact between the layers prevents their delamination and mutual slippage. The displacements of the plate points are represented as

$$\begin{aligned} u^i &= u + \sum_{j=1}^{i-1} h_j \psi_x^j + (z - \delta_{i-1}) \psi_x^i, & v^i &= v + \sum_{j=1}^{i-1} h_j \psi_y^j + (z - \delta_{i-1}) \psi_y^i, \\ w^i &= w, & \delta_i &= \sum_{j=1}^i h_j, & \delta_{i-1} &\leq z \leq \delta_i, & i &= \overline{1, I} \end{aligned} \quad (1)$$

where $u = u(x, y)$, $v = v(x, y)$, $w = w(x, y)$ are displacements of the coordinate surface point in the direction of the coordinate axes; $\psi_x^i = \psi_x^i(x, y)$, $\psi_y^i = \psi_y^i(x, y)$ are angles of rotation of a normal element in the i -th layer around the axes Ox and Oy ; h_j is the thickness of the j -th layer. The layer strains ε_x^i , ε_y^i , γ_{xy}^i , γ_{xz}^i , γ_{yz}^i are determined according to the Cauchy formulas. Stresses and strains in the i -th layer are related by Hooke's law

$$\begin{aligned} \sigma_x^i &= \frac{E_i}{1 - \nu_i^2} (\varepsilon_x^i + \nu_i \varepsilon_y^i) - \frac{E_i}{1 - \nu_i} \alpha_i^t T_i, & \sigma_y^i &= \frac{E_i}{1 - \nu_i^2} (\varepsilon_y^i + \nu_i \varepsilon_x^i) - \frac{E_i}{1 - \nu_i} \alpha_i^t T_i, \\ \tau_{xy}^i &= G_i \gamma_{xy}^i, & \tau_{xz}^i &= G_i \gamma_{xz}^i, & \tau_{yz}^i &= G_i \gamma_{yz}^i, & i &= \overline{1, I}, \end{aligned} \quad (2)$$

where $G_i = \frac{E_i}{2(1+\nu_i)}$,

E_i is the Young's modulus of the i -th layer material; ν_i is the Poisson's ratio; α_i^t is the coefficient of linear thermal expansion of the i -th layer material; T_i is the temperature change in relation to the temperature of the unstressed state.

Equilibrium equations for a multilayer plate are obtained on the basis of the Lagrange's variational principle

$$\mathbf{C} \mathbf{U} = \mathbf{Q}^t - \mathbf{Q}, \quad (x, y) \in G, \quad (3)$$

as well as the corresponding boundary conditions

$$\mathbf{\Gamma} \mathbf{U} = \mathbf{Q}^L. \quad (4)$$

Here \mathbf{Q} is the vector of force loads, \mathbf{U} is the vector of the required displacement functions,

$$\begin{aligned} \mathbf{U} &= \{u, v, w, \psi_x^i, \psi_y^i\}^T; & \mathbf{Q}^t &= \{C_{t,x}^i, C_{t,y}^i, 0, D_{t,x}^i, D_{t,y}^i\}^T; & \mathbf{Q}^L &= \{C_t^i, 0, 0, D_t^i, 0\}^T; \\ C_t^i &= \sum_{j=1}^I N_t^j, & D_t^i &= h_i \sum_{j=i}^{I-1} N_t^{j+1} + M_t^i; \\ N_t^i &= \frac{E_i \alpha_i^t}{1 - \nu_i} \int_{\delta_{i-1}}^{\delta_i} T_i dz, & M_t^i &= \frac{E_i \alpha_i^t}{1 - \nu_i} \int_{\delta_{i-1}}^{\delta_i} T_i (z - \delta_{i-1}) dz, & i &= \overline{1, I}. \end{aligned}$$

The elements of the symmetric matrix \mathbf{C} (3) and the matrix $\mathbf{\Gamma}$ (4) are given in [5, 11].

4. Solution method

The solution to the problem of thermal elasticity is based on the immersion method developed previously for solving the problem of unsteady dynamics of multilayer structures [14]. The initial multilayer plate of arbitrary shape in plane is immersed in an auxiliary enveloping multilayer plate with the same composition of layers. The shape of the enveloping plate is chosen in such a way that a simple analytical solution can be obtained. In this work a hinged rectangular multilayer plate is chosen as an

auxiliary one. The loading conditions for the auxiliary plate in the area G coincide with the loading conditions for the initial plate.

To ensure the fulfillment of the actual boundary conditions (4), additional compensating forces and moments are applied to the auxiliary plate along the contour L $\mathbf{Q}^c = \{q_j^c(x, y)\}$, $(x, y) \in L$, $j = \overline{1, 2I + 3}$. The functions of compensating loads enter the equations of thermoelastic equilibrium (3) in the form of integral relations:

$$p_j^c(x, y) = \int_0^{s^*} q_j^c(x_L, y_L) \delta(x - x_L, y - y_L) ds, \quad j = \overline{1, 2I + 3}, \quad (5)$$

where $\delta(x - x_L, y - y_L)$ is the two-dimensional Dirac δ -function; L : $x_L = x(s)$, $y_L = y(s)$, $0 \leq s \leq s^*$; s is the current arc length; s^* is the plate perimeter.

Boundary conditions (4) taking into account (5) lead to a system of integral equations for determining the intensities of compensating loads

$$\Gamma \mathbf{U}[\mathbf{Q}^c(x, y)] = \mathbf{Q}^L, \quad (x, y) \in L. \quad (6)$$

The method for solving system (6) is that the functions of displacements \mathbf{U} , force \mathbf{Q} , temperature \mathbf{Q}^t and compensating \mathbf{P}^c (5) loads are expanded into trigonometric series in functions that satisfy the conditions for the hinge support of the auxiliary rectangular plate

$$\begin{aligned} u_j(x, y) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_{jmn} B_{jmn}(x, y), \quad q_j(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} q_{jmn} B_{jmn}(x, y), \\ q_j^t(x, y) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} q_{jmn}^t B_{jmn}(x, y), \quad p_j^c(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} p_{jmn}^c B_{jmn}(x, y), \quad (7) \\ B_{1mn} &= \cos \frac{m\pi x}{A} \sin \frac{n\pi y}{B}, \quad B_{2mn} = \sin \frac{m\pi x}{A} \cos \frac{n\pi y}{B}, \quad B_{3mn} = \sin \frac{m\pi x}{A} \sin \frac{n\pi y}{B}, \\ B_{3+i, mn} &= B_{1mn}, \quad B_{3+I+i, mn} = B_{2mn}, \quad i = \overline{1, I}, \quad j = \overline{1, 2I + 3}; \end{aligned}$$

A and B are geometric dimensions of the plate according to the coordinate axes.

At the same time, the functions of compensating loads and functions included in the boundary conditions (4) are expanded in a series along the contour L

$$q_j^c(s) = \sum_{\alpha=1,2} \sum_{\mu=0}^{\infty} f_{j\alpha\mu} d_{\alpha\mu}(s), \quad u_j(s) = \sum_{\alpha=1,2} \sum_{\mu=0}^{\infty} u_{j\alpha\mu} d_{\alpha\mu}(s), \quad j = \overline{1, 2I + 3}, \quad (8)$$

where $d_{1\mu} = \sin[\mu\gamma(s)]$, $d_{2\mu} = \cos[\mu\gamma(s)]$, $\gamma(s) = 2\pi \int_0^s d\tilde{s} / \int_0^{s^*} d\tilde{s}$, $0 \leq \gamma(s) \leq 2\pi$.

As a result of the expansions (7), (8) and further transformations, the system of integral equations (6) is reduced to a system of linear algebraic equations for the coefficients of expansion into a series of functions of compensating loads $f_{j\alpha\mu}$, the solution of which makes it possible to determine the values of compensating loads. Finally, the solution to the problem (3), (4) can be represented as

$$u_j(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{2I+3} \eta_{jk}^{mn} \left[q_{jmn} - q_{jmn}^t + \sum_{\alpha=1,2} \sum_{\mu=0}^{\infty} f_{j\alpha\mu} \theta_{j\alpha\mu}^{mn} \right] B_{jmn}, \quad j = \overline{1, 2I + 3},$$

where η_{jk}^{mn} are the coefficients of the inverse matrix obtained by expanding the displacement functions from the equilibrium equations (3) into series in functions satisfying the conditions for the hinged support of the auxiliary rectangular plate;

$$\theta_{j\alpha\mu}^{mn} = \frac{4}{AB} \int_0^{s^*} d_{\alpha\mu}(s) B_{jmn}(x_L, y_L) ds \quad j = \overline{1, 2I + 3}.$$

5. Numerical results

The efficiency and effectiveness of the developed method is illustrated by solving the problem of thermal elasticity of a multilayer plate, the contour of which is made up of K line segments and K arcs of circles conjugated to them ($K = 4$). The sections of the contour s_{2k-1} , which are line segments, are given by the following equations:

$$x_L = x_{2k-1} + (S - S_{2(k-1)}) \cos \alpha_{2k-1}, \quad y_L = y_{2k-1} + (S - S_{2(k-1)}) \sin \alpha_{2k-1}, \quad k = \overline{1, K},$$

where the point with coordinates (x_{2k-1}, y_{2k-1}) is the beginning of $(2k - 1)$ -th straight line segment.

The sections of the contour s_{2k} , which are circular arcs, are given by the ratios:

$$\begin{aligned} x_L &= x_{2k} + R_k \left[\sin \left(\frac{S - S_{2k-1}}{R_k} + \alpha_{2k-1} \right) - \sin \alpha_{2k-1} \right], \\ y_L &= y_{2k} - R_k \left[\cos \left(\frac{S - S_{2k-1}}{R_k} + \alpha_{2k-1} \right) - \cos \alpha_{2k-1} \right], \quad k = \overline{1, K}, \end{aligned}$$

where the point (x_{2k}, y_{2k}) is the end of $(2k - 1)$ -th straight line segment, α_{2k-1} is the angle between the $(2k - 1)$ -th straight line segment on the contour and the positive direction of the X -axis, S is the

length of the contour section from the origin [point(x_1, y_1)] to the current point(x, y) on this contour section; $S_k = \sum_{i=1}^k S_i, S_0 = 0$.

Fig. 1 shows the design scheme of the plate, $l_1 = 74$ mm, $l_2 = 53$ mm, $l_3 = 77$ mm, $l_4 = 60$ mm, $R_i = 30$ mm, $i = 1, 4$. The layers of the plate are made of materials with the following characteristics: $E_i = 6.8 \cdot 10^4$ MPa, $\nu_i = 0,22$, $\alpha_i^t = 9 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $i = 1, 3,5$; $E_i = 2,2 \cdot 10^2$ MPa, $\nu_i = 0,38$, $\alpha_i^t = 8.3 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $i = 2,4$; $h_1 = 5$ mm, $h_2 = 3$ mm, $h_3 = 19$ mm, $h_4 = 2$ mm, $h_5 = 12$ mm.

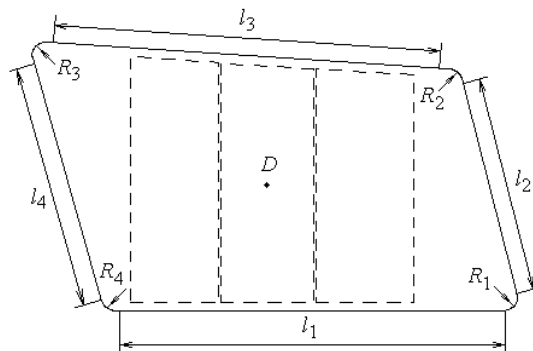


Fig. 1. Design scheme

It is assumed that there are no power loads. The field of temperature loads is obtained from the solution of the non-stationary problem of thermal conductivity of multilayer plates [15-17], taking into account the effect of a film heat source. Thermal insulation of the side surface of the plate is considered to be ideal. The heat conductivity problem has been solved with the following initial data: $k_i = 1.08$ W/(m·°C), $i = 1, 3,5$; $k_i = 0.22$ W/(m·°C), $i = 2,4$ (thermal conductivity coefficients of the i -th layer material); $H_1 = 433$ W/(m·°C), $H_2 = 20$ W/(m·°C) (convective heat transfer coefficients on the upper and lower surfaces of the plate); $T_1 = -30^\circ\text{C}$, $T_2 = 20^\circ\text{C}$ (environment temperature at the upper and lower surfaces boundary). A film heat source with a capacity of $q = 6$ kW/m² is located between the first and second layers of the plate. The source location is shown in Fig. 1 by a dashed line.

Fig. 2 shows the distribution of temperature and the principal stress σ_1^i ($i = \overline{1, I}$) over the thickness of the plate at point D (see Fig. 1), which located in the middle of the region occupied by the heat source. The stress is obtained for the temperature distribution at the time when the temperature on the surface with the source reaches the highest value. Layer composition is also shown. At the interface between the first and second layers of the plate, a sharp change in temperature and stress caused by the presence of a heat source is observed.

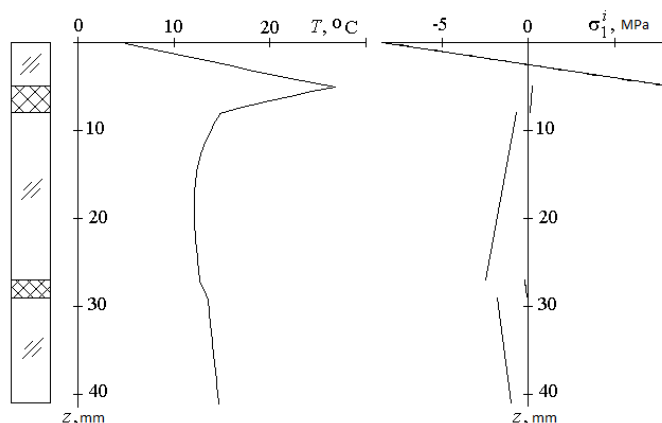


Fig. 2. Distribution of temperature and stress over the thickness of the plate.

6. Conclusions

A method for solving problems of thermal elasticity of multilayer plates of non-canonical shape in plane has been developed, which makes it possible to present the solution of the problem in an analytical form.

Deformation of plates is described within the framework of the linear refined first-order theory which accounts for transverse shear strain in each layer along with the polygonal line hypothesis for a

pack. The thermal elastic equilibrium equations and the boundary conditions on the contour are obtained by using Lagrange's variational principle. The method of solving the thermal elasticity problem for multilayer plates with non-canonical shape is based on the immersion method.

The proposed approach can be applied in the design of heating systems for multilayer glazing in various vehicles.

ЛІТЕРАТУРА

1. Boley, B. A., Weiner, J. H. Theory of Thermal Stresses Quantum, New York, 1974.
2. Noda N., Hetnarski, R. B., Tanigawa, Y. Thermal Stress, 2nd ed. Taylor and Francis, London, 2004.
3. Hachkevych O., Terlets'kyi R., Turii O. The formulation and development of methods of solving thermomechanics problems for irradiated layered solids MMC. 2017; Vol. 4, No 1, 2017, P. 21-36. DOI: <https://doi.org/10.23939/mmc2017.01.021>.
4. Hsueh C.H. Thermal stresses in elastic multilayer systems. Thin Solid Films Vol. 418, No 2, 2002, Pages 182-188 DOI: [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(02\)00699-5](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(02)00699-5).
5. Smetankina, N.V.: Non-stationary deformation, thermal elasticity and optimisation of laminated plates and cylindrical shells. Miskdruk Publishers, Kharkiv, 2011, 376 p.
6. Thermal Stresses V, edited by R. B. Hetnarski. Lastran Corporation, Rochester, NY, 1999. 542 pages.
7. Shih T.-M., Arie M., Ko D. Literature Survey of Numerical Heat Transfer (2000–2009): Part II, Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, Vol. 60, No 11-12, 2011, 883-1096, DOI: <https://doi.org/10.1080/10407782.2011.636720>
8. Barut A., Madenci E. Non-linear analysis of composite panels under non-uniform temperature distribution, Int. J. Solids and Struct. Vol. 37. No 27, 2000, P. 3681–3713. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(99\)00119-5](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(99)00119-5)
9. Brischetto S., Carrera E. Thermal stress analysis by refined multilayered composite shell theories, J. of Thermal Stresses, Vol. 32, No 1-2, 2008, 165-186, DOI: <https://doi.org/10.1080/01495730802540882>
10. Silva J.F., Nunes J.P., Velosa, J.C. Using Thermoplastic (HDPE) Liners and Glass Fiber Reinforced Thermosetting and Thermoplastic Structural Wall Matrices to Produce Filament Wound Pressure Vessels. *Proceedings of the ASME 2010 Pressure Vessels and Piping Division/K-PVP Conference. ASME 2010 Pressure Vessels and Piping Conference: Volume 6, Parts A and B.* Bellevue, Washington, USA. July 18–22, 2010. P. 275-281. ASME. DOI: <https://doi.org/10.1115/PVP2010-25826>
11. Neng-HuiZhang, Thin Solid Films Vol. 515, Issue 23, 14 September 2007, P. 8402-8406 Thermoelastic stresses in multilayered beams, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.05.003>
12. Chunxue G., Zhiwei Z., Xuehua L. Modeling of thermal stresses in elastic multilayer coating systems Journal of Applied Physics 117, 055305, 2015, DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4907572>
13. Сметанкіна Н. В., Постний О. В. Розрахунок термонапруженого стану шаруватих оболонок складної форми. Динаміка, міцність та моделювання в машинобудуванні: тези доповідей II Міжнародної науково-технічної конференції (05–08 жовтня 2020 р., Харків). Харків: Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, 2020. С. 285.
14. Шелудько Г.А., Шупіков О.М., Сметанкіна Н.В., Угрімов С.В. Прикладний адаптивний пошук.- Харків: Око, 2001.-191 с.
15. Malykhina A. I., Merkulov D. O., Postnyi O. V., Smetankina N. V. Stationary problem of heat conductivity for complex-shape multilayer plates. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління».* 2019. Вип. 41. С. 46–54.
16. Smetankina N., Postnyi O. Nonstationary heat conduction in multilayer glazing subjected to distributed heat sources. *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Srodowiska.*, 2020., Vol. 10, No 2, P. 28-31. DOI: <https://doi.org/10.35784/iapgos.930>
17. Smetankina N. V., Merkulova A.I., Merkulov D. O., Postnyi O. V. Modeling of non-stationary temperature fields in multilayer shells with film heat sources. Conference Proceedings: 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek) IEEE (5-10 Oct. 2020)., IEEE: Kharkiv, 2020., P. 242–246. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250139>

REFERENCES

1. B. A. Boley, J. H. Weiner, Theory of Thermal Stresses Quantum, New York, 1974.
2. N. Noda, R. B. Hetnarski, Y. Tanigawa, Thermal Stress, 2nd ed. Taylor and Francis, London, 2004.
3. O. Hachkevych, R. Terlets'kyi, O. Turii. The formulation and development of methods of solving thermomechanics problems for irradiated layered solids MMC, Vol. 4, No 1, 2017, P. 21-36. DOI: <https://doi.org/10.23939/mmc2017.01.021>.
4. C.H. Hsueh, Thermal stresses in elastic multilayer systems. Thin Solid Films. Vol. 418, No 2, 2002, Pages 182-188 DOI: [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(02\)00699-5](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(02)00699-5).
5. N.V. Smetankina. Non-stationary deformation, thermal elasticity and optimisation of laminated plates and cylindrical shells. Miskdruk Publishers, Kharkiv, 2011, 376 p. [in Russian]
6. Thermal Stresses V, edited by R. B. Hetnarski. Lastran Corporation, Rochester, NY, 1999. 542 pages.
7. T.-M. Shih, M. Arie, D. Ko. Literature Survey of Numerical Heat Transfer (2000–2009): Part II, Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, Vol. 60, No 11-12, 2011, 883-1096, DOI: 10.1080/10407782.2011.636720.
8. A. Barut, E. Madenci, Non-linear analysis of composite panels under non-uniform temperature distribution, Int. J. Solids and Struct. Vol. 37. No 27, 2000, P. 3681–3713. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(99\)00119-5](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(99)00119-5)
9. S. Brischetto, E. Carrera Thermal Stress Analysis by refined multilayered composite shell theories, J. of Thermal Stresses, Vol. 32, No 1-2, 2008, 165-186, DOI: 10.1080/01495730802540882
10. J.F. Silva, J.P. Nunes, J.C. Velosa. Using Thermoplastic (HDPE) Liners and Glass Fiber Reinforced Thermosetting and Thermoplastic Structural Wall Matrices to Produce Filament Wound Pressure Vessels. *Proceedings of the ASME 2010 Pressure Vessels and Piping Division/K-PVP Conference. ASME 2010 Pressure Vessels and Piping Conference: Volume 6, Parts A and B.* Bellevue, Washington, USA. July 18–22, 2010. P. 275-281. ASME. DOI: <https://doi.org/10.1115/PVP2010-25826>
11. Neng-Hui Zhang. Thermoelastic stresses in multilayered beams. Thin Solid Films Vol. 515, Issue 23, 2007, P. 8402-8406, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.05.003>
12. G. Chunxue, Z. Zhiwei, L. Xuehua Modeling of thermal stresses in elastic multilayer coating systems Journal of Applied Physics 117, 055305, 2015, DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4907572>
13. N.V. Smetankina, O.V. Postnyi. Calculation of the thermal stress state of layered shells of complex shape. Dynamics, Strength and Modelling in Mechanical Engineering: Abstracts of reports of the II International Scientific and Technical Conference (05–08 October 2020 p., Kharkiv). Kharkiv: A. Pidhornyi Institute of Mechanical Engineering Problems of the NAS of Ukraine, 2020. P. 285 [in Ukrainian]
14. H.A. Sheludko, O.M. Shupikov, N.V. Smetankina, S.V. Ugrimov. Applied adaptive search. Kharkiv, Oko, 2001, 191 p. [in Ukrainian]
15. A. I. Malykhina, D. O. Merkulov, O. V. Postnyi, N. V. Smetankina. Stationary problem of heat conductivity for complex-shape multilayer plates. *Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University, series «Mathematical modeling. Information technology. Automated control systems».* 2019. Vol. 41. P. 46–54.
16. N. Smetankina, O. Postnyi. Nonstationary heat conduction in multilayer glazing subjected to distributed heat sources. *Informatyka, Automatyka, Pomiarzy w Gospodarce i Ochronie Srodowiska.*, 2020., Vol. 10, No 2, P. 28-31. DOI: <https://doi.org/10.35784/iapgos.930>
- N.V. Smetankina, O.V. Postnyi, A.I. Merkulova, D.O. Merkulov. Modeling of non-stationary temperature fields in multilayer shells with film heat sources. Conference Proceedings: 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek) IEEE (5-10 Oct. 2020)., IEEE: Kharkiv, 2020., P. 242–246. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250139>

УДК 519.6, 51-76

Evolution of memes

K.V. Shatsky, V.V. Yanovsky

Shatsky Kirill V.

*Student of Department of Systems and Technology Modeling
V. N. Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq. 4, Kharkiv-22, Ukraine,
61022
e-mail: sckir04@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1608-7011>*

Yanovsky Volodymyr V.

*Doctor of Science, Professor, Professor of Department of Artificial Intelligence
and Software
V. N. Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq. 4, Kharkiv-22, Ukraine,
61022
Head of the Theoretical Department, Institute for Single Crystals of the National
Academy of Science of Ukraine, 60 Nauky str., c. Kharkiv, Ukraine, 61001.
e-mail: yanovsky@isc.kharkov.ua
<https://orcid.org/0000-0003-0461-749X>*

The paper considers the evolution of a population of individuals, where each of them initially possesses a certain number of strategies whose memory depth does not exceed 2. All individuals randomly enter into competition in pairs at each stage of evolution. In each random pair of individuals a competition between pairs of all their randomly selected strategies is performed. These strategies compete in pairs according to the iterated prisoner's dilemma. Afterwards, strategies earn evolutionary advantage points according to a given payout matrix. The strategy with the most points wins. To negate an effect of the first move each pair of strategies play this game twice. The first game is started by one strategy and the second game by another. The winnings are determined by the outcome of both games. After this competition the winning strategy of one individual replaces the corresponding losing strategy of another individual. Thus, there is an exchange of the "successful" strategies between individuals with the corresponding elimination of the losing strategies. The evolution of the population is carried out until the stationary state is achieved. The patterns of changes in basic properties of average individual strategies during evolution have been established. It is shown that in the process of evolution the aggression of an individual increases, tending to the maximum value. The stationary set of an individual's strategies consists of strategies of maximum memory depth and complexity along with a certain number of primitive strategies. The complexity and memory depth of an individual's strategies turn out to be evolutionary beneficial. In the stationary state the number of primitive an individual's strategies depends on their initial distribution. The paper considers two initial distributions, where the first corresponds to the equal probability of any strategy in the distribution by individuals, and the second corresponds to equally probable choice in terms of memory depth. The variety of strategies in the process of evolution decreases significantly, making up only a small part of the initial strategies present in the population.

Keywords: *evolution of population, strategies with memory, memory depth, complexity, aggression, prisoner's dilemma, stationary state.*

Еволюція мемів

**Шацький
Кирило Віталійович**

*студент кафедри моделювання систем і технологій
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
майдан Свободи 4, Харків-22, Україна, 61022*

**Яновський
Володимир
Володимирович**

*доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри
штучного інтелекту та програмного забезпечення
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
майдан Свободи 4, Харків-22, Україна, 61022
Завідувач теоретичним відділом, інститут монокристалів НАН України,
пр.Науки 60, Харків, Україна, 61001*

В роботі розглянуто еволюцію популяції особин, кожна з яких спочатку має певну кількість стратегій, пам'ять яких не перевищує глибини 2. На кожному етапі еволюції всі особини випадковим чином вступають попарно в конкурентну боротьбу. Випадкова пара особин при взаємодії проводить змагання між парами всіх своїх випадково обраних стратегій. Ці стратегії попарно вступають у змагання відповідно до ітерованої дилеми в'язнів. У такій боротьбі стратегії набирають очки еволюційних переваг відповідно заданої матриці виплат. Виграє стратегія, яка набрала

найбільшу кількість очок. Для нівелювання значення першого ходу дві стратегії вступають в таку гру двічі. Спочатку гру починає одна стратегія, в другій грі починає інша стратегія. Виграш визначається за результатом цих двох ігор. Після проведення такого змагання стратегія однієї особи, яка виграла, замінює відповідну стратегію, яка програла, іншої особи. Таким чином, між особинами відбувається обмін більш "процвітаючими" стратегіями з втратою тих, хто програв. Проведена еволюція популяції таких особин до етапу встановлення стаціонарного стану особин популяції. Під час еволюції встановлені закономірності зміни основних властивостей стратегій середньої особи. Показано, що в процесі еволюції агресивність особи зростає, прагнучи до максимального значення. Кількість стратегій особи зменшується, досягаючи деякого стаціонарного значення. Стаціонарний набір стратегій особи складають стратегії максимальної пам'яті та складності з деякою кількістю примітивних стратегій. Складність і глибина пам'яті стратегій особи виявляються еволюційно вигідними. Кількість примітивних стратегій у особи в стаціонарі залежить від їх початкового розподілу по особинам. У роботі розглянуті два початкових розподіли: один відповідає рівномірності будь-якої стратегії при розподілі по особинам, другий відповідає рівномірному вибору за глибиною пам'яті стратегій. Різноманітність стратегій в процесі еволюції зменшується значно, складаючи лише малу частину присутніх в популяції початкових стратегій.

Ключові слова: еволюція популяції, стратегії з пам'яттю, глибина пам'яті, складність, агресивність, дилема ув'язнених, стаціонарний стан.

Эволюция мемов

**Шацкий
Кирилл Витальевич**

*студент кафедры моделирования систем и технологий
Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,
площадь Свободы 4, Харьков-22, Украина, 61022*

**Яновский
Владимир
Владимирович**

*доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры
искусственного интеллекта и программного обеспечения
Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,
площадь Свободы 4, Харьков-22, Украина, 61022
заведующий теоретическим отделом, институт монокристаллов НАН
Украины, пр. Науки 60, Харьков, Украина, 61001*

В работе рассмотрена эволюция популяции особей, каждая из которых изначально обладает определенным числом стратегий, память которых не превосходит глубины 2. На каждом этапе эволюции все особи случайным образом вступают попарно в конкурентную борьбу. Случайная пара особей при взаимодействии проводит соревнование между парами всех своих случайно выбранных стратегий. Эти стратегии попарно вступают в соревнование в соответствии с итерированной дилеммой заключенных. В такой борьбе стратегии набирают очки эволюционных преимуществ в соответствии с заданной матрицей выплат. Выигрывает стратегия, набравшая больше очков. Для нивелирования значения первого хода две стратегии вступают в такую игру дважды. Сначала игру начинает одна стратегия, во второй игре начинает другая стратегия. Выигрыш определяется по результату этих двух игр. После проведения такого соревнования выигравшая стратегия одной особи заменяет соответствующую проигравшую стратегию другой особи. Таким образом, между особями происходит обмен более "преуспевающими" стратегиями с потерей проигравших. Проведена эволюция популяции таких особей до этапа установления стационарного состояния особей популяции. Во время эволюции установлены закономерности изменения основных свойств стратегий средней особи. Показано, что в процессе эволюции агрессивность особи возрастает, стремясь к максимальному значению. Число стратегий особи уменьшается, достигая некоторого стационарного значения. Стационарный набор стратегий особи составляют стратегии максимальной памяти и сложности с некоторым количеством примитивных стратегий. Сложность и глубина памяти стратегий особи оказываются эволюционно выгодными. Количество примитивных стратегий у особи в стационаре зависит от их первоначального распределения по особям. В работе рассмотрены два начальных распределения: одно соответствует равновероятности любой стратегии при распределении по особям, второе соответствует равновероятному выбору по глубине памяти. Разнообразие стратегий в процессе эволюции уменьшается значительно, составляя только малую часть присутствующих в популяции начальных стратегий.

Ключевые слова: эволюция популяции, стратегии с памятью, глубина памяти, сложность, агрессивность, дилемма заключенных, стационарное состояние.

1. Introduction

Nowadays, the evolution of different populations and communities is the subject of interest and active research. Such interest is closely related to changes in the populations' properties that emerge during the evolution process and the emergent properties of the population are of particular interest. It should be noted that this method of changing the properties of a population is also useful for artificial populations of various swarm and multi-agent systems. One of the properties that have been attracting attention for a long time is the emergence of cooperative behavior in different populations [1]. Elements of game theory are widely used in modeling the evolution of populations [2,3]. The conducted

researches revealed some mechanisms that lead to cooperation in a wide variety of systems [4]. Among such mechanisms the following can be noted: voluntary participation [5], punishment [6], similarity [7], heterogeneous activity [8], social diversity [9, 10], dynamical linking [11], asymmetric interaction and permutation graphs [12], migration [13-15], in-group favoritism [16], and interdependent relations [17]. It is possible to find mechanisms of emergence of other properties of populations in the process of evolution in a similar way.

Memory is one of the most general properties of individuals in a population, so its influence on the evolution of populations is of great interest. The evolution of a population of strategies limited by memory depth within the scope of generalized prisoner's dilemma is considered in [18,19]. The concept of strategy's complexity is also introduced. Every new generation of strategies loses the most disadvantageous behavior strategies of the previous generation. It is shown that an increase in memory and complexity of population strategies is evolutionary beneficial. Evolutionary selection winners invariably come across strategies with maximum memory and close to maximum complexity.

The evolution of a population of strategies with memory in the presence of sources of strategies of different memory depth is considered in [20]. It is shown that memory depth and complexity of strategies are evolutionarily advantageous too. In all cases the strategies' aggression decreases, and at the stationary stage all strategies have zero aggression towards each other. This feature can be used as a principle for selecting strategies for possible stationary states. Also, a relation between aggression and the amount of points received per strategy's move when strategies interact has been found. The higher the aggression, the fewer evolutionary advantage points are received by the strategy per move.

The alternative evolution of a population of strategies with memory is considered in [21]. In such evolution a strategy with the highest amount of evolutionary advantage points is removed from every generation. This alternative evolution leads to significant changes in the strategies of the population in comparison to the usual evolution. In a sense, the alternative evolution supports maximum memory depth and complexity even more than the regular evolution. However, the major difference lies in the absolute aggression of stationary strategies. The stationary state is formed by the most aggressive strategies.

This paper considers a population of individuals where each has a certain number of strategies with memory. A principle for exchanging strategies between individuals is proposed, and the evolution of such population is considered. When individuals interact, all their strategies compete in pairs according to the iterated prisoner's dilemma. The winning strategy replaces the corresponding losing strategy of an individual. It is shown that in the process of the evolution the aggression of an individual increases tending to the maximum value. The behavior of the distribution of an individual's strategies in terms of memory depth and complexity in the process of evolution has been studied in details. The number of individual's strategies decreases reaching a certain stationary value. The stationary set of an individual's strategies consists of strategies of maximum memory and complexity with a certain number of primitive strategies. The variety of strategies in the process of evolution decreases significantly, making up only a small part of the initial strategies present in the population.

2. Population of individuals

In the considered population each individual has a finite set of strategies with memory. For the evolution it is essential to introduce the rules of strategies' meetings, interactions and selection. In the population at each stage of evolution all individuals are randomly divided into pairs that interact. All strategies of one individual interact with the strategies of another (also randomly divided into pairs) according to the iterated prisoner's dilemma. To negate the impact of the first move, both strategies play the game twice. One strategy starts the first game, and another starts the second game. The winnings are determined by the results of these two games. The winning strategy replaces the losing strategy of the corresponding individual. In other words, there is an exchange of strategies between individuals where a loser gets removed. After the interactions of all pairs of individuals in accordance with the described rules, the next stage of evolution begins. All individuals again are randomly divided into the interacting pairs. It can be compared to the evolution of ideas or memes¹ in different societies. The evolution stops

¹This term was introduced by Richard Dawkins in 1976 to name a unit of relevant information within a culture. A meme is an idea, symbol, manner, or a way of acting, that consciously or unconsciously can be transmitted from one person to another through speech, writing, video, rituals, gestures, etc. In some sense, a meme is similar to a gene as a carrier of cultural information.

when the population reaches a stationary state. During the process of evolution, we will monitor the properties of the population's strategies and all the individuals included in the population.

Now, let us discuss the choice of the initial distribution of strategies over individuals of the population. The full number of strategies with the memory depth 2 is distributed among individuals. The process of distribution can be implemented in different ways. This paper considers two ways of strategies distribution. In the first method, we assign strategies to an individual by choosing them randomly from the set of all strategies with the memory depth not exceeding 2, assuming that strategies are equally probable. This choice does not take into account the properties of strategies, assuming them to be equal. In the second method, we choose strategies for an individual by a uniform distribution over memory. Therefore all strategies are divided into three sets by memory depth and the choice is equally probable between these sets. We will discuss those two methods of forming the initial distribution of strategies among individuals of the population further.

Another feature of the considered population of individuals is the emergence of collective variables to describe individuals and not just the population of strategies. Each individual has a distribution of strategies in terms of memory and complexity, and the entire individual can show definite aggression. Thus, there are properties of an individual, such as distribution of strategies by memory depth and complexity. These distributions define the average memory depth, complexity, aggression of i individual and its average aggression:

$$\langle M \rangle_i = \sum_{j=1}^{N_i} \frac{M_{ij}}{N_i}, \langle C \rangle_i = \sum_{j=1}^{N_i} \frac{C_{ij}}{N_i}, \langle A \rangle_i = \sum_{j=1}^{N_i} \frac{a_{ij}}{N_i} \quad (2.1)$$

where $\langle M \rangle_i$, $\langle C \rangle_i$, $\langle A \rangle_i$ are the average memory, the average complexity, and the average aggression of the i individual respectively; N_i is the number of strategies of the i individual; M_{ij} is the memory depth of the j strategy of the i individual; C_{ij} is the complexity of the j strategy of the i individual; a_{ij} is the aggression of the j strategy of the i individual.

These local characteristics can be used to track changes in the properties of individuals during evolution. In addition, global characteristics of the population appear, such as the average values of memory, complexity and aggression of the whole population:

$$\bar{M} = \sum_{i=1}^S \frac{\langle M \rangle_i}{S}, \bar{C} = \sum_{i=1}^S \frac{\langle C \rangle_i}{S}, \bar{A} = \sum_{i=1}^S \frac{\langle A \rangle_i}{S} \quad (2.2)$$

where S is the number of individuals in the population.

These characteristics are calculated by averaging over all individuals in the population and determine the typical characteristics of an individual. Another useful characteristic that determines the variety of strategies in the population is the number of different strategies which we call formative strategies. By the formative strategies we imply the number of different strategies present in a population at some stage of evolution. Accordingly, we use the following formula as characteristics of the formative strategies in the population.

$$\langle M \rangle = \sum_{i=1}^N \frac{M_i}{N}, \langle C \rangle = \sum_{i=1}^N \frac{C_i}{N}, \langle A \rangle = \sum_{i=1}^N \frac{a_i}{N} \quad (2.3)$$

where N is the number of formative strategies; $\langle M \rangle$, $\langle C \rangle$, and $\langle A \rangle$ are the average memory, complexity, aggression of the formative strategy respectively.

3. Evolution of individuals with a uniform distribution of initial strategies

The population of 50000 individuals, where each one has 50 strategies has been considered. The ratio between these values is chosen so that all strategies which do not exceed the memory depth of 2 are present among the individuals of the population. The choice of these strategies is carried out in an equally probable manner from the set of all strategies with the memory depth not exceeding 2. In this

case, the strategies with the memory depth of 2 dominate due to the largest number of such strategies in the initial set of strategies (32640). The number of strategies with the memory depth of 1 is significantly smaller (120 strategies) and the number of strategies with the memory depth of 0 is the smallest (8 strategies). The initial distribution of strategies is shown in Fig. 3.1 and inherits the distribution properties of all strategies. The overwhelming number of strategies with the memory depth of 2 and maximum complexity is typical for the initial distribution of an individual's strategies (see Fig.3.1) as the consequence of the rule used for selecting strategies for an individual. The calculation of the properties of individuals has been carried out by averaging over 10 implementations of the initial state and their evolution.

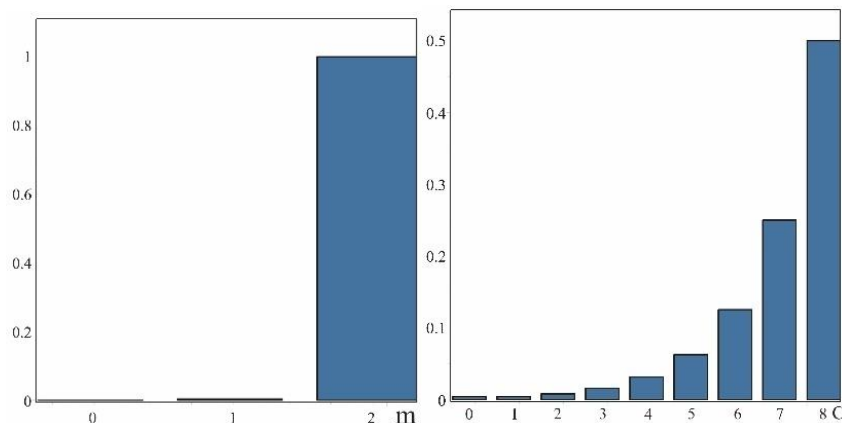


Fig.3.1 For an average individual at the beginning of evolution, the share of strategies of a certain memory depth is shown on the left, and the share of strategies of varying complexity on the right. The same histograms determine the probability of detecting a strategy of a certain memory depth (left) and complexity (right) of an individual at the initial stage of evolution

Let us discuss the initial distribution of aggression which is formed in the individuals by the chosen initial distribution of strategies. To do this we need to proceed with the first stage of evolution. At the first stage of evolution, all individuals are randomly divided into pairs that interact. All strategies of one individual interact with the strategies of another by dividing strategies randomly into pairs in accordance with the iterated prisoner's dilemma (the number of moves is 100). They interact twice: in the first game started by the first strategy, and the second game started by the second strategy. This method of competing between two strategies negates the impact of the first move. To identify the winning strategy the payoff matrix [3, 18-20] have been applied as shown in the Tab. 1.

Table 1. Payoff matrix

	Cooperation	Rejection
Cooperation	3,3	0,5
Rejection	5,0	1,1

The winning strategy (one with the highest score) replaces the losing strategy of the corresponding individual for an each pair of strategies. After the first stage, aggression shown by an individual (or the relative number of refusals to cooperate) is established.

Fig. 3.2 shows the distribution of the initial aggression of the individuals in terms of memory and complexity. It is easy to see that average aggression of the individuals in the population is close to 0.5. At the same time, the strategies with different memory depth show approximately the same aggression. The aggression of the strategies with zero complexity is maximal, and the strategies with the complexity 1 are minimal. The strategies of greater complexity have the same aggression (see Fig. 3.2). Therefore, the aggression of primitive strategies with the memory depth 0 and the complexity 0 is maximal.

Further evolution makes it possible to discern the changes in the basic characteristics of individuals.

First of all, the number of strategies of every individual decreases. Fig. 3.3 shows the average decrease in the number of an individual's strategies. In the process of evolution, after the stage of exponential decrease in numbers, it reaches a stationary state. Therefore individuals develop a

stationary set of strategies. With such a ratio of individuals and the strategies the stationary stage is achieved on average at $N_s = 45.5$.

Let us consider how the individual distribution of strategies by memory depth changes over time. Fig. 3.4 shows the evolution in strategies' distribution by the memory. For that we use the probability of finding an individual's strategy with the memory depth $m = 0, 1, 2$ respectively as a convenient characteristic.

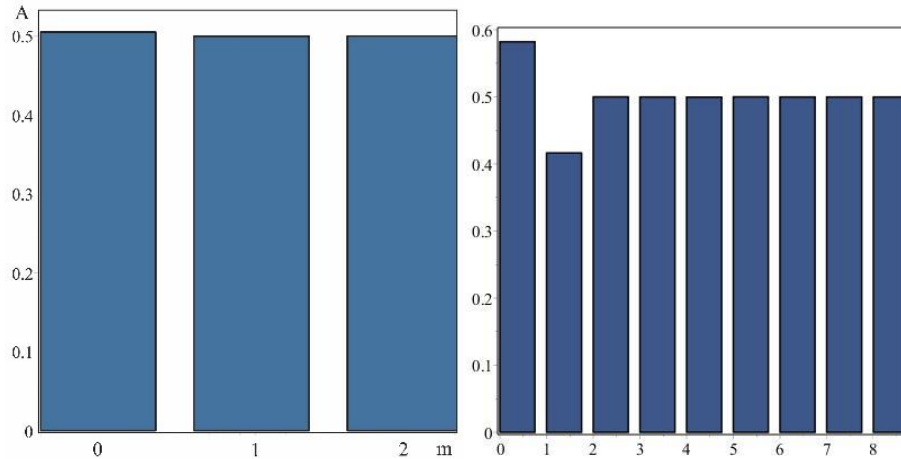


Fig.3.2 The initial distribution of an individual's aggression in the population by memory depth (left) and complexity (right) calculated at the first step of evolution

The probability of detecting an individual's strategies with the memory depth of 0 and 1 increases up to the tenth step, while the probability of strategies with the memory depth of 2 decreases insignificantly and then stabilizes (Fig. 3.4). It is obvious that the probability of finding an individual's strategies of maximum memory depth throughout evolution is overwhelmingly high.

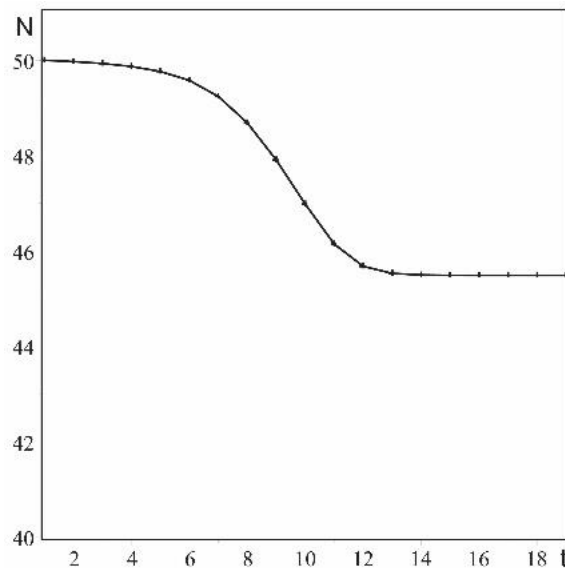


Fig.3.3 The change in the average number of individual's strategies over time of evolution

Note that the probability of detecting strategies with the minimal memory of 0 and 1 increase over time but still remains at a low level. The composition of an individual's strategies also undergoes qualitative changes in terms of complexity. Let us consider the change in the probability of finding an individual's strategy of certain complexity in the process of evolution. Fig. 3.5 shows the probabilities of finding an individual's strategy of a certain complexity at the corresponding stages of evolution.

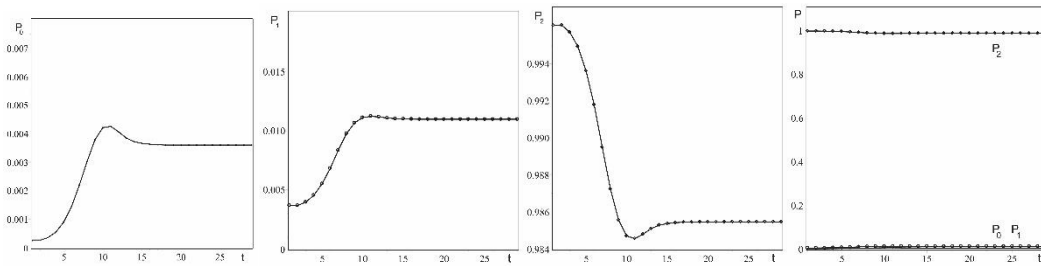


Fig. 3.4 shows the change in the probability of finding an individual's strategy with the memory depth 0 as P_0 , with the memory depth 1 as P_1 , and with the memory depth 2 as P_2 over time of evolution. These relations are shown in the same scale on the right, so the changes of initial probabilities are relatively minor

Rather diverse behavior of these probabilities is noticeable. Every complexity follows three different types of behavior: decreasing, increasing, oscillating. These probabilities reach certain stationary levels.

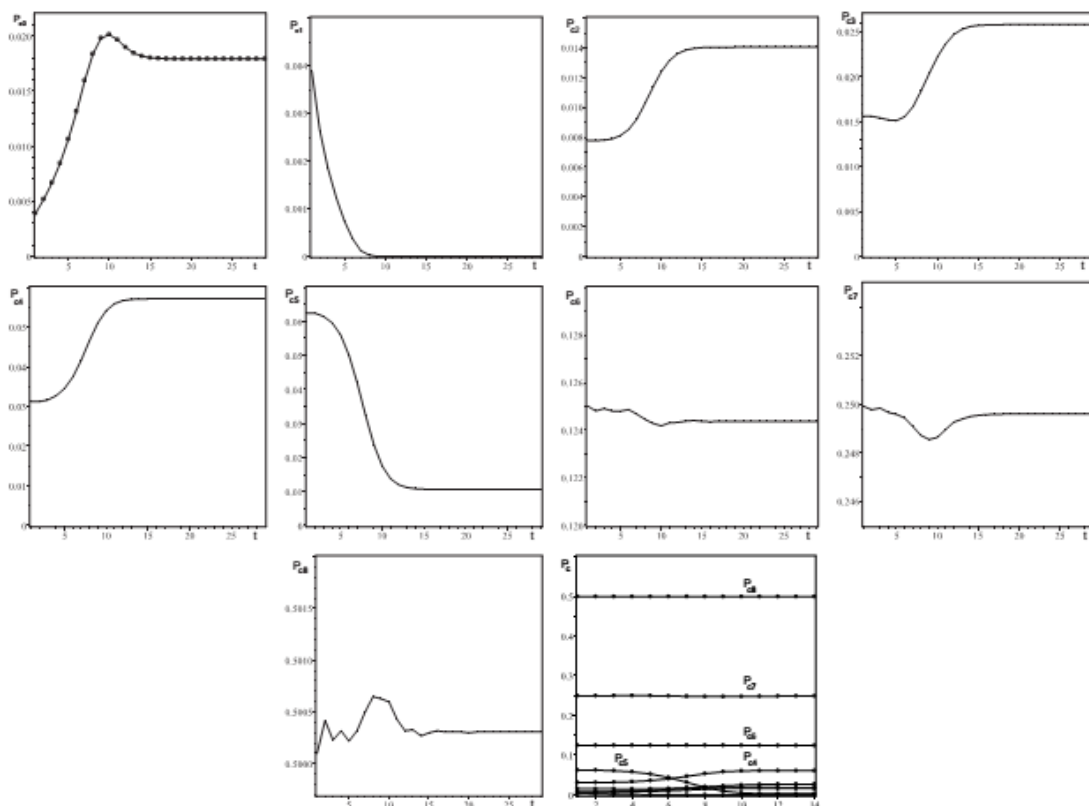


Fig.3.5 shows the change in the probability of finding an individual's strategy with complexity 0,1,..., 8 over time of evolution, where strategies of these complexities denoted as P_{c0} , P_{c1} , ..., P_{c8} respectively. A decrease in the probabilities is observed only for strategies of complexity 1 and 5. The last graph shows these dependencies on the same scale

The most complex strategies of 6, 7, 8 have the highest probability by the end of the evolution ($P_{c6} \approx 0.12$), ($P_{c7} \approx 0.25$), ($P_{c8} \approx 0.5$) and their changes over time are negligible. The strategies of complexity 1 exhibit significantly different behavior and disappear after step 8. Therefore, the probability to discover strategies with the memory depth of 0 increases due to an increase in probability of strategies of complexity 0 and 2. Interestingly, the probability of detecting the most primitive strategies with zero memory and complexity increases by $4 \div 5$ times, while remaining low at $P_{c0} \approx 0.02$. The increase in strategies with zero memory occurs mainly due to the increase in primitive strategies. The probabilities for finding the most complex strategies P_{c6} , P_{c7} , P_{c8} , mostly retain their initial values. This is due to their overwhelming quantity; therefore a small number of low-complexity

strategies cannot significantly influence strategies of high complexity. Noticeable changes can be seen in the probabilities of detecting strategies of complexity P_{c5} , P_{c4} that compete directly and are influenced by the strategies of lower complexity as well.

Thus, for an individual in a stationary state, strategies of maximum depth and close to maximum complexity have the highest probability. Even so, the most primitive strategies do not disappear but increase their probability while remaining at a low level.

More obvious tendencies are displayed by the changes in the aggression of individuals. The average aggression of individuals in the population tends to the maximum possible value of 1. The aggression distribution by memory depth is shown in Fig. 6. The strategies with the zero memory depth demonstrate the highest aggression during all stages of evolution, and the strategies with the memory depth of 1 demonstrate the lowest aggression. After the tenth stage of evolution the differences in their aggression disappears and coincides with the average aggression (Fig. 3.6). The stratification of aggression by complexity also indicates a typical increase of aggression and striving for maximum value. The only exception is the strategies with complexity 1 as the least aggressive strategies that disappear from the population after stage 12. Therefore, the aggression of population's strategies, regardless of memory depth and complexity of strategies, grows with evolution and reaches the maximum value of 1 in the stationary state. The stationary set of an individual's strategies consists of strategies with maximum aggression towards strategies of other individuals. The stationary distribution of strategies is formed by the strategies of maximum memory depth and complexity. The variety of present strategies in the population decreases significantly. The number of formative strategies in the stationary state decreases by 97.7% in comparison to the initial one, and the number of strategies in individual decreases just by 9%.

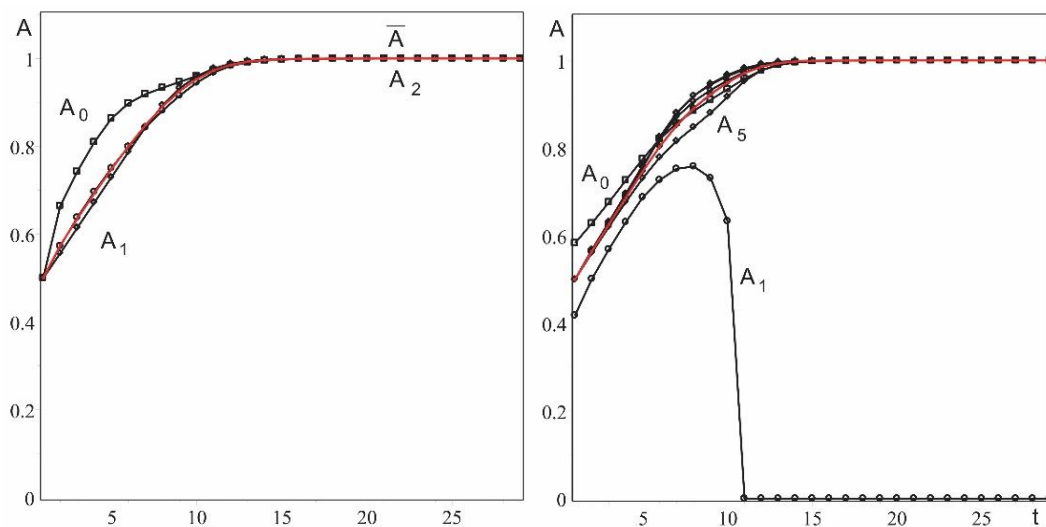


Fig. 3.6 shows average aggression of an individual of the population over time of evolution. Average aggression by memory depth (left), where \bar{A} is the average aggression of the whole population, and A_0, A_1, A_2 are the average aggressions of strategies with memory depth 0, 1, 2. Average aggression by complexity to the right, where \bar{A} is the average complexity of the population, and A_0, A_1, \dots, A_8 are the average aggressions of strategies with complexity from 0 to 8

It should be noted that in the process of evolution no strategy is able to spread to all individuals. The averaged maximum presence of one strategy over individuals is 21%, which differs from the initial number by no more than 0.4%. Also, an increase of the initial number of individuals does not affect the typical behavior of their strategies. All tendencies of an individual's changes, as well as the stationary values stay the same. Apparently, further increase in the size of population does not lead to significant changes because of the presence of all formative strategies in the initial population.

4. Evolution of individuals with a uniform distribution of initial strategies by memory depth

Let us now consider another initial distribution of strategies for the population evolution. The initial distribution of strategies is formed by an equally probable choice between strategies of different memory depth from formative strategies. This means that all formative strategies are divided into three classes by memory depth and the probability of choice between them is equal. All characteristics are averaged by 10 experiments with the same initial properties. In this experiment the number of individuals is 50000 as well, but the number of strategies for each is 24. With this choice each individual has an equal number of strategies of different memory depth at the beginning of evolution (Fig. 4.1). Therefore, the main difference from the previous case is the equal share of strategies of the memory depth of 0, 1, and 2 for each individual in initial population. Strategies with the greater memory depth can be more complex, which sophisticates the initial distribution of strategies by complexity. Consequently, the initial distribution of strategies by the complexity for a typical individual has a non-monotonic dependence as shown in Fig. 4.1 on the right. It can be seen that the initial number of complex strategies $C = 6, 7, 8$ decreases.

To find the aggression of population's strategies let us proceed with the first stage of evolution. Fig. 4.2 shows the simulation results and the impact of aggression on the memory depth and the complexity of population strategies.

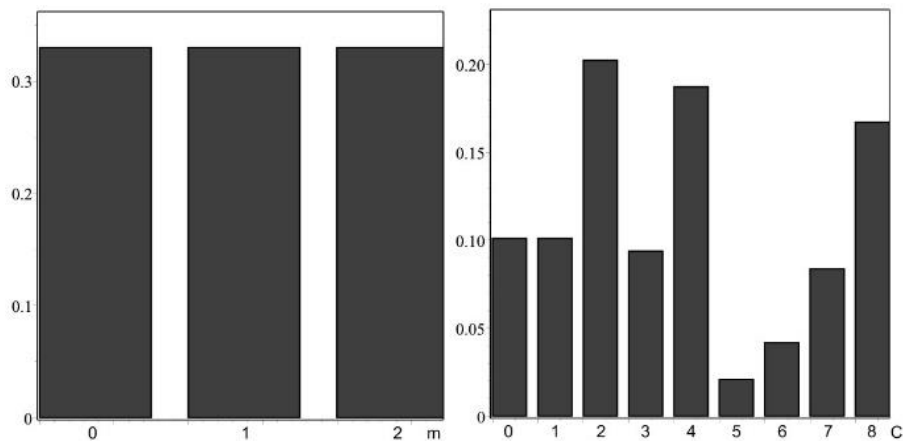


Fig.4.1 The initial distribution of strategies for an average individual in the population by memory depth (left) and complexity (right)

Let us note that despite the significantly different distribution of strategies among individuals, the initial distribution of aggression in terms of memory depth and complexity remains the same. But the tendency for an increased average aggression of strategies of the complexity 0 and a decreased aggression of strategies of the complexity 1 becomes even more prominent due to an increase in the number of these strategies.

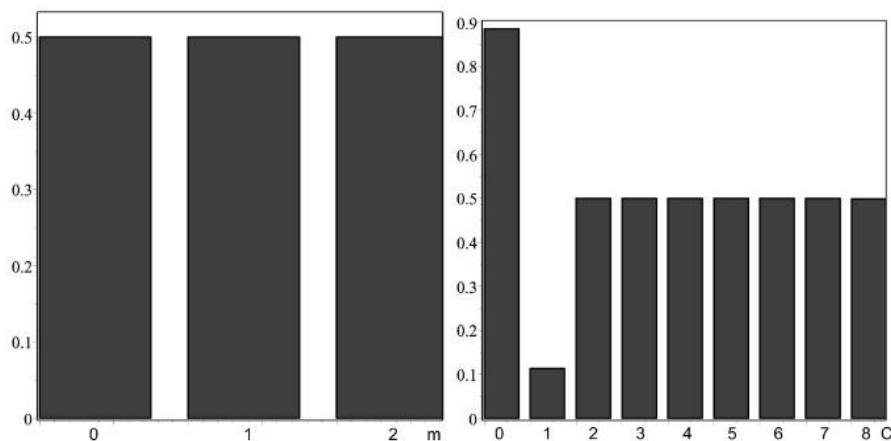


Fig.4.2 The histogram that determines the initial aggression distribution of strategies for an individual of the population by memory depth (left) and complexity (right)

Let us consider how the evolution affects the number of an individual's strategies and their memory depth for such an initial population. The change in the average number of strategies for an individual is shown in Fig. 4.3 on the left. The changes in the number of strategies for an individual are universal and decrease in the process of evolution. To control the change in the memory depth of an individual we use the probability of finding a strategy of a certain memory depth shown in Fig. 4.3 on the right.

At the initial stage these probabilities are equal. During the evolution the probability of detecting strategies with zero memory depth falls to the certain stationary level of $P_{s0} \approx 0.15$.

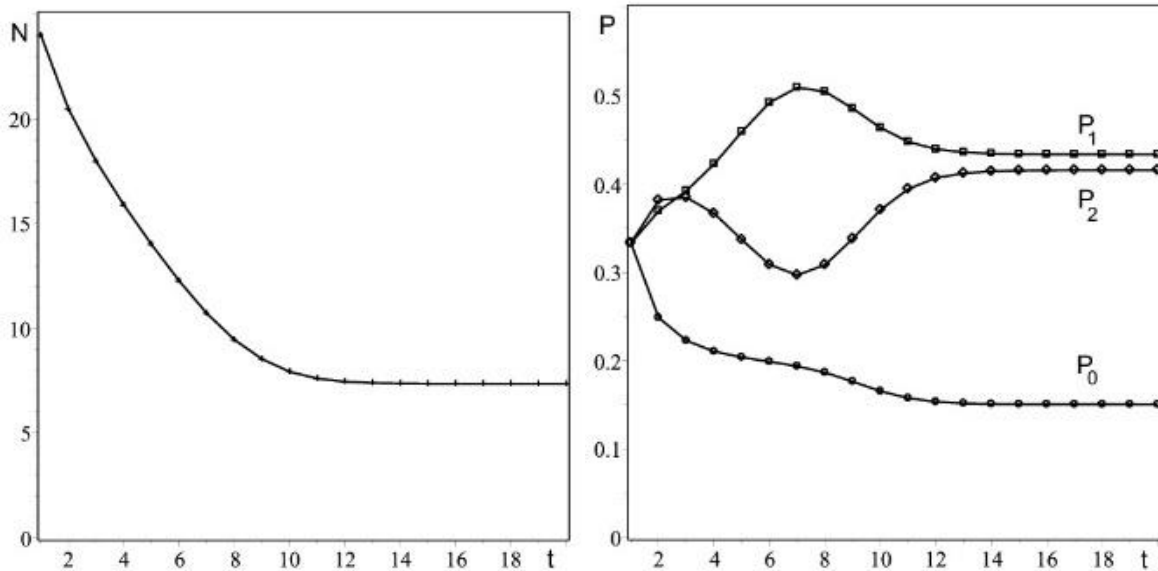


Fig.4.3 The change in the total number of strategies for an average individual (left) and the probability of finding the presence of a strategy with a certain memory depth (right), where P_0 is the probability of finding a strategy with the memory depth 0, P_1 with the memory depth 1, P_2 with the memory depth 2

The probability of detecting strategies with the memory depth of 1 increases to a certain value and then falls to the stationary value of $P_{s1} \approx 0.43$. In contrast to the previous case, strategies with the memory depth of 1 are dominant in a stationary state. Probability of detecting a strategy with the memory depth of 2 changes in a more complex way. There are two phases of increasing this probability divided by the phase of decreasing. Finally, it reaches the stationary value of $P_{s2} \approx 0.41$. It is interesting that the minimum value of the probability P_2 corresponds to the maximum value of the probability P_1 . Therefore, these components compete with each other to be available for an individual. Thus, in the stationary state strategies with the memory depth of 1 and 2 are dominant with a significant presence of strategies with a zero memory depth. The stationary values for this distribution are radically different from the corresponding values found in the previous experiment. The nature of these probabilities has also changed dramatically. In that case, in the process of evolution the probability P_0 does not increase and the probabilities P_1 and P_2 exceed their initial level.

For a more detailed analysis of the behavior of an individual's strategies let us consider how the complexity of an individual and the complexity of strategies with a certain memory depth evolve. Fig. 4.4 shows the average complexity of an individual in the population and the change in the complexity components of strategies with a certain memory depth. It could be seen that two phases of increase in complexity of an average individual divided by the phase of decrease. The time period of complexity decrease can be called a period of decline or a primitive period of evolution. Periods of complexity increase can be called periods of growth. The first period of growth lasts 2 stages of evolution or 9% of the evolution time. The period of decline takes 4 stages or 18% of the evolution time. And the second period lasts till the stationary state, which takes 22 evolution stages or 72% of the evolution time. These periods correlate with the behavior of strategies with a certain memory depth. Thus, for example,

probability of finding a strategy of the memory depth of 2 for an individual correlates with a change in complexity of the individual's strategies (Fig.4.3). The reason is related to the greater complexity of the strategies with the memory depth of 2. Note that the average complexity of an individual is significantly lower than in the previously considered case. This is due to the large number of strategies with the memory depth of 0 and 1 for an individual and a low initial complexity of individual's strategies. In the process of evolution, complex strategies dominate and therefore the stationary level of complexity ($\bar{C}_s \approx 4.3$) of an individual's strategies exceeds the initial ($\bar{C}|_{t=0} \approx 3.8$).

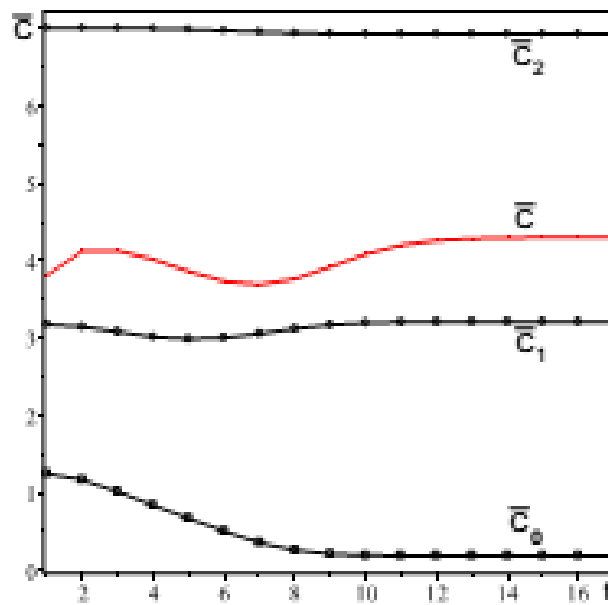


Fig.4.4 The evolution of the average complexity of an individual in the population \bar{C} and by memory depth. \bar{C}_0 is the complexity of individual's strategies with the memory depth 0, \bar{C}_1 for the memory depth 1, \bar{C}_2 for the memory depth 2

A more detailed behavior of the average complexity of strategies for an individual can be obtained by plotting the probability of the presence of a strategy with a certain complexity at the certain time of evolution. The change in probability of finding a strategy with a certain complexity is quite complicated depending on the value of complexity (Fig. 4.5). Therefore, the strategies of the complexity 0, 4, 6, 7, 8 increase their presence in the process of evolution. The most primitive zero-complexity strategies take the third place in terms of probability after the strategies of the complexity 4 (maximum value) and the complexity 8. The strategies with the complexity 1, 2, 3, and 5 decrease their presence. The strategies of complexity 1 have completely disappeared from the population being the most non-aggressive ones.

As for the evolution of an individual's aggression in the population, Fig. 4.6 shows that the strategies with the memory depth 0 are more aggressive and the strategies with the memory depth 1 are less aggressive over the course of evolution. In terms of complexity, the strategies with the complexity 0 are most aggressive; the strategies with the complexity 1 are the most non-aggressive and disappear from the population after step 12. For the previous type of distribution, the strategies of the complexity 1 also disappear from the population and others tend to the maximum possible value of the aggression, which indicates the universality of these patterns. The aggression of the strategies of the complexity 0 is the greatest as well. The average aggression of an individual is determined by the aggression of the strategies of the memory depth 2 and the complexity 8 as shown on Fig. 4.6.

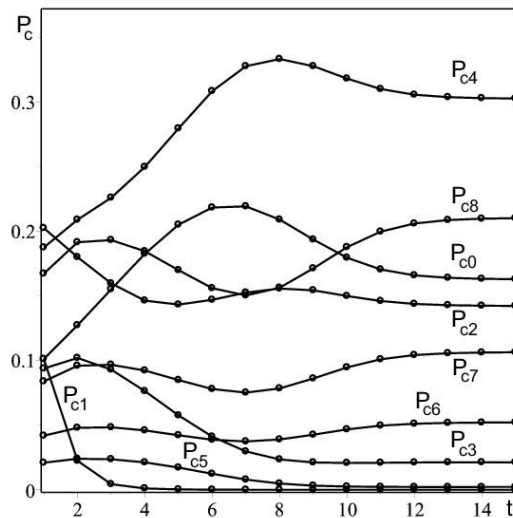


Fig.4.5 The probability of finding a strategy with a certain complexity for an average individual of the population ($P_1 \dots P_8$ represents complexity from 0 to 8 respectively)

Thus, in this case the stationary stage is also formed by the most aggressive individuals, whose strategies have the greatest complexity and memory depth. The presence of strategies of zero memory depth in the stationary state increases in comparison to the initial one by approximately 2 times. Moreover, it is the primitive strategies of zero complexity that have survived, while the less aggressive strategies of complexity 1 have disappeared from the population. Complex strategies ($C = 6, 7, 8$) have increased their presence, as well as those of complexity $C = 4$. Strategies with complexity $C = 1, 2, 3, 5$ have decreased their presence.

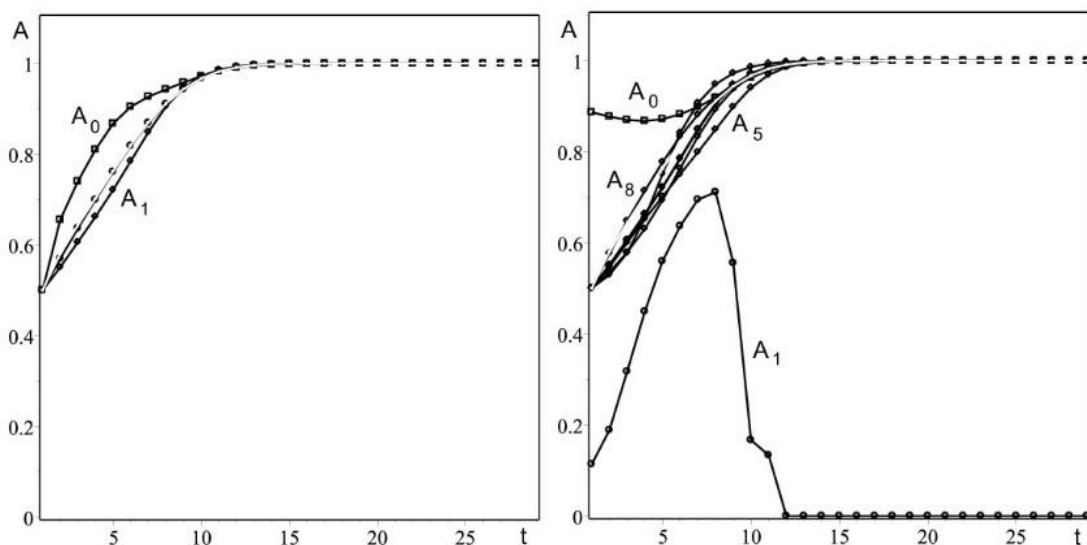


Fig.4.6 Aggression of the population by memory depth (left) and by complexity (right), where A is the average aggression; A_0, A_1, A_2 are the aggressions for memory depth from 0 to 2; A_0, A_1, \dots, A_8 are the aggressions for complexities from 0 to 8

Let us now discuss the effect of an increase in the number of strategies for an individual in case of initial distribution of strategies with equal probabilities by memory depth. Naturally, this will lead to an increase in the average strategy complexity of an individual because of the increased number of strategies of maximum complexity. Therefore, the stationary value of the average complexity of an individual's strategies will also increase. The dependence of its changes over time with the presence of two periods of growth and one period of decline will remain (quite similar to the example shown in Fig. 4.4).

The probabilities of finding strategies of a certain memory depth are a subject to more radical changes (see Fig. 4.3). For example, when choosing the initial number of strategies for an individual as 50, at all times of evolution the probability of finding a strategy of the memory depth 2 in it exceeds the probability of finding a strategy with the memory depth 1 in contrast to the case where the initial number of strategies is 24 (Fig. 4.3). Thus, the tendency for the dominance of strategies of maximum memory and complexity becomes ever more prominent with an increase in the number of its strategies.

5 Conclusion

Therefore, the evolution where the method of strategy exchange is used supports individuals with maximum aggression, maximum memory depth, and high complexity of strategies. The stationary set of an individual's strategies consists mainly of such strategies with addition of some most primitive strategies. The number of strategies of the average individual decreases with the evolution time reaching a certain stationary value, which depends on the initial distribution of strategies. The variety of strategies with evolution decreases more significantly: about 6% of the original formative strategies remains in the stationary state. The strategies of the complexity 1, being the least aggressive, disappear from the population. Complex behavior and periods of growth and decline in complexity appear with significant proportion of strategies with low complexity and low memory, otherwise these strategies do not affect the nature of evolution being suppressed at early stages by more complex strategies with a large memory depth.

REFERENCES

1. H. Brandt, C. Hauert, and K. Sigmund, "Punishment and reputation in spatial public goods games", *Proc. R. Soc. Lond. B.*, vol. 270, no. 1519, pp. 1099–104, 2003. . <https://doi.org/10.1098/rspb.2003.2336>
2. M. A. Nowak, and R. M. May, "Evolutionary games and spatial chaos", *Nature*, vol. 359, no. 6398, pp. 826–29, 1992. <https://doi.org/10.1038/359826a0>
3. R. Axelrod, *The evolution of cooperation*. New York: Basic Books, 1984. <http://www.eleutera.org/wp-content/uploads/2015/07/The-Evolution-of-Cooperation.pdf>
4. M. A. Nowak and R. Highfield, *SuperCooperators: Altruism, Evolution, and Why We Need Each Other to Succeed*. New York: Free Press, 2012. <https://www.amazon.com/SuperCooperators-Altruism-Evolution-Other-Succeed/dp/1451626630>
5. G. Szab'o and C. Hauert, "Evolutionary prisoner's dilemma games with voluntary participation", *Phys. Rev. E.*, vol. 66, no. 062903, 2002. <https://doi.org/10.1103/physreve.66.062903>
6. C. Hauert, A. Traulsen, H. Brandt, M.A. Nowak, and K. Sigmund, "Via freedom to coercion: The emergence of costly punishment", *Science*, vol. 316, no. 5833, pp. 1905–7, 2007. <https://dx.doi.org/10.1126%2Fscience.1141588>
7. A. Traulsen and J. C. Claussen, "Similarity based cooperation and spatial segregation", *Phys. Rev. E.*, vol. 70, no. 046128, 2004. <https://doi.org/10.1126/science.1141588>
8. A. Szolnoki and G. Szab'o, "Cooperation enhanced by inhomogeneous activity of teaching for evolutionary prisoner's dilemma games", *EPL*, vol. 77, no. 30004, 2007. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.710.7492&rep=rep1&type=pdf>
9. M. Perc and A. Szolnoki, "Social diversity and promotion of cooperation in the spatial prisoner's dilemma game", *Phys. Rev. E.*, vol. 77, no. 011904, 2008. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.77.011904>
10. H. X. Yang, W. X. Wang, Z. X. Wu, Y. C. Lai, and B. H. Wang, "Diversity-optimized cooperation on complex networks", *Phys. Rev. E.*, vol. 79, no. 056107, 2009. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.79.056107>
11. J. M. Pacheco, A. Traulsen, and M. A. Nowak, "Coevolution of strategy and structure in complex networks with dynamical linking", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 97, no. 258103, 2006. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.97.258103>
12. H. Ohtsuki, M. A. Nowak, and J. M. Pacheco, "Breaking the symmetry between interaction and replacement in evolutionary dynamics on graphs", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 98, no. 108106, 2007. . <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.98.108106>

13. S. Meloni, A. Buscarino, L. Fortuna, M. Frasca, J. Gómez-Gardeñes, V. Latora, and Y. Moreno, "Effects of mobility in a population of prisoner's dilemma players", *Phys. Rev. E.*, vol. 79, no. 067101, 2009. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.79.067101>
14. L. L. Jiang, W. X. Wang, Y. C. Lai, and B. H. Wang, "Role of adaptive migration in promoting cooperation in spatial games", *Phys. Rev. E.*, vol. 81, no. 036108, pp. 1–6, 2010. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.81.036108>
15. F. Fu and M. A. Nowak, "Global migration can lead to stronger spatial selection than local migration", *J. Stat. Phys.*, vol. 151, pp. 637–53, 2013. https://projects.iq.harvard.edu/files/ped/files/jstatphys13_0.pdf
16. F. Fu, C. E. Tarnita, N. A. Christakis, L. Wang, D. G. Rand, and M. A. Nowak, "Evolution of in-group favoritism", *Sci. Rep.*, vol. 2, no. 460, 2012. <https://www.nature.com/articles/srep00460>
17. Z. Wang, A. Szolnoki, and M. Perc, "Optimal interdependence between networks for the evolution of cooperation", *Sci. Rep.*, vol. 3, no. 2470, 2013. <https://www.nature.com/articles/srep02470>
18. V. M. Kuklin, A. V. Priymak, and V. V. Yanovsky, "The influence of memory on the evolution of populations," *Visnik of the Kharkiv National University named after V. N. Karazin, series "Mathematical Modelling. Information technology. Automation of the control system"*, vol. 29, pp. 41–66, 2016. [in Russian] <https://periodicals.karazin.ua/mia/article/view/6557/6065>
19. V. V. Yanovsky, A. V. Priymak, and V. M. Kuklin, "Memory and evolution of communities," *Visnik of the Kharkiv National University named after V. N. Karazin, series "Mathematical Modelling. Information technology. Automation of the control system"*, vol. 35, pp. 38–60, 2017. [in Russian] <https://periodicals.karazin.ua/mia/article/view/9841/9365>
20. V. V. Yanovsky and A. V. Priymak, "Evolution of strategy communities with sources available," *Visnik of the Kharkiv National University named after V. N. Karazin, series "Mathematical Modelling. Information technology. Automation of the control system"*, vol. 36, pp. 68–84, 2017. [in Russian] <https://periodicals.karazin.ua/mia/article/view/10098/9626>
21. V. V. Porichansky, A. V. Priymak, and V. V. Yanovsky, "Alternative evolution of strategies with memory," *Visnik of the Kharkiv National University named after V. N. Karazin, series "Mathematical Modelling. Information technology. Automation of the control system"*, vol. 44, pp. 74–87, 2019. [in Russian] <https://periodicals.karazin.ua/mia/article/view/15775/14613>

ЛІТЕРАТУРА

1. Brandt H., Hauert C., Sigmund K. Punishment and reputation in spatial public goods games. *Proc. R. Soc. Lond. B.* 2003. Vol. 270. Issue 1519. P. 1099–1104. <https://doi.org/10.1098/rspb.2003.2336>
2. Nowak M.A., May R.M. Evolutionary games and spatial chaos. *Nature.* 1992. Vol. 359. Issue 6398. P. 826–829. <https://doi.org/10.1038/359826a0>
3. Axelrod R. The evolution of cooperation. New York: Basic Books, 1984. 223 p. <http://www.eleutera.org/wp-content/uploads/2015/07/The-Evolution-of-Cooperation.pdf>
4. Nowak M. A., Highfield R. SuperCooperators: Altruism, Evolution, and Why We Need Each Other to Succeed. New York: Free Press, 2012. 352 p. <https://www.amazon.com/SuperCooperators-Altruism-Evolution-Other-Succeed/dp/1451626630>
5. Szabó G., Hauert C. Evolutionary prisoner's dilemma games with voluntary participation. *Phys. Rev. E.* 2002. Vol. 66. Issue 6 (062903). P. 1–4. <https://doi.org/10.1103/physreve.66.062903>
6. Hauert C., Traulsen A., Brandt H., Nowak M. A., Sigmund K. Via freedom to coercion: The emergence of costly punishment. *Science.* 2007. Vol. 316. Issue 5833. P. 1905–1907. <https://dx.doi.org/10.1126/science.1141588>
7. Traulsen A., Claussen J. C. Similarity based cooperation and spatial segregation. *Phys. Rev. E.* 2004. Vol. 70. Issue 4 (046128). P. 1–8. <https://doi.org/10.1126/science.1141588>
8. Szolnoki A., Szabó G. Cooperation enhanced by inhomogeneous activity of teaching for evolutionary prisoner's dilemma games. *EPL.* 2007. Vol. 77 (30004). P. 1–5. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.710.7492&rep=rep1&type=pdf>
9. Perc M., Szolnoki A. Social diversity and promotion of cooperation in the spatial prisoner's dilemma game. *Phys. Rev. E.* 2008. Vol. 77. Issue 1 (011904). P. 1–5. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.77.011904>

10. Yang H. X., Wang W. X., Wu Z. X., Lai Y. C., Wang B. H. Diversity-optimized cooperation on complex networks. *Phys. Rev. E*. 2009. Vol. 79. Issue 5 (056107). P. 1–7. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.79.056107>
11. Pacheco J. M., Traulsen A., Nowak M. A. Coevolution of strategy and structure in complex networks with dynamical linking. *Phys. Rev. Lett.* 2006. Vol. 97. Issue 25 (258103). P. 1–4. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.97.258103>
12. Ohtsuki H., Nowak M. A., Pacheco J. M. Breaking the symmetry between interaction and replacement in evolutionary dynamics on graphs. *Phys. Rev. Lett.* 2007. Vol. 98. Issue 10 (108106). P. 1–8. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.98.108106>
13. Meloni S., Buscarino A., Fortuna L., Frasca M., Gómez-Gardeñes J., Latora V., Moreno Y. Effects of mobility in a population of prisoner's dilemma players. *Phys. Rev. E*. 2009. Vol. 79. Issue 6 (067101). P. 1–4. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.79.067101>
14. Jiang L. L., Wang W. X., Lai Y. C., Wang B. H. Role of adaptive migration in promoting cooperation in spatial games. *Phys. Rev. E*. 2010. Vol. 81. Issue 3 (036108). P. 1–6. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.81.036108>
15. Fu F., Nowak M. A. Global migration can lead to stronger spatial selection than local migration. *J. Stat. Phys.* 2013. Vol. 151. P. 637–653. https://projects.iq.harvard.edu/files/ped/files/jstatphys13_0.pdf
16. Fu F., Tarnita C. E., Christakis N. A., Wang L., Rand D. G., Nowak M. A. Evolution of in-group favoritism. *Sci. Rep.* 2012. Vol. 2. Issue 460. <https://www.nature.com/articles/srep00460>
17. Wang Z., Szolnoki A., Perc M. Optimal interdependence between networks for the evolution of cooperation. *Sci. Rep.* 2013. Vol. 3. Issue 2470. P. 1–7. <https://www.nature.com/articles/srep02470>
18. Куклин В. М., Приймак А. В., Яновский В. В. Влияние памяти на эволюцию популяций. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління». 2016. Вып. 29. С. 41–66 <https://periodicals.karazin.ua/mia/article/view/6557/6065>
19. Яновский В. В., Приймак А. В., Куклин В. М. Память и эволюция сообществ. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління». 2017. Вып. 35. С. 38–60. <https://periodicals.karazin.ua/mia/article/view/9841/9365>
20. Яновский В. В., Приймак А. В. Эволюция сообществ стратегий при наличии источников. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління». 2017. Вып. 36. С. 68–84. <https://periodicals.karazin.ua/mia/article/view/10098/9626>
21. Поричанский В. В., Приймак А. В., Яновский В. В. Альтернативная эволюция стратегий с памятью. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління». 2019. Вып. 44. С. 74–87. <https://periodicals.karazin.ua/mia/article/view/15775/14613>

Наукове видання

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

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

Випуск 49

Збірник наукових праць

Українською та англійською мовами

Комп'ютерне верстання О.О. Афанасьєва

Підписано до друку 18.04.2021 р.
Формат 60x84/8. Папір офсетний. Друк цифровий.
Ум. друк. арк. – 10,5.
Обл.– вид. арк. – 13,1.
Наклад 50 пр. Зам. № 7/2021
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