

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 58

Серія заснована 2003 р.

BULLETIN

of V.N. Karazin Kharkiv National University

Series

«Mathematical Modeling.
Information Technology.
Automated Control Systems»

Issue 58

First published in 2003

Харків
2023

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

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

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

Затверджено до друку рішенням Вченої ради Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (протокол № 10 від 26.06.2023 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

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.

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 № 10 of 26.06.2023).

Editorial Board:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Language of publication: Ukrainian, English.

The articles pass internal and external review.

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

ЗМІСТ

▪ Алексієв В. О., Алексієв О. П., Маций О. Б., Маций М. Є.	6
ІТ технологія транспортних застосувань	
▪ Величко К.О., Доценко О. В.	15
Дослідження КРІ в умовах оцінки протоколів DeFi	
▪ Колодяжний В. М., Лісіна О. Ю., Лісін Д.	28
Багатовимірні узагальнення атомарних радіальних базисних функцій	
▪ Мірошник М. А., Пшеничний К. Ю., Шафранський А. В., Шкіль О. С.	37
Підвищення тестопридатності часових автоматів Мура	
▪ Панченко А. С., Жолткевич Г. М.	47
Техніка моделювання Кіберфізичних систем за допомогою Коалгебри	
▪ Рева С. М., Комеристий В. С.	54
Програмний емулятор навчальної моделі цифрового процесора	
▪ Рева С. М., Циблієв Д. О.	64
Математичні моделі та алгоритми комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів	

CONTENTS

▪ Aleksiev V., Aleksiev O., Matsyi O., Matsyi M.	6
IT technology of transport applications	
▪ Velychko K., Dotsenko O.	15
KPI research in the context of DeFi protocol evaluation	
▪ Kolodyazhny V., Lisina O., Lisin D.	28
Multidimensional generalizations of atomic radial basis functions	
▪ Miroshnyk M., Pshenychnyi K., Shafranskyi A., Shkil O.	37
Models of Testable Timed Moore Finite State Machines	
▪ Panchenko A., Zholtkevych H.	47
The technique of modeling Cyberphysical systems using Coalgebra	
▪ Reva S., Komerysty V.	54
Software emulator of the digital processor training model	
▪ Reva S., Tsyblyiyev D.	64
Mathematical models and algorithms of computer modeling of spectrometric signals	

УДК 656:004.75

ІТ технологія транспортних застосувань

Алексієв В. О., Алексієв О. П., Маций О. Б., Маций М. Є.

**Алексієв
Володимир Олегович**

*д. т. н., професор
Харківський національний економічний університет ім. Семена Кузнеця
пр-т Науки, 9А, м. Харків, Україна, 61166
e-mail: aleksiyev@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6767-7524>*

**Алексієв
Олег Павлович**

*д. т. н., професор
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
вул. Ярослава Мудрого 25, Харків, Україна, 61002
e-mail: o.p.alekseev@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-9503-825X>*

**Маций
Ольга Борисівна**

*к. т. н., доцент
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
площа Свободи 4, Харків, Україна, 61022
e-mail: olga.matsiy@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1350-9418>*

**Маций
Михайло Євгенійович**

*аспірант
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
вул. Ярослава Мудрого 25, Харків, Україна, 61002
e-mail: michael.matsiy@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-7143-4269>*

Відмінною особливістю цієї роботи є застосування для рішення задач автомобільним бортовим інформаційно-комунікаційним комплексом обчислювальних ресурсів спеціального Інтернет-порталу. Така система, завдяки синергетичному поєднанню розподілених обчислювальних ресурсів транспортного порталу та засобів бортових систем реєстрації даних, надають учасникам руху та транспортним організаціям сервісні функції забезпечення ритмічності, оперативності, керованості та прогнозованості перевізних процесів (дані про розташування рухомих одиниць та характер середовища руху). Для цього застосовується аналогія, узагальнений синергетичний підхід, імітаційне моделювання, теорія операторів, мехатроніка та телематика. Така наукова основа базується на основних положеннях з сполучення засобів управління рухом автотранспортних засобів, електронних приладів та пристроїв, що забезпечують інформаційну взаємодію різномірних вузлів та агрегатів автомобілів і роботу усіх учасників дорожнього руху. Це є основа інформаційно-комунікаційної технології управління рухом наземного транспорту, яка продовжує розвиток комп'ютеризації та інтелектуалізації транспортних систем.

Ключові слова: мехатроніка, телематика, автомобільний бортовий інформаційно-комунікаційний комплекс, автотранспортні засоби.

Як цитувати: Алексієв В. О., Алексієв О. П., Маций О. Б., Маций М. Є. ІТ технологія транспортних застосувань. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління*. 2023. вип.58. С.6-14. <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2023-58-01>

How to quote: V.A. Aleksiev, and N.N. Aleksiev, O.B. Matsyi, M. Ye. Matsyi “ IT technology of transport applications.” *Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University, series Mathematical modelling. Information technology. Automated control systems*, vol. 28, pp. 6-14, 2023. <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2023-58-01>

1 Вступ

ІТ-індустрія наразі вирішує проблеми інтелектуальних електронних систем транспортних засобів, моніторингу стану транспортних засобів та умов дорожнього руху, забезпечуючи новий

рівень якості національної системи наземного транспорту, значно покращуючи її технічні характеристики та покращуючи умови перевезень. Це надає системі новий рівень якості, значно покращує її технічні характеристики та покращує умови перевезень. надання транспортних послуг населенню міст та регіонів України. Особливо це має значення в умовах логістики створення сучасних мехатронних автомобільних приладів та пристроїв, агрегатів та і саме автомобілів.

Головними є проблеми, що пов'язані зі зміною характеру відповідних наземних транспортних засобів (рухомих одиниць – РО), універсалізацією їх енергетичних властивостей. Існуючі окремі рішення транспортної IT потребують узагальнення, стандартизації та уніфікації, визначення нових спеціальних вимог до створення спеціальних властивостей обчислювальних систем та мереж РО [1-5].

Сучасні інформаційні системи загального призначення призначені для забезпечення мультимедійних функцій (наприклад, радіо, телебачення, відтворення DVD), вирішення завдань навігації та надання додаткових функцій безпеки і комфорту водіння (наприклад, системи паркування, зупинки або блокування двигуна, сервісного обслуговування в СТО).

На рис.1 наведена узагальнена схема створення відповідної мехатронної системи (мехатронізація РО).

ОБҐРУНТУВАННЯ МЕХАТРОНІЗАЦІ РО



Рис.1.1 Мехатронна автомобільна система

Для цього потрібно, перш-за-все, своєрідна діджиталізація, або формалізація перевізного процесу. На рис.2 наведена схема відповідної формальної системи його своєрідної просторово-часової орієнтації.

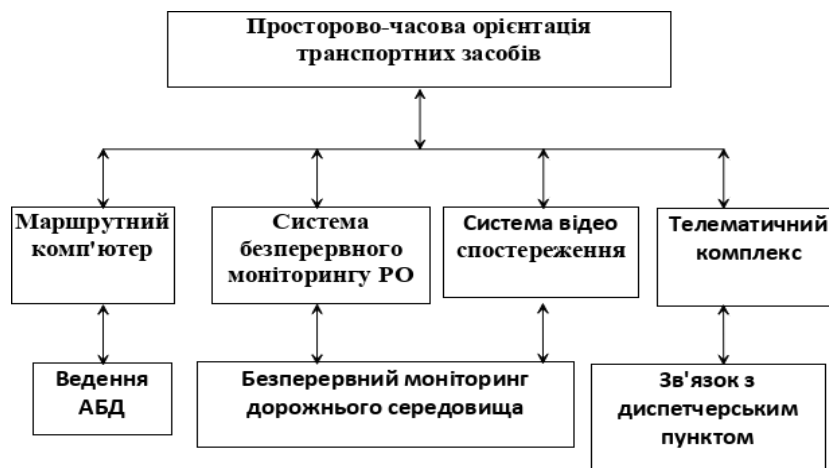


Рис.1.2 Схема формальної системи

Така система дозволяє аналізувати енергетичну складову РО, їх взаємозв'язки з енергетикою, а також вплив інформатизації на оцінку та засоби. У попередніх розробках процеси отримання інформації, її обробки та прийняття управлінських рішень на практиці були розділені. Тому важливо створити інформаційно-комунікаційну технологію для управління рухом наземного транспорту у великих містах. Ця технологія є основою для побудови технічних засобів для запису та аналізу даних на борту транспортних засобів в режимі реального часу, використовуючи ресурси розподілених систем обробки даних на базі інтернет-порталів.

Вирішення цього протиріччя дозволить покращити обслуговування населення великих міст та регіонів на всіх рівнях транспортної інфраструктури України, удосконалити транспортні процеси [6-7], уникнути таких негативних наслідків, як порушення руху транспорту, незадовільний стан шляхів сполучення, нераціональне використання коштів, що виділяються на ремонт, експлуатацію та розгортання транспортних шляхів та енергозалежних РО. інформаційне наповнення мережі та методи збору даних можуть бути покращені.

Відмінною особливістю є використання обчислювальних ресурсів спеціальних інтернет-порталів для вирішення завдань бортового інформаційно-комунікаційного комплексу транспортного засобу.

Така система синергетично поєднує розподілені обчислювальні ресурси транспортного порталу та бортової системи реєстрації даних для надання учасникам дорожнього руху та організаціям дорожнього руху сервісних функцій для забезпечення ритмічності, ефективності, керованості та передбачуваності дорожнього процесу (місцезнаходження мобільних одиниць та дорожньої обстановки (дані про характер дорожньої обстановки)).

2 Основні поняття метода досліджень

У зв'язку з постійною інформатизацією суспільства та його виробничих елементів, нові транспортні системи та машини досягли високого рівня інформатизації. Таким чином, виникає нове протиріччя між стрімким розвитком засобів і методів інформатизації складних об'єктів і систем та неоднорідним характером існуючих підсистем і ланок транспортного комплексу України. Вирішення цього протиріччя дозволить транспортній інфраструктурі на всіх рівнях покращити обслуговування населення міст та регіонів, удосконалити транспортні процеси та уникнути існуючих негативних наслідків.

Як наслідок, будуть усунені перебої в русі транспорту, незадовільний стан транспортних шляхів та нераціональне використання коштів, що виділяються на ремонт, утримання та вдосконалення транспортних шляхів. Це підвищує безпеку руху, покращує якість транспортних послуг та забезпечує комфорт пересування людей і збереження вантажів. Усуненню саме таких супутніх явищ при вдосконаленні інформаційної складової транспортної інфраструктури мегаполісу присвячені відповідні публікації [7, 8].

У дослідженні [3] визначено рішення для такого вдосконалення як розвиток віртуального управління дорожнім рухом (інформаційно-комунікаційні технології ІКТ транспортного веб-порталу, його створення та застосування до дорожнього руху). На нашу думку, зміст відповідних сервісів має базуватися на просторово-часовій орієнтації, алгоритмізації та маршрутизації руху залізничних транспортних засобів підприємств та організацій, що забезпечують транспортні процеси. Тому основна увага має бути зосереджена на впровадженні та реалізації основних положень віртуального управління транспортними процесами [8].

3 Основна частина

Об'єктом дослідження є предмет даної науково-технічної роботи з розробки та впровадження інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) для наземного автомобільного транспорту – процес інформаційного розвитку транспортної системи.

Метою дослідження є забезпечення ритмічності, ефективності, керованості та прогнозованості роботи міського та регіонального транспортних комплексів України та підвищення інформаційної забезпеченості учасників дорожнього руху.

Метод дослідження полягає у застосуванні інформаційного аналізу та синтезу складних обчислювальних систем на транспорті. Для цього застосовується аналогія, узагальнений синергетичний підхід, імітаційне моделювання, теорія операторів, мехатроніка та телематика. Така наукова основа. Вона базується на основних положеннях з сполучення засобів управління рухом автотранспортних засобів, електронних приладів та пристроїв, що забезпечують

інформаційну взаємодію різнорідних вузлів та агрегатів автомобілів і роботу усіх учасників дорожнього руху.

Це є основа інформаційно-комунікаційної технології управління рухом наземного транспорту, яка продовжує розвиток комп'ютеризації та інтелектуалізації транспортних систем з урахуванням наближення РО та людини до відповідної енергетичної складової. Звичайно, все це означає подальше розширення бізнес-сервісів веб-порталу, розвиток досліджень у напрямку побудови гнучких систем масштабування, продовження впровадження результатів цих досліджень у діяльність галузі, накопичення даних та розширення сервісів існуючих транспортних веб-порталів. Ми пропонуємо саме таке важливе сьогодні розподілення безпосереднього контакту людини з енергетичним впливом небезпечного середовища, однак дійсно важливого для її праці та існування. Це і є такий інформаційний контакт рис.3.



Рис.3.1 Інформаційний контакт з Інтернет-порталом

У визначеній в цій статті логістиці створення сучасних мегатонних автомобільних приладів та пристроїв, агрегатів та й автомобілів є саме поєднання використання спеціального універсального Інтернет-порталу з інтерактивним моніторингом як просторово-часовому орієнтуванню, так і виключенню безпосереднього контакту людини з небезпечним середовищем, його безпосереднім впливом на стан здоров'я людини. Практично це є відмова від транспортування таких речовин до спеціального міста визначенню їх дійсної небезпечності. Таким чином, можна уникнути за рахунок цієї відмови проведення спеціальної експертизи енергетичного впливу небезпечного середовища безпосередньо у цьому середовищі. Транспортування просто замінюється на передачу експрес оцінки по інтернету.

Сьогодні інформаційні системи загального призначення для транспортних засобів у дорожньому русі спрямовані на забезпечення мультимедійних функцій (наприклад, радіо, телебачення, відтворення DVD), вирішення навігаційних завдань і надання додаткових засобів для безпеки та комфорту водіння (наприклад, системи паркування, зупинки або блокування двигуна). Системи діагностики транспортних засобів орієнтовані, в першу чергу, на вирішення проблем технічного обслуговування транспортних засобів на станціях технічного обслуговування.

Досвід ХНАДУ в розробці автомобільних інформаційно-обчислювальних систем свідчить про потенціал створення універсальних мобільних інформаційно-комунікаційних систем для використання в транспортних засобах. Однак у попередніх розробках процес отримання інформації, її обробки та прийняття управлінських рішень був тимчасово фрагментований. Тому існує нагальна потреба в розробці інформаційно-комунікаційної технології для наземного транспорту у великих містах. Ця технологія є основою для побудови технічних засобів фіксації та аналізу бортових даних транспортних засобів у режимі реального часу з використанням ресурсів розподілених систем обробки даних на базі інтернет-порталів [7].

Відмінною особливістю даного науково-технічного дослідження є використання обчислювальних ресурсів спеціальних інтернет-порталів для вирішення завдань бортового інформаційно-комунікаційного комплексу автомобіля.

Така система поєднує розподілені обчислювальні ресурси транспортного порталу з синергетичним поєднанням бортових систем реєстрації даних для надання учасникам руху та організаціям дорожнього руху сервісних функцій, що забезпечують ритмічність, оперативність,

керованість та передбачуваність транспортного процесу (щодо місцезнаходження мобільних одиниць та характеру дорожньої обстановки). даних). Для цього використовуються аналогії, узагальнені синергетичні підходи, імітаційне моделювання, теорія операторів, мехатроніка і телематика. Це і є наукова база. Вона базується на основних положеннях поєднання пристроїв керування рухом транспортних засобів, електронних пристроїв, інформаційної взаємодії різнорідних вузлів і агрегатів транспортних засобів та пристроїв, що гарантують роботу всіх учасників дорожнього руху. Вона є основою інформаційно-комунікаційної технології управління наземним рухом, яка продовжує розвиток комп'ютеризації та інтелектуалізації транспортної системи. Реалізація цього проекту відбувається поетапно.

На першому етапі розроблено функціональну структуру та архітектуру програмно-апаратного комплексу інформаційно-комунікаційної технології управління наземним транспортом у великих містах. Визначення наближеного та комбінованого рішення експериментального зразка бортових інформаційно-комунікаційних комплексів на основі математичної моделі руху транспортного засобу з моніторингом транспортної ситуації. Виконано наукове обґрунтування та доведена можливість синергетичного об'єднання комп'ютерних ресурсів усіх учасників дорожнього руху в єдиному інформаційному просторі глобальної мережі Internet – від окремої транспортної машини до корпоративного рівня транспортної організації. Це є основним науковим результатом першого етапу цієї науково-технічної роботи.

Це є практика створення ланцюга: розумні машини → дорога → інформаційний простір Internet, яка розв'язує протиріччя між стрімким розвитком інформаційних ресурсів та існуючим станом інформаційного забезпечення транспортних процесів. Об'єднання комп'ютерних ресурсів кожного учасника руху значно підвищить інформативність осіб, що отримують транспортні послуги або приймають рішення щодо їх організації. Правильний вибір відповідного маршруту та транспортного засобу забезпечує безпеку, технологічність, економічність транспортних процесів за рахунок інформаційного розвитку транспортної інфраструктури великих міст та окремих регіонів будь-якої держави.

Інформаційно-комунікаційна технологія руху наземного транспорту орієнтована не тільки на надання додаткових послуг учасникам руху, а й на удосконалення середовища руху транспортних засобів. Така універсальна система є найбільш привабливим саме для України. Іншою перевагою інформаційно-комунікаційної технології наземного транспорту, що розроблена, є розподілений характер системи реєстрації, оцінки та формування контенту сховища даних, їх представлення користувачам.

У результаті виконання першого етапу виконано опис функціональної структури та архітектури програмно-апаратного комплексу інформаційно-комунікаційної технології наземного транспорту наземного транспорту.

Головним завданням другого етапу є створення робочої версії транспортного порталу на сервері виконавця з урахуванням попереднього тестування елементів програмних, технічних та апаратних рішень взаємодії бортового інформаційно-комунікаційного комплексу з транспортним порталом та результатів обчислювального експерименту з визначення інформаційних потоків та обсягу комп'ютерних ресурсів, необхідних для моніторингу транспортних ситуацій. Таким чином, на другому етапі розроблено дві основних частини забезпечення інформаційно-комунікаційної технології руху наземного транспорту великих міст: дослідний зразок бортового інформаційно-комунікаційного комплексу та саме транспортний портал.

Такі системи надають учасникам перевезень і транспортним організаціям сервісні функції (дані про місцезнаходження залізничних транспортних засобів і характер дорожнього середовища) для забезпечення ритмічності, ефективності, керованості та передбачуваності транспортних процесів за рахунок синергетичного поєднання розподілених обчислювальних ресурсів транспортних порталів і бортових систем реєстрації даних.

Об'єкт дослідження другого етапу – розгортання робочої версії транспортного порталу інформаційно-комунікаційної технології руху наземного транспорту великих міст. Предмет другого етапу науково-технічної роботи – розроблення програмних, технічних та апаратних рішень взаємодії бортового інформаційно-комунікаційного комплексу з транспортним порталом.

Результати науково-технічної роботи мають наступні переваги в інформаційному розвитку транспортної інфраструктури України:

– у світі нема подібних систем. Переважно світові аналоги орієнтовано на вирішення окремих задач, наприклад, пошук маршруту або загально доступні картографічні сервісні системи;

– на відміну від зарубіжних аналогів враховується специфіка вітчизняних ІКТ, розробка спрямована не тільки на надання додаткових послуг учасникам руху, а й на оцінку середовища руху транспортних засобів;

– система реєстрації даних має універсальний характер та надає можливості розвитку інформаційного забезпечення будь-яких транспортних засобів. Вона є розподіленою комп'ютерною системою транспортних додатків;

– обладнання лише 10% рухомих одиниць подібними бортовими комплексами знижує кількість заторів на 30%;

– використання бортових інформаційно-комунікаційних систем, пов'язаних з транспортними порталами, для вибору оптимальних маршрутів може підвищити економічну ефективність пасажирських і вантажних перевезень на 21% за витратами на паливо, на 16% за відстанню і на 18% за часом у дорозі;

– вирішення проблеми управління транспортом та автоматизації диспетчеризації руху у великих містах дозволить заощадити щонайменше 2 млн грн на рік (за рахунок спрощення обладнання автостанцій та автоматизації транспортних засобів);

– застосування у якості програмно-апаратної платформи транспортного ситуаційного центру великого місту забезпечує виконання завдань універсального пункту спостереження, диспетчерського контролю, моніторингу руху транспортних засобів. Забезпечується як функції диспетчеризації маршрутного транспорту так і заходи проти угону транспортного засобу (швидке реагування на розрив зв'язку із рухомою одиницею (РО), дистанційне спостереження за станом відповідного транспортного засобу).

Науковий результат другого етапу полягає в інтелектуалізації ланцюга, що поєднує розумні машини, дорожні умови та інформаційний простір Internet. Це є узагальнення проблем створення транспортного порталу для забезпечення додатковим комп'ютерним ресурсом учасників руху великих міст та регіонів (будь-яких регіонів).

Практичний результат виконання другого етапу – програмні, технічні та апаратні рішення з взаємодії бортового інформаційно-комунікаційного комплексу з транспортним порталом. Він полягає у створенні дослідного зразку бортового інформаційно-комунікаційного центру інформаційно-комунікаційної технології управління рухом наземного транспорту великих міст. Визначено програмно-апаратну архітектуру транспортного порталу, платформу та інтерфейс користувач. Виконано опис програмних, технічних та апаратних рішень взаємодії бортового інформаційно-комунікаційного комплексу з транспортним порталом. Розглянуто уніфікацію програмно-апаратних рішень. Визначені характеристики мережевих інтерфейсів та протоколів передачі даних, розглянуто взаємодія програмних компонентів порталу, особливості обробки даних. При розробці дослідного зразку бортового інформаційно-комунікаційного комплексу основна увага приділена вдосконаленню схемних та функціональних рішень, розробці та доопрацюванню програмних модулів. Розглянуто випробування дослідного зразку бортового інформаційно-комунікаційного комплексу.

У додатках звітності за другий етап наведено акти на введення в дію робочої версії транспортного порталу, випробувань дослідного зразку бортового інформаційно-комунікаційного комплексу. Додається також технічне завдання на транспортний портал та керівництво з експлуатації бортового інформаційно-комунікаційного комплексу з ним. Це стало основою розроблення програмного забезпечення дослідного зразку бортового інформаційно-комунікаційного комплексу та модулів транспортного порталу, визначенню мережевих інтерфейсів та протоколів передачі даних.

Стислий зміст виконаних робіт третього етапу наступний:

– розроблення робочої конструкторської документації бортового інформаційно-комунікаційного комплексу універсального призначення відповідно до коригування за результатами випробувань дослідного зразку бортового інформаційно-комунікаційного комплексу та тестуванням транспортного порталу;

– в цілому розроблено методології впровадження інформаційно-комунікаційних технологій наземного транспорту у великих містах та окремих регіонах України;

– розроблено методології впровадження інформаційно-комунікаційних технологій наземного транспорту у великих містах та окремих регіонах України. Впровадження інформаційно-комунікаційних технологій наземного транспорту у великих містах на рівні муніципальних

органів влади, інспекції якості та сертифікації дорожньої продукції, підприємств та організацій, пов'язаних з виробництвом та експлуатацією транспортних машин і систем, в цілому; РО;

– тестування транспортного порталу та визначені рекомендації щодо вдосконалення інтерфейсу його користувачів.

У результаті етапу виконується:

– розробка робочої конструкторської документації бортового інформаційно-комунікаційного комплексу універсального призначення; описані методи та комплекс заходів для забезпечення масштабованості та адаптації інформаційно-комунікаційної технології руху наземного транспорту великих міст до збільшення кількості користувачів;

– розробка методики впровадження інформаційно-комунікаційної технології руху наземного транспорту великих міст; акти впровадження інформаційно-комунікаційної технології руху наземного транспорту великих міст;

– складається протокол тестування транспортного порталу; рекомендації щодо вдосконалення інтерфейсу користувача транспортного порталу.

– отримуються результати впроваджені на рівні дослідної експлуатації. Це дослідження треба розглядати складовою частиною інтелектуалізації транспортних машин, систем та комунікацій, процесів інформатизації сучасного суспільства залежно від часу (просторово часової орієнтації РО).

Завершення цієї праці є опис розроблення апаратної складової інформаційно-комунікаційної технології руху наземного транспорту. Це відомості про функціональну структуру та архітектуру програмно-апаратного комплексу інформаційної технології руху наземного транспорту. Досліджено процеси створення та виготовлення експериментального зразку бортового інформаційно-комунікаційного комплексу. Виконано математичне моделювання руху транспортного засобу з інформаційно-комунікаційним комплексом.

У другому розділі визначено програмно-апаратну архітектуру транспортного порталу. Наведені програмні, технічні та апаратні рішення взаємодії бортового інформаційно-комунікаційного комплексу з транспортним порталом. Описана розробка дослідного зразка бортового інформаційно-комунікаційного комплексу, методика обробки даних. Виконано випробування дослідного зразка бортового інформаційно-комунікаційного комплексу.

У розділі 3 розглянуто пілотне впровадження інформаційно-комунікаційних технологій на наземному транспорті у великих містах на таких підприємствах та організаціях: ДНТЦ "Зоря", НВП "Хартрон-Аркос", ВАТ "Харківський тракторний завод", ДП "Українська автотранспортна компанія "ВОЕНКОНВЕРС-43", ДП "Харківський завод спеціальних машин", ПАТ "Харківське автотранспортне підприємство 163". Транспортна компанія "ВОЕНКОНВЕРС-43", ДП "Харківський завод спеціальних машин", ПАТ "Автотранспортне підприємство 16364". Представлено робочий проект бортового інформаційно-комунікаційного комплексу. Визначено методи та заходи щодо забезпечення масштабованості інформаційно-комунікаційних технологій наземного транспорту у великих містах та їх адаптації до зростаючої кількості користувачів. Розроблено методологію впровадження інформаційно-комунікаційних технологій наземної транспортної мобільності у великих містах. Проведено тестування транспортного порталу та визначено рекомендації щодо покращення користувацького інтерфейсу. За результатами створення та попереднього експериментального впровадження можна рекомендувати виробниче розгортання компонентів розробленої технології та їх впровадження у промислову експлуатацію в транспортній галузі [8]. Це пов'язано з тим, що продемонстровано, що в умовах великих міст та регіонів підтверджується твердження про те, що за рахунок інформаційно-комунікаційних технологій на наземному транспорті може бути зекономлено щонайменше 2 млн. грн. на рік (за рахунок спрощення зупинок та автоматизації руху транспортних засобів шляхом безперервного моніторингу дорожньої обстановки). Вартість прототипу інформаційно-комунікаційної багатофункціональної машини становить приблизно 17000 гривень. Орієнтовний річний обсяг виробництва – 1 000 транспортних засобів. Використання бортових інформаційно-комунікаційних систем для вибору оптимального маршруту може підвищити економічну ефективність пасажирських і вантажних перевезень на 21% у витратах на паливо, на 16% – на відстань і на 18% - на час у дорозі. Крім того, оснащення лише 10% залізничних транспортних засобів такими бортовими системами може зменшити затори на 30%.

4 Висновок

Визначені показники та науково-технічний рівень дозволяють стверджувати, що результати дослідження є корисними для розвитку транспортної галузі та можуть суттєво покращити рівень інформування учасників дорожнього руху в містах та регіонах України та рівень транспортного обслуговування населення. Безсумнівно, це означає, що розвиток дослідження в напрямку подальшого розширення бізнес-сервісів веб-порталу та створення гнучкої системи масштабування, подальше впровадження результатів цього дослідження в промислову експлуатацію, накопичення даних та розширення сервісів існуючих транспортних веб-порталів буде дуже корисним для всіх українських міст та регіонів нашої країни. Призначений для вирішення проблем транспортного обслуговування мешканців міст та регіонів.

ЛІТЕРАТУРА

1. L. Koliechkina and O. Pichugina, *A Horizontal Method of Localizing Values of a Linear Function in Permutation-Based Optimization*, in *Optimization of Complex Systems: Theory, Models, Algorithms and Applications*, Cham, 2020, pp. 355–364. doi: 10.1007/978-3-030-21803-4_36.
2. L. D. R. Beal, D. C. Hill, R. A. Martin, and J. D. Hedengren, *GEKKO Optimization Suite, Processes*, volume 6, no. 8, Aug. 2018, p. 106. doi: 10.3390/pr6080106.
3. T. F. Chan, J. Cong, J. R. Shinnerl, K. Sze, M. Xie, and Y. Zhang, *Multiscale Optimization in VLSI Physical Design Automation*, in *Multiscale Optimization Methods and Applications*, W. W. Hager, S.-J. Huang, P. M. Pardalos, and O. A. Prokopyev, Eds. Springer US, 2006, pp. 1-67.
4. *APMonitor, APMonitor/apopt*, 2020. URL: <https://github.com/APMonitor/apopt> S. Held, D. Muller, D. Rotter, R. Scheifele, V. Traub, and J. Vygen, *Global Routing with Timing Constraints*, *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2017, pp. 1–14. doi: 10.1109/TCAD.2017.2697964.
5. B. Korte, D. Rautenbach, and J. Vygen, *BonnTools: Mathematical Innovation for Layout and Timing Closure of Systems on a Chip'*, *Proceedings of the IEEE*, volume 95, no. 3, pp. 555–572, Mar. 2007. doi: 10.1109/JPROC.2006.889373.
6. O. Pichugina, *Placement problems in chip design: Modeling and optimization*, 2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), 2017, pp. 465–473. doi: 10.1109/infocommst.2017.8246440.
7. Алексієв О.П., Алексієв В.О., Маций М.С. Інформаційна соціалізація учасників дорожнього руху. Відкриті інформаційні та комп'ютерні технології, 2020. № 89. С. 91-103.
8. Алексієв О.П. Cloud Computing автомобільного трансферу та утримання доріг. Вісник ХНАДУ. Вип. 87, Харьков, 2019. С.24-31.

REFERECES

1. L. Koliechkina and O. Pichugina, *A Horizontal Method of Localizing Values of a Linear Function in Permutation-Based Optimization*, in *Optimization of Complex Systems: Theory, Models, Algorithms and Applications*, Cham, 2020, pp. 355–364. doi: 10.1007/978-3-030-21803-4_36.
2. L. D. R. Beal, D. C. Hill, R. A. Martin, and J. D. Hedengren, *GEKKO Optimization Suite, Processes*, volume 6, no. 8, Aug. 2018, p. 106. doi: 10.3390/pr6080106.
3. T. F. Chan, J. Cong, J. R. Shinnerl, K. Sze, M. Xie, and Y. Zhang, *Multiscale Optimization in VLSI Physical Design Automation*, in *Multiscale Optimization Methods and Applications*, W. W. Hager, S.-J. Huang, P. M. Pardalos, and O. A. Prokopyev, Eds. Springer US, 2006, pp. 1-67.
4. *APMonitor, APMonitor/apopt*, 2020. URL: <https://github.com/APMonitor/apopt> S. Held, D. Muller, D. Rotter, R. Scheifele, V. Traub, and J. Vygen, *Global Routing with Timing Constraints*, *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2017, pp. 1–14. doi: 10.1109/TCAD.2017.2697964.
5. B. Korte, D. Rautenbach, and J. Vygen, *BonnTools: Mathematical Innovation for Layout and Timing Closure of Systems on a Chip'*, *Proceedings of the IEEE*, volume 95, no. 3, pp. 555–572, Mar. 2007. doi: 10.1109/JPROC.2006.889373.
6. O. Pichugina, *Placement problems in chip design: Modeling and optimization*, 2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), 2017, pp. 465–473. doi: 10.1109/infocommst.2017.8246440.

7. Aleksiiiev O.P., Aleksiiiev V.O., Matsyi M.Ye. *Informatsiina sotsializatsiia uchasnykiv dorozhnoho rukhu*. Vidkryti informatsiini ta kompiuterni tekhnolohii, 2020. № 89. S. 91-103.
8. Aleksiiiev O.P. *Cloud Somputing avtomobilnoho transferu ta utrymannia dorih*. Visnyk KhNADU. Vyp. 87, Kharkov, 2019. S.24-31.

Aleksiev Volodymyr

*Doctor of Technical Sciences, Professor
Semyon Kuznets Kharkiv National University of Economics
Ukraine, 9A Nauki Avenue, Kharkiv, Ukraine, 61002
e-mail: aleksiyev@gmail.com;
<https://orcid.org/0000-0001-6767-7524>*

Aleksiev Oleh

*Doctor of Technical Sciences, Professor
Kharkiv National Automobile and Highway University
Yaroslava Mudryho str, 25, Kharkiv, Ukraine, 61002
e-mail: o.p.alekseev@gmail.com;
<https://orcid.org/0000-0002-9503-825X>*

Matsyi Olga

*PhD of Technical Sciences, docent
V.N. Karazin Kharkiv National University
Svobody Square 4, Kharkiv, Ukraine, 61002
e-mail: olga.matsiy@gmail.com;
<https://orcid.org/0000-0002-1350-9418>*

Matsyi Michael

*Graduate student Kharkiv National Automobile and Highway University,
Yaroslava Mudryho str, 25, Kharkiv, Ukraine, 61002
e-mail: michael.matsiy@gmail.com;
<https://orcid.org/0000-0001-7143-4269>*

IT technology of transport applications

A distinctive feature of this work is the usage of computing resources of a dedicated Internet portal for solving problems by the automotive on-board information and communication complex. Such a system, thanks to the synergistic combination of on-board data recording systems and distributed computing resources of the transport portal, can provide traffic participants and transport organizations with service functions to ensure the rhythm, efficiency, controllability and predictability of transport processes (data on the location of moving units and the nature of the traffic environment). For this purpose, analogy, generalized synergistic approach, simulation modeling, operator theory, mechatronics and telematics have been used. Such approach is based on the main provisions on the combination of traffic control tools, electronic equipment and devices that ensure the informational interaction of heterogeneous car components and systems, and the activities of all traffic participants. This is the basis of the information and communication technology of land transport traffic management, which continues the development of computerization and intellectualization of transport systems.

Keywords: *mechatronics, telematics station, car on-board information and communication complex, motor vehicles.*

УДК (UDC) 336.7

**Величко Кирило
Олександрович**

студент факультету комп'ютерних наук, ХНУ імені В.Н. Каразіна,
майдан Свободи, 4, Харків, 61022, Україна
e-mail: velychko2021kb12@student.karazin.ua
<https://orcid.org/0009-0001-9551-7242>

**Доценко Олексій
Володимирович**

викладач ХНУ імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, Харків, 61022,
Україна
e-mail: dotsenko@karazin.ua
<https://orcid.org/0000-0002-2028-1810>

Дослідження КРІ в умовах оцінки протоколів DeFi

Анотація. Ця стаття присвячена проведенню аналізу ключових показників ефективності в умовах оцінки DeFi-протоколів. Під час дослідження було проведено глибокий аналіз, спрямований на визначення важливих аспектів альтернативного фінансування і ролі DeFi-протоколів як альтернативи традиційним фінансовим методам. У ході дослідження було проаналізовано різноманітні показники ефективності. Основною фокусною точкою є загальний обсяг заблокованих коштів (TVL), який виявився вирішальним показником інвестиційної привабливості DeFi-проектів. TVL відображає сукупний капітал, вкладений в їхню успішну роботу. Крім TVL, було досліджено інші ключові аспекти, такі як відношення ціни до обсягів торгів, структура токенів, рух токенів на централізованих біржах і чіткість документації DeFi-проектів. Це важливо для того, щоб отримати повний обсяг інформації, необхідний для правильного вибору інвестиційного напрямку в цьому різноманітному ринку. Дослідження також вказує на широкий спектр різних категорій бізнес-моделей у галузі DeFi, такі як децентралізовані біржі, протоколи кредитування та протоколи управління активами. Розуміння цієї різноманітності є ключовим для правильного вибору інвестиційного напрямку. При аналізі інвестиційної привабливості DeFi-проектів слід звертати увагу на різні показники, включаючи ціну та обсяги торгів, TVL та інші фактори. Також важливо враховувати інші чинники, такі як структура токенів і їхня активність на централізованих біржах. Доступність і повнота документації проекту також грають вагомую роль, оскільки вони впливають на права власників токенів і умови отримання прибутку від стейкінгу LP. Усе це дослідження надає вичерпний огляд та інсайти для інвесторів у галузі DeFi, допомагаючи їм приймати інформовані рішення про вибір проектів та оптимальний спосіб розміщення капіталу в цій швидко розвиваючійся галузі.

Ключові слова: DeFi, децентралізовані фінанси, TVL, Total Value Locked, KPI.

Як цитувати: Величко К. О., Доценко О. В. Дослідження КРІ в умовах оцінки протоколів DeFi. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління*. 2023. вип. 58. С.15-27. <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2023-58-02>

How to quote: Velychko K. O., and Dotsenko O. V., "KPI research in the context of DeFi protocol evaluation." *Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University, series Mathematical modelling. Information technology. Automated control systems*, vol. 58, pp. 15-27, 2023. <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2023-58-02>

Постановка проблеми.

Блокчейн та криптовалюти стали сенсаційними технологіями десятиліття що дали змогу створити розвинути нову індустрію децентралізованих фінансів - DeFi. Нова індустрія потребує нових дослідників та ставить нові виклики для науковців. У сегменті криптовалют є безліч загроз шахрайства та невизначеності для інвесторів що частково не сприяє розвитку індустрії та потребує вирішення низки важливих питань. Зокрема у нашому дослідженні ми працюємо над аналізом КРІ (ключові показники ефективності) DeFi проектів. КРІ є надзвичайно важливим аспектом, зокрема коли річ іде про інвестиції та перспективи розвитку проектів, тому дана тема є актуальною у контексті фінансового світу сучасності.

Аналіз основних досліджень і публікацій.

(Олексій Доценко, 2022), у статті досліджено функціональні особливості децентралізованих фінансових активів, об'єднуючи криптографічні технології з децентралізованими реєстрами даних. Увага приділяється дослідженню архітектури децентралізованих додатків, аналізу

динаміки їх створення та вивченню взаємодії різних складових цих додатків. Стверджується, що децентралізовані додатки є важливою ланкою в ринку децентралізованих фінансів, і розкривають основні аспекти їхньої архітектури та функціонування, закликаючи до постійного розвитку та доповнення цієї технологічної галузі.

(Yousaf and Yarovaia, 2021), у статті досліджується взаємозв'язок між NFT, активами DeFi і традиційними активами, такими як нафта, золото, біткойни. Дослідження показує, що активи NFT і DeFi відносно відокремлені від традиційних активів і біткойнів, причому більшість активів NFT і DeFi діють як чисті передавачі прибутку та переливу волатильності. Дослідження показує, що під час початкової фази пандемії COVID-19 і криптовалютної бульбашки 2021 року зростає зв'язок динамічної прибутковості та волатильності, що спонукає менеджерів портфельів відповідно коригувати розподіл активів.

(Kaal, Evans and Howe, 2022), у статті висвітлюються проблеми застосування традиційних оціночних показників до цифрових активів через унікальні характеристики та незрілість ринку цифрових активів. Вона підкреслює необхідність окремого аналізу та методів оцінки, специфічних для цифрових активів, які суттєво відрізняються і надають менеджерам цифрових активів можливість оцінювати їх на власний розсуд. Відсутність єдиних стандартів оцінки цифрових активів призводить до невизначеності та плутанини серед інвесторів і менеджерів, і в статті міститься заклик до розробки загальногалузевих стандартів, які можуть розвиватися разом з ринком.

(Azar et al., 2022), у статті досліджується вплив екосистеми цифрових активів на фінансову стабільність. Виявлено, що екосистема цифрових активів демонструє вразливість, але має обмежений вплив на традиційну фінансову систему через її обмежені взаємозв'язки. Однак нові вразливості, такі як ризики, пов'язані зі стейблкоїнами, тиск на оцінку та відсутність регулювання, можуть створити значні ризики для фінансової стабільності, якщо екосистема цифрових активів стане більш інтегрованою з традиційною фінансовою системою або розширить свої фінансові послуги.

(Saengchote, 2021), основна увага в статті приділена потокам стейблкоїну DAI в екосистемі DeFi, зокрема його зв'язку з різними протоколами. Автори відзначають, що на карбування DAI впливає ціна ETH, і DAI має тенденцію перетікати в популярні протоколи, що часто зумовлено стимулами для фермерських господарств, спрямованих на підвищення врожайності. У статті підкреслюється складність аналізу екосистеми DeFi через її взаємопов'язану природу, засновану на токенах, і наголошується на необхідності подальших досліджень для розуміння ролі стейблкоїнів у стеку DeFi і потенційних ризиків, які вони можуть створювати, особливо в умовах, коли DeFi продовжує розвиватися і розширюватися.

(Stepanova and Eriņš, 2021), у статті представлено огляд ландшафту децентралізованих фінансів (DeFi) та 12 найпопулярніших додатків DeFi, виміряних за показником Total Value Locked за 34-місячний період. У документі підкреслюється зростання інвестицій та кількості користувачів DeFi, незважаючи на ризики та виклики, що свідчить про необхідність подальших досліджень та розвідок на цьому фінансовому ринку, що розвивається.

(Prokhorova, 2020), у статті представлено методологію прогнозування довгострокового впливу маркетингових кампаній у сфері послуг електронної комерції. Підхід оцінює ефективність кампанії, включаючи рентабельність інвестицій, на основі даних, зібраних протягом перших 4 тижнів після завершення кампанії. Однак він не прогнозує повну життєву цінність клієнта, яка може змінюватися через цінові та конкурентні фактори.

(Abdulhakeem and Hu, 2021), основна увага в статті приділена трансформаційному потенціалу децентралізованих фінансів (DeFi) на основі технології блокчейн. У ній висвітлюються обмеження традиційної фінансової системи та перспективи DeFi з точки зору фінансової інклюзивності, прозорості та ефективності. У статті підкреслюється, що DeFi може доповнити існуючу фінансову систему і створити нові можливості як для роздрібних користувачів, так і для установ, зменшуючи при цьому тягар винаходу фінансових послуг з нуля.

(Schueffel, 2021), у статті розглядається концепція DeFi (децентралізовані фінанси), підкреслюється її зростаюча популярність у фінансовому світі. Також досліджується потенційний вплив DeFi на сектор фінансових послуг, включаючи такі ключові тенденції, як перехід мережі Ethereum, крос-ланцюгові технології, стейблкоїни, розширення спектру продуктів і можливість переходу DeFi в мейнстрім. Крім того, у звіті йдеться про те, що DeFi може принести інновації та

зміни у фінансові концепції, що може мати потенційні наслідки як для регульованих, так і для нерегульованих секторів індустрії.

(Werner et al., 2022), у статті представлено систематичне дослідження екосистеми децентралізованих фінансів (DeFi), підкреслено її стрімке зростання з 700 мільйонів доларів США, заблокованих два роки тому, до близько 150 мільярдів доларів США станом на квітень 2022 року. У звіті класифікуються системи DeFi на основі примітивів, операційних протоколів і аспектів безпеки, підкреслюється необхідність всебічного розуміння як технічних, так і економічних ризиків безпеки.

(Chohan, 2021), у статті критично розглядається потенціал децентралізованих фінансів (DeFi) як альтернативної фінансової системи, заснованої на децентралізації та дезінтеграції, висвітлюються її виклики, включаючи маніпулювання ринком і відмивання грошей. У висновку висловлюється обережний оптимізм щодо здатності DeFi розширювати можливості людей, але визнається необхідність усунення значних ризиків, що призводить до закликів до подальших досліджень його потенційної цінності в контексті криптоанархістських принципів.

(Caldarelli and Ellul, 2021), у статті досліджується концепція "проблеми Oracles" в децентралізованих фінансах (DeFi), яка виникає через використання оракулів для отримання зовнішніх даних для фінансових додатків на основі блокчейну. У ньому підкреслюється необхідність стандартизації та економічних стимулів для вирішення технічних і соціальних питань, пов'язаних з оракулами. У дослідженні також обговорюється вплив минулих збоїв оракулів, ризики, пов'язані з оракулами в DeFi, і потенційні поліпшення. У висновку підкреслюється поява нових протоколів блокчейну, які мають на меті усунути потребу в оракулах, потенційно революціонізуючи DeFi та інші застосування технології розподіленого реєстру.

(Phemex, 2021a), основна ідея статті полягає в тому, що сучасна система валютних курсів більше не прив'язана до золота чи матеріальних товарів, а прив'язана до внутрішніх економічних умов та довіри до політики країни. Через економічні наслідки глобальної пандемії та спричинену нею інфляцію біткоїн знову набув інтересу як інфляційно стійкий актив. Однак у статті робиться висновок, що хоча біткоїн може бути хеджуванням від інфляції, він не може стати ідеальним хеджуванням, поки інфляція залишається під контролем, але він залишається потужним класом активів для інвестування.

(Phemex, 2021b), у статті обговорюється оцінка інвестиційного потенціалу блокчейн-проектів децентралізованих фінансів (DeFi). Підкреслюється важливість конкретних показників ефективності, таких як співвідношення P/S, TVL, коефіцієнт TVL, пропозиція токенів і рух балансу токенів, для оцінки життєздатності проекту DeFi. Крім того, в статті підкреслюється важливість врахування ясності і повноти проектної документації для прийняття обґрунтованих інвестиційних рішень.

(CoinMarketCap Academy, 2021), Основна увага в статті приділена концепції токеноміки, яка передбачає аналіз динаміки попиту та пропозиції криптовалют. Вона висвітлює історичний контекст грошової маси та потенційний вплив створення урядами додаткової валюти, що призводить до інфляції. У статті також підкреслюється, як токеноміка може бути використана для оцінки майбутньої вартості криптоактивів на прикладах Bitcoin Cash і Tron, щоб проілюструвати важливість таких факторів, як загальна пропозиція, у визначенні їхнього потенціалу для майбутнього успіху.

(Qin Kaihua et al., 2021), основною темою статті є аналіз та розмежування централізованих фінансів (CeFi) та децентралізованих фінансів (DeFi). Дослідження показало, що, незважаючи на наявність відмінностей, межі між ЦФ і ДФ не завжди є чіткими. У статті робиться висновок, що DeFi вже включає в себе активи і практики CeFi, і пропонується, щоб і CeFi, і DeFi працювали разом, щоб створити стійкі, зручні для користувачів і ефективні фінансові екосистеми.

(Momtaz, 2022), у статті досліджується ефективність ринку первинного розміщення монет (ICO) і те, як технологія блокчейн впливає на деталізацію ринку, що призводить до зростання неефективності пошуку. Підкреслюється, що спеціалізовані криптовалютні фонди підвищують ефективність ринку ICO, зменшуючи труднощі пошуку, а також отримують значну економічну вигоду.

(Şoiman, Dumas and Jimenez-Garces, 2022), стаття зосереджена на аналізі факторів, що впливають на дохідність децентралізованих фінансів (DeFi). У дослідженні вивчається вплив різних драйверів, включаючи вплив криптовалютного ринку, мережевий ефект, увагу інвесторів та коефіцієнт оцінки. У статті також висвітлено потенційні напрямки майбутніх досліджень, такі

як вивчення мережевих факторів за різних ринкових умов, оцінка прибутковості DeFi на основі рівня волатильності та вивчення цінової ефективності не взаємозамінних токенів (NFT).

(Brucker, 2022), основна увага в статті приділяється оцінці активів токенів винагород DeFi, підкреслюючи важливість їх токеномічної структури і механізмів для визначення їх вартості. У ній визнається існування численних питань і проблем, пов'язаних з активами DeFi, і ставиться завдання закласти основу для загальноприйнятого методу оцінки цих активів, незважаючи на відсутність досконалого методу оцінки на сьогоднішній день. У висновку висловлюється впевненість у безперервному розвитку аналітики і методів оцінки цих токенів в умовах швидкого розвитку DeFi ландшафту.

(Zmaznev, 2021), у статті розроблено та порівняно два індекси регуляторної невизначеності DeFi (децентралізовані фінанси) на основі частоти висвітлення у ЗМІ. Дослідження використовує активне навчання та модель SVM для виявлення новинних статей, пов'язаних з невизначеністю, і виявляє зростаючі рівні регуляторної невизначеності DeFi, причому найбільш значні сплески відбулися під час початкової хвилі пандемії COVID-19. Структурна VAR-модель використовується для демонстрації негативного впливу шоків регуляторної невизначеності на загальну вартість, зафіксовану в смарт-контрактах для децентралізованих фінансових послуг, причому кредитні послуги та децентралізовані біржі зазнають негативного впливу, тоді як деривативи та платіжні протоколи зазнають зростання. Дослідження підкреслює важливість більш складного текстового підходу до побудови регуляторних індексів DeFi та їхню потенційну цінність для вивчення регуляторної невизначеності в галузях, що розвиваються.

Мета статті.

Мета даної роботи дослідити можливості та перспективи використання KPI DeFi для аналізу ефективності та оцінки проектів.

Виходячи з мети було поставлено наступні задачі роботи:

- проаналізувати дослідження пов'язані з темою KPI та DeFi;
- дослідити загальні функціональні особливості DeFi;
- проаналізувати динаміку показників DeFi у міжнародному середовищі;
- сформувати характеристики та опис найважливіших KPI;
- детально дослідити особливості найважливіших KPI;
- зробити висновки.

Зазначимо також, що об'єктом даної роботи - є DeFi у складі ринку криптовалют. Предметом роботи стали DeFi KPI як інструменти аналізу проектів DeFi .

Методологія дослідження.

У процесі нашого дослідження ми використовували різні методи наукового пізнання для того, щоб докладно вивчити предмет дослідження та систематизувати основні принципи та поняття. Ми застосовували діалектичний метод для аналізу та узагальнення об'єкта дослідження, логічний метод для створення систематизованого уявлення, а також методи аналізу, синтезу та порівняння для розгляду складових екосистеми децентралізованих додатків. Для виявлення основних тенденцій у цій сфері ми використовували економіко-статистичний метод. Матеріали та результати дослідження були представлені графічно для кращого розуміння. Нарешті, ми використовували системно-структурний метод для теоретичного узагальнення результатів та формування висновків.

Дослідження пов'язані з темою KPI та DeFi.

Існує досить багато досліджень, присвячених ринку DeFi, що розвивається. Однак вони здебільшого стосуються одних і тих самих, суто теоретичних питань, тобто викликів, переваг і потенціалу екосистеми DeFi-технологій (Abdulhakeem and Hu, 2021; Werner et al., 2022), проблеми та ризику, пов'язані з формуванням ринків DeFi (включаючи маніпулювання ринком, спотворення стимулів, надмірну короткостроковість, фінансові піраміди та відмивання грошей) (Chohan, 2021; Caldarelli and Ellul, 2021), порівняння між ринком DeFi та ринком CeFi (Qin Kaihua et al., 2021), та неефективності ринку DeFi (Momtaz, 2022). Існують також дослідження, які спираються на надійні статистичні моделі, а ті, що були проведені, стосуються виключно найпопулярнішого показника продуктивності, а саме TVL (так, ніби це єдиний показник, який відстежує продуктивність

протоколів DeFi), як альтернатива увазі інвесторів (Şoiman, Dumas and Jimenez-Garces, 2022). У літературі також є дуже цілеспрямовані дослідження, які стосуються конкретних питань, пов'язаних з протоколами DeFi, наприклад, дослідження природи поведінки користувачів. На противагу цьому, (Kaal, Evans and Howe, 2022) та (Brucker, 2022) вказують на брак досліджень та необхідність проведення для кращого розуміння оцінки цифрових активів, зокрема, протоколів DeFi.

Загальні функціональні особливості DeFi.

Децентралізована фінансова система, або DeFi (Decentralized Finance), представляє собою революційний підхід до фінансів, що використовує блокчейн-технології для створення фінансових послуг, незалежних від традиційних фінансових установ. Ця нова парадигма фінансів вже сьогодні змінює спосіб, яким ми зберігаємо, обмінюємо та інвестуємо свої гроші.

Завдяки своїй децентралізованій природі та використанню блокчейн-технологій, DeFi, або децентралізована фінансова система, пропонує широкий спектр функціональних особливостей, які демократизують фінансовий світ і створюють нові можливості для користувачів. Це включає в себе можливість учасників безпосередньо взаємодіяти один з одним, уникнути посередників та комісій, створювати та управляти смарт-контрактами для автоматизації фінансових угод, надавати та брати позики, обмінювати криптовалюти на децентралізованих біржах, зберігати активи та отримувати дохід від них, а також забезпечувати страхування та інші механізми захисту. Ця система працює 24/7 і глобально доступна для всіх, незалежно від їх місця проживання, надаючи анонімність та конфіденційність користувачам. Хоча DeFi відкриває безліч можливостей, вона також вносить нові ризики, включаючи безпекові питання та виклики регуляторної сфери. Тим не менше, ця інноваційна система вже змінює обличчя фінансів, революціонізує галузь та відкриваючи шлях для майбутніх технологічних розвитків у фінансовому секторі.

DeFi - це інноваційна фінансова екосистема, яка демократизує доступ до фінансових послуг, забезпечуючи децентралізацію, автоматизацію та глобальний доступ. Однак вона також супроводжується ризиками, включаючи безпеку та регуляторні питання. Попри це, DeFi обіцяє змінити спосіб, яким ми сприймаємо та використовуємо фінанси, революціонізує галузь та створюючи нові можливості для учасників ринку.

Динаміка показників DeFi у міжнародному середовищі.

Незважаючи на широке використання інтернету за останні 30 років і його численні застосування, він точно не виправдав очікувань з точки зору розвитку фінансової галузі, особливо враховуючи динаміку змін проти технічного прогресу (Abdulhakeem and Hu, 2021). Навіть з відповідним рядом інноваційних інститутів, таких як інвестиційний банкінг і фінтехи, найбільшим недоліком фінансового сектора залишається його важка концентрація і централізація. Прорив у цьому плані, який породив надії на поступову децентралізацію всієї фінансової системи, стався лише з розвитком технології блокчейн та інновацій, пов'язаних з цією революційною технологією (Abdulhakeem and Hu, 2021). Слід підкреслити, що сам блокчейн як технологія дозволяє здійснювати P2P транзакції без посередників і будь-якої централізації.

З розвитком Blockchain також виникла ціла екосистема фінансових додатків, побудована на мережі Blockchain, з використанням крипто-токенів і смарт-контрактів, і пропонуючи прозорі фінансові послуги без посередників. Вся ця екосистема отримала назву DeFi, від децентралізованих фінансів (Stepanova and Eriņš, 2021). DeFi передбачає, що фінансові послуги повинні надаватися самими користувачами іншим користувачам (Schueffel, 2021). Якщо коротко, то це стало можливим завдяки використанню програмних компонентів для децентралізованої однорангової системи на блокчейні (Schueffel, 2021). Протоколи та платформи DeFi є одними з найбільш обговорюваних нових технологічних розробок у світових фінансах сьогодні. Вони не викликають довіри і базуються на прозорих рішеннях. (Saengchote, 2021), зазначає, що існування протоколів DeFi має багато переваг. Однією з найцінніших, на його думку, є сумісність, тобто те, що різні протоколи можуть вільно взаємодіяти один з одним, утворюючи нові сервіси.

Поява DeFi відкрила нові можливості для інвесторів у фінансовому світі. З фінансової точки зору це можна розглядати позитивно, оскільки DeFi відкриває можливості для диверсифікації та розширення інвестиційних портфельів, не обмежуючись традиційними активами, такими як акції і облігації. Це також допомагає зменшити ризик впливу змін на традиційних фінансових ринках на

загальну прибутковість (Yousaf and Yarovaia, 2021). Зокрема, деякі DeFi протоколи пропонують автоматизований і менш ризиковий спосіб отримання прибутку через "дельта-нейтральну" торгову стратегію, яка зменшує волатильність. Однак DeFi є новою галуззю і вимагає нестандартного підходу для оцінки ефективності. Важливо відзначити, що в літературі відсутні комплексні дослідження, такі як економетричні аналізи на основі надійних моделей, які б оцінювали DeFi протоколи з точки зору конкретних фінансових показників. З цього приводу було зазначено необхідність таких досліджень, зокрема у роботі (Kaal, Evans and Howe, 2022). Один із показників популярності серед інвесторів у сфері DeFi - це TVL (Total Value Locked), криптовалютний показник, який використовується для оцінки загальної вартості всіх активів (коштів), зафіксованих у протоколах DeFi. TVL може обчислюватися як для окремих протоколів DeFi, так і агреговано для всіх протоколів у цілому. Цей показник дедалі більше набуває популярності серед інвесторів. TVL відображає фінансовий бік DeFi-послуг та їх використання, а тому є придатною метрикою для оцінки протоколів DeFi-мереж. Однак слід зазначити, що активи DeFi не є однорідними, а складаються з різних класів внесених коштів у протоколи DeFi, тобто вони включають пули ліквідності, а також відсотки або різні види винагород, що є результатом послуг, пропонувананих у протоколах DeFi, таких як позики, частки або вищезгадані пули ліквідності, зафіксовані в смарт-контрактах. З точки зору ставок, метрику TVL слід інтерпретувати як суму активів, депонованих постачальниками ліквідності в протоколах DeFi. Звичайно, неможливо бездоганно ранжувати окремі протоколи (наприклад, на основі їх TVL), і тому не можна виключати занепад протоколу DeFi, який пропонує високі премії за стейкінг при високій TVL. Прикладом цього є нещодавній швидкий повний крах Terra (LUNA) (див. Рисунок 1). TerraUSD (UST) - стейблкоїн, розміщений в мережі Terra, який став другим блокчейном з найвищим TVL після Ethereum у другому кварталі 2022 року (Azar et al., 2022).

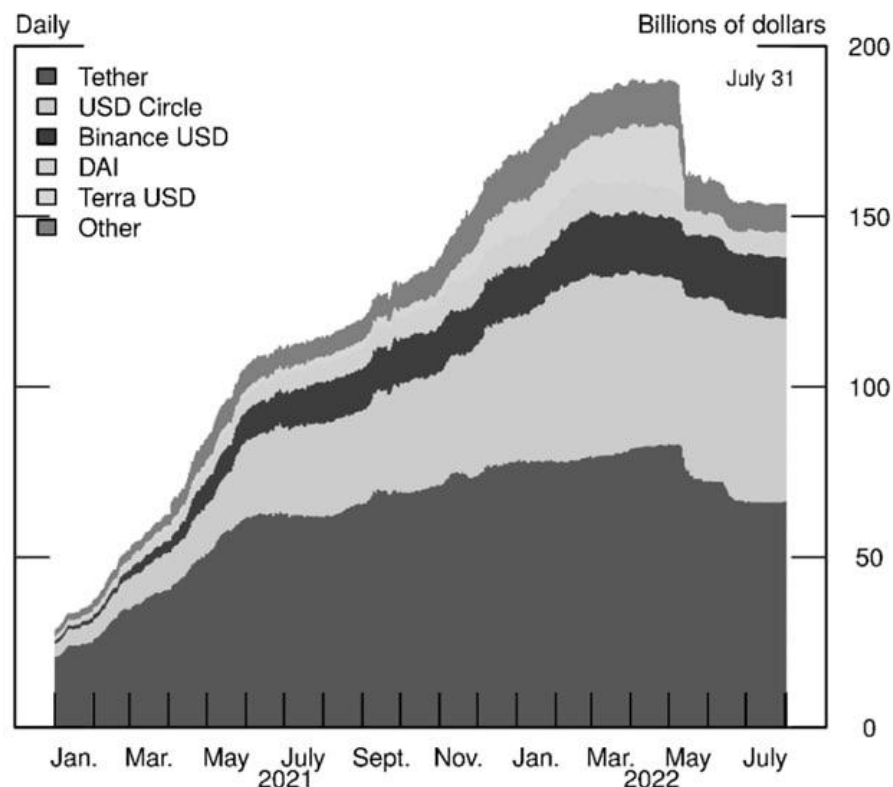


Рисунок 1. Ринкова капіталізація основних стейблкоїнів
Джерело: Azar et al., 2022

Характеристики та опис найважливіших KPI.

У ході дослідження було проаналізовано безліч факторів та функціональних характеристик DeFi що можуть використовуватися як KPI. Серед головних: Total Value Locked, Inflation Rate, Protocol Revenue, Total Revenue, Gross Merchandise Volume, (див. Таблиця 1)

Таблиця 1. Показники KPI та їхній опис

Показники	Опис
Total Value Locked (TVL)	Загальна заблокована вартість (TVL) представляє собою суму коштів, яку користувачі внесли у протоколи DeFi як депозити. Цей показник визначає загальну вартість активів, заблокованих в одному конкретному DeFi проекті або в усьому просторі DeFi (зазвичай виражений в доларах США). Активи DeFi включають в себе винагороди та проценти, отримані від послуг, таких як кредитування, стейкінг та пули ліквідності, реалізовані через смарт-контракти. Для прикладу, у випадку стейкінгу, TVL допомагає інвесторам обирати DeFi платформи з найвищими винагородами. Конкретно, TVL у DeFi платформах стейкінгу представляє собою суму активів, заблокованих постачальниками ліквідності. Наприкінці 2021 року загальна вартість активів DeFi склала близько 250 мільярдів доларів США, збільшившись більше ніж у 600 разів протягом двох років, показавши значний ріст ринку DeFi від 400 мільйонів доларів США до зазначених 250 мільярдів доларів США. З ростом популярності та цінності DeFi в криптовалютному просторі, TVL став важливим показником для інвесторів, який допомагає визначити, наскільки безпечною є вся екосистема DeFi або окремий DeFi протокол для інвестування. Важливо зауважити, що для роботи DeFi протоколів необхідний капітал, і учасники ринку DeFi зазвичай внесли свій капітал як застава для кредитів або участі в пулах ліквідності. Це збільшує прибутковість DeFi протоколів і приносить користь інвесторам та кінцевим користувачам. Зростання TVL показує зростаючу популярність конкретного DeFi протоколу, що призводить до збільшення його ліквідності та користі. Ці фактори сприяють успіху протоколу. Вищий обсяг залученого капіталу в DeFi протоколи веде до більших винагород і доходів для їх учасників. Навпаки, відтік коштів (тобто зменшення TVL) означає, що доступних коштів менше, і, відповідно, менше доходів. На основі показника TVL інвестори та учасники ринку DeFi можуть визначити більш надійні протоколи, які мають стійку ринкову позицію завдяки великій вартості внесених коштів. Високий показник TVL свідчить про довіру до DeFi протоколу, підтверджує високий попит на конкретну платформу DeFi і вказує на наявність досвідченої розробницької команди та цінної бізнес-моделі (Stapanova and Eriņš, 2021). Всі ці фактори сприяють збільшенню TVL і привабленню більше учасників та інвесторів, сприяючи успіху проекту TVL.
Inflation Rate	Багато протоколів DeFi запроваджують правила, які гарантують, що їхня пропозиція токенів не призведе до інфляції та девальвації токенів. Однак не всі токени захищені від девальвації правилами платформи. У деяких випадках механізм підтримки обмеженої пропозиції токенів незрозумілий або навіть не визначений проектом (Phemex, 2021a). Досліджуючи протокол DeFi, важливо звернути увагу на збільшення пропозиції токенів і темпи інфляції. Токени, які мали тенденцію демонструвати високі темпи інфляції в минулому, краще уникати.
Protocol Revenue (PR)	Дохід протоколу це сума доходів, яка розподіляється між власниками токенів, що отримана протоколом DeFi. Іншими словами, це показує, скільки грошей протокол заробив для користувачів і власників токенів.
Total Revenue (TR)	Загальний дохід визначається як сума всіх платежів, які користувачі здійснюють протягом певного періоду. Наприклад, щоденний загальний дохід за один день дорівнює комісіям, оплаченим протягом цього 24-годинного періоду. Найважливіше, дохід від протоколу та загальний дохід мають різний економічний зміст для власників токенів. У той час як перший включає в себе лише прибуток, який припадає на протокол та/або власників токенів, другий також враховує дохід, отриманий учасниками зі сторони пропозиції, такими як виробники чи постачальники ліквідності. Іншими словами, дохід з боку пропозиції - це сума прибутку, яку проект DeFi сплачує своїм учасникам, таким як постачальники ліквідності, які отримують певну кількість токенів постачальника ліквідності (LPT), коли вони додають свої криптовалютні активи до пулу DeFi. Токени LPT повертаються до системи DeFi, коли постачальник ліквідності бажає вилучити свої активи.
Gross Merchandise Volume (GMV)	У додаток до зазначених показників, існує ще один показник, який сприяє аналізу росту DeFi-бізнесу - це валова вартість товару (GMV). GMV зазвичай використовується для оцінки діяльності онлайн-бізнесів, зокрема, в електронній комерції (Prokhorova,

	<p>2020). GMV це показник, що використовується в онлайн-ритейлі для позначення загальної вартості продажів у доларах США для товарів, проданих через певний ринок за певний період часу. GMV особливо корисний для аналізу потенціалу росту DeFi-проектів, додатків та протоколів. Популярність сектору DeFi відображається у збільшенні кількості нових проектів DeFi та обсягу вкладених коштів у ці протоколи. Цей показник також дуже популярний серед маркетплейсів, які займаються онлайн-торгівлею, будь то безпосередньо або опосередковано. В найпростішому вигляді GMV обчислюється як загальна вартість продажів протягом певного періоду. За допомогою GMV компанії, які спеціалізуються на продажах нефізичним особам в інтернеті, можуть порівнювати свою ефективність за певний часовий період з минулими періодами. Цей показник дозволяє оцінювати динаміку їхнього бізнесу з плином часу. Інвестори також можуть легко порівнювати компанії зі схожим бізнес-профілем за допомогою GMV. Зрозуміло, що вищий показник GMV вказує на більший потенціал росту для проекту DeFi. З точки зору інвестора, GMV дозволяє виділяти бізнес-проекти з вищим потенціалом росту та прогнозувати їхні фінансові результати в майбутньому. Крім того, GMV опосередковано вказує на те, який проект вважається лідером в конкретному сегменті. Чим вище значення GMV, тим більш відомий проект серед споживачів і користувачів. Лідери ринку зазвичай мають переваги завдяки своєму розміру і відомостям, і тому вони можуть оптимізувати свою діяльність та знижувати витрати на маркетинг. Таким чином, GMV може надати важливі відомості про витрати в галузі. Отже, хоча GMV показує лише валовий дохід, він також може надавати підказки щодо витрат та ефективності проекту.</p>
--	---

Total Value Locked.

У даній статті розглядаються ключові показники, які дозволяють порівнювати DeFi-протоколи з точки зору їхньої аналітичної продуктивності. Однією з таких метрик є "загальна заблокована вартість" (TVL), яка визначає ринок DeFi-протоколів і вказує, скільки грошей загально заблоковано в конкретному DeFi-протоколі. Оскільки на ринку DeFi існують різні типи протоколів (наприклад, децентралізовані біржі, кредитні протоколи, платформи для управління активами тощо), TVL може мати різне значення для різних видів DeFi. Для кращого розуміння, що означає TVL, давайте розглянемо цей показник на прикладі. Наприклад, для протоколів кредитування TVL можна пояснити як загальну вартість DeFi-токенів, які були заблоковані у блокчейні як застава для отримання кредиту.

Загальна заблокована вартість представляє собою суму активів, які знаходяться у смарт-контрактах проекту. Окрім оцінки (капіталізації окремих проектів та ринку в цілому), TVL є одним з криптовалютних показників, який інвестори в галузі DeFi використовують для оцінки проектів, у які вони вкладають свої кошти (Zmaznev, 2021). Важливо зазначити, що кошти розподіляються між різними DeFi-протоколами з різними цілями, такими як стейкінг, пули ліквідності та кредитування. Зростання TVL в DeFi-протоколах свідчить про перспективи автоматизованих фінансових послуг. TVL є важливим показником для DeFi-протоколів, оскільки він відображає фінансовий аспект послуг та їх використання (Zmaznev, 2021).

Розглядаючи найпопулярніші DeFi-платформи, були розглянуті дані про TVL у 12 найпопулярніших dApp станом на 29 жовтня 2020 року. Список проаналізованих платформ наведено нижче:

- Платіжні та переказні платформи: Flexa, Lightning Network, xDai;
- Платформи для кредитування: Maker, Compound, Aave;
- DEX-платформи: Uniswap, Curve Finance, Balancer;
- Платформи для деривативів: Synthetix, Nexus Mutual, Erasure;
- Платформи для управління активами: WBTC, Harvest Finance, yearn finance;

Для візуалізації розвитку DeFi-проектів були використані наступні дані DeFi Pulse проектів (див. Рисунок 2).

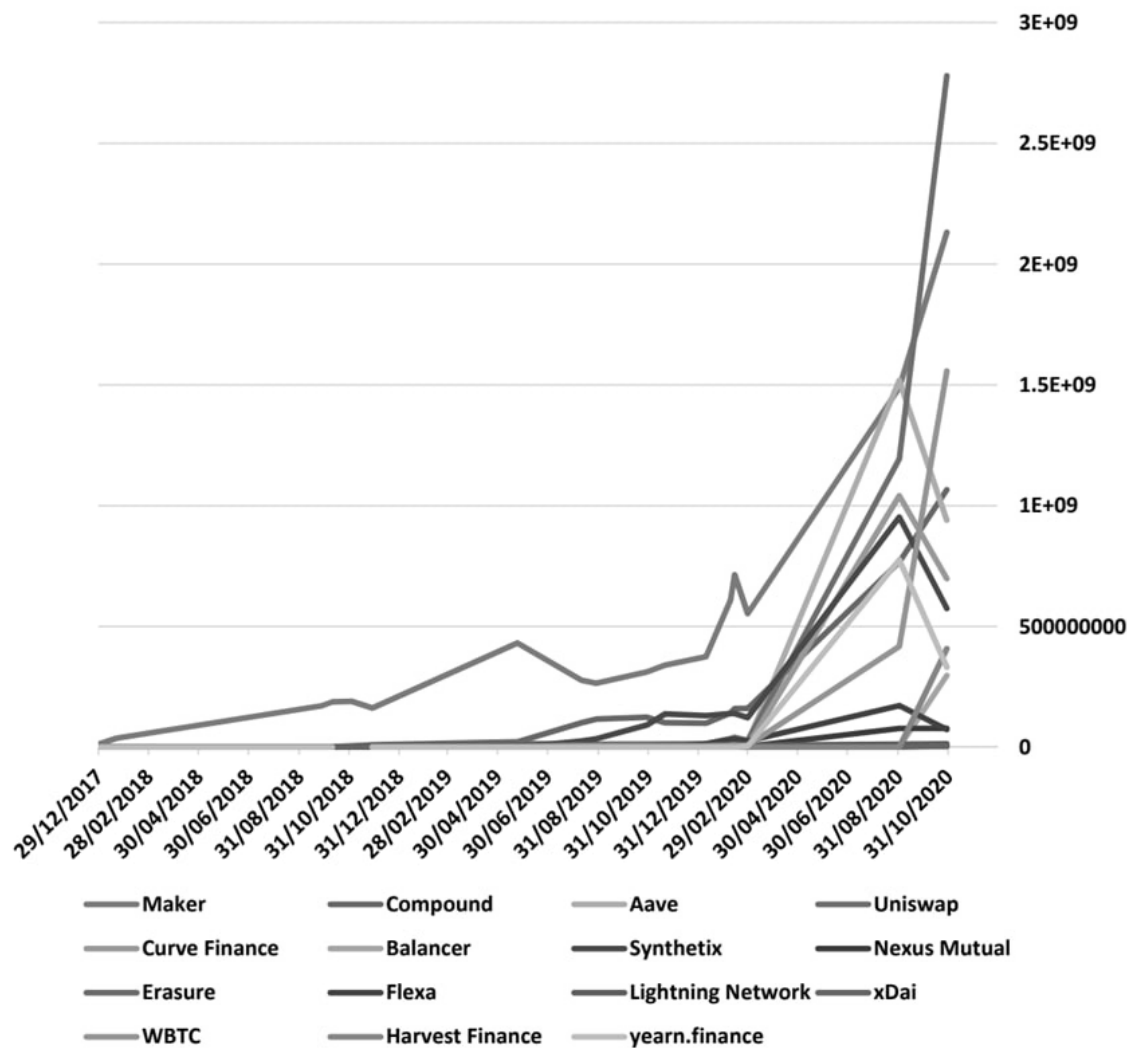


Рисунок 2. Розвиток DeFi-проектів
Джерело: Stepanova and Eriņš, 2021

У дослідженні (Saengchote, 2021) розглядається освітлення можливостей вимірювання показника DeFi Total Value Locked (TVL) та вказується на складність аналізу і моніторингу ринку DeFi. Автор відзначає, що TVL обчислюється як ринкова вартість токенів, які зберігаються або заблоковані в системі, і, отже, великою мірою залежить від цін на ці токени. Очікується, що зв'язок цієї змінної з оцінками буде досить сильним. У свою чергу, (Şoiman, Dumas and Jimenez-Garces, 2022) називають TVL особливою змінною, характерною для ринку DeFi, оскільки вона служить індикатором росту та успіху цього ринку. Іншими словами, вона відображає обсяг залучених коштів в протоколах DeFi. Згідно з емпіричними даними, які представлені цими авторами, TVL вважається найважливішою змінною для цього ринку, за нею слідує транзакції (як індикатор інтересу інвесторів) і мережеві ефекти. Кілька цікавих спостережень щодо TVL також можна знайти в роботі (Stepanova and Eriņš, 2021). TVL може бути використана для оцінки DeFi токенів та моніторингу цього ринку, тому розгляд цієї змінної та її історичних показників є важливим.

Зазвичай TVL (Total Value Locked) можна використовувати для оцінки надійності окремого DeFi-протоколу і визначення його інвестиційної привабливості. Проте визначення TVL часто вимагає більш складних розрахунків, ніж просте підсумовування всіх депозитів, зняття коштів і визначення реальної суми, зберіганої в протоколі DeFi та у смарт-контрактах. Величина TVL також залежить від вартості нативного токена та фіатної валюти, в якій він оцінюється. Тому, коли ці значення змінюються, TVL також змінюється. Інакше кажучи, зростання вартості токена DeFi призводить до збільшення показника TVL цього протоколу (Saengchote, 2021). TVL важливий з точки зору протоколів DeFi, оскільки він є їхньою життєвою силою і дозволяє їм функціонувати; без депонованого капіталу у вигляді смарт-контрактів протоколи DeFi не могли б функціонувати.

У цьому контексті TVL можна інтерпретувати як ранній індикатор потенційного прибутку протоколів DeFi, а також вигоди для учасників та інвесторів цих протоколів.

Окрім TVL, існують інші показники, такі як прибуток від протоколу, загальний прибуток, валовий товарний обсяг і фактор інфляції. У контексті оцінки DeFi, кожна з цих метрик важлива як для команд проекту, так і для інвесторів. Проте, коли розглядаємо, наприклад, прибуток від протоколу і загальний прибуток, важко знайти більш загальні визначення для цих термінів, які б відзначали основні відмінності між ними. Однак, ця різниця суттєва. По-перше, прибуток від протоколу враховує тільки прибуток, який виплачується власникам протоколу та/або власникам його токенів, тоді як загальний прибуток також включає дохід учасників, які активно взаємодіють з протоколом. Учасники з боку пропозиції, такі як постачальники ліквідності, отримують певну кількість токенів за свій внесок до пулу DeFi. Політика кожного протоколу DeFi щодо розподілу прибутку значною мірою залежить від індивідуальних стратегій цих протоколів. Команди розробників DeFi мають відповідних стратегів і менеджерів проектів, які розробляють фінансову та маркетингову політику, що впроваджується в смарт-контрактах. Ці політики включають в себе стратегічні плани щодо емісії додаткових токенів (токен-мінтинг, токен-бернінг), виплати винагород та інші аспекти. Фактично, всі ці аспекти взаємопов'язані та становлять складні частини стратегій розвитку DeFi протоколу. Різні фактори, такі як емісія нових токенів чи їх знищення, залучення учасників ринку через емісію управлінських токенів (як засіб залучення капіталу в протокол), а також надання високих винагород за забезпечення ліквідності (з метою залучення капіталу в проект, щоб сприяти його розвитку), всі це є складними частинами системної динаміки, які можуть призвести до успіху або невдачі проекту. Прикладом невдачі може служити Terraform Labs, компанія, що стоїть за Terra USD (UST) і Terra (LUNA), яка столкнулася з крахом проекту через помилкові рішення. Тому важливо висвітлити та проаналізувати ці проблеми, оскільки це дослідження має велику цінність та внесок в розуміння DeFi.

Висновок та перспективи.

Дослідження в області DeFi виявляє важливі аспекти альтернативного фінансування. Зокрема, великий огляд літератури, представлений в статті, відкриває значення DeFi-протоколів як альтернативи традиційним фінансовим методам.

Вивчення теми відзначає розрізнення між різними категоріями DeFi протоколів, такими як децентралізовані біржі, кредитні протоколи і системи управління активами. Розуміння цієї різноманітності важливе для вибору правильного інвестиційного напрямку в області DeFi. Дослідження також вказує на певну схожість між DeFi та традиційними фінансами, особливо при розгляді відповідних оціночних показників, які аналізуються в цьому дослідженні та їхніх еквівалентів в традиційних фінансах. Ці усі знання сприяють кращому розумінню ринків DeFi, які поки що знаходяться на початкових стадіях свого розвитку. Важливо зауважити, що існує багато досліджень, приурочених до DeFi, але їм бракує глибокого економетричного аналізу на основі моделей, які б докладно розглядали особливості та характеристики цього ринку з фінансової точки зору.

Один з головних показників оцінки DeFi-проектів - це TVL (загальний обсяг заблокованих коштів). Дослідження підтверджує, що TVL є важливим фактором, впливаючим на оцінку DeFi-протоколів. Така важливість не випадкова, оскільки TVL вважається справжньою кров'ю DeFi-протоколів і відображає вкладений капітал, необхідний для їхнього успішного функціонування. При аналізі інвестиційної привабливості DeFi-проекту, слід звертати увагу на різні показники, зокрема співвідношення ціни та продажів, TVL та інші. Однак важливо також не ігнорувати інші фактори, такі як структура пропозиції токенів та рух балансу токенів на централізованих біржах. Крім того, важливим аспектом є чіткість і повнота документації DeFi-проекту, оскільки це впливає на права власників токенів та умови заробітку від стейкінгу LP.

Можливо, через те, що DeFi здебільшого не регулюється, з'явилося багато проектів з погано задокументованими деталями їхніх протоколів. Однак це не завадило багатьом людям вкладати свої кошти в ці проекти. При оцінці DeFi-проекту ключовим показником є рівень деталізації протоколу, який надається громадськості та потенційним інвесторам. Як мінімум, проект повинен мати білу книгу, яка детально пояснює процеси та токеноміку протоколу (CoinMarketCap Academy, 2021). Механізм управління і права голосу, що надаються власникам токенів, також повинні бути чітко описані.

Наприклад, що станеться, якщо ваші кошти будуть втрачені протоколом через порушення безпеки? Чи отримаєте ви компенсацію? Чи потрібно чекати, поки користувачі платформи проголосують за потенційну компенсацію для вас? Необхідно звертати увагу на ці ключові деталі, переглядаючи технічний документ проекту, веб-сайт та оголошення в соціальних мережах. Хоча повнота проектної документації не є фінансовою чи операційною метрикою, вона є життєво важливим показником, який слід враховувати (Phemex, 2021b).

ЛІТЕРАТУРА

1. Олексій Доценко (2022). ARCHITECTURE OF DECENTRALIZED APPLICATIONS AS PART OF THE DEFI ECOSYSTEM. Соціальна економіка, (64), pp.117–124. doi:<https://doi.org/10.26565/2524-2547-2022-64-10>.
2. Abdulhakeem, S.A. and Hu, Q. (2021). Powered by Blockchain Technology, DeFi (Decentralized Finance) Strives to Increase Financial Inclusion of the Unbanked by Reshaping the World Financial System. *Modern Economy*, 12(01), pp.1–16. doi:<https://doi.org/10.4236/me.2021.121001>
3. Azar, P.D., Baughman, G., Carapella, F., Gerszten, J., Lubis, A., Perez-Sangimino, J.P., Scotti, C., Swem, N., Vardoulakis, A. and Rappoport Wurgaft, D.E. (2022). The Financial Stability Implications of Digital Assets. *SSRN Electronic Journal*. doi:<https://doi.org/10.2139/ssrn.4234695>.
4. Brucker, A. (2022). De-Fi Protocol Token Valuation by Projecting Token Flows and Estimating an Appropriate Risk Premium. Honors Theses and Capstones. [online] Available at: <https://scholars.unh.edu/honors/683> [Accessed 24 Oct. 2023].
5. Caldarelli, G. and Ellul, J. (2021). The Blockchain Oracle Problem in Decentralized Finance—A Multivocal Approach. *Applied Sciences*, [online] 11(16), p.7572. doi:<https://doi.org/10.3390/app11167572>.
6. Chohan, U.W. (2021). Decentralized Finance (DeFi): An Emergent Alternative Financial Architecture. *SSRN Electronic Journal*. doi:<https://doi.org/10.2139/ssrn.3791921>.
7. CoinMarketCap Academy. (2021). What Is Tokenomics? | CoinMarketCap. [online] Available at: <https://coinmarketcap.com/academy/article/what-is-tokenomics> [дата звернення: 24 жовтня 2023].
8. Kaal, W.A., Evans, S. and Howe, H. (2022). Digital Asset Valuation. *SSRN Electronic Journal*. [online] doi:<https://doi.org/10.2139/ssrn.4033886>.
9. Momtaz, P.P. (2022). How Efficient is Decentralized Finance (DeFi)? *SSRN Electronic Journal*. doi:<https://doi.org/10.2139/ssrn.4063670>.
10. Phemex. (2021a). Is Bitcoin Inflation Proof? Bitcoin and Central Banks - Phemex Academy. [online] Available at: <https://phemex.com/academy/is-bitcoin-inflation-proof> [дата звернення: 21 жовтня 2023].
11. Phemex. (2021b). Top 9 Important DeFi Performance Indicators - Phemex Academy. [online] Available at: <https://phemex.com/academy/defi-performance-indicators> [дата звернення: 19 жовтня 2023].
12. Prokhorova, T. (2020) Forecasting Long-Term Effect of Marketing Actions on the Basis of the Analysis of Incremental Retention of Gross Merchandise Volume. [online] Available at: <https://proceedings.emac-online.org/pdfs/A2020-64385.pdf> [дата звернення: 23 жовтня 2023].
13. Qin Kaihua, Liyi Zhou, Yaroslav Afonin, Ludovico Lazzaretti, and Arthur Gervais. 2021b. CeFi vs. DeFi—Comparing Centralized to Decentralized Finance. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.08157>.
14. Saengchote, K. (2021). Where do DeFi stablecoins go? A closer look at what DeFi composability really means. *SSRN Electronic Journal*. doi:<https://doi.org/10.2139/ssrn.3893487>
15. Schueffel, P. (2021). DeFi: Decentralized Finance - An Introduction and Overview. *Journal of Innovation Management*, [online] 9(3), pp.I–XI. doi:https://doi.org/10.24840/2183-0606_009.003_0001.
16. Şoiman, F., Dumas, G. and Jimenez-Garces, S. (2022). The return of (I)DeFiX. [online] arXiv.org. doi:<https://doi.org/10.48550/arXiv.2204.00251>.
17. Stepanova, V. and Eriņš, I. (2021). Review of Decentralized Finance Applications and Their Total Value Locked. *TEM Journal*, 10(1), pp.327–333. doi:<https://doi.org/10.18421/tem101-41>.
18. Werner, S.M., Perez, D., Gudgeon, L., Arian Klages-Mundt, Harz, D. and Knottenbelt, W.J. (2022). SoK: Decentralized Finance (DeFi). doi:<https://doi.org/10.1145/3558535.3559780>.

19. Yousaf, I. and Yarovaya, L. (2021). Static and Dynamic Connectedness Between NFTs, Defi and Other Assets: Portfolio Implication. SSRN Electronic Journal. doi:<https://doi.org/10.2139/ssrn.3946611>.
20. Zmaznev, E. (2021). Measuring Decentralised Finance Regulatory Uncertainty. [online] Available at: <https://openaccess.nhh.no/nhh-xmlui/bitstream/handle/11250/2769995/masterthesis.pdf> [дата звернення: 23 жовтня 2023].

REFERENCES

1. Oleksiy Dotsenko (2022). ARCHITECTURE OF DECENTRALIZED APPLICATIONS AS PART OF THE DEFI ECOSYSTEM. Social economy, (64), pp.117–124. doi:<https://doi.org/10.26565/2524-2547-2022-64-10>.
2. Abdulhakeem, S.A. and Hu, Q. (2021). Powered by Blockchain Technology, DeFi (Decentralized Finance) Strives to Increase Financial Inclusion of the Unbanked by Reshaping the World Financial System. Modern Economy, 12(01), pp.1–16. doi:<https://doi.org/10.4236/me.2021.121001>.
3. Azar, P.D., Baughman, G., Carapella, F., Gerszten, J., Lubis, A., Perez-Sangimino, J.P., Scotti, C., Swem, N., Vardoulakis, A. and Rappoport Wurgaft, D.E. (2022). The Financial Stability Implications of Digital Assets. SSRN Electronic Journal. doi:<https://doi.org/10.2139/ssrn.4234695>.
4. Brucker, A. (2022). De-Fi Protocol Token Valuation by Projecting Token Flows and Estimating an Appropriate Risk Premium. Honors Theses and Capstones. [online] Available at: <https://scholars.unh.edu/honors/683> [Accessed 24 Oct. 2023].
5. Caldarelli, G. and Ellul, J. (2021). The Blockchain Oracle Problem in Decentralized Finance—A Multivocal Approach. Applied Sciences, [online] 11(16), p.7572. doi:<https://doi.org/10.3390/app11167572>.
6. Chohan, U.W. (2021). Decentralized Finance (DeFi): An Emergent Alternative Financial Architecture. SSRN Electronic Journal. doi:<https://doi.org/10.2139/ssrn.3791921>.
7. CoinMarketCap Academy. (2021). What Is Tokenomics? | CoinMarketCap. [online] Available at: <https://coinmarketcap.com/academy/article/what-is-tokenomics> [Accessed 24 Oct. 2023].
8. Kaal, W.A., Evans, S. and Howe, H. (2022). Digital Asset Valuation. SSRN Electronic Journal. [online] doi:<https://doi.org/10.2139/ssrn.4033886>.
9. Momtaz, P.P. (2022). How Efficient is Decentralized Finance (DeFi)? SSRN Electronic Journal. doi:<https://doi.org/10.2139/ssrn.4063670>.
10. Phemex. (2021a). Is Bitcoin Inflation Proof? Bitcoin and Central Banks - Phemex Academy. [online] Available at: <https://phemex.com/academy/is-bitcoin-inflation-proof> [Accessed 24 Oct. 2023].
11. Phemex. (2021b). Top 9 Important DeFi Performance Indicators - Phemex Academy. [online] Available at: <https://phemex.com/academy/defi-performance-indicators> [Accessed 24 Oct. 2023].
12. Prokhorova, T. (2020) Forecasting Long-Term Effect of Marketing Actions on the Basis of the Analysis of Incremental Retention of Gross Merchandise Volume. [online] Available at: <https://proceedings.emac-online.org/pdfs/A2020-64385.pdf> [Accessed 24 Oct. 2023].
13. Qin Kaihua, Liyi Zhou, Yaroslav Afonin, Ludovico Lazzaretti, and Arthur Gervais. 2021b. CeFi vs. DeFi—Comparing Centralized to Decentralized Finance. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.08157>.
14. Saengchote, K. (2021). Where do DeFi stablecoins go? A closer look at what DeFi composability really means. SSRN Electronic Journal. doi:<https://doi.org/10.2139/ssrn.3893487>
15. Schueffel, P. (2021). DeFi: Decentralized Finance - An Introduction and Overview. Journal of Innovation Management, [online] 9(3), pp.I–XI. doi:https://doi.org/10.24840/2183-0606_009.003_0001.
16. Şoiman, F., Dumas, G. and Jimenez-Garces, S. (2022). The return of (I)DeFiX. [online] arXiv.org. doi:<https://doi.org/10.48550/arXiv.2204.00251>.
17. Stepanova, V. and Eriņš, I. (2021). Review of Decentralized Finance Applications and Their Total Value Locked. TEM Journal, 10(1), pp.327–333. doi:<https://doi.org/10.18421/tem101-41>.
18. Werner, S.M., Perez, D., Gudgeon, L., Ariah Klages-Mundt, Harz, D. and Knottenbelt, W.J. (2022). SoK: Decentralized Finance (DeFi). doi:<https://doi.org/10.1145/3558535.3559780>.
19. Yousaf, I. and Yarovaya, L. (2021). Static and Dynamic Connectedness Between NFTs, Defi and Other Assets: Portfolio Implication. SSRN Electronic Journal. doi:<https://doi.org/10.2139/ssrn.3946611>.

20. Zmaznev, E. (2021). Measuring Decentralised Finance Regulatory Uncertainty. [online] Available at: <https://openaccess.nhh.no/nhh-xmlui/bitstream/handle/11250/2769995/masterthesis.pdf> [Accessed 24 Oct. 2023].

Kyrylo Velychko *student of the Faculty of Computer Science, V.N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine*

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

KPI research in the context of DeFi protocol evaluation

Abstract. This article is devoted to the analysis of key performance indicators in the context of DeFi protocol evaluation. During the study, an in-depth analysis was carried out aimed at determining the important aspects of alternative financing and the role of DeFi protocols as an alternative to traditional financial methods. Various performance indicators were analyzed during the study. The main focal point is the total volume of blocked funds (TVL), which turned out to be a decisive indicator of the investment attractiveness of DeFi projects. TVL reflects the aggregate capital invested in their successful operation. In addition to TVL, other key aspects such as price-to-volume ratio, token structure, token movement on centralized exchanges, and documentation clarity of DeFi projects were investigated. This is important in order to get the full amount of information necessary to make the right choice of investment direction in this diverse market. The study also points to a wide range of different business model categories in the DeFi industry, such as decentralized exchanges, lending protocols, and asset management protocols. Understanding this diversity is key to choosing the right investment direction. When analyzing the investment attractiveness of DeFi projects, one should pay attention to various indicators, including price and trading volumes, TVL and other factors. It is also important to consider other factors, such as the structure of tokens and their activity on centralized exchanges. The availability and completeness of the project documentation also play an important role, as they affect the rights of token holders and the conditions for obtaining profits from LP staking. All of this research provides a comprehensive overview and insights for investors in the DeFi industry, helping them make informed decisions about project selection and the optimal way to deploy capital in this fast-growing industry.

Keywords: *DeFi, decentralized finance, TVL, Total Value Locked, KPI.*

UDC 517.5+517.97+519.6

**Kolodyazhny
Volodymyr**

*Professor, D.Sc., Ph.D., Professor of the Department of Informatics and Applied Mathematics
Kharkiv National Automobile and Highway University, 25 Jaroslava Mudrogo str., Kharkiv, Ukraine 61002
e-mail: kolodyazhny@ukr.net
<https://orcid.org/0000-0001-6537-7763>*

**Lisina
Olha**

*Associate Professor, Ph.D., Associate Professor, Department of Computer Physics
V.N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody sq., Kharkiv, Ukraine 61022
e-mail: o.lisina@karazin.ua <https://orcid.org/0000-0002-2732-2136>*

**Lisin
Denys**

*Associate Professor, Ph.D., Associate Professor, Department of Computer Physics
V.N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody sq., Kharkiv, Ukraine 61022
e-mail: d.lisin@karazin.ua <https://orcid.org/0000-0002-6718-7389>*

Multidimensional generalizations of atomic radial basis functions

Possible approaches to generalizing multidimensional atomic radial basis functions are presented. The functions of mathematical physics are used in solving two-dimensional and three-dimensional boundary value problems with partial derivatives. Depending on the problem, the functions of different dimensions are used, that is, the functions generated by various differential operators. The functional-differential equations that generate those functions are considered and families of finite solutions for those equations generated by the differential operators of Laplace, Helmholtz, etc. have been constructed according to the given scheme. The results are presented in the form of theorems. In order to expand the class of functions and improve their properties, the construction of the atomic radial basis function family of three independent variables on the example of a functional-differential equation of the appropriate type is considered. The solution methods refer to seedless schemes and combine the possibilities of constructing the boundaries of regions by using R-functions. Atomic functions are convenient for implementing computational algorithms for constructing approximate solutions of boundary value problems in 2D and 3D domains by using meshless schemes. The properties of these functions make it possible to use them as basic functions in solving boundary value problems by meshless methods based on collocation methods. For atomic functions, the dependence on the compression ratio is provided, which is specified in the process of constructing the solution of the boundary value problem as necessary to ensure certain properties of the functions. The scheme for constructing solutions of heat conduction problems by using a gridless scheme is provided.

Keywords: atomic radial basic functions, boundary problems of mathematical physics, meshless methods for solving boundary value problems..

How to quote: V. Kolodyazhny, O. Lisina, D. Lisin, “Multidimensional generalizations of atomic radial basis functions” *Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University, series Mathematical modelling. Information technology. Automated control systems*, vol. 58, pp.28-36, 2023. <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2023-58-03>

Як цитувати: Колодяжний В. М., Лісіна О., Лісін Д. “Багатовимірні узагальнення атомарних радіальних базисних функцій”. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н.Каразіна, серія Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління*. 2023. вип. 58. С. 28-36 <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2023-58-03>

The necessity to construct various types of multidimensional generalizations of atomic radial basic functions is determined by the requirements of their application in the numerical analysis. For example, when constructing an interpolation spline it is necessary to solve systems of algebraic equations. The dimension of the system is determined by the number of interpolation conditions and may be sufficiently huge. The task of interpolation is simplified by using local splines, as to calculate each of the splenic parameters several interpolation conditions are utilized. Atomic functions not only enable the further simplification of the solution of the interpolation problem, but allow us to consider more complex situations of interpolation of functions which are determined on various geometric manifolds.

An attempt to non-trivial generalization of atomic functions in the case of many variables was provided in the research [1] where a number of necessary conditions for the existence of finite solutions

of some functional-differential equations is given without evidence. Multidimensional generalizations of atomic functions appeared as a result of solving one of the lists of relevant tasks of the theory of atomic functions [2] on the construction of finite solutions of functional-differential equations like the following:

$$Lu(x_1, \dots, x_n) = \int_{\partial\Omega} \varphi(\xi_1, \dots, \xi_n) u(ax_1 - \xi_1, \dots, ax_n - \xi_n) ds + ku(ax_1, \dots, ax_n)$$

where L is a linear differential operator; $\partial\Omega$ is the boundary of the convex closed area. The cases of existence and unity of the solution of this problem when the operators of Laplace, Helmholtz and Klein Gordon and others are considered as generating operators.

Let us consider the equation

$$\Delta u(x_1, x_2) = \lambda \oint_{\partial\Omega} u[3(x_1 - \xi_1), 3(x_2 - \xi_2)] ds + \mu u(3x_1, 3x_2)$$

where $\partial\Omega$ is a circle: $\xi_1^2 + \xi_2^2 = r^2$, $\Delta = \partial^2/\partial x_1^2 + \partial^2/\partial x_2^2$ is a Laplace operator. The consideration of these functional-differential equations follows from the condition that the Laplace operator is invariant relatively to rotations and a finite system of points. In the case when it contains more than one point it is not invariant. Summation in the right part of the equation (similar to one-dimensional case when the equation like [3] $Ly(x) = \lambda \sum_{k=1}^M c_k y(ax - b)$, $|a| > 1$, is considered where L is a linear differential operator with constant coefficients) does not provide the finite solution.

However, if instead of the subformation we carry out an integration operation by a circle, it is possible to establish a solution with a compact carrier (that is the finite solution of the output equation). The resulting functions have preserved the name of atomic ones. The finite solution is called $Plop(x_1, x_2)$, it exists and is the only one for the following values of coefficients: $\mu = -4\pi\lambda/3$ and $\lambda = 3^5/(4\pi)$.

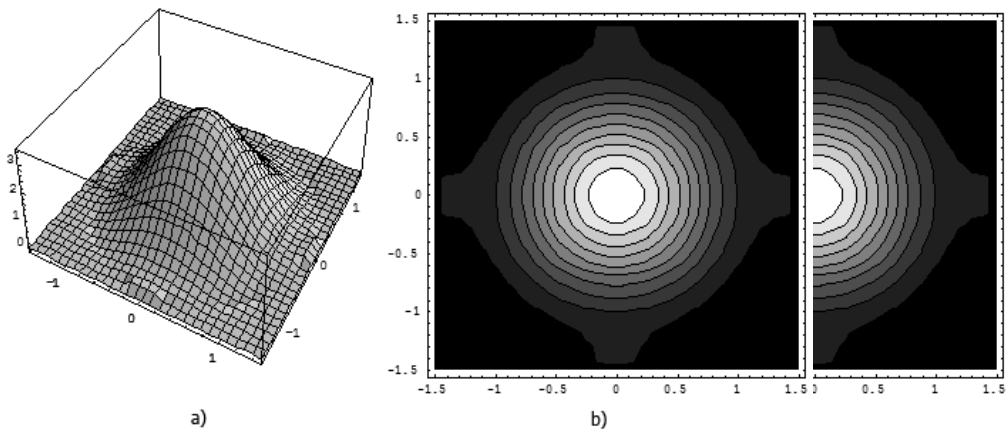
$$Plop(x_1, x_2) = \sum_{r=0}^{\infty} \sum_{q=0}^{\infty} a_{rq} \cos(r\pi x_1) \cos(q\pi x_2)$$

$$a_{oo} = \frac{1}{4}; \quad a_{ro} = \frac{1}{2} U(r\pi, 0) = \prod_{h=0}^{\infty} \frac{1 - J_o(2q\pi/3^{h+1})}{3^{-2h-2}(q\pi)^2};$$

$$a_{oq} = \frac{1}{2} U(0, q\pi) = \prod_{h=0}^{\infty} \frac{1 - J_o(2r\pi/3^{h+1})}{3^{-2h-2}(r\pi)^2};$$

$$a_{rq} = U(r\pi, q\pi) = \prod_{h=0}^{\infty} \frac{1 - J_o\left(\frac{2}{3^{h+1}} \sqrt{(r\pi)^2 + (q\pi)^2}\right)}{3^{-2h-2} [(r\pi)^2 + (q\pi)^2]}$$

The graph and the level lines of the atomic function $Plop(x_1, x_2)$ the support of which is a part of



the region $[-1, 1] \times [-1, 1]$ are presented in Fig. 1:

Fig. 1. The graph (a) and the level lines (b) of the atomic function $Plop(x_1, x_2)$.

In the case of three variables the desired function is obtained when solving the equation:

$$\Delta u(x_1, x_2, x_3) = \lambda \int_{\partial\Omega} u[3(x_1 - \xi_1), 3(x_2 - \xi_2), 3(x_3 - \xi_3)] ds + \mu u(3x_1, 3x_2, 3x_3)$$

where $\partial\Omega$ is the surface of the ball: $\xi_1^2 + \xi_2^2 + \xi_3^2 = \frac{4}{9}$, $\Delta = \partial^2 / \partial x_1^2 + \partial^2 / \partial x_2^2 + \partial^2 / \partial x_3^2$ is the Laplace operator in R^3 . That function is called $Corp(x_1, x_2, x_3)$ and support of that function is shown in Fig. 2 and Fig. 3 (a, b)

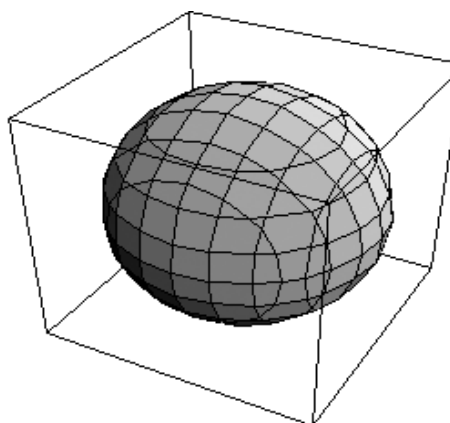


Fig. 2. The support of the function $Corp(x_1, x_2, x_3)$.

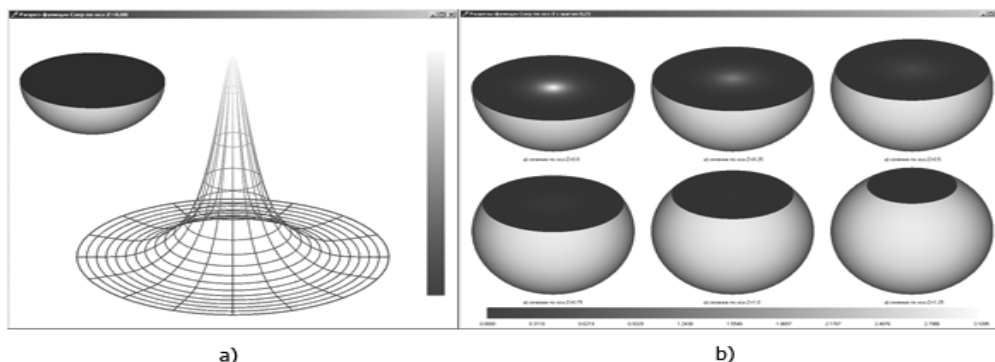


Fig. 3 The graph of the atomic function: a) with different sections of the OZ and b) plane cross section visualization of its distribution density

In numerical schemes for solving boundary value problems, in addition to the above functions, the following functions are also required: $\Delta Plop(x_1, x_2)$, $\Delta Corp(x_1, x_2, x_3)$, $\Delta^s Plop(x_1, x_2)$, $\Delta^s Corp(x_1, x_2, x_3)$, $s > 1$.

To solve the equation of thermal conductivity according to the mesh scheme, it makes sense to use the atomic solution of the following functional-differential equation:

$$\Delta u(x_1, x_2) - \delta^2 u(x_1, x_2) = \lambda \int_{\partial\Omega} u(3(x_1 - \xi_1), 3(x_2 - \xi_2)) d\omega + \mu u(3x_1, 3x_2)$$

where $\partial\Omega: \xi_1^2 + \xi_2^2 = 1$; $\Delta = \partial^2 / \partial x_1^2 + \partial^2 / \partial x_2^2$, with the appropriate choice of parameters λ and μ :

$$\mu = 2\pi\lambda J_0(ic), \lambda = \frac{9c^2}{2\pi[J_0(ic) - J(0)]}$$

The support of the function $Hlop(x_1, x_2)$ is a circle of radius 1.5 (Fig. 4).

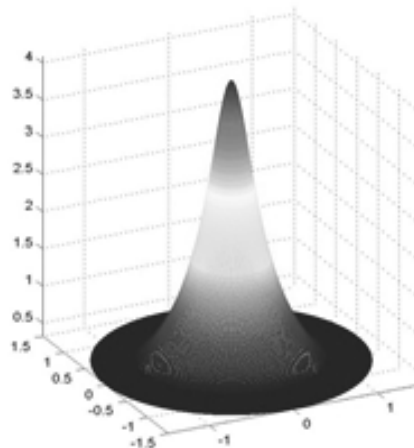


Fig. 4 The graph of atomic function $Hlop(x_1, x_2)$

The information about other atomic functions such as $KGlop(x_1, x_2)$ and $Blop(x_1, x_2)$ functions generated by a biharmonic differential operator can be found in [5, 6, 8].

Obtaining functions of three independent variables $Corp(x_1, x_2, x_3)$ and $Horp(x_1, x_2, x_3)$ is ensured when finding finite solutions of functional differential equations like

$$Lu(x_1, x_2, x_3) = \lambda \int_{\partial\Omega} u[a(x_1 - \xi_1), a(x_2 - \xi_2), a(x_3 - \xi_3)] + \mu u(ax_1, ax_2, ax_3)$$

where the atomic function $Corp(x_1, x_2, x_3)$ is a solution to the functionally differential equation

generated by the Laplace operator: $\Delta = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2}{\partial x_i^2}$; the atomic function $Horp(x_1, x_2, x_3)$ to the equation

generated by the Helmholtz operator: $\Delta \pm \delta^2$, where δ^2 is the parameter of the Helmholtz equation.

The corresponding supports of the functions $Corp(x_1, x_2, x_3)$ and $Horp(x_1, x_2, x_3)$ are a ball of a certain radius $supp F(x_1, x_2, x_3) = M; M: x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 \leq R^2$; $F(x_1, x_2, x_3)$ is one of the functions $Corp(x_1, x_2, x_3)$ or $Horp(x_1, x_2, x_3)$. Each of these functions is normalized by the condition

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(x_1, x_2, x_3) dx = 1.$$

These three-dimensional atomic functions are convenient for implementing computational algorithms when constructing approximate solutions to boundary value problems in 3D domains using meshless schemes. The properties of these functions make it possible to use them as basic ones for solving boundary value problems by meshless methods based on collocation methods.

Atomic functions of three independent variables are solutions of functional differential equations with the Helmholtz operator

$$\Delta u(x_1, x_2, x_3) - \delta^2 u(x_1, x_2, x_3) = \lambda \int_{\partial\Omega} u[3(x_1 - \xi_1), 3(x_2 - \xi_2), 3(x_3 - \xi_3)] d\omega + \mu u(3x_1, 3x_2, 3x_3), (1)$$

where $\partial\Omega$ is the sphere: $\xi_1^2 + \xi_2^2 + \xi_3^2 = \frac{4}{9}$; $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2}$ is the Laplace operator; λ, μ are the parameters, the values of which are refined in the process of finding a finite solution to this equation; δ^2 is the parameter of the Helmholtz equation.

The functions $Horp(x_1, x_2, x_3)$ form a subclass of atomic functions that are generated by the modified Helmholtz differential operator $\Delta - \delta^2$. Other subclasses of atomic functions which are

generated by the Laplace operator, biharmonic and polyharmonic operators, have been investigated in articles [5, 6, 7].

Fig. 5–7 show the visualization of the result of the numerical construction of a three-dimensional function $Horp(x_1, x_2, x_3)$, its first and second derivatives with respect to the arguments x_1, x_2 , and the results of the action of the Laplace and Helmholtz operators on the function $Horp(x_1, x_2, x_3)$: $\Delta Horp(x_1, x_2, x_3), (\Delta - \delta^2)Horp(x_1, x_2, x_3)$ respectively.

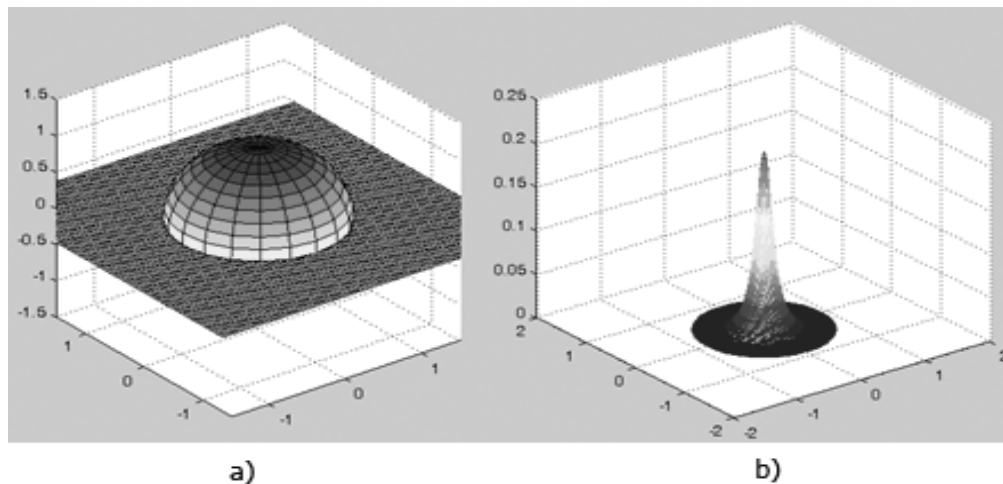


Fig. 5 Visualizing the graph of the $Horp(x_1, x_2, x_3)$ function projection in space $Ox_1x_2Horp(x_1, x_2, const)$: a) determining the support points under the condition $x_3 = const$ (section by the plane $x_3 = const$ of the support – a unit ball centered at the point $(0, 0, 0)$); b) the graph of the function projection

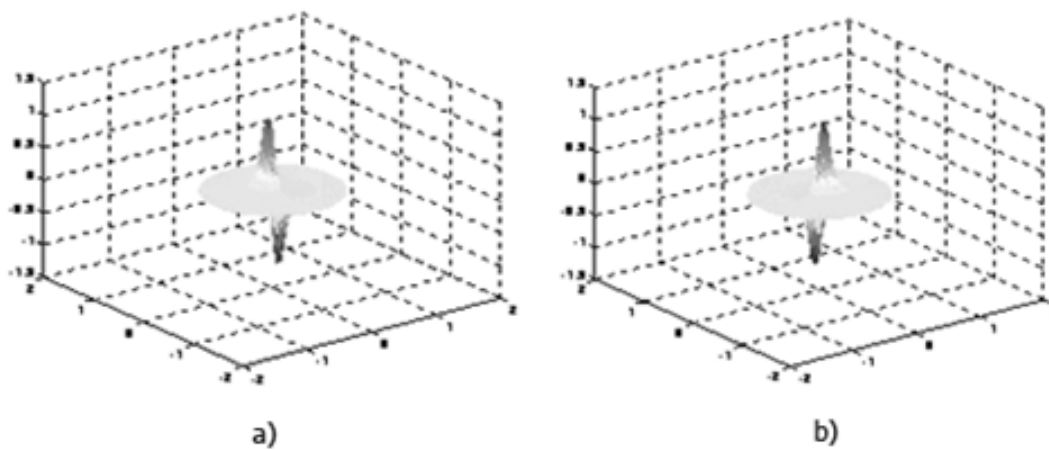


Fig. 6 The graphs of projections of the first derivatives of the function $Horp(x_1, x_2, x_3)$ with respect to variables x_1, x_2 , provided $x_3 = const$: a) the graph of $\frac{\partial Horp(x_1, x_2, const)}{\partial x_1}$ in space $Ox_1x_2 \frac{\partial Horp(x_1, x_2, const)}{\partial x_1}$; b) the graph of $\frac{\partial Horp(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_2}$ in space $Ox_1x_2 \frac{\partial Horp(x_1, x_2, const)}{\partial x_2}$.

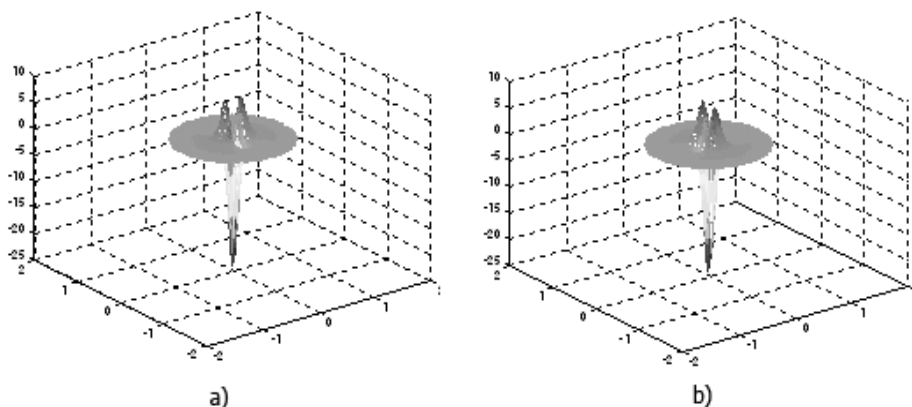


Fig. 7 The graphs of projections of the second derivatives of the function $Horp(x_1, x_2, x_3)$ on the variables

x_1, x_2 provided: $x_3 = const$ a) the graph of $\frac{\partial^2 Horp(x_1, x_2, const)}{\partial x_1^2}$ in space

$Ox_1x_2 \frac{\partial^2 Horp(x_1, x_2, const)}{\partial x_1^2}$; b) the graph of $\frac{\partial^2 Horp(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_2^2}$ in space $Ox_1x_2 \frac{\partial^2 Horp(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_2^2}$

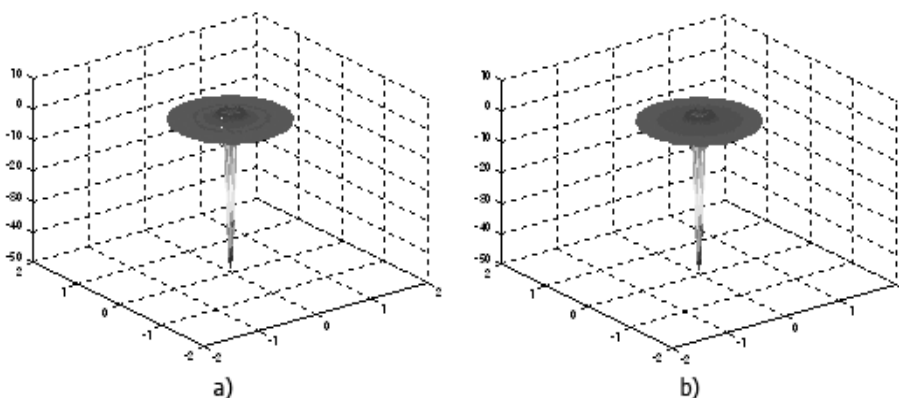


Fig. 8 The results of the action of the Laplace Δ and Helmholtz $(\Delta - \delta^2)$ differential operators on the function

$Horp(x_1, x_2, x_3)$: a) the projection graph of $\Delta Horp(x_1, x_2, const)$ in space $Ox_1x_2 \Delta Horp(x_1, x_2, const)$;

b) the graph of $(\Delta - \delta^2) Horp(x_1, x_2, const)$ in space $Ox_1x_2 (\Delta - \delta^2) Horp(x_1, x_2, const)$

The scheme for constructing a finite solution to a functional differential equation (1) can also be used to find a finite solution to a functional differential equation of the following form:

$$\Delta u(x_1, x_2, x_3) + \delta^2 u(x_1, x_2, x_3) = \lambda \iint_{\partial\Omega} u[3(x_1 - \xi_1), 3(x_2 - \xi_2), 3(x_3 - \xi_3)] d\omega + \mu u(3x_1, 3x_2, 3x_3), \quad (2)$$

where all the notations of the equation (1) are preserved.

The atomic function $KGorp(x_1, x_2, x_3)$ which is a solution to the functional differential equation (2)

where $\partial\Omega$ is the sphere $\xi_1^2 + \xi_2^2 + \xi_3^2 = \frac{4}{9}$ and the values of the coefficients

$$\lambda = \frac{3^5 \delta^3}{8\pi \left[\sin \frac{2}{3} \delta - 2\delta \right]}, \quad \mu = \frac{8\pi}{3\delta} \lambda \sin \frac{2}{3} \delta$$

will be a bounded infinitely differentiable function supported in the form of a ball of unit radius and normalized by the condition

$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} KGorp(x_1, x_2, x_3) dx_1 dx_2 dx_3 = 1$ which is represented in the cube $[-1, 1] \times [-1, 1] \times [-1, 1]$ by the

Fourier series

$$KGorp(x_1, x_2, x_3) = \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{q=0}^{\infty} \sum_{r=0}^{\infty} a_{pqr} \cos(p\pi x_1) \cos(q\pi x_2) \cos(r\pi x_3)$$

where a_{pqr} , $p, q, r = 1, 2, \dots$ are the Fourier coefficients:

$$a_{000} = \frac{1}{8},$$

$$a_{p00} = \frac{1}{4} KG\tilde{o}\tilde{r}\tilde{p}(p\pi, 0, 0), \quad a_{0q0} = \frac{1}{4} KG\tilde{o}\tilde{r}\tilde{p}(0, q\pi, 0), \quad a_{00r} = \frac{1}{4} KG\tilde{o}\tilde{r}\tilde{p}(0, 0, r\pi),$$

$$a_{p q 0} = \frac{1}{2} KG\tilde{o}\tilde{r}\tilde{p}(p\pi, q\pi, 0), \quad a_{0 q r} = \frac{1}{2} KG\tilde{o}\tilde{r}\tilde{p}(0, q\pi, r\pi), \quad a_{p 0 r} = \frac{1}{2} KG\tilde{o}\tilde{r}\tilde{p}(p\pi, 0, r\pi),$$

$$a_{pqr} = KG\tilde{o}\tilde{r}\tilde{p}(p\pi, q\pi, r\pi).$$

$$KG\tilde{o}\tilde{r}\tilde{p} = \prod_{h=0}^{\infty} \frac{\mu - \frac{16\pi}{3^2} \lambda \frac{\sin\left(\frac{2\sqrt{t_1^2 + t_2^2 + t_3^2}}{3^{h+1}}\right)}{2\sqrt{t_1^2 + t_2^2 + t_3^2}}}{3^3 \left(\frac{t_1^2 + t_2^2 + t_3^2}{3^{2h}} - \delta^2\right)}.$$

Fourier function transformation $KGorp(x_1, x_2, x_3)$ is a rapidly decreasing function of exponential type for $t_1^2 + t_2^2 + t_3^2 \rightarrow \infty$.

The proof of the existence of a solution is similar to the given above.

The considered atomic functions $Horp(x_1, x_2, x_3)$ and $KGorp(x_1, x_2, x_3)$ are the radial basis functions that can be used to construct approximate solutions of boundary value problems according to meshless schemes for differential equations in the formation of which Helmholtz-type operators are used.

In order to expand the class of functions and improve their properties, let us consider the construction of a family of the atomic radial basic functions (ARBFs) of three independent variables by using the example of a functional differential equation in the form

$$\Delta u(x_1, x_2, x_3) - \delta^2 u(x_1, x_2, x_3) = \lambda \oint_{\partial\Omega} u(k(x_1 - \xi_1), k(x_2 - \xi_2), k(x_3 - \xi_3)) d\omega + \mu u(kx_1, kx_2, kx_3), \tag{3}$$

where $\partial\Omega: \sum_{i=1}^3 \xi_i^2 = r_k^2$ and $r_k = r_k(k)$.

It should be noted that the region $\partial\Omega$ is dependent on the compression ratio and can be refined in the process of constructing a solution to the boundary value problem if it necessary to ensure certain properties of functions.

That function will be denoted $Horp_k(x_1, x_2, x_3)$ and, according to [7], will be considered an atomic function. It should be noted that the index indicates the possibility of extending the subclass of the functions $Horp_k(x_1, x_2, x_3)$ in order to provide the necessary characteristics of the function.

The function $Horp_k(x_1, x_2, x_3)$ is even with respect to its variables and can be expanded in a threefold Fourier series [4]

$$Horp_k(x_1, x_2, x_3) = \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{q=0}^{\infty} \sum_{r=0}^{\infty} a_{pqr} \cos(p\pi x_1) \cos(q\pi x_2) \cos(r\pi x_3) \tag{4}$$

in which the Fourier coefficients are calculated by using the following formulas:

$$\begin{aligned}
 a_{000} &= \frac{1}{8}; a_{p00} = \frac{1}{4} H\tilde{\delta}r p_k(p\pi, 0, 0); \\
 a_{pq0} &= \frac{1}{2} H\tilde{\delta}r p_k(p\pi, q\pi, 0); a_{0q0} = \frac{1}{4} H\tilde{\delta}r p_k(0, q\pi, 0); \\
 a_{0qr} &= \frac{1}{2} H\tilde{\delta}r p_k(0, q\pi, r\pi); a_{p0r} = \frac{1}{2} H\tilde{\delta}r p_k(p\pi, 0, r\pi); \\
 a_{00r} &= \frac{1}{4} H\tilde{\delta}r p_k(0, 0, r\pi); a_{pqr} = H\tilde{\delta}r p_k(p\pi, q\pi, r\pi),
 \end{aligned} \tag{5}$$

where $p, q, r = 1, 2, \dots$

The functions $Horp_k(x_1, x_2, x_3)$ forms a family of a subclass of atomic functions that are generated by the modified Helmholtz differential operator $\Delta - \delta^2$ (Fig.9).

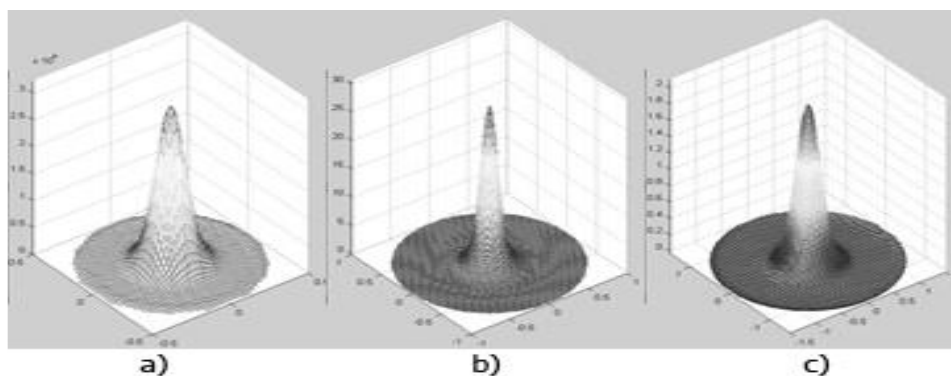


Fig. 9 The $Horp_k(x_1, x_2, x_3)$ function of ARBF family with variation in parameters r (support radius) and k (compression ratio)

According to the scheme above, it is possible to construct families of finite solutions to the considered functional differential equations which are generated by differential operators of Laplace, Helmholtz, etc.

The proposed families of atomic radial functions can be used as basic ones in the case of solving boundary value problems by using meshless schemes [9, 10]. Expanding the subclass of functions will allow selecting functions from families. That will provide the best approximation of the desired solution to the boundary value problem.

REFERENCES

1. Gorin E.A. On finite solutions of some functional differential equations. // UMN, 36, No. 4, 1981. – P. 211–212. (in Russian)
2. Kolodyazhnyi V.M., Rvachev V.A. Finite functions generated by the Laplace operator // Proceedings of the National Academy of Sciences of Ukraine. No. 4, 2004. – P. 17–22. (in Russian)
3. Theory of R-functions and topical problems of applied mathematics. / Stoyan Yu.G., Protsenko V.S., Manko G.P., Goncharyuk I.V., Kurpa L.V., Rvachev V.A., Sinekop N.S., Sirodzhia I.B., Shevchenko A.N., Sheiko V.I. – K.: Nauk. dumka, 1986. – 262 p. (in Russian)
4. Sigmund A. Trigonometric series. / A. Sigmund. – V. 1, Moscow: Fizmatiz, 1965. – 616 p. V. 2, 1965. – 538 p. (in Russian)
5. Kolodyazhnyi V.M., Rvachov V.O. Finite functions generated by a harmonious operator // Proceedings of the National Academy of Sciences of Ukraine. - 2006. – No. 2. – P. 23–30. (in Ukrainian)
6. Kolodyazhnyi V.M., Rvachov V.O. Finite functions, which are generated by the operator Laplace // Proceedings of the National Academy of Sciences of Ukraine. – 2004. – No. 4. – P. 17–22. (in Ukrainian)
7. Kolodyazhny V.M., Rvachov V.A. Atomic functions of three variables invariant with respect to the rotation group // Cybernetics and Systems Analysis. – 2004. – No. 6 – P. 118–130. (in Russian)

8. Kolodyazhny V.M., Rvachov V.A. Atomic functions. Generalizations to the case of many variables and promising directions of practical applications // Cybernetics and System Analysis. – 2007. Vol. 43, No. 6. – P. 155–177. (in Russian)
9. Lisina O.Yu. Modeling thermal fields in non-canonical technical products // Journal of Problems of mechanical engineering, Vol. 14, No. 6, 2011. – P. 57–64. (in Russian).
10. Protektor, D.O., Kolodyazhny, V.M., Lisin, D.O, Lisina O.Yu. A Meshless Method of Solving Three-Dimensional Nonstationary Heat Conduction Problems in Anisotropic Materials // Cybern Syst Anal. 2021. Vol. 57, Issue 3.

Багатовимірні узагальнення атомарних радіальних базисних функцій

**Колодяжний
Володимир
Максимович**

*д. ф.-м. н., професор;
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
вул. Ярослава Мудрого 25, м. Харків, 61002, Україна
e-mail: kolodyazhny@ukr.net*

**Лісіна
Ольга Юліївна**

*к. ф.-м. н., доцент;
Харківський національний університет імені
В. Н. Каразіна, майдан Свободи 4, м. Харків, 61022, Україна
e-mail: o.lisina@karazin.ua
<https://orcid.org/0000-0002-2732-2136>*

**Лісін
Денис**

*доцент, к.т.н., доцент кафедри комп'ютерної фізики
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
майдан Свободи 4, м. Харків, 61022, Україна
e-mail: d.lisin@karazin.ua
<https://orcid.org/0000-0002-6718-7389>*

Представлені можливі підходи узагальнення багатовимірних атомарних радіальних базисних функцій. Функції математичної фізики використовуються при розв'язанні двовимірних та тривимірних крайових задач з частинними похідними. Відповідно до задач мають місце використання функції згідно до розмірності, тобто функції, що породжені різними диференційними операторами. Розглянуті функціонально-диференційні рівняння, що породжують саме ці функції. Згідно з наведеною схемою, будують сімейства фінитних рішень розглянутих функціонально-диференціальних рівнянь, які породжуються диференціальними операторами Лапласа, Гельмгольца та ін. Підсумки наведені у вигляді теорем. З метою розширення класу функцій та удосконалення їх властивостей розглядається побудова сімейства АРБФ трьох незалежних змінних на прикладі функціонально-диференціального рівняння відповідного виду. Методи розв'язання відносяться до безіткових схем та поєднують можливості побудови границь областей за допомогою R-функцій. Атомарні функції зручні при реалізації обчислювальних алгоритмів побудови наближених рішень крайових завдань у 2D та 3D областях за безсітковими схемами. Властивості цих функцій дозволяють використовувати їх як базисні при вирішенні крайових задач безсітковими методами на основі методів колокації. Для атомарних функцій надана залежність від коефіцієнта стиснення, яка уточнюється в процесі побудови рішення крайової задачі за необхідністю для забезпечення певних властивостей функцій. Надано схему побудови розв'язків задач теплопровідності за безсітковою схемою.

Ключові слова: атомарні радіальні базисні функції, крайові задачі математичної фізики, безсіткові методи розв'язування крайових задач.

УДК 681.326

- Мірошник Марина** *докт. техн. наук, професор; професор кафедри теоретичної та прикладної системотехніки, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, майдан Свободи 4, м. Харків, Україна, 61022*
e-mail: m.miroshnyk@karazin.ua
<https://orcid.org/100000002223125291>
- Пшеничний Кирило** *аспірант доцент кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки; Харківський національний університет радіоелектроніки, пр. Науки, 14, м. Харків, Україна, 61166*
e-mail: kyrylo.pshenychnyi@nure.ua
<https://orcid.org/0009000707996604>
- Шафранський Андрій** *аспірант кафедри теоретичної та прикладної системотехніки, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, майдан Свободи 4, м. Харків, Україна, 61000*
e-mail: shafranskyi.andrei@student.karazin.ua
<https://orcid.org/0009-0004-7725-3556>
- Шкіль Олександр** *к.т.н., доцент; доцент кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки Харківський національний університет радіоелектроніки, пр. Науки, 14, м. Харків, Україна, 61166*
e-mail: oleksandr.shkil@nure.ua
<https://orcid.org/0000000310713445>

Підвищення тестопридатності часових автоматів Мура

У роботі запропоновано метод проектування тестопридатних цифрових пристроїв реального часу, представлених у вигляді скінчених автоматів та описаних за допомогою мов опису апаратури (Hardware Description Languages, HDL).

Актуальність. Актуальність роботи полягає у можливості діагностування цифрових пристроїв реального часу під час активної експлуатації.

Методи дослідження. Основним методом дослідження є представлення апаратної надлишковості у вигляді додаткових HDL конструкцій у код опису пристрою та додаткових дуг на графі переходів.

Результати. Моделювання легкотестованого автомата реального часу підтвердило працездатність запропонованого підходу. Результати синтезу за допомогою САПР Xilinx ISE показали, що додаткові апаратні витрати не перевищують 20% порівняно з канонічною моделлю опису.

Висновки. Вирішено задачу проектування тестопридатних пристроїв реального часу на базі легкотестованих автоматів Мура. Запропонований метод дозволяє встановлювати автомат у довільний стан за фіксований час. Такий підхід дозволяє значно спростити процес проведення діагности пристрою.

Наукова новизна даної роботи полягає в розробці підходів і методів створення тестопридатних HDL моделей часових автоматів та їх комбінування шляхом модифікації HDL опису цільового пристрою. Такі методи можна інтегрувати в системи САПР, що дозволяє скоротити загальний час проектування та верифікації.

Ключові слова: легкотестовані системи, автоматизація проектування, скінчені автомати, верифікація, мови опису апаратури, Verilog.

Як цитувати: Мірошник М. А., Пшеничний К. Ю., Шафранський А. В., Шкіль О. С. Підвищення тестопридатності часових автоматів Мура. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління*. 2023. вип. 58. С.37-47.
<https://doi.org/10.26565/2304-6201-2023-58-04>

How to quote: Miroshnyk M., Pshenychnyi K., Shafranskyi A., Shkil O., “Models of Testable Timed Moore Finite State Machines” *Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University, series Mathematical modelling. Information technology. Automated control systems*, vol. 58, pp.37-46, 2023.
<https://doi.org/10.26565/2304-6201-2023-58-04>

1 Вступ

Сучасні цифрові пристрої являють собою складні системи, які складаються з безлічі логічних елементів. Мови опису апаратури, такі як Verilog і VHDL, забезпечують високий рівень абстракції, що дозволяє інженеру працювати з цифровим пристроєм у вигляді коду, який описує його функціональність. Таким чином, розробник використовує синтаксис мови для реалізації цільового

пристрою незалежно від його складності та розміру. Водночас залишається актуальним питання діагностики.

Варто відзначити, що структурні методи діагностики, які використовуються для виявлення константних несправностей, не є ефективними. Крім того, ці методи практично неможливо застосувати на практиці для реальних пристроїв.

Відомо, що модель скінченного автомата (Finite State Machine, FSM) є широко поширеною для опису поведінки цифрових систем. Скінчений автомат є математичною абстракцією, яку можна представити різними способами, наприклад, таблицею переходів, графом переходів або блок-схемою. Така модель використовується і для пристроїв логічного управління реального часу. Для їх реалізації використовується темпоральна модель автомата (timed FSM), а для їх візуального представлення – темпоральний граф переходів (temporal state diagram).

Машинний час, в якому працюють автомати, визначається тактами синхросигнала. Однак цифрові пристрої реального часу працюють в метричному часі. Іншими словами, стан таких пристроїв визначається як вхідними сигналами, так і часом обробки цих сигналів [1]. Таким чином, оскільки переходи між станами безпосередньо залежать від часу, необхідно виразити метричний час у термінах тактових циклів. Також необхідно визначити часові обмеження на графі переходів, який є відправною точкою моделювання.

Канонічна модель кінцевого автомата з часом представлена як $Y(t) = g(X(t), Z(t), T)$, $Z(t+1) = f(X(t), Z(t), T)$. Тут X – множина вхідних сигналів, Z – множина внутрішніх станів автоматів, Y – множина вихідних сигналів, t – машинний час, визначений тактами, d – вихідна функція, t – функція переходу. $T = \{t_c, t_o, t_d\}$ – набір часових параметрів: t_c – часові обмеження (timing constraints), t_o – тайм-аут вихідних сигналів (output timeouts), t_d – вихідні затримки (output delays). Темпоральний граф як канонічне візуальне представлення часових автоматів був введений в [2]. На такому графі присутній таймер, який використовується для затримок у станах. Таймер використовується для зациклованні автомата в певному стані протягом фіксованої кількості тактів. Приклад часового автомата Мура показано на малюнку 1.1.

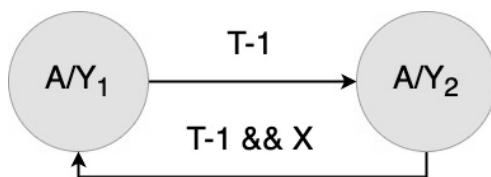


Рис. 1.1 Приклад темпорального графу часового автомата Мура

Тут перехід АВ є звичайним часовим переходом, під час якого автомат залишається у стані А протягом T тактів синхросигнала, видаючи вихідний сигнал $Y1$. Умова записується у формі $T - 1$, оскільки внутрішній таймер працюватиме від $t = 0$ до $t = T - 1$. Перехід ВА залежить від стану допоміжного таймера та вхідного сигналу X (умовно-часовий перехід). Таким чином, автомат залишатиметься в стані В, видаючи сигнал $Y2$ принаймні протягом $T - 1$ тактових циклів. З точки зору HDL, часові переходи реалізуються через перебування в певному стані – зациклованням у стані.

2 Постановка задачі

На початковому етапі проектування цифровий пристрій реального часу представляється у вигляді кінцевого автомата – математичної абстракції, яка базується на специфікації цифрового пристрою. Автоматний шаблон – це форма опису логіки автомата за допомогою мов опису апаратури, таких як SystemVerilog, Verilog, VHDL, SystemC тощо. Зазвичай автоматний шаблон складається з окремих процесів, які представляють функції переходів, виходів та спеціального синхронізованого процесу, який реалізує перехід у новий стан.

Було розроблено різні методи верифікації та діагностики з урахуванням складності та специфіки скінчених автоматів. Однією з них є модифікація моделей автомата для впровадження апаратної надлишковості, як структурно (додаткові входи та виходи для спрощення проведення діагностики), так і функціонально (доповнення та зміни функціонального опису автомата, зокрема графу). Такі стратегії мають на меті спростити подальшу функціональну верифікацію цифрового пристрою.

Метою цієї статті є розробка процедур побудови легкотестованих скінчених часових автоматів з використанням мов опису апаратури шляхом введення апаратної надлишковості у автоматний шаблон.

3 Огляд літератури

У [1] розглядаються апаратні методи реалізації подієвих автоматів. В залежності від обробки вхідних сигналів автомати класифікуються на активні та пасивні, в залежності від способу генерації вихідних сигналів – на моделі Мура та Мілі. Лічильник автоматних тактів використовується для реалізації часових параметрів. Моделі часових автоматів реалізуються за допомогою автоматного шаблону на мові опису апаратури VHDL. Поведінкове моделювання запропонованих моделей, їхній синтез та реалізація в ПЛІС, а також постсинтез-моделювання були проведені за допомогою САПР Xilinx ISE 14.7.

У [5] усі скінчені автомати розподілено на три категорії: регулярні, часові та рекурсивні. Часовий автомат визначається як автомат, який має принаймні один залежний від часу перехід. Для кожної з розглянутих категорій пропонується загальна реалізація на мовах Verilog та VHDL.

У [2] запропоновано спосіб верифікації систем логічного керування реального часу за допомогою асерцій. Вхідною точкою запропонованої методики є темпоральний граф переходів іа відповідна реалізація на мові опису апаратури. Запропонований метод ґрунтується на апараті тверджень, який використовується для опису темпоральних властивостей часових автоматів.

Питання знаходження встановлюючих (діагностичних) послідовностей для дискретних автоматів та визначення їхньої довжини розглядається в [4].

Методи підвищення тестоздатності шляхом додавання апаратної надлишковості в реалізацію цифрових пристроїв широко використовуються під час проектування. Концепція «контрольованості» (controllability) та «спостережуваності» (observability) були запропоновані як фундаментальні ознаки тестопридатності у класичній роботі з розробки та класифікації структурних методів тестопридатного проектування [7]. Викладено принципи організації зсувного регістра в ділянці пам'яті цифрового пристрою та створення на їх основі шляху сканування (scanned path). Крім того, запропоновано вдосконалення відомих структурних методів тестування з використанням технологій сканування. У [8] наведено практичні рекомендації щодо використання структурних підходів для підвищення тестоздатності цифрових пристроїв та розробки на їх основі діагностичних алгоритмів.

Функціональні підходи до розробки тестопридатних цифрових пристроїв детально обговорюються в [9]. Для цифрових автоматів, представлених у вигляді таблиці переходів, введено поняття про діагностовані та безумовно діагностовані класи автоматів та запропоновано методи приведення таблиць станів автоматів до потрібних класів. Розглянуто процедури проведення діагностичних експериментів над автоматами із застосуванням встановлюючих та синхронізуючих послідовностей. Крім того, надано обґрунтування підвищенню тестопридатності автомата шляхом включення апаратної надлишковості через розширення вхідного алфавіту, вихідного алфавіту та алфавіту внутрішніх станів. У [10] розглянуто проблеми організації діагностичних експериментів шляхом відвідування всіх вузлів та дуг на графі переходів. Запропоновано метрику визначення довжини та повноти діагностичних експериментів.

Питання автоматизації проведення діагностичних експериментів у автоматних HDL моделях в [13, 14]. Розглянуто процедури організації діагностичних експериментів у системі верифікації САПР для ПЛІС та запропоновано процедури локалізації проектних помилок у моделях HDL.

Аспекти підвищення надійності на початкових етапах проектування цифрових пристроїв, у тому числі способи захисту цифрового контенту вбудованих систем, розглядаються в [15].

4 Виклад основного матеріалу

Визначимо тестопридатний цифровий пристрій як такий що задовольняє наступним вимогам:

1. Можливість генерації тестових наборів;
2. Наявність метрики оцінки ефективності тестів.
3. Можливість проведення тестової діагностики.

Типовий діагностичний експеримент над автоматом складається з двох етапів: подання вхідних послідовностей та аналіз відповідних вихідних послідовностей. Такі експерименти поділяються на три категорії: ідентифікація внутрішніх станів автомата, ідентифікація вхідних послідовностей автомата та ідентифікація автомата з n станами, який відрізняється від усіх інших автоматів з

такою ж кількістю станів. Діагностичний експеримент, який обходить усі вершини графу переходів, використовується для виявлення проблем проектування в моделях автоматів, представлених таблицею переходів або графом переходів.

Легкотестований автомат визначається як автомат, який можна встановити в будь-який стан за менш ніж n циклів без синхронізуючих послідовностей, де n – загальна кількість станів [14].

Наведене вище твердження має бути адаптовано для часових автоматів. Очевидно, що в часовий автомат може перебувати в певному стані протягом більш ніж n тактів. Крім того, правильність часових переходів є важливим аспектом такого роду автоматів, який необхідно перевірити на ранніх стадіях проектування. Таким чином, визначимо легкотестований часовий автомат як автомат, який задовольняє наступним вимогам:

1. Можливість перемикання автомата в режим тестування і навпаки на будь-якому циклі роботи.

2. Автоматизація запропонованого методу засобами САПР.

Для класичних автоматів підвищення тестоздатності можливе лише шляхом розширення множини вхідних сигналів X , множини внутрішніх станів Z або множини вихідних сигналів Y [9]. З одного боку, це збільшує кількість елементів, які використовуються під час синтезу схеми. З іншого боку це підвищує тестоздатність дизайну на основі автомата. У [6] автори статті вводять апаратну надлишковість у автоматний шаблон на мові VHDL шляхом додавання фрагментів коду, які дозволяють встановити автомат у довільний стан без синхронізуючих послідовностей. Для ілюстрації запропонованого методу була використана модель регістра зсуву. Вхідний алфавіт розширено новим символом – Sh , який дає змогу увімкнути режим діагностики, який реалізує циклічний обхід всіх станів.

Для ілюстрації запропонованих методів розглянемо автомат, який реалізує модуль управління світлофором на пішохідному переході, запропоновану в [1].

Визначимо множину станів:

1. a_1 – включення автомата, вихідні сигнали відсутні, затримка до одиниці;
2. a_2 – жовтий при зміні (G–R), виходи {YGR, R1, R2}, затримка to_2 ;
3. a_3 – червоний на дорозі, зелений на переході, виходи {R1, G2}, затримка to_3 ;
4. a_4 – жовтий при зміні (R–G), виходи {YRG, R1, R2}, затримка to_2 ;
5. a_5 – зелений на дорозі, червоний на переході, виходи {G1, R2}, затримка to_3 ;
6. a_6 – зелений на дорозі, червоний на переході, виходи {G1, R2}, затримка to_3 ;
7. a_7 – горить тільки жовтий, затримка to_1 .

На рисунку 4.1 представлено темпоральний граф переходів автомата Мура даного пристрою.

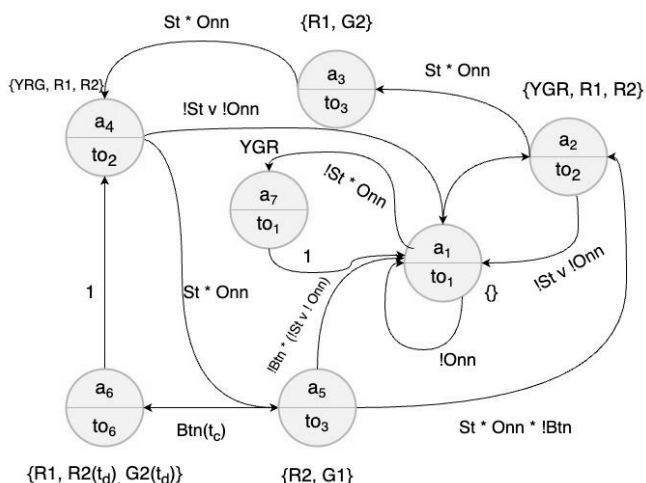


Рис.4.1 Темпоральний граф переходів часового автомата Мура для управління світлофором

Алгоритм функціонування світлофора описується наступним чином: при увімкненні пристрою керування ($Onn=1$), спочатку виконується нічний цикл роботи світлофора, під час якого відбувається миготіння жовтого світла на головній дорозі ($a_1 - a_7$), тоді як світлофор на пішохідному переході не активний. Після початку денного циклу ($St=1$) запускається система переходів ($a_2 - a_3 - a_4 - a_5 - a_2$). У стані a_5 , коли на головній дорозі горить зелений,

встановлюється вікно прийому t_c для зовнішньої події Btn (натискання кнопки переходу). При обробці цієї події керуючий автомат переходить в стан a_6 . В цей момент на головній дорозі вмикається червоний світлодіод, а на пішохідному переході червоний світлодіод затримується, а зелений світлодіод вмикається зі затримкою t_d (час на підготовку до переходу). За період t_c може бути прийнятий тільки один сигнал (зовнішня подія) Btn .

Розширимо вхідний набір сигналом Bps (Вурасс). Коли цей сигнал дорівнює 1, автомат працює у режимі діагностики, який полягає у послідовному обході всіх станів автомата. При $Bps = 0$ автомат реалізує заданий алгоритм. Оновлений граф переходів показаний на рисунку 4.2.

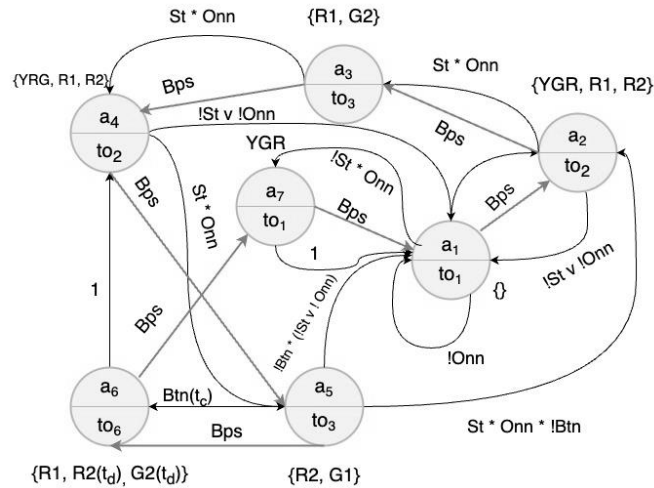


Рис.4.2 Темпоральний граф переходів часового автомата Мура для управління світлофором з діагностичним входом Bps

Необхідно внести відповідні зміни в автоматний шаблон, а саме в процес, що відповідає за визначення наступного стану. Перевірка сигналу bps повинна мати найвищий пріоритет у операторі `if-else`. Відповідний фрагмент коду Verilog представлено на малюнку 4.3. Тут сигнал bps перевіряється перед іншими сигналами та внутрішнім лічильником. Важливо відзначити, що сигнал `count1` повинен бути призначений в операторі `if`, щоб уникнути синтезу латч-тригера для цього сигналу.

```

a1: begin
  if (bps)
    nextState = a2;
    count1 = 3'b000;
  else
    if(count < T1 - 1) begin
      nextState = a1;
      count1 = count + 1'b1;
    end
    else if(st && onn) begin
      nextState = a2;
      count1 = 3'b000;
    end
    else if (!st && onn) begin
      nextState = a7;
      count1 = 3'b000;
    end
    else
      begin
        nextState = a1;
        count1 = 3'b000;
      end
  end
end

```

Рис.4.3 Пріоритизація сигналу bps в описі процесу переходів

На малюнку 4.4 показано результати моделювання модифікованого автомата. Якщо сигнал *bps* дорівнює 0, то автомат працює в стандартному режимі (від 0 до 330 пс). Якщо *bps* дорівнює 1 – усі стани відвідуються циклічно (цикл Гамільтона). Перша сторінка статті повинна завершуватися копірайтом автора в тому ж форматі, що наведено в даному шаблоні.

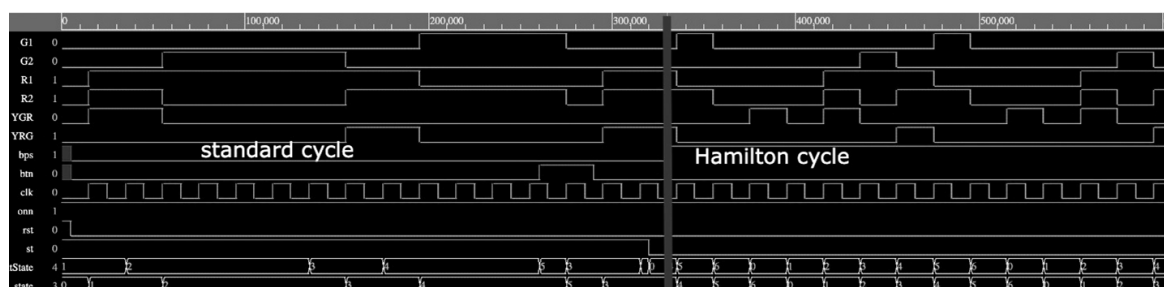


Рис.4.4 Результати моделювання режимів автомата

Результатом синтезу пристрою на ПЛІС FPGA XC3S500E-5fg320 та CPLD XC9572XL-10-TQ100 є автомат з 7 станами. Результати початкового синтезу наведено в таблиці 1. У таблиці 2 наведено результати після модифікації HDL опису та введенням додаткового діагностичного входу *bps*.

Ці результати показують, що додаткова діагностична логіка всередині автомата не збільшує кількість згенерованих тригерів (flips-flops), які використовуються для кодування станів. Відсутні латч-тригери (latches). Натомість запропоновані модифікації HDL опису збільшили використання основних елементів логіки (Basic Elements of Logic, BELs) для обох ПЛІС. Для FPGA зросло використання зрізів (Slices) і таблиць пошуку (Lookup Tables, LUTs) – з 16/30 до 18/35 відповідно. Для CPLD кількість використовуваних макрокомірок (Macrocells) зросла з 10 до 12. Середні додаткові апаратні витрати становлять 20%.

Аналіз швидкодії наведено в таблиці 3. Для CPLD жодних змін у мінімальному тактовому періоді та максимальній частоті виявлено не було. Для FPGA тактовий період збільшився з 3.900 нс до 4.112 нс, а максимальна частота зменшилася з 256.430 МГц до 243.188 МГц. Таким чином, зниження швидкодії становить менше 8%.

Таблиця 1. Результати початкового синтезу автомата для ПЛІС FPGA та CPLD

ПЛІС	Тригери	Латч- тригери	BELs	Slices/ LUTs	Макрокомірки
FPGA XC3S500E- 5fg320	10	0	30	16/30	
CPLD XC9572XL-10- TQ100	6	0	120		10

Таблиця 2. Результати синтезу автомата для ПЛІС FPGA та CPLD з введенням додаткового діагностичного входу *bps*

ПЛІС	Тригери	Латч- тригери	BELs	Slices/ LUTs	Макрокомірки
FPGA XC3S500E- 5fg320	10	0	36	18/35	
CPLD XC9572XL-10- TQ100	6	0	143		12

Таблиця 3. Порівняльні результати швидкодії автомата для FPGA та CPLD з додатковим діагностичним входом

ПЛІС	Мінімальний період тактового сигналу, нс	Максимальна частота, МГц	Мінімальний період тактового сигналу з додатковим входом, нс	Максимальна частота з додатковим входом, МГц
FPGA XC3S500E-5fg320	3.900	256.430	4.112	243.188
CPLD XC9572XL-10-TQ100	6.300	158.730	6.300	158.730

5. Висновки

У цій статті було вирішено проблему створення автоматного шаблону легкотестованого часового автомата Мура. Впровадження апаратної надлишковості є основою для проектування такого роду автоматів. Запропоновано спосіб модифікації опису автомата на мові Verilog. Запропонований підхід надає можливість встановити часовий автомат у довільний стан без синхронізуючих послідовностей та внутрішньої модифікації таймера за фіксовану кількість тактів синхросигнала. Це підвищує тестоздатність і спостережуваність цифрового пристрою, що дозволяє автоматизувати процес створення діагностичних експериментів.

Для ілюстрації запропонованих методів використано модель контролера світлофора. Початкова модель була розширена додатковим входом, який дозволяє переводити автомат в довільний стан. Результати моделювання підтвердили ефективність та працездатність методики. Результати синтезу в САД XILINX ISE показали, що додаткові апаратні витрати становлять менше 20%, коли модель розширено додатковим діагностичним входом як для FPGA, так і для CPLD.

Наукова новизна даної роботи полягає у подальшій розробці підходів і методів створення легкотестованих HDL моделей часових автоматів та їх комбінування шляхом модифікації HDL опису. Такі методи можна інтегрувати в системи САПР, що дозволяє скоротити загальний час проектування та верифікації, а також подальшу діагностику.

Практична значущість роботи полягає у введенні HDL шаблону легкотестованого часового автомата Мура шляхом введення додаткових операторів if-else. Запропоновану методологію можна інтегрувати з іншими методами перевірки та тестування, такими як перевірка на основі асерцій, формальні методи та Universal Verification Methodology.

ЛІТЕРАТУРА

1. M. Miroshnyk, A. Shkil, E. Kulak, D. Rakhlis, A. Miroshnyk, N. Malahov Design Timed FSM With VHDL Moore Pattern. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2020. Issue 14. P. 137-148. doi:10.15588/1607-3274-2020-2-14. <http://ric.zntu.edu.ua/article/view/208496>
2. A. Shkil, A. Miroshnyk, G. Kulak and K. Pshenychnyi. Assertion Based Design of Timed Finite State Machine. *IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Batumi, Georgia*. 2021. P. 1-4. doi: 10.1109/EWDTS52692.2021.9581046. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9581046>
3. M. Miroshnyk, Y. Pakhomov, E. German, A. Shkil, E. Kulak and D. Kucherenko. Design automation of testable finite state machines. *IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Novi Sad, Serbia*. 2017. P. 1-6. doi: 10.1109/EWDTS.2017.8110034. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8110034>

4. Tvardovskii, A.S., Yevtushenko, N.V. Deriving Homing Sequences for Finite State Machines with Timed Guards. *Aut. Control Comp. Sci.* Issue 55. 2021. P. 738–750 doi: 10.3103/S0146411621070154.
https://www.researchgate.net/publication/347911837_Deriving_Homing_Sequences_for_Finite_State_Machines_with_Timed_Guards
5. V. A. Pedroni. Finite state machines in hardware: theory and design (with VHDL and SystemVerilog). MIT Press. 2013.
<https://direct.mit.edu/books/book/4016/Finite-State-Machines-in-HardwareTheory-and-Design>
6. R. Alur, D. L. Dill. A theory of timed automata. *Theoretical Computer Science*. vol. 126, no. 2. 1994. PP. 183-235.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0304397594900108>
7. М. А. Мирошник. Проектирование диагностической инфраструктуры вычислительных систем и устройств на ПЛИС: монография, Харків: ХУПС, 2012.
<http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/5759/1/%D0%9D%D0%B0%D0%B2%D1%87%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B8%D0%B9%20%D0%BF%D0%BE%D1%81%D1%96%D0%B1%D0%BD%D0%B8%D0%BA.pdf>
8. G. Wagner, An abstract state machine semantics for discrete event simulation *2017 Winter Simulation Conference (WSC)*. Las Vegas, NV, USA. 2017. P. 762-773, doi: 10.1109/WSC.2017.8247830.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8247830>
9. Z. Navabi. Digital System Test and Testable Design. Springer New York, NY. 2010. doi: 10.1007/978-1-4419-7548-5.
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4419-7548-5>
10. J.E. Hopfort, R. Motwani, J.D. Ullman. Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation (3rd. ed.), Addison Wesley Longman Publishing Co., Inc., 2006.
<https://www-2.dc.uba.ar/staff/becher/Hopcroft-Motwani-Ullman-2001.pdf>
11. D. Bresolin, A. Tvardovskii, N. Yevtushenko, T. Villa, M. Gromov. Minimizing Deterministic Timed Finite State Machines. IFAC-PapersOnLine, 2018. P. 486-492, doi:10.1016/j.ifacol.2018.06.344.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318306748>
12. M. Zhigulin, N. Yevtushenko, S. Maag and A. Cavalli. FSM-Based Test Derivation Strategies for Systems with Time-Outs. *2011 11th International Conference on Quality Software*, Madrid, Spain. 2011. P. 141-149, doi: 10.1109/QSIC.2011.30.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/6004321>
13. А. С. Шкиль, Г. П. Фастовец, А. С. Серокурова, "Автоматизация поиска ошибок проектирования в HDL-моделях конечных автоматов", АСУ и приборы автоматики. 2014. 168, с. 43-52.
<https://openarchive.nure.ua/items/5b0b4a07-c457-41a4-ae8-79256ac9b730>
14. M. Miroshnyk, Y. Pakhomov, E. German, A. Shkil, E. Kulak and D. Kucherenko. Design automation of testable finite state machines *2017 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*, Novi Sad, Serbia. 2017. P. 1-6, doi: 10.1109/EWDTS.2017.8110034.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8110034>
15. М. А. Мірошник, М. С. Курцев, Автоматизація проектування вбудованих систем і програмних засобів на ПЛІС мовою опису апаратури: Навч. посібник, УкрДУЗТ, 2021
<http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/7162>

REFERENCES

1. A. Shkil, A. Miroshnyk, G. Kulak and K. Pshenychnyi, "Assertion Based Design of Timed Finite State Machine," 2021 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Batumi, Georgia, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/EWDTS52692.2021.9581046.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/9581046>
2. M. Miroshnyk, Y. Pakhomov, E. German, A. Shkil, E. Kulak and D. Kucherenko, "Design automation of testable finite state machines," 2017 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Novi Sad, Serbia, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/EWDTS.2017.8110034.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8110034>
3. Tvardovskii, A.S., Yevtushenko, N.V. Deriving Homing Sequences for Finite State Machines with Timed Guards. *Aut. Control Comp. Sci.* 55, 2021, 738–750 doi: 10.3103/S0146411621070154.

https://www.researchgate.net/publication/347911837_Deriving_Homing_Sequences_for_Finite_State_Machines_with_Timed_Guards

4. V. A. Pedroni, Finite state machines in hardware: theory and design (with VHDL and SystemVerilog), MIT Press, 2013.
<https://direct.mit.edu/books/book/4016/Finite-State-Machines-in-HardwareTheory-and-Design>
5. R. Alur, D. L. Dill, "A theory of timed automata," Theoretical Computer Science, vol. 126, no. 2, 1994, pp. 183-235.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0304397594900108>
6. M. A. Miroschnyk, Diagnostic infrastructure of computing systems and devices design on FPGA: monograph, KhUPS, 2012. [in Ukrainian]
<http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/5759/1/%D0%9D%D0%B0%D0%B2%D1%87%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B8%D0%B9%20%D0%BF%D0%BE%D1%81%D1%96%D0%B1%D0%BD%D0%B8%D0%BA.pdf>
7. G. Wagner, "An abstract state machine semantics for discrete event simulation," 2017 Winter Simulation Conference (WSC), Las Vegas, NV, USA, 2017, pp. 762-773, doi: 10.1109/WSC.2017.8247830.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8247830>
8. Z. Navabi, Digital System Test and Testable Design, Springer New York, NY, 2010. doi: 10.1007/978-1-4419-7548-5.
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4419-7548-5>
9. J.E. Hopfort, R. Motwani, J.D. Ullman, Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation (3rd. ed.), Addison Wesley Longman Publishing Co., Inc., 2006.
<https://www-2.dc.uba.ar/staff/becher/Hopcroft-Motwani-Ullman-2001.pdf>
10. D. Bresolin, A. Tvardovskii, N. Yevtushenko, T. Villa, M. Gromov, "Minimizing Deterministic Timed Finite State Machines," IFAC-PapersOnLine, 2018, pp. 486-492, doi:10.1016/j.ifacol.2018.06.344.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318306748>
11. M. Zhigulin, N. Yevtushenko, S. Maag and A. Cavalli, "FSM-Based Test Derivation Strategies for Systems with Time-Outs," 2011 11th International Conference on Quality Software, Madrid, Spain, 2011, pp. 141-149, doi: 10.1109/QSIC.2011.30.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/6004321>
12. A. S. Shkil, G. P. Fastovets, A. S. Serokurova, "Automation of search for design errors in HDL-models of finite state machines ", MANAGEMENT INFORMATION SYSTEM AND DEVICES, vol. 168, pp. 43-52, 2014. [in Russian]
<https://openarchive.nure.ua/items/5b0b4a07-c457-41a4-ae8-79256ac9b730>
13. M. Miroschnyk, Y. Pakhomov, E. German, A. Shkil, E. Kulak and D. Kucherenko, "Design automation of testable finite state machines," 2017 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Novi Sad, Serbia, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/EWDTS.2017.8110034.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8110034>
14. M. A. Miroschnyk, M. S. Kurtcev, Automation of the design of embedded systems and software on FPGAs in the hardware description languages: textbook, UkrSURT, 2021. [in Ukrainian]
<http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/7162>
15. M. A. Miroschnyk, M. S. Kurtcev, Automation of the design of embedded systems and software on FPGAs in the hardware description languages: textbook, UkrSURT, 2021. [in Ukrainian]
<http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/7162>

**Miroshnyk
Maryna**

*Doctor of Technical Sciences, Professor
Professor of theoretical and applied systems
engineering department, V. N. Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq., 4,
Kharkiv, Ukraine, 61022*

e-mail: m.miroshnyk@karazin.ua

<https://orcid.org/0000000222312529>

**Pshenychnyi
Kyrylo**

*Post graduate student of design automation department, Kharkiv National University of
Radioelectronics, Nauky Ave., 14, Kharkiv, Ukraine, 61166*

e-mail: kyrylo.pshenychnyi@nure.ua

<https://orcid.org/0009000707996604>

**Shafranskyi
Andrei**

*graduate student of the Department of theoretical and applied systems engineering,
Kharkiv National University named after V. N. Karazin Kharkiv National University,
Svobody Sq., 4, Kharkiv, Ukraine, 61022*

e-mail: shafranskyi.andrei@student.karazin.ua

<https://orcid.org/0009-0004-7725-3556>

Shkil Oleksandr

*Doctor of Philosophy, Associate professor
Associate professor of design automation department, Kharkiv National University of
Radioelectronics, Nauky Ave., 14, Kharkiv, Ukraine, 61166*

e-mail: oleksandr.shkil@nure.ua

<https://orcid.org/0000000310713445>

Models of Testable Timed Moore Finite State Machines

The work proposes a method of designing testable digital devices in real time, presented in the form of finite state machines and described using hardware description languages (HDL).

Relevance. The relevance of the work lies in the possibility of diagnosing digital devices in real time during active operation.

Research methods. The main research method is the introduction of hardware redundancy in the form of an additional HDL code blocks in the device description code and additional fragments on the temporal state diagram. The proposed approach provides a way to set timed FSM into an arbitrary state without synchronizing sequences and internal timer modification within a fixed number of clock cycles. This increases the testability and observability of the digital device allowing to automate the process of diagnostic experiments creation.

Conclusions. The problem of testable real-time devices based on easy-to-test Moore FSM design has been solved. The proposed method allows to set the automata into an arbitrary state within a fixed time. This approach makes it possible to significantly simplify the process of device diagnostics.

Traffic light controller model was used to illustrate the proposed methods. The initial model was extended with an additional input that allows setting the automata into an arbitrary state. Simulation results confirmed the efficiency of the approach. The synthesis results in CAD XILINX ISE showed that hardware costs are less than 20% when the model is extended with an additional debug input for both FPGA and CPLD boards.

The scientific novelty of this paper lies in developing approaches and methods of creating testable HDL models of timed FSM and their combination by modifying the design HDL description. Such methods can be integrated into CAD systems which allows to decrease the overall time of design and verification.

The practical significance of the work is to introduces the HDL pattern of easy-tested timed Moore FSM by introducing additional if-else statements. The propose methodology can be integrated with other verification and testing technics such as assertion based verification, formal methods, and Universal Verification Methodology increasing the overall design reliability.

Keywords: *easy-to-test systems, design automation, finite state machines, verification, hardware description languages, Verilog.*

УДК 004.4`2; 004.94

**Панченко Артем
Сергійович***Аспірант факультету Математики і інформатики
Харківській національній університет імені В.Н.Каразіна, майдан
Свободи 4, Харків, Україна, 61022
e-mail: artem.panchenko@karazin.ua
<https://orcid.org/0000-0001-5865-6158>***Жолткевич Григорій
Миколайович***д.т.н., професор; декан факультету Математики і інформатики
Харківській національній університет імені В.Н.Каразіна, майдан
Свободи 4, Харків, Україна, 61022
e-mail: g.zholtkevych@karazin.ua
<https://orcid.org/0000-0002-7515-2143>*

Техніка моделювання Кіберфізичних систем за допомогою Коалгебри

Актуальність. На сьогодні ми можемо спостерігати стрімкий темп розвитку інформаційних технологій, впровадження результатів якого є широкий процент автоматизації виробничих процесів. У більшості випадків цю мету можна досягти за допомогою впровадження Кіберфізичних систем у виробничі процеси. Основною особливістю таких інформаційних систем є інтеграція різноманітних сенсорів та маніпуляторів (фізичної складової системи) у обчислювальну систему, що виконує операційно-контролюючу функцію (кібернетична складова системи). Такі системи потребують високого рівня надійності роботи, що у свою чергу вимагає від їх проєктувальників уважно ставитися до аналізу специфікації поведінки подібних систем за метою виявлення критичних станів її роботи.

Мета. У роботі досліджується можливість використання формальних моделей опису роботи системи за допомогою Коалгебри. Такий підхід дасть можливість більш ефективно уникати помилок аналізу поведінки Кіберфізичної системи на стадії її проєктування. У цьому дослідженні буде показано методику моделювання розповсюджених типів динамічних систем за допомогою Коалгебри.

Методи дослідження. Основні типи динамічних систем у ході цього дослідження будуть абстраговані до моделі на основі Коалгебри.

Результати. Було розроблено підходи до моделювання найпоширеніших типів динамічних систем, а саме, Детермінованої системи, Системи з переходами та Рандомної системи. Моделі будувались з використанням теорії категорій та Коалгебри, що забезпечує необхідний високий рівень абстракції. Такий підхід забезпечує можливість працювати не з однією конкретною системою, що була цілком до аналізу а з цілим класом подібних систем.

Висновки. Результати дослідження показали основні методи до створення моделей основних моделей динамічних систем з використанням Коалгебри. Результати цього дослідження можуть бути корисними для розв'язання задачі моделювання динамічних систем, як основа для подальших досліджень.

Ключові слова: Кіберфізичні системи, Коалгебра, Моделювання динамічних систем, Теорія категорій, Фінальна коалгебра.

Як цитувати: Панченко А.С., Жолткевич Г.М. Техніка моделювання Кіберфізичних систем за допомогою Коалгебри. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління.* 2023. вип. 58. С.47-53.

<https://doi.org/10.26565/2304-6201-2023-58-05>

How to quote: Panchenko A., Zholtkevych H., "The technique of modeling Cyberphysical systems using Coalgebra", *Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University, series Mathematical modelling. Information technology. Automated control systems*, vol. 58, pp.47-53, 2023. <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2023-58-05>

1 Вступ

В сучасному світі зростає розуміння необхідності інтеграції інформаційних технологій та фізичних процесів у так звані Кіберфізичні системах. Кіберфізичні системи є новим напрямком розвитку, що виникає в результаті стрімкої еволюції інформаційних технологій та автоматизації виробничих процесів. Під Кіберфізичними системами ми розуміємо такі системи, що поєднують у собі компоненти реального світу, таких як різноманітні датчики та маніпулятори (фізична складова системи), та елементи контролю та керування на основі комп'ютерів (кібернетична складова системи). Однією з основних областей застосування кіберфізичних систем є промисловість, медичні технології, транспорт та логістика [1].

Слід зазначити, що можна розглядати Кібер фізичну систему як вид розподіленої системи. Подібні системи мають велику кількість переваг, у першу чергу паралельність виконання задач, але потребують більш детального підходу до проектування подібних систем.

Серед основних проблем, що виникають під час проектування Кіберфізичних [2] систем можна виділити наступні

1. Системна складність: Кіберфізичні системи включають в себе різноманітні компоненти, що взаємодіють між собою на різних рівнях. Підтримка та управління такими складними системами може бути викликана труднощами у розумінні взаємодії між компонентами та управлінням їх функціонуванням.
2. Безпека та конфіденційність даних: У кіберфізичних системах, які залучають обробку великих обсягів даних, виникають серйозні проблеми забезпечення безпеки та конфіденційності цих даних. Вразливості в програмному забезпеченні та мережеві атаки можуть призвести до проникнення зловмисників та порушення конфіденційності даних.
3. Гетерогенність інтегрованих систем: Кіберфізичні системи часто поєднують у собі різні технології та пристрої, які можуть мати різну архітектуру та стандарти взаємодії. Це може викликати проблеми сумісності та інтеграції між компонентами системи.
4. Недостатня надійність та стійкість до відмов: Кіберфізичні системи повинні бути стійкими до відмов та недоліків в роботі окремих компонентів. Однак навіть невеликі відмови можуть призвести до серйозних наслідків у функціонуванні системи.
5. Відсутність єдиної методології розробки та тестування: На сьогоднішній день не існує єдиної методології розробки та тестування кіберфізичних систем. Це може призвести до різних підходів до розробки, що ускладнює співпрацю між командами розробників та може призвести до недоліків у якості та надійності системи.

Враховуючи ці проблеми, необхідно використовувати такі підходи до аналізу специфікації поведінки Кіберфізичної системи [3] та її проектування, що характеризуються високим рівнем

1. Формальності мови специфікації, що дозволить уникати помилок при реалізації конкретних специфікацій
2. Виразності мови, що дозволить описати усі аспекти поведінки системи
3. Надійності опису, що дозволить уникати протиріч під час специфікації поведінки системи

У ході цього дослідження ми покажемо і доведемо, що найбільш адекватним інструментом до розв'язання цієї задачі є підхід з використанням Коалгебри. Коалгебра - це математична структура, що вивчається в теорії категорій, яка виникає як дуальна до алгебри структура. Вона дозволяє моделювати властивості об'єктів зі складною структурою, які можуть бути описані через взаємодію та композицію.

Використання Коалгебри дозволяє абстрагуватися від конкретних реалізацій системи та розглядати її як композицію окремих компонентів, які взаємодіють між собою. Це дозволяє здійснювати формальний аналіз властивостей системи та забезпечує більшу модульність та гнучкість у проектуванні.

Таким чином, стає очевидно, що Коалгебра виявляється корисним математичним інструментом, який дозволяє моделювати та аналізувати взаємодію між різними компонентами Кіберфізичних систем. Основна методика застосування Коалгебри під час проектування та специфікації поведінки розподілених систем включає в себе наступні застосування:

1. Моделювання взаємодії компонентів: Коалгебра дозволяє створювати абстрактні моделі, які відображають взаємодію між різними компонентами кіберфізичної системи. Це допомагає розуміти структуру та функціонування системи на високому рівні абстракції та забезпечує базу для подальшого аналізу та оптимізації.
2. Аналіз властивостей системи: За допомогою коалгебри можна вивчати різні властивості кіберфізичних систем, такі як стійкість до відмов, продуктивність, безпека тощо. Вона дозволяє формалізувати ці властивості та визначати їх умови та обмеження.
3. Розробка алгоритмів управління: Коалгебра надає математичний апарат для розробки та аналізу алгоритмів управління кіберфізичними системами. Вона дозволяє моделювати та формалізувати різні аспекти управління, такі як взаємодія з сенсорами та актуаторами, прийняття рішень на основі отриманих даних тощо.

4. Валідація та верифікація систем: Коалгебра дозволяє проводити формальну валідацію та верифікацію кіберфізичних систем, перевіряючи їхні властивості та специфікації за допомогою математичних методів та алгоритмів.

В рамках цього дослідження ми зосередимося на підходах до валідації та верифікації систем за допомогою знаходження фінальної Коалгебри для системи.

2 Аналіз сучасних підходів до специфікації поведінки Кіберфізичних систем

Під час дослідження нами було проаналізовано декілька актуальних наукових публікацій на тему, серед них можна виділити наступні:

Автори [4] окремо наголошують на підвищених вимогах до безвідказності та безперебійності роботи Кіберфізичних, через те, що вони можуть використовуватися у системах автопілотування і ціна помилки такої системи буде вартувати людських життів. Також окремо наголошується, що не існує єдиного підходу до специфікації поведінки подібних систем. Авторами було запропоновано саме підхід з використання Коалгебри, що забезпечує перевірку працездатності системи у цілому. Авторами було показано, що за допомогою використання Коалгебри можна забезпечити уніфікований математичний інструмент для обмеження поведінки надскладних систем та мінімізувати небезпечну поведінку подібних систем.

Автори [5] наголошують, що композиція є важливою властивістю мови специфікації, оскільки вона дозволяє проектувати складну систему як композицію її підсистем, що дозволяє редукувати складність проектування. Декомпозиція однаково важлива для міркування про структурні властивості системи. Зазвичай, однак, систему можна декомпонувати кількома способами, кожен з яких оптимізується за окремим набором критеріїв. У своєму дослідженні автори вивчили можливість використання цього математичного апарату у Коалгебраїчних моделях, націлених на розв'язання задачі проектування Кіберфізичних систем та успішно використали цей фреймворк для проектування реальної системи з керування роботизованою Кіберфізичною системою.

Автори <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8673032> у своїй роботі представили підхід до трансформації моделі роботи Кіберфізичних систем, заснований на абстрактній інтерпретації, техніці статичного програмного аналізу. Таким чином, автори підкреслюють необхідність відходу від концепції неформального опису роботи систем до формального та високорівневого. Таким чином ми зможемо використовувати такий інструмент специфікації, що є максимально прозорим для доведення некоректної поведінки систем у разі наявності такої поведінки..

2.1 Висновки щодо аналізу сучасних підходів до розв'язання поставленої задачі

Аналіз сучасних методів аналізу та специфікації поведінки розподілених систем показав наступне

1. Подібна задача на сьогодні не має єдиного підходу для її розв'язання
2. Однак існує чітке розуміння необхідності використання формальних підходів до опису роботи Кіберфізичних систем, що дає ряд переваг над неформальними, а саме чіткий опис моделі та надійний інструмент доведення
3. Використання Коалгебри для аналізу та специфікації поведінки Кіберфізичних систем є розповсюдженим, у першу чергу через властивості цього математичного апарату, а саме формальна математична основа та високий рівень абстракції.

3 Основні концепти Коалгебри

У розділі буде описано визначення коалгебри та пов'язаних основних Концепцій. Основним джерелом визначень для нас буде онлайн-енциклопедія nLab. Даний розділ необхідний для розуміння подальших моделей систем, створених за допомогою Коалгебр а також буде містити у собі неформальну інтерпретацію формальних визначень

Крім того, деякі конкретні концепції обговорюються для випадку, коли базова категорія - це категорія **Set**.

Визначення 1. Функтор $F: \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{C}$ від категорії до себе самої називається ендифунктором.

Далі у ході дослідження ми будемо вважати за замовченням, що ми працюємо з заданою та фіксованою категорією \mathcal{C} та її ендифунктором F .

Визначення 2. Морфізм a категорії \mathcal{C} називається F -коалгеброю, якщо виконується рівність $\text{cod } a = F(\text{dom } a)$. У цьому випадку $\text{dom } a$ називається носієм a та позначається як \underline{a} .

Визначення 3. Нехай a та $b \in F$ -коалгебрами. Тоді морфізм $f: \underline{a} \rightarrow \underline{b}$ називається F -морфізмом з a в b , якщо діаграма, зображена на Рисунку 1 є комутативною

$$\begin{array}{ccc} \underline{a} & \xrightarrow{f} & \underline{b} \\ \downarrow a & & \downarrow b \\ F \underline{a} & \xrightarrow{Ff} & F \underline{b} \end{array}$$

Рис.1 Діаграма комутативності

Твердження 1. Клас F -коалгебр, обладнаних F -морфізмами, є Категорією, яку зазвичай позначають як $Coalg_F(\mathbb{C})$ або просто $Coalg_F$, якщо базова категорія \mathbb{C} зрозуміла з контексту.

Визначення 4. Термінальний об'єкт $Coalg_F$, якщо він існує, називається кінцевою F -коалгеброю, яку позначають символом νF .

Визначення 5. Для будь-якої F -коалгебри a , єдиний F -морфізм з a в νF називається аноморфізмом і позначається $\llbracket a \rrbracket$.

Таким чином, ми бачимо, що використання Коалгебри є не тільки доцільним з точки зору вибору формального інструменту, а й цілком природним до предметної області моделювання динамічних систем. Це пов'язано за декількома факторами, а саме

1. Визначення 2 можна неформально інтерпритувати наступним чином. Під Коалгеброю ми розуміємо процес зміну стану систем після кожної ітерації її роботи
2. Використовуючи підхід з використання Теорії категорій ми розв'язуємо задачу моделювання до цілого класу систем, що мають однакові властивості
3. Визначення 4 неформально можна інтерпритувати наступним чином. Якщо у класі систем існує такий об'єкт, що має у собі основні властивості систем класу, то ми завжди зможемо створити механізм абстракції кожної системи до його рівня (за допомогою аноморфізма) і аналізувати тільки його поведінку. Таким чином ми зможемо розповсюджувати результати досліджень на усі систему обраного класу.

4 Підходи до моделювання основних типів динамічних систем за допомогою Коалгебри

У цьому розділі ми опишемо підходи до моделювання основних типів динамічних систем за допомогою Коалгебр. Нами будуть формалізовані процеси їх роботи та дано визначення самої Коалгебри для таких категорій систем.

4.1 Дискретна детермінована система

Дискретна детермінована система - це математична модель систем, що складається з множини станів та перехідних функцій, які визначають перехід між цими станами. Формально, така система може бути представлена як впорядкована пара (X, δ) , де X - множина станів, а δ - функція переходу, яка відображає поточний стан в наступний стан згідно з певними правилами.

Однією з ключових особливостей дискретних детермінованих систем є їхня детермінованість, що означає, що результат переходу між станами є повністю визначеним правилами системи і не залежить від випадкових факторів.

Формально таку категорію систем можна визначити за допомогою ідентифікаційного ендоморфізму Id категорії Set . Це означає, що Id -система є парою $(X, \delta: X \rightarrow X)$, а Id -морфізм з A в B є функцією $f: \underline{A} \rightarrow \underline{B}$ такою, що діаграма, зображена на Рисунку 2 є комутативною.

$$\begin{array}{ccc} \underline{A} & \xrightarrow{f} & \underline{B} \\ \delta_A \downarrow & & \downarrow \delta_B \\ \underline{A} & \xrightarrow{f} & \underline{B} \end{array}$$

Рис.2 Діаграма комутативності Коалгебри для Дискретної системи

Таким чином, ми бачимо, що такий клас систем доволі легко замоделювати за допомогою Коалгебри. Подібні системи відіграють ключову роль у широкому спектрі областей, включаючи теорію керування, комп'ютерні науки, інформатику, теорію автоматів, теорію ігор та інші. Вони є об'єктом інтенсивного дослідження через їхню важливу роль у моделюванні різноманітних процесів та систем.

4.2 Системи з переходами

Систему з переходами можна описати як математичну структуру, що складається з набору станів і набору переходів між цими станами. Кожен стан представляє собою конкретну конфігурацію системи, а переходи відображають, як система переходить з одного стану в інший відповідно до певних правил або умов.

Такі системи широко використовуються для моделювання різноманітних процесів і систем, таких як програми, мережеві протоколи, керування процесами, та багато інших. Вони дозволяють аналізувати поведінку системи, виявляти помилки та неочікувані стани, та розробляти стратегії керування та відновлення.

Формально категорію Систем з переходами можна визначити за допомогою ендofунктора P_* , який переводить будь-яку множину X у множину її кінцевих підмножин і будь-якої функції $f : X \rightarrow Y$, він надсилає у функцію, яка приймає скінченну підмножину A з X і повертає скінченну підмножину $\{f x \mid x \in A\}$ з Y . Перевірка того, що описані перетворення визначають ендofунктор, є тривіальною.

Отже, Система з переходами – це пара $(X, \delta : X \rightarrow P_* X)$, функція переходу δ якої пов'язує скінченну множину можливих станів-наступників з будь-яким поточним станом $x \in X$.

Наступне поняття є корисним для опису P_* -морфізмів.

Нехай A - P_* -система, тоді можна визначити таке бінарне відношення \xrightarrow{A}

$$x \xrightarrow{A} x' \text{ тільки за умови, якщо } x' \in \delta Ax$$

Таким чином, P_* -морфізм $f : A \rightarrow B$ це функція $f : \underline{A} \rightarrow \underline{B}$ така, що

$$fx \xrightarrow{B} y \text{ тільки за умови, якщо } x \xrightarrow{A} x' \text{ для деяких } x', \text{ таких, що } fx' = y$$

Системи з переходами є потужним інструментом для моделювання та аналізу дискретних процесів та систем. Їх широкий спектр застосувань робить їх важливим елементом у розв'язанні різних завдань у сферах інформатики, інженерії програмного забезпечення, теорії автоматів та багатьох інших областях. У цьому підрозділі нами було показано як замоделювати їх роботу за допомогою Коалгебри, що значно спрощить їх аналіз та зроблять його більш надійним.

4.3 Рандомні системи

Як було зазначено вище, у Детермінованій системі кожен можливий стан або перехід між станами є чітко визначеним і передбачуваним. Перехід між станами відбувається згідно з чіткими правилами або алгоритмами, і результат переходу завжди однозначно визначений. Такий підхід до моделювання не завжди є оптимальним у першу чергу через те, що зазвичай у нас немає можливості повного збору інформації щодо поточного стану системи. Саме тому виникає можливість використовувати модель Рандомної системи.

Основною її відмінністю від Детермінованої системи є те, що у Рандомній системі переходи між станами визначаються випадковим чином. Результати переходів або подій не можуть бути передбаченими з абсолютною впевненістю, оскільки вони залежать від випадкових факторів або ймовірностей. Таким чином, нам необхідно використовувати монади розподілення ймовірностей для визначення наступного стану системи.

Формально Рандомну систему можна визначити наступним чином. Нехай X, Y — довільні множини, а $f : X \rightarrow Y$ - функція, тоді

$$D_+X = \{p : X \rightarrow [0,1] \mid p(x) \neq 0 \text{ для кінцевої множини } x \text{ та } \sum_{x \in X} p(x) = 1\}$$

$$D_+f = \lambda p. \lambda y. \sum_{x \in X} [f x = y] \cdot p(x) : D_+X \rightarrow D_+Y$$

Таким чином, D_+ можна називати Рандомною системою.

Для D_+ -системи A ми інтерпретуємо $(\delta Ax)(x')$ як ймовірність переходу $x \xrightarrow{A} x'$ для $x, x' \in \underline{A}$,

тобто

$$Pr\left(f x \xrightarrow{B} y\right) = \sum_{x' \in X} [f x' = y] \cdot Pr\left(x \xrightarrow{A} x'\right)$$

Для будь-яких $x \in A$ та $y \in B$.

Отже, у цьому підрозділі було показано, як за допомогою використання функтору Джирі на Коалгебри можна змодельовати роботу Рандомної системи.

5 Висновки

Робота над аналізом та специфікацією поведінки Кібрфізичної системи пов'язана з низкою проблем у першу чергу викликаних високими вимогами до безпеки (з точки зору безвідмовності) системи, що проектується. Через це, стандартні для розробки програмного забезпечення методи аналізу поведінки системи не завжди можуть бути оптимальними.

Через подібні обмеження бажано використовувати формальні методи моделювання системи з високим рівнем абстракції. Такий підхід забезпечить

1. Відсутність протиріч у вимогах, що зумовлено використання математичних моделей
2. Можливість розповсюдження отриманих знань про систему на увесь клас подібних систем

Класичним підходом до розв'язання задачі аналізу та специфікації поведінки системи є використання Коалгебри та Теорії категорій. Основною причиною цього вибору є високий рівень виразності та абстрактності, а також аналіз усього класу систем за допомогою Фінальної Коалгебри.

В статті були представлені підходи до моделювання основних моделей динамічних систем, а саме Детермінованої системи, Системи з переходами та Рандомної системи. Для кожної з них було представлено відповідну Коалгебру. Результати цього дослідження можуть бути корисними для розв'язання задачі моделювання динамічних систем, як основа для подальших досліджень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Y. Liu, Y. Peng, B. Wang, S. Yao and Z. Liu, "Review on cyber-physical systems," in IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, vol. 4, no. 1, pp. 27-40, Jan. 2017, doi: 10.1109/JAS.2017.7510349. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7815549>
2. Rasim Alguliyev, Yadigar Imamverdiyev, Lyudmila Sukhostat, Cyber-physical systems and their security issues, Computers in Industry, Volume 100, Pages 212-223, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.04.017>. <https://sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166361517304244>
3. Hasuo, I. Metamathematics for Systems Design. New Gener. Comput. 35, 271–305 (2017). <https://doi.org/10.1007/s00354-017-0023-1>. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00354-017-0023-1>
4. Georgios Bakirtzis, Cody H. Fleming, and Christina Vasilakopoulou. 2021. Categorical Semantics of Cyber-Physical Systems Theory. ACM Trans. Cyber-Phys. Syst. 5, 3, Article 32 (July 2021), 32 pages. <https://doi.org/10.1145/3461669>. <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3461669>
5. Benjamin Lion, Farhad Arbab, Carolyn Talcott, A formal framework for distributed cyber-physical systems, Journal of Logical and Algebraic Methods in Programming, Volume 128, 2022, 100795, <https://doi.org/10.1016/j.jlamp.2022.100795>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352220822000487>

REFERENCES

1. Y. Liu, Y. Peng, B. Wang, S. Yao and Z. Liu, "Review on cyber-physical systems," in IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, vol. 4, no. 1, pp. 27-40, Jan. 2017, doi: 10.1109/JAS.2017.7510349. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7815549>
2. Rasim Alguliyev, Yadigar Imamverdiyev, Lyudmila Sukhostat, Cyber-physical systems and their security issues, Computers in Industry, Volume 100, Pages 212-223, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.04.017>. <https://sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166361517304244>

3. Hasuo, I. Metamathematics for Systems Design. *New Gener. Comput.* 35, 271–305 (2017).
<https://doi.org/10.1007/s00354-017-0023-1>.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s00354-017-0023-1>
4. Georgios Bakirtzis, Cody H. Fleming, and Christina Vasilakopoulou. 2021. Categorical Semantics of Cyber-Physical Systems Theory. *ACM Trans. Cyber-Phys. Syst.* 5, 3, Article 32 (July 2021), 32 pages. <https://doi.org/10.1145/3461669>. <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3461669>
5. Benjamin Lion, Farhad Arbab, Carolyn Talcott, A formal framework for distributed cyber-physical systems, *Journal of Logical and Algebraic Methods in Programming*, Volume 128, 2022, 100795, <https://doi.org/10.1016/j.jlamp.2022.100795>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352220822000487>

Panchenko Artem*PhD student**V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine**e-mail: artem.panchenko@karazin.ua*<https://orcid.org/0000-0001-5865-6158>**Zholtkevych Hryhorii***Doctor of Engineering, Professor;**Head of School of Mathematics and Computer Sciences**V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine**e-mail: g.zholtkevych@karazin.ua*<https://orcid.org/0000-0002-7515-2143>

The technique of modeling Cyberphysical systems using Coalgebra

Relevance. Presently, we observe a rapid pace of development in information technologies, the implementation of which results in a broad percentage of automation in manufacturing processes. In most cases, this goal can be achieved by integrating Cyber-Physical Systems (CPS) into production processes. The primary feature of such information systems is the integration of various sensors and actuators (the physical component of the system) into a computational system performing operational and control functions (the cybernetic component of the system). These systems require a high level of operational reliability, demanding careful analysis of the behavior specification of such systems to identify critical operational states from their designers.

Goal. This work explores the possibility of utilizing formal models to describe system behavior using Coalgebra. Such an approach provides the opportunity to more effectively avoid errors in analyzing the behavior of Cyber-Physical Systems during the design stage. This investigation demonstrates the methodology of modeling distributed types of dynamic systems using Coalgebra.

Research methods. The main types of dynamic systems in this study are abstracted into models based on Coalgebra.

The results. Approaches to modeling the most common types of dynamic systems, namely, Deterministic Systems, Transition Systems, and Stochastic Systems, have been developed. Models are constructed using category theory and Coalgebra, ensuring the necessary high level of abstraction. Such an approach enables working not with individual systems but with entire classes of similar systems.

Conclusions. The research results have demonstrated fundamental methods for creating models of basic dynamic systems using Coalgebra. The findings of this study can be beneficial for addressing the challenge of modeling dynamic systems as a basis for further research.

Keywords: *Cyber-Physical Systems, Coalgebra, Dynamic Systems Modeling, Category Theory, Final Coalgebra*

УДК (UDC) 004.942 : 371.388

Програмний емулятор навчальної моделі цифрового процесора

Рева С. М., Комеристий В. С.

**Рева
Сергій Миколайович***к.т.н., доцент кафедри ЕіУС; факультету комп'ютерних наук;
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,
майдан Свободи, 6, Харків, Україна, 61022**e-mail: iec-lab@karazin.ua**<https://orcid.org/0000-0002-2615-9226>***Комеристий
Владислав Сергійович***бакалавр факультету комп'ютерних наук Харківського
національного університету імені В.Н. Каразіна,
майдан Свободи, 6, Харків, Україна, 61022**e-mail: xa12850420@student.karazin.ua**<https://orcid.org/0009-0003-2375-5190>*

В роботі розглянуто проблеми організації практичних та лабораторних робіт в освітньому процесі у вищих навчальних закладах України в умовах проведення дистанційних занять. Причиною цих проблем є відсутність в нинішніх умовах можливості проведення аудиторних занять з використанням відповідного наочного обладнання та лабораторного устаткування. Як один із можливих методів вирішення цього питання розглядається розробка і створення програмних емуляторів та інтерактивних навчальних додатків.

Метою роботи є покращення якості освітнього процесу при вивченні основ мікропроцесорної техніки за рахунок розробки і використання комп'ютерної моделі навчального процесора.

В статті проведено короткий огляд та **аналіз** існуючих зразків програмних емуляторів цифрових процесорів, що працюють самостійно або у складі інтегрованих середовищ для розробки програмного забезпечення, визначено їх недоліки відносно використання в навчальному процесі, **запропоновано** новий підхід щодо дизайну та програмної реалізації, сформульовано основні технічні вимоги до комп'ютерної моделі. Розглянуто структуру створеного програмного додатку та його користувацький інтерфейс, описано особливості програмної реалізації. Головною відмінністю створеного емулятора від існуючих аналогів є розширене графічне представлення внутрішньої будови процесора, а також анімаційна індикація сигналів і процесів, що протікають під час його роботи.

Програмно **реалізована** комп'ютерна модель дозволяє виконувати розміщену у віртуальній пам'яті програму у одному із трьох режимів. Перший режим забезпечує покрокове виконання команд, наочно демонструючи за допомогою графічних засобів формування внутрішніх сигналів управління процесором та зміну станів його окремих вузлів протягом всього машинного циклу. Другий режим дозволяє поступово виконувати програму по одній команді, відображаючи стан процесора лише після завершення виконання кожної команди. Третій режим призначений для автоматичного безперервного виконання програми із попередньо встановленою швидкістю.

Також наведено **результати** тестування та пробної експлуатації створеного програмного емулятора в умовах дистанційного навчання на факультеті комп'ютерних наук Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна.

Підведено **підсумки** та розглянуто **перспективи** подальшого вдосконалення і розширення можливостей використання даної моделі у навчальному процесі.

Ключові слова: програмний емулятор, комп'ютерне моделювання, алгоритмічна модель, цифровий процесор, користувацький інтерфейс, навчальний процес.

Як цитувати: Рева С. М., Комеристий В. С. Програмний емулятор навчальної моделі цифрового процесора. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління.* 2023. т. 58. С.54-63. <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2023-58-06>

How to quote: S. M. Reva, V. S. Komerysty "Software emulator of the digital processor training model" *Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University, series Mathematical modeling. Information technology. Automated control systems,* vol. 58, pp. 54-63, 2023. <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2023-58-06>

1 Вступ

Фахівці, що працюють у галузі комп'ютерних наук, повинні знати та розуміти базові принципи роботи процесора, який присутній в усіх електронних обчислювальних машинах (ЕОМ), смартфонах, побутовій техніці та інших пристроях, без яких не можливо уявити собі сучасний світ. Особливо це необхідно для майбутніх системних програмістів, які створюють програмне забезпечення для взаємодії користувачів з апаратною частиною пристроїв (драйвери, утиліти, операційні системи тощо), а також для майбутніх розробників нових комп'ютерів і комп'ютерних систем. Ці знання допоможуть розробляти швидкодіючі та ефективні програми, що здатні працювати без використання зайвих ресурсів. Щоб не знищити бажання студентів, а навпаки — зацікавити їх у вивченні основ мікропроцесорної техніки, бажано знайомство розпочинати не із сучасних процесорів зі складною архітектурою, а з простої моделі, на прикладі якої можна пояснити функціонування процесорів та їх взаємодію з іншими компонентами комп'ютера. Викладачі та студенти факультету комп'ютерних наук свого часу створили таку модель [1], щоб надати можливість здобувачам вищої освіти докладно розібратися в будові та принципі дії основного компоненту ЕОМ. Зовнішній вигляд моделі показано на рисунку 1.1.

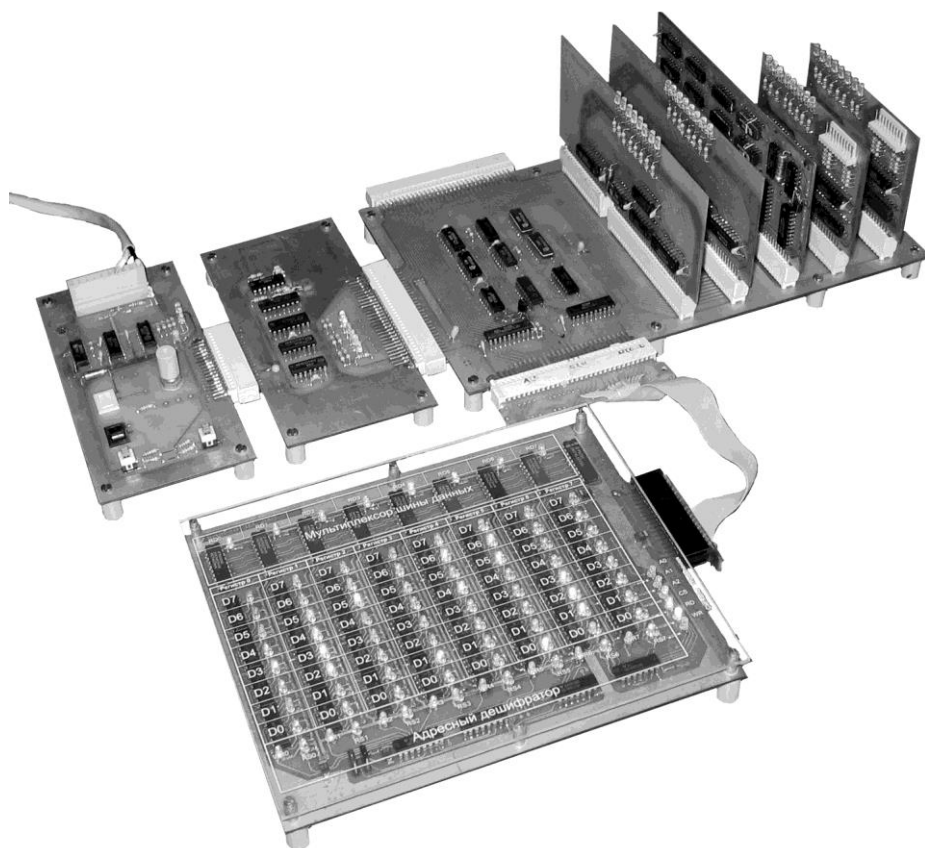


Рис 1.1 – Лабораторна модель цифрового процесора DPM-08

Останні роки стали справжнім життєвим випробуванням як для кожного із нас, так і для освітньої галузі України в цілому. Спочатку — два роки пандемії, які змусили викладачів та студентів відшукувати нові форми освітнього процесу. Лабораторні роботи та практичні заняття проводилися з використанням додаткової відеокамери, що дозволяла доєднати до зом-конференції ще одного «учасника» — лабораторну модель цифрового процесора. З початком повномасштабного вторгнення країни-агресора робота комп'ютерних лабораторій в стінах університету стала неможливою. Однак, всупереч усім складнощам, університет продовжує навчати студентів і готувати з них гідних спеціалістів. Проте, сьогоднішні умови не дають можливості здобувачам освіти працювати з реальним обладнанням і знову вимагають від викладачів пошуку нових підходів для формування навичок практичної роботи. Одним із методів вирішення цієї задачі може бути створення емуляторів, математичних і програмних моделей лабораторного обладнання, демонстраційних інтерактивних додатків і тому подібного.

Так з'явилася ідея проведення окремого дослідження та розробки програмного емулятора лабораторної моделі цифрового процесора, який буде доступним для кожного студента. Це дозволить як і раніше проводити лабораторний практикум у відповідності до навчальної програми, а також розширити використання емулятора для виконання студентами індивідуальних робіт, цікавих та пізнавальних домашніх завдань.

Метою даної роботи є покращення навчального процесу завдяки забезпеченню можливості дистанційного вивчення основ мікропроцесорної техніки та отримання практичного досвіду програмування на мовах низького рівня. Результатом дослідження має бути створення програмної моделі цифрового процесора із зручним графічним інтерфейсом, яка допоможе в проведенні дистанційних лекцій та практичних занять в навчальних курсах «Мікропроцесори», «Основи комп'ютерної схемотехніки» та інших. Програма має імітувати роботу реальної лабораторної моделі процесора.

Дана стаття містить кілька розділів. У розділі другому проведено короткий огляд та аналіз існуючих зразків програмних емуляторів цифрових процесорів. Третій розділ містить формулювання основних цілей та технічних вимог до створюваної моделі. В четвертому розділі мова піде про структурну організацію та користувацький інтерфейс програмної моделі процесора. П'ятий розділ присвячений розгляду деяких особливостей цієї розробки. У шостому розділі підведено підсумки та розглянуто перспективи подальшого вдосконалення і розширення можливостей використання даної моделі у навчальному процесі.

2 Короткий огляд та аналіз існуючих програмних рішень

На сьогоднішній день існує чимало програм-емюляторів, які створювалися програмістами від початку появи перших комп'ютерів. Всі вони певною мірою спрощують життя, надаючи можливість виконувати програмний код шляхом імітації роботи процесора та деяких інших важливих компонентів комп'ютера, не маючи при цьому реального обладнання. При цьому спеціалісти отримують ті самі результати, що і при роботі з фізичними пристроями.

Розпочати розгляд існуючих емуляторів варто з програми Turbo Debugger (TD.exe), яка була створена компанією Borland Software Corporation ще наприкінці восьмидесятих років минулого століття [2]. Свого часу це був досить потужний налагоджувач програмного забезпечення, який використовувався в основному з транслятором Borland Turbo Pascal. Емулятор працював в операційній системі DOS в текстовому повноекранному режимі. Після завантаження програмного коду Turbo Debugger забезпечує його відображення в мнемонічних позначеннях асемблера, надає можливість використовувати точки зупинки при виконанні програмного коду, демонструє поточний стан регістрів процесора та ділянки пам'яті, з якою він працює. Не зважаючи на екранний текстовий режим відображення емулятор досить чітко показує всю необхідну інформацію і фокусує увагу оператора на важливих подіях. І хоча цей продукт має досить солідний вік, він і зараз іноді використовується в навчальному процесі для демонстрації роботи процесорів x86 та відлагодження консольних додатків, написаних на асемблері та C++.

Один із можливих варіантів емуляції роботи процесора реалізований в програмі Proteus Design від компанії Labcenter Electronics [3]. Це програмний пакет, який являє собою систему схемотехнічного моделювання на основі математичних моделей окремих компонентів, в тому числі — мікроконтролерів та мікропроцесорних систем. Емулятор має чудові графічні можливості, але пакет орієнтований на розробку електронних пристроїв і систем, а емуляція роботи процесорів не надає можливості вивчати їх внутрішню будову та принцип дії.

Ще одним різновидом є емулятори, вбудовані в сучасні інтегровані середовища для розробки програмного забезпечення, характерним представником яких є програма Keil uVision, розроблена німецькою компанією Keil Elektronik GmbH [4]. Компанія вперше реалізувала компілятор C для мікроконтролерів 8051. Вбудований емулятор поєднує в собі можливості Turbo Debugger (візуалізація стану регістрів, пам'яті і т.п.) та деякі можливості схемотехнічного моделювання, наприклад, побудову осцилограм сигналів, що формуються на виходах портів мікроконтролера. Однак дослідити схемну конструкцію та роботу процесорного ядра в цьому середовищі також не можливо.

Підводячи підсумки цього короткого огляду, можна зробити висновок, що велика кількість досить потужних емуляторів, якісно створених відомими світовими компаніями, орієнтована в першу чергу на розробників програмного забезпечення та розробників електронних систем. Вони не володіють достатньою мірою наочності для демонстрації базових принципів будови та

функціонування мікропроцесорів і мікроконтролерів. Вони також не можуть бути налаштовані на роботу процесора з довільною системою команд і не можуть бути використані як заміна лабораторної моделі процесора DPM08 під час проведення занять у дистанційній формі. Саме це стало вагомим фактором у прийнятті рішення щодо створення власного програмного емулятора.

Розроблена програмна модель представляє собою застосунок зі зручним та зрозумілим графічним інтерфейсом. Він може працювати під будь-якою операційною системою сімейства Windows, починаючи з Windows XP і закінчуючи сучасними Windows 10 та Windows 11. Це дає можливість застосовувати додаток як на нових комп'ютерах, так і на застарілих ноутбуках, що особливо важливо в нинішніх умовах проведення освітнього процесу. Використання сумісно з UNIX-подібними системами поки що не розглядалось, але в майбутньому це цілком можливо.

Для розробки програми використовувалась мова програмування C++ [5] та набір бібліотек Qt [6]. Цей набір надає багато можливостей для створення якісних користувацьких додатків, а також дозволяє легко впроваджувати кросплатформеність, що і стане в нагоді при реалізації роботи емулятора під UNIX-подібними системами.

3 Основні цілі та завдання дослідження.

Виходячи з результатів проведеного аналізу автори прийшли до висновку, що розробка власної програмної моделі простого цифрового процесора допоможе вирішити цілий ряд питань, що виникли з переходом на дистанційну форму проведення занять, і які не можуть бути вирішені шляхом застосування існуючих програмних емуляторів. Для початку були визначені основні цілі розробки та технічні вимоги, яким повинна відповідати дана модель.

1. Програма повинна моделювати роботу лабораторної моделі цифрового процесора DPM08. Для цього вона має емулювати виконання всіх інструкцій, які входять до складу системи команд цього процесора. Закладати можливості гнучкого налаштування на довільну систему команд не варто, оскільки це призведе до ускладнення програми та знизить її швидкодію.

2. Програма має працювати під операційною системою Windows як найбільш поширеною у студентському середовищі. При цьому бажано забезпечити її сумісність як з останніми версіями, так і з попередніми, починаючи з Windows XP. Це надасть можливість використання програмної моделі навіть на застарілому апаратному обладнанні.

3. Для повної емуляції апаратних можливостей реального процесора бажано створити модель програмної пам'яті, яка може змінювати свій розмір, імітуючи роботу як з демонстраційним блоком пам'яті об'ємом вісім байт, так і з усім адресним простором, що доступний процесору.

4. Для зручності роботи з емулятором та ручного редагування програми безпосередньо в машинних кодах необхідно забезпечити можливість керування моделлю не лише за допомогою миші, але й з клавіатури з використанням «гарячих» кнопок оперативного управління.

5. Модель повинна наочно відображати формування основних внутрішніх та зовнішніх сигналів управління, поточний стан усіх регістрів та програмної пам'яті, а також графічними засобами акцентувати увагу на виконанні основних процесів машинного циклу.

4 Структура програмної моделі.

Процесор — це апаратний пристрій, який керує процесом виконання програми. Програма може зберігатися у спеціальній програмній пам'яті (гарвардська архітектура) або у програмному сегменті загальної оперативної пам'яті (архітектура фон Неймана). Але у будь-якому випадку для емуляції роботи процесора потрібно мати дві комп'ютерні моделі: модель пам'яті для зберігання і редагування програмного коду та модель самого процесора, який буде послідовно зчитувати та виконувати цей код. Тому при розробці комп'ютерної моделі було вирішено створити два окремі компоненти, взаємодія між якими буде відбуватися через масив програмного коду та деякі змінні, що будуть забезпечувати певну їх синхронізацію. На рисунку 4.1 показано зовнішній вигляд робочого вікна створеної програмної моделі.

Для забезпечення високої якості відображення окремих графічних елементів додаток має фіксований розмір робочого вікна, яке умовно розділене на дві частини. Зліва знаходиться монітор емулятора процесора DPM08, на якому відображається поточний стан його основних складових частин і сигналів, а внизу — органи управління моделлю процесора. Права частина вікна містить інтерфейс моделі програмної пам'яті. При цьому користувач не може працювати одночасно з обома частинами: якщо він працює з модулем пам'яті, то управління модулем процесора заблоковано і навпаки. Далі окремо наведено опис кожної моделі.

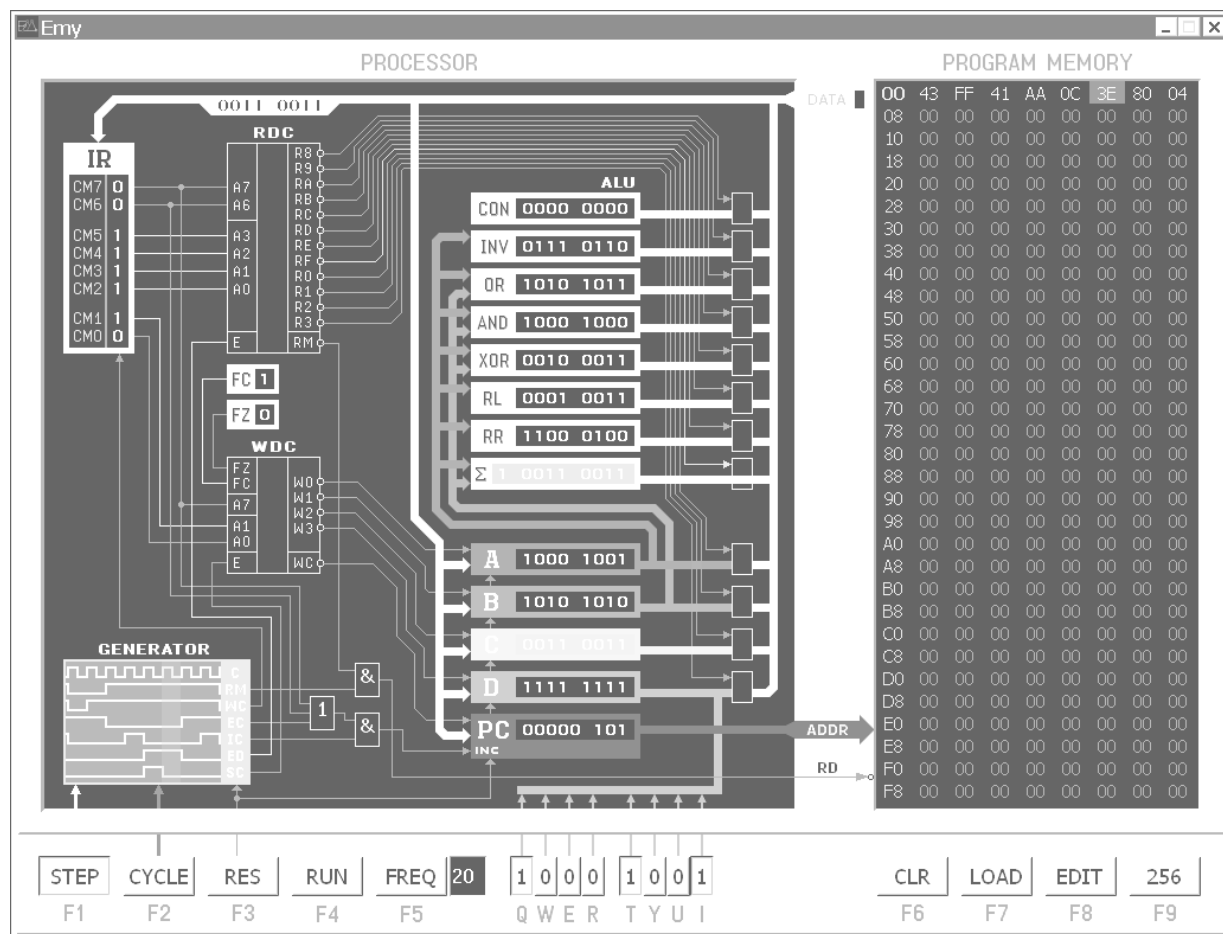


Рис 4.1 – Зовнішній вигляд інтерфейсного вікна програмної моделі процесора DPM-08

Модуль пам'яті представлений у вигляді таблиці, яка відображає масив із 256 одnobайтних чисел, що знаходяться у пам'яті комп'ютера. Таблиця складається із 32 рядків, кожен із яких містить вісім числових значень окремих байт масиву та розпочинається з адреси — номера елемента масиву, що показаний першим у цьому рядку відразу після вказівника адреси (рис. 4.2). Для компактності запису та зручності зчитування дані та адреси представлені у шістнадцятковому форматі (від 00 до FF), значення адрес виділені зеленим кольором. Кожен елемент масиву відображає значення однієї лунки програмної пам'яті, з якою може працювати програмна модель процесора. Масив із 256 елементів моделює максимально доступний об'єм пам'яті, так як реальний процесор DPM08 має лише восьмирозрядну адресну шину.

Модель пам'яті передбачає три можливих стани кожної лунки (див. рис. 4.2):

- лунка недоступна для програмної моделі процесора та для редагування — значення байта відображається темно-сірим кольором;
- лунка доступна для використання, але не містить коду програми — значення байта відображається світло-сірим кольором;
- лунка містить байт програмного коду, що завантажений туди будь-яким доступним методом — значення відображається білим кольором.

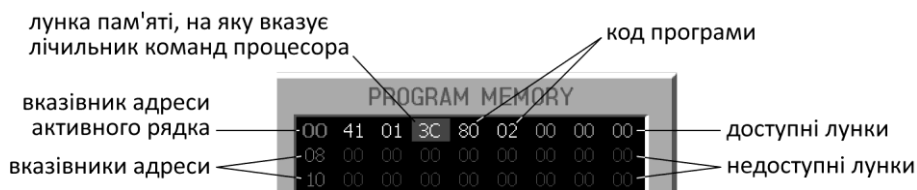


Рис 4.2 – Відображення елементів моделі пам'яті

Завдяки таким властивостям досить просто реалізується модель пам'яті об'ємом вісім байт, яка зазвичай використовується з процесором DPM08 при проведенні перших лабораторних робіт з програмування в машинних кодах. Для цього доступними для завантаження коду призначаються лише вісім перших лунок, а інші залишаються недоступними. Зміна максимального об'єму пам'яті здійснюється при натисканні на кнопку управління «256».

Інші кнопки управління, що розташовані під інтерфейсним вікном модуля програмної моделі пам'яті (див. рис. 4.1) виконують наступні функції:

«CLR» – натискання на кнопку очищає всі елементи масиву пам'яті;

«LOAD» – при натисканні на цю кнопку відкривається стандартне діалогове вікно Windows, яке дозволяє відшукати на диску та завантажити до масиву пам'яті вміст попередньо створеного файлу з програмним кодом у бінарному форматі або Intel-HEX форматі;

«EDIT» – вмикає режим ручного редагування пам'яті, дозволяючи вводити та змінювати дані, що знаходяться в доступних для редагування лунках (клітинках таблиці).

Кнопки управління модулем пам'яті продубльовані на клавіатурі комп'ютера функціональними кнопками F6... F9. Також програмна модель пам'яті передбачає можливість виділення тим чи іншим кольором тих клітинок таблиці, на які в поточний момент часу вказує лічильник команд РС. Це додатково акцентує увагу користувача на взаємодії програмної моделі процесора та модуля пам'яті під час їх спільної роботи.

Таким чином, після завантаження програмного коду в блок пам'яті користувач може розпочинати роботу безпосередньо з емулятором процесора.

Модуль процесора — це основна частина програми, яка моделює роботу процесора під час виконання команд. Так само, як і блок пам'яті, модуль процесора має ряд кнопок управління, що розташовані під вікном монітора стану процесора (рис. 4.1). Активувати їх можна кліком миші або натисканням на клавіатурі відповідних функціональних кнопок F1... F5. У вікні монітора користувач може спостерігати за послідовністю формування сигналів управління, що генеруються протягом машинного циклу, за поточним станом шин, за процесом дешифрації інструкцій та зміною станів окремих регістрів і флагів, за роботою вузлів арифметико-логічного пристрою (АЛП). Дана програмна модель підтримує три режими роботи:

- покрокове виконання команди;
- покомандне виконання програми;
- безперервний режим роботи із заданою частотою.

Перший режим активується натисканням кнопки «STEP». Однократне натискання на цю кнопку імітує надходження у процесор одного імпульсу тактової частоти. Режим має найбільшу ступінь демонстраційності та наочності і дозволяє детально відслідкувати виконання всіх етапів машинного циклу, підсвічуючи на кожному кроці сигнали, які задіяні в даний момент часу. Активовані сигнали мають різну кольорову окраску, що допомагає зрозуміти суть процесів, що відбуваються. Зеленим кольором відображаються сигнали читання, червоним — сигнали запису, білим — деякі інші сигнали управління, дешифратори коду операції в момент їх активації підсвічуються білим кольором. Модуль пам'яті в цей час також використовує кольорове виділення клітинок таблиці, з якими взаємодіє модуль процесора: лунки пам'яті, до яких звертається процесор, підсвічуються синім кольором, а в момент їх зчитування — зеленим. (як і самі сигнали читання). До складу монітора стану процесора входить невелике вікно, у якому відображаються сигнали генератора управління. На кожному етапі виконання команди відповідна фаза формування цих сигналів виділяється блакитним кольором, надаючи можливість зрозуміти їх призначення та відстежити всю послідовність виконання машинного циклу.

Другий режим здійснює покомандне виконання програми. Однократне натискання на кнопку «CYCLE» призводить до виконання однієї команди. В цьому режимі користувач не бачить послідовності формування окремих сигналів, адже весь машинний цикл проходить автоматично. Відображається лише оновлений стан лічильника команд та флагів, а також зміни в регістрах та на виходах функціональних вузлів АЛП, які відбулися в результаті виконання команди.

Індикація в модулі пам'яті також змінюється. Після виконання кожної команди фіолетовим кольором підсвічуються клітинки таблиці, в яких розміщується наступна команда. Якщо вона однобайтна, кольором виділяється одна клітинка, а якщо двобайтна — обидві. Цей режим дозволяє спостерігати за послідовністю виконання команд, відслідковувати алгоритм та відлагоджувати програму, завантажену у модуль пам'яті, якщо вона працює некоректно.

Третій режим активується натисканням кнопки «RUN». Він забезпечує безперервне виконання програми зі встановленою швидкістю. В цьому режимі користувач бачить зміни лише в регістрах оперативного призначення. Автори дійшли висновку, що в даному режимі відсутня потреба спостерігати за змінами АЛП та окремими сигналами, головне — отримати результат роботи програми. В третьому режимі в момент виконання кожної команди її програмний код підсвічується в таблиці пам'яті помаранчевим кольором. Це дає можливість спостерігати за загальним перебігом виконання машинного коду, за розміщенням у пам'яті замкнених циклів та аналізувати загальну структурну організацію програми.

В цьому режимі користувач може обирати тактову частоту, з якою комп'ютерна модель процесора буде виконувати програму. Натисканням на кнопку «FREQ» він може переглянути доступні значення частоти, що відображаються на розташованому поряд із кнопкою дисплеї, та залишити бажане. Перелік частот знаходиться у файлі *config.conf*, і за потреби його можна відредагувати та доповнити. Проте, варто пам'ятати, що програмна модель має певне обмеження по швидкодії, спричинене необхідністю формування відповідних графічних зображень за результатами виконання кожної команди. Тести показали, що максимальна швидкість роботи може сягати приблизно 30 команд за секунду. Такої продуктивності цілком достатньо для вивчення принципів дії процесора і навіть для створення анімаційних зображень, що програмним способом можуть формуватися відповідними цифровими значеннями в регістрах.

Для повернення програмної моделі в початковий стан достатньо натиснути кнопку «RES». При цьому всі регістри оперативного призначення (A, B, C і D) будуть очищені, на виходах всіх вузлів АЛП (окрім функціонального вузла інверсії) також встановляться нульові значення. До нульового стану буде очищений і лічильник команд, відповідно, в таблиці модуля пам'яті кольором виділиться клітинка, що відповідає нульовій адресі. Режим автоматичного виконання програми також буде вимкнено.

Комп'ютерна модель процесора передбачає можливість ручного введення числових даних в межах одного байта. Для цього до регістра D, який побудований за принципом порту вводу-виводу, під'єднана віртуальна клавіатура, що складається із восьми кнопок з фіксацією положення. Їх стан алгоритмічно обробляється моделлю відповідно до схеми «монтажного I». Тобто, при зчитуванні даних з регістра D стан кожного розряду одnobайтного числа, що надходить на шину даних, буде визначатися операцією кон'юнкції між значенням відповідного розряду числа, записаного в регістрі, та поточним станом відповідної кнопки віртуальної клавіатури. Це дозволяє користувачеві вводити зовнішні дані для програмної обробки моделлю процесора та змінювати їх при виконанні програми, якщо її алгоритм передбачатиме періодичний контроль стану віртуальної клавіатури. Змінити стан віртуальних кнопок моделі користувач може натисканням «гарячих кнопок» на клавіатурі комп'ютера («Q», «W», «E» і т.д. до «I») або за допомогою миші.

5 Особливості розробки.

Всі функціональні можливості, що описані у попередньому розділі, потребували розробки відповідних алгоритмів і написання зрозумілого та структурованого програмного коду. Весь код програми розділено на три великі класи або, інакше кажучи, три великі структури, а також включає в себе кілька допоміжних структур. На рисунку 5.1 зображена ієрархія класів програми.

Перший клас (EmuWindow), основний, відповідає за створення вікна програми та розміщення на ньому всіх необхідних компонентів. Він є найбільшим та найскладнішим, адже саме тут відбувається формування елементів графічного дизайну та надання функціональності таким компонентам, як кнопки управління. Також цей клас відповідає за основну логіку роботи програми. Він складається з функцій обробки подій промальовування зображень, декількох слотів, що викликаються при натисканні кнопок (особливість QT [7]) та невеликої кількості допоміжних функцій, як наприклад, створення та читання файлу конфігурації.

Другий великий клас (DisplayWidget) відповідає за представлення модуля процесора. Його основними функціями є побудова графічних зображень всіх компонентів, написів, зберігання інформації про кольори. Тут же прописані функції, необхідні для аналізу командного слова та визначення подальших дій, які від цього залежать. Перший клас мав велику наповненість інтерфейсними компонентами для взаємодії з програмою, а цей клас містить більше інформації про поточний стан емулятора в цілому.

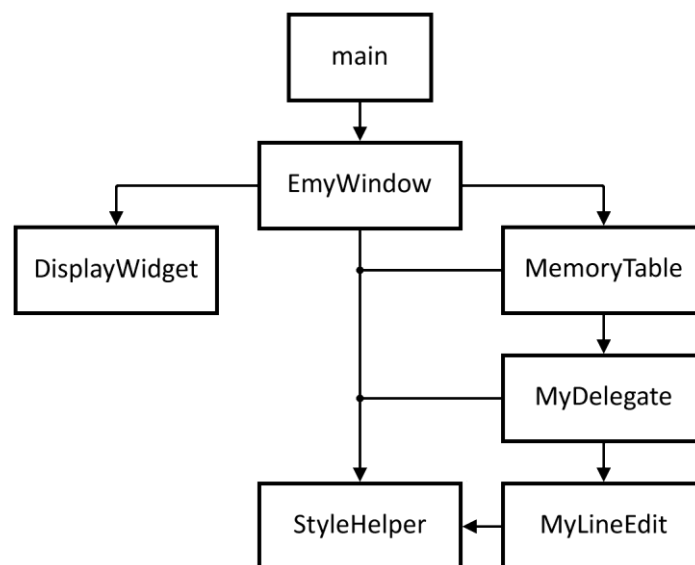


Рис 5.1 – Ієрархія класів програми

Третій великий клас (MemoryTable) відповідає за модуль пам'яті. Тут створювалася таблиця пам'яті, розроблявся її дизайн. Окрім цього, цей клас містить всі функції, які надають користувачеві можливість швидко і зручно працювати з пам'яттю, не витрачаючи час на зайві переміщення курсору, виправлення некоректно введених даних тощо. Для надання ергономічних якостей даному компоненту довелося створювати пару допоміжних класів (MyDelegate, MyLineEdit), які за розміром є невеликими, але досить важливими для того, щоб модуль пам'яті функціонував правильно і був зручним у роботі.

Окрім того, програма містить у своєму складі певні ресурси, а саме графічні зображення, які є статичними і не змінюються в процесі виконання програми, шрифт для написів та іконку самого застосунку. Це необхідно для коректного відображення графічних елементів на інших комп'ютерах та під різними операційними системами.

6 Висновки та плани на подальші дослідження

Розроблені комп'ютерні моделі процесора і програмної пам'яті, які реалізовані у створеному на їх основі застосунку, пройшли випробування навчальним процесом на факультеті комп'ютерних наук Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Застосунок надавався студентам третього курсу під час проведення лабораторних робіт в режимі дистанційного навчання, а також для домашнього використання з метою проведення самостійних досліджень та виконання домашніх завдань. Робоче тестування програми здійснювалося протягом двох навчальних семестрів і дало хороші результати. За цей час були виявлені та виправлені певні недоліки, які в основному стосувалися роботи функцій графічного відображення деяких елементів та покращення ергономічних якостей застосунку. Студентами та викладачами робота створеної програми перевірена сумісно з операційними системами Windows XP, Windows 7, Windows 10 і Windows 11. Для тестування використовувалися як програми, що були написані раніше для реальної моделі процесора DPM08, так і нові програми, що створювалися студентами під час виконання лабораторних робіт. Зауважень щодо роботи функціональної частини емулятора не виявлено.

Таким чином, було досягнуто всіх поставлених цілей даного дослідження.

1. Створений застосунок повністю моделює роботу лабораторної моделі цифрового процесора DPM08, забезпечуючи виконання всіх інструкцій реального процесора.

2. Працездатність та коректна робота застосунку підтверджена всестороннім та тривалим тестуванням сумісно з усіма передбаченими технічним завданням операційними системами сімейства Windows. Продуктивності роботи емулятора цілком достатньо для навчальних цілей навіть при використанні застарілих комп'ютерів з одноядерними процесорами та тактовою частотою менше 1 ГГц.

3. Комп'ютерна модель програмної пам'яті допускає можливість зміни її максимального об'єму, що дозволяє використовувати емулятор для проведення усіх лабораторних робіт, передбачених навчальними програмами факультету.

4. Інтерфейс створеної програми дозволяє працювати з емулятором як з використанням миші, так і виключно за допомогою стандартної клавіатури комп'ютера. Емулятор надає можливість завантаження програмного коду в режимі ручного вводу, отриманого за рахунок трансляції асемблерної програми, або створеного іншими програмними засобами.

5. Побудовані комп'ютерні моделі надають можливість наочно демонструвати устрій та принцип дії простого процесора на рівні окремих регістрів та сигналів машинного циклу, відлагоджувати написані програми, акцентуючи при цьому увагу на важливих деталях та виконуваних процесах. Програма має зручний та зрозумілий інтерфейс управління. Застосунок активно використовується у навчальному процесі на кафедрі електроніки та управляючих систем Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна під час проведення дистанційних лекцій та лабораторних робіт.

Отриманий досвід застосування створеного програмного забезпечення наштовхує на думку про подальше його вдосконалення. По-перше, варто забезпечити можливість роботи застосунку під UNIX-подібними операційними системами, оскільки деякі студенти саме їх використовують на своїх комп'ютерах. По-друге, варто реалізувати режим відображення завантажених у регістри даних не в числовому бінарному вигляді, а за допомогою імітації зображення ввімкнутих та вимкнутих світлодіодів, як це зроблено на реальній моделі. Без жодних сумнівів це додасть реалістичності програмній моделі, особливо, при створенні та відлагодженні анімаційних програм. І нарешті, деякі невеликі вдосконалення моделі процесора без суттєвого його ускладнення дозволять значно розширити функціональність моделі, наблизивши її за можливостями до промислових процесорів. При цьому програма лабораторного практикуму може бути суттєво розширена новими цікавими лабораторними роботами.

ЛІТЕРАТУРА

1. Журавель Ю. А. Модель цифрового процесора / Ю. А. Журавель, С. Н. Рева // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія : Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління. - 2011. - № 987, Вип. 18. - С. 5-18. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKhIMAM_2011_987_18_3 (дата звернення: 15.02.2023)
2. UMD Computer Science Department. Turbo Debugger for Windows. URL: <https://www.d.umn.edu/~rmaclin/cs1621/debugger.html> (дата звернення: 15.02.2023)
3. Proteus: PCB Design & Simulation Made Easy. URL: <https://www.labcenter.com/> (дата звернення: 15.02.2023)
4. ARM Keil: About μ Vision. URL: https://www.keil.com/support/man/docs/uv4cl/uv4cl_overview.htm (дата звернення: 15.02.2023)
5. Bjarne Stroustrup. The C++ Programming Language. Fourth Edition. Addison-Wesley. 2013. 1346 pages.
6. QT Framework Official Website. URL: <https://www.qt.io/product/framework> (дата звернення: 15.02.2023)
7. QT Documentation: Signals & Slots. URL: <https://doc.qt.io/qt-6/signalsandslots.html> (дата звернення: 15.02.2023)

REFERENCES

1. Zhuravel Y. Digital processor model / Y. Zhuravel, S. Reva // Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series : Mathematical Modeling. Information Technology. Automated Control Systems. - 2011. - № 987, Volume 18. - P. 5-18. [in Russian] URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKhIMAM_2011_987_18_3 (Last accessed: 15.02.2023)
2. UMD Computer Science Department. Turbo Debugger for Windows. URL: <https://www.d.umn.edu/~rmaclin/cs1621/debugger.html> (Last accessed: 15.02.2023)

3. Proteus: PCB Design & Simulation Made Easy. URL: <https://www.labcenter.com/> (Last accessed: 15.02.2023)
4. ARM Keil: About μ Vision.
URL: https://www.keil.com/support/man/docs/uv4cl/uv4cl_overview.htm (Last accessed: 15.02.2023)
5. Bjarne Stroustrup. The C++ Programming Language. Fourth Edition. Addison-Wesley. 2013. 1346 pages.
6. QT Framework Official Website. URL: <https://www.qt.io/product/framework> (Last accessed: 15.02.2023)
7. QT Documentation: Signals & Slots. URL: <https://doc.qt.io/qt-6/signalsandslots.html> (Last accessed: 15.02.2023)

Software emulator of the digital processor training model

Reva Sergiy

Candidate of Technical Science, Associate Professor of the Department of Electronics and Control Systems; Faculty of Computer Science; V. N. Karazin National University, Svobody Sq 6, Kharkiv, Ukraine, 61022
e-mail: iec-lab@karazin.ua;

<https://orcid.org/0000-0002-2615-9226>

Komerystyi Vladislav

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

e-mail: xa12850420@student.karazin.ua

<https://orcid.org/0009-0003-2375-5190>

The paper deals with the problems of organizing practical and laboratory work in the educational process in higher educational institutions of Ukraine in the context of distance learning. The reason for these problems is the lack of the possibility of conducting classroom classes with the use of appropriate visual equipment and laboratory equipment in the current conditions. The development and creation of software emulators and interactive learning applications is considered as one of the possible methods of solving this issue.

The purpose of the work is to improve the quality of the educational process in the study of the basics of microprocessor technology through the development and use of a computer model of a learning processor.

The article provides a brief review and analysis of existing samples of software emulators of digital processors that work independently or as part of integrated software development environments, identifies their shortcomings in relation to the use in the educational process, proposes a new approach to design and software implementation, and formulates the main technical requirements for a computer model. The structure of the created software application and its user interface are considered, and the features of the software implementation are described. The main difference between the created emulator and existing analogues is an extended graphical representation of the internal structure of the processor, as well as animated indication of signals and processes occurring during its operation.

The software implemented computer model allows executing a program placed in virtual memory in one of three modes. The first mode provides step-by-step execution of commands, clearly demonstrating with the help of graphical means the formation of internal processor control signals and changes in the states of its individual nodes throughout the entire machine cycle. The second mode allows you to gradually execute the program one command at a time, displaying the processor status only after each command is completed. The third mode is designed for automatic continuous program execution at a preset speed.

The results of testing and trial operation of the created emulator within the framework of distance learning at the Faculty of Computer Science of V. N. Karazin Kharkiv National University are also presented.

The results are summarized and the prospects for further improvement and expansion of the possibilities of using this model in the educational process are considered.

Keywords: *software emulator, computer modeling, algorithmic model, digital processor, user interface, educational process.*

УДК 004.93:004.94

Математичні моделі та алгоритми комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів

Рева**Сергій Миколайович**

*к.т.н., доцент кафедри ЕіУС; факультету комп'ютерних наук;
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,
майдан Свободи, 6, Харків, Україна, 61022
e-mail: iec-lab@karazin.ua
<https://orcid.org/0000-0002-2615-9226>*

Циблієв**Денис Олександрович**

*аспірант Харківського національного університету імені
В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 6, Харків, Україна, 61022
e-mail: dtsibliyev@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0008-4373-8773>*

Технологія комп'ютерної обробки та аналізу даних, отриманих в процесі вимірювання енергетичних спектрів рентгенівського та гамма-випромінювання, поступово витісняє класичні аналогові методи вимірювання. Проте існує проблема об'єктивного оцінювання ефективності того чи іншого методу комп'ютерного аналізу, оскільки через випадковість процесів під час реальних експериментів немає можливості отримання еталонних даних. Можливим способом вирішення цієї проблеми є комп'ютерне моделювання штучного спектрометричного сигналу із заданими параметрами, який надасть можливість визначити вірогідність розпізнавання сигналів детектора тим чи іншим методом математичної та логічної обробки.

Метою даної роботи є розробка математичних моделей та алгоритмів комп'ютерного моделювання сигналів із наперед відомими параметрами та дослідження можливості їх використання в подальшому для оцінки ефективності комп'ютерних методів розпізнавання та аналізу цих сигналів.

Стаття розглядає два різні **методи** синтезу цифрового образу спектрометричного сигналу з потрібним розподілом амплітуд імпульсів на основі попередньо завантаженого шаблону — табличної функції розподілу амплітуд.

Перший підхід базується на використанні статистичних методів та відрізків ймовірностей для визначення амплітуд імпульсів в процесі створення цифрового образу сигналу. Він дозволяє моделювати хід експерименту, поступово формуючи сигнал, в якому розподіл амплітуд завжди наближений до заданого. В основі другого підходу комп'ютерного моделювання покладено використання детермінованих кінцевих значень розподілу амплітуд імпульсів у створюваному сигналі. Цей підхід дозволяє при випадковому розподілі імпульсів у часі отримати точний цифровий образ сигналу, що не містить статистичних відхилень від шаблону. Але на відміну від першого, даний метод дає необхідний результат лише при закінченні всього сеансу комп'ютерного моделювання експерименту.

В роботі наведено деякі **результати** моделювання, які отримані при проведенні чисельних експериментів за допомогою комп'ютерної програми, що розробляється в рамках дослідження. Показано, що при моделюванні першим методом з використанням експериментально отриманого спектру або штучно створеного ідеалізованого шаблону, результуючий спектр містить статистичні відхилення, однак функція розподілу амплітуд в цілому відповідає табличній функції, вказаній у шаблоні.

Описані підходи та алгоритми моделювання можуть бути **використані** для створення цифрових образів сигналів з повністю визначеними вхідними даними для подальшої перевірки ефективності роботи комп'ютерних методів розпізнавання та аналізу параметрів спектрометричних сигналів.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, імітаційне моделювання, комп'ютерні методи аналізу, математичні моделі, спектрометричні сигнали.

Як цитувати: Рева С. М., Циблієв Д. О. Математичні моделі та алгоритми комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління*. 2023. вип. 58. С.64-74.
<https://doi.org/10.26565/2304-6201-2023-58-07>

How to quote: S.M. Reva, D.O. Tsyblyiev, “Reva S. M., Циблієв Д. О. “Mathematical models and algorithms of computer modeling of spectrometric signals ” *Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University, series Mathematical modeling. Information technology. Automated control systems*, vol. 58, pp.64-74, 2023. <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2023-58-07>

1 Вступ. Мета та актуальність дослідження

Останні десятки років, на протигагу класичним методам спектрального аналізу рентгенівського та гамма-випромінювання з використанням аналогової електроніки, інтенсивного розвитку набувають комп'ютерні методи реєстрації та вимірювання спектрів. В їх основу, як правило, покладено цифровий запис сигналів, що надходять безпосередньо з детекторів рентгенівського та гамма-випромінювання, з їх послідуною комп'ютерною обробкою та аналізом. Для того, щоб отримати цифрові дані, використовується спеціальне обладнання, що зазвичай включає в себе: детектор випромінювання (сцинтиляційний або напівпровідниковий) з відповідним пристроєм живлення, digitizer (оцифровувач сигналу), комп'ютер чи розподілену комп'ютерну систему збору і обробки даних і, звісно ж, саме джерело випромінювання. Приклад будови такої спектрометричної установки з використанням сцинтиляційного детектора показано на рисунку 1.1 [1].

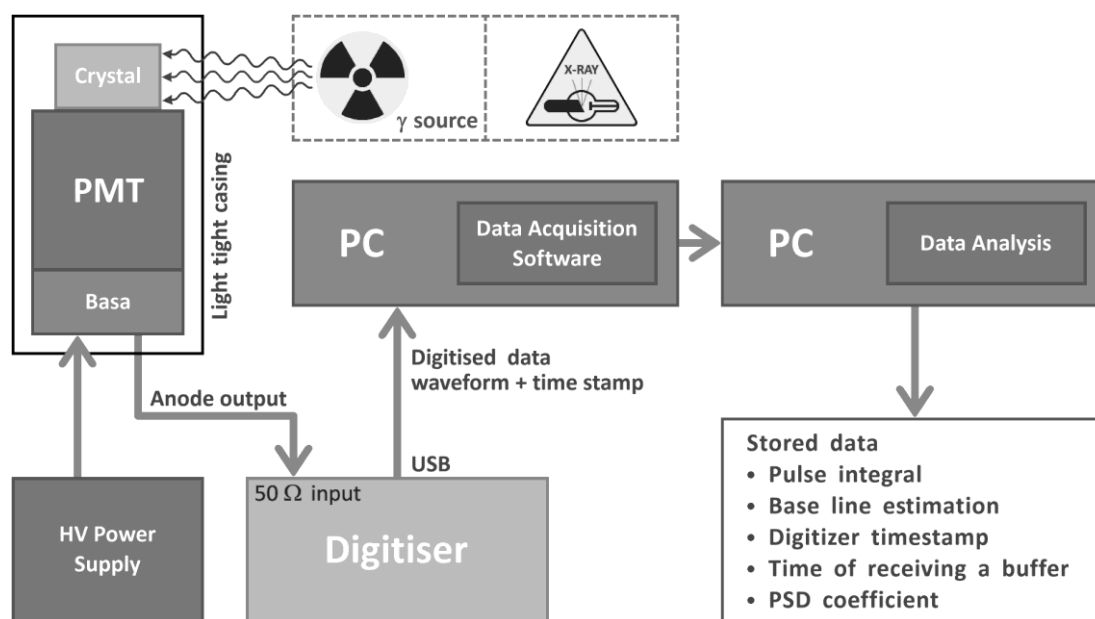


Рис. 1.1 Загальна схема установки для отримання та аналізу цифрових спектрометричних даних

Спектрометричний сигнал, що виробляється детектором, являє собою послідовність імпульсів, які формуються у випадкові моменти часу та мають різні амплітуди. Саме вони, а точніше — їх параметри, і несуть в собі закодовану корисну інформацію про матеріали і процеси, що досліджуються. Однак випадковий характер появи імпульсів часто призводить до їх взаємного накладання, в результаті чого змінюється їх амплітуда і тривалість, а це, в свою чергу, призводить до спотворення первинної інформації. Відновити її повністю методами аналогової спектрометрії практично неможливо, тобто, результуючий спектр завжди має певні похибки.

На відміну від аналогових методів вимірювання, в яких обробка сигналу здійснюється виключно апаратними засобами (частотними фільтрами, інтегруючими та диференціюючими каскадами і т. п.), комп'ютерний аналіз не лише надає можливість використання математичних методів обробки попередньо оцифрованого сигналу, але і можливість його логічного аналізу з метою відновлення частково втраченої інформації, що може поліпшити достовірність отриманого кінцевого результату.

Однак існує проблема об'єктивного оцінювання ефективності того чи іншого комп'ютерного методу обробки, оскільки немає можливості отримання повністю достовірних даних. Процеси на вході спектрометричного вимірювального тракту завжди є випадковими та непередбачуваними в деталях. Це унеможливує порівняння результатів, отриманих внаслідок комп'ютерної обробки цифрового сигналу, з реальною послідовністю подій, які зареєстрував детектор.

Вирішити цю проблему можливо шляхом комп'ютерного моделювання штучного спектрометричного сигналу, який потім буде використовуватися для дослідження методів математичної та логічної обробки. Адже в цьому разі для всіх створених випадковим чином імпульсів буде відомим точний час генерації та їх електричні параметри. Це дозволить порівняти

вхідні та вихідні дані для конкретних умов чисельного експерименту, а також розрахувати на основі цього порівняння *ймовірності отримання достовірних даних*. Саме цей параметр може бути використаний як критерій ефективності того чи іншого методу комп'ютерної обробки спектрометричного сигналу.

У попередній статті [2] було описано механізм комп'ютерного моделювання сигналу детектора з випадковими величинами амплітуд імпульсів і, відповідно, випадковим амплітудним спектром. Приклад синтезованого імпульсного сигналу зображено на рисунку 1.2. Проте більш актуальною є задача моделювання випадкової за часом послідовності сигналів згідно із наперед визначеним законом розподілу амплітуд, що є характерним для певного реального джерела випромінювання. Така модель буде краще відповідати цифровим даним, які отримуються на реальних експериментальних установках. Окрім того, це дасть можливість проведення чисельних експериментів з деякими ідеалізованими функціями розподілу амплітуд для більш детального та глибинного дослідження методів комп'ютерної обробки даних.

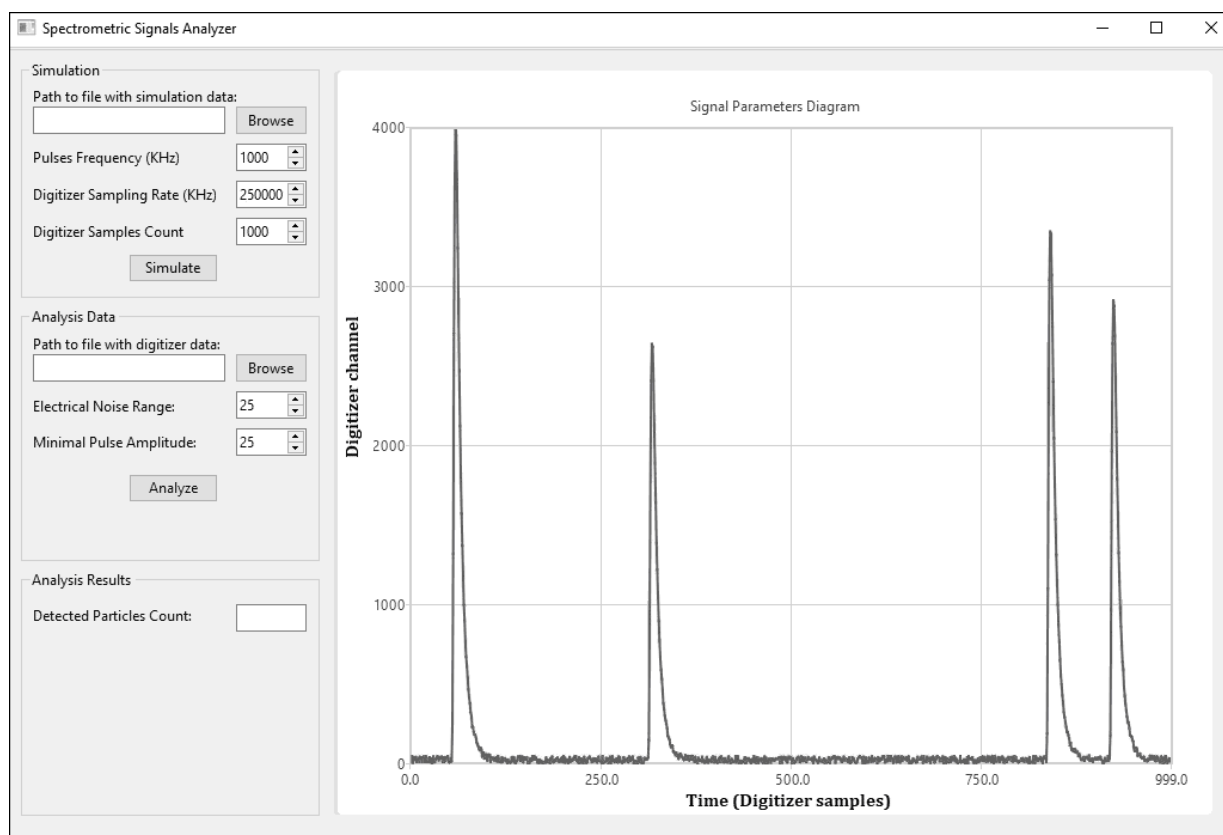


Рис. 1.2 Форма імпульсних сигналів, отриманих за допомогою комп'ютерного моделювання

Метою даного дослідження є розробка комп'ютерних моделей та алгоритмів генерації цифрових спектрометричних сигналів із заданими параметрами та дослідження можливості їх використання для оцінки ефективності математичних та алгоритмічних методів розпізнавання та аналізу цих сигналів.

2 Програмні засоби. Підготовка даних для моделювання згідно заданого шаблону

В рамках дослідження розробляється додаток для комп'ютерного моделювання (симуляції) даних [3], які за форматом відповідають вихідним даним digitizer-a, що отримуються під час проведення експериментів. Програма надає можливість симулювати наближений до реального сигнал з попередньо вказаним законом розподілу амплітуд імпульсів або завантажити дані, отримані експериментально за допомогою digitizer-a. Додаток також дозволяє аналізувати ці дані з метою розпізнавання реальних або промодельованих подій, використовуючи різні алгоритмічні підходи, а також візуалізувати отримані результати у вигляді числових параметрів, часових діаграм сигналів та гістограм спектрів, побудованих на основі проведеного аналізу.

Додаток розробляється на мові програмування C++ [4] з використанням бібліотеки QT [5]. Дана бібліотека дозволяє створювати кросплатформне програмне забезпечення і надає можливість компіляції та запуску додатку під Unix-подібними операційними системами або операційною системою Windows.

Для симуляції даних, що наближені до реальних експериментів, програма передбачає можливість завантаження файлів-шаблонів, записаних раніше за допомогою спектрометричної апаратури. Вони являють собою табличні функції розподілу енергій (амплітуд імпульсів) і є чисельним представленням тих чи інших енергетичних спектрів. З цією метою за необхідності можна також застосовувати і спеціально створені (ідеалізовані) функції розподілу. Під час створення додатку у якості шаблонів використовувалися файли спектрів, отримані за допомогою 12-розрядного аналого-цифрового перетворювача (АЦП), що входить до складу гамма-спектрометра з аналоговим каналом обробки спектрометричного сигналу. На рисунку 2.1 можна побачити спектр випромінювання ^{137}Cs з домішками Pb, який побудований на основі завантажених в програму експериментальних даних. На осі X виведені номери каналів АЦП (від 0 до 4095), а вісь Y відображає кількість зареєстрованих в цих каналах імпульсів з відповідною амплітудою. Програма також підраховує і виводить загальну кількість зареєстрованих під час експерименту імпульсних сигналів. Наприклад, для завантаженого файлу це значення дорівнює 2 236 424 250. Наступним кроком роботи додатку є комп'ютерне моделювання сигналу детектора, який міститиме в собі вказану кількість імпульсів або певну їх частину (50%, 10%, тощо) з випадковим розподілом у часі та розподілом амплітуд, що відповідає саме цьому завантаженому спектру.

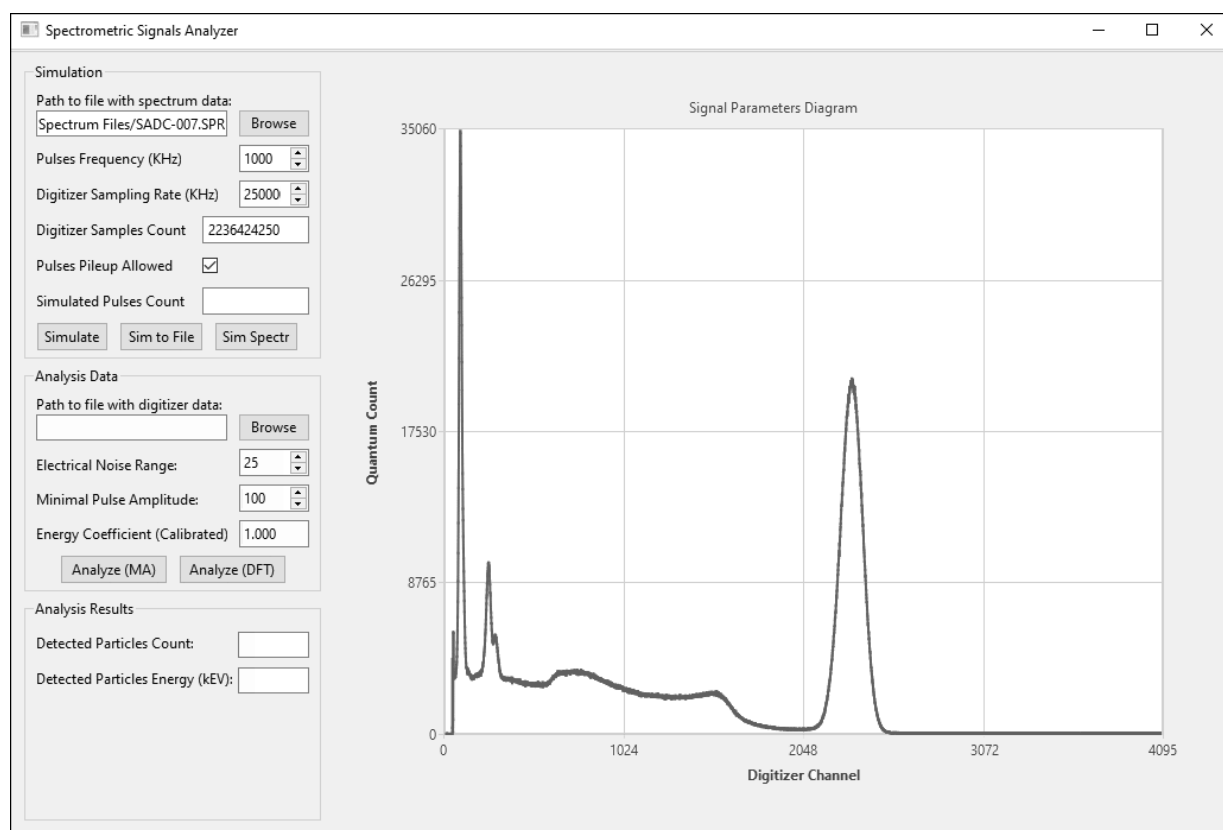


Рис. 2.1 Візуалізація даних завантаженого файлу спектру-шаблону

В інтерфейсі комп'ютерної програми для моделювання окремих імпульсів скінтіляційного детектора є можливість вказати наступні налаштування чисельного експерименту:

- інтенсивність генерації імпульсів — середня кількість імпульсів за секунду (Average pulses count per sec), цей параметр ще називають рівнем завантаження детектора;
- тривалість експерименту, що моделюється, в секундах (Experiment duration);
- рівень електричного шуму, що накладається на сигнал (Electrical Noise Range).

Загальна кількість імпульсів L , які мають бути змодельовані, обчислюється за формулою 2.1:

$$L = APC \times ED, \quad (2.1)$$

де APC – середня кількість імпульсів за секунду, ED – тривалість експерименту в секундах.

Повністю змодельована форма сигналу реєстрації квантів гамма-випромінювання у дискретному вигляді може бути представлена формулою 2.2 [6]:

$$s_i = z_i + n_i + \sum_{j=0}^L A_j p(i - t_j), \quad (2.2)$$

де i – порядковий номер дискретного кадру з digitizer, s – значення сигналу, z – константа або дуже повільні зміни в часі порівняно до компоненти ширини імпульсу сигналу; n – компонента шуму, що накладається на сигнал, L – число зареєстрованих імпульсів, A_j та t_j є амплітудою та часом реєстрації імпульсу j , $p(t)$ – форма імпульсу, що згенерована одним зареєстрованим квантом (більш детально описана в статтях [6, 7]).

Для того, щоб змодельувати імпульсні сигнали згідно з потрібним законом розподілу амплітуд, значення амплітуд A_j мають корелюватися із завантаженим спектром-шаблоном. У наступних розділах статті більш детально розглядаються два підходи моделювання, які були реалізовані в ході дослідження і дозволяють досягти цієї мети.

3 Моделювання з використанням відрізків ймовірностей розподілу амплітуд

Перший підхід для імітаційного моделювання згідно заданого шаблону базується на статистичних методах та використанні відрізків ймовірностей розподілу амплітуд імпульсів модельованого сигналу. Спочатку формується масив відрізків ймовірностей потрапляння амплітуди імпульсу в певний діапазон згідно завантаженого файлу-шаблону. Оскільки такий файл містить фіксовану кількість N каналів та кількість зареєстрованих електронікою імпульсів в кожному каналі, то взявши за основу весь відрізок ймовірності шириною від 0 до 1, ми розбиваємо його на N відрізків, що відповідають ймовірності потрапляння значення амплітуди імпульсу в кожен канал відповідно. Ширина відрізка ймовірності для конкретного каналу обчислюється за формулою 3.1:

$$wp_i = C_i / TC \quad (3.1)$$

де wp_i – ширина відрізка ймовірності для значення амплітуди імпульсу A_j , що відповідає i -му каналу; C_i – кількість імпульсів зареєстрованих на i -му каналі в шаблоні; TC – загальна кількість зареєстрованих імпульсів у завантаженому файлі-шаблоні на всіх каналах.

В програмному алгоритмі відрізки ймовірностей зберігаються у відсортованому масиві як пари чисел (початкове, кінцеве значення ймовірності). Також була реалізована функція, яка ефективно виконує бінарний пошук [8] в даному масиві відрізка ймовірності, в який потрапляє згенероване випадкове число R . Далі в алгоритмі моделювання ми створюємо масив із L імпульсів (кількість обчислена згідно формули 2.1) з поки невизначеними амплітудами, проте час появи кожного імпульсу t_j встановлюється випадковим чином в діапазоні часу експерименту за допомогою генератора випадкових чисел з лінійним розподілом [3, 9]. Відсортуємо даний масив за часом появи імпульсів та починаємо моделювання цифрового сигналу використовуючи формулу 2.2, при цьому амплітуда A_j кожного імпульсу встановлюється таким чином, що генерується випадкове число R в діапазоні від 0 до 1 за допомогою генератора випадкових чисел з лінійним розподілом та залежно від того, у відрізок ймовірності якого каналу wp_i потрапляє це випадкове число R , береться значення амплітуди імпульсу A_j , яке відповідає цьому каналу (рис. 3.1). Оскільки час появи імпульсу генерується випадковим чином, то імпульси можуть накладатися один на одного, формуючи так званий pile-up ефект.

Таким чином, чим більше було зареєстровано імпульсів на певному каналі у завантаженому шаблоні, тим ширше буде діапазон ймовірності потрапляння в цей канал, і тим більше змодельованих імпульсів матимуть амплітуду, яка відповідає саме цьому каналу. В процесі моделювання і генерації випадкових чисел розподіл амплітуд змодельованих імпульсів буде наближатися до завантаженого шаблонного розподілу.

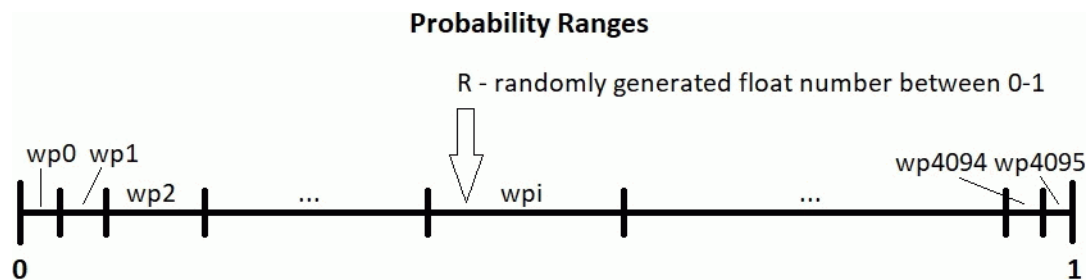


Рис. 3.1 Схематичне зображення відрізків ймовірностей вибору значень амплітуд модельованих імпульсів згідно завантаженого шаблону

На рисунку 3.2 зображено результат комп'ютерного моделювання цим методом зі встановленим часом експерименту, що відповідає генерації близько 50% загальної кількості імпульсів, передбачених файлом-шаблоном. Діаграма D1 візуалізує завантажений шаблонний розподіл, а також розподіл амплітуд змодельованих імпульсів. Як бачимо, крива розподілу амплітуд синтезованого сигналу відтворює форму шаблону. Проте ця лінія проходить наполовину нижче, оскільки загальна кількість імпульсів практично зменшена вдвічі.

Діаграма D2 візуалізує лише частину часової діаграми синтезованого сигналу, так як загальна кількість згенерованих імпульсів є дуже великою і становить більше одного мільярда.

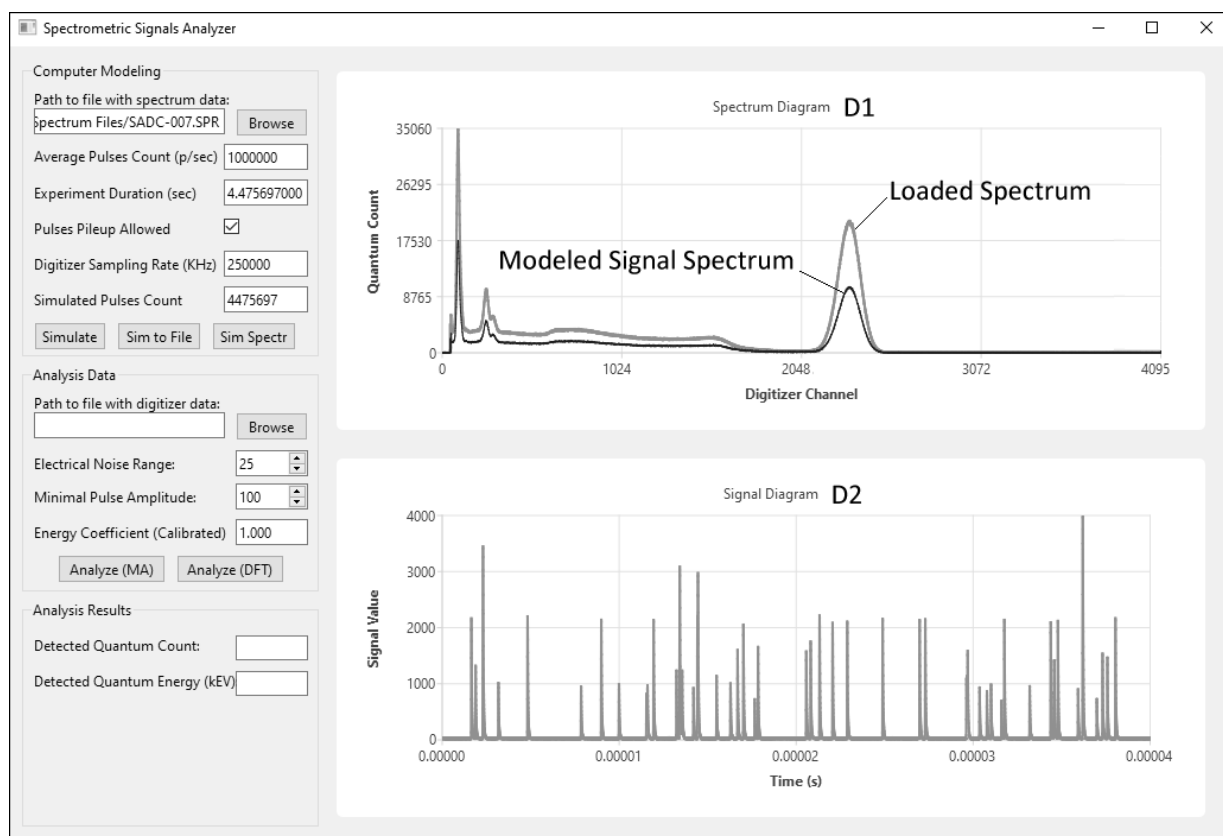


Рис. 3.2 Результат комп'ютерного моделювання 50% імпульсів алгоритмом з використанням відрізків ймовірностей згідно файлу-шаблону з розподілом як у реального джерела випромінювання

Також для додаткового дослідження цього підходу було проаналізовано комп'ютерне моделювання згідно штучно створеного лінійного розподілу. Тобто такого випадку розподілу, коли на кожному каналі є однакова кількість зареєстрованих імпульсів і такий завантажений файл-шаблон на діаграмі являє собою рівну горизонтальну лінію. Був підготовлений спеціальний файл з однаковою кількістю зареєстрованих імпульсів на кожному з N каналів рівною 1000. Далі цей файл був завантажений в програму і також був запущений процес моделювання з встановленим часом експерименту, щоб змоделювати 50% від загальної кількості

імпульсів у завантаженому шаблоні. Результати моделювання згідно лінійного розподілу відображені на рисунку 3.3. На діаграмі D1 цього рисунку можна побачити, що розподіл амплітуд змодельованих імпульсів не являє собою рівну горизонтальну лінію, а є наближений до неї в середньому, проте є певні відхилення. Це пояснюється тим, що моделювання амплітуд здійснюється випадковим чином за допомогою генератора випадкових чисел і може мати статистичні відхилення. При збільшенні часу експерименту і, відповідно, кількості імпульсів, що моделюються, розподіл їх амплітуд буде наближатися до лінійного. Тобто, в цілому описаний алгоритм дозволяє моделювати хід реального експерименту. В кожний момент часу розподіл амплітуд імпульсів змодельованого сигналу буде в певній мірі відтворювати завантажений шаблон, а зі збільшенням кількості змодельованих імпульсів (та часу експерименту) — все більше наближатися до завантаженого спектру. Проте для досягнення, наприклад, повністю лінійного розподілу амплітуд краще використовувати підхід, описаний у наступному розділі.

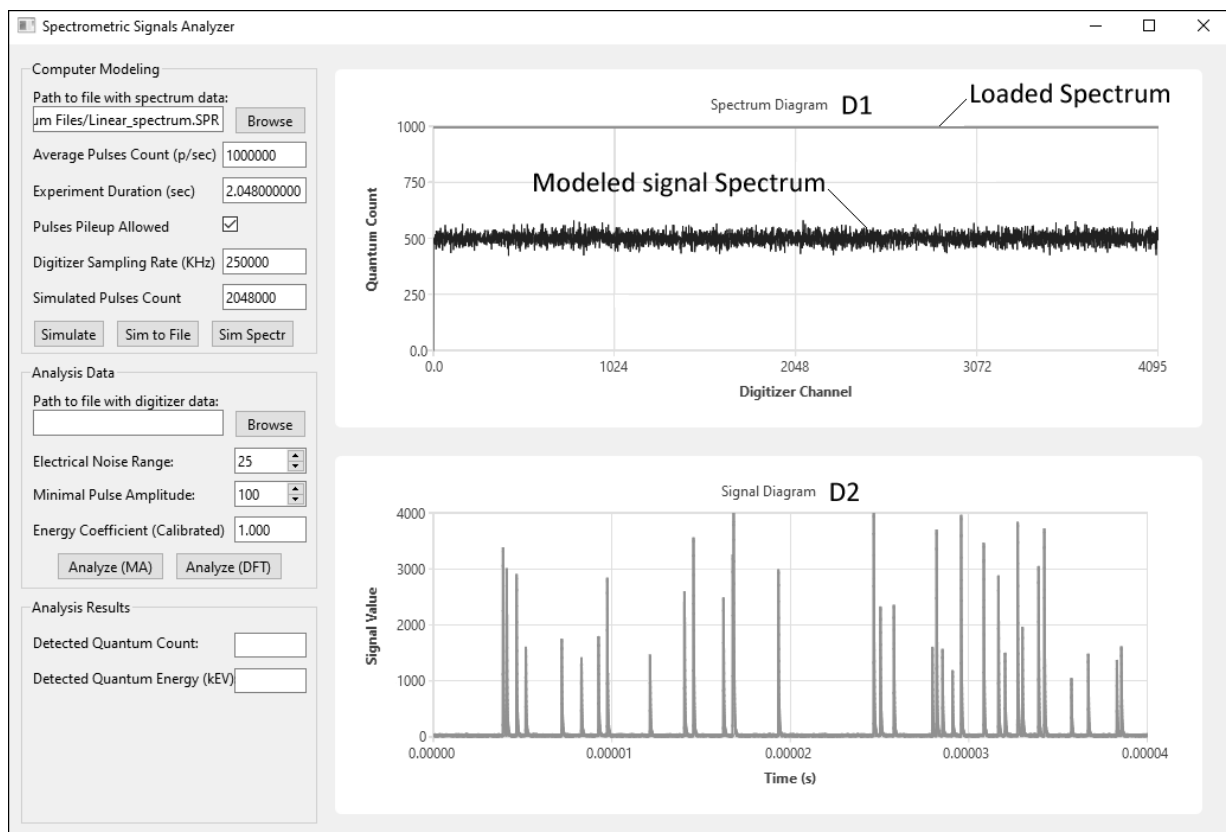


Рис. 3.3 Результат комп'ютерного моделювання 50% імпульсів алгоритмом з використанням відрізків ймовірностей згідно шаблону з лінійним розподілом

4 Моделювання на основі детермінованих кінцевих значень розподілу амплітуд

Даний підхід комп'ютерного моделювання базується на тому, що у завантаженому шаблоні нам відома кількість зареєстрованих імпульсів в кожному з N каналів та загальна кількість імпульсів у всіх каналах. Виставляючи час експерименту та моделюючи певну кількість імпульсів L , що вказана у відсотках від загальної кількості (100%, 50%, 10%, тощо), ми можемо у відповідності із завантаженим шаблоном відразу вирахувати кінцеву кількість змодельованих імпульсів, що мають мати амплітуди A_j за формулою 4.1:

$$CA_j = (L / TC) \times C_j \quad (4.1)$$

де CA_j – кількість імпульсів з амплітудою A_j що відповідає каналу j ; L - загальна кількість імпульсів, що має бути змодельована (обчислюється за формулою 2.1); TC – загальна кількість зареєстрованих імпульсів у завантаженому файлі-шаблоні на всіх каналах; C_j – кількість зареєстрованих імпульсів на каналі j у завантаженому шаблоні.

Враховуючи це, ми можемо в алгоритмі програми попередньо сформувати масив із N елементів, кожен із яких міститиме кількість імпульсів CA_j , що у підсумку мають бути змодельовані, та їх амплітуди A_j . Такий масив для 4096 каналів схематично зображений на рисунку 4.1.

Channel number:	0	1	2	...	...	4094	4095
Modeled quantum pulses count:	CA_0	CA_1	CA_2	...	...	CA_{4094}	CA_{4095}
Amplitude that corresponds to channel:	A_0	A_1	A_2	...	...	A_{4094}	A_{4095}

Рис. 4.1 Сформований масив кінцевого розподілу амплітуд імпульсів модельованого сигналу

Далі в алгоритмі моделювання ми в циклі беремо кожен елемент масиву і формуємо задану кількість імпульсів сигналу CA_j з відповідною амплітудою, проте час появи кожного імпульсу t_j визначається за допомогою генератора випадкових чисел з лінійним розподілом в діапазоні всього часу експерименту. Відсортовуємо імпульси за часом появи і моделюємо цифровий сигнал згідно формули 2.2. Таким чином, наприкінці процесу моделювання ми отримуємо образ сигналу, в якому розподіл амплітуд імпульсів повністю відповідає файлу-шаблону. Слід зауважити, що цей підхід дає необхідний результат, лише коли експеримент моделюється від початку і до кінця. Саме під час моделювання розподіл амплітуд імпульсів буде сильно відрізнятися від завантаженого спектру-шаблону на відміну від підходу, описаного у розділі 3, коли в будь який момент часу форма спектру змодельованого сигналу в цілому відповідає шаблону.

На діаграмі D1 рисунку 4.2 показано результуючий спектр сигналу, отриманого з використанням другого методу при генерації 50% імпульсів, передбачених шаблоном з лінійним розподілом амплітуд.

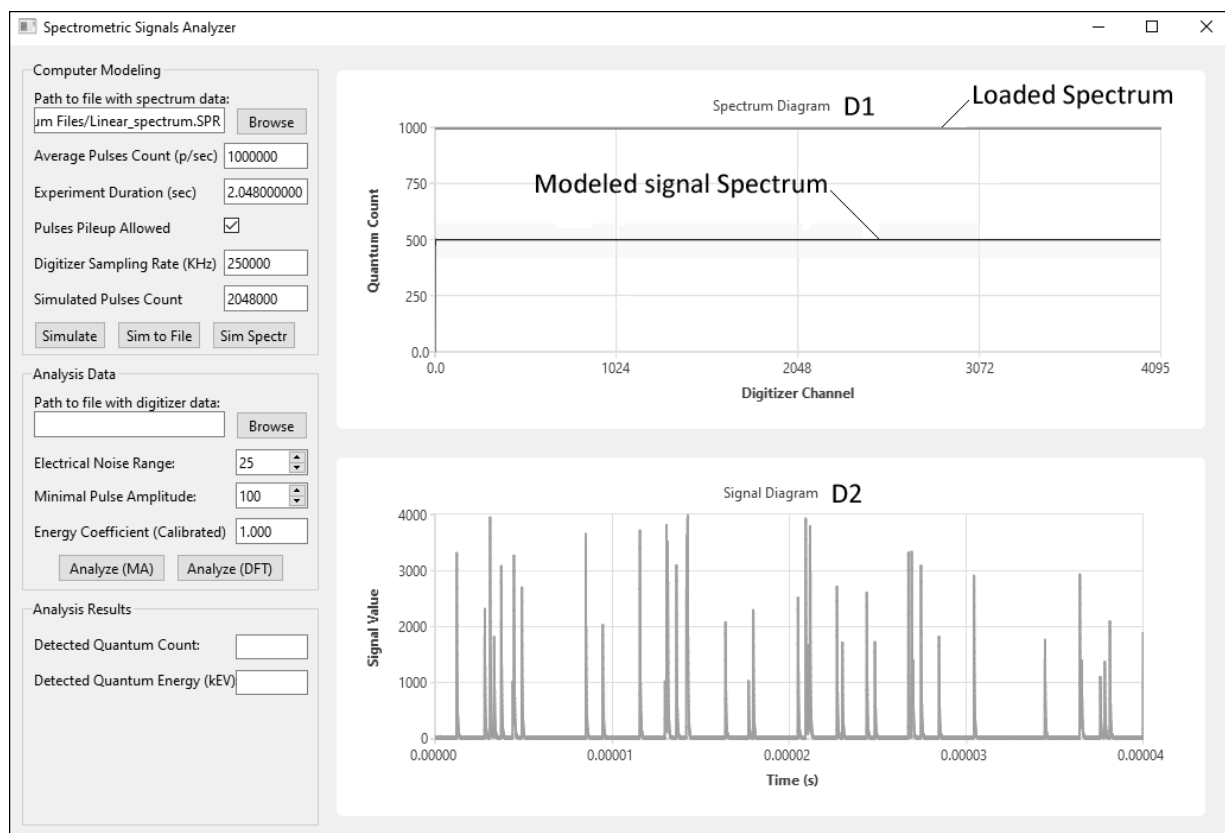


Рис. 4.2 Результат моделювання 50% імпульсів другим методом згідно шаблону з лінійним розподілом амплітуд

Таким чином, даний підхід моделювання у підсумку не містить статистичних відхилень розподілу і має краще підійти для перевірки роботи комп'ютерних методів аналізу, розпізнавання та вимірювання параметрів спектрометричних сигналів.

5 Висновки та напрямки для подальших досліджень

У даній статті було описано математичні моделі та два різні алгоритми для комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів згідно заданого шаблону, які були реалізовані в ході цього дослідження.

Перший підхід базується на використанні статистичних методів, в основі яких формування необхідного розподілу амплітуд здійснюється шляхом управління ймовірністю виникнення імпульсів потрібної амплітуди. Для цього в алгоритмічній моделі генератора випадкових подій застосовуються відрізки ймовірностей, довжина яких пропорційна кількості імпульсів, що зафіксовані в тому чи іншому каналі спектру-шаблону. Цей підхід дозволяє послідовно моделювати весь хід експерименту, поступово формуючи у реальному часі спектральний сигнал із вказаним законом розподілу амплітуд. Це наближає чисельний експеримент до реального із застосуванням того чи іншого джерела випромінювання. При зупинці процесу моделювання в довільний момент часу отримані вихідні дані будуть в певній мірі відповідати завантаженому файлу-шаблону. Випадковий розподіл амплітуд в межах одного каналу може бути реалізований шляхом комп'ютерної генерації та додавання шумового сигналу з певними параметрами.

Проте при дослідженні даного методу синтезу спектрометричного сигналу з використанням штучно створеного шаблону з лінійним спектром, було виявлено певні закономірні статистичні відхилення від лінійного розподілу. Вони зумовлені випадковим характером процесу моделювання. Це може дещо ускладнити в деяких випадках використання цього методу для оцінки достовірності розпізнавання імпульсів у складі спектрометричного сигналу при використанні тих чи інших методів комп'ютерної обробки та аналізу.

Другий метод моделювання базується на використанні детермінованих кінцевих значень розподілу амплітуд імпульсів. Такий підхід в підсумку дозволив змоделювати сигнал згідно завантаженого файлу-шаблону з даними, що в точності відповідають спектру реального джерела випромінювання без будь-яких статистичних відхилень. Особливістю даного способу моделювання є те, що правильний розподіл ми отримуємо лише в кінці процесу моделювання, а в ході процесу розподіл амплітуд імпульсів буде сильно відрізнятися від заданого (на відміну від першого підходу).

В подальшому дослідженні планується використати описані моделі та алгоритми комп'ютерного моделювання для генерації вхідних даних, які потрібні для перевірки ефективності роботи існуючих комп'ютерних алгоритмів і методів розпізнавання, аналізу та вимірювання параметрів спектрометричних сигналів, а також для створення нових, більш ефективних методів.

Також можливим є подальше вдосконалення як самих розроблених комп'ютерних моделей для синтезу цифрових образів спектрометричних сигналів, так і методів візуалізації графічної інформації, отриманої з їх допомогою.

ЛІТЕРАТУРА

1. W. Wolszczak, P. Dorenbos. Time-resolved gamma spectroscopy of single events. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment. 2018. Volume 886. P. 30–55. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900217315036> (дата звернення: 28.12.2023)
2. Рева С., Циблієв Д. Комп'ютерні методи розпізнавання та аналізу параметрів рентгенівського і гамма-випромінювання. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління». 2022. Том 55, 38-48. URL: <https://periodicals.karazin.ua/mia/article/view/22593> (дата звернення: 28.12.2023)
3. Averill M. Law, W. David Kelton. Simulation Modeling and Analysis. Third edition. McGraw-Hill. 2000. 760 pages.

4. Bjarne Stroustrup. The C++ Programming Language. Fourth Edition. Addison-Wesley. 2013. 1346 pages.
5. QT Framework Official Website. URL: <https://www.qt.io/product/framework> (дата звернення: 28.12.2023)
6. E.M. Khilkevitch, A.E. Shevelev, I.N. Chugunov, M.V. Iliasova, D.N. Doinikov, D.B. Gin, V.O. Naidenov, I.A. Polunovsky, Advanced algorithms for signal processing scintillation gamma ray detectors at high counting rates. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment. 2020. Volume 997. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900220307051> (дата звернення: 28.12.2023)
7. A.E. Shevelev, et al., High performance gamma-ray spectrometer for runaway electron studies on the FT-2 tokamak, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment. 2016. Volume 830. P. 102–108. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900216304685> (дата звернення: 28.12.2023)
8. Adam Drozdek. Data Structures and Algorithms in C++. Second Edition. Brooks/Cole. 2001. 650 pages.
9. Стеценко І.В. Моделювання систем: навчальний посібник. М-во освіти і науки України, Черкаський державний технологічний університет. Черкаси. 2010. 399 с.

REFERENCES

1. W. Wolszczak, P. Dorenbos. Time-resolved gamma spectroscopy of single events. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment. Volume 886. P. 30–55. 2018. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900217315036> (Last accessed: 28.12.2023)
2. Reva, S., & Tsyblyiyev, D. Computer methods of recognition and analysis of X-ray and gamma radiation parameters. Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University, Series «Mathematical Modeling. Information Technology. Automated Control Systems». 2022. Volume 55. P. 38-48. <https://periodicals.karazin.ua/mia/article/view/22593> (Last accessed: 28.12.2023) [in Ukrainian]
3. Averill M. Law, W. David Kelton. Simulation Modeling and Analysis. Third edition. McGraw-Hill. 760 pages. 2000.
4. Bjarne Stroustrup. The C++ Programming Language. Fourth Edition. Addison-Wesley. 2013. 1346 pages.
5. QT Framework Official Website. URL: <https://www.qt.io/product/framework> (Last accessed: 28.12.2023)
6. E.M. Khilkevitch, A.E. Shevelev, I.N. Chugunov, M.V. Iliasova, D.N. Doinikov, D.B. Gin, V.O. Naidenov, I.A. Polunovsky, Advanced algorithms for signal processing scintillation gamma ray detectors at high counting rates. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment. Volume 997. 2020. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900220307051> (Last accessed: 28.12.2023)
7. A.E. Shevelev, et al., High performance gamma-ray spectrometer for runaway electron studies on the FT-2 tokamak, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment. Volume 830. P. 102–108. 2016. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900216304685> (Last accessed: 25.12.2022)
8. Adam Drozdek. Data Structures and Algorithms in C++. Second Edition. Brooks/Cole. 2001. 650 pages.
9. I. V. Stetsenko. *Systems modeling: textbook*. Cherkasy: CSTU, 2010, 399 p. [in Ukrainian]

Mathematical models and algorithms of computer modeling of spectrometric signals

Reva Sergiy

Candidate of Technical Science, Associate Professor of the Department of Electronics and Control Systems; Faculty of Computer Science; V. N. Karazin National University, Svobody Sq 6, Kharkiv, Ukraine, 61022
e-mail: iec-lab@karazin.ua;
<https://orcid.org/0000-0002-2615-9226>

Tsybliyev Denys

PhD student V.N. Karazin National University, Svobody Sq 6, Kharkiv, Ukraine, 61022
e-mail: dtsibliyev@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0008-4373-8773>

The technology of computer processing and analysis of data obtained in the process of measuring the energy spectra of X-ray and gamma radiation is gradually replacing the classic analog measurement methods. However, there is a problem of objective evaluation of the effectiveness of different computer analysis methods. Because obtaining reference data is not possible due to the randomness of processes during real experiments. A possible way to solve this problem is computer modeling of an artificial spectrometric signal with known parameters. This will provide an opportunity to determine the probability of detecting detector signals by different methods of mathematical and logical processing.

The purpose of this work is to develop mathematical models and algorithms for computer modeling of signals with known parameters and investigate the possibility of their use to evaluate the effectiveness of computer methods of recognition and analysis of these signals.

The article considers two different **methods** of synthesizing a digital image of a spectrometric signal with the required distribution of pulse amplitudes based on a preloaded template - a tabular function of amplitude distribution.

The first approach is based on the use of statistical methods and probability ranges for determining pulse amplitudes in the process of digital signal image creation. It allows you to simulate the process of the experiment, gradually forming a signal in which the distribution of amplitudes is always close to the given one. The basis of the second computer modeling approach is the use of deterministic final values of pulse amplitudes distribution in the generated signal. This approach makes it possible to obtain an accurate digital image of the signal with a random distribution of pulses in time, which does not contain statistical deviations from the template. But unlike the first, this method gives the required result only after the end of the entire session of computer modeling of the experiment.

The article presents some modeling **results** obtained during numerical experiments based on a computer program developed as a part of the research. When modeling by the first method using an experimentally obtained spectrum or an artificially created idealized template, it is shown that the resulting spectrum contains statistical deviations. But the amplitude distribution function generally corresponds to the tabular function specified in the template.

The described approaches and modeling algorithms can be **used** to create digital images of signals with fully defined input data to further test the effectiveness of computer-based methods of spectrometric signal parameters recognition and analysis.

Keywords: *computer modeling, simulation modeling, computer analysis methods, mathematical models, spectrometric signals.*

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

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

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

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

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

Email: journal-mia@karazin.ua

Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University

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

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

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

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

Наукове видання

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

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

Випуск 58

Збірник наукових праць

Українською та англійською мовами

Комп'ютерне верстання О. О. Афанасьєва

Підписано до друку 30.06.2023 р.
Формат 60x84/8. Папір офсетний. Друк цифровий.
Ум. друк. арк. – 6.17.
Обл.– вид. арк. – 7.71.
Наклад 50 пр. Зам. № 40/2023
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