ISSN 2219-9365
DOI: 10.31891/2219-9365

Міжнародний науково-технічний журнал

ВИМІРЮВАЛЬНА ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ

2022, № 2

International scientific-technical journal

MEASURING AND COMPUTING DEVICES IN TECHNOLOGICAL PROCESSES

2022, Issue 2

Хмельницький 2022
Khmelnytskyi 2022

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ
ВИМІРЮВАЛЬНА ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ

Затверджений як фахове видання (перереєстрація), група «Б»
Наказ МОН 28.12.2019 №1643

Засновано в травні 1997 р. ***Виходить 4 рази на рік***

Хмельницький, 2022, № 2 (70)

Засновник і видавець: **Хмельницький національний університет (до 2005 р. — Технологічний університет Поділля, м. Хмельницький)**

Наукова бібліотека України ім. В.І. Вернадського http://nbuv.gov.ua/j-tit/votte

Журнал включено до наукометричних баз:

Index Copernicus http://jml2012.indexcopernicus.com/,p24781565,3.html
Google Schoolar http://scholar.google.com.ua/citations?user=nwN_nusAAAAJ&hl=uk
CrossRef http://doi.org/10.31891/2219-9365

Головний редактор **Мартинюк В. В.**, д. т. н., професор, завідувач кафедри автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій і телекомунікацій Хмельницького національного університету

Заступник головного редактора **Бойко Ю. М.**, д. т. н., професор кафедри телекомунікацій та радіотехніки, начальник науково-дослідної частини Хмельницького національного університету

Відповідальний секретар **Кравчик Ю. В.**, к. е. н., старший викладач кафедри економіки, менеджменту та адміністрування Хмельницького національного університету

Ч л е н и р е д к о л е г і ї

Бармак О. В., д.т.н., **Бедратюк Л. П.,** д.фіз.-мат.н., **Бубулис Алгимантас,** д.т.н. (Литва)**, Василевський О. М.**, д.т.н., **Горященко К. Л.,** к.т.н., **Калачинський Томаш**, PhD (Польща), **Косенков В. Д.,** к.т.н., **Кулаков П. І.**, д.т.н., **Кухарчук В. В.**, д.т.н., **Кучерук В. Ю.**, д.т.н., **Лампасі Алессандро**, PhD, (Італія), **Лукасевіч Марцін**, PhD, (Польща), **Мрозинський Адам**, PhD, (Польща), **Мусяль Януш**, PhD, (Польща), **Ортігуейра Мануель Дуарте**, PhD, (Португалія), **Походило Є. В.**, д.т.н., **Психалінос Костас**, PhD, (Греція), **Савенко О. С.**, д.т.н., **Семенко А. І.,** д.т.н., **Сурду М. М.**, д.т.н., **Шарпан О. Б.**, д.т.н.

Технічний редактор Кравчик Ю. В., к. е. н.

Рекомендовано до друку рішенням Вченої ради Хмельницького національного університету, протокол № 18 від 30.06.2022

Адреса редакції: **Україна, 29016,**
м. Хмельницький, вул. Інститутська, 11,
Хмельницький національний університет,
Редакція журналу "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах"
☎ **067-347-74-57**
e-mail: **vottp@khmnu.edu.ua**
web: **http://vottp.khmnu.edu.ua**

Зареєстровано Міністерством України у справах преси та інформації.
Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації
Серія КВ № 24923-14863 ПР від 12 липня 2021 року (перереєстрація)

© Хмельницький національний університет, 2022
© Редакція журналу «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах», 2022

ISSN 2219-9365

ЗМІСТ

ОЛЬГА ТАРАСЮК, АНАТОЛІЙ ГОРБЕНКО, АНДРІЙ КАРПЕНКО
РОЗВИТОК АРХІТЕКТУР, ТЕОРЕМ ТА МОДЕЛЕЙ ВЛАСТИВОСТЕЙ РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМ ЗБЕРІГАННЯ ІНФОРМАЦІЇ 5

OLGA TARASYUK, ANATOLIY GORBENKO, ANDRII KARPENKO
MODELING OF THE DECISION-SUPPORTING PROCESS ON THE POSSIBILITY OF CONCLUDING THE CONTRACT ON THE THERAPEUTIC SERVICES PROVISION

АНДРІЙ МЕЛЬНИК, МИКОЛА ДИВАК, ВОЛОДИМИР МАНЖУЛА
МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ КОНЦЕНТРАЦІЙ ШКІДЛИВИХ ВИКИДІВ АВТОТРАНСПОРТУ НА ОСНОВІ ПОЄДНАННЯ МЕТОДІВ ІНТЕРВАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ТА ОНТОЛОГІЧНОГО ПІДХОДУ 14

ANDRIY MELNYK, MYKOLA DYVAK, VOLODYMYR MANZHULA
MODELING OF DYNAMICS OF CONCENTRATIONS OF HARMFUL EMISSIONS OF MOTOR TRANSPORT ON THE BASIS OF A COMBINATION OF METHODS OF THE INTERVAL ANALYSIS AND THE ONTOLOGICAL APPROACH

ЄЛИЗАВЕТА ГНАТЧУК
ПРАВИЛА ТА МЕТОД ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО МОЖЛИВОСТІ СУРОГАТНОГО МАТЕРИНСТВА НА ОСНОВІ ЦИВІЛЬНОГО ПРАВА 24

YELYZAVETA HNATCHUK
RULES AND METHOD OF SUPPORTING THE DECISION-MAKING ABOUT THE POSSIBILITY OF SURROGATE MOTHERHOOD BASED ON THE CIVIL LAW

ВІТАЛІЙ ОСЯДЛИЙ, АРТЕМ МОСКАЛЕНКО
СИСТЕМА КЕРУВАННЯ МЕДИЧНИМИ ДАНИМИ НА ОСНОВІ БЛОКЧЕЙН-ТЕХНОЛОГІЙ 29

VITALII OSYADLYI, ARTEM MOSKALENKO
SYSTEM OF MEDICAL DATA MANAGEMENT BASED ON BLOCKCHAIN TECHNOLOGIES

ІГОР КОВТУН, АНДРІЙ ГОРОШКО, СВІТЛАНА ПЕТРАЩУК
НЕРУЙНІВНА ДІАГНОСТИКА МІЦНОСТІ НЕРОЗ'ЄМНИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ 39

IGOR KOVTUN, A. GOROSHKO, SVITLANA PETRASHCHUK
NON-DESTRUCTIVE STRENGTH DIAGNOSTICS OF NON-DETACHABLE STRUCTURES IN ELECTRONIC PACKAGES

ОЛЕКСІЙ ЗАВГОРОДНІЙ, ДМИТРО ЛЕВКІН, ОКСАНА ШТОНДА
МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ 48

OLEXIY ZAVGORODNIY, DMYTRO LEVKIN, OKSANA SHTONDA
METHODS OF TECHNICAL SYSTEMS PARAMETERS' CALCULATION

СЕРГІЙ ГОРЯЩЕНКО, КОСТЯНТИН ГОРЯЩЕНКО,
ГЕОРГІЙ ДРАПАК, ВАСИЛЬ НЕЗДОРОВІН
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДИНАМІКИ ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧОЇ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ 52

SERHIY HORIASHCHENKO, KOSTYANTYN HORIASHCHENKO,
GEORGII DRAPAK, VASYL NEZDOROVIN
MATHEMATICAL MODEL OF THE DYNAMICS OF A HEAT STORAGE SYSTEM

ISSN 2219-9365

ВОЛОДИМИР ДЖУЛІЙ, МАРІЯ КАПУСТЯН,
ЮРІЙ КЛЬОЦ, ВІКТОРІЯ ОРЛЕНКО, ВІКТОР ЧЕШУН
МОДЕЛЬ СТЕГАНОСИСТЕМИ НА ОСНОВІ ПРОСТОРОВИХ ТА ФОРМАТНИХ ПРИНЦИПІВ ПРИХОВУВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ 58

VOLODYMYR DZHULIY, MARIIA KAPUSTIAN,
YURII KLOTS, VIKTORIIA ORLENKO, VIKTOR CHESHUN
MODEL OF STEGANOGRAPHIC SYSTEM BASED ON SPATIAL AND FORMAT PRINCIPLES OF INFORMATION HIDING

ВОЛОДИМИР КУЧЕРУК, МИХАЙЛО ГЛУШКО
ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ РЕКОМЕНДАЦІЙНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ КВАЛІМЕТРИЧНИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ 65

VOLODYMYR KUCHERUK, MYKHAILO HLUSHKO
IMPROVING THE QUALITY OF RECOMMENDATION SYSTEMS BASED ON QUALIMETRIC MEASUREMENT METHODS

ОЛЕКСІЙ СТАХОВ
МЕТОДИ ПОБУДОВИ ВИСОКОПРОДУКТИВНИХ АЦП ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СТРУКТУРНОЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНОЇ НАДЛИШКОВОСТІ 73

OLEXIY STAKHOV
METHODS OF BUILDING HIGH-PERFORMANCE ADC USING STRUCTURAL AND INFORMATION REDUNDANCY

ГАННА ФІГАС
БАГАТОРОЗРЯДНИЙ ЦАП ІЗ ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ З ВИХОДОМ ПО СТРУМУ 80

GANNA FIGAS
METHODS OF BUILDING HIGH-PERFORMANCE ADC USING STRUCTURAL AND INFORMATION REDUNDANCY

https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-70-2-1
УДК 004.65

Ольга ТАРАСЮК
Одеський технологічний університет «ШАГ»
https://orcid.org/0000-0001-5991-8631
Анатолій ГОРБЕНКО
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»
Університет Лідс Беккет
https://orcid.org/0000-0001-6757-1797
Андрій КАРПЕНКО
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»
https://orcid.org/0000-0003-2789-1168

РОЗВИТОК АРХІТЕКТУР, ТЕОРЕМ ТА МОДЕЛЕЙ ВЛАСТИВОСТЕЙ РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМ ЗБЕРІГАННЯ ІНФОРМАЦІЇ

Бази даних пройшли певний шлях еволюції від архітектури мейнфреймів до глобально-розподілених нереляційних сховищ, що призначені для збереження величезних обсягів інформації та обслуговування мільйонів користувачів. У статті зазначено драйвери та передумови цього розвитку, а також розглянуто трансформацію моделей властивостей систем керування базами даних та теорем, що формалізують відносини між ними. Зокрема, розглянуто обумовленість переходу від моделі властивостей ACID до моделі BASE, яка пом'якшує вимоги до узгодженості даних, що є необхідним для забезпечення високої продуктивності розподілених баз даних з багатьма репліками. Крім того, надано стисле обґрунтування теорем CAP та PACELC, які встановлюють взаємовиключні відносини між доступністю, узгодженістю та швидкодією у реплікованих інформаційних системах та проаналізованоо їх обмеження. Зазначено проблеми сумісності моделей узгодженості, що використовуються різними нереляційними сховищами даних, та, в якості прикладу, детально розглянуто можливі налаштування узгодженості NoSQL баз даних Cassandra, MongoDB та Azure CosmosDB. Результати еволюції архітектур розподілених баз даних узагальнено за допомогою нотації GSN (Goal Structuring Notation). Також окреслено подальші напрямки наукових досліджень та шляхи подальшого розвитку глобально-розподілених інформаційних систем та сховищ даних.

Ключові слова: розподілені бази даних, моделі ACID та BASE, теореми CAP та PACELC, база даних Cassandra, Azure CosmosDB, MongoDB, нотація GSN.

Olga TARASYUK
Odessa Technological University STEP
Anatoliy GORBENKO
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Leeds Beckett University
Andrii KARPENKO
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"

MODELING OF THE DECISION-SUPPORTING PROCESS ON THE POSSIBILITY OF CONCLUDING THE CONTRACT ON THE THERAPEUTIC SERVICES PROVISION

Today, we live in the world of information technologies, which have penetrated into all possible spheres of human activity. Recent developments in database management systems have coincided with advances in parallel computing technologies. In view of this fact, a new class of data storage has appeared, namely globally distributed non-relational database management systems, and they are now widely used in Twitter, Facebook, Google and other modern distributed information systems to store and process huge volumes of data.

Databases have undergone a certain evolution from mainframe architecture to globally distributed non-relational repositories designed to store huge amounts of information and serve millions of users. The article indicates the drivers and prerequisites of this development, and also considers the transformation of models of properties of database management systems and theorems that formalize the relationship between them. In particular, the conditionality of the transition from the ACID property model to the BASE model is considered, which relaxes the requirements for data consistency, which is necessary to ensure the high performance of distributed databases with many replicas. In addition, a concise justification of the SAR and PACELC theorems, which establish mutually exclusive relationships between availability, consistency, and speed in replicated information systems, is provided, and their limitations are analyzed. The compatibility issues of the consistency models used by different non-relational data stores are noted, and, as an example, the possible consistency settings of the NoSQL databases Cassandra, MongoDB, and Azure CosmosDB are discussed in detail. The results of the evolution of distributed database architectures are summarized using the GSN (Goal Structuring Notation). Further directions of scientific research and ways of further developing globally distributed information systems and data repositories are also outlined.

Keywords: distributed databases, ACID and BASE models, CAP and PACELC theorems, Cassandra database, Azure CosmosBD, MongoDB, GSN notation.

Постановка проблеми у загальному вигляді
та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

На сьогоднішній день ми живемо у світі інформаційних технологій, які проникли у всі можливі сфери життєдіяльності людства. Нещодавній розвиток систем управління базами даних співпав з досягненнями у технологіях паралельного обчислення. З огляду на цей факт з'явився новий клас сховищ даних, а саме глобально-розподілені нереляційні системи управління базами даних [1], і саме вони зараз широко застосовуються у Twitter, Facebook, Google та інших сучасних розподілених інформаційних системах для збереження та обробки величезних обсягів даних.

Системи управління базами даних пройшли певний шлях еволюції від архітектури мейнфреймів до глобально-розподілених нереляційних сховищ даних [2]. Здебільшого ця еволюція була зумовлена появою нових вимог до збереження даних та забезпечення доступу до них, пов'язаних з ростом обсягів інформації, зростанням швидкості її надходження та необхідністю одночасного обслуговування величезної кількості гетерогенних споживачів інформації.

Еволюція теорем та моделей властивостей сховищ даних. Модель ACID

Вперше акронім ACID [3] був сформований у 1983 році А. Рейтером і Т. Хардером базуючись на дослідженнях Д. Грейа. Модель ACID (Atomicity, Consistency, Isolation, Durability) представляє собою набір властивостей, які повинна мати реляційна база даних для забезпечення достовірності даних, що зберігаються:

- Atomicity (атомарність) – властивість, яка гарантує, що кожна транзакція буде виконана в повному обсязі або не виконається взагалі, не допускаючи проміжного стану;
- Consistency (узгодженість) – властивість, яка гарантує, що кожна транзакція не порушує цілісність даних у ній;
- Isolation (ізольованість) – властивість, яка гарантує, що будь-яка операція читання або запису не буде змінена іншими операціями читання або запису;
- Durability (довговічність) – властивість, яка гарантує, що зміни внесені до бази даних, які були успішно завершені, збережені назавжди, навіть у разі відмови системи, наприклад при аварійному відключенні електроживлення.

Модель BASE

BASE (Basically Available, Soft state, Eventually Consistent) [4] є більш гнучкою моделлю, ніж ACID і забезпечує ряд переваг перед ACID-сумісними базами даних, які за своїм дизайном не є у певній мірі розподіленими системами і не можуть забезпечити ефективну роботу в умовах відмов каналів зв'язку. Проте, властивості BASE не надають жорстких гарантій щодо узгодженості даних на відміну від моделі ACID:

- Basically Available (переважно доступні дані) – дані, що зберігаються, залишаються переважно доступними навіть при наявності відмов каналів зв'язку або деяких вузлів бази даних (за рахунок використання реплікації), проте узгодженість інформації не гарантується; тобто існує імовірність того, що при читанні буде повернена застаріла версія даних, або результати операції запису не будуть збережені;
- Soft state (м'який стан) – властивість, яка говорить про те, що стан системи може змінюватися навіть при відсутності нових операцій читання/запису оскільки ще можуть продовжуватися фонові процеси оновлення даних для досягнення узгодженості; таким чином, існує лише певна ймовірність того, що система (дані) знаходиться у певному стані;
- Eventually Consistent (кінцева узгодженість) – зрештою система після деякого проміжку часу досягне бажаного рівня узгодженості, та усі репліки бази даних будуть мати актуальні дані.

Модель BASE надала поштовх для розвитку нереляційних баз даних NoSQL (Non SQL, Not only SQL) [1]. Властивості, передбачені цією моделлю, забезпечують високу масштабованість сховищ даних, велику продуктивність та швидкість виконання операцій читання та запису, простоту реалізації механізмів реплікації та створюють можливість для зберігання та аналізу дійсно великих даних, так званих Big Data [5].

Теорема CAP

Гіпотеза CAP (акронім утворений з англомовних іменувань властивостей розподілених інформаційних систем: Consistency, Availability, Partition tolerance) вперше була озвучена у 2000 році Е. Брюером [6]. Згодом у 2002 році С. Гілберт та Н. Лінч довели гіпотезу та трансформували її у теорему [7].

Теорема CAP стверджує, що для будь-якої розподіленої інформаційної системи неможливо одночасно забезпечити виконання більш ніж двох із зазначених властивостей, а саме:

- Consistency (узгодженість) – властивість, яка гарантує, що кожна операція читання повертає актуальні дані, а всі вузли-репліки завжди мають однаковий набір даних.
- Availability (доступність/готовність) – властивість, яка забезпечує отримання відповіді від бази даних на кожний запит, однак актуальність повернених даних не гарантується.
- Partition tolerance (стійкість до розподілення) – здатність системи продовжувати роботу та обробляти запити навіть у разі втрати або значної затримки повідомлень між вузлами-репліками або відмови деяких реплік.

У разі відмови комунікаційних каналів і втрати зв'язку між вузлами в розподілених реплікованих системах баз даних неможливо одночасно підтримувати як доступність так і узгодженість даних. Тобто або вся операція читання повинна бути скасована для збереження узгодженості, або система буде продовжувати підтримувати доступність, а отже, нехтуючи узгодженістю.

Таким чином теорема CAP зазначає розподіл між сховищами даних, що реалізують модель ACID, та тими, що побудовані за ідеологією BASE.

Теорема PACELC

Теорема PACELC була вперше описана та сформульована Д. Абаді у 2012 році [8]. Вона є подальшим розвитком теореми CAP і стверджує, що у разі розподілення (Partition) системи виникає необхідність вибору між доступністю (Availability) та узгодженістю (Consistency), а при відсутності розподілення системи існує додатковий (Else) компроміс між часовою затримкою (Latency) та узгодженістю (Consistency). Під часовою затримкою слід вважати час, який клієнт очікує від бази даних на повернення результатів запиту на читання або підтвердження успішності виконання запису.

Таким чином теорема PACELC забезпечує більш повне відображення потенційних компромісів, пов'язаних із забезпеченням узгодженості даних у розподілених інформаційних системах.

Обмеження теорем CAP та PACELC

Теореми CAP та PACELC є, безумовно, важливими для розуміння якісного зв'язку між ключовими характеристиками розподілених систем збереження та обробки інформації. Однак, вони мають низку принципових недоліків, які обмежують коло їхнього застосування.

По-перше, зазначені характеристики за своєю природою є не бінарними, як це розглядається в теоремах CAP та PACELC, а безперервними (наприклад, час обслуговування є безперервною величиною на інтервалі (0, ∞) у той час як доступність традиційно вимірюється від 0 до 100%) або мають дискретний набір значень. Наприклад, це стосується узгодженості даних, яка може змінюватися від слабкої (weak) до строгої (strong) з багатьма можливими рівнями послабленої (relaxed) узгодженості між ними.

По-друге, вони встановлюють лише якісний зв'язок між характеристиками розподіленої системи, що обмежує практичне значення теорем і не дозволяє кількісно оцінити рівень впливу одних характеристик на інші.

По-третє, теореми CAP/PACELC передбачають знаходження компромісу між узгодженістю, доступністю та швидкодією (або ж можливістю продовження роботи у разі розподілення) лише за рахунок вибору двох з цих трьох властивостей. Однак, найбільш ефективним є знаходження більш гнучкого балансу між ними.

Крім того, зазначені теореми не відображають дуалізм узгодженості даних. З одного боку узгодженість може визначати імовірність того, що всі вузли-репліки мають однаковий набір даних, або ж надавати певні гарантії щодо узгодженості даних (наприклад строга узгодженість завжди гарантує однаковість даних, що повертаються різних користувачам). З іншого боку, рівень узгодженості може бути одним із налаштувань розподіленої інформаційної системи. Наприклад, нереляційна база даних Cassandra забезпечує узгодженість у кінцевому випадку (eventual consistency), та дозволяє встановити рівень узгодженості для кожного окремого запиту, який визначає кількість реплік (всі, одна, або більшість), яким буде спрямовано цей запит.

Нарешті, існують інші важливі характеристики які суттєво пов'язані із зазначеними у теоремах CAP та PACELC. Наприклад, це стосується відмовостійкості (fault-tolerance), довговічності (durability), енергоспоживання (energy consumption), тощо.

Еволюція архітектур сховищ даних. Клієнт-серверна архітектура

Клієнт-серверна модель – це розподілена архітектура, яка відокремлює постачальників інформаційно-обчислювальних ресурсів, тобто серверів обробки та збереження інформації, від ініціаторів запитів на обробку – клієнтів (див. рис. 1).



Рис. 1. Клієнт-серверна архітектура

Доступ до даних у клієнт-серверній архітектурі забезпечується наступним чином [9]: 1) клієнт формує та надсилає запит до сервера бази даних; 2) сервер обробляє запит і отримує необхідну інформацію з бази даних, а у разі необхідності – виконує маніпуляції з інформацією, що зберігаються у базі даних; 3) після завершення обробки запиту сервер формує відповідь та надсилає її клієнту. Таким чином, ресурси клієнтського комп'ютера не приймають участь у фізичному виконанні запиту [10].

Архітектура централізованого реплікованого кластеру

Традиційна клієнт-серверна архітектура з одним сервером має певні обмеження пов'язані з доступністю та продуктивністю. Так, у разі відмови сервера всі клієнти втрачають доступ до інформації. Крім того, існує певна межа продуктивності, після досягнення якої сервер не може впоратися з обслуговуванням нових користувачів, або ж значно зростає час обслуговування запитів. Вирішенням перелічених вище недоліків може бути реплікація даних по декількох серверах. Це дозволяє розподілити зростаюче навантаження між серверами-репліками, а також забезпечити стійкість до відмов серверів, тобто підвищити готовність системі.

Таким чином, наступним етапом розвитку розподілених систем була архітектура реплікованого клієнт-серверного кластеру [11] з репліками, розташованими у межах локальної мережі (див. рис. 2). Передумовами виникнення такої архітектури була необхідність підвищення надійності, доступності та продуктивності.

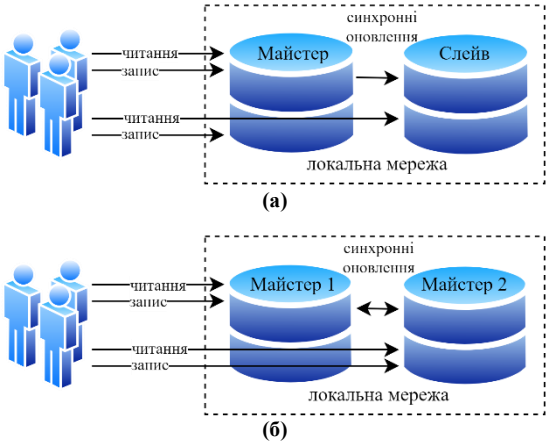


Рис. 2. Архітектура централізованого реплікованого кластеру: (а) майстер-слейв; б) майстер-майстер

Існують два різновиди реплікованого кластеру: майстер-слейв (master-slave) та майстер-майстер (master-master або multi-master). У першому випадку (рис. 2, а) всі репліки можуть обробляти запити на читання інформації, проте будь-яка операція, яка вимагає оновлення даних, повинна проходити та оброблятися майстер-сервером, який розповсюджує оновлення на всіх підлеглих серверах.

Архітектура майстер-слейв досить проста у реалізації, але до її недоліків можна віднести наявність єдиної точки відмови (майстер-сервера) та проблеми продуктивності при зростанні кількості операцій запису [12]. З цієї причини реплікація майстер-слейв переважно використовується в інтенсивних для читання додатках. Якщо майстер виходить з ладу, один із підлеглих серверів може прийняти на себе роль майстра. Однак на час вибору нового майстра кластер не може обслуговувати запити на оновлення інформації.

Наступним етапом розвитку баз даних стала поява архітектури кластеру майстер-майстер (рис. 2, б), яка є більш складною у реалізації, але вирішує недоліки попередньої схеми. Однак можливість оновлення бази даних декількома серверами одночасно викликає складність у підтримки узгодженості даних. Конфлікт може виникнути, якщо кілька серверів намагаються одночасно оновити один і той самий об'єкт у базі даних. Для виявлення та вирішення таких конфліктів використовуються спеціальні алгоритми та протоколи [13].

Треба також зазначити, що у централізованому кластері всі репліки компактно розміщені у локальній мережі, а синхронізація між майстром та іншими репліками є синхронною. Тобто, операція запису чи оновлення даних вважається успішною тільки після завершення оновлення інформації на всіх серверах-репліках. Також, всі репліки призупиняють обслуговування запитів до закінчення синхронізації даних між ними використовуючи механізм двофазних транзакцій (two-phase commit protocol [14]). Однак, оскільки всі репліки об'єднані локальною мережею, синхронізація виконується дуже швидко, і блокування роботи системи не займає багато часу.

Архітектура глобально-розподіленого реплікованого кластеру

Архітектура централізованого реплікованого кластеру ефективно обслуговує клієнтів, що розташовані поруч із серверами. Однак, при обслуговуванні географічно віддалених клієнтів виникають суттєві затримки, пов'язані зі зростанням часу пересування результатів обробки через глобальну мережу Інтернет. Також централізований кластер не захищений від відмов із загальними причинами, тобто не забезпечує катастрофостійкості [15].

Таким чином, для обслуговування географічно-віддалених користувачів виникла необхідність у побудові глобально-розподілених інформаційних систем за архітектурою майстер-майстер в яких репліки розташовані близько до груп користувачів, які вони обслуговують, а не одна до одної (рис. 3).

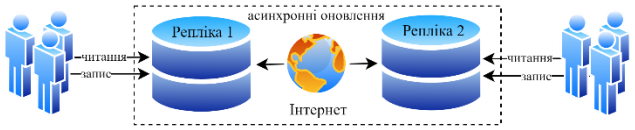


Рис. 3. Архітектура глобально-розподіленого реплікованого кластеру

Однак, така архітектура фактично унеможливлює виконання синхронних оновлень між репліками, оскільки реалізація протоколу двофазних транзакцій між глобально-розподіленими репліками призводить до катастрофічного зниження продуктивності усієї системи.

Отже, у таких системах використовується механізм асинхронних реплікацій, у якому зміни інформації в одній репліці розповсюджуються на інші репліки у фоновому режимі через деякий час. Таким чином, асинхронна реплікація призводить до появи тимчасової неузгодженості даних між вузлами-репліками.

Фактично, це обумовлює перехід від моделі ACID зі строгою узгодженістю даних, до моделі BASE, яка забезпечує тільки кінцеву узгодженість (Eventual Consistency). Як наслідок, деякі клієнти можуть отримати застарілі дані.

Безумовно, у деяких додатках послаблення вимог до узгодженості може спричинити катастрофічні наслідки, що є неприйнятним. Однак для систем, які можуть собі дозволити послаблення узгодженості, наприклад, у соціальних мережах, впровадження асинхронної реплікації дозволяє досягти високої продуктивності та зробити систему високо-масштабованою [13].

Еволюція моделей узгодженості даних

Моделі узгодженості даних визначають гарантії, що надаються сховищем даних користувачам щодо результатів операцій читання та запису при наявності конкуруючих запитів від багатьох користувачів.

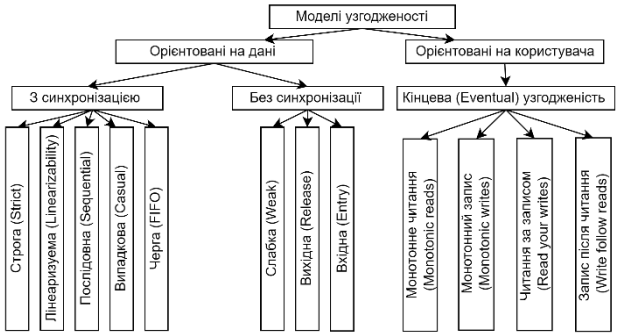


Рис. 4. Моделі узгодженості даних

Існує багато різних моделей узгодженості, які використовуються у розподілених обчислювальних системах і системах зберігання даних, які узагальнені на рис. 4. Умовно їх можна поділити на дві основні групи [16]. Перша група забезпечує певний стан сховища даних для всіх користувачів (моделі орієнтовані на дані); друга надає гарантії лише для окремого користувача (моделі орієнтовані на користувача) у той час як інформація, що повертається у відповідь на той же самий запит читання, отриманий одночасно від декількох користувачів, може відрізнятися від користувача до користувача.

Строга узгодженість не може бути ефективно досягнута у реплікованих глобально-розподілених системах. Таким чином, багато сучасних нереляційних сховищ даних реалізують різні види моделей ослабленої узгодженості.

На жаль, на сьогодні не існує загальних правил для послаблення узгодженості і, виходячи з цього, різні постачальники баз даних реалізують різні моделі узгодженості, які несумісні між собою та які важко порівняти.

Наприклад, Apache Cassandra, яка підтримує архітектуру майстер-майстер, визначає дискретний набір рівнів узгодженості, вказуючи кількість реплік, що викликаються для виконання кожній операції читання та запису (див. табл. 1). Строга узгодженість, яка гарантує, що читання завжди відображатиме найбільш актуальні дані, досягається коли сума вузлів, що викликаються при операціях запису та читання є більшою за коефіцієнт реплікації даних [17].

Модель узгодженості MongoDB, що є системою майстер-слейв, заснована на налаштуванні параметрів w та j, як показано у табл. 2. Оновлення даних з первинної репліки (майстра) на вторинні (слейви) завжди виконуються асинхронно. За замовчуванням читання виконуються з майстра, але ж читання з вторинних реплік автоматично робить MongoDB системою з кінцевою (eventual) узгодженістю [17].

Azure CosmosDB – це хмарна система зберігання даних, репліки якої можна розмістити по всьому світу у кількох регіонах Azure. CosmosDB підтримує п’ять рівнів узгодженості, характеристика яких наведена у табл. 3, та може бути налаштована для роботи з однією або кількома майстер-репліками [17].

Таблиця 1

Модель узгодженості Apache Cassandra

Рівень узгодженості	Визначення та гарантії узгодженості
ONE	Дані мають бути записані до журналу транзакцій та у пам’ять принаймні однієї репліки перш ніж підтвердити успішність операції запису клієнту; під час зчитування даних Cassandra запитує та повертає відповідь з однієї репліки (використовується найближча репліка з найменшою затримкою); строга узгодженість забезпечується, коли сума реплік, що викликаються для читання та запису даних більша за коефіцієнт реплікації
TWO	Дані повинні бути записані принаймні на дві репліки; операція читання повертає найбільш актуальний запис із двох найближчих реплік (найбільш актуальні дані визначаються шляхом порівняння часових міток записів, повернутих цими двома репліками)
THREE	Подібно до TWO але для трьох реплік
QUORUM	Кворум (тобто більшість) вузлів-реплік повинен підтвердити запис або повернути відповідь на запит читання
ALL	Дані повинні бути записані на всі вузли репліки в кластері перед підтвердженням успішності операції; запит на читання завжди повертає найбільш актуальні дані після того, як отримання відповіді від усіх реплік; операція читання/запису не буде вважітися успішною, якщо навіть одна репліка не відповідсть на запит
EACH_QUORUM, LOCAL_QUORUM LOCAL_ONE	Додаткові рівні узгодженості, які використовуються, якщо репліки кластера Cassandra розподілені по декількох центрах обробки даних

Таблиця 2

Модель узгодженості MongoDB

Рівень узгодженості	Визначення та гарантії узгодженості
w:0, j:false	Найслабший рівень узгодженості (записи можуть бути втрачені навіть без розподілу системи), що забезпечує найменшу затримку читання/запису
w:1, j:false	Гарантовано запис на диск первинної репліки; це забезпечує досить низьку затримку, але й дуже слабку узгодженість
w:2, j:false	Гарантовано запис на диск первинної репліки та в пам'ять однієї з вторинних реплік; це забезпечує низьку затримку та слабку узгодженість
w:2, j:true	Гарантовано запис на дисках первинної репліки та однієї з вторинних реплік; це забезпечує середню затримку та узгодженість
w:majority, j:false	Гарантовано запис на дисках первинної репліки та в пам’ять більшості вторинних реплік; це забезпечує середню затримку та узгодженість
w:majority, j:true	Гарантовано запис на дисках первинної репліки та більшості вторинних реплік; це забезпечує високу узгодженість даних, але ж тягне й високі часові затримки на виконання операцій читання та запису

Таблиця 3

Модель узгодженості Azure CosmosDB

Рівень узгодженості	Визначення та гарантії узгодженості
STRONG (Reads: local minority; Writes: global majority)	Строга узгодженість забезпечує гарантії лінеаризованості, тобто, наприклад, читання гарантовано повертає найбільш актуальні результати запису/оновлення даних
BOUNDED STALENESS (Reads: local minority: Writes: local majority)	Гарантується, що читання завжди повертатиме впорядковані результати оновлення даних. Однак, допускається, що читання може відставати від запису, але не більше ніж на *K* оновлень або на *T* часовий інтервал (тобто вікно нестачі (staleness window)), залежно від того, що менше.
SESSION (Reads: single replica with session token; Writes: local majority)	Гарантується, що читання завжди повертатиме впорядковані результати оновлення даних протягом однієї клієнтської сесії; для інших клієнтів також гарантоване монотонне читання та запис, запис після читання (write-follows-reads) та читання свого запису (read-your-writes)
CONSISTENT PREFIX (Reads: single replica; Writes: local majority)	Гарантується, що читання завжди повертатиме впорядковані результати оновлення даних без пробілів; наприклад, гарантується дотримання впорядкованої послідовності оновлень даних (починаючи з першої), яка зберігалася в мастер-репліці в якийсь час у минулому; натомість, допускається, що найбільш актуальні дані можуть бути відсутніми
EVENTUAL (Reads: Single replica; Writes: local majority)	Немає гарантії порядку читання; за відсутності подальшого запису репліки зрештою сходяться; користувачі можуть читати дані, які «старші», ніж ті, що були прочитані раніше

Еволюція моделей узгодженості даних

GSN (Goal Structuring Notation) – схема, яка ілюструє окремі аргументи певного судження та його співвідношення, які існують між цими елементами. Основні елементи схеми є:

- Мета (Goal, G1);
- Рішення (Solution, Sn1);
- Стратегія (Strategy, Str1);
- Контекст (Context, C1);
- Припущення (Assumption, A1);
- Доказ (Justification, J1).

Формат GSN закріплений у стандарті «Goal Structuring Notation (GSN) Community Standard» [18]. Об'єднання елементів у єдину структуру описується як «goal structure». Ця структура показую, як цілі послідовно декомпозуються на підцілі, перш ніж буде досяжна точка, у якої вони можуть бути підтверджені прямим посиланням на рішення. У рамках цієї декомпозиції за допомогою GSN також можна пояснити прийняті стратегії аргументації, обґрунтування підходу та контекст, у якому сформульовані цілі. Узагальнений процес еволюції архітектур сховищ даних, формалізований за допомогою нотації GSN, представлений на рис. 5.

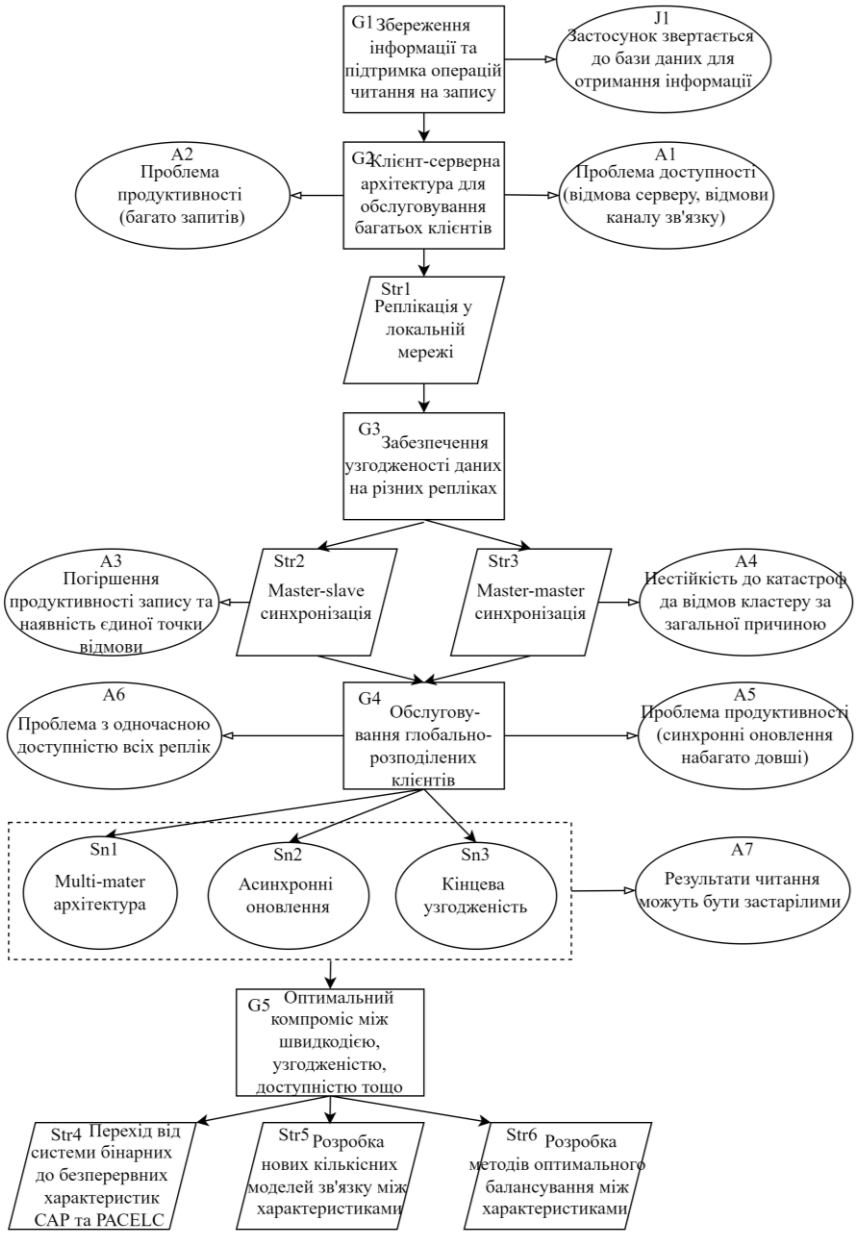


Рис. 5. Еволюція архітектур сховищ даних у нотації GSN

Збереження інформації та підтримка маніпуляцій з ними є основною метою (G1) створення сховищ даних. Мета G2 уособлює необхідність обслуговування багатьох користувачів з конкуруючими запитами. Мета G2 тягне необхідність вирішення проблем надійності/доступності (A1) та продуктивності (A2). Ці проблеми вирішуються за допомогою введення допоміжних серверів-реплік, що зберігають копію даних та (Str1). Це забезпечує відмовостійкість та дозволяє підвищити продуктивність сховища даних шляхом розподілу клієнтських запитів між усьома репліками. Наступна мета пов'язана з необхідністю синхронізації даних між репліками (G3). Для її досягнення було запроваджено дві архітектури баз даних: master-slave (Str2) та master-master (Str3). Реалізація стратегії Str2 є набагато простішою, але залишає проблему з недостатньою продуктивністю операцій запису та наявністю єдиної точки відмови (A3). Стратегія Str3 більш складна в реалізації і не вирішує проблему катастрофостійкості та можливості відмови всього

кластера через загальну причину (A4), оскільки всі репліки розташовані в локальній мережі близько один до одного, що необхідно для швидкої синхронізації даних між ними. Додаючи наступну ціль (G4), яка спрямована на підтримку обслуговування глобально-розподілених користувачів завдяки розміщенню реплік у різних географічних локаціях, з'являються додаткові проблеми: проблема повільної синхронізації даних через мережу Інтернет між віддаленими репліками (A5), проблема частого розподілу кластера у разі відмови або недоступності через нестабільність мережевого середовища Інтернет хоча б однієї з реплік (A6).

Для їх вирішення було запропоновано такі підходи: використання архітектури з кількома майстрами (multi-master) (Sn1), впровадження асинхронних оновлень між репліками (Sn2) та гарантію тільки кінцевої узгодженості даних (Sn3). Ці фундаментальні рішення лягли в основу створення та швидкого розвитку сучасних нереляційних баз даних NoSQL. Однак ці рішення створили передумови для появи іншої проблеми, яка й досі залишається невирішеною (A7), а саме – принципову можливість отримання користувачами застарілих/неактуальних результатів при читанні інформації зі сховища даних.

Таким чином виникає необхідність досягнення нової мети (G5), яка полягає у знаходженні оптимального балансу між часовими затримками, узгодженістю даних, доступністю та іншими характеристиками розподілених баз даних.

Для її досягнення, по-перше, пропонується розглядати характеристики розподілених реплікованих сховищ даних, які використовуються у теоремах CAP та PACELC (зокрема, часові затримки, доступність та узгодженість), як безперервні, а не дискретні величини (Str4). По-друге, необхідно розробити нові аналітичні моделі, які б дозволили встановити кількісний зв'язок між зазначеними характеристиками Str5 (на відміну від теорем CAP та PACELC, які встановлюють лише якісне співвідношення між ними та декларують можливість вибору лише двох з цих трьох характеристик при створені розподіленої інформаційної системи). По-третє, актуальним є розробка нових методів знаходження оптимального або ж раціонального компромісу між характеристиками розподілених баз даних, які є суперечливими за своєю природою (Str6).

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1) Еволюція баз даних тісно пов’язана з досягненнями інформаційних технологій та розвитком комп’ютерних систем. З ростом числа оброблюємої інформації виникали й нові моделі та архітектурні рішення, які використовувалися для створення сховищ даних. Наприклад, при побудові глобально-розподілених систем зберігання великих даних (Big Data) модель ACID, яка домінувала протягом десятиліть, була замінена моделлю BASE, а від гарантій строгої узгодженості (strong consistency) був здійснений перехід до понять ослабленої (relaxed) або кінцевої (eventual) узгодженості.

2) Неможливість одночасного забезпечення стійкості до розподілення, готовності та строгої узгодженості даних у глобально-розподілених реплікованих інформаційних системах вперше була зазначена у теоремі CAP у 1999 році. З годом, ця теорема набула подальшого розвитку у вигляді теореми PACELC, яка визначає необхідність додаткового вибору між швидкодією та узгодженістю під час проектування та експлуатації таких систем.

3) У статті розглянуто передумови розвитку теорем та моделей властивостей сховищ даних, етапи еволюції архітектур розподілених інформаційних систем, а також різні моделі узгодженості даних, що використовуються сучасними нереляційними базами даних NoSQL. Крім того, зазначені напрямки та актуальні завдання наукового та прикладного характеру для подальшого розвитку глобально-розподілених інформаційних систем.

References

1. NoSQL: past, present, future [Електронний ресурс]. – QCon – Режим доступу – https://www.infoq.com/presentations/NoSQL-History/

2. Meier, A. SQL and NoSQL Databases: Models, Languages, Consistency Options and Architectures for Big Data Management [Text] / A. Meier, M. Kaufmann. – Berlin: Springer Verlag, 2019. – 229 p.

3. Medjahed B., Generalization of ACID Properties [Текст] / B. Medjahed, M. Ouzzani, A.K. Elmagarmid // Encyclopedia of Database Systems. – 2009. – pp. 1221-1222.

4. Pritchett, D. BASE: An Acid Alternative [Текст] / D. Pritchett // ACM Queue. – 2008. – Vol. 6, No. 3. – P. 48-55.

5. Ugur N.G., Understanding Big Data[Текст] / N.G. Ugur, A.H. Turan // Advances in Data Mining and Database Management. – 2020. – pp. 1-29.

6. Brewer E., Towards robust distributed systems [Текст] / E. Brewer // 19th Annual ACM Symposium on Principles of Distributed Computing. – Portland, USA, 2000. – P. 7-8.

7. Gilbert, S., Brewer’s Conjecture and the Feasi- bility of Consistent, Available, Partition-Tolerant Web Services [Текст] / S. Gilbert, N. Lynch // ACM SIGACT News. – 2002. – Vol. 33, No. 2. – P. 51-59.

8. Abadi, D., Consistency tradeoff in modern distributed database system design [Текст] / D. Abadi // IEEE Computer. – 2012. – Vol. 45, No. 2. – P. 37-42

9. Distributed Database Systems [Електронний ресурс]. – University of Cape Town – Режим доступу: https://www.cs.uct.ac.za/mit_notes/database/pdfs/chp15.pdf

10. Understanding Distributed Systems [Електронний ресурс]. – Oracle docs – Режим доступу: https://docs.oracle.com/cd/A57673_01/DOC/server/doc/SD173/ch1.htm

ISSN 2219-9365

11. Client-Server Model [Електронний ресурс]. – GeeksforGeeks – Режим доступу: https://www.geeksforgeeks.org/client-server-model/

12. Strickland, R. Cassandra High Availability [Текст] / R. Strickland. – Packt, 2014. – 186 p.

13. Multi-master Replication Solutions for PostgreSQL [Електронний ресурс]. – Percona – Режим доступу: https://www.percona.com/blog/2020/06/09/multi-master-replication-solutions-for-postgresql/

14. Al-Houmaily J. Y., Two-Phase Commit [Текст] / Y. J. Al-Houmaily, G. Samaras // Encyclopedia of Database Systems. – 2009. – pp. 3204-3209

15. Choy M., Disaster recovery techniaues for databasesystems [Текст] / M. Choy, H.V. Leong, M. H. Wong // Communications of the ACM. – 2000. – Vol.43. – P. 6.

16. Database replication 101 Systems [Електронний ресурс]. – OVHcloud – Режим доступу: https://blog.ovhcloud.com/database-replication-101/

17. NoSql Database Architectural Comparison [Електронний ресурс]. – Fixstars – Режим доступу: https://griddb.net/en/docs/NoSQL_Database_Architectural_Comparison.pdf

18. Goal Structuring Notation [Електронний ресурс]. – Safety-Critical Systems Club – Режим доступу: https://scsc.uk/gsn

https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-70-2-2
УДК 004.94

Андрій МЕЛЬНИК
Західноукраїнський національний університет
https://orcid.org/0000-0001-7799-9877
Микола ДИВАК
Західноукраїнський національний університет
https://orcid.org/0000-0002-9049-4993
Володимир МАНЖУЛА
Західноукраїнський національний університет
https://orcid.org/0000-0001-5222-8443

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ КОНЦЕНТРАЦІЙ ШКІДЛИВИХ ВИКИДІВ АВТОТРАНСПОРТУ НА ОСНОВІ ПОЄДНАННЯ МЕТОДІВ ІНТЕРВАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ТА ОНТОЛОГІЧНОГО ПІДХОДУ

Проблема побудови математичної моделі динаміки концентрацій шкідливих викидів автотранспорту на різних ділянках міста з використанням методів інтервального аналізу та онтологічного підходу розглянута в цій статті. Досліджено особливості побудови таких моделей на основі періодичного вимірювання концентрацій шкідливих речовин та відповідної процедури ідентифікації на основі отриманих вимірювань.

В роботі запропоновано поєднання онтологічний підхід, як інструмент управління, який дозволяє значно спростити систематичні стандартизовані методи зберігання моделей, процес їх побудови та відповідного використання в практичних ситуаціях.

Процедура застосування онтологічної моделі дозволяє формалізувати процес отримання, зберігання та використання відповідних знань та підходить для більш інтелектуалізованих систем, такі як визначення завідомо хибних розв'язків на основі моделі, оптимізація процесу прийняття рішень на основі знань та моделювання відповідної технологічної схеми.

У цій роботі також описані особливості побудови відповідної онтологічної моделі, закономірність вибору нелінійної моделі. В результаті проведених експериментальних досліджень підтверджено ефективність запропонованого підходу.

Ключові слова: математичне моделювання, інтервальний аналіз, управління знаннями, онтологічний підхід.

Andriy MELNYK, Mykola DYVAK, Volodymyr MANZHULA
West Ukrainian National University

MODELING OF DYNAMICS OF CONCENTRATIONS OF HARMFUL EMISSIONS OF MOTOR TRANSPORT ON THE BASIS OF A COMBINATION OF METHODS OF THE INTERVAL ANALYSIS AND THE ONTOLOGICAL APPROACH

The problem of building a mathematical model of the dynamics of concentrations of harmful emissions from vehicles in different parts of the city using the methods of interval analysis and ontological approach is considered in this article. The peculiarities of construction of such models on the basis of periodic measurement of concentrations of harmful substances and the corresponding identification procedure on the basis of the received measurements are investigated.

The paper proposes a combination of ontological approach as a management tool, which significantly simplifies the systematic standardized methods of storing models, the process of their construction and appropriate use in practical situations.

The ontological modeling procedure formalizes the process of obtaining, storing, and using relevant knowledge and is suitable for more intelligent systems, such as identifying knowingly erroneous solutions based on a model, optimizing a knowledge-based decision-making process, and modeling an appropriate flow chart.

This paper also describes the features of the construction of the corresponding ontological model, the regularity of the choice of the nonlinear model. As a result of experimental studies, the effectiveness of the proposed approach was confirmed.

Keywords: mathematical modeling, interval analysis, knowledge management, ontological approach.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Об'єкти з розподіленими параметрами є найскладнішими з точки зору ідентифікації їх моделей. До такого класу об'єктів слід віднести просторовий розподіл забруднень шкідливими речовинами внаслідок інтенсивних викидів забруднюючих речовин точковими, чи просторово розподіленими джерелами з подальшою дифузією цих речовин в атмосферу, водні ресурси чи ґрунти [1-3]. Спектр задач, пов'язаний із необхідністю моделювання об'єктів з розподіленими параметрами далеко не обмежується зазначеними випадками. Подібні задачі, окрім згаданих екології та медицини виникають при управлінні технологічними процесами, при дослідженні адсорбційних та абсорбційних властивостей пористих структур, тощо [4]. Спрощеним варіантом моделей таких об'єктів є моделі динаміки. Переважно, моделювання цих об'єктів та процесів використовують диференціальні рівняння в частинних похідних та з похідними з часовою змінною. Для забезпечення високої точності та адекватності таких моделей необхідно ураховувати специфіку

фізичних процесів чи збільшувати кількість впливових чинників, а також ускладнювати та деталізувати відображення їх взаємодії.

Альтернативним підходом до вищезазначеного, є індуктивний підхід, коли досліджуючи реальний об'єкт, накопичують результати спостережень, а потім на основі цих результатів «синтезують» математичну модель з окремих, наперед заданих елементів [5]. У результаті, отримують математичну модель у вигляді різницевої схеми, з коефіцієнтами-параметрами схеми, які не мають фізичного змісту. Зазначений підхід ще у кінці сімдесяти років минулого століття був запропонований академіком О.Г. Івахненком [6]. Такі моделі називають дискретними, бо вони побудовані на сітці дискретних результатів спостережень. Процес ідентифікації математичної моделі передбачає дві фази: структурну та параметричну. Важливо зазначити, що задачу параметричної ідентифікації математичної моделі багаторазово розв'язують на етапах розв'язування задачі структурної ідентифікації, що формує основну обчислювальну складність останньої.

Розв'язком задачі структурної ідентифікації є загальний вигляд дискретної математичної моделі. Складові елементи моделі визначені вектором базисних функцій, вектором параметрів, наборами векторів вхідних змінних (управлінь), а також порядком різницевої схеми. Обчислювальна задача структурної ідентифікації належить до класу NP-складних. Причому, її складність суттєво зростає, коли результати спостережень є неточними. У працях О. Івахненка та його послідовників розглянуто випадки, коли дані спостережень призводять до стохастичної постановки задачі, тобто похибки в даних є випадковими [5,6]. Разом, з тим такий спосіб представлення результатів спостережень, є дещо спрощеним, оскільки, переважно. похибки вимірювань є обмеженими. А у випадку необхідності забезпечення заданої точності моделі доцільно розглядати результати спостережень в інтервальному вигляді [1-4,7]. Своєю чергою це спричинює неможливість використання багатьох відомих методів як параметричної так і структурної ідентифікації, наприклад методів групового урахування аргументів (МГУА) [5,6].

У випадку використання інтервальних даних, обидві задачі параметричної та структурної ідентифікації дискретних моделей стають NP-складними задачами дискретної нелінійної оптимізації [4,7]. Для такого класу задач запропоновано ряд еволюційних обчислювальних методів. Проте, у праці [7] запропоновано використання еволюційного методу структурної ідентифікації дискретних моделей, який ґрунтується на поведінкових моделях штучної бджолиної колонії. Математичні механізми функціонування штучної бджолиної колонії запропоновано у працях Дервіса Карабоги [8]. Надзвичайно висока обчислювальна складність реалізації цих методів суттєво стримує їх застосування для структурної ідентифікації дискретних моделей складних об'єктів. При цьому дослідження показали, що складові проблеми обчислювальної складності полягають у налаштуванні параметрів обчислювального алгоритму. Це є зокрема: виборі початкової множини структурних елементів моделі (різницевої схеми); виборі початкових структур моделей-претендентів, від яких залежить складність пошуку оптимальної структури; налаштуванні процедур виходу із локальних екстремумів оптимізаційної задачі структурної ідентифікації.

Разом з тим, на даний момент існує певний досвід застосування зазначених обчислювальних схем. Більше того розроблена онтологія математичного моделювання на основі інтервальних даних [9] та створено депозитарії інтервальних дискретних моделей для широкого класу об'єктів, які керуються певними онтологічними надбудовами. Вище зазначене створює можливості для удосконалення як теоретичних основ так і обчислювальної реалізації еволюційного методу структурної ідентифікації дискретних моделей складних динамічних об'єктів та об'єктів з розподіленими параметрами.

Постановка проблеми

Для моделювання процесів забруднення приземистого шару атмосфери шкідливими викидами нестаціонарними джерелами забруднення, наприклад автотранспорту, часто використовують диференціальні рівняння, або ж їх різницеві аналоги [10-13]. Для структурної ідентифікації різницевих рівнянь використовують метод побудований на основі поведінкових моделей бджолиної колонії [7].

Тепер розглянемо задачу параметричної ідентифікації інтервальних моделей динамічних об'єктів. Спочатку зробимо припущення щодо структури математичної моделі. Отже, розглянемо математичну модель об'єкта у вигляді такого різницевого рівняння:

$$v_k = \vec{f}^T(v_{k-d},...,v_{k-1},\vec{u}_0,..,\vec{u}_{d-1},\vec{u}_k)\cdot\vec{g}, k = d,...,K \quad (1)$$

де v_k – модельована концентрація діоксиду азоту на часовій дискреті $k = d,...,K$; $\vec{u}_0,...,\vec{u}_k$ - вектори вхідних змінних, які задають умови побудови та умови застосування моделі; d – порядок дискретної динамічної моделі; $\vec{g}$ – вектор невідомих параметрів моделі; $\vec{f}^T(\bullet)$ - вектор відомих базисних функцій.

Виразом (1) подано лінійне за параметрами різницеве рівняння. В цілому, не порушуючи

загальності розгляду, можемо припустити, що рівняння може бути і нелінійним. Результати вимірювань концентрацій діоксиду азоту подаємо у вигляді числових інтервалів можливих їх значень у певній точці та у рівномірно зафіксованих часових дискретах:

$$[z_k^-; z_k^+],\ k = 0,...,K, \tag{2}$$

де z_k^-, z_k^+ - відповідно, нижня та верхня межі інтервалу можливих значень виміряних концентрацій, у часових дискретах $k = 0,...,K$.

Виконання вимог забезпечення точності математичної моделі в межах точності інтервальних даних призводить до такої інтервальної системи:

$$\begin{cases} [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] \subseteq [z_0^-; z_0^+],..., \\ ....[\hat{v}_{d-1}^-; \hat{v}_{d-1}^+] \subseteq [z_{d-1}^-; z_{d-1}^+]; \\ z_k^- \le \vec{f}^T([\hat{v}_{k-d}],...,[\hat{v}_{k-1}], \vec{u}_0,... \\ ...,\vec{u}_k) \cdot \hat{\bar{g}} \le z_k^+, k = d,...,K. \end{cases}, \tag{3}$$

у якій перша стрічка – початкові умови, а наступні – умови узгодження експериментальних даних та прогнозованих, які будемо обчислювати на основі математичної моделі, параметри якої потрібно обчислити із системи (3). Спираючись на загальне представлення моделі об'єкта у вигляді різницевого рівняння (1), зазначену математичну модель, коли вже обчислено оцінки параметрів, подаємо таким виразом:

$$\begin{aligned} &[\hat{v}_k] = [\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+] = \vec{f}^T([\hat{v}_{k-d}],..., \\ &...[\hat{v}_{k-1}], \vec{u}_0,...,\vec{u}_{d-1}, \vec{u}_k) \cdot \hat{\bar{g}},\ k = d,...,K. \end{aligned}, \tag{4}$$

де $[\hat{v}_k]$ – інтервальна оцінка концентрації діоксиду азоту на часових дискретах $k = d,...,K$; $\hat{\bar{g}}$ – вектор оцінок параметрів моделі.

Усі обчислення, як при побудові моделі (4), так і при її застосуванні проводимо із застосуванням інтервальної арифметики. Тому такі моделі називаємо інтервальними дискретними моделями динамічних об'єктів (ІДМДО). Як бачимо, у випадку параметричної ідентифікації інтервальних моделей динаміки діоксиду азоту, маємо справу з математичною задачею, суть якої полягає у розв'язуванні або знаходженні хоча б одного розв'язку інтервальної системи нелінійних алгебричних рівнянь (ІСНАР).

Сумісність ІСНАР (3) означає належність інтервалів значень прогнозованої концентрації діоксиду азоту $[\hat{v}_k]$ на часових дискретах $k = 0,...,K$ до інтервалів $[z_k^-; z_k^+]$, отриманих експериментально у тих же самих дискретах, тобто, коли виконуються такі умови:

$$[\hat{v}_k] \subset \left[z_k^-; z_k^+ \right], k = 0,...,K \tag{5}$$

Отже, ітераційна процедура для методу оцінювання розв'язку ІСНАР (3) повинна ґрунтуватися на досліджені на кожній ітерації «якості» оцінки параметрів математичної моделі, представленої різницевим рівнянням (4). Якість оцінки параметрів на кожній l-тій ітерації задаємо величиною $\delta(\hat{\bar{g}}_l)$ у вигляді різниці центрів найбільш віддалених між собою, модельованого, на основі різницевої схеми (4), та експериментального інтервалів $[z_k^-; z_k^+]$ для кожної дискрети – у випадку, коли ці інтервали не перетинаються.

У випадку перетину цих інтервалів, функцію $\delta(\hat{\bar{g}}_l)$ визначатимемо найменшою шириною перетину серед прогнозних та експериментальних інтервалів. Вираз для функції $\delta(\hat{\bar{g}}_l)$, для вище зазначених обох випадків, представимо у такому вигляді, відповідно:

$$\delta(\hat{\bar{g}}) = \max_{i=1,...,N} \left\{ \left| mid([\hat{v}_k]) - mid([z_k^-; z_k^+]) \right| \right\}, \text{ якщо } [\hat{v}_k] \cap [z_k^-; z_k^+] = \varnothing, \exists k = 0,...,K \quad (6)$$

$$\delta(\hat{\bar{g}}) = \max_{i=1,...,N} \left\{ wid([\hat{v}_k]) - wid([\hat{v}_k] \cap [z_k^-; z_k^+]) \right\},$$

$$\text{якщо } [\hat{v}_k] \cap [z_k^-; z_k^+] \neq \varnothing, \forall k = 0,...,K \quad (7)$$

Зауважимо, ІСНАР (3) є складною, оскільки кожне рівняння формується рекурентно. Тому, у випадку розробки ІДМДО, задача буде полягати в обчисленні тільки одного розв'язку ІСНАР (3).

Варто зауважити, що умови (5) завершення ітераційної процедури, своєю чергою, забезпечують виконання такої умови:

$$\delta(\hat{\bar{g}}_l) = 0 \quad (8)$$

Для використання формул (6) та (7) в обчислювальних процедурах з метою обчислення значень функції $\delta(\hat{\bar{g}}_l)$, перепишемо їх у розгорнутому вигляді:

$$\delta(\hat{\bar{g}}_l) = \max_{i=1,...,N} \left\{ \left| \begin{array}{l} mid(\vec{f}^T([\hat{v}_{k-d}],..., \\ ....[\hat{v}_{k-1}],\ \vec{u}_0,...,\vec{u}_{d-1},\vec{u}_k) \cdot \hat{\bar{g}}) - , \\ -mid(\left[z_k^-; z_k^+ \right]) \end{array} \right| \right\}, \quad (9)$$

якщо $[\hat{v}_k] \cap [z_k^-; z_k^+] = \varnothing, \exists k = 0,...,K$

$$\delta([\hat{\bar{g}}_l^-; \hat{\bar{g}}_l^+]) = \max_{i=1,...,N} \left\{ \begin{array}{l} wid(\vec{f}^T([\hat{v}_{k-d}],..., \\ ....[\hat{v}_{k-1}],\ \vec{u}_0,...,\vec{u}_{d-1},\vec{u}_k) \cdot \hat{\bar{g}}) - \\ -wid(\vec{f}^T([\hat{v}_{k-d}],...,[\hat{v}_{k-1}],\ \vec{u}_0,..., \\ ...\vec{u}_{d-1},\vec{u}_k) \cdot \hat{\bar{g}}) \cap \left[z_k^-; z_k^+ \right] \end{array} \right\}, \quad (10)$$

якщо $[\hat{v}_k] \cap [z_k^-; z_k^+] \neq \varnothing, \forall k = 0,...,K$.

Важливим питанням залишається, як оптимальним чином організувати ітераційну процедуру обчислення послідовності інтервальних оцінок компонент векторів параметрів $\hat{\bar{g}}_1, \hat{\bar{g}}_2,..., \hat{\bar{g}}_l,...$ Очевидно, що для забезпечення збіжності ітераційної процедури, необхідно забезпечити таку послідовність оцінювання значень функції $\delta(\hat{\bar{g}}_1)$, $\delta(\hat{\bar{g}}_2),...,\delta(\hat{\bar{g}}_l),...$, обчислених за виразом (9), або (10), яка призводить до виконання таких умов:

$$\delta(\hat{\bar{g}}_1) > \delta(\hat{\bar{g}}_2) >,...,> \delta(\hat{\bar{g}}_l),...,> \delta(\hat{\bar{g}}_{l=L} \subset \Omega), \quad (11)$$

де Ω - у даному випадку позначає область розв'язків ІСНАР (12).

Отже, задачу параметричної ідентифікації інтервальних моделей динамічного об'єкта, сформулюємо у вигляді оптимізаційної задачі:

$$\begin{array}{l} \delta(\hat{\bar{g}}_l) \xrightarrow{\hat{\bar{g}}_l} \min,\ \hat{g}_{jl} \in [g_{jl}^{low}; g_{jl}^{up}], \\ j = 1,...,m,\ l = 1,...,S \end{array}, \quad (12)$$

де значення функції мети $\delta(\hat{\bar{g}}_l)$ обчислюватимемо за формулою (9), чи (10).

Еволюційний обчислювальний метод структурної ідентифікації ІДМ складних об'єктів

АБК – це евристичний алгоритм, що ґрунтується на принципах ройового інтелекту. Вперше основні засади АБК (Artificial Bee Colony algorithm) були сформульовані турецьким вченим Карабогою Д. у 2005 році для розв'язування оптимізаційної задачі із складною функцією мети багатьох змінних [8]. Основна ідея АБК полягає у моделюванні поведінки колонії медоносних бджіл у процесі пошуку їжі (нектару).

Як відомо, метод ґрунтується на реалізації чотирьох фаз діяльності колонії медоносних бджіл, які ітераційно повторюються до тих пір поки не буде досягнуто умову $\delta(\bar{\bar{g}}_l^s) = 0$

На фазі ініціалізації задають основні параметри методу: LIMIT; S; $[I_{\min}; I_{\max}]$; mcn =0 – поточний номер ітерації; MCN – загальну кількість ітерацій та множину структурних елементів F, а також випадковим чином формують початкову множину Λ_0 (з потужністю S) структур λ_s із набору структурних елементів F. Саме на цій фазі визначається складність реалізації обчислювальної схеми.

На фазі робочих бджіл використовують оператор $P(\wedge_{mcn}, F)$, який перетворює структури інтервальної моделі. На поточній ітерації реалізації методу структурної ідентифікації, цей оператор $P(\wedge_{mcn}, F)$ формує, на основі кожної з поточних структур λ_s математичної моделі, по одній «новій» структурі λ_s', яка є близькою до поточної.

На цій фазі визначаємо кількість R_s структур, які будуть згенеровані на основі кожної λ_s' структури із множини Δ^1_{mcn}. Зазначений показник R_s обчислюють за наступними процедурами.

Спочатку обчислюють ймовірність $P_s(\lambda_s^1)$ синтезу на основі поточної структури S новосформованих:

$$P_s(\lambda_s^1) = \frac{1}{\delta(\lambda_s^1) \cdot \sum_{s=1}^{S} \frac{1}{\delta(\lambda_s^1)}}, s = 1...S-1. \quad (13)$$

Далі знаходять цілі значення кількості «нових» структур моделей, які потрібно сформувати на основі кожної поточної (відомої) структури за такою формулою:

$$R_s = ToInt(P_{s-1}(\lambda_{s-1}^1) \cdot S), \quad s = 2...S, \quad R_1 = 0. \quad (14)$$

Далі, на цій фазі також використовують оператор $P_\delta(\wedge_{mcn}, F)$, який здійснює перетворення поточної структури у певну кількість R_s структур. При цьому, загальна кількість структур розподілених між поточними структурами, дорівнює S. Таким чином, $P_\delta(\wedge_{mcn}, F)$ означає перетворення кожної структури λ_s^1 з множини структур $\lambda_S^1 \in \Delta^1_{mcn}$ першого ряду формування, згенерованих на ітерації алгоритму $mcn = 0$, у множини структур λ_s', $s = 1...S$.

На фазі бджіл дослідників визначаємо кількість R_s структур, які будуть згенеровані на основі кожної λ_s^1 структури із множини Δ^1_{mcn}.

Вихід із локальних мінімумів функції мети здійснюємо на фазі бджіл розвідників. Для цього для кожної поточної структури λ_s вводимо лічильник Limits, який збільшуємо на «1» кожного разу, якщо під час попарної чи погрупової селекції поточна структура не «оновилася», та обнуляємо - в іншому випадку. Порівняння значення цього лічильника з деякою, уведеною на фазі ініціалізації, константою LIMIT дає можливість прийняти рішення про те, чи поточна структура себе вичерпала. Якщо лічильник $Limit_s$ досягає значення LIMIT, то більше не доцільно модифікувати цю поточну структуру. Це означає знаходження в локальному мінімумі функції. Тоді, використовуємо оператор $P_N(F, I_{\min}, I_{\max})$, який випадковим чином генерує «нову» структуру λ_s^2 з множини F всіх структурних елементів випадковим чином, так як на фазі ініціалізації, тільки для однієї структури. Отже, таких структур буде тільки декілька відсотків від значення S (усіх робочих бджіл).

Аналіз вище наведеної обчислювальної схеми показує, що саме на фазі ініціалізації визначається її складність. Вона визначається правильністю та повнотою формування множини структурних елементів *F*, діапазоном $[I_{\min}; I_{\max}]$ можливої кількості структурних елементів різницевої схеми, встановленою кількістю ітерацій LIMIT для виходу із локальних мінімумів, а також заданою початковою множиною Λ_0 (з потужністю S) структур λ_s із набору структурних елементів F, яку, як відомо, формують випадковим

чином. Спираючись на той факт, що на даний момент існує онтологія математичного моделювання на основі інтервальних даних [9] та створено репозиторій інтервальних дискретних моделей для широкого класу об'єктів, які керуються певними онтологічними надбудовами, у даній праці запропоновано удосконалити метод структурної ідентифікації ІДМ динамічних об'єктів та об'єктів з розподіленими параметрами. Для цього повністю модифіковано фазу ініціалізації. Спочатку розглянемо особливість онтологічного опису об'єктів моделювання на основі ІДМ [13-15].

Поєднання еволюційного методу з онтологічним підходом

Виходячи із вищенаведеного аналізу властивостей ІДМ та методу його побудови, можемо вважати, що основними елементами цієї моделі є конкретний набір структурних елементів $F^S=\{f_1^S(\vec{V}),f_2^S(\vec{V}),...,f_{m_s}^S(\vec{V})\}\subset F$, який обирають із $F=\{\ f_1(\vec{V}),f_2(\vec{V}),...,f_m(\vec{V})\ \}$ множини потенційних структурних елементів моделі, попередньо визначивши їх кількість $m_S\in[I_{\min};I_{\max}]$. Також для формування моделі у вигляді ІДМ необхідно встановити значення параметрів моделі $\hat{g}_{jl}^S\in[g_{jl}^{low};g_{jl}^{up}],j=1,...,m$. Для цього використовуємо процедури, які описано вище. Таким чином, формально такого типу математичні моделі описують набором із множин:

$$M_l^S=<V_0^S,F^S,G^S>, \tag{15}$$

де

$V_0^S=\{[\hat{v}_{0,0,0,0}^-;\hat{v}_{0,0,0,0}^+]\subseteq[z_{0,0,0,0}^-;z_{0,0,0,0}^+],...,[\hat{v}_{d-1,d-1,d-1}^-;\hat{v}_{d-1,d-1,d-1}^+]\subseteq[z_{d-1,d-1,d-1,d-1}^-;z_{d-1,d-1,d-1}^+]\}$ -множина початкових умов; $G^S=\{\hat{g}_j^S,j=1,...,m\}$ - множина оцінок параметрів.

На стадії ініціалізації визначаємо обмеження на саму структуру моделі, а саме: набір структурних елементів $F=\{\ f_1(\vec{V}),f_2(\vec{V}),...,f_m(\vec{V})\ \}$, обмеження на значення елементів множини G^S у вигляді $\hat{g}_j^S\in[g_j^{low};g_j^{up}],j=1,...,m$, а також обмеження на кількість елементів в в структурі будь-якої ІДМ $m_S\in[I_{\min};I_{\max}]$.

За умови наявності репозиторію моделей, ці описи необхідно розширити до такого набору:

$$M_m^S=<V_0^S,F^S,G^S,F,I_{\min},I_{\max},G_{\min},G_{\max},\Lambda_0,M_a,M_o,M_c,A_{par}\}>, \tag{16}$$

де $G_{\min}=\{g_j^{low},j=1,...,m\}$, $G_{\max}=\{g_j^{up},j=1,...,m\}$; Λ_0 - початкова множина структур; M_a - сфера математичного моделювання; M_o - набір об'єктів, для яких може бути використана модель; M_c - набір характеристик експерименту; A_{par} - параметри алгоритму структурної ідентифікації.

Як вище зазначено, параметри алгоритму ідентифікації є такими:

$$A_{par}=\{Limit,S,MCN\} \tag{17}$$

Сферу математичного моделювання M_a описуємо таким кортежом

$$Ma=\langle IdMa,NmMa\rangle, \tag{18}$$

де $IdMa$ – ідентифікатор предметної області; $NmMa$ – предметна область .

Набір об'єктів M_o, для яких може бути використана модель задаємо таким кортежом:

$$Mo=\left\langle IdMo,NmMo,IdMa,V_0^S,F^S,G^S,F,I_{\min},I_{\max},G_{\min},G_{\max},\Lambda_0\right\rangle \tag{19}$$

де $IdMo$ – ідентифікатор об'єкта моделювання; $NmMo$ це інформація, яка описує структуру об'єкта використання моделі.

Набір характеристик експерименту M_C матиме таку структуру:

$$M_C = \left\langle IdMc, MA, Dsc, IdMa, NA, IdMo, M_m^S \right\rangle \tag{20}$$

де $IdMc$ - ідентифікатор ознак, що впливають на умови проведення експериментів; MA - основні характеристики; NA - альтернативні характеристики, Dsc - твердження, що описує умови використання математичної моделі.

Спираючись на вище описане представлення предметної області для побудови ІДМ, з урахуванням існуючого депозитарію моделей, процес ідентифікації моделі буде залежати від предметної області, об'єкта та умов отримання результатів експерименту. Замість фази ініціалізації в алгоритмі бджолиної колонії встановлюємо вище зазначені характеристики M_a, M_O, M_C, після чого визначаємо умови виконання процесу ідентифікації. Для пошуку прийнятних умов для побудови моделі використовуємо поняття семантичної близькості [14,15]. При виявленні семантично близьких сфер моделювання, об'єктів чи умов отримання експерименту на фазі ініціалізації вище описаного методу розглядається один із можливих варіантів розв'язування задачі.

Варіант1. Задання початкових умов для ІДМ семантично близької задачі, знайденої в репозиторії. Якщо результат задовільний, тобто знайдена в репозиторії ІДМ має достатні прогностичні властивості для інших початкових даних, - завершення процедури ідентифікації. В протилежному випадку перехід до варіанту 2.

Варіант 2. Задання початкових умов та параметрів обчислювального алгоритму для структури ІДМ семантично близької задачі, знайденої в репозиторії та ідентифікація параметрів ІДМ. Якщо результат задовільний, тобто отримана модель з іншими значеннями параметрі та зі структурою ідентичною для знайденої в репозиторії ІДМ має достатні прогностичні властивості, - завершення процедури ідентифікації. В протилежному випадку перехід до варіанту 3.

Варіант 3. Задання початкових умов та параметрів обчислювального алгоритму, набору структурних елементів ІДМ семантично близької задачі, знайденої в репозиторії та структурна ідентифікація ІДМ згідно до обчислювальної схеми наступних трьох фаз.

Як бачимо, у випадку третього варіанту буде найвища обчислювальна складність реалізації еволюційних обчислень.

Експериментальні дослідження та оцінка ефективності

Розглянемо приклад застосування запропонованого підходу до моделювання об'єкта з розподіленими параметрами, яким є розподіл концентрації діоксиду азоту, який спричинено шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту в заданій центральній ділянці міста Тернополя на автотранспортному кільці, до якого примикають вулиці С. Крушельницької, Збаразької, Бродівської та Галицької. Для отримання експериментальних даних використали комплекс вимірювання концентрації діоксиду азоту на базі модуля Sniffer4D Hyper-local Air Quality Analyzer з встановленим сенсором вимірювання діоксиду азоту та із телеметричним субмодулем для передачі даних на базову станцію у вигляді персонального комп'ютера із інстальованим стандартним програмним забезпеченням Sniffer4D Mapper. Сам модуль було встановлено на борту мобільної системи - квадрокоптера DJI M100. Вимірювання проводили з 13.00 до13.10 на висоті h=1,5 метра від дорожнього полотна на ділянці розміром 32,43м на 32,43м (1051.883 Square Meter) (із дискретизацією заданої ділянки по 20 точок для кожної координати. Варто зазначити, що цей час характеризується відносно помірним трафіком руху автотранспорту.

Характеристики умов проведення вимірювань були такі: середні координати квадратної ділянки (в глобальній системі координат за навігаційною системою аеромобільного комплексу): Longitude (довгота): 25.5997; Latitude (широта): 49.5597; середня температура повітря у точках вимірювання: -2,6 С; відносна вологість повітря 72,4 %; атмосферний тиск: 97473 Pa; вітер північного напряму, швидкість вітру 3 м/с.

Результати експерименту у вигляді виміряних концентрацій діоксиду азоту $z_{i,j,h,k}$, $i = 0...,19$, $j = 0,...,19$, $h = const$, $k = const$ наведено на рисунку 1. Для отримання інтервалів можливих значень розподілу концентрацій діоксиду азоту $[z^-_{i,j,h,k}; z^+_{i,j,h,k}]$ $i = 0...,19$, $j = 0,...,19$, $h = const$, $k = const$ за формулою (1), враховано відносну похибку вимірювань 15%.

i\j	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0	20,2	20,7	20,2	19,7	20,7	19,7	19,7	21,2	20,2	19,7	21,2	19,7	19,3	19,7	19,7	20,7	20,2	20,2	20,7	21,2
1	20,7	21,2	22,1	22,6	23,5	24,4	25,9	26,3	26,3	27,3	27,7	27,7	27,7	29,1	28,7	28,7	29,1	28,7	29,6	29,1
2	28,7	29,1	28,7	28,2	29,1	29,6	28,7	29,1	28,7	28,7	29,1	28,7	28,2	28,7	27,7	27,3	28,2	27,7	27,7	27,7
3	27,7	28,2	27,3	27,3	28,7	27,7	27,7	28,2	28,2	27,7	27,7	27,7	27,3	28,2	27,3	27,3	28,2	27,3	26,8	27,3
4	26,8	27,3	28,2	29,1	30,6	30,6	30,6	32	32,4	32,4	34,3	34,8	35,3	36,2	35,3	35,3	36,2	36,2	37,1	37,6
5	38,1	39	39	40,4	40,9	41,4	41,8	42,8	42,8	42,8	43,7	44,2	44,2	44,7	44,7	44,2	44,7	45,1	44,2	45,1
6	43,3	42,8	43,7	42,8	41,8	42,8	41,8	41,4	41,8	40,4	41,4	41,8	40,9	41,8	42,3	42,3	44,7	44,7	46,1	47,5
7	48,4	49,8	50,8	50,8	51,2	52,2	52,2	52,2	53,6	53,6	53,6	53,6	53,1	54,1	53,1	52,7	54,1	53,1	52,7	53,1
8	53,1	53,1	52,7	52,2	52,2	52,2	51,7	51,7	52,2	52,2	52,2	52,7	51,7	51,2	50,8	49,8	50,3	49,4	48,4	49,4
9	48,4	47,5	48	48,9	48,9	48,9	48,4	48,9	49,8	49,4	49,8	50,3	50,3	51,2	52,2	51,7	51,7	52,7	54,1	55,9
10	55,9	56,9	59,7	60,2	61,1	64,9	66,3	68,6	71,5	72,9	76,2	79	79	79,9	82,7	82,7	83,2	84,6	84,2	84,2
11	84,2	84,2	85,1	84,2	83,7	84,6	83,7	83,2	83,2	83,7	82,7	82,3	82,3	81,3	80,9	79,9	79,5	79,5	78,5	78
12	78,5	77,6	77,6	75,7	75,2	75,2	74,8	74,3	74,3	73,3	72,9	73,3	71,9	71,5	70,1	68,6	68,2	68,6	65,8	64,9
13	64,9	63,9	63	63	62,1	61,1	60,6	60,6	61,6	60,6	59,7	60,2	60,2	59,2	60,2	59,7	59,2	59,2	58,8	58,8
14	59,2	58,8	58,3	58,3	57,4	57,4	56,9	56,4	55	54,5	54,5	54,5	53,1	52,2	52,7	52,2	50,3	50,8	50,8	48,9
15	48,9	48,4	47,5	47,5	46,5	46,1	46,5	45,6	46,1	47,5	47	46,1	46,5	45,1	46,1	45,1	44,2	45,1	44,2	43,7
16	43,7	43,7	42,3	41,8	41,4	40,9	40,9	40,4	40,4	40	39,5	38,6	39,5	39	38,6	38,6	38,1	39,5	38,6	37,6
17	39	39	38,6	38,1	39	38,1	38,1	38,6	39	40	39	38,6	39,5	39	39	39	39,5	39	39	38,6
18	39	40	39,5	39,5	40	40	40	40,9	40,4	40	40,9	40,9	41,4	41,8	41,8	42,8	42,3	41,8	42,3	42,8
19	42,8	44,2	45,1	45,6	48	48,4	48,9	51,2	51,2	51,2	52,7	52,2	51,7	51,7	51,7	52,2	51,7	51,7	52,7	52,2

Рис. 1. Результати вимірювання $z_{i,j,k}$ концентрацій діоксиду азоту NO2 в $10^{-6}\frac{g}{m^3}$ на заданих дискретах

Для побудови ІДМ, що прогнозує розподіл концентрацій діоксиду азоту на вказаній ділянці необхідно розв'язати задачу структурної ідентифікації цієї моделі. Зважаючи на той факт, що у нашому розпоряджені є репозитарій ІДМ спробуємо спростити процес структурної ідентифікації за вище описаним методом. Для цього, спочатку розглянемо запит до побудованої семантичної мережі, яка розроблена для управління наявним репозитарієм ІДМ.

Відгуком мережі є семантичний опис «найближчої» до необхідної ІДМ:

$M_m^S =< V_0^S, F^S, G^S, F, I_{\min}, I_{\max}, G_{\min}, G_{\max}, \Lambda_0, M_a, M_o, M_c, A_{par}\} >$, зокрема, сама модель є у такому вигляді:

$$[\hat{v}_{ijhk}] = 0{,}7952 + 0{,}3128[\hat{v}_{i,j-1hk}] - 0{,}1935[\hat{v}_{i-1,jhk}] + 0{,}17[\hat{v}_{i-1,j-1hk}] + 0{,}7149[\hat{v}_{i,j-2hk}] + 0{,}0171[V_{i,j-3hk}]$$

Тепер реалізуємо процедури ідентифікації моделі на основі запропонованого підходу. Спочатку розглядаємо варіант 1. Задаємо початкові умови на основі даних рисунку 1 для ІДМ, тобто семантично близької задачі, знайденої в репозиторії:

$$[\hat{v}_{ijhk}] = [z_{i,j,h,k} - z_{i,j,h,k} * 0{,}005;\ z_{i,j,h,k} + z_{i,j,h,k} * 0{,}005],\ i = 0, j = 0, \ldots, 2, h = const, k = const \qquad (21)$$

В результаті проведених обчислень виявляється, що знайдена в репозиторії модель є адекватною для вищеописаного випадку. Результати обчислень наведено на рис. 2. Як бачимо прогнозовані значення знаходяться в межах експериментальних, тобто обмежувальні умови виконуються.

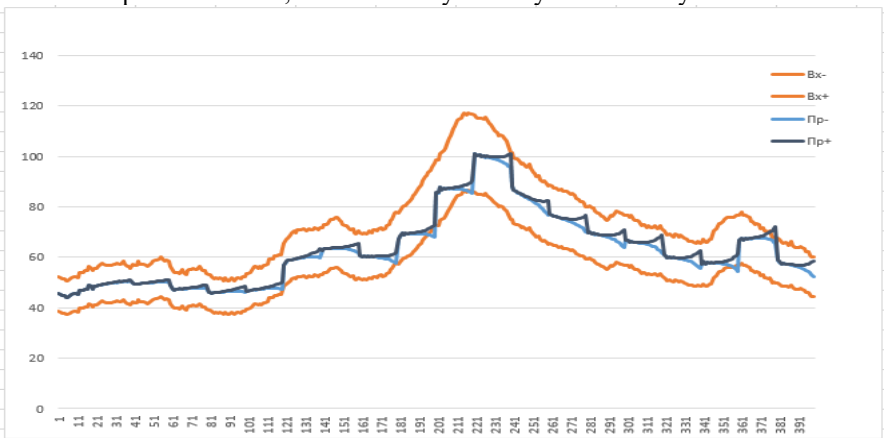


Рис. 2. Результати прогнозування на основі отриманої в репозиторії моделі і їх зіставлення з експериментальними даними

Таким чином на цьому процедуру ідентифікації завершуємо. Можемо констатувати, що для структурної ідентифікації такої моделі використано у близько 1000 раз менше часу, аніж для подібної моделі, яка знаходилася в репозиторії, що підтверджує високу ефективність запропонованого методу. Варто також зазначити, що семантична подібність між отриманою і знайденою ІДМ в репозитарії є дуже висока, тому і ефективність методу є також дуже висока. В подальших дослідженнях необхідно провести оцінку ефективності запропонованого методу структурної ідентифікації у випадках низької семантичної подібності.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Незважаючи на сучасний прогрес у більшості сфер використання та контролю процесу математичного моделювання, контроль знань у цій галузі є дуже перспективним напрямом науково-практичних досліджень.

В рамках даної роботи запропоновано підхід до побудови математичних та комп'ютерних моделей із застосуванням та поєднанням методів аналізу інтервальних даних та методів онтологічного аналізу з метою підвищення прогностичних характеристик моделей. Проведено ряд експериментальних досліджень, здійснено оцінку ефективності запропонованих підходів на прикладі побудови моделі динаміки концентрацій шкідливих викидів автотранспорту.

У подальших дослідженнях планується масштабування розробленого програмного середовища для моделювання об’єктів із розподіленими параметрами у вигляді інтервальних різницевих рівнянь на основі поєднання онтологічного підходу та аналізу інтервальних даних.

Література

1. Дивак, М. П. Ідентифікація дискретних моделей систем з розподіленими параметрами на основі аналізу інтервальних даних [Текст] : монографія / М. П. Дивак, Н. П. Порплиця, Т. М. Дивак. – Тернопіль: Економічна думка ТНЕУ, 2018. – 220 с.
2. Дивак М. П. Задачі математичного моделювання статичних систем з інтервальними даними: монографія / М. П. Дивак. - Т. : Економ. думка ТНЕУ, 2011. - 215 с.
3. Дивак М. П. Прикладні задачі структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей складних об'єктів [Електронний ресурс] : монографія / М. П. Дивак, А. В. Пукас, Н. П. Парплиця, А. М. Мельник. - Тернопіль : Університетська думка, 2021. - 212 с.
4. Dyvak M, Rot A, Pasichnyk R, Tymchyshyn V, Huliiev N, Maslyiak Y. Monitoring and Mathematical Modeling of Soil and Groundwater Contamination by Harmful Emissions of Nitrogen Dioxide from Motor Vehicles. Sustainability. 2021; 13(5):2768. https://doi.org/10.3390/su13052768
5. Ivakhnenko, G. Ivakhnenko, “The Review of Problems Solvable by Algorithms of the Group Method of Data Handling (GMDH),” Pattern Recognition and Image Analysis, 5 (4), pp. 527–535, 1995.
6. A. Ivakhnenko, V. Lapa, “Cybernetics and Forecasting Techniques,” Modern Analytic and Computational Methods in Science and Mathematics, v.8 ed. American Elsevier, 1967.
7. Dyvak, M.; Porplytsya, N.; Maslyiak, Y.; Kasatkina, N. Modified artificial bee colony algorithm for structure identification of models of objects with distributed parameters and control. In Proceedings of the 2017 14th International Conference, The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM), Lviv, Ukraine, 21–25 February 2017; pp. 50–54.
8. D. Karaboga, “An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization,” Technical Report—TR06; Erciyes University: Kayseri, Turkey, 2005
9. Mykola Dyvak, Andriy Melnyk, Artur Rot, Marcin Hernes, Andriy Pukas, "Ontology of mathematical modelling based on interval data", Complexity, vol. 2022, Article ID 8062969, 24 pages, 2022
10. Matviychuk, V.K.; Khar, I.O. Monograph. In Atmospheric Air Pollution; National Academy of Management: Kyiv, Ukraine, 2013; 272p.
11. De Corato, U. Towards New Soil Management Strategies for Improving Soil Quality and Ecosystem Services in Sustainable Agriculture: Editorial Overview. Sustainability 2020, 12, 9398.
12. Moranda, A.; Cianci, R.; Paladino, O. Analytical Solutions of One-Dimensional Contaminant Transport in Soils with Source Production-Decay. Soil Syst. 2018, 2, 40.
13. Smit, R.; Kingston, P. Measuring On-Road Vehicle Emissions with Multiple Instruments Including Remote Sensing. Atmosphere 2019, 10, 516.
14. SW. Tu, H. Eriksson, JH. Gennari, Y. Shahar, MA. Musen, “Ontology-based configuration of problem-solving methods and generation of knowledge-acquisition tools: application of PROTEGE-II to protocol-based decision support,” Artif Intell Med., 7(3), pp. 257-89, 1995, doi: 10.1016/0933-3657(95)00006-r. PMID: 7581625.
15. A. Sattar, E. Salwana, M. Surin, M. Ahmad, M. Ahmad, A. Mahmood, “Comparative Analysis of Methodologies for Domain Ontology Development: A Systematic Review,” International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA), 11(5), 2020.

References

1. Dyvak, M. P. Identyfikatsiia dyskretnykh modelei system z rozpodilenymy parametramy na osnovi analizu intervalnykh danykh [Tekst] : monohrafiia / M. P. Dyvak, N. P. Porplytsia, T. M. Dyvak. – Ternopil: Ekonomichna dumka TNEU, 2018. – 220 s.

2. Dyvak M. P. Zadachi matematychnoho modeliuvannia statychnykh system z intervalnymy danymy : monohrafiia / M. P. Dyvak. - T. : Ekonom. dumka TNEU, 2011. - 215 c.

3. Dyvak M. P. Prykladni zadachi strukturnoi ta parametrychnoi identyfikatsii intervalnykh modelei skladnykh obiektiv [Elektronnyi resurs] : monohrafiia / M. P. Dyvak, A. V. Pukas, N. P. Parplytsia, A. M. Melnyk. - Ternopil : Universytetska dumka, 2021. - 212 s.

4. Dyvak M, Rot A, Pasichnyk R, Tymchyshyn V, Huliiev N, Maslyiak Y. Monitoring and Mathematical Modeling of Soil and Groundwater Contamination by Harmful Emissions of Nitrogen Dioxide from Motor Vehicles. Sustainability. 2021; 13(5):2768. https://doi.org/10.3390/su13052768

5. Ivakhnenko, G. Ivakhnenko, "The Review of Problems Solvable by Algorithms of the Group Method of Data Handling (GMDH)," Pattern Recognition and Image Analysis, 5 (4), pp. 527–535, 1995.

6. A. Ivakhnenko, V. Lapa, "Cybernetics and Forecasting Techniques," Modern Analytic and Computational Methods in Science and Mathematics, v.8 ed. American Elsevier, 1967.

7. Dyvak, M.; Porplytsya, N.; Maslyiak, Y.; Kasatkina, N. Modified artificial bee colony algorithm for structure identification of models of objects with distributed parameters and control. In Proceedings of the 2017 14th International Conference, The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM), Lviv, Ukraine, 21–25 February 2017; pp. 50–54.

8. D. Karaboga, "An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization," Technical Report—TR06; Erciyes University: Kayseri, Turkey, 2005

9. Mykola Dyvak, Andriy Melnyk, Artur Rot, Marcin Hernes, Andriy Pukas, "Ontology of mathematical modelling based on interval data", Complexity, vol. 2022, Article ID 8062969, 24 pages, 2022

10. Matviychuk, V.K.; Khar, I.O. Monograph. In Atmospheric Air Pollution; National Academy of Management: Kyiv, Ukraine, 2013; 272p.

11. De Corato, U. Towards New Soil Management Strategies for Improving Soil Quality and Ecosystem Services in Sustainable Agriculture: Editorial Overview. Sustainability 2020, 12, 9398.

12. Moranda, A.; Cianci, R.; Paladino, O. Analytical Solutions of One-Dimensional Contaminant Transport in Soils with Source Production-Decay. Soil Syst. 2018, 2, 40.

13. Smit, R.; Kingston, P. Measuring On-Road Vehicle Emissions with Multiple Instruments Including Remote Sensing. Atmosphere 2019, 10, 516.

14. SW. Tu, H. Eriksson, JH. Gennari, Y. Shahar, MA. Musen, "Ontology-based configuration of problem-solving methods and generation of knowledge-acquisition tools: application of PROTEGE-II to protocol-based decision support," Artif Intell Med., 7(3), pp. 257-89, 1995, doi: 10.1016/0933-3657(95)00006-r. PMID: 7581625.

15. A. Sattar, E. Salwana, M. Surin, M. Ahmad, M. Ahmad, A. Mahmood, "Comparative Analysis of Methodologies for Domain Ontology Development: A Systematic Review," International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA), 11(5), 2020, http://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2020.011051

https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-70-2-3
УДК 004.9: 347.151

Єлизавета ГНАТЧУК
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0003-2989-3183
e-mail: liza_veta@ukr.net

ПРАВИЛА ТА МЕТОД ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО МОЖЛИВОСТІ СУРОГАТНОГО МАТЕРИНСТВА НА ОСНОВІ ЦИВІЛЬНОГО ПРАВА

Розроблені правила та метод підтримки прийняття рішень щодо можливості сурогатного материнства на основі цивільного права, які ґрунтуються на врахуванні вимог, наданих експертами галузі медичного права щодо процедури сурогатного материнства, унеможливлюють прийняття некоректних (неправомірних) рішень щодо можливості/неможливості сурогатного материнства. Використання розробленого методу забезпечує обґрунтоване та юридично коректне рішення щодо можливості або неможливості проведення процедури сурогатного материнства, підвищує рівень коректності прийнятих рішень щодо сурогатного материнства, формалізує процес прийняття рішень щодо можливості сурогатного материнства та є теоретичним підґрунтям для розроблення системи підтримки прийняття рішення щодо можливості сурогатного материнства на основі цивільного права.

Ключові слова: підтримка прийняття рішень, сурогатне материнство, система підтримки прийняття рішень.

Yelyzaveta HNATCHUK
Khmelnytskyi National University

RULES AND METHOD OF SUPPORTING THE DECISION-MAKING ABOUT THE POSSIBILITY OF SURROGATE MOTHERHOOD BASED ON THE CIVIL LAW

The possibility of having a child is an important indicator of the reproductive health of the population. 10-15% of Ukrainian families are infertile. Most of them resort to the use of assisted reproductive technologies, which are currently developing rapidly in Ukraine. The essence of surrogate mothrhood is that the fertilized egg is transplanted into the body of a genetically foreign woman who gives birth and gives birth not for herself, but for a couple who for various reasons can not have children. The productivity of health workers is significantly increased through the successful implementation and use of decision support systems.

None of the known decision support systems is designed to support decision-making on the possibility of surrogacy, taking into account the rules of civil law. So, today, the urgent task is to develop a system of supporting the decision-making about the possibility of surrogate motherhood based on the civil law, for which we must first develop rules and methods of supporting the decision-making about the possibility of surrogate motherhood based on the civil law, which is the purpose of this study.

Developed rules and methods of supporting the decision-making about the possibility of surrogate motherhood based on the civil law, on the basis of the requirements of medical law experts on the procedure of surrogate motherhood, make it impossible to make incorrect (illegal) decisions on the possibility / impossibility of surrogate motherhood. The use of the developed method provides a reasonable and legally correct decision on the possibility or impossibility of surrogate motherhood, increases the correctness of decisions on surrogate motherhood, formalizes the decision-making process on the possibility of surrogate motherhood and is the theoretical basis for developing a system of supporting the decision-making about the possibility of surrogate motherhood based on the civil law.

Keywords: supporting the decision-making, surrogate motherhood, decision support system.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Важливим показником стану репродуктивного здоров'я населення є можливість народження дитини. 10-15% українських сімей є безплідними. Більшість з них вдаються до застосування допоміжних репродуктивних технологій, які наразі бурхливо розвиваються в Україні.

На сьогоднішній день у світі існує велика кількість видів допоміжних репродуктивних технологій, що застосовуються при лікуванні безпліддя. Аналізуючи зміст Наказу МОЗ України № 787 [1] можна зробити висновок, що в Україні застосовуються наступні різновиди допоміжних репродуктивних технологій [2]: екстракорпоральне запліднення; внутрішньоматкова інсемінація; донація гамет або ембріонів; сурогатне материнство – перенесення гамет, зигот або ембріонів до фаллопієвої труби.

Суть сурогатного материнства полягає у тому, що запліднена яйцеклітина пересаджується до організму генетично сторонньої жінки, яка виношує і народжує дитину не для себе, а для подружжя, яке з різних причин не може мати дітей.

Головна проблема сурогатного материнства в Україні — це відсутність чіткого механізму дій, особливо коли учасниками програми планують бути громадяни тих країн, де таку процедуру заборонено (Франції, Швеції, Угорщини, Німеччини, Ісландії, Італії, Японії, Швейцарії, Пакистану, Саудівської Аравії, Сербії) [3]. Низька обізнаність населення стосовно процедури сурогатного материнства породжує дискусії та появу дезінформації, що шкодить її меті, а саме – боротьбі з безпліддям [4].

Для захисту майнових та немайнових прав й законних інтересів осіб, які беруть участь у програмі сурогатного материнства, можна застосувати такі юридичні засоби:

1) підготовка договору між сурогатною матір'ю та біологічними батьками про виношування дитини;

2) оформлення письмової згоди біологічних батьків на виношування сурогатною матір'ю ембріона, отриманого в результаті екстракорпорального запліднення (рекомендаційний характер);

3) оформлення письмової згоди сурогатної матері на виношування ембріона біологічних батьків;

4) підготовка заяви сурогатної матері про відсутність претензій до біологічних батьків після закінчення програми сурогатного материнства (рекомендаційний характер);

5) оформлення згоди сурогатної матері на запис біологічних батьків як батьків дитини в органах реєстрації актів громадянського стану (рекомендаційний характер) [5].

Лікар (медична установа) як виконавець послуги зобов'язана вчасно надавати необхідну, повну і достовірну інформацію про послуги для того, щоб забезпечити право споживача на вибір медичного закладу та лікуючого лікаря. Ця інформація повинна бути надана ще до укладення договору про застосування допоміжних репродуктивних технологій, оскільки вона повинна бути висвітлена і в договорі про сурогатне материнство. Сторони мають отримати повну інформацію про можливі варіанти запліднення та отримати всебічну та детальну консультацію від лікаря (медичного закладу), який буде здійснювати процедуру імплантації ембріону сурогатній матері. Виконавець зобов'язаний надавати медичні послуги з використанням сучасних методів діагностики і лікування, в повному обсязі відповідно до договору, а також забезпечувати участь висококваліфікованого медичного персоналу для надання послуг за цим договором [5].

Продуктивність праці медичних працівників значно підвищується завдяки успішному впровадженню та використанню систем підтримки прийняття рішень [6].

В [7] авторами було проведено огляд основних юридичних проблем сурогатного материнства; визначено необхідні вимоги та юридичні рекомендації до потенційної сурогатної матері, до потенційних батьків, до потенційного виконавця послуги.

Крім цього, автори [7] провели огляд відомих систем підтримки прийняття рішень для галузі медичного права, який показав, що жодна з відомих систем підтримки прийняття рішень не призначена для підтримки прийняття рішень щодо можливості сурогатного материнства з врахуванням норм цивільного права.

Формування цілей статті

Отже, на сьогодні *актуальною задачею* є розроблення системи підтримки прийняття рішень щодо можливості сурогатного материнства на основі норм цивільного права, для якої спочатку слід розробити правила та метод підтримки прийняття рішень щодо можливості сурогатного материнства на основі цивільного права, що і є *метою даного дослідження*.

Правила і метод підтримки прийняття рішень щодо можливості сурогатного материнства на основі цивільного права

Аналіз предметної галузі цивільного права щодо можливості донорства і трансплатнтації, проведений у [7], показав, що *для можливості проведення сурогатного материнства мають бути виконані наступні умови*:

1) потенційна сурогатна мати має бути повнолітньою;

2) потенційна сурогатна мати має бути дієздатною;

3) потенційна сурогатна мати повинна мати власну здорову дитину;

4) потенційна сурогатна мати повинна добровільно оформити письмову заяву;

5) потенційна сурогатна мати не повинна мати медичних протипоказань до вагітності та пологів;

6) потенційна сурогатна мати не повинна бути донором яйцеклітини;

7) потенційна сурогатна мати повинна виконувати всі розпорядження лікаря;

8) потенційна сурогатна мати повинна надати повну інформацію про стан свого здоров'я;

9) потенційні батьки повинні мати медичні показання до сурогатного материнства;

10) потенційні батьки повинні мати генетичний зв'язок з майбутньою дитиною;

11) потенційні батьки повинні бути різностатевим подружжям;

12) сурогатне материнство повинне бути дозволене законодавством тієї країни, громадянами якої є потенційні батьки;

13) потенційні батьки повинні бути дієздатними;

14) вік обох потенційних батьків становить 21 і більше років;

15) потенційні батьки не повинні бути позбавлені батьківських прав (або повинні мати поновлені батьківські права);

16) потенційні батьки не повинні бути стороною договору сурогатного материнства, який було розірвано з їхньої вини;

17) потенційні батьки не повинні бути усиновлювачами (опікунами, піклувальниками, прийомними батька-ми, батьками-вихователями) іншої дитини, усиновлення або опіку над якими було скасовано або визнано недійсним з вини цього подружжя;

18) потенційні батьки не повинні перебувати на обліку або на лікуванні у психоневрологічному чи наркологічному диспансері;

19) потенційні батьки не повинні зловживати спиртними напоями або наркотичними засобами;

20) потенційні батьки повинні мати постійне місце проживання та постійний заробіток (дохід);

21) потенційні батьки не повинні страждати на хвороби, перелік затверджені Міністерством охорони здоров'я України;

22) потенційні батьки не повинні бути засуджені за злочини проти життя і здоров'я, волі, честі та гідності, статевої свободи та статевої недоторканності особи, проти громадської безпеки, громадського порядку та моральності, у сфері обігу наркотичних засобів, психотропних речовин, їх аналогів або прекурсорів, не повинні мати непогашеної чи не знятої в установленому законом порядку судимість за вчинення інших злочинів;

23) потенційні батьки не повинні потребувати постійного стороннього догляду за станом здоров'я;

24) потенційні батьки не можуть бути особами без громадянства;

25) медична установа, яка виконує та супроводжує сурогатне материнство, повинна надавати необхідну, повну і достовірну інформацію про послугу;

26) медична установа, яка виконує та супроводжує сурогатне материнство, повинна надавати інформацію про послугу до укладення договору про застосування допоміжних репродуктивних технологій;

27) медична установа, яка виконує та супроводжує сурогатне материнство, повинна надавати повну інформацію про можливі варіанти запліднення;

28) медична установа, яка виконує та супроводжує сурогатне материнство, повинна надавати всебічну та детальну консультацію щодо процедури імплантації ембріону сурогатній матері;

29) медична установа, яка виконує та супроводжує сурогатне материнство, повинна надавати медичні послуги з використанням сучасних методів діагностики і лікування;

30) медична установа, яка виконує та супроводжує сурогатне материнство, повинна забезпечувати участь висококваліфікованого медичного персоналу для надання послуг;

31) в договорі повинні бути описані наслідки невиношування плоду;

32) в договорі повинні бути описані наслідки народження неповноцінної дитини;

33) в договорі повинні бути описані наслідки народження дитини з фізичними або психічними вадами;

34) в договорі повинні бути описані наслідки народження дитини з вродженими аномаліями;

35) в договорі повинні бути описані наслідки мертвородження;

36) в договорі повинен бути описаний порядок дій на випадок, якщо народяться близнюки, то k=k+1.

Дерево рішень щодо можливості сурогатного материнства на основі цивільного права представлено на рис. 1.



Рис. 1. Дерево рішень щодо можливості сурогатного материнства на основі цивільного права

Метод підтримки прийняття рішень щодо можливості сурогатного материнства на основі цивільного права представлений на рис. 2.

ISSN 2219-9365

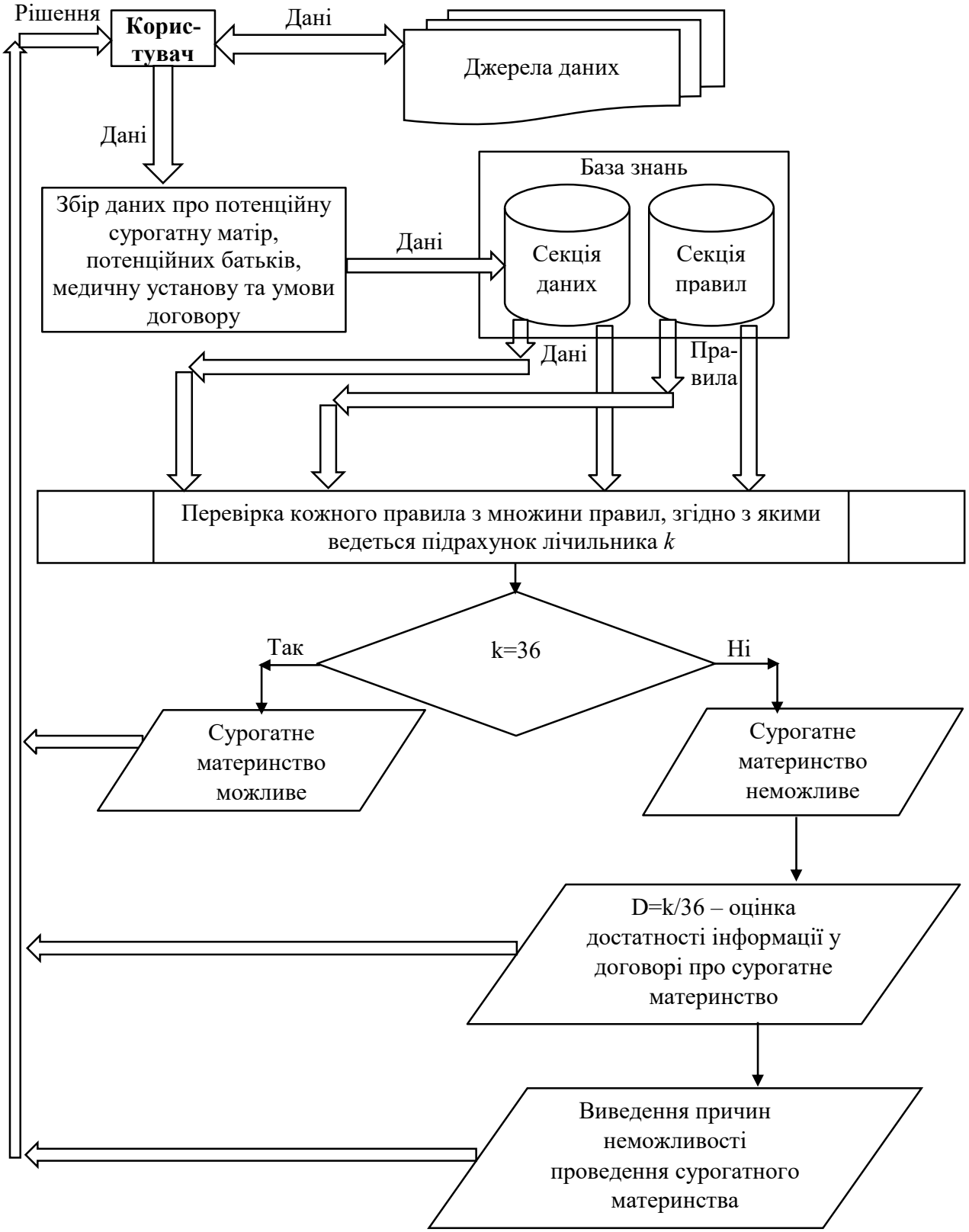


Рис. 2. Метод підтримки прийняття рішень щодо можливості сурогатного материнства на основі цивільного права

Розроблені правила та метод підтримки прийняття рішень щодо можливості сурогатного материнства на основі цивільного права відображають особливості прийняття рішення щодо проведення або не проведення сурогатного материнства на основі дотримання вимог цивільного законодавства для такої процедури, забезпечують адаптацію до особливостей предметної галузі та є теоретичним підґрунтям для

розроблення системи підтримки прийняття рішення щодо можливості сурогатного материнства на основі цивільного права.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Важливим показником стану репродуктивного здоров'я населення є можливість народження дитини. 10-15% українських сімей є безплідними. Більшість з них вдаються до застосування допоміжних репродуктивних технологій, які наразі бурхливо розвиваються в Україні. Суть сурогатного материнства полягає у тому, що запліднена яйцеклітина пересаджується до організму генетично сторонньої жінки, яка виношує і народжує дитину не для себе, а для подружжя, яке з різних причин не може мати дітей.

На сьогодні актуальною задачею є розроблення системи підтримки прийняття рішень щодо можливості сурогатного материнства на основі норм цивільного права, для якої спочатку слід розробити правила та метод підтримки прийняття рішень щодо можливості сурогатного материнства на основі цивільного права, що і є метою даного дослідження.

Розроблені правила та метод підтримки прийняття рішень щодо можливості сурогатного материнства на основі цивільного права, які ґрунтуються на врахуванні вимог, наданих експертами галузі медичного права щодо процедури сурогатного материнства, унеможливлюють прийняття некоректних (неправомірних) рішень щодо можливості/неможливості сурогатного материнства. Використання розробленого методу забезпечує обґрунтоване та юридично коректне рішення щодо можливості або неможливості проведення процедури сурогатного материнства, підвищує рівень коректності прийнятих рішень щодо сурогатного материнства, формалізує процес прийняття рішень щодо можливості сурогатного материнства та є теоретичним підґрунтям для розроблення системи підтримки прийняття рішення щодо можливості сурогатного материнства на основі цивільного права.

Література

1. Наказ Міністерства охорони здоров'я «Про затвердження Порядку застосування допоміжних репродуктивних технологій в Україні» від 09.09.2013 року №787 // Офіційний вісник України від 01.11.2013 р., –№ 82 – С. 446. – Стаття 3064.

2. Holovashchuk A. Auxiliary reproductive technologies as a way to exercise the right to maternity / A. Holovashchuk. – Proceddings of International Scientific and Practical Conference "Rule of law, legality and human rights", 2012. – P. 32.

3. Interpretation of the Ministry of Justice of Ukraine "Determination of the origin of the child by the parents at the state registration of birth" of 11.05.2012. URL: http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/n0016323-12.

4. Talanov Y. Surrogate motherhood: moral and legal aspects / Y. Talanov // Proceedings of Kharkiv National Pedagogical University named after S. Skovoroda "LAW". – 2012. – Vol. 19. – Pp. 23-25.

5. Герц А. А. Договірні зобов'язання у сфері надання медичних послуг / А.А. Герц. – Хмельницький : ФОП Мельник А. А., 2015. – 250 с.

6. Syerov Y. Method of the Data Adequacy Determination of Personal Medical Profiles / Y. Syerov, N. Shakhovska, S. Fedushko // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020. – Vol. 902. – Pp. 333-343.

7. Hovorushchenko T. Concept of Intelligent Decision Support System in the Legal Regulation of the Surrogate Motherhood / T. Hovorushchenko, A. Herts, Ye. Hnatchuk // CEUR-WS. – 2019. – Vol. 2488. – Pp. 57-68.

References

1. Order of the Ministry of Health "On Approval of the Procedure for the Use of Assisted Reproductive Technologies in Ukraine No. 787 of 09.09.2013", Official Journal of Ukraine, vol. 82, 2013, p. 446.

2. A. Holovashchuk. Auxiliary reproductive technologies as a way to exercise the right to maternity. – Proceddings of International Scientific and Practical Conference "Rule of law, legality and human rights", 2012. – P. 32.

3. Interpretation of the Ministry of Justice of Ukraine "Determination of the origin of the child by the parents at the state registration of birth" of 11.05.2012. URL: http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/n0016323-12.

4. Y. Talanov. Surrogate motherhood: moral and legal aspects // Proceedings of Kharkiv National Pedagogical University named after S. Skovoroda "LAW". – 2012. – Vol. 19. – Pp. 23-25.

5. A. Herts. Contractual obligations in the field of medical services. – Khmelnytskyi: FOP Melnyk A. A., 2015. – 250 p.

6. Y. Syerov, N. Shakhovska, S. Fedushko. Method of the Data Adequacy Determination of Personal Medical Profiles // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020. – Vol. 902. – Pp 333-343.

7. T. Hovorushchenko, A. Herts, Ye. Hnatchuk. Concept of Intelligent Decision Support System in the Legal Regulation of the Surrogate Motherhood // CEUR-WS. – 2019. – Vol. 2488. – Pp. 57-68.

https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-70-2-4
УДК 004.9: 004.056.53: 004.622

Віталій ОСЯДЛИЙ
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0001-7861-4684
e-mail: vitalik9865@gmail.com
Артем МОСКАЛЕНКО
Міжнародний науково-технічний університет ім. академіка Ю. Бугая
https://orcid.org/0000-0001-7433-3105
e-mail: a.moskalenko@istu.edu.ua

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ МЕДИЧНИМИ ДАНИМИ НА ОСНОВІ БЛОКЧЕЙН-ТЕХНОЛОГІЙ

В статті проведено аналіз архітектур відомих систем керування медичними даними на основі блокчейн-технологій, а також розроблено архітектуру системи для керування медичними даними на основі розроблених раніше авторами методів оцінювання достатності медичних даних (блок оцінювання достатності медичних даних), виконання транзакцій над медичними даними (блок виконання транзакцій над медичними даними), оцінювання репутації медичної установи як майнера блокчейну (блок оцінювання репутації медичної установи).
Ключові слова: блокчейн-технологія, медичні дані, система керування медичними даними.

Vitalii OSYADLYI
Khmelnytskyi National University
Artem MOSKALENKO
Academician Yuriy Bugay International Scientific and Technical University

SYSTEM OF MEDICAL DATA MANAGEMENT BASED ON BLOCKCHAIN TECHNOLOGIES

The introduction of the latest competitive information technologies in all spheres of human activity in order to automate processes, reduce the share of physical labor and minimize the impact of the human factor is the main strategic goal of the information society in Ukraine. Information systems are a key factor in the success of medical research and health care. The use of medical information systems provides doctors with up-to-date information in the field of medicine, increases the efficiency of the use of relevant medical resources, increases productivity, integrates Ukrainian medicine into the world medical space. The exchange of medical data in accordance with the Law on Medical Confidentiality requires experts to be thoroughly acquainted with its complex provisions for verification. Recently, increased attention to the technology of distributed registries has led to an understanding of the potential of blockchain technologies in building information systems for the health care system. Blockchain has already proven its effectiveness in health and science, helping to build trust and optimize cooperation. Moreover, this technology will continue to play a leading role in solving even more complex problems. Thus, the current challenge for Ukraine is the need to manage medical data, in particular, to perform transactions on medical data based on blockchain technologies.

The article analyzes the architectures of known medical data management systems based on blockchain technologies, as well as the architecture of the medical data management system based on previously developed by the authors methods of assessing the adequacy of medical data (medical data adequacy assessment unit), performing transactions on medical data execution of transactions over medical data), assessment of the reputation of the medical institution as a blockchain miner (block of assessment of the reputation of the medical institution).
Keywords: blockchain technologymedical data, systems of medical data management.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Впровадження новітніх конкурентоспроможних інформаційних технологій в усі сфери людської діяльності з метою автоматизації процесів, зменшення частки фізичної праці та мінімізації впливу людського фактору є основною стратегічною метою розвитку інформаційного суспільства в Україні [1].

Обмін медичними даними відповідно до закону про медичну конфіденційність вимагає від експертів глибокого знайомства з його складними положеннями для перевірки.

Інформаційні системи є ключовим фактором успіху медичних досліджень та охорони здоров'я. В даний час більшість цих систем використовують гетерогенні та власні моделі даних, які перешкоджають обміну даними та комплексному аналізу даних у наукових цілях. Через складність медичної термінології загальна кількість моделей медичних даних дуже велика. Наразі переважна більшість цих моделей недоступні науковому співтовариству. Метою порталу моделей медичних даних (https://medical-data-models.org) є сприяти обміну моделями медичних даних [2]. Перевагами порталу є покращення та прискорення розробки моделей медичних даних шляхом обміну передовими практиками, більш стандартизованих моделей даних із семантичними анотаціями та кращого обміну інформацією між інформаційними системами, зокрема, електронним збором даних та електронними медичними записами

системи. Зміст порталу потребує подальшого розширення, щоб охопити широке охоплення всіх відповідних медичних областей.

Використання медичних інформаційних систем надає лікарям актуальну інформацію в галузі медицини, підвищує ефективність використання актуальних медичних ресурсів, підвищує продуктивність роботи, інтегрує українську медицину в світовий медичний простір.

Останнім часом підвищена увага до технології розподілених реєстрів привела до розуміння потенціалу застосування блокчейн-технологій при побудові інформаційних систем для системи охорони здоров'я.

Блокчейн – це один із способів розподіленого зберігання даних. Цю технологію можна використовувати для запису та відстеження будь-якого виду інформації: від медичних показників до проведення виборів [3].

Типи блокчейн-мереж [4]:

1) загальнодоступні блокчейн-мережі – до загальнодоступної блокчейн-мережі може приєднатися будь-який користувач; до недоліків такої мережі належать високі вимоги до обчислювальної потужності, низький рівень конфіденційності транзакцій та слабкий захист; ці критерії важливі при використанні блокчейну у корпоративних середовищах;

2) приватні блокчейн-мережі – приватна блокчейн-мережа, як і загальнодоступна блокчейн-мережа, є децентралізованою одноранговою мережею; проте управління такою мережею здійснюється однією організацією, яка відповідає за управління учасниками, виконання протоколу консенсусу та підтримку загального реєстру; залежно від сценарію використання такий підхід дозволяє істотно підвищити достовірність і надійність інформації, що передається між учасниками; приватна блокчейн-мережа може перебувати за корпоративним брандмауером або навіть у локальному середовищі;

3) ексклюзивні блокчейн-мережі – компанії, що обирають приватний блокчейн, зазвичай налаштовують ексклюзивну мережу; важливо, що загальнодоступні блокчейн-мережі також можуть бути ексклюзивними; це накладає певні обмеження на коло осіб, яким дозволено брати участь у мережі або лише окремих транзакціях; учасникам необхідно отримати запрошення чи дозвіл на приєднання;

4) блокчейн-консорціум – відповідальність за адміністрування блокчейну може лежати на кількох організаціях; ці заздалегідь обрані організації встановлюють права доступу до виконання транзакцій чи доступу до даних; блокчейн-консорціум є ідеальним рішенням для компаній, коли всі учасники мають дозволи та несуть колективну відповідальність за блокчейн.

Переваги блокчейну [5]:

1) зміцнення довіри – приєднуючись до мережі блокчейна, користувач може бути впевнений в тому, що завжди отримуватиме достовірну та оперативну інформацію, а також у тому, що його конфіденційні записи блокчейна доступні лише вибраним ним учасникам мережі;

2) висока безпека – для здійснення транзакції потрібна згода всіх учасників щодо точності даних, і записи про всі перевірені транзакції є незмінними; ніхто, навіть системний адміністратор, не може видалити транзакцію;

3) підвищення ефективності – розподілений реєстр, доступ до якого мають усі учасники мережі, дозволяє не витрачати час на звіряння записів. Для прискорення транзакцій застосовується набір правил (смарт-контракт), який зберігається в мережі блокчейна і виконується в автоматичному режимі.

Блокчейн вже довів свою ефективність у галузі охорони здоров'я та природничих наук, допомагаючи зміцнити довіру та оптимізувати співпрацю. Більше того, ця технологія продовжить відігравати провідну роль у вирішенні ще складніших проблем [6].

Відтак, наразі актуальною задачею для України є потреба у керуванні медичними даними, зокрема, виконанням транзакцій над медичними даними, на основі блокчейн-технологій.

Система керування медичними даними на основі блокчейн-технологій

Перш ніж перейти до розроблення архітектури своєї системи для керування медичними даними, розглянемо архітектури відомих систем керування медичними даними на основі блокчейн-технологій.

Так, у роботі [7] представлено концепцію верифікації галузі охорони здоров’я за допомогою блокчейну та штучного інтелекту – рисунок 1, а також хмарна архітектура інтелектуальних агентів на основі згорткових нейронних мереж для збільшення показників медичних даних (рисунок 2), яка перевіряє медичні дані за допомогою алгоритмів штучного інтелекту в багатовимірних масивах; після перевірки дані розміщаються в блок блокчейну, потім в смарт-контракти і розподіляються окремо за допомогою консенсусних алгоритмів.

ISSN 2219-9365

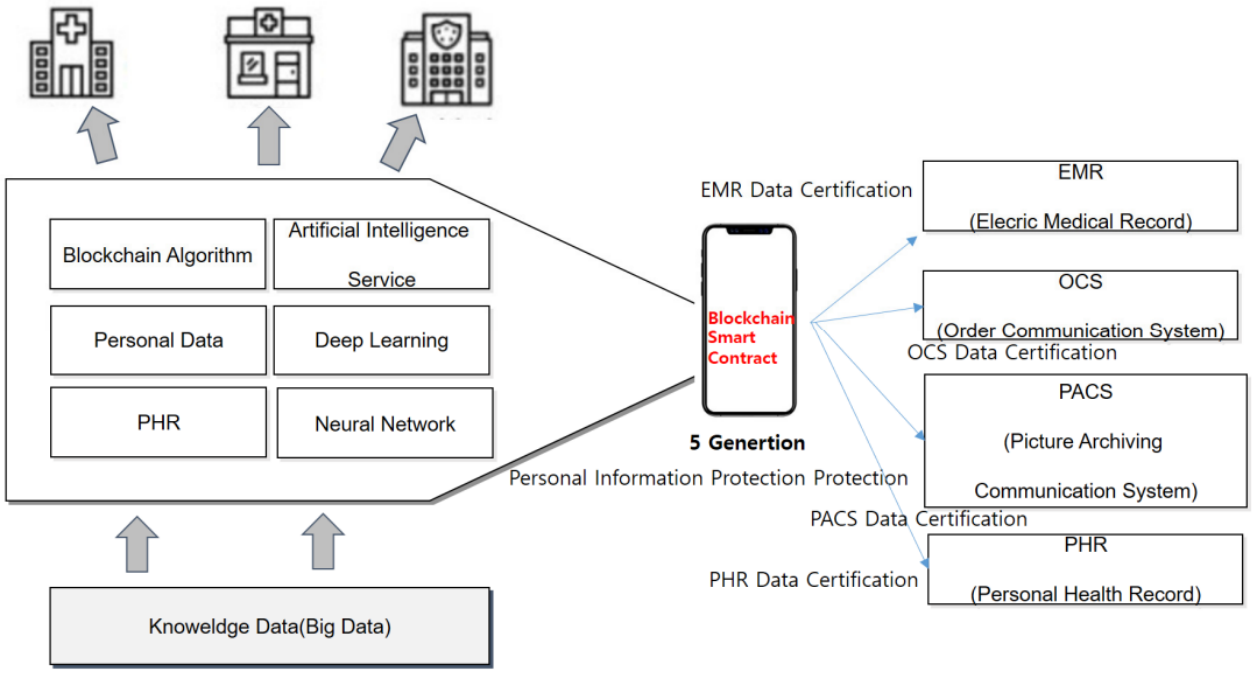


Рис. 1. Концепція верифікації галузі охорони здоров'я за допомогою блокчейну та штучного інтелекту [7]

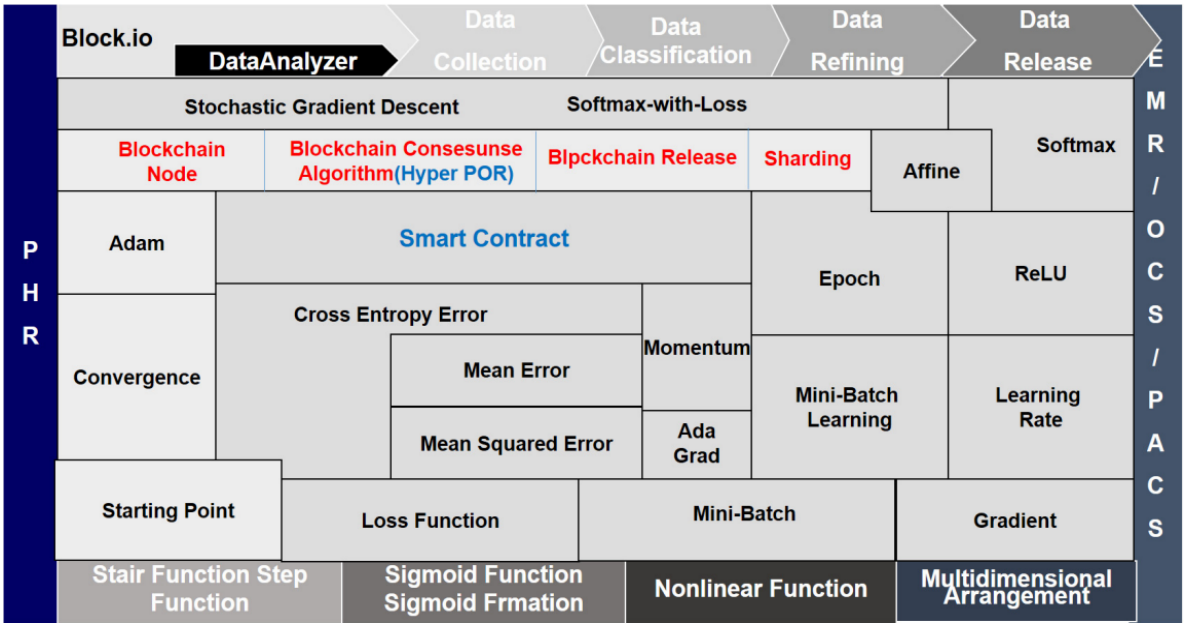


Рис. 2. Хмарна архітектура інтелектуальних агентів на основі згорткових нейронних мереж для збільшення показників медичних даних [7]

На рисунку 3 показано архітектуру системи, де блокчейн консорціум представлено як проміжне програмне забезпечення з певним рівнем довіри, а кожен медичний заклад виступає вузлом-учасником платформи [8].

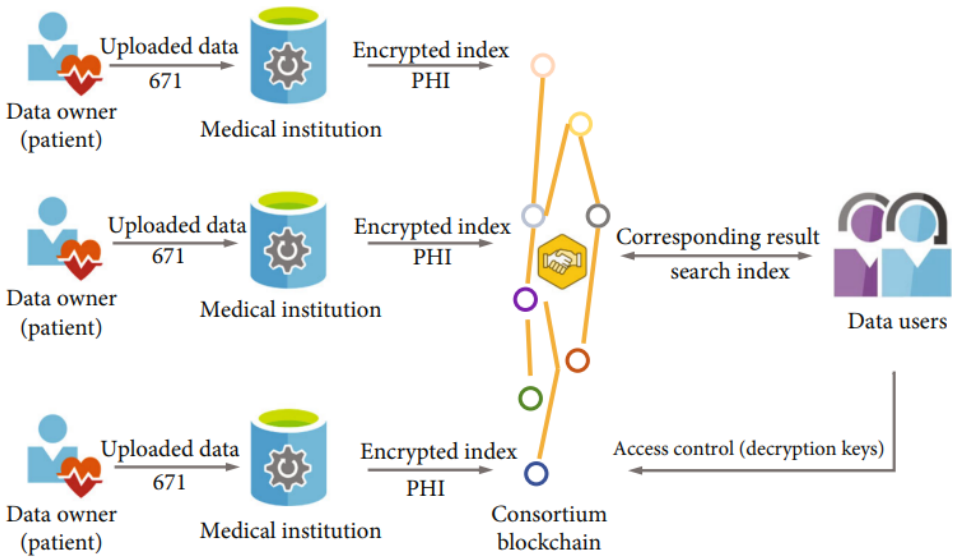


Рис. 3. Архітектура системи блокчейн-консорціуму медичних закладів [8]

Наступна архітектура системи на основі блокчейну складається з 3-х рівнів – рівня отримання даних, рівня зберігання даних, рівня обміну даними – рисунок 4 [9].

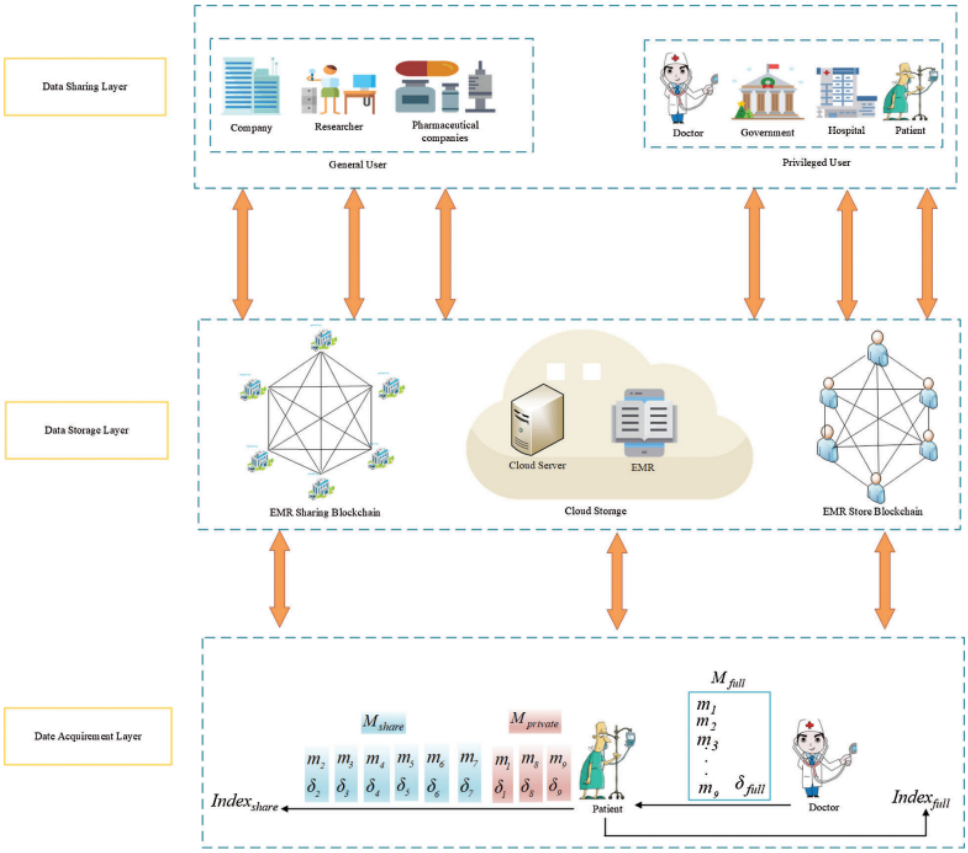


Рис. 4. Архітектура трирівневої системи на основі блокчейн-технологій [9]

У [10] представлена архітектура контролю доступу до медичних даних на основі блокчейну (рисунок 5). Щоб гарантувати, що політика та обмін дозволами є загальнодоступними в блокчейні, а також для економії ресурсів блокчейну, ці два ключові параметри зберігається у блокчейні. Інші медичні дані все ще зберігаються на сервері медичного закладу, а також сервер медичного закладу бере на себе роботу аутентифікації до контроля доступу. Після того, як користувач надішле запит на доступ, модуль керування

безпекою даних проаналізує запит на доступ, призначить ролі, проаналізує завдання та запитає доступ до медичних даних.

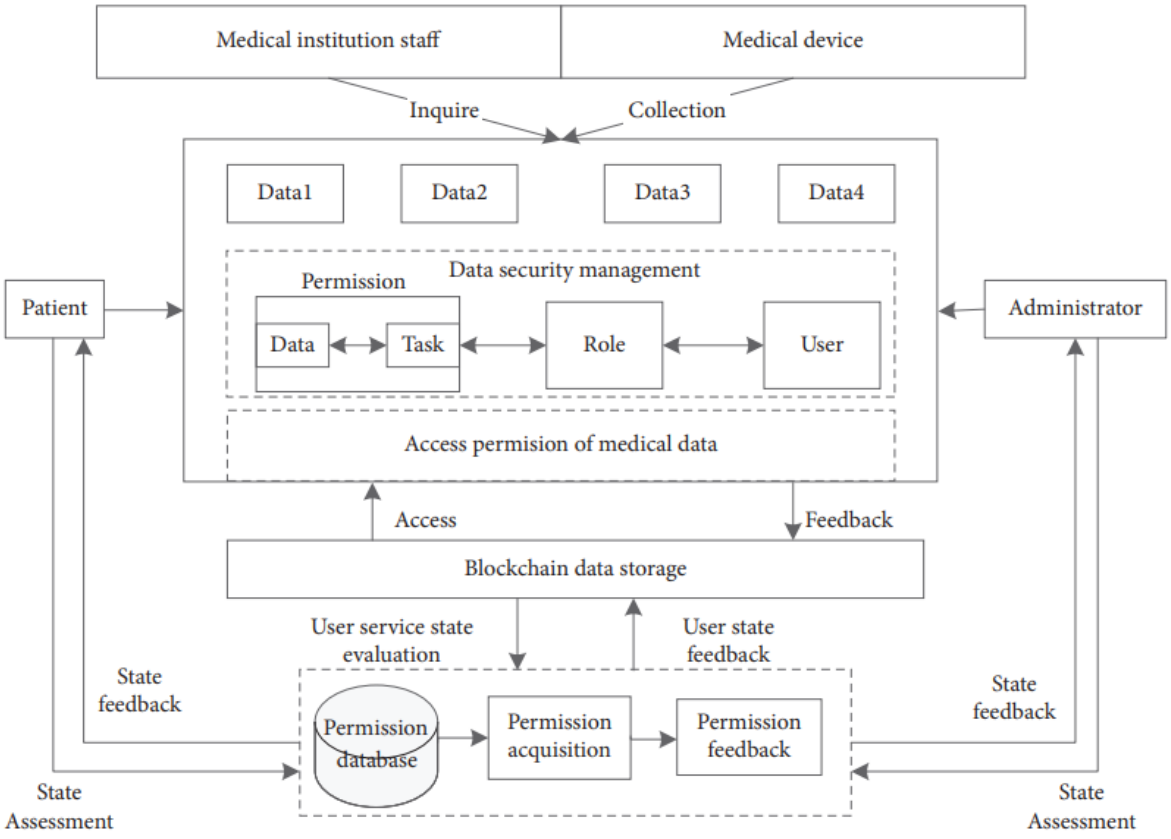


Рис. 5. Архітектура контролю доступу до медичних даних на основі блокчейну [10]

Для підвищення ефективності та безпеки обміну електронними медичними картками між системами контролю медичної інформації коректному управлінню даними сприятиме єдиний і сумісний підхід – наприклад, схема спільного використання електронних медичних карток на основі гібридної архітектури блокчейну [11]. Як показано на рисунку 6, усі учасники консорціуму пов'язані разом із набором правил і попередньо визначеними смарт-контрактами. Тільки уповноважені організації можуть отримати доступ до чутливих частин електронних медичних карток, щоб поставити медичний діагноз і скласти плани лікування.

Мережевий сервіс DynamiChain на основі блокчейну та великих даних для галузі охорони здоров'я представлено на рисунку 7. Запропонована медична блокчейн-мережа була спеціалізована для обробки великих даних огляду здоров'я, які складаються з тестів Inbody, аналізів крові та наборів даних функціональних тестів [12].

Три організації – постачальники даних, користувачі даних і лікарня – утворюють консорціум у DynamiChain (рисунок 8). В основному постачальники даних можуть встановлювати свої правила динамічної згоди. Лікарні можуть зберігати записи передачі медичних даних і керувати передачею даних загального огляду здоров'я. Користувачі даних можуть порівнювати хеші даних огляду здоров'я та читати дані огляду відповідно. До консорціуму приєднуються всі три організації через один канал. Організації встановлюють власний одноранговий пристрій у своєму центрі обробки даних. Додаткову участь у консорціумі можна встановити за допомогою блоку конфігурації, що зберігається в службі замовлення [12].

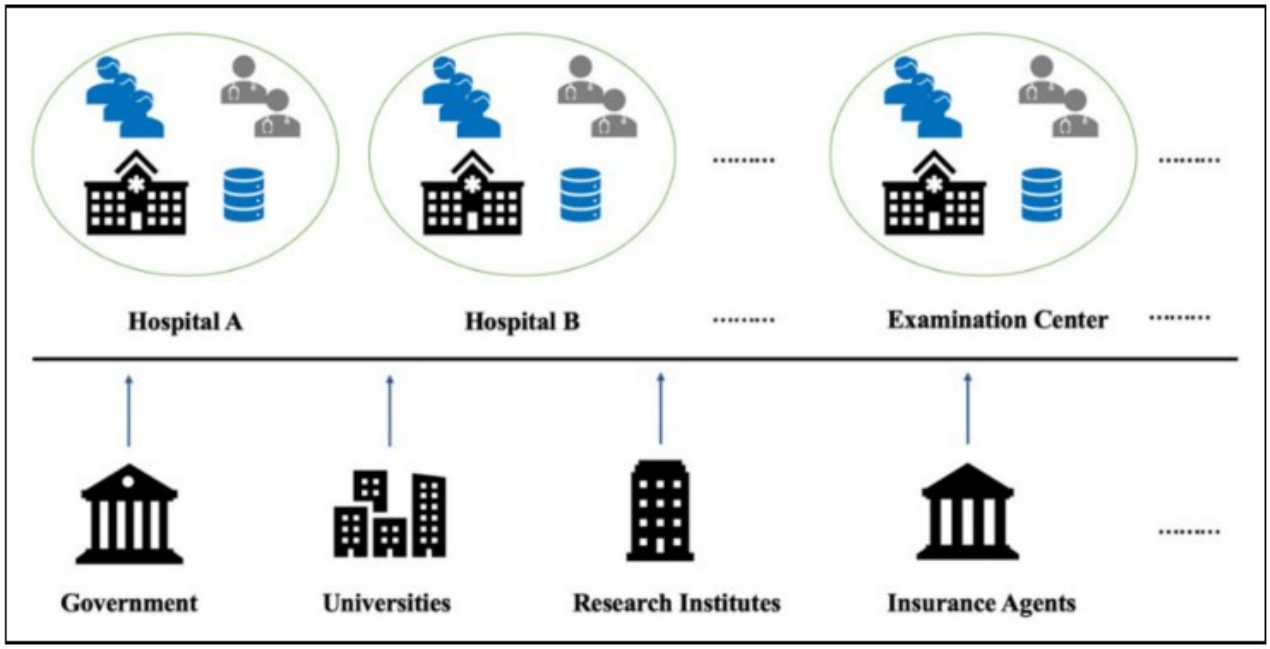


Рис. 6. Схема спільного використання електронних медичних карток на основі гібридної архітектури блокчейну [11]

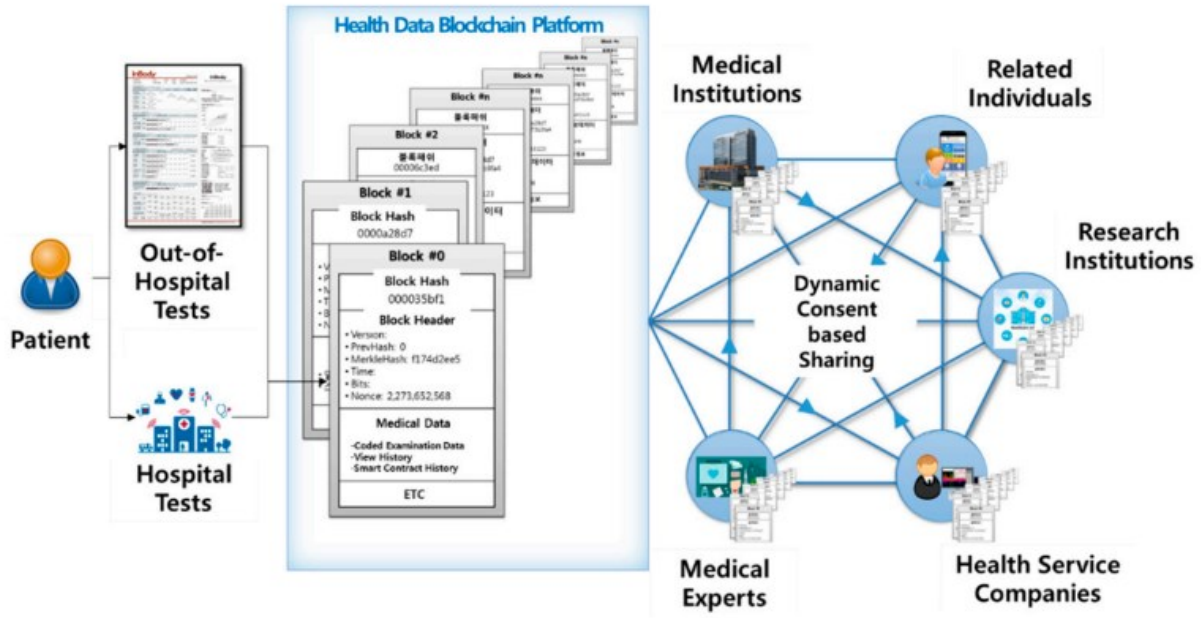


Рис. 7. Мережевий сервіс DynamiChain на основі блокчейну та великих даних для галузі охорони здоров'я [12]

Детальний робочий процес блокчейн-мережі SPChain представлено на рисунку 9. Кожна організація (наприклад, пацієнти та медичні установи) у SPChain має обліковий запис блокчейну. Система складається з етапів налаштування, реєстрації, завантаження, мітки, спільного доступу та пошуку [13].

На основі проведеного аналізу архітектур відомих систем керування медичними даними на основі блокчейн-технологій, розробимо архітектуру системи для керування медичними даними, яка базується на розроблених авторами у [14-16] методах оцінювання достатності медичних даних (блок оцінювання достатності медичних даних), виконання транзакцій над медичними даними (блок виконання транзакцій над медичними даними), оцінювання репутації медичної установи як майнера блокчейну (блок оцінювання репутації медичної установи).

Архітектура системи для керування медичними даними представлена на рисунку 10.

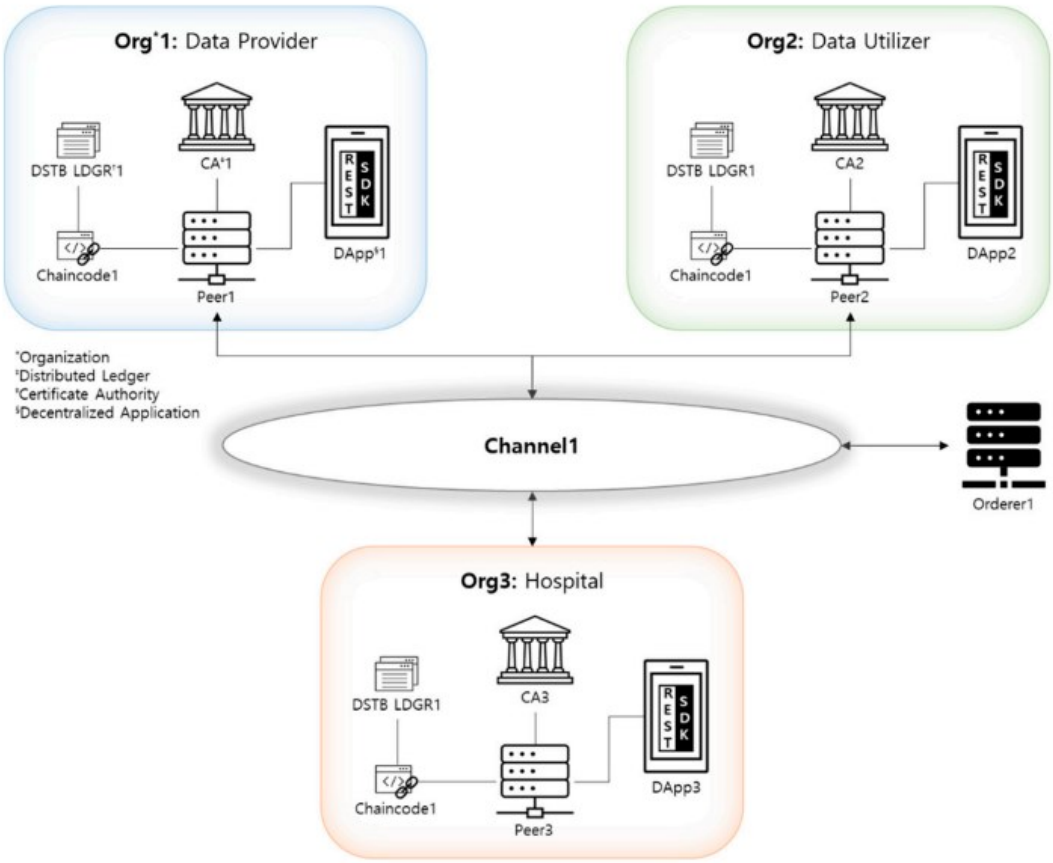


Рис. 8. Блокчейн-консорціум з 3-х організацій у DynamiChain [12]

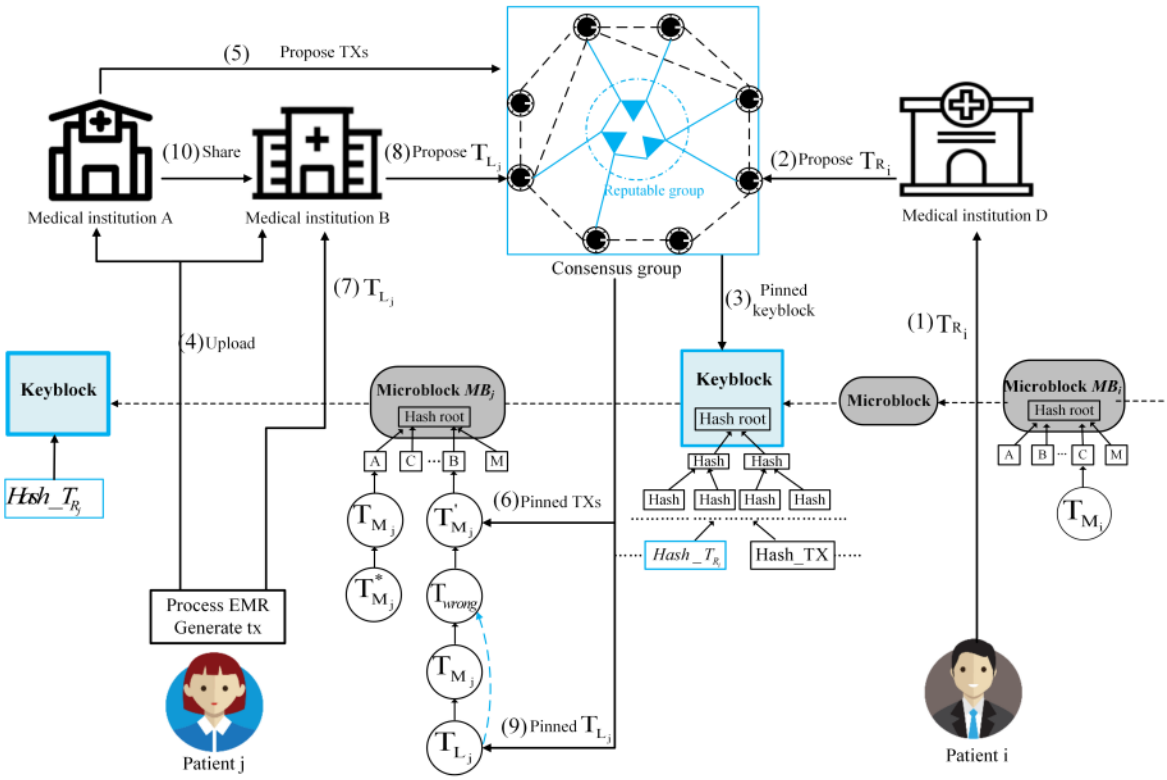


Рис. 9. Детальний робочий процес блокчейн-мережі SPChain [13]

ISSN 2219-9365

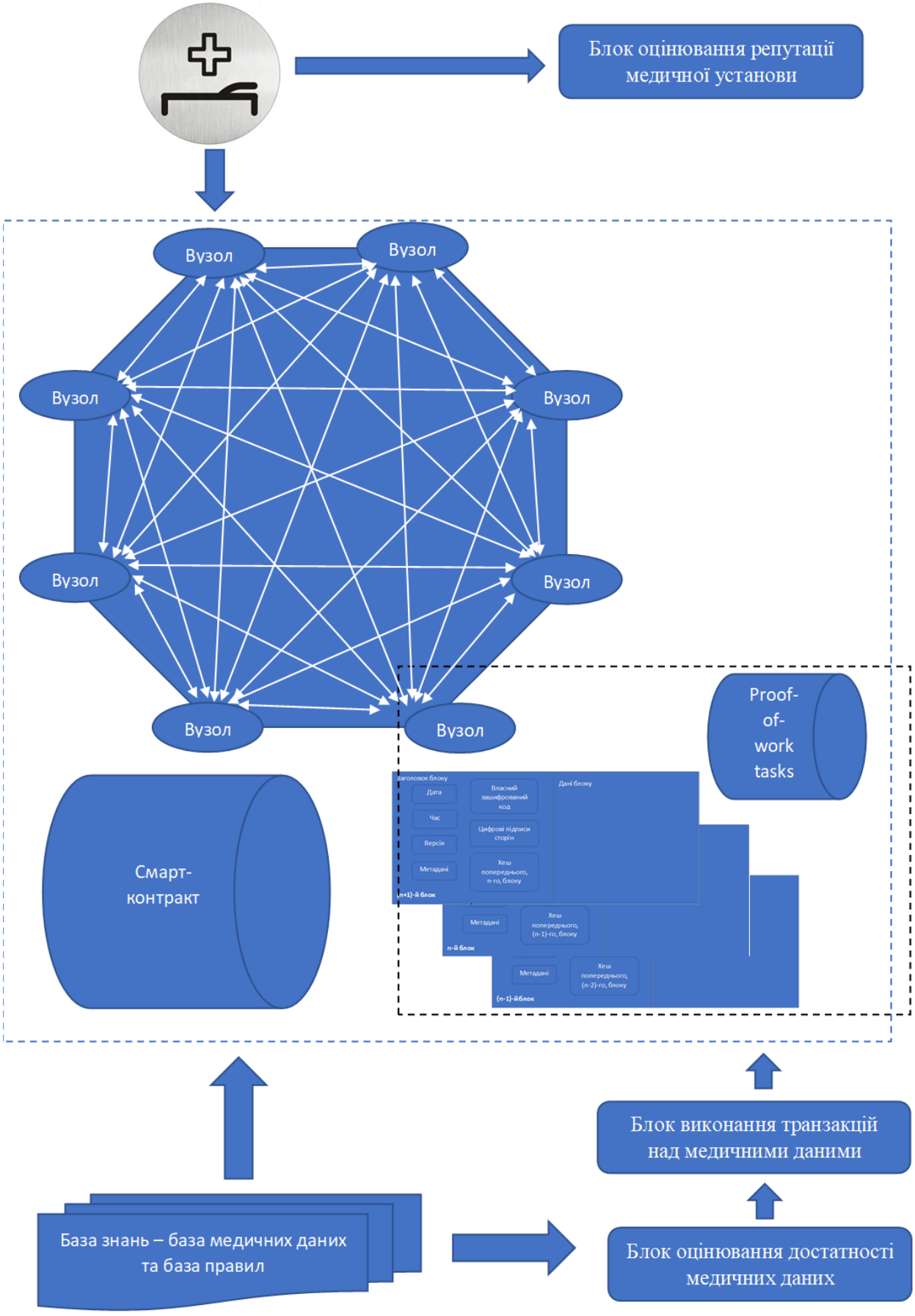


Рис. 10. Архітектура системи для керування медичними даними

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Інформаційні системи є ключовим фактором успіху медичних досліджень та охорони здоров'я. Використання медичних інформаційних систем надає лікарям актуальну інформацію в галузі медицини, підвищує ефективність використання актуальних медичних ресурсів, підвищує продуктивність роботи, інтегрує українську медицину в світовий медичний простір. Останнім часом підвищена увага до технології розподілених реєстрів привела до розуміння потенціалу застосування блокчейн-технологій при побудові інформаційних систем для системи охорони здоров'я. Блокчейн вже довів свою ефективність у галузі охорони здоров'я та природничих наук, допомагаючи зміцнити довіру та оптимізувати співпрацю. Більше того, ця технологія продовжить відігравати провідну роль у вирішенні ще складніших проблем.Відтак, наразі актуальною задачею для України є потреба у керуванні медичними даними, зокрема, виконанням транзакцій над медичними даними, на основі блокчейн-технологій.

В статті проведено аналіз архітектур відомих систем керування медичними даними на основі блокчейн-технологій, а також розроблено архітектуру системи для керування медичними даними на основі розроблених раніше авторами методів оцінювання достатності медичних даних (блок оцінювання достатності медичних даних), виконання транзакцій над медичними даними (блок виконання транзакцій над медичними даними), оцінювання репутації медичної установи як майнера блокчейну (блок оцінювання репутації медичної установи).

Література

1. Hovorushchenko T. Development of an intelligent agent for analysis of nonfunctional characteristics in specifications of software requirements / T. Hovorushchenko, O. Pavlova, M. Bodnar // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Vol. 1. – Issue 2. – Pp. 6-17.
2. Dugas M. Portal of medical data models: information infrastructure for medical research and healthcare / M. Dugas, P. Neuhaus, A. Meidt, J. Doods, M. Storck, P. Bruland, J. Varghese // Database: The Journal of Biological Databases and Curation. – 2016. – Paper bav121.
3. Xu Z. What can blockchain do and Cannot do? / Z. Xu, C. Zou // China Economic Journal. – 2021. – Vol. 14. – Issue 1. – Pp. 4-25.
4. Li W. An Overview of Blockchain Technology: Applications, Challenges and Future Trends / W. Li, M. He, H. Sang // 2021 IEEE 11th International Conference On Electronics Information and Emergency Communication: Proceedings. – Beijing, 2021. – Pp. 31-39.
5. Yang L. The blockchain: State-of-the-art and research challenges / L. Yang // Journal of Industrial Information Integration. – 2019. – Vol. 15. – Pp. 80-90.
6. Zeng Y. Review of research on blockchain application development method / Y. Zeng, Y. Zhang // Journal of Physics Conference Series. – 2019. – Vol. 1187. – Article Number 052005.
7. Kim S. Artificial Neural Network Blockchain Techniques for Healthcare System: Focusing on the Personal Health Records / S. Kim, J. Huh // Electronics. – 2020. – Vol. 9. – Issue 5. – Article Number 763.
8. Chen Y. A Blockchain-Based Medical Data Sharing Mechanism with Attribute-Based Access Control and Privacy Protection / Y. Chen, L. Meng, H. Zhou, G. Xue // Wireless Communications & Mobile Computing. – 2021. – Vol. 2021. – Article number 6685762.
9. Zhang L. Secure and Efficient Data Storage and Sharing Scheme Based on Double Blockchain / L. Zhang, M. Peng, W. Wang, Y. Su, S. Cui, S. Kim // CMC-Computers Materials & Continua. – 2021. – Vol. 66. – Issue 1. – Pp. 499-515.
10. Chen F. Data Access Control Based on Blockchain in Medical Cyber Physical Systems / F. Chen, J. Huang, C. Wang, Y. Tang, C. Huang, D. Xie, T. Wang, C. Zhao // Security and Communication Networks. – 2021. – Vol. 2021. – Article number 3395537.
11. Cao Y. Hybrid blockchain-based privacy-preserving electronic medical records sharing scheme across medical information control system / Y. Cao, Y. Sun, J. Min // Measurement & Control. – 2020. – Vol. 53. – Issue 7-8. – Pp. 1286-1299.
12. Kim T. DynamiChain: Development of Medical Blockchain Ecosystem Based on Dynamic Consent System / T. Kim, S. Lee, D. Chang, J. Koo, T. Kim, K. Yoon, I. Choi // Applied Sciences-Basel. – 2021. – Vol. 11. – Issue 4. – Article number 1612.
13. Zou R. SPChain: Blockchain-based medical data sharing and privacy-preserving eHealth system / R. Zou, X. Lv, J. Zhao // Information Processing & Management. – 2021. – Vol. 58. – Issue 4. – Article number 102604.
14. Москаленко А. Модель та метод оцінювання достатності медичних даних / А. Москаленко, В. Осядлий // Вісник Хмельницького національного університету. Серія «Технічні науки». – 2022. – №3.
15. Осядлий В. Метод виконання транзакцій над медичними даними на основі блокчейн-технологій / В. Осядлий, А. Москаленко // Вісник Хмельницького національного університету. Серія «Технічні науки». – 2022. – №4.

16. Moskalenko A. Method of assessing the reputation of a medical institution (as a miner of blockchain) / A. Moskalenko, T. Hovorushchenko, V. Osyadlyi // Computer Systems and Information Technologies. – 2022. – №3.

References

1. T. Hovorushchenko, O. Pavlova, M. Bodnar. Development of an intelligent agent for analysis of nonfunctional characteristics in specifications of software requirements // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Vol. 1. – Issue 2. – Pp. 6-17.

2. M. Dugas, P. Neuhaus, A. Meidt, J. Doods, M. Storck, P. Bruland, J. Varghese. Portal of medical data models: information infrastructure for medical research and healthcare // Database: The Journal of Biological Databases and Curation. – 2016. – Paper bav121.

3. Z. Xu, C. Zou. What can blockchain do and Cannot do? // China Economic Journal. – 2021. – Vol. 14. – Issue 1. – Pp. 4-25.

4. W. Li, M. He, H. Sang. An Overview of Blockchain Technology: Applications, Challenges and Future Trends // 2021 IEEE 11th International Conference On Electronics Information and Emergency Communication: Proceedings. – Beijing, 2021. – Pp. 31-39.

5. L. Yang. The blockchain: State-of-the-art and research challenges // Journal of Industrial Information Integration. – 2019. – Vol. 15. – Pp. 80-90.

6. Y. Zeng, Y. Zhang. Review of research on blockchain application development method // Journal of Physics Conference Series. – 2019. – Vol. 1187. – Article Number 052005.

7. S. Kim, J. Huh. Artificial Neural Network Blockchain Techniques for Healthcare System: Focusing on the Personal Health Records // Electronics. – 2020. – Vol. 9. – Issue 5. – Article Number 763.

8. Y. Chen, L. Meng, H. Zhou, G. Xue. A Blockchain-Based Medical Data Sharing Mechanism with Attribute-Based Access Control and Privacy Protection // Wireless Communications & Mobile Computing. – 2021. – Vol. 2021. – Article number 6685762.

9. L. Zhang, M. Peng, W. Wang, Y. Su, S. Cui, S. Kim. Secure and Efficient Data Storage and Sharing Scheme Based on Double Blockchain // CMC-Computers Materials & Continua. – 2021. – Vol. 66. – Issue 1. – Pp. 499-515.

10. F. Chen, J. Huang, C. Wang, Y. Tang, C. Huang, D. Xie, T. Wang, C. Zhao. Data Access Control Based on Blockchain in Medical Cyber Physical Systems // Security and Communication Networks. – 2021. – Vol. 2021. – Article number 3395537.

11. Y. Cao, Y. Sun, J. Min. Hybrid blockchain-based privacy-preserving electronic medical records sharing scheme across medical information control system // Measurement & Control. – 2020. – Vol. 53. – Issue 7-8. – Pp. 1286-1299.

12. T. Kim, S. Lee, D. Chang, J. Koo, T. Kim, K. Yoon, I. Choi. DynamiChain: Development of Medical Blockchain Ecosystem Based on Dynamic Consent System // Applied Sciences-Basel. – 2021. – Vol. 11. – Issue 4. – Article number 1612.

13. R. Zou, X. Lv, J. Zhao. SPChain: Blockchain-based medical data sharing and privacy-preserving eHealth system // Information Processing & Management. – 2021. – Vol. 58. – Issue 4. – Article number 102604.

14. A. Moskalenko, V. Osyadlyi. Model and method of assessing the sufficiency of medical data // Bulletin of the Khmelnytskyi National University. Technical Sciences Series. – 2022. – №3.

15. V. Osyadlyi, A. Moskalenko. Method of performing transactions on medical data based on blockchain technologies // Bulletin of the Khmelnytskyi National University. Technical Sciences Series. – 2022. – №4.

16. A. Moskalenko, T. Hovorushchenko, V. Osyadlyi. Method of assessing the reputation of a medical institution (as a miner of blockchain) // Computer Systems and Information Technologies. – 2022. – №3.

https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-70-2-5
УДК 620.172.21:621.396.6.019.5

Ігор КОВТУН
https://orcid.org/0000-0002-1430-6479
Хмельницький національний університет
Андрій ГОРОШКО
https://orcid.org/0000-0002-1386-2326
Хмельницький національний університет
Світлана ПЕТРАЩУК
https://orcid.org/0000-0003-2043-1409
Хмельницький національний університет

НЕРУЙНІВНА ДІАГНОСТИКА МІЦНОСТІ НЕРОЗ'ЄМНИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

Стаття присвячена розробленню методик неруйнівної діагностики нероз'ємних елементів конструкцій електронної техніки, зокрема їх паяним та зварним з'єднанням. Методики неруйнівної діагностики міцності і герметичності побудовані на основі акустико-емісійного і електротензометричного методів вимірювання застосовані в умовах механічного, температурного та пневматичного навантаження. Випробування на міцність паяних з'єднань наскрізного та поверхневого монтажу двох-вивідних електронних компонентів в критичних умовах напружено-деформованого стану під дією простих видів механічного навантаження на відрив та розтяг та випробування паяних з'єднань друкованих плат навантаженням, яке створює напружено-деформований стан, що зустрічається в процесі експлуатації, за схемою навантаження на чистий згин в режимі циклічного пульсуючого навантаження показали зниження міцності та можливість використання параметрів акустичної емісії в якості діагностичних для виявлення дефектів та оцінки міцності паяних з'єднань. Проведено діагностику міцності на основі аналізу напружено-деформованого стану нероз'ємних з'єднань, які використовуються для герметизації модулів надвисоких частот виготовлених із сплаву АМГ-2 двох типів конструкції вузла герметизації виконаних відповідно зварним та паяним з'єднанням, під дією внутрішнього надлишкового тиску та температури. Набула подальшого розвитку акустико-емісійна методика неруйнівної діагностики міцності нероз'ємних елементів конструкцій електронної техніки, зокрема їх паяних та зварних з'єднань.

Ключові слова: неруйнівна діагностика, міцність, герметичність, паяне з'єднання, зварне з'єднання, акустична емісія, електротензометрія.

Igor KOVTUN, A. GOROSHKO, Svitlana PETRASHCHUK
Khmelnytskyi National University

NON-DESTRUCTIVE STRENGTH DIAGNOSTICS OF NON-DETACHABLE STRUCTURES IN ELECTRONIC PACKAGES

The represented paper is aimed at development of methods for non-destructive diagnostics of non-detachable structures in electronic packages, in particular, their soldered and welded joints, as much as such joints are considered to be the weakest link in the structure and providing their strength is an actual research task. Methods for non-destructive diagnostics of strength and air-tightness are based on acoustic-emission and electrotensometric measurement methods under the action of mechanical, thermal and pneumatic impacts. Strength testing solder joints of through-hole and surface mounted two-pin electronic components under critical stress and strain conditions produced by simple types of mechanical forces on pull out and tension tests and pure bending tests that produce stress and strain conditions identical to operational and conducted in cyclic pulsating mode with simultaneous recording mechanical characteristics and acoustic-emission parameters showed the decrease in solder joints strength caused by their defects and provided using using acoustic emission parameters as diagnostic indicators to detect these defects and assess the strength of solder joints. The strength diagnostics for non-detachable sealing joints used to seal super-high frequency air-tight packages made from AMG-2 alloy of two types of sealing unit design representing both welded and soldered joints has been conducted by internal overpressure and temperature impacts. The stress and strain analysis of air-tight cases in conditions of pneumatic impacts has revealed that the stress in the cases is under the acceptable limit but in the joints reaches even the ultimate strength. The method for non-destructive acoustic-emission strength diagnostics as applied to non-detachable joints in electronic packages, in particular, their soldered and welded joints, has gained its progression.

Keywords: non-destructive diagnostics, strength, air-tightness, solder joint, weld joint, acoustic emission, electrotensometry.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Основною технологією отримання механічних та електричних нероз'ємних з'єднань у виробах електронної техніки залишається на сьогоднішній день пайка або зварювання [1–6]. Завдяки механічному зв'язку, який представляє собою жорстке і нерухоме защемлення, виникає взаємодія між елементами конструкцій, яка створює передумови для виникнення та передачі деформацій у всіх ланках механічного зв'язку. Такі деформації та, відповідно, напруження виникають в результаті дії як експлуатаційного навантаження так і під впливом конструктивно-технологічного виконання, і слід зазначити, що саме вони не рідко виявляються причиною руйнування електричних ланцюгів та втрати працездатності електронних вузлів і модулів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В електроніці та обчислювальній техніці у зв'язку з їх комплексною мікромініатюризацією вимоги до якості і надійності паяних та зварних з'єднань безперервно збільшуються і однією з важливих завдань забезпечення їх міцності та надійності є застосування та вдосконалення методів їх діагностики. Так державними стандартами [7, 8] обумовлено ряд методів, контролю якості паяних з'єднань. Поряд із значним збільшенням їх кількості зменшились їх геометричні розміри. Так, площа контактної ділянки під мікросхеми в корпусах SOIC, PLCC становить 1,7 мм^2 і менше. У зв'язку з цим були продовжені пошуки більш інформативних вторинних критеріїв якості паяних з'єднань і розробка на їх основі методів діагностики. Загальна класифікація методів неруйнівної діагностики наведена в державному стандарті [9], проте застосування цих методів, як показує практика, не завжди забезпечує надійне відбраковування неякісних паяних з'єднань (ПЗ).

У ряді розглянутих робіт [10, 11] висловлені припущення про можливість застосування для контролю якості ПЗ електрофізичних методів, заснованих на реєстрації електрофізичних параметрів, що носять інформацію про якість і надійність об'єкта. Відповідно до [12] до електрофізичних методів відносять: електропараметричний, шумовий, акустико-емісійний, екзоелектронної емісії, фотовідповідних та рекомбінантних випромінювань. Основним недоліком більшості зазначених методів є складність оцінювання небезпечності дефектного ПЗ, висока вартість і складність обладнання для контролю. В останні роки все більше застосування для неруйнівного контролю, діагностування і прогнозування міцності знаходить метод акустичної емісії, який характеризується широкими можливостями застосування, в тому числі і для контролю паяних з'єднань.

Формулювання цілей статті

Представлена робота присвячена розробленню методик неруйнівної діагностики нероз'ємних елементів конструкцій електронної техніки, зокрема їх паяним та зварним з'єднанням, оскільки, як показано в попередніх дослідженнях [13], саме вузли з'єднання виявляються найслабшою ланкою в конструкції і забезпечення їх міцності виступає актуальним завданням дослідження. Методики неруйнівної діагностики міцності і герметичності побудовані на основі акустико-емісійного та електротензометричного методів вимірювання під дією механічного, температурного та пневматичного навантаження.

Механічні випробування паяних з'єднань друкованих плат

Розповсюдженим випробуванням на міцність паяних з'єднань є випробування на зсув [14]. Проте, явище зсуву в чистому вигляді не зустрічається і супроводжується іншими деформаціями, які також викликають нормальні напруження і створюють складний напружено-деформований стан. Тому визначення характеристик міцності паяних з'єднань відбувалося за програмою випробувань, в якій відтворювали критичні умови напружено-деформованого стану за допомогою простих видів механічного навантаження на відрив, розтяг та згин.

Об'єктами дослідження були паяні з'єднання наскрізного та поверхневого монтажу двох-вивідних електронних компонентів. Для утворення паяного з'єднання використовувався олов'яно-свинцевий сплав ПОС-61. Поряд із ПЗ виконаними за технологією пайки, що відповідала нормам якості, випробуванням підлягали ПЗ виконані із заздалегідь заданим дефектами, такими як холодна пайка. Випробування проводили для встановлення впливу дефектів на міцність ПЗ та аналізу пов'язаних із ними сигналами акустичної емісії.

Випробування виконувались на розривній машині ІР-5057-50 із використанням кріпильних пристосувань, які дозволяли виконувати задані види навантаження. Одночасно із записом діаграми навантаження, який здійснювався на самописці машини, системою акустико-емісійного контролю в одноканальному режимі вимірювання здійснювався запис таких параметрів сигналів акустичної емісії як амплітуда, активність та сумарний рахунок.

Випробування на відрив виконувались у спеціальному кріпильному пристосуванні, конструкція якого представлена на рис. 1, *а*. Пристрій складається із опорної колодки 1, до якої гвинтовими стяжками 7 через монтажні отвори кріпиться відрізок друкованої плати 2 із контактним вузлом 3 для наскрізного монтажу. Для забезпечення потрібної жорсткості кріплення основи друкованої плати здійснюється через притискні пластини 4, які розташовані в безпосередній близькості до контактного вузла по обидві сторони від нього. Навантаження паяного з'єднання здійснюється через відрізок мідного дроту 5, який імітує вивід електронного компонента. Дріт одним кінцем припаюється до контактного вузла, а іншим кріпиться гвинтовою стяжкою 8 до опорної колодки 6. Колодки 1 та 6 кріпляться в верхньому та нижньому затискачах розривної машини, завдяки чому здійснюється силове навантаження P за напрямом показаним на схемі. Навантаження здійснювалося із постійною швидкістю 1 мм/хв. Для реєстрації параметрів сигналів акустичної емісії датчик АЕ встановлюється на поверхні колодки 1.

Випробуванню підлягали дві партії зразків по 20 шт. в кожній, які поділялися за станом паяних з'єднань: 1) бездефектні; 2) із дефектом «холодна пайка».

Представлені в таблиці 1 усереднені значення отримані обробкою матеріалів випробувань, показали зниження значень руйнівних навантажень ПЗ з дефектом «холодна пайка» в середньому на 47 % та очевидну відмінність в прояві сигналів акустичної емісії, зокрема їх максимальної активності та сумарного рахунку, які мали суттєве перевищення для дефектних паяних з'єднань. Таким чином, зафіксоване зниження значень руйнівного навантаження продемонструвало зниження міцності ПЗ внаслідок наявності дефектів, та різниця в параметрах АЕ показала перспективи використання цих параметрів в якості діагностичних для виявлення дефектів та оцінки міцності паяних з'єднань. Отриманий результат підтверджує результати опубліковані в попередній роботі [15].

Випробування на міцність паяних з'єднань поверхневого монтажу здійснювались механічним навантаженням на розтяг у спеціальному кріпильному пристрої, конструкція якого представлена на рис. 1, *б*. Пристрій складається із двох ідентичних опорних колодок 1, до кожної з яких через монтажні отвори кріпляться два відрізки друкованої плати 2. Кріплення здійснюється через притискну платину 5 двома гвинтовими стяжками 6. Використання двох відрізків плат, між якими виконано паяне з'єднання 3 SMD компонента 4 (металокерамічного конденсатора К10-17В) дозволяє виключити вплив основи друкованої плати на міцність паяних з'єднань. Як і попередньому випробуванні колодки 1 кріпляться в верхньому та нижньому затискачах розривної машини, завдяки чому здійснюється силове навантаження P за напрямом показаним на схемі. Навантаження здійснювалося із постійною швидкістю 1 мм/хв. Датчик акустичної емісії встановлювався на поверхні однієї з колодок 1.

На відміну від попереднього випробування крім двох партій паяних з'єднань – бездефектних та із дефектом «холодна пайка» була використана третя партія паяних з'єднань виконаних із попереднім перегрівом SMD терміналів, що повинно було підвищити міцність з'єднання в порівнянні із стандартною технологією. Кожна партія налічувала по 20 зразків. Попередній прогрів здійснювався витримкою компонентів в термостаті протягом 30 хв. при температурі 200 °С після чого відбувалось їх розпаювання.

Представлені в таблиці 1 усереднені значення отримані обробкою матеріалів випробувань показали зниження значень руйнівних навантажень ПЗ з дефектом «холодна пайка» в середньому на 36,5 % та очікуване підвищення міцності на 48 % завдяки попередньому перегріву терміналів SMD. Також зафіксована очевидна відмінність в значеннях сумарного рахунку та максимальної активності сигналів акустичної емісії підтверджує можливість застосування цих параметрів для діагностики технічного стану та міцності паяних з'єднань. Отриманий результат підтверджує результати опубліковані в попередній роботі [15].

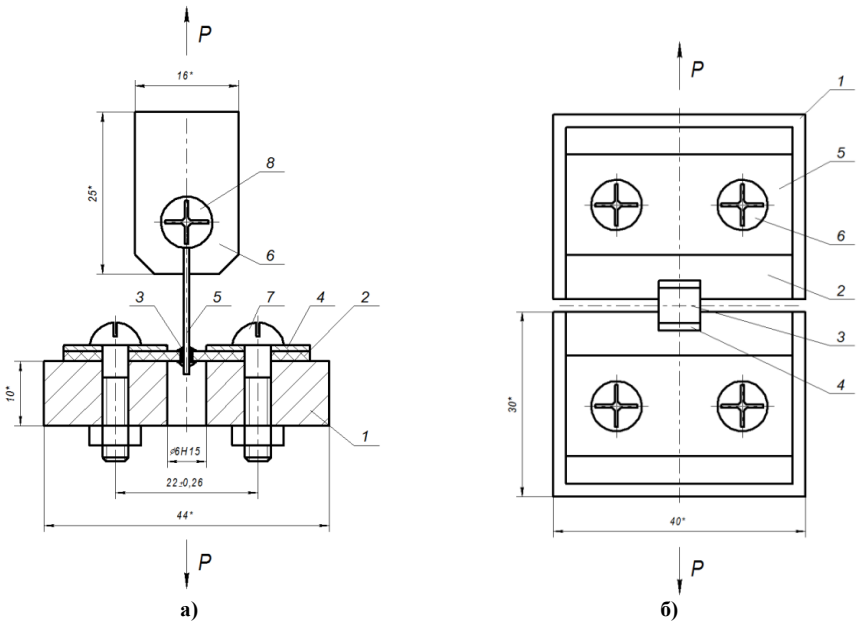


Рис. 1. Кріпильне пристосування для силового навантаження:
а) паяного з'єднання наскрізного монтажу на відрив; б) паяного з'єднання поверхневого монтажу на розтяг

Після дослідження міцності паяних з'єднань у критичних умовах навантаження наступне випробування проводилось навантаженням, яке створює напружено-деформований стан, що зустрічається в процесі експлуатації при деформації основи друкованих плат. В якості такого навантаження запропоновано використання схеми чистого згину, перевагами якого є можливість одночасного випробування багатьох ПЗ і забезпечення для них ідентичності напружено-деформованого стану.

Слід зазначити, що для здійснення неруйнівної діагностики міцності паяних з'єднань навантаження повинно не перевищувати допустимого напруження на розтяг ПЗ. Тобто тестове напруження повинно

знаходитися в межах ділянки пропорційності матеріалу припою, в якій відбувається тільки пружна деформація матеріалу, що може бути підтверджено відсутністю сигналів акустичної емісії. Таким чином, в умовах неруйнівного навантаження застосування методу акустичної емісії дозволить здійснювати діагностику міцності.

Таблиця 1

Середні значення руйнівного навантаження
та параметрів акустичної емісії при випробуванні паяних з'єднань

Стан паяного з'єднання	Руйнівне навантаження, Н	Відносна зміна міцності, %	Сумарний рахунок АЕ, імп.	Максимальна активність, імп/с
Випробування паяного з'єднання наскрізного монтажу на відрив				
Бездефектний	95,4	–	38	15
Холодна пайка	52,8	-44,65	85	40
Випробування паяного з'єднання поверхневого монтажу на розтяг				
Бездефектний	33,94	–	32	14
Холодна пайка	21,54	-36,53	55	32
З перегрівом	50,18	+47,85	28	11

Допустиме напруження на розтяг визначається за формулою:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_B}{s} = \frac{40}{2,5} = 16 \text{ МПа}, \quad (1)$$

де σ_B = 40 МПа – мінімальне значення границі міцності для припою ПОС-61 [16]; s = 2,5 – рекомендований коефіцієнт запасу міцності.

Відповідно до схеми навантаження максимальне напруження [17] виникає в небезпечному поперечному перерізі балки на довжині відрізку чистого згину l між опорами, де згинальний момент є максимальним $M_{\max} = P \times L$, де L – плече сили. Тоді максимально допустиме навантаження:

$$[P] \le \frac{b \cdot h^2}{6L}[\sigma] , \quad (2)$$

де b – ширина, h – товщина друкованої плати, L – плече сили, яке дорівнює відстані від місця прикладення сили на краю друкованої плати до ближчої опори. При b = 50 мм, h = 1,5 мм, L = 20 мм, $[P]$ = 15 Н.

Випробування проводилися для 5-ти склотекстолітових фольгованих друкованих плат розмірами 160×50×1,5, на кожній з яких було встановлено по 9 SMD компонентів розташованих на однаковій відстані один від одного в три ряди.

Випробування проводились в режимі циклічного пульсуючого навантаження в діапазоні від 0 Н до $P_{\text{тест}}$ = 15 Н. Такому навантаженню відповідає максимальний прогин плати $f_{\max}$ = 1,9 мм. Навантаження та розвантаження здійснювалося зі швидкістю 20 мм/хв. із витримкою 30 с між цими фазами. Випробування повторювалось в 10 циклах, або до появи ознак руйнування. Прояв ефекту Кайзера [18], який полягає в тому, що при повторному навантаженні сигнали АЕ практично відсутні, був використаний для підтвердження пружних деформацій та міцності паяних з'єднань, а також для підтвердження достовірності реєстрації п'єзодатчиком саме сигналів АЕ, а не різного роду шумів. Для реєстрації АЕ датчик кріпився до поверхні плати.

Характерно, що відсутність ефекту Кайзера при повторному навантаженні свідчила про наявність пластичних деформацій, або актів руйнування та розвитку тріщин, пор та інших дефектів. Витримка на піку навантаження дозволяла додатково виявити процеси релаксації та повзучості паяних з'єднань.

Під час випробувань 2 із 5-ти друкованих плат показали прояв сигналів АЕ та їх розвиток, зокрема сумарного рахунку подій, амплітуда яких перевищувала рівень дискримінації, впродовж випробування. Для прикладу на рис. 2 показано розвиток активності та сумарного рахунку АЕ друкованої плати, паяне з'єднання якої було зруйновано на 5-му циклі навантаження. Проведений огляд цих плат виявив наявність тріщини в паяному з'єднанні та відшарування контактної площадки. Слід зазначити, що випромінювання АЕ спостерігалось також в паузах на піку навантаження. Таким чином подібний метод навантаження із одночасним аналізом параметрів сигналів АЕ може бути використаний для діагностики міцності паяних з'єднань під дією неруйнівного навантаження.

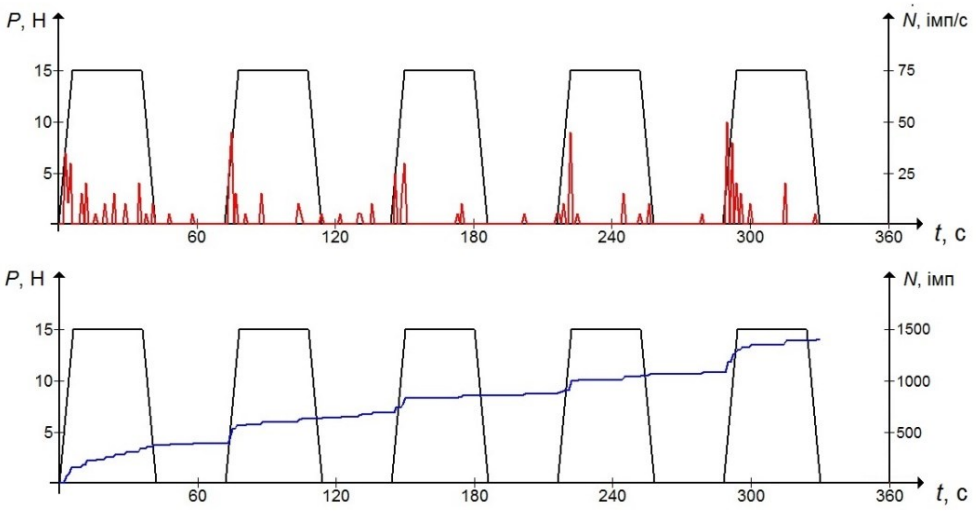


Рис. 2. Розвиток активності ($\dot{N}$) та сумарного рахунку (N) при циклічному навантаженні друкованих плат

Діагностика паяних і зварних з'єднань захисних герметичних корпусів електронних модулів

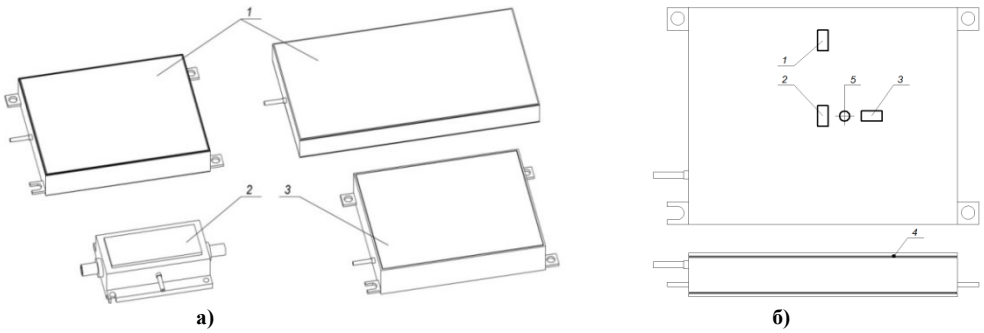
Об'єктами дослідження були корпуси модулів надвисоких частот (НВЧ) спеціального призначення, які використовуються в авіаційних системах навігації і керування. На висоті корпус піддається дії внутрішнього тиску, який є надмірним порівняно із низьким зовнішнім тиском. При зльотах і приземленнях, корпуси піддаються дії знакозмінного навантаження і можуть бути розгерметизовані через надмірні втомні напруження, що діють на матеріали корпусу та їх зварні чи паяні шви. За технічними вимогами такі корпуси повинні витримувати не менше 100 зльотів і приземлень (циклів). При цьому герметичність за швидкістю витоку гелію повинна складати не більше $5 \cdot 10^{-2}$ Па·см^3/с. Але не всі корпуси витримують таку кількість циклів, і на практиці розгерметизація може статися у будь-який момент.

Досліджені корпуси виготовлені із алюмінієвого сплаву АМГ-2 (рис. 3, *а*) представлені двома типами, які відрізняються технологією герметизації: 1) лазерним зварюванням (тип К); 2) паяним швом або герметиком (типи КМ, КБ).

Для проведення натурних досліджень було використано стенд тестування, який складається із двох комплексів: випробувального (термопневмосистема); та вимірювального, який реалізує такі методи як манометричний; бульбашковий; електротензометрії та акустичної емісії.

Діапазон вимірюваних величин надлишкового тиску для манометра *3* складає від 0 до 4 атм (ціна поділки – 0,04 атм), для манометра *5* – від 0 до 16 атм (ціна поділки – 0,16 атм). Кліматична камера «Фойтрон» 3626/51 слугує для імітації кліматичних умов навколишнього середовища (температури та вологості).

Місця установки тензодатчиків та індикатора годинникового типу показані на рис. 3, *б*.



а) **б)**

Рис. 3. Корпуси модулів НВЧ: а) К (1), КМ (2), КБ (3); б) препарування корпусів: *1* – тензодатчики з робочою базою 10 мм; *2* – тензодатчики з робочою базою 1 мм; *3* – індикатор годинникового типу

Для візуального контролю моменту втрати герметичності корпусу модуля на кожному ступені навантаження проводиться відсічення тиску повітря, після чого необхідно стежити за показаннями зразкового манометра на початку та в кінці етапу випробувань. Поряд з цим, у процесі випробувань можливий також візуальний контроль деформації корпусу модуля за індикатором годинникового типу.

У відповідності до програми випробувань корпусів НВЧ під дією внутрішнього надмірного тиску та температури були отримані наступні результати:

1) при $P_{тест}$ = 1,6 атм і τ = +20°С корпуси герметичні;

2) при $P_{тест}$ = 0,4 атм і термоциклюванні в діапазоні τ = -60°С – +85°С в кількості трьох циклів (за винятком корпусів з явними дефектами шва) корпуси герметичні;

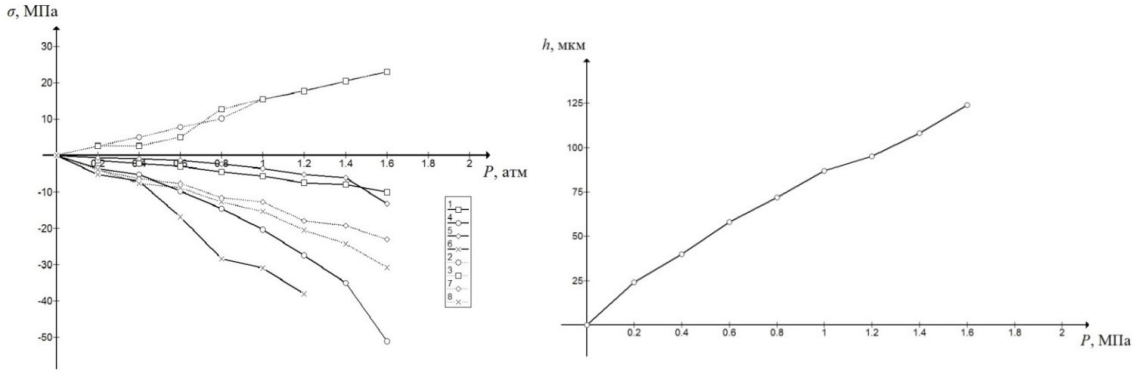
3) при циклічній зміні $P_{тест}$ = 0 – 1,6 атм і τ = +85°С корпуси не витримують заданих 100 циклів навантаження через недотримання технології виконання шва; структурні зміни в матеріалі шва при τ = +85 ° С пов'язані, як із зміною температури, так і одночасно з деформаціями матеріалу шва.

Виявлений розкид отриманих значень тиску розгерметизації, який склав від 0,18 до 3,00 атм, та кількості циклів навантаження до розгерметизації корпусів свідчить про нестабільність та ненадійність технології герметизації. В такій ситуації підвищення надійності виготовлюваних корпусів можливо із розробкою методів контролю їх технічного стану, в процесі виробництва і експлуатації. Такий метод і засоби його реалізації були розроблені на базі методів електротензометрії та акустичної емісії, які дозволили визначити напружено-деформований стан та виявити процеси руйнування, які виявляються причинами розгерметизації об'єктів дослідження.

Оцінка напружено-деформованого стану корпусів НВЧ

Визначення напружено-деформованого стану корпусів виконувалось при статичному випробуванні пневматичним навантаженням, яке здійснювалось східчасто із записом показників тензодатчиків через кожні 0,2 атм. Для оцінки впливу температури випробування відбувались при τ = +20 °С та τ = +85 °С. Отримані значення відносних деформацій перераховувались у нормальні напруження за законом Гука, при наступних значеннях модулю Юнга $E = 0{,}71 \cdot 10^5$ МПа – для АМГ-2; та $E = 39{,}7 \cdot 10^3$ МПа при τ = +20 °С і $E = 23{,}4 \cdot 10^3$ МПа при τ = +85 °С – для матеріалу припою [16]. Визначення прогину кришок корпусів здійснювались індикатором годинникового типу з ціною поділки 1 мкм. Контроль герметичності корпусів перевіряли методом занурення у спирт при надмірному тиску 0,4 атм.

Аналіз даних отриманих для корпусів із другої групи (КБ-3, КБ-4) показав, що напруження, які виникають в матеріалі кришок корпусів при температурах +20 °С та +85 °С є невеликими – в 5–6 разів менше границі міцності їх матеріалу – АМГ-2 (σ_B = 200 МПа ± 30 %; σ_T = 80 МПа) і не представляють небезпеки та не залежить температури. Проте в матеріалі шва, під тиском, що наближається до робочого навантаження 1,6 атм, величини напружень досягають величин більших не тільки його границі пропорційності, а й границі міцності (σ_B = 50 МПа). Діаграма напружено-деформованого стану випробуваного корпусу КБ-3 залежно від надлишкового тиску при τ = +20 °С показані на рис. 4.



а) **б)**

Рис. 4. Напруження у матеріалі шва (датчики 1, 4, 6) і кришки (датчики 7, 8) та прогин кришки корпусу КБ-3 (б) залежно від надлишкового тиску при τ = +20 °С

При таких значеннях напружень матеріал шва відчуває пластичні деформації, і правильніше було б говорити, що датчики показують величини відносних деформацій, а не напружень. При такому характері деформацій припою (повзучість, великі деформації, великий час циклів теплозмін) відбувається перебудова його мікроструктури, що супроводжується зменшенням пластичності, і, при цьому, тріщини розвиваються в основному по межах зерен, тобто знижується втомна міцність шва. Подібні процеси відбуваються і в шві, який герметизує гвинт і кришку.

Наступні випробування для всіх типів корпусів проводились пневматичним навантаженням до руйнування при τ = +20 °С. Одночасно із реєстрацією показників датчиків електротензометрії відбувалась реєстрація сигналів акустичної емісії.

Аналіз напружено-деформованого стану випробуваних корпусів типу К, виявив, що напруження на швах перевищують границю текучості (σ_T = 80 МПа) та досягають границі міцності (σ_B = 200 МПа ± 30 %) зварного шва і спричиняють розгерметизацію гермо-вузлів. Характерним для корпусів було те, що напруження на швах і кришках мають протилежні знаки (рис. 5). Позитивні

напруження на кришках виробів свідчать про те, що вироби приймають діжко-подібну форму, в результаті чого на зовнішніх волокнах зварних швів повинні виникнути напруження стиску (які мають знак «мінус»), що і підтверджується результатами тензометрування.

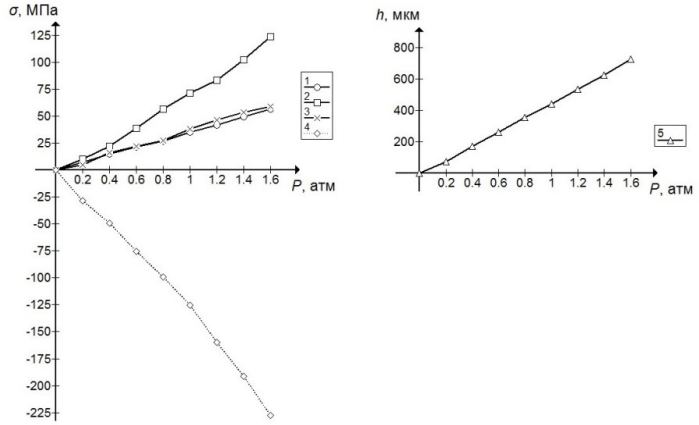


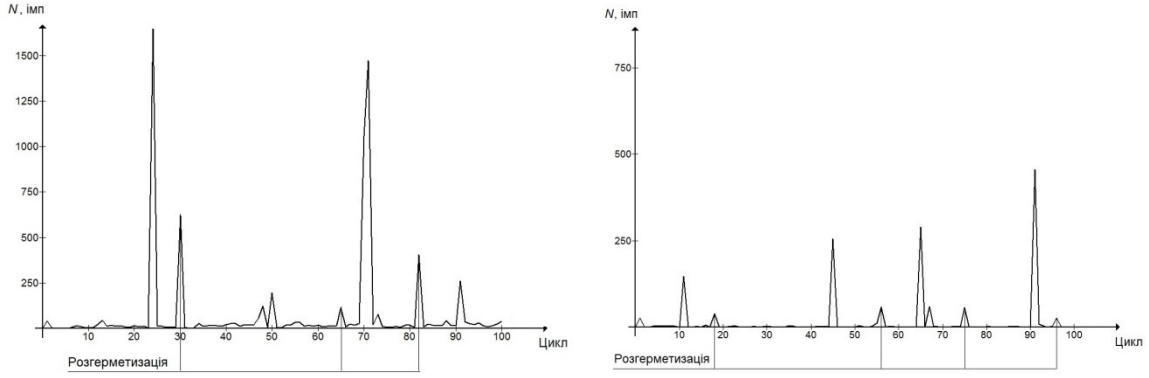
Рис. 5. Залежності напруження на кришці (1-3) і шві (4) та прогину кришки (5) корпусу К-21 від надлишкового тиску

Діагностика міцності та герметичності корпусів НВЧ методом акустичної емісії

Реєстрація сигналів АЕ здійснювалась резонансним п'єзоелектричним датчиком розташованим по центру кришки корпусів. Перешкодозахищеність від вібрацій, електричних наведень і т.п. досягалась пониженням повного підсилення приладу АФ-15 (80 дБ) на 9 дБ за допомогою вбудованого атенюатору та попереднім визначенням частотного діапазону корисних сигналів АЕ 200-500 кГц з використанням аперіодичного ПЕП із пологою АЧХ в діапазоні до 1,0 МГц.

Аналіз матеріалів АЕ дозволив виявити прояв значного рівня параметрів АЕ при тиску значно нижчому за тиск розгерметизації. В якості інформативних параметрів було запропоновано використовувати амплітуду та сумарний рахунок АЕ. Проте діагностування при статичному випробуванні не дає гарантії, що розгерметизація не відбудеться у наступному циклі навантаження, а саме в таких умовах працюють об'єкти дослідження. Тому подальші дослідження відбувались при циклічному випробуванні в пульсуючому режимі навантаження до $P_{\text{тест}}$ = 1,6 атм із витримкою 1 хв. Випробування повторювалось в 100 циклах, або до появи розгерметизації корпусу. Прояв ефекту Кайзера, був використаний для перевірки герметичності та для підтвердження достовірності реєстрації п'єзодатчиками саме сигналів АЕ, а не різного роду шумів.

Характерно, що після початку повторного збурення АЕ, корпуси витримували в середньому біля 6–10 циклів до руйнування (рис. 6).



а) **б)**

Рис. 6. Активність подій АЕ залежно від внутрішнього надлишкового тиску і циклічного навантаження корпусів К-17 (а) та К-18 (б)

Таким чином, повторний прояв сигналів АЕ свідчить про зародження і розвиток процесу руйнування зварного чи паяного шва корпусу, задовго до катастрофічного руйнування, тобто його розгерметизації, і свідчить про непридатність такого корпусу до експлуатації.

Методика неруйнівного діагностування міцності паяних та зварних з'єднань в конструкціях електронної техніки

Виходячи із отриманих результатів запропонована методика акустико-емісійної неруйнівної діагностики міцності нероз'ємних елементів конструкцій, зокрема їх паяних та зварних з'єднань:

1. Випробування здійснюють неруйнівним навантаженням, яке розраховується із коефіцієнтом запасу міцності s відносно граничного або руйнівного навантаження P_{max} і відповідає допустимому напруженню паяного чи зварного з'єднання досліджуваної конструкції $P_{тест} = P_{max}/s$.

2. Випробування проводиться в режимі пульсуючого циклу навантаження/розвантаження із витримкою паузи між цими фазами та одночасною реєстрацією параметрів сигналів акустичної емісії. При появі сигналів АЕ з амплітудою вище встановленого рівня дискримінації випробування продовжуються до десяти циклів. Повторний прояв АЕ із зростанням сумарного рахунку свідчить про розвиток небезпечних дефектів і початок процесу руйнування та непридатність об'єкту дослідження до експлуатації; при необхідності, проводиться локація небезпечних дефектів.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Випробування на міцність паяних з'єднань наскрізного та поверхневого монтажу двох-вивідних електронних компонентів в критичних умовах напружено-деформованого стану під дією простих видів механічного навантаження на відрив та розтяг показали зниження значень руйнівних навантажень ПЗ викликане дефектом «холодна пайка» в середньому на 47 % для наскрізного монтажу та на 36,5 % для поверхневого монтажу, та очікуване підвищення міцності на 48 % завдяки попередньому перегріву терміналів SMD.

Запропоновано використання схеми чистого згину для проведення випробування в режимі статичного та циклічного пульсуючого навантаження, яке створює напружено-деформований стан, що зустрічається в процесі експлуатації при деформації основи друкованих плат, перевагами якого є можливість одночасного випробування багатьох ПЗ і забезпечення ідентичності напружено-деформованого стану.

Запропоновано проведення неруйнівного випробування навантаженням, при якому напруження ПЗ знаходиться в межах ділянки пропорційності матеріалу припою, в якій відбувається тільки пружна деформація матеріалу, що може бути підтверджено відсутністю сигналів акустичної емісії. Також відсутність сигналів акустичної емісії слугує підтвердженням достовірності реєстрації п'єзодатчиком саме сигналів АЕ, а не різного роду шумів.

Циклічні випробування за пульсуючим циклом виявили, що відсутність ефекту Кайзера при повторному навантаженні свідчить про наявність пластичних деформацій, або актів руйнування та розвитку тріщин, пор та інших дефектів. Витримка на піку навантаження дозволяє додатково виявити процеси релаксації та повзучості паяних з'єднань.

Аналіз напружено-деформованого стану корпусів НВЧ під дією пневматичного навантаження здійснений методом електротензометрії виявив, що напруження в матеріалі кришок корпусів є невеликими – в 5–6 разів меншими границі міцності їх матеріалу – АМГ-2, проте в матеріалі шва герметизації величини напружень досягають величин більших не тільки його границі пропорційності, а й границі міцності.

Набула подальшого розвитку акустико-емісійна методика неруйнівної діагностики міцності нероз'ємних елементів конструкцій електронної техніки, зокрема їх паяних та зварних з'єднань, яка полягає у відборі інформативних параметрів: амплітуди та сумарного рахунку сигналів акустичної емісії, не перевищення порогового рівня яких в умовах циклічного навантаження, свідчить про придатність об'єкту дослідження до експлуатації.

Література

1. ДСТУ 2646–94. Плати друковані. Терміни та визначення. – Чинний від 1994-01-07. – Київ : Держстандарт України, 1994. – 44 с.
2. ДСТУ IEC 60917-1:2010. Конструкції механічні для електронного устаткування. Модульний принцип конструювання. Ч. 1. Родовий стандарт (IEC 60917-1:2009, IDT). – Київ : Держспоживстандарт України, 2013. – 21 с.
3. Robertson C. T. Printed Circuit Board Designer's Reference: Basics / C. T. Ro-bertson. – New Jersey : Prentice Hall Professional, 2003. – 277 p.
4. Tong J. P. C. A DMAIC approach to printed circuit board quality improvement / J. P. C. Tong, F. Tsung, B. P. C. Yen // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – London : Springer, 2004. – Vol. 23, Issue 7–8. – P. 523–531.
5. Electronic packaging: design, materials, process, and reliability / John H. Lau, C. P. Wong, John L. Prince, Wataru Nakayama. – New York: McGraw-Hill Professional, 1998 – 496 p.
6. Engelmaier W. Solder joints in electronics: design for reliability. Workshop Notes. Engelmaier Associates, Inc., Mendham, NJ, 1995. – 13 p.
7. ДСТУ 7655:2014. Вироби електронної техніки. Загальні вимоги щодо надійності та методи випробування. – На заміну ГОСТ 25359-82 ; чинний від 2015-07-01. – Київ : Держспоживстандарт України, 2009. – 9 с.
8. ДСТУ 8216:2015. Вироби електронної техніки. Класифікація за умовами застосування та вимоги стійкості до зовнішніх впливових чинників. – Київ : Держспоживстандарт України, 2017. – 11 с.

9. ДСТУ EN 1330-2:2008, Неруйнівний контроль. Термінологія. Частина 2. Загальні терміни стосовно методів неруйнівного контролю. – Київ : Держспоживстандарт України, 2009. – 22 с.

10. Optical Interconnects on and in Printed Circuit Boards. International Journal of Electronics and Communications / B. Wittmann, S. Lehmacher, S. Kopecz, A. Neyer // AEU In-ternational Journal of Electronics and Communications. – Elsevier GmbH, 2001. – Vol. 55, Issue 5. – P. 319–222.

11. Barto S. Nonlinear distortion of C/V characteristic – Useful tool for diagnostics of electrically conductive adhesives: Theoretical background, measuring equipment, selected ap-plications / S. Barto and P. Mach // Proceedings of: Conf. on Diagnostics in Electrical Engine-ering (Diagnostika), 6–8 Sept. 2016 Pilsen, Czech Republic. – Pilsen : IEEE, 2016. – P. 1–4.

12. ДСТУ EN 1330-1:2016. Неруйнівний контроль. Термінологія. Частина 1. Перелік загальних термінів. – Київ : Держспоживстандарт України, 2017. – 22 с.

13. Effects of the strain transmission from the main board to the installed electronic components / I. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk, G. Baurienė, K. Pilkauskas // Mechanika. – Kaunas : KTU, 2016. – Vol. 22, № 6. – P. 494–489.

14. Shear strength and fracture surface analysis of Sn58Bi/Cu solder joints under a wide range of strain rates / Yongqiang Wan, Shuang Li, Xiaowu Hu, Yu Qiu, Tao Xu, Yulong Li, Xiongxin Jiang // Microelectronics Reliability – Elsevier, 2018. – Vol. 86. – P. 27–37.

15. Kovtun I. Nondestructive strength diagnostics of solder joints on printed circuit boards / I. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk // Proceedings of the Second IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo 2017), (Odessa, Ukraine, 1115 September, 2017). – P. 1–4.

16. Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев ; отв. ред. Г. С. Писаренко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев : Наук. думка, 1988. – 736 с.

17. Писаренко Г. С. Опір матеріалів / Г. С. Писаренко, О. Л. Квітка, Е. С. Уманський ; за ред. Г. С. Писаренка. – 2-ге вид. допов. і перероб. – Київ : Вища школа, 2004. – 655 с.

18. Tonolini F. General review of developments in Acoustic Emission methods / F. Tonolini, A. Sala, G. Villa // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – Elsevier Ltd, 1987. – Vol. 28, Issues 1–5. – P. 179–201.

References

1. DSTU 2646–94. Printed circuit boards. Terms and definitions. – Valid from 1994-01-07. – Kyiv : Derzhstandard of Ukraine, 1994. – 44 p.

2. DSTU IEC 60917-1:2010. Mechanical constructions for electronic equipment. Module principle of construction. Pt. 1. Standard (IEC 60917-1:2009, IDT). – Kiyv : Derszspozhivstandard of Ukraine, 2013. – 21 p.

3. Robertson C. T. Printed Circuit Board Designer's Reference: Basics / C. T. Ro-bertson. – New Jersey : Prentice Hall Professional, 2003. – 277 p.

4. Tong J. P. C. A DMAIC approach to printed circuit board quality improvement / J. P. C. Tong, F. Tsung, B. P. C. Yen // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – London : Springer, 2004. – Vol. 23, Issue 7–8. – P. 523–531.

5. Electronic packaging: design, materials, process, and reliability / John H. Lau, C. P. Wong, John L. Prince, Wataru Nakayama. – New York: McGraw-Hill Professional, 1998 – 496 p.

6. Engelmaier W. Solder joints in electronics: design for reliability. Workshop Notes. Engelmaier Associates, Inc., Mendham, NJ, 1995. – 13 p.

7. DSTU 7655:2014. Electronic components. General standards for reliablilty and testing methods. – Valid from 2015-07-01. – Kyiv : Derszspozhivstandard of Ukraine, 2009. – 9 p.

8. DSTU 8216:2015. Electronic components. Classification by conditions of expoitation and standards of resistance to external impacts. – Kyiv : Derszspozhivstandard of Ukraine, 2017. – 11 p.

9. DSTU EN 1330-2:2008, Non-destructive control. Terminology. Pt 2. General terms on non-destructive control methods. – Kyiv : Derszspozhivstandard of Ukraine, 2009. – 22 p.

10. Optical Interconnects on and in Printed Circuit Boards. International Journal of Electronics and Communications / B. Wittmann, S. Lehmacher, S. Kopecz, A. Neyer // AEU In-ternational Journal of Electronics and Communications. – Elsevier GmbH, 2001. – Vol. 55, Issue 5. – P. 319–222.

11. Barto S. Nonlinear distortion of C/V characteristic – Useful tool for diagnostics of electrically conductive adhesives: Theoretical background, measuring equipment, selected ap-plications / S. Barto and P. Mach // Proceedings of: Conf. on Diagnostics in Electrical Engine-ering (Diagnostika), 6–8 Sept. 2016 Pilsen, Czech Republic. – Pilsen : IEEE, 2016. – P. 1–4.

12. DSTU EN 1330-1:2016. Non-destructive control. Terminology. Pt 1. List of general terms. – Kyiv : Derszspozhivstandard of Ukraine, 2017. – 22 c.

13. Effects of the strain transmission from the main board to the installed electronic components / I. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk, G. Baurienė, K. Pilkauskas // Mechanika. – Kaunas : KTU, 2016. – Vol. 22, № 6. – P. 494–489.

14. Shear strength and fracture surface analysis of Sn58Bi/Cu solder joints under a wide range of strain rates / Yongqiang Wan, Shuang Li, Xiaowu Hu, Yu Qiu, Tao Xu, Yulong Li, Xiongxin Jiang // Microelectronics Reliability – Elsevier, 2018. – Vol. 86. – P. 27–37.

15. Kovtun I. Nondestructive strength diagnostics of solder joints on printed circuit boards / I. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk // Proceedings of the Second IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo 2017), (Odessa, Ukraine, 1115 September, 2017). – P. 1–4.

16. Reference book on strength of materials / G. S. Pisarenko, A. P. Yakovlev, V. V. Matveev ; ed. by G. S. Pisarenko. – 2-nd Edition. – Kyiv : Naukova dumka, 1988. – 736 p.

17. Pisarenko G. S. Strength of materials / G. S. Pisarenko, A. L. Kvitka, Y. S. Umanskiy; ed. by G. S. Pisarenko. – 2-nd Edition. – Kyiv : Higher school, 2004. – 655 p.

18. Tonolini F. General review of developments in Acoustic Emission methods / F. Tonolini, A. Sala, G. Villa // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – Elsevier Ltd, 1987. – Vol. 28, Issues 1–5. – P. 179–201.

https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-70-2-6
УДК 519.6:001.5

Олексій ЗАВГОРОДНІЙ
Державний біотехнологічний університет
https://orcid.org/0000-0003-2510-9160
e-mail: alexey.z.2014@gmail.com
Дмитро ЛЕВКІН
Державний біотехнологічний університет
https://orcid.org/0000-0002-1980-4426
e-mail: dimalevkin23@gmail.com
Оксана ШТОНДА
Харківський національний педагогічний університет імені Г.С. Сковороди
https://orcid.org/0000-0001-7601-487X
e-mail: stonda.oksana@gmail.com

МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

В статті вирішується низка задач оптимального управління технічними системами, які містять джерела фізичного навантаження. Через те, що для моделювання і оптимізації технологічних процесів в зазначених системах використовують нелокальні крайові задачі з диференціальними рівняннями в часткових похідних, ці системи відносяться до систем з розподіленими параметрами. Розв'язок диференціальних рівнянь з таких задач існує лише за стандартної форми об'єкта дослідження, відсутності багатошарової будови та, якщо не враховувати специфічні особливості процесу термічної дії. Для збільшення точності розрахунку і оптимізації технічних параметрів модельованих процесів потрібно розв'язати крайові задачі з некласичними диференціальними рівняннями. Використавши методи з теорії узагальнених функцій можливо обгрунтувати коректність зазначити крайових задач. Отже, потрібно визначити умови коректності крайових задач для конкретних видів диференціальних рівнянь. При оптимізації параметрів функції мети обґрунтування коректності зазначених крайових задач і прикладних оптимізаційних математичних моделей дозволить підвищити точність розрахунку і оптимізації параметрів модельованих систем.

Врахувавши особливості процесу термічної дії на багатошаровий матеріал, авторами побудована нелокальна крайова задача системи диференціальних рівнянь теплопровідності. Застосувавши методи з теорії узагальнених функцій, обгрунтована коректність крайової задачі в просторах узагальнених функцій степеневого зростання. Для доказу умов існування єдиного розв'язку, авторами перевірені умови обмеження на фундаментальну функцію розв'язків в зазначених просторах. Запропоновану в статті методику доцільно застосувати для розв'язання прикладних задач з розрахунку і оптимізації технічних, біотехнологічних, економічних і транспортних систем.

Ключові слова: управління, розрахунок, оптимізація, коректність, крайові задачі.

Olexiy ZAVGORODNIY, Dmytro LEVKIN
State Biotechnological University
Oksana SHTONDA
H.S. Scovoroda Kharkiv National Pedagogical University

METHODS OF TECHNICAL SYSTEMS PARAMETERS' CALCULATION

This article solves many problems of optimal management of technical systems that contain sources of physical activity. These systems are systems with distributed parameters because for modeling and optimization of technological processes these systems use non-local boundary value problems with differential equations in partial derivatives. The solution of differential equations for such problems exists only in the standard form of the object of study, in the absence of a multilayer structure and ignoring the specific features of the thermal action process. It is necessary to solve boundary value problems non-classical differential equations to increase the accuracy of calculations and optimization of technical parameters of simulated processes. It is possible to justify the correctness of the boundary value problems using methods from the theory of generalized functions. Therefore, it is necessary to determine the conditions for the correctness of boundary value problems for specific types of differential equations. The optimization of parameters of the function for the substantiation the correctness of boundary value problems and applied optimization mathematical models will allow increased accuracy of calculations and optimization of parameters of the modeled systems.

The authors constructed a nonlocal boundary value problem of the system of differential equations of thermal conductivity considering the peculiarities of the process of thermal action on a multilayer material. The correctness of the boundary value problem in the space of generalized functions of power growth is substantiated by applying methods from the theory of generalized functions. The authors tested the conditions of restriction on the fundamental function of solutions in these spaces to prove the conditions for the existence of a single solution. The method proposed in the article should be used to solve applied problems in the calculation and optimization of technical, biotechnological, economic, and transport systems.

Keywords: management, calculation, optimization, correctness, boundary value problems.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Для розробки нових проектних рішень в наукових областях потрібно вдосконалити існуючі методи математичного моделювання систем з розподіленими параметрами. Це дозволить автоматизувати наукові

дослідження прикладних оптимізаційних моделей і дослідити ефективність їх реалізації. Через специфіку предметної області досліджень класичні математичні моделі і методи не завжди адекватно відображають сутність оптимізованих процесів. Тому, більш доцільно запропонувати математичні моделі і методи реалізації процесів розрахунку і оптимізації параметрів складних систем для конкретних задач. Це дозволить автоматизувати наукові дослідження прикладних оптимізаційних математичних моделей і підвищити ефективність застосування методів для їх реалізації.

Здійснивши аналіз методів для розв'язання багатовимірних, багатоекстремальних задач нелінійного математичного програмування, в статті запропонована методика з розрахунку управляючих параметрів багатошарових технічних систем, які містять джерела термічного навантаження. Авторами наведена та розв'язана нелокальна крайова задача системи диференціальних рінянь теплопровідності, яка описує стан модельованого процесу. Застосувавши метод Шварця, доведена єдиність її розв'язку. Автори вважають, що доцільно використати запропоновану в статті методику для розрахунку управляючих параметрів технічних, біотехнологічних і економічних систем.

Аналіз досліджень та публікацій

В роботах [1–3] досліджена низка задач інженерного і технологічного проектування складних систем, які містять зосереджені дискретні джерела дії. Розроблені методи раціонального розбиття дискретно-неперервних точкових множин на підмножини [2, 3]. В публікації [4] вдосконалені математичні моделі і методи для оптимізації систем з розподіленими параметрами. Побудові математичних моделей і вдосконаленню існуючих методів для розрахунку і оптимізації процесу термічної дії на листовий метал задля збільшення ефекивності розв'язання прикладних задач у металургії та машинобудуванні присвячені результати публікацій [5, 6]. Авторами публікації [7] вдосконалені існуючі математичні моделі і методи в частині врахування особливостей трибосистем для підвищення точності розрахунку коефіцієнту добротності. Математичне моделювання і оптимізація транспортних потоків сільськогосподарських культур здійснене в публікації [8]. Деякі аспекти підвищення ефективності виробничої діяльності сільськогосподарських підприємств розглянуті в публікаціях [9–11].

Формулювання цілей статті

Метою роботи є запропонувати методику розрахунку управляючих параметрів багатошарових систем, яка буде враховувати етап визначення умов коректності наведеної в статті крайової задачі з системи диференціальних рівнянь.

Виклад основного матеріалу

Наведемо методику розрахунку параметрів технологічних процесів термічної дії на багатошарові матеріали. В публікаціях [12–14] здійснений розрахунок і оптимізація багатьох систем з розподіленими параметрами. Результати цієї публікації можливо застосувати для вдосконалення методики прогнозування і контролю виробничих ризиків при функційонуванні складних систем.

Крайова задача технологічного процесу термічної дії на багатошаровий матеріал:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial T(x,t)}{\partial t} = k\left(\dfrac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2}\right); \\ T(x,t_k-0) = T(x,t_k+0); \\ T(x,0)+\gamma T(x,t_n) = \varphi(x), \end{cases} \tag{1}$$

де $T(x,t)$ – температура дії:

γ –дійсний коефіцієнт;

$\varphi(x)$ – узагальнена функція.

Подіємо перетворенням Фур'є на крайову задачу (1):

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \tilde{T}(s,t)}{\partial t} = -ks^2\tilde{T}(s,t); \\ \tilde{T}(s,t_k-0) = \tilde{T}(s,t_k+0); \\ \tilde{T}(s,0)+\gamma\tilde{T}(s,t_n) = \tilde{\varphi}(s). \end{cases} \tag{2}$$

Для доказу умов коректності крайової задачі (1) дослідимо властивості фундаментальної функції:

ISSN 2219-9365

$$Q(s,t)=\begin{cases}\exp\{-ts^2\}\Delta^{-1}(s);\\ \exp\left\{\left(t-\frac{t_n}{2}\right)\left(-2s^2\right)\right\}\Delta^{-1}(s)\exp\left\{-\frac{t_n s^2}{2}\right\};\\ \ldots\quad\ldots\quad\ldots\quad\ldots\quad\ldots\quad\ldots\quad\ldots\quad\ldots\quad\ldots\\ \exp\left\{(t-\frac{(n-1)t_n}{n})\left(-ns^2\right)\right\}\Delta^{-1}(s)\exp\left\{-\frac{t_n s^2(n-1)}{2}\right\},\end{cases} \tag{3}$$

де $\Delta(s)=1+\gamma\exp\left\{\frac{-t_n s^2(n+1)}{2}\right\}$.

Потрібно, щоб $\Delta(s)$ не мала дійсних коренів. Розглянемо рівняння:

$$\Delta(s)=1+\gamma\exp\left\{\frac{-t_n s^2(n+1)}{2}\right\}=0. \tag{4}$$

Оскільки $\exp\left\{\frac{-t_n s^2(n+1)}{2}\right\}>0$, тоді рівняння (4) за умови, що $\gamma>0$, не має дійсних розв'язків, отже крайова задача (1) не коректна в просторі узагальнених функцій.

За умови, що $\gamma<0$, рівняння (4) має дійсні розв'язки, отже крайова задача (1) некоректна в просторі узагальнених функцій.

Перевіримо, що функція $Q(s,t)=\exp\left\{(t-\frac{(k-1)t_n}{n})\left(-ks^2\right)\right\}\Delta^{-1}(s)\exp\left\{-\frac{t_n s^2 k(1-k)}{2n}\right\}$ належить простору нескінченно-диференційованих функцій. Потрібно, щоб $\Delta^{-1}(s)<1$.

За умови, що $\gamma>0$, $\Delta(s)=1+\gamma\exp\left\{\frac{-t_n s^2(n+1)}{2}\right\}>1$, отже $\Delta^{-1}(s)<1$ і крайова задача (1) коректна.

За умови, що $\gamma<0$, $\Delta(s)=1+\gamma\exp\left\{\frac{-t_n s^2(n+1)}{2}\right\}<1$, отже $\Delta^{-1}(s)>1$і, крайова задача (1) некоректна.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У статті наведена формалізація задачі розрахунку температури дії на багатошарову технічну систему. Побудована та розв'язана крайова задача системи псевдодиференціальних рівнянь теплопровідності, яка описують стан модельованого процесу. Визначені та детально досліджені умови коректності, параболічності зазначеної крайової задачі в функціональних просторах. Аналіз особливостей фундаментальної функції розв'язку дозволить більш ефективно здійснити вибір методів для реалізації прикладних оптимізаційних математичних моделей пошуку оптимальних значень технічних параметрів.

Література

1. Стоян Ю.Г. Размещение источников физических полей. / Ю.Г. Стоян, В.П. Путятин. – К.: Наук. думка, 1981. – С. 59–87.

2. Стоян Ю.Г. Методы и алгоритмы размещения плоских геометрических объектов. / Ю.Г. Стоян, Н.И. Гиль. – К.: Наук. думка, 1976. – 247 с.

3. Садковий В.П. Раціональне розбиття множин при територіальному плануванні в сфері цивільного захисту. / В.П. Садковий, В.М, Комяк, О.М, Соболь. – Харків: УЦЗУ, 2008. – 174 с.

4. Mamtiyev K. Analysis of one class of optimal control problms for distributed-parameter systems. / K. Mamtiyev, T. Aliyeva, U. Rzayeva. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – Vol. 5. No. 4 (113): Mathematics and Cybernetics applied aspects. – Pp. 26–33. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.241232

5. Зайцев Є.П. Математичне моделювання двічі нелінійної задачі теплопровідності трансверсально-ізотропного термочутливого циліндра під впливом зонального високотемпературного теплообміну. / Зайцев Є.П. // Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського. Серія: «Технічні науки». – Київ, 2021. – Т.32(71). №2. Ч. 1. – С. 31–38. https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.2-1/07

6. Скобло Т.С. Использование лазерных технологий для упрочнения и восстановления изделий из

сталей и сплавов. / Т.С. Скобло, А.Д. Мартыненко, В.А. Бантковский, А.А. Гончаренко, А.В. Сайчук, А.В. Тихонов, С.В. Лысенко. // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – 2019. – № 15. – С. 142–162.

7. Vojtov V.A. Criteria for evaluation of tribus system practices and its communication with tribological characteristics. / V.A. Vojtov, A.SH. Bekirov, A.V. Voitov. // Problems of Tribology. – 2018. – Vol. 88. No. 2. – Pp. 35–42.

8. Vojtov V. Modeling of reliability of logistic systems of urban freight transportation taking into account street congestion. / V. Vojtov, O. Kutiya, N. Berezhnaja, M. Karnaukh, O. Bilyaeva. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Vol. 4. No. 3. – Pp. 15–21. DOI: 10. 15587/1729-4061.2019. 175064.

9. Fedicheva K. Controlling, monitoring and diagnostics in identifying effective management practices of agricultural enterprises . / K. Fedicheva, O. Kochetkov, S. Honcharenko, R. Levkina, M. Bichevin. // Agricultural and Resource Economics. – 2021. – Vol. 7. Issue. 2. – Pp. 200–218. https://doi.org/10.22004/ag.econ.31363610.

10. Tytarchuk I. Innovations financing in the agricultural sector. / I. Tytarchuk, Y. Nehoda, I. Shalyhina, N. Bazhanova, O. Horbachova, L. Rybina. // International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology. – 2020. – Vol. 11. Issue. 4. – Pp. 246–255.

11. Котко Я.М. Механізм управління розвитком підприємств-виробників продукції рослинництва. / Котко Я.М. // Український журнал прикладної економіки. – 2020. – Т. 5. №3. – С. 387–394. https://doi.org/10.36887/2415-8453-2020-3-43

12. Skoblo T.S. Influence of Stresses on Structural Changes in Gray Cast Iron. / T.S. Skoblo, O.I. Sidashenko, O.V. Saichuk, O.Y. Klochko, D.A. Levkin. // Materials Science. – 2020. – Vol. 56. Issue. 3. – Pp. 347–358.

13. Kravtsov A. Development of a rheological model of stress relaxation in the structure of an oil film on the friction surface with fullerene additives. / A. Kravtsov, A. Suska, A. Biekirov, D. Levkin. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – Vol. 3. No. 7 (111): Applied mechanics. – Pp. 93–99. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.235468

14. Palii A.P. Milking and udder health assesment in industrial farming. / A.P. Palii, S.A. Mihalchenko, H.F. Chechui, A.P.Reshetnichenko, Y.E. Rozum, V.V. Bredychin, O.V. Bogomolov, S.A. Denicenko, T.Y. Mitashkina, A.I. Sychov, V.B. Savcenko, D.A. Levkin, A.P. Paliy. // Ukrainian journal of Ecology. – Vol. 10. Issue. 2. – Pp. 375–381. doi: 10_15421/2020_112

References

1. Stoyan Yu.G. Razmeschenie istochnikov fizicheskih poley. / Yu.G. Stoyan, V.P. Putyatin. – Kyiv: Naukova dumka, 1981. – Pp. 59–87.

2. Stoyan Yu.G. Metodyi i algoritmyi razmescheniya ploskih geometricheskih ob'ektov. / Yu.G. Stoyan, N.I. Gil. – Kyiv: Naukova dumka, 1976. – 247 p.

3. Sadkovyi V.P. Ratsionalne rozbyttia mnozhyn pry terytorialnomu planuvanni v sferi tsyvilnoho zakhystu. / V.P. Sadkovyi, V.M. Komiak, O.M. Sobol. – Kharkiv: UtsZU? 2008. – 174 p.

4. Mamtiyev K. Analysis of one class of optimal control problms for distributed-parameter systems. / K. Mamtiyev, T. Aliyeva, U. Rzayeva. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – Vol. 5. No. 4 (113): Mathematics and Cybernetics applied aspects. – Pp. 26–33. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.241232

5. Zaytsev E.P. Matematychne modeliuvannia dvichi neliniinoi zadachi teploprovidnosti transversalno-izotropnoho termochutlyvoho tsylindra pid vplyvom zonalnoho vysokotemperaturnoho teploobminu. / Zaytsev E.P. // Vcheni zapysky Tavriiskoho Natsionalnoho Universytetu imeni V.I. Vernadskoho. Seriia: «Tekhnichni nauky». – Kyiv, 2021. – Vol. 32(71). No. 2. Ch. 1 – Pp. 31–38. https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.2-1/07

6. Skoblo T.S. Ispolzovanie lazernyih tehnologiy dlya uprochneniya i vosstanovleniya izdeliy iz staley i splavov. / T.S. Skoblo, A.D. Martyinenko, V.A. Bantkovskiy, A.A. Goncharenko, A.V. Saychuk, A.V. Tihonov, S.V. Lyisenko. // Tekhnichnyi servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv. – 2019. – No. 15. – Pp. 142–162.

7. Vojtov V.A. Criteria for evaluation of tribus system practices and its communication with tribological characteristics. / V.A. Vojtov, A.SH. Bekirov, A.V. Voitov. // Problems of Tribology. – 2018. – Vol. 88. No. 2. – Pp. 35–42.

8. Vojtov V. Modeling of reliability of logistic systems of urban freight transportation taking into account street congestion. / V. Vojtov, O. Kutiya, N. Berezhnaja, M. Karnaukh, O. Bilyaeva. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Vol. 4. No. 3. – Pp. 15–21. DOI: 10. 15587/1729-4061.2019. 175064.

9. Fedicheva K. Controlling, monitoring and diagnostics in identifying effective management practices of agricultural enterprises . / K. Fedicheva, O. Kochetkov, S. Honcharenko, R. Levkina, M. Bichevin. // Agricultural and Resource Economics. – 2021. – Vol. 7. Issue. 2. – Pp. 200–218. https://doi.org/10.22004/ag.econ.31363610.

10. Tytarchuk I. Innovations financing in the agricultural sector. / I. Tytarchuk, Y. Nehoda, I. Shalyhina, N. Bazhanova, O. Horbachova, L. Rybina. // International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology. – 2020. – Vol. 11. Issue. 4. – Pp. 246–255.

11. Котко Я.М. Механізм управління розвитком підприємств-виробників продукції рослинництва. / Котко Я.М. // Український журнал прикладної економіки. – 2020. – Т. 5. №3. – С. 387–394. https://doi.org/10.36887/2415-8453-2020-3-43

12. Skoblo T.S. Influence of Stresses on Structural Changes in Gray Cast Iron. / T.S. Skoblo, O.I. Sidashenko, O.V. Saichuk, O.Y. Klochko, D.A. Levkin. // Materials Science. – 2020. – Vol. 56. Issue. 3. – Pp. 347–358.

13. Kravtsov A. Development of a rheological model of stress relaxation in the structure of an oil film on the friction surface with fullerene additives. / A. Kravtsov, A. Suska, A. Biekirov, D. Levkin. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – Vol. 3. No. 7 (111): Applied mechanics. – Pp. 93–99. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.235468

14. Palii A.P. Milking and udder health assesment in industrial farming. / A.P. Palii, S.A. Mihalchenko, H.F. Chechui, A.P.Reshetnichenko, Y.E. Rozum, V.V. Bredychin, O.V. Bogomolov, S.A. Denicenko, T.Y. Mitashkina, A.I. Sychov, V.B. Savcenko, D.A. Levkin, A.P. Paliy. // Ukrainian journal of Ecology. – Vol. 10. Issue. 2. – Pp. 375–381. doi: 10_15421/2020_112

https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-70-2-7
УДК 681.513.5

Сергій ГОРЯЩЕНКО
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0001-6623-2523
e-mail: horiashchenko@khmnu.edu.ua
Костянтин ГОРЯЩЕНКО
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0002-7034-8702
e-mail: kostyakst@ukr.net
Георгій ДРАПАК
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0002-4908-0887
e-mail: g_drapak@i.ua
Василь НЕЗДОРОВІН
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0003-3592-4548
e-mail: nezdorovin@gkhmnu.edu.ua

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДИНАМІКИ ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧОЇ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ

У статті представлено моделювання роботи темплоакумулятора при перетворені електричної енергії в теплову, які мають кращі показники. Перспективним в цьому плані є застосування автономних теплоакумулюючих електронагрівальних приладів, які акумулюють енергію вночі по пільговим тарифам та віддають її протягом дня. Це пов'язано з тим, що постійне збільшення ціни за теплопостачання залежить від ціни на природній газ. В таких умовах електроопалення з використанням низьких нічних тарифів з неефективного стає економічно вигідним і конкурентоспроможним порівняно з іншими видами індивідуального опалення. Проведена оцінка динаміки систем опалення з точки зору ефективності використання теплової енергії та рівня підтримки теплового комфорту в опалювальних приміщеннях у широкому діапазоні показала варіанти технічних рішень ефективного розподілу теплової енергії та забезпечення кращих умов теплового комфорту в опалювальних приміщеннях. Отримана модель може бути корисна для інженерних розрахунків теплоакумулюючих систем з електричною системою опалення.

Ключові слова: опалення, динаміка, котел, теплоакумулятор.

Serhiy HORIASHCHENKO, Kostyantyn HORIASHCHENKO,
Georgii DRAPAK, Vasyl NEZDOROVIN
Khmelnitskyi National University

MATHEMATICAL MODEL OF THE DYNAMICS OF A HEAT STORAGE SYSTEM

The article presents a model of the operation of a thermal accumulator during the transformation of electrical energy into thermal energy, which may be the best indicators. Prospective in this plan is the installation of autonomous heat-accumulating electric heating appliances, which accumulate energy at night at low tariffs and last through the day. Why is it due to the fact that there will be a permanent reduction in the price for heat supply to deposit in the price of natural gas. In such minds, electric scorching with low nightly tariffs is not efficient, economically viable and competitively equal to other types of individual scorching.

For solving problems of non-stationary and stationary heat conduction with boundary minds of the third kind, it is necessary to know the heat transfer coefficient. Krim tsyogo in deyakih vipadkah vinikає nebhidnist i in designated temperature watering in pototsi idini abo gas. Distinguish convective heat exchange during temporal and during free flow. At the first moment, the flow is rushed to the floor by pumps, fans, compressors, etc. In the other, there is a fluctuation of ruh ridini or gas vinikає bil surfacing warm or cold body, the middle T_f and the surface of the body TW. I in case of vibration, and in case of free convection, laminar, transitional and turbulent flow modes are distinguished.

An assessment of the dynamics of scorching systems from the point of view of the efficiency of heat energy and the improvement of thermal comfort in scorching areas in a wide range has been carried out, it has shown options for technical solutions for effective distribution of heat energy and for ensuring the safety of heating in reducing comfort. Otriman's model can be adapted for engineering designs of heat-accumulating systems with an electrical scorching system.

Key words: scorching, dynamics, boiler, heat accumulator.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

В основі роботи опалювальної теплоакумуляційної системи [1,2,3,4] лежить принцип накопичення тепла в теплових акумуляторах, які нагріваються від електричної енергії. Накопичивши тепло теплові акумулятори не споживаючи електроенергію віддають тепло в приміщення, таким чином опалюють його, за рахунок цього і досягається значна економія електроенергії.

Розвиток сучасних технологій в галузі перетворення електричної енергії в теплову, які мають кращі показники в теплоакумуляційному забезпеченні споживачів сприяв широкому впровадженню таких систем

як теплові насоси і теплові генератори в усіх індустріально розвинутих країнах, що спонукає до пошуку шляхів більш широкого їх застосування і в Україні [5]. Перспективним в цьому плані є застосування автономних теплоакумулюючих електронагрівальних приладів, які акумулюють енергію вночі по пільговим тарифам та віддають її протягом дня. Це пов'язано з тим, що постійне збільшення ціни за теплопостачання залежить від ціни на природній газ. В таких умовах електроопалення з використанням низьких нічних тарифів з неефективного стає економічно вигідним і конкурентоспроможним порівняно з іншими видами індивідуального опалення [6, 8, 9].

Розглянемо елементарну область теплообмінника, з урахуванням [6, 7, 10] при нестаціонарному температурному режимі роботи. Нехай гарячий теплоносій також знаходиться в трубному просторі і його характеристики мають індекс 1. Також зберігаються всі інші позначення, прийняті при моделюванні стаціонарного режиму. При нестаціонарному температурному режимі витрати теплоносіїв і їх початкові температури можуть залишатися постійними або змінюватися в часі. [12] В цьому випадку елементарна область являє собою елементарний внутрішній обсяг апарату, який визначається так само, як в стаціонарному випадку, але розглянута протягом елементарного інтервалу часу Δτ. Допущення про постійність теплофізичних характеристик теплоносіїв усередині елементарної області, прийняте для елементарної області при стаціонарному режимі, залишається в силі. Тепловий баланс елементарної області в нестаціонарному температурному режимі з урахуванням [13] можна записати як:

$$\Delta Q_1 = \Delta Q_2 + \Delta Q_T + \Delta Q_K + \Delta Q_i + \Delta Q_П, \tag{1}$$

де ΔQ_1 - теплова потужність, що віддається гарячим теплоносієм;
ΔQ_2 - теплова потужність, що отримується холодним теплоносієм;
$\Delta Q_т$ - теплова потужність, що витрачається на нагрів стінок трубок;
$\Delta Q_к$ - теплова потужність, що витрачається на нагрів стінки корпусу;
ΔQ_i - теплова потужність, що витрачається на нагрів шару теплоізоляції;
$\Delta Q_п$ - теплова потужність втрат в навколишній простір.

Температурне поле елементарної області при нестаціонарному температурному режимі також моделюється рішенням зв'язаним завданням теплопровідності, що включає задачі нестаціонарної теплопровідності для полого багатошарового необмеженого циліндра з довільним початковим розподілом і несиметричними неоднорідними граничними умовами 3-го роду на внутрішній і зовнішній поверхнях (температурні поля стінок трубок і теплоізольованого корпусу), і рівняннями руху рідини, що рухається в режимі ідеального витіснення з каналу (температурні поля теплоносіїв в трубному та міжтрубному просторах). Необхідність використання постановки задач теплопровідності з довільним початковим розподілом диктується методикою використання температурного поля елементарної області для моделювання температурного поля апарату, при якій для чергової елементарної області доводиться вирішувати нове завдання теплопровідності з початковим температурним профілем, відповідним попереднім інтервалом часу для тієї ж просторової області. При відсутності забруднень стінка трубки розглядається як порожній одношаровий необмежений циліндр, при наявності - відповідно як багатошаровий. Теплоізольований корпус апарату в залежності від наявності забруднень, покриттів, екранів, також може розглядатися як дво- або багатошаровий порожній необмежений циліндр.

Формулювання цілей статті

В позначеннях, аналогічних прийнятим для моделювання стаціонарного режиму, температурне поле елементарної області теплообмінника, що працює в нестаціонарному температурному режимі, моделюється системою рівнянь [10]:

$$\frac{\partial t_1(x,\tau)}{\partial \tau} + W_1 \frac{\partial t_1(x,\tau)}{\partial x} + K_1 t_1(x,\tau) = F_1(x,\tau), \quad 0 \le x \le \Delta x; \tag{2}$$

$$t_1(0,\tau) = t_{10}(\tau); \qquad t_1(x,0) = f_1(x); \tag{3}$$

$$\frac{\partial U(r,\tau)}{\partial \tau} = a_t^2 \left(\frac{\partial^2 U(r,\tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U(r,\tau)}{\partial r} \right), \qquad r_т \le r \le r_т + \delta_т, \quad \tau > 0; \tag{4}$$

$$U(r,0) = f_t(r); \tag{5}$$

Вихідними даними для розрахунку є наступні.

ISSN 2219-9365

1) Дані по апарату:
$D_к$ - внутрішній діаметр корпусу апарату;
$d_т$ - внутрішній діаметр трубок;
$\delta_к$ - товщина стінки корпусу;
T - товщина стінки трубок;
δ_i - товщина шару теплоізоляції;
δ_z - товщина забруднень;
n - число трубок в пучку;
m - число ходів;
$l_р$ - відстань між перегородками;
$s_е$ - площа поперечного перерізу, відокремлена екранами;
$\lambda_т$, $\lambda_к$, λ_i, λ_z - коефіцієнти теплопровідності матеріалів трубок, корпусу, теплоізоляції і забруднень відповідно.

2) Дані про речовини, які беруть участь в теплообміні:
P_1, P_2 - тиску в трубному та міжтрубному просторах;
$\rho_1(t)$, $\rho_2(t)$ - щільності;
$c_1(t)$, $c_2(t)$ - теплоємності;
$\lambda_1(t)$, $\lambda_2(t)$ - теплопровідності;
$\mu_1(t)$, $\mu_2(t)$ - динамічні в'язкості;
$\beta_1(t)$, $\beta_2(t)$ - коефіцієнти об'ємного розширення;
$\sigma_1(t)$, $\sigma_2(t)$ - поверхневі натягу;
$r_1(t)$, $r_2(t)$ - питомі теплоти фазових переходів;
$t_{ф1}(P)$, $t_{ф2}(P)$ - температури фазових переходів;
$t_{ос}$ - температура навколишнього середовища.
k_1 - індекс, що визначає взаємне напрямок руху теплоносіїв;
F - площа поверхні теплообміну;
G_1, G_2 - масові витрати теплоносіїв;
$t_{1н}$, $t_{2н}$ - початкові температури теплоносіїв;
$t_{1к}$, $t_{2к}$ - кінцеві температури теплоносіїв.

Виклад основного матеріалу

Модель динаміки представимо у вигляді:

$$t_1(x,d\tau)=\exp(-P_1 x)\left(t_{10}(d\tau)+\int_0^x \theta_1(x,d\tau)\exp(P_1 x)dx\right), \tag{6}$$

$$P_1=\frac{K_1 d\tau+1}{W_1 d\tau};\qquad \theta_1(x,d\tau)=\frac{1}{W_1}\left(F_1(x,d\tau)+\frac{f_1(x)}{d\tau}\right). \tag{7}$$

Градієнт температури:

$$U(r,\tau)=A+B\ln(r)+\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\xi(\nu_n,\tau)\zeta(r,\nu_n)}{Z_n}, \tag{8}$$

$$B=\frac{\bar{t}_1-\bar{t}_2}{\ln(r_т)-\ln(r_т+\delta_т)+\lambda_т\left(\frac{1}{r_т\,\alpha_1}-\frac{1}{(r_т+\delta_т)\alpha_2}\right)}; \tag{9}$$

$$A=\bar{t}_1-B\left(\ln(r_т)+\frac{\lambda_c}{\alpha_1 r_т}\right). \tag{10}$$

Рівняння функції зміни температури в просторі:

$$\xi(\nu_n,\tau)=\xi(\nu_n,0)\exp\left(-\nu_n^2\tau\right); \tag{11}$$

$$\zeta(r,\nu_n)=J_0\left(\frac{\nu_n r}{a_c}\right)+D_n Y_0\left(\frac{\nu_n r}{a_c}\right); \tag{12}$$

$$\xi(\nu_n,0)=\int_{r_T}^{r_T+\delta_T} r\left(f_t(r)-A-B\ln(r)\right)\zeta(r,\nu_n)dr; \tag{13}$$

$$D_n=\frac{\frac{\lambda_T\nu_n}{a_t}J_1\left(\frac{\nu_n}{a_t}r_T\right)-\alpha_1 J_0\left(\frac{\nu_n}{a_t}r_T\right)}{\alpha_1 Y_0\left(\frac{\nu_n}{a_t}r_T\right)-\frac{\lambda_T\nu_n}{a_t}Y_1\left(\frac{\nu_n}{a_t}r_T\right)}; \tag{14}$$

де ν_n- послідовні позитивні коріння рівняння.
Стан теплової рівноваги визначається так:

$$J_0\left(\frac{\nu(r_T+\delta_T)}{a_t}\right)-\frac{\nu\lambda_T}{a_t\alpha_2}J_1\left(\frac{\nu(r_T+\delta_T)}{a_t}\right)+ \\ +D\left(Y_0\left(\frac{\nu(r_T+\delta_T)}{a_t}\right)-\frac{\nu\lambda_T}{a_t\alpha_2}Y_1\left(\frac{\nu(r_T+\delta_T)}{a_t}\right)\right)=0. \tag{15}$$

При цьому стан рівняння теплопровідності є для ізоляції є:

$$C_{2,n}=\frac{C_{1,n}J_0\left(\frac{\mu_n}{a_1}R_1\right)+D_{1,n}Y_0\left(\frac{\mu_n}{a_1}R_1\right)-D_{2,n}Y_0\left(\frac{\mu_n}{a_2}R_1\right)}{Y_0\left(\frac{\mu_n}{a_2}R_1\right)}; \tag{16}$$

$$D_{2,n}=\frac{\frac{\lambda_1 a_{21}}{\lambda_2 a_1}J_0\left(\frac{\mu_n}{a_2}R_1\right)\left(C_{1,n}J_1\left(\frac{\mu_n}{a_1}R_1\right)+D_{1,n}Y_1\left(\frac{\mu_n}{a_1}R_1\right)\right)-}{J_0\left(\frac{\mu_n}{a_2}R_1\right)Y_1\left(\frac{\mu_n}{a_2}R_1\right)-}\rightarrow \\ \rightarrow\frac{-J_1\left(\frac{\mu_n}{a_2}R_1\right)\left(C_{1,n}J_0\left(\frac{\mu_n}{a_1}R_1\right)+D_{1,n}Y_0\left(\frac{\mu_n}{a_1}R_1\right)\right)}{-J_1\left(\frac{\mu_n}{a_2}R_1\right)Y_0\left(\frac{\mu_n}{a_2}R_1\right)}; \tag{17}$$

μ_n - n-й позитивний корінь рівняння. Прицьому:

$$C_2\left(J_0\left(\frac{\mu R_2}{a_2}\right)-\frac{\mu\lambda_2}{a_2\alpha_{oc}}J_1\left(\frac{\mu R_2}{a_2}\right)\right)+D_2\left(Y_0\left(\frac{\mu R_2}{a_2}\right)-\frac{\mu\lambda_2}{a_2\alpha_{oc}}Y_1\left(\frac{\mu R_2}{a_2}\right)\right)=0. \tag{18}$$

Температурна напруженість в моделі:

$$\sigma(\mu_n,0)=\sum_{m=1}^{2}\frac{\lambda_m}{a_m^2}\int_{R_{m-1}}^{R_m} r_m\left(\vartheta_m(r_m)-A_m-B_m\ln(r_m)\right)\times \\ \times\left(C_{m,n}J_0\left(\frac{\mu_n r_m}{a_m}\right)+D_{m,n}Y_0\left(\frac{\mu_n r_m}{a_m}\right)\right)dr_m; \tag{19}$$

$$\sigma(\mu_n,\tau)=\sigma(\mu_n,0)\exp\left(-\mu_n^2\tau\right). \tag{20}$$

У формулах (17) - (19) індекс 1 відноситься до стінки корпусу, а індекс 2 - до шару теплоізоляції.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Для вирішення задач нестаціонарної та стаціонарної теплопровідності з граничними умовами третього роду потрібне знання коефіцієнта тепловіддачі α. Крім цього в деяких випадках виникає необхідність і в визначенні температурних полів в потоці рідини або газу. Розрізняють конвективний теплообмін при вимушеному і при вільному перебігу. У першому випадку потік збуджується до руху насосами, вентиляторами, компресорами і т.д. У другому ж випадку рух рідини або газу виникає біля поверхні теплого або холодного тіла, середовища T_f і поверхні тіла TW. І при вимушеній, і при вільної конвекції розрізняють ламінарний, перехідний і турбулентний режими течії.

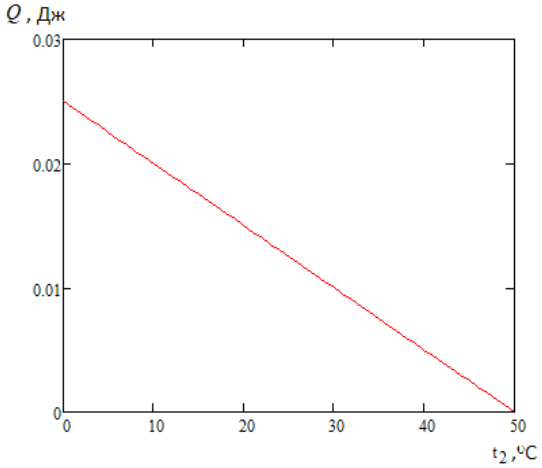


Рис. 1. Залежність теплоти, що випромінюється в залежності від перепаду температур

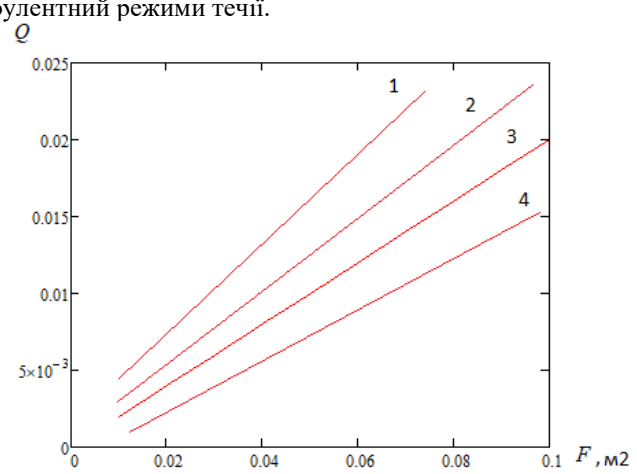


Рис. 2. Залежність теплоти, що випромінюється площі від теплообмінниика при різних температурах: 1- 20 ^{0}C, 2- 30 ^{0}C, 3- 40 ^{0}C, 4- 50 ^{0}C

Через те, що фактори, що визначають режими теплопостачання та теплоспоживання будинків, мають в більшій своїй частині імовірнісний характер і залежать від особливостей умов функціонування даної конкретної системи (її розміру, стану обладнання метеорологічних умов, режиму центрального регулювання відпуску тепла, тепло-фізичних характеристик огороджувальних конструкцій та ін.), представляється можливим дати узагальнену кількісну оцінку втрат при розподілі теплоносія між опалювальними приміщеннями з урахуванням ефективності автоматичного регулювання.

Проведена оцінка динаміки систем опалення з точки зору ефективності використання теплової енергії та рівня підтримки теплового комфорту в опалювальних приміщеннях у широкому діапазоні показала варіанти технічних рішень ефективного розподілу теплової енергії та забезпечення кращих умов теплового комфорту в опалювальних приміщеннях. Отримана модель може бути корисна для інженерних розрахунків теплоакумулюючих систем з електричною системою опалення

Література

1. 86 Пат.112572 Україна, МПК F24H 1/20. Електродний нагрівач рідини із зворотним зв'язком/Любчик Віталій Романович; Рибалко Олег Петрович; Горященко Сергій Леонідович; Параска Георгій Борисович; Заявник та патентовласник Хмельницький національний університет; Патент опубліковано 26.12.2016, бюл. № 24/2016 -5 с.

2. Пат. 89286 Україна, МПК F24D 11/00, F24D 15/02. Теплоакумулятор з теплоізолюючою перегородкою/ Г. Б. Параска; С. Л. Горященко; В. Р. Любчик; А .В. Вітюк; заявник і патентовласник Хмельницький національний університет; опубліковано 10.04.2014, Бюл. № 7/2014 – 4 с.

3. Пат. 9148 Україна, F24D 11/00. Система опалення приміщень/ Г. Б. Параска; С. Л. Горященко; В. Р. Любчик; А. В. Вітюк; заявник і патентовласник Хмельницький національний університет; опубліковано 10.07.2014, Бюл. № 13/2014 – 5 с.

4. Пат. 99525, Україна. F24D 15/02, F24D 11/00. Теплоакумулятор з теплоізолюючою перетинкою/ С. Л. Горященко , Г. Б. Параска, А. В. Вітюк, В. Р. Любчик; заявник і патентовласник Хмельницький національний університет; опубліковано 10.06.2015, Бюл. № 11/2015 – 4 с.

5. Теплове господарство України: сучасний стан, проблеми та перспективи розвитку : монографія / В. І. Пила, В. Я. Чевганова, В. В. Скриль ; Полтавський нац. техн. ун-т імені Юрія Кондратюка. - К. : Центр учбової літератури, 2014. - 341 с.

6. Інженерія та енергетика: теорія, аналіз, практика : матеріали другої регіональної наук.-практ. конф. студ. та викладачів, (Луганськ, 11 квіт. 2013 р.) / Луган. облрада директорів ВНЗ І-ІІ рівнів акредитації, ДВНЗ «Луган. буд. коледж». - Луганськ : Ноулідж, 2013. - 160 с. : іл., табл.

7. Інноваційне управління енергозбереженням промислових підприємств: монографія /Аптекар С. С., Іванова В. В. ; Донецький нац. ун-т економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського. - Донецьк : ДонНУЕТ, 2012. - 286 с.

8. Інтеграція технологій екологізації та енергозбереження в освітніх закладах : монографія / Совгіра С. В., Гончаренко Г. Є., Гончаренко В. Г.; МОН. - Умань : Видавець "Сочінський", 2014. - 182 с.

9. Управління проектами енерговикористання : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закладів, які навч. за спец. "Енергетичний менеджмент" / Ю. Г. Качан, К. О. Братковська ; Запорізька інж. акад. - Запоріжжя : ЗДІА, 2014. - 141 с.

10. Вступ до теорії енергоефективності багаторівневих систем: методи та моделі енергетичного менеджменту в системі житлово-комунального господарства : монографія / О. М. Ковалко, О. В. Новосельцев, Т. О. Євтухова ; НАН України, Ін-т техн. теплофізики. - К. :, 2014. - 253 с.

11. Теплове господарство України: сучасний стан, проблеми та перспективи розвитку : монографія / В. І. Пила, В. Я. Чевганова, В. В. Скриль; Полтавський нац. техн. ун-т імені Юрія Кондратюка. - К. : Центр учбової літератури, 2014. - 341 с.

12. Математичне моделювання автоматизованої теплоакумулюючої сисетеми/ С.Л. Горященко, О.О. Никитин, Ю.Ю. Кушнір, С.В. Успаленко//Вісник хмельницького національного університету серія: Технічні науки, Хмельницький. ХНУ, т.6., - 2017, с. 60-64

13. Моделювання роботи тепло-холодоакумулюючої системи/ С.Л. Горященко, С.В. Успаленко//Вісник хмельницького національного університету серія: Технічні науки, Хмельницький. ХНУ, №3, 2017, с.77-79

References

1. 86 Pat.112572 Ukrayina, MPK F24H 1/20. Elektrodnyj nahrivach ridyny iz zvorotnym zv'yazkom/Lyubchyk Vitalij Romanovych; Rybalko Oleh Petrovych; Horyashhenko Serhij Leonidovych; Paraska Heorhij Borysovych; Zayavnyk ta patentovlasnyk Xmel"nyc"kyj nacional"nyj universytet; Patent opublikovano 26.12.2016, byul. № 24/2016 -5 s.

2. Pat. 89286 Ukrayina, MPK F24D 11/00, F24D 15/02. Teploakumulyator z teploizolyuyuchoyu perehorodkoyu/ H. B. Paraska; S. L. Horyashhenko; V. R. Lyubchyk; A .V. Vityuk; zayavnyk i patentovlasnyk Xmel"nyc"kyj nacional"nyj universytet; opublikovano 10.04.2014, Byul. № 7/2014 – 4 s.

3. Pat. 9148 Ukrayina, F24D 11/00. Systema opalennya prymishhen"/ H. B. Paraska; S. L. Horyashhenko; V. R. Lyubchyk; A. V. Vityuk; zayavnyk i patentovlasnyk Xmel"nyc"kyj nacional"nyj universytet; opublikovano 10.07.2014, Byul. № 13/2014 – 5 s.

4. Pat. 99525, Ukrayina. F24D 15/02, F24D 11/00. Teploakumulyator z teploizolyuyuchoyu peretynkoyu/ S. L. Horyashhenko , H. B. Paraska, A. V. Vityuk, V. R. Lyubchyk; zayavnyk i patentovlasnyk Xmel"nyc"kyj nacional"nyj universytet; opublikovano 10.06.2015, Byul. № 11/2015 – 4 s.

5. Teplove hospodarstvo Ukrayiny: suchasnyj stan, problemy ta perspektyvy rozvytku : monohrafiya / V. I. Pyla, V. Ya. Chevhanova, V. V. Skryl" ; Poltavs"kyj nac. texn. un-t imeni Yuriya Kondratyuka. - K. : Centr uchbovoyi literatury, 2014. - 341 s.

6. Inzheneriya ta enerhetyka: teoriya, analiz, praktyka : materialy druhoyi rehional"noyi nauk.-prakt. konf. stud. ta vykladachiv, (Luhans"k, 11 kvit. 2013 r.) / Luhan. oblrada dyrektoriv VNZ I-II rivniv akredytaciyi, DVNZ «Luhan. bud. koledzh». - Luhans"k : Noulidzh, 2013. - 160 s. : il., tabl.

7. Innovacijne upravlinnya enerhozberezhennyam promyslovyx pidpryyemstv: monohrafiya /Aptekar S. S., Ivanova V. V. ; Donec"kyj nac. un-t ekonomiky i torhivli imeni Myxajla Tuhan-Baranovs"koho. - Donec"k : DonNUET, 2012. - 286 s.

8. Intehraciya texnolohij ekolohizaciyi ta enerhozberezhennya v osvitnix zakladax : monohrafiya / Sovhira S. V., Honcharenko H. Ye., Honcharenko V. H.; MON. - Uman" : Vydavec" "Sochins"kyj", 2014. - 182 s.

9. Upravlinnya proektamy enerhovykorystannya : navch. posib. dlya stud. vyshh. navch. zakladiv, yaki navch. za spec. "Enerhetychnyj menedzhment" / Yu. H. Kachan, K. O. Bratkovs"ka ; Zaporiz"ka inzh. akad. - Zaporizhzhya : ZDIA, 2014. - 141 s.

10. Vstup do teoriyi enerhoefektyvnosti bahatorivnevyx system: metody ta modeli enerhetychnoho menedzhmentu v systemi zhytlovo-komunal"noho hospodarstva : monohrafiya / O. M. Kovalko, O. V. Novosel"cev, T. O. Yevtuxova ; NAN Ukrayiny, In-t texn. teplofizyky. - K. :, 2014. - 253 s.

11. Teplove hospodarstvo Ukrayiny: suchasnyj stan, problemy ta perspektyvy rozvytku : monohrafiya / V. I. Pyla, V. Ya. Chevhanova, V. V. Skryl"; Poltavs"kyj nac. texn. un-t imeni Yuriya Kondratyuka. - K. : Centr uchbovoyi literatury, 2014. - 341 s.

12. Matematychne modelyuvannya avtomatyzovanoyi teploakumulyuyuchoyi sysetemy/ S.L. Horyashhenko, O.O. Nykytyn, Yu.Yu. Kushnir, S.V. Uspalenko//Visnyk xmel"nyc"koho nacional"noho universytetu seriya: Texnichni nauky, Xmel"nyc"kyj. XNU, t.6., - 2017, s. 60-64

13. Modelyuvannya roboty teplo-xolodoakumulyuyuchoyi systemy/ S.L. Horyashhenko, S.V. Uspalenko//Visnyk xmel"nyc"koho nacional"noho universytetu seriya: Texnichni nauky, Xmel"nyc"kyj. XNU, №3, 2017, s.77-79

https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-70-2-8
УДК 004.056:621.397.3:004.942

Володимир ДЖУЛІЙ
Хмельницький національний університет
http://orcid.org/0000-0003-1878-4301
e-mail: dzhuliivm@khmnu.edu.ua
Марія КАПУСТЯН
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0001-9200-1622
e-mail: kapustian.mariia@gmail.com
Юрій КЛЬОЦ
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0002-3914-0989
e-mail: klots@khmnu.edu.ua
Вікторія ОРЛЕНКО
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0001-9601-1916
e-mail: orlenkovs@khmnu.edu.ua
Віктор ЧЕШУН
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0002-3935-2068
e-mail: cheshunvn@khmnu.edu.ua

МОДЕЛЬ СТЕГАНОСИСТЕМИ НА ОСНОВІ ПРОСТОРОВИХ ТА ФОРМАТНИХ ПРИНЦИПІВ ПРИХОВУВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ

Розглянуто актуальне завдання вибору математичної моделі стеганографічної системи для приховування інформації в рамках інфраструктури мережевого спілкування інтернет-учасників в медіа-просторі. Запропонована модель орієнтована на розробку і оцінку ефективності стеганоалгоритмів для приховування інформації великого об'єму в цифрових зображеннях та реалізації функції роботи з форматами JPEG і BMP. Передбачено, що робочі алгоритми стеганографічної системи аналізують і змінюють структуру сегментів файлів.

Ключові слова: стеганографія, математична модель, растрове зображення, прихований канал зв'язку, стеганографічна система.

Volodymyr DZHULIY, Mariia KAPUSTIAN,
Yurii KLOTS, Viktoriia ORLENKO, Viktor CHESHUN
Khmelnytskyi National University

MODEL OF STEGANOGRAPHIC SYSTEM BASED ON SPATIAL AND FORMAT PRINCIPLES OF INFORMATION HIDING

The actual task of choosing a mathematical model of the steganographic system for hiding information within the network communication infrastructure of Internet participants in the media space is considered. The proposed model is focused on the development and evaluation of the effectiveness of steganographic algorithms for hiding large amounts of information in digital images and the implementation of the function of working with JPEG and BMP formats. It is assumed that the working algorithms of the steganographic system analyze and change the structure of file segments.

In today's world, there are several practical reasons for the practical interest in computer and, above all, digital steganography. In our opinion, this is the presence of such practical problems as: restrictions on the use of cryptographic protection of information in some countries and new technological opportunities for the activities of special services in modern conditions; management of computer incidents and computer forensics, due to the wide technological possibilities for violation of supervision over the actions of users and processes of information and telecommunication systems, which can lead to threats of leakage, imposition, destruction and blocking of information; protection of property rights to information presented in digital form, and development of technologies to protect information from forgery and unauthorized duplication.

Studies have shown that the conversion area is not well suited for the introduction of large amounts of data, but is well suited for the introduction of digital watermarks, which are a limited sequence of bytes. The principal requirement is also the many restrictions imposed on the container. Carrying out of research of features of formats of JPEG-files and BMP-files allowing to make secret introduction of the information of large volume. In addition, the requirement not to degrade the quality of digital photos is required. The BMP format, compared to the JPEG format, has a large spatial area of the image. JPEG format contains a fairly large set of file structure segments. Some segments are skipped by JPEG file reader software. Writing information in the LSB area of a BMP file makes it possible to implement a large number of bytes of information. Disadvantage - such an implementation is quite easy to detect.

Keywords: steganography, mathematical model, raster image, hidden communication channel, steganographic system.

Постановка проблеми у загальному вигляді
та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Під час ведення військових дій інформаційне суспільство потребує активізації наукових досліджень і розробок в області приховування інформації, що пов'язане, зокрема, з багаточисельним використанням цифрових форматів мультимедіа, але при цьому виникають проблеми управління ресурсами і дотримання авторських прав на цифрові файли. Звідси постає актуальне завдання приховання інформації в рамках інфраструктури мережевого спілкування інтернет-учасників в медіа-просторі.

Сучасна стеганографія та її методи активно розвиваються, використовуючи новітні можливості сучасних інформаційних технологій для реалізації, за суттю, класичних підходів [1,2,3] до приховування інформації з використанням:

апаратних функцій управління накопичувачами електронної інформації;

файлової структури операційних систем; форматів представлення даних (файлів);

протоколів інформаційного обміну (включно із тими, що використовуються в методах криптографічного і технічного захисту інформації).

У сучасному світі можна виокремити кілька практичних причин, що зумовлюють практичний інтерес до комп'ютерної і, насамперед, цифрової стеганографії [1]. На наш погляд, це наявність ряду практичних проблем:

обмеження на використання засобів криптографічного захисту інформації в деяких країнах світу та новими технологічними можливостями для діяльності спеціальних служб в сучасних умовах;

управління комп'ютерними інцидентами та комп'ютерною криміналістикою внаслідок широких технологічних можливостей для порушення нагляду за діями користувачів і процесів інформаційно-телекомунікаційних систем, що може призвести до реалізації загроз витоку, нав'язування, знищення та блокування інформації;

захист прав власності на інформацію, представлену в цифровому вигляді, та розвиток технологій захисту інформації від підробки та несанкціонованого тиражування.

Постановка задачі

Сьогодні методи комп'ютерної (цифрової) стеганографії все активніше находять поширення в завданнях кібербезпеки, що пов'язане з їх використанням в задачах автоматизації пошуку по електронних файлах, маркування файлів необхідними допоміжними атрибутами, захисту авторських прав на об'єкти інтелектуальної власності і забезпечення таємниці листування за рахунок прихованої передачі інформації. Принциповою проблемою стає велика кількість вимог-обмежень, що пред'являються до контейнера, тому виникає потреба узгодження контейнера приховування даних і типу приховуваних даних. Проведені дослідження вказують, що область перетворення погано підходить для впровадження великих об'ємів даних, проте добре підходить для впровадження цифрових водяних знаків, що представляють собою обмежену послідовність байтів.

Дослідження доступних стеганосистем впровадження цифрових водяних знаків в цифрові фотографії показали, що існуючі відкриті технологічні рішення не можна широко використовувати в Internet унаслідок наявності досить простих засобів для знищення цифрових водяних знаків.

Для розробки стеганографічних методів і алгоритмів роботи стеганосистеми, що вбудовують і приховують великі об'єми інформації в графічні зображення з подальшою передачею цієї інформації, а також для подальшого обґрунтування ефективності роботи алгоритмів і системи в цілому першочергово необхідно вирішити завдання вибору адекватної і достовірної математичної моделі стеганосистеми.

Основна частина

В математичній моделі стеганосистеми генерацію цифрового водяного знаку можна формально записати у вигляді операцій над елементами трьох множин:

$Y_{ЦВЗ}$ - множина цифрових водяних знаків;

$X_{КЛЮЧ}$ - множина ключів;

$X_{КОНТЕЙНЕР}$ - множина контейнерів;

$X_{ПОВІДОМЛЕННЯ}$ - множина приховуваних повідомлень.

На основі запропонованих елементів моделі, формально, генерація цифрового водяного знаку може бути представлена у вигляді:

$$F : X_{КОНТЕЙНЕР} \times X_{КЛЮЧ} \times X_{ПОВІДОМЛЕННЯ} \to Y_{ЦВЗ}, \quad (1)$$

$$y_{ЦВЗ} = F\left(x_{КОНТЕЙНЕР}, x_{КЛЮЧ}, x_{ПОВІДОМЛЕННЯ}\right), \quad (2)$$

де $y_{ЦВЗ} \in Y_{ЦВЗ}$, $x_{КОНТЕЙНЕР} \in$, $x_{КЛЮЧ} \in X_{КЛЮЧ}$, $x_{ПОВІДОМЛЕННЯ} \in X_{ПОВІДОМЛЕННЯ}$.

Функція F (відображення) може бути довільна, але для практичного використання додають умови робастності цифрового водяного знаку, наприклад:

$$y_{ЦВЗ} = F\left(x_{КОНТЕЙНЕР}, x_{КЛЮЧ}, x_{ПОВІДОМЛЕННЯ}\right) \approx F\left(x_{КОНТЕЙНЕР} + \varepsilon, x_{КЛЮЧ}, x_{ПОВІДОМЛЕННЯ}\right). \quad (3)$$

Тобто, згідно (3) модифікований стеганоконтейнер не приводить до руйнування цифрового водяного знаку.

Крім того, функція F часто є складеною:

$$F = T \circ G, \quad (4)$$

де:

$$G : X_{КЛЮЧ} \times X_{ПОВІДОМЛЕННЯ} \to X_{КОД}, \quad (5)$$

$$T : X_{КОНТЕЙНЕР} \times X_{КОД} \to Y_{ЦВЗ}. \quad (6)$$

Реалізація G здійснюється із застосуванням генератора псевдовипадкових послідовностей. За початкове значення береться $x_{КЛЮЧ} \in X_{КЛЮЧ}$.

Відліки цифрового водяного знаку належать множині {-1,1}. Для відображення {0,1}→{-1,1} зазвичай застосовується двійкова відносна фазова модуляція (BPSK). Оператор T перетворить множину кодових слів $X_{КОД}$ в множину цифрових водяних знаків - $Y_{ЦВЗ}$. На даний оператор не накладають умову існування у нього зворотного перетворення, з огляду на те, що вибір G не гарантує зворотнє перетворення F. Оператор T будується так, щоб незаповнений контейнер $X_{КОНТЕЙНЕР_0}$, заповнений контейнер $X_{КОНТЕЙНЕР_{ЗАПОВНЕНИЙ}}$ і заповнений контейнер з невеликими змінами $X'_{КОНТЕЙНЕР_{ЗАПОВНЕНИЙ}}$ породжували б одні і ті ж цифрові водяні знаки:

$$T\left(X_{КОНТЕЙНЕР_0}, x_{КОД}\right) = T\left(X_{КОНТЕЙНЕР_{ЗАПОВНЕНИЙ}}, x_{КОД}\right) = T\left(X'_{КОНТЕЙНЕР_{ЗАПОВНЕНИЙ}}, x_{КОД}\right). \quad (7)$$

Тобто, оператор T має бути стійким до невеликої модифікації стеганоконтейнера.

Процес впровадження цифрового водяного знаку $y_{ЦВЗ}(i,j)$ в оригінальне зображення $X_{КОНТЕЙНЕР_0}(i,j)$ описується суперпозицією сигналів:

$$\psi : X_{КОНТЕЙНЕР} \times Y_{ЦВЗ} \times X_{МАСКА} \to X_{КОНТЕЙНЕР_{ЗАПОВНЕНИЙ}}, \quad (8)$$

$$x_{КОНТЕЙНЕР_{ЗАПОВНЕНИЙ}}(i,j) = x_{КОНТЕЙНЕР_0}(i,j) \oplus x_{МАСКА} \cdot y_{ЦВЗ}(i,j) \cdot p(i,j), \quad (9)$$

де $x_{МАСКА}$ - маска вбудовування цифрового водяного знаку, яка враховує особливості людської зорової системи, і призначена для зменшення помітності цифрового водяного знаку; p(i,j) - залежна від ключа проєктуюча функція; через символ $\oplus$ позначається оператор суперпозиції, що складається з операцій додавання, усікання і квантування.

Функція p(i,j) проводить «розподіл» цифрового водяного знаку за всім зображенням. Її використання аналогічне до функції розподілу даних паралельними каналами. Додатково p(i,j) володіє заданою просторовою структурою з кореляційними властивостями, що використовується для протидії геометричним атакам.

Одним з найважливіших пристроїв системи є стеганодетектор. Залежно від завдання, він видає двійкові або M-кратні рішення про присутність/відсутність цифрового водяного знаку (стеганодетектор з м'якими рішеннями).

Спочатку досліджено ситуацію «жорсткого» стеганодетектора, який є простішим. Формально оператор детектування D описується виразом:

$$D : X_{КОНТЕЙНЕР_{ЗАПОВНЕНИЙ}} \times Y_{ЦВЗ} \to \{0,1\}, \quad (10)$$

$$D\left(x_{КОНТЕЙНЕР_{ЗАПОВНЕНИЙ}} \times y_{ЦВЗ}\right) =$$
$$= D\left(x_{КОНТЕЙНЕР_{ЗАПОВНЕНИЙ}}, F\left(x_{КОНТЕЙНЕР_{ЗАПОВНЕНИЙ}}, x_{КЛЮЧ}, x_{ПОВІДОМЛЕНЬ}\right)\right) = \begin{cases} 1, \text{якщо } y_{ЦВЗ} \text{ присутній} \\ 0, \text{якщо } y_{ЦВЗ} \text{ відсутній} \end{cases} \quad (11)$$

В якості детектора цифрового водяного знаку часто застосовують кореляційний приймач [1].

Без втрати наочності передбачимо, що в певної частини пікселів фотографії величина інтенсивності збільшилася на 1, а в частини, що залишилася, не змінилася, або зменшилася на 1. Тоді

$$x_{КОНТЕЙНЕР_{ЗАПОВНЕНИЙ}} = x_{КОНТЕЙНЕР_0} + y_{ЦВЗ} \quad (12)$$

Таким чином, кореляційний приймач отримує наступне значення:

$$x_{КОНТЕЙНЕР_{ЗАПОВНЕНИЙ}} \cdot y_{ЦВЗ} = \left(x_{КОНТЕЙНЕР_0} + y_{ЦВЗ}\right) \cdot y_{ЦВЗ} = x_{КОНТЕЙНЕР_0} \cdot y_{ЦВЗ} + y_{ЦВЗ} \cdot y_{ЦВЗ} \quad (13)$$

Оскільки $y_{ЦВЗ}$ належить множині {-1,1}, то $x_{КОНТЕЙНЕР_0} \cdot y_{ЦВЗ}$ є невеликою величиною, а $y_{ЦВЗ} \cdot y_{ЦВЗ}$ більше нуля. Таким чином, $x_{КОНТЕЙНЕР_{ЗАПОВНЕНИЙ}} \cdot y_{ЦВЗ}$ наближається до $y_{ЦВЗ} \cdot y_{ЦВЗ}$. Тому вірогідність неправильного детектування стеганодетектором записується як додаткова (комплементарна) функція помилок з квадратного кореня відношення $y_{ЦВЗ} \cdot y_{ЦВЗ}$ («енергії сигналу») до дисперсії величин пікселів яскравості («енергія шуму»).

В разі м'якого детектора є дві основні міри схожості:

нормований коефіцієнт взаємної кореляції 1

$$\delta = \frac{x_{КОНТЕЙНЕР_0} \cdot x_{КОНТЕЙНЕР_{ЗАПОВНЕНИЙ}}}{\left\| x_{КОНТЕЙНЕР_0} \right\| \left\| x_{КОНТЕЙНЕР_{ЗАПОВНЕНИЙ}} \right\|}; \quad (14)$$

відстань Хеммінга

$$\delta = N - \sum_{i}^{N} x_{КОНТЕЙНЕР_0}(i) \cdot x_{КОНТЕЙНЕР_{ЗАПОВНЕНИЙ}}(i). \quad (15)$$

У стеганографії найбільш популярні два перетворення [5,7]: дискретне вейвлет-перетворення (ДВП) і дискретне косинусне перетворення (ДКП).

ДКП застосовується під час стиснення JPEG-зображень. Даний факт пояснює велику популярність застосування ДКП у стеганографії JPEG. А ось ДВП є базою для стиснення в алгоритмі JPEG 2000.

ДКП застосовують як до всього зображення, так і до окремих блоків точок зображення. Зазвичай контейнер розбивають на блоки розміром 8×8 пікселів, а потім до кожного блоку застосовують ДКП. Отримані матриці коефіцієнтів ДКП мають розмір 8×8 [5]. Позначимо елементи цих матриць як $c_b(j,k)$, де b - номер блоку, (j,k) - місце коефіцієнта усередині блоку. Якщо блок сканується в зигзагоподібному порядку (як, наприклад, у JPEG), то позначення буде $c_{b,j}$. Елемент у лівому верхньому куті $c_b(0,0)$ (0,0), прийнято називати DC коефіцієнтом. Він говорить про яскравість всього блоку. Усі інші елементи називають AC-коефіцієнтами. У деяких випадках виконують ДКП не окремих блоків, а всього зображення.

На прикладі алгоритму Koch [6,8], розглянемо впровадження/вилучення інформації з допомогою ДКП. У даному стеганоалгоритмі здійснюється впровадження одного біта цифрового водяного знаку в блок 8x8. Існують дві реалізації алгоритму, за якими випадково вибираються 2 або 3 коефіцієнти ДКП. Впровадження інформації відбувається наступним чином: для вставки біта 0 роблять абсолютну величину різниці значень коефіцієнтів більше заданого додатнього значення ε. При передачі одного біта цю різницю роблять менше $-\varepsilon$:

$$\begin{aligned} \left|c_b\left(j_{i,j}, k_{i,1}\right)\right| - \left|c_b\left(j_{i,2}, k_{i,2}\right)\right| > \varepsilon, \ \text{якщо } s_i = 0, \\ \left|c_b\left(j_{i,j}, k_{i,1}\right)\right| - \left|c_b\left(j_{i,2}, k_{i,2}\right)\right| < \varepsilon, \ \text{якщо } s_i = 1. \end{aligned} \quad (16)$$

Це означає, що вхідна фотографія спотворюється за рахунок модифікацій коефіцієнтів ДКП. При читанні цифрового водяного знаку декодер робить ту саму процедуру вибору коефіцієнтів. Правило вибору рішення:

$$\begin{aligned} s_i &= 0,\ якщо \left|c_b\left(j_{i,j},k_{i,1}\right)\right| > \left|c_b\left(j_{i,2},k_{i,2}\right)\right|, \\ s_i &= 1,\ якщо \left|c_b\left(j_{i,j},k_{i,1}\right)\right| < \left|c_b\left(j_{i,2},k_{i,2}\right)\right|. \end{aligned} \tag{17}$$

У стеганодетекторі системи існує вірогідність появи помилок двох видів: помилкове визначення цифрового водяного знаку в порожньому стеганоконтейнері (помилка першого роду) та невиявлення впровадженого цифрового водяного знаку (помилка другого роду). Зменшення помилки першого викликає збільшення помилки другого роду. Прийнято оцінювати якість стеганодетектора величиною помилки першого роду [6].

Стеганосистема цифрового водяного знаку повинна будуватись так, щоб мінімізувати вірогідність виникнення помилок першого і другого роду, зважаючи на те, що будь-яка з них може привести до неправильної роботи стеганодетектора системи. Для оцінки стійкості водяного знаку використовується коефіцієнт помилкових бітів (Bit Error Rate), який застосовується при оцінці модифікацій бітової послідовності цифрового водяного знаку[3]:

$$BER\left(S,S^{''}\right)=\frac{\sum p_i}{N}, \tag{18}$$

де N – загальна кількість біт, p_i= 1, якщо $s_i \neq s_i^{''}$ і p_i= 0, якщо $s_i = s_i^{''}$, де s_i - і-й біт в рядку початкового зображення, $s_i^{''}$ - і-й біт в рядку вихідного зображення.

У протилежність зовнішнім атакам, властивості яких можна відтворити для будь-яких стеганоконтейнерів цифрових водяних знаків, вбудованих різними стеганографічними алгоритмами, параметри P і метод впровадження є унікальними для будь-якого стеганографічного алгоритму [8]. Створюючи єдині початкові умови, які використовуються при порівняльному аналізі стійкості цифрового водяного знаку, зазвичай стежать за таким параметром як рівень модифікацій, які з'являються при вбудовуванні цифрового водяного знаку.

Однією з найуживаніших метрик обчислення рівня модифікацій, які упроваджуються в стеганографічний контейнер з цифровим водяним знаком є максимум співвідношення «сигнал/шум» (PSNR - Peak Signal Noise Range)[9]:

$$PSNR=\frac{XY\cdot\max\limits_{x,y}\left(C_{x,y}\right)^2}{\sum\limits_{x,y}\left(C_{x,y}-S_{x,y}\right)^2}, \tag{19}$$

де X,Y - габарити зображення; $C_{x,y}$ - розмір пікселя вхідного зображення; $S_{x,y}$ - розмір пікселя після зашумлення.

В ролі сигналу приймається початкова фотографія, а за шум - зміни, що з'являються при впровадженні цифрового водяного знаку. У наступній широко вживаній метриці використовується кореляція між початковим і зміненими сигналами (кореляційні показники викривлення). Нормовану взаємну кореляцію (Normalized-cross-Correlation) розраховують за формулою [4]:

$$NC=\frac{\sum\limits_{x,y}C_{x,y}S_{x,y}}{\sum\limits_{x,y}\left(C_{x,y}\right)^2} \tag{20}$$

Величину PSNR (NC), що задається, можна досягти, змінюючи параметр P або об'єм упровадженої інформації M. Для якісного виконання оцінки стійкості, розмір цифрового водяного знаку вибирають незмінним і однаковим. Тому рішення даної задачі можливе лише зміною коефіцієнта P.

BMP-формат дозволяє представляти колір пікселя 1,2 і 3 байтами. Звідси витікає, що зміни колірної складової залежить від представлення однієї точки. Тому, виходячи з вищесказаного, залежність потенційного розміру впроваджуваної інформації можна визначити за формулою:

$$V = f(x,i) = \frac{x \overset{jpeg \to bmptrans}{\to} x_{bmp} - H_{bmp}}{D_{bmp}} \times i \,, \tag{21}$$

де x - об'єм JPEG-файлу, $i \in \{1,2,3,4\}$ - число використовуваних молодших розрядів, $H_{bmp} = 54$ - розмір BMP- файлу, байт, $D_{bmp} \in \{1,2,3,4\}$ [1;4] - кількість бітів на 1 піксель BMP-зображення.

Оскільки найбільший об'єм виходить перетворенням в 24-бітове BMP-зображення, то розроблена модель стеганосистеми базується на ньому. Формат JPEG є форматом стискування з втратами, то обов'язково треба враховувати цю обставину при витяганні впровадженої інформації.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Розглянуто актуальне завдання вибору математичної моделі стеганографічної системи для приховування інформації в рамках інфраструктури мережевого спілкування інтернет-учасників в медіа-просторі. Запропонована модель орієнтована на розробку і оцінку ефективності стеганоалгоритмів для приховування інформації великого об'єму в цифрових зображеннях та реалізації функції роботи з форматами JPEG і BMP. Передбачено, що робочі алгоритми стеганографічної системи аналізують і змінюють структуру сегментів файлів.

Проведенні дослідження особливостей форматів JPEG- файлів і BMP-файлів, що дозволяють зробити таємне впровадження інформації великого об'єму. Крім того, потрібне дотримання вимоги про не погіршення якості цифрових фотографій. BMP-формат, в порівнянні з JPEG- форматом, має велику просторову область зображення. JPEG-формат містить досить великий набір сегментів файлової структури. Деякі сегменти пропускаються програмним забезпеченням читання JPEG-файлів. Запис інформації в області LSB BMP-файлу робить можливим впровадження великого числа байтів інформації. Недолік - таке впровадження досить легко детектується.

Література

1. Конахович, Г. Ф. Комп'ютерна стеганографічна обробка й аналіз мультимедійних даних / Г.Ф. Конахович, Д.О.Прогонов, О.Ю. Пузиренко // Підручник. – К. : «Центр навчальної літератури», 2018. – 558 с.

2. Хорошко, В.О. Комп'ютерна стеганографія / В.О. Хорошко, Ю.Є. Яремчук, В.В. Карпінець – Вінниця: ВНТУ, 2014. – 155 с.

3. Дурняк, Б. В. Стеганографічні методи захисту документів / Б. В. Дурняк, Д. В. Музика, В. І. Сабат. – Львів : Укр. акад. друкарства, 2014. – 159 с. : іл.

4. Ленков, С.В. Модель безпеки поширення забороненої інформації в інформаційно-телекомунікаційних мережах / С.В. Ленков, В.М. Джулій, В.С. Орленко, О.В. Сєлюков, А.В. Атаманюк // Збірник наукових праць ВІКНУ ім. Тараса Шевченка. – К.: ВІКНУ, 2020. – Вип. №68. – С. 53-64.

5. Ленков, С.В. Методы и средства защиты информации. В 2-х томах / С.В. Ленков, Д.А. Перегудов, В.А. Хорошко – К: Арий, 2008. – 464с.

6. Кузнецов, О.О. Стеганографія : навчальний посібник / О.О.Кузнецов, С. П. Євсеєв, О. Г. Король. – Х. : Вид. ХНЕУ, 2011. – 232с.

7. Хорошко, В.О. Основи комп'ютерної стеганографії / В.О. Хорошко, О. Д. Азаров, М. Є. Шелест, Ю. Є. Яремчук // Вінниця: ВДТУ, 2003. – 143 с.

8. Юдін, О.К. Захист інформації в мережах передачі даних / О.К. Юдін, О.Г. Корченко, Г.Ф. Конахович // Підручник – К. : Вид-во DIRECTLINE, 2019. – 714 с.

9. Семкин, С. Н. Основи інформаційної безпеки об'єктів обробки інформації / С. Н.Семкин, А. Н. Семкин // Науч.-практ. посібник. Орел: 2018г. – 300 с.

10. Лавров, Є. А. Математичні методи дослідження операцій : підручник / Є. А. Лавров, Л. П. Перхун, В. В. Шендрик – Суми : Сумський державний університет, 2017. – 212 с.

11. Конахович, Г. Ф. Комп'ютерна стеганографія. Теорія і практика. / Г.Ф. Конахович, О.Ю.Пузиренко – К.: «МК-Пресс», 2006. – 288 с.

12. Бабенко, В.Г. Метод вбудовування стегоповідомлення на основі ключового елемента / В.Г. Бабенко, В.М. Зажома, О.Б. Нестеренко. // Захист інформації. 2014. – С. 53-58.

References

1. Konakhovych, H.F. (2018), Kompiuterna stehanohrafichna obrobka y analiz multymediinykh danykh / H.F. Konakhovych, D.O.Prohonov, O.Iu. Puzyrenko // Pidruchnyk. - K. : «Tsentr navchalnoi literatury» - 558 s.

2. Khoroshko, V.O. (2014), Kompiuterna stehanohrafiia / V.O. Khoroshko, Yu.Ie. Yaremchuk, V.V. Karpinets - Vinnytsia: VNTU – 155 s.

3. Durniak, B.V. (2014), Stehanohrafichni metody zakhystu dokumentiv / B. V. Durniak, D. V. Muzyka, V. I. Sabat. – Lviv : Ukr. akad. Drukarstva – 159 s. : il.

4. Lenkov, S.V. (2020), Model bezpeky poshyrennia zaboronenoi informatsii v informatsiino-telekomunikatsiinykh merezhakh / S.V. Lenkov, V.M. Dzhulii, V.S. ORLENKO, O.V. Sieliukov, A.V. Atamaniuk // Zbirnyk naukovykh prats VIKNU im. Tarasa Shevchenka. – K.: VIKNU. – №68. – ss. 53-64.

5. Lenkov, S.V. (2008), Metody y sredstva zashchytы ynformatsyy. V 2-kh tomakh / S.V. Lenkov, D.A. Perehudov, V.A. Khoroshko – K: Aryi – 464s.

6. Kuznetsov, O. O. (2011), Stehanohrafiia : navchalnyi posibnyk / O.O.Kuznetsov, S. P. Yevseiev, O. H. Korol. – Kh. : Vyd. KhNEU – 232s.

7. Khoroshko, V.O.(2003), Osnovy kompiuternoi stehanohrafii / V.O. Khoroshko, O. D. Azarov, M. Ye. Shelest, Yu. Ye. Yaremchuk // Vinnytsia: VDTU – 143 s.

8. Yudin, O.K. (2019), Zakhyst informatsii v merezhakh peredachi danykh / O.K. Yudin, O.H. Korchenko, H.F. Konakhovych // Pidruchnyk – K. : Vyd-vo DIRECTLINE - 714 s.

9. Semkyn, S. N. (2018), Osnovy informatsiinoi bezpeky obiektiv obrobky informatsii / S. N.Semkyn, A. N. Semkyn// Nauch.-prakt. posibnyk. Orel –300 s.

10. Lavrov, Ye. A. (2017), Matematychni metody doslidzhennia operatsii : pidruchnyk / Ye. A. Lavrov, L. P. Perkhun, V. V. Shendryk – Sumy : Sumskyi derzhavnyi universytet – 212 s.

11. Konakhovych, H. F. (2006), Kompiuterna stehanohrafiia. Teoriia i praktyka. / H.F. Konakhovych, O.Iu.Puzyrenko – K.: «MK-Press» – 288 s.

12. Babenko, V.H.(2014), Metod vbudovuvannia stehopovidomlennia na osnovi kliuchovoho elementa / V.H. Babenko, V.M. Zazhoma, O.B. Nesterenko. // Zakhyst informatsii – ss. 53-58.

https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-70-2-9
УДК 004.78, 004.048

Володимир КУЧЕРУК
Вінницький національний технічний університет
https://orcid.org/0000-0002-6422-7779
Михайло ГЛУШКО
Вінницький національний технічний університет
https://orcid.org/0000-0001-6665-9754

ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ РЕКОМЕНДАЦІЙНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ КВАЛІМЕТРИЧНИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ

В даній статті розглянуто актуальність теми рекомендаційних систем в 2022 році спільно із рос-том e-commerce сфери, в яких найчастіше використовуються рекомендаційні системи. Проаналізова-но основі типи рекомендаційних систем та детально розглянуті недоліки кожної з них: коллаборатив-на фільтрація (collaborative filtering); засновані на контенті (content-based); засновані на знаннях (knowledge-based); гібридні (hybrid).

Сформована мета дослідження, яка полягає в покращенні якості та систематизація параметрів якості рекомендаційних систем на підставі кваліметричних методів та засобів отримання показників рекомендаційних систем на основі аналітичних інструментів. Присутнє наукове обгрунтування вне-сення додаткових параметрів до алгоритму рекомендацій на основі "думки" користувача та запрова-женняк кваліметричного методу «Циклограма якості рекомендаційної системи». Сформована наукова задача, яка включає: систематизацію показників якості рекомендаційних сис-тем на підставі кваліметричних методів; розробку нових показників якості рекомендаційних систем на підставі кваліметричних методів; розробку нової рекомендаційної системи колаборативної фільтрації, яка включає оцінку "думки" користувача; покращення якості рекомендаційної системи за допомогою внесення до алгоритму рекомендацій додаткових кваліметричних показників якості. Охарактеризовано доцільність використання кваліметричних методів оцінювання якості рекомен-даційних систем. Описана важливість аналізу відгуків про авто. Розглянуті параметри кваліметрії та задачі, які ми вирішуємо за допомогою цих параметрів в циклограмі якості.

В даній науковій роботі розглянуто новий кваліметричний підхід до вимірювання якості рекоменда-ційних систем. Запропонована система оцінку якості відгуку та рекомендаційної системи у форматі «Циклограми якості», яка включає параметр оцінки думки користувача про товар – «Value of Mids». Набір всіх восьми показників якості рекомендаційних систем поділено на чотири ключові категорії. Описано важливість дослідження для бізнес-задач. Сформовані висновки та фінальні заключення по науковій роботі.

Keywords: рекомендаційна система, алгоритм, колаборативна фільтрація, якість, кваліметрія.

Volodymyr KUCHERUK, Mykhailo HLUSHKO
Vinnytsia National Technical University

IMPROVING THE QUALITY OF RECOMMENDATION SYSTEMS BASED ON QUALIMETRIC MEASUREMENT METHODS

In the work on the basis of the conducted analysis of methods of carrying out scientific researches it is defined that the method of multifactor experiment most thoroughly allows to investigate influence of simultaneously various external factors on information system. This method is comprehensive and allows to obtain statistics for different testing scenarios, to determine the allowable limits of the impact of various external factors on the information system and their various aggregates, as well as to develop a set of recommendations for operation and maintenance of the information system. This article examines the relevance of the topic of referral systems in 2022, along with the growth of e-commerce, in which referral systems are most often used. The types of recommendation systems are analyzed on the basis and the shortcomings of each of them are considered in detail: collaborative filtering; content-based; knowledge-based; hybrid (hybrid).

The purpose of the research is formed, which is to improve the quality and systematization of quality parameters of recommendation systems on the basis of qualimetric methods and means of obtaining indicators of recommendation systems based on analytical tools. There is a scientific substantiation of the introduction of additional parameters to the algorithm of recommendations based on the "opinion" of the user and the introduction of the qualimetric method "Cyclogram of the quality of the recommendation system".

A scientific task has been formed, which includes: systematization of quality indicators of recommendation systems on the basis of qualimetric methods; development of new quality indicators of recommendation systems based on qualimetric methods; development of a new recommendation system of collaborative filtering, which includes assessment of the "opinion" of the user; improving the quality of the recommendation system by adding additional qualitative quality indicators to the algorithm of recommendations.

The expediency of using qualimetric methods for assessing the quality of recommendation systems is described. The importance of analyzing car reviews is described. The parameters of qualimetry and the problems we solve with the help of these parameters in the cyclogram of quality are considered.

In this scientific work a new qualimetric approach to measuring the quality of recommendation systems is considered. A system for assessing the quality of feedback and a recommendation system in the format of "Quality Cyclograms" is proposed, which includes the parameter of assessing the user's opinion about the product - "Value of Mids". The set of all eight indicators of the quality of recommendation systems is divided into key categories. The importance of research for business tasks is described. Conclusions and final conclusions on scientific work are formed.

Keywords: recommendation system, algorithm, collaborative filtering, quality, qualimetry.

Постановка проблеми у загальному вигляді
та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

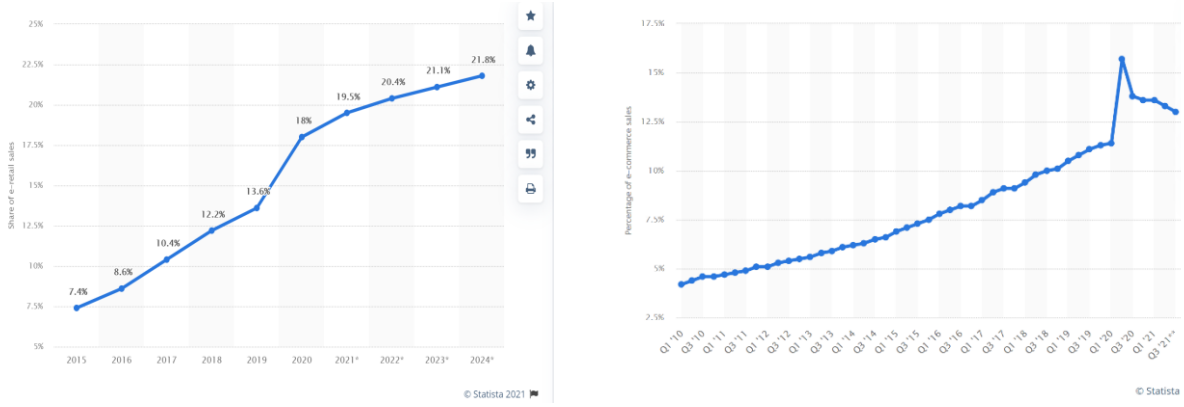
Рекомендаційна система - це підклас системи фільтрації інформації, яка зазвичай прагне передбачити "рейтинг" або "уподобання", які користувач надав би предмету. Вони в основному використовуються в комерційних програмах. Якість рекомендаційних систем можна визначити, оцінивши якість роботи алгоритмів, якість рекомендацій.

Актуальність теми. Враховуючи, що рекомендаційна система - це програма, яка на основі даних про користувача (User) і предмета (Item) дає рекомендації, така система включає в себе весь процес - від отримання інформації до її подання користувачеві. Важливий кожен етап: від інформації яку збирають, залежить, які алгоритми можуть застосовуватись. Хороші алгоритми дають якісні, корисні рекомендації. Критерії оцінки результату дозволяють вибрати найбільш підходящі алгоритми. Рекомендаційні системи використовують переважно в e-commerce компаніях.

Електро́нна коме́рція (e-commerce) — це сфера цифрової економіки, що включає всі фінансові та торгові транзакції, які проводяться за допомогою комп'ютерних мереж, та бізнес-процеси, пов'язані з проведенням цих транзакцій.

Основними складовими електронної комерції є мобільна комерція, електронний переказ коштів, управління ланцюгами поставок, інтернет-маркетинг, обробка онлайн-транзакцій, електронний обмін даними, системи управління запасами та автоматизовані системи збору даних.

Активний розвиток цього напрямку зумовлений технологічними досягненнями електронної промисловості [1]. А даному випадку ми розглядаємо тип e-commerce – «Бізнес-до-споживача» (B2C). Типовим прикладом B2C є інтернет магазини та маркетплейси із роздрібної торгівлі. Електронна комерція, безсумнівно, є найбільшою тенденцією в індустрії роздрібної торгівлі, і вона зростає швидше, ніж будь-коли. Наприклад, у 2020 році електронні роздрібні продажі становили 18% усіх роздрібних продажів у всьому світі. Очікується, що у 2024 році цей показник досягне 21,8% (Рис. 1.). Це пов'язано зі зміною торгових звичок покупців, і світ все ще перебуває під впливом пандемії [2].



а) **б)**

Рис. 1. а) Частка електронної комерції у загальному обсязі глобальних роздрібних продажів з 2015 по 2024 рік;
б) Частка електронної комерції в загальних роздрібних продажах США з 1 кварталу 2010 року по 3 квартал 2021 року

У третьому кварталі 2021 року частка електронної комерції в загальному обсязі роздрібних продажів у США становила 13 відсотків у порівнянні з 13,8 відсотками в тому ж кварталі попереднього року. Тим не менш, з квітня по червень 2021 року роздрібні продажі електронної комерції в Сполучених Штатах перевищили 220 мільярдів доларів США, що є найвищим квартальним доходом в історії [3].

Soul Partners, Baker Tilly Україна, Aequo представили аналітичний огляд ринку e-commerce в Україні за 2020 рік Згідно з результатами дослідження, з початку пандемії COVID-19 обсяг ринку e-commerce в Україні зріс на 41% (рис. 2.).

Як показало дослідження, ринок e-commerce у 2020 році виявився одним із найдинамічніших в Україні. Він сягнув $4 млрд, що становить 8,8% від загального обсягу роздрібної торгівлі. При цьому, за останні 5 років ринок зріс майже втричі. Протягом наступних п'яти років прогнозується зростання у 2 рази.

Переважно всі IT-компанії в сфері «e-commerce» використовують рекомендаційні системи, перша компанія яка реалізувала такі алгоритми – Amazon. Найбільші маркетплейси в Україні, які використовують рекомендаційні системи: Rozetka, Prom, Allo, Bigl та Epicentr. Проте зараз часто доводиться стикатися з проблемою рекомендації товарів або послуг користувачам будь-якої інформаційної системи.



Рис. 2. Динаміка ринку електронної комерції (e-commerce) та її частки у роздрібній торгівлі

Формулювання цілей статті

Мета та наукові задачі. Метою дослідження є покращення якості та систематизація параметрів якості рекомендаційних систем на підставі кваліметричних методів та засобів отримання показників рекомендаційних систем на основі аналітичних інструментів. Наукове обґрунтування полягає у відсутності єдиних прийнятих показників якості рекомендаційних систем. Також пропонується внесення додаткових параметрів до алгоритму рекомендацій на основі “думки” користувача.

Для реалізації окресленої мети зараз, необхідно виконати такі завдання:

- провести аналіз рекомендаційних систем та наукових публікацій щодо поставленої мети;
- сформувати принципи визначення якості рекомендаційних систем;
- дослідити основні підходи до структурування характеристик оцінювання якості рекомендаційних систем;
- реалізувати просту рекомендаційну систему та виміряти результати;
- реалізувати рекомендаційну систему на основі алгоритмів колаборативної фільтрації;
- запропонувати кваліметричний метод оцінки якості рекомендаційних систем на основі запропонованої «циклограми якості рекомендаційної системи».

В подальших наукових роботах заплановано:

- реалізувати рекомендаційну систему на основі алгоритмів колаборативної фільтрації та покращити її кваліметричними параметрами якості, які враховують “думку” користувача;
- покращити якість рекомендаційної системи колаборативної фільтрації на основі нових кваліметричних показників якості в рамках запропонованого в даній статті методу.

Кваліметрія (англ. qualimetry, нім. Qualimetrie f) (лат. Quales - якість + грец. Μετρέω - міряю) — наука про оцінку якості об'єктів, вивчає та реалізує методи і засоби кількісної оцінки якості продукції. Сьогодні кваліметрію розглядають як частину теорії прийняття рішень. Сьогодні за допомогою апарату кваліметрії почали оцінювати якість праці, якість працівника, якість освіти тощо. Можна вважати, що кваліметрія перетворюється в загальну науку про вимірювання, оцінку об'єктів різної природи - матеріального й нематеріального продукту, явища, процесу.

Кваліметрія передбачає структурування об'єкта вивчення, поділ його на складові частини, які у свою чергу поділяються на частини і т. д. При цьому виходить ієрархічна система, що зазвичай відображається схемою чи таблицею. Далі виконується оцінка експертами або іншим шляхом («вимірювання») кожної складової та встановлення її вагомості (важливості) й, нарешті, поєднання цих оцінок за певними правилами в загальну оцінку об'єкта. Якість рекомендаційної системи ми визначаємо саме за рахунок кваліметричних методів вимірювання.

Об’єктом дослідження є сайт-агрегатор пошуку автомобілів в – Automoto.ua. Це пошукова система, спеціалізацією якої є пошук оголошень про продаж автомобілів, мотоциклів, спецтехніки та інших транспортних засобів в Україні. Automoto.ua дає можливість здійснювати пошук пропозицій про продаж авто по всій Україні, надаючи максимально повні та актуальні результати. Сьогодні сайт обробляє інформацію з понад 100 автосайтів України. Щодня в базі знаходиться більше 250 000 тисяч оголошень, 9-16 тисяч з яких є свіжими надходженнями за поточний день.

Предметом дослідження є алгоритм «item to item» колаборативної фільтрації.

Ми вже визначили, що рекомендаційна система - комплекс алгоритмів, програм та сервісів, завдання якого передбачити, що може зацікавити того чи іншого користувача. В основі роботи лежить інформація про профіль людини та інші дані. Із всіх існуючх рекомендаційних систем, зараз в світі використовують переважно 4 типа:

- Колаборативна фільтрація *(collaborative filtering)*.

Рекомендації засновані на історії оцінок як користувача, так і інших. У другому випадку системи розглядають споживачів, оцінки чи інтереси яких схожі на ваші. Колаборативну фільтрацію поділяють на три основних алгорит -ма: User-to-User, Item-to-Item, Гібридна (User+Item). Недолік: показувати хороші рекомендації новим користувачам не вийде, адже про них немає ніякої інформації. Через це буде великий відсоток відмов.

- Засновані на контенті *(content-based)*.

Цей тип є основою багатьох рекомендаційних систем. На відміну від колаборативної фільтрації етап знайомства з користувачем опускається. Товари та послуги рекомендуються з урахуванням знання них: жанр, виробник, конкретні функції тощо. Загалом застосовують будь-які дані, які можна зібрати. Неділок: спочатку системи діють неточно і потрібно більше часу на реалізацію.

- Засновані на знаннях *(knowledge-based)*.

Цей тип працює на основі знань про якусь предметну область: про користувачів, товари та інші, які можуть допомогти в ранжируванні. Як і у випадку з "content-based", оцінки інших користувачів системи не враховують. Є кілька різновидів: case-based, demographic-based, utility-based, critique-based, whatever-you-want-based і т.д. Неділок: для розробки цієї системи потрібно багато часу і ресурсів. Але результат виправдовує засоби.

- Гібридні *(hybrid)*.

Комбінування кількох алгоритмів в межах однієї платформи. Неділок: складність розробки і невизначеність в результах.

Виклад основного матеріалу

На основі попереднього дослідження алгоритму рекомендаційної системи було використано метод колаборативної фільтрації на основі користувачів (user to user). Але цей метод має дві основні проблеми:

1. Рідкість даних: У випадку наявності великої кількості елементів кількість елементів, з якими взаємодіяв користувач, зменшується до невеликого відсотка, що робить коефіцієнт кореляції менш надійним.

2. Користувачі швидко змінюються (знаходять потрібне авто та більше не шукають), і всю модель системи потрібно було перерахувати, що є затратно по часу і обчислювально дорогим [2].

Для вирішення цих проблем ми використали колаборативну фільтрацію item-to-item. Колаборативна фільтрація item-to-item шукає елементи, схожі на ті, з якими користувач уже взаємодіяв, і рекомендують більшість подібних елементів. В нашому випадку, алгоритм шукає подібні авто до того, яке шукав користувач сайту. Коли ми говоримо про подібність авто, ми не маємо на увазі, що два авто однакові за різними атрибутами. Натомість, подібність означає, що користувачі ставляться до двох автомобільних оголошень однаково.

Цей метод є досить стійкий сам по собі порівняно із колаборативною фільтрацією на основі користувачів (user to user), оскільки елемент (автомобільне оголошення), з яким була взаємодія, має набагато більше даних, ніж користувач [4].

Для обчислення подібності між двома автомобільними оголошеннями ми розглянули набір елементів, які формують характеристики автомобіля і обчислюють, наскільки вони схожі на цільове оголошення, а потім вибирають N-більшість подібних елементів. Подібність між двома оголошеннями обчислили за допомогою показників відвідуваності користувачів, які переглядали оголошення, надалі використовуючи згадану нижче функцію косинусової подібності [5]:

$$similarity = \cos(\theta) = \frac{A \cdot B}{\| A \| \cdot \| B \|} = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_j \times B_j}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (A_j)^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (B_j)^2}}; \quad (1)$$

Другий етап включав виконання рекомендаційної системи. Він використовує оголошення (вже переглянуті користувачем), які найбільш схожі на відсутній елемент, щоб створити оцінку. Тому згенерували прогнози на основі переглядів подібних оголошень. Обчислилио це за формулою, яка обчислює рейтинг для конкретного товару, використовуючи зважену суму рейтингів інших подібних продуктів. (В нашому випадку рейтинг - кількість переглядів оголошень, від *0* до *N*)

$$rating(U,I_i)=\frac{\sum_j rating(U,I_i)*S_{ij}}{\sum_j S_{ij}};\qquad(2)$$

Колаборативну фільтрацію запроваджували для двох рекомендаційних систем – «Вигідніше» та «З цим авто також шукать» (рис. 3), роботи яких базується на рекомендації схожих елементів (оголошень) - https://automoto.ua/uk/Volkswagen-Tiguan-2020-Krivoyrog-48654959.html.

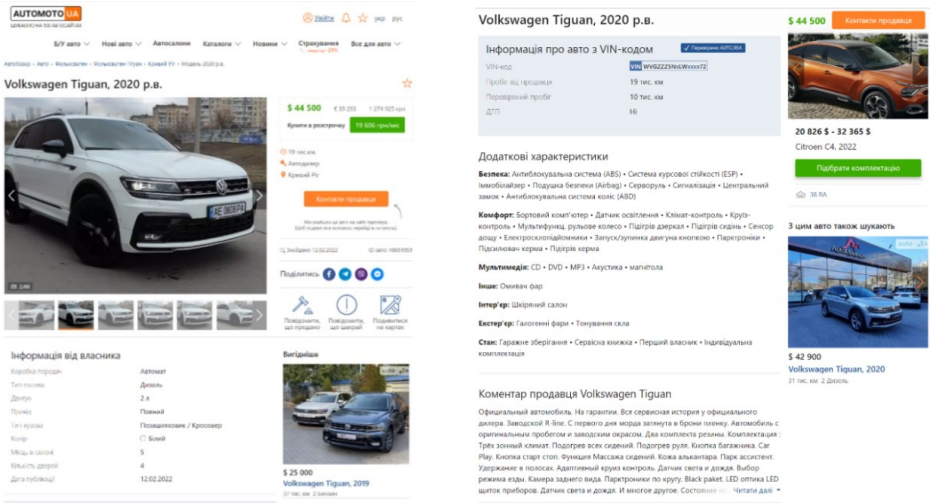


Рис. 3. Вигляд рекомендаційних систем «Вигідніше» та «З цим авто також шукають»

Кількість кліків по рекомендаваних оголошеннях зросла на 22,80 та на 21,80% за рахунок імплементації алгоритму item-to-item. Вимірювання проводилось за допомогою сервісу Google Analytics (рис. 4) та (рис. 5). Семплування даних при вимірюванні – відсутнє, оскільки вимірювання проводимлось на основі 100% сеансів.

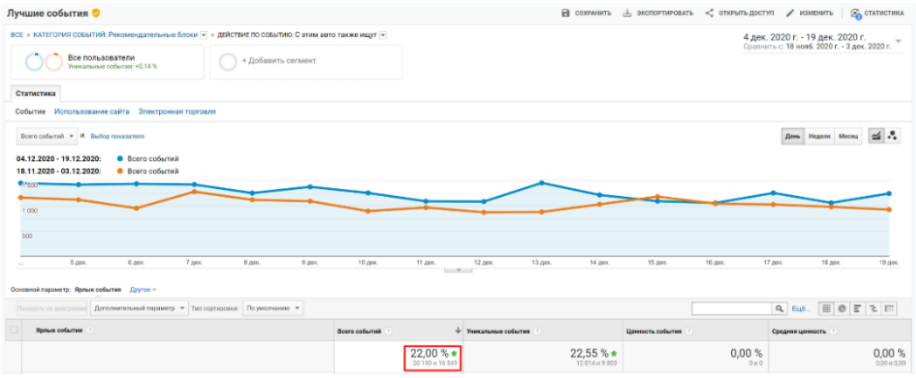


Рис. 4. Ріст кліків по рекомендаційній системі «З цим авто також шукають»

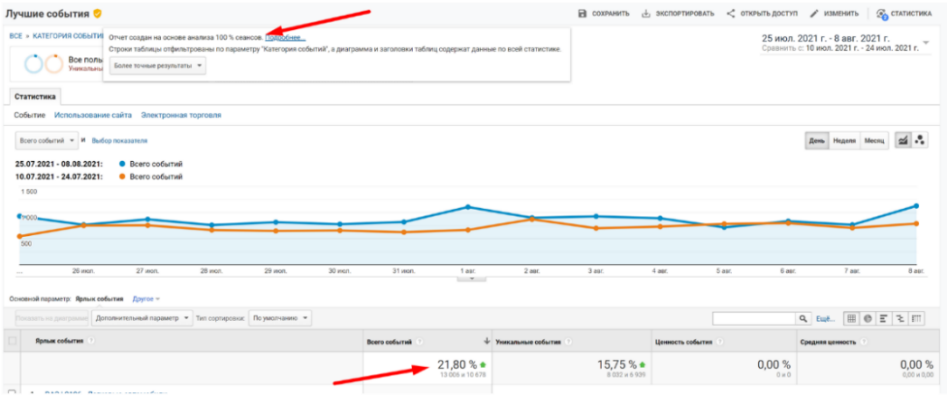


Рис. 5. Ріст кліків по рекомендаційній системі «Вигідніше»

Кількість кліків по рекомендаваних оголошеннях зросла на 21,80% за рахунок імплементації додаткової інформації в систему рекомендацій. Вимірювання проводилось за допомогою сервісу Google Analytics (рис.4). Семплування даних при вимірюванні – відсутнє, оскільки вимірювання проводимлось на основі 100% сеансів [6].

Далі, пропонується створити третій унікальний алгоритм колаборативної фільтрації, який буде враховувати «думку» користувачів про авто. Мається наувазі зібрати відгуки про авто із десятків автомобільних сайтів України та світу, та конвертувати текст відгуку в числове значення – «The Value of Opinion». Алгоритм пропонує наступні покращення: найбільна в світі авто вибірку відгуків – до 3 мільйонів відгуків; аналіз всього відгуку, а не тільки блоки «плюси» та «мінуси; набір із 8 кваліметричних метрик, які комплексно оцінюють якість відгуку та формують унікальне значення «The Value of Opinion»; внесення показника «The Value of Opinion» в основну формулу ранжування рекомендаційних систем із найбільшою кількістю оголошень в Україні.

На основі наших всіх наукових робіт та досвіду, проаналізувавши наукові роботи України та світу, ми виявили, що не існує єдиної системи «якості» рекомендаційної системи. В кожній науковій/бізнес-задачі якість рекомендаційних система вимірюється по-різному. Тому, в рамках кваліметричних методів вимірюваннь ми запроваджуємо – «Циклограму якості рекомендаційних систем» - рис. 6, де запроваженно унікальний показник «The Value of Opinion».

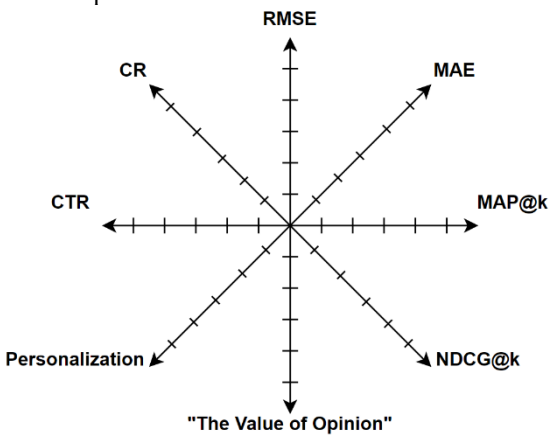


Рис. 6. «Циклограма якості рекомендаційних систем»

Встановлено, що найкращі практики в світі базуються на комплексному аналізі якості та точності рекомендаційних систем, які спрямовані на ріст бізнесу. В таблиці 1 поділено 8 основних метрик на 4 групи:

Таблиця 1

Група	Бізнес-метрики	Метрики точності	Метрики якості ранжування	Метрики якості
Метрика	*CTR, CR*	*RMSE, MAE*	*MAP@k, NDCG@k*	*«The Value of Opinion», Personalization*

Розглянемо детільніше кожну метрику:

CTR - click-through rate, цей показник показує, який відсоток користувачів, що побачили рекомендаційну систему, клацнули по ній. Формула розрахунку CTR:

$$CTR = Кількість\ кліків / Кількість\ показів \times 100\% \quad (3)$$

CR - це коефіцієнт конверсії (conversion rate). Так називають співвідношення відвідувачів сайту, які досягли мети, до спільної аудиторії. Якщо просто, то це відсоток користувачів, які здійснили потрібну дію - зареєструвалися, підписалися на розсилку, заповнили форму, подали заявку, оформили покупку. В нашому випадку – перейшли на джерело оголошення для здійснення дзвінку.

$$CR = Загальна\ кількість\ конверсій / Загальна\ кількість\ відвідувачів \times 100\% \quad (4)$$

RMSE – root mean square error, середньоквадратична відхилення. Є часто використовуваною мірою відмінностей між значеннями (вибірковими або сукупними значеннями), передбаченими моделлю або оцінювачем, і спостережуваними значеннями. RMSD являє собою квадратний корінь з моменту другого зразка відмінностей між прогнозованими значеннями та спостережуваними значеннями або середнє квадратичне цих відмінностей.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{|D|}\sum (u,i) \in D(\hat{r}_{ui} - r_{ui})^2}; \quad (5)$$

MAE - mean absolute error, середня абсолютне відхилення. Це міра помилок між парними спостереженнями, що виражають одне й те саме явище. Використовують для вимірювання точності прогнозу.

$$MAE = \frac{1}{n}\sum\nolimits_{u,i} | \, p_{u,i} - r_{u,i} \, | \; ; \quad (6)$$

MAP@k - Mean average precision at K, одна з найчастіше використовуваних метрик якості ранжирування. p@K і ap@K якість ранжування оцінюється для окремо взятого об'єкта (користувача, пошукового запиту). На практиці об'єктів безліч: ми маємо справу із сотнями тисяч користувачів, мільйонами пошукових запитів тощо. Ідея map@K полягає в тому, щоб порахувати ap@K для кожного об'єкта та усереднити:

$$Precision@k = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} Relevance@i; \quad (7)$$

$$AP@k = \frac{\sum_{i=1}^{k}(Relevance@i \cdot Precision@i)}{\sum_{i=1}^{k} Relevance@i}; \quad (8)$$

$$MAP@k = \frac{1}{|Users|}\sum\nolimits_{u \in Users} AP@k(u); \quad (9)$$

NDCG@k - normalized discounted cumulative gain at K, метрика якості ранжування. Основна перевага NDCG полягає в тому, що він враховує оцінені значення релевантності. Якщо вони доступні в наборі даних, NDCG добре підходить. Порівняно з метрикою MAP, вона добре оцінює позицію ранжированих елементів. Він працює за межами бінарного релевантного/нерелевантного сценарію [7].

$$DCG@k = \sum_{i=1}^{k} \frac{2^{Relevance@i} - 1}{\log(i+1)}; \quad (10)$$

$$nDCG@k = \frac{DCG@k}{\max(DCG@k)}; \quad (11)$$

«The Value of Opinion» - супупне кваліметричне значення якості відгуків *N* для вектору товарів *X,* про які ці відгуки були написані.

Personalization – це відсоток персоналізованої видачі результатів в рекомендаційній системі серед всіх сеансів. Число має бути наближене до 100%, але не може дорівнювати 100%, оскільки існує проблема «холодного старту».

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Встановлено, що не існує єдиної системи оцінки якості рекомендаційних систем, які би закривали потреби бізнесу в розрізі якості рекомендації та оцінки відхилень результатів одночасно. Також, рекомендаційні системи не враховують думку про рекомендований товар в цілому, про що свідчить аналіз рекомендаційних систем та наукових публікацій щодо поставленої мети.

Тому, сформували принципи визначення якості рекомендаційних систем, а саме групи метрик, які є кваліметричною основою якості рекомендаційних систем: бізнес-метрики (*CTR, CR*), метрики точності (*RMSE, MAE*), метрики якості ранжування (*MAP@k, NDCG@k*) та метрики якості *(«The Value of Opinion», Personalization*). В рамках запропонованих груп створена – «Циклограма якості рекомендаційних систем» яка включає в себе 8 метрик (по 2 метрики на кожну групу). Крім унікального кваліметричного підходу вимірювання, циклограма включає в себе новий показник – «The Value of Opinion», який базується на основі аналізу відгуків (думок) про товар (в нашому випадку - автомобіль).

Запропонована «Циклограма якості рекомендаційних систем» може використовуватись для любих бізнес-задач в інтернеті, а також будь-яких товарів, а отже є універсальною для використання.

Література

1. В. Кучерук, М. Глушко, «Покращення алгоритму "item to item" методу колаборативної фільтрації для розробки рекомендаційних систем на основі косинусної міри шляхом оцінки релевантності»,

ScienceRise, № 1, с. 20-24. 2018. https://doi.org/10.15587/2313-8416.2018.120886

2. O2O Commerce: The New Key to Growth of the Retail Industry., 2021. [Online]. Avalible: https://www.simicart.com/blog/what-is-o2o-commerce. Accessed on: February 19, 2022.

3. E-commerce as share of total U.S. retail sales from 1st quarter 2010 to 3rd quarter 2021., 2021. [Online]. Avalible: https://www.statista.com/statistics/187439/share-of-e-commerce-sales-in-total-us-retail-sales-in-2010/. Accessed on: February 20, 2022.

4. В. Кучерук, М. Глушко, «Покращення точності рекомендаційної системи «с этим авто также ищут» на основі алгоритму колаборативної фільтрації item-to-item» на *2nd International scientific and practical conference. MDPC Publishing,* Мюнхен, Німеччина, 2015. с. 83-88

5. V. Kucheruk, M. Hlushko. «Improving Accuracy of Recommender systems based on Collaborative Filtering Algorithm Item-To-Item» in *Technical research and development: collective monograph*, – Boston, 2021. pp. 119-125 https://doi.org/10.46299/ISG.2021.MONO.TECH.I

6. Кучерук, М. Глушко, «Метод подібності жаккара для покращення якості рекомендаційних систем» на *V Міжнародній науково-практичній конференції «Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи»* Львів, 20-21 травня 2021, с. 143

7. Рекомендательные системы: идеи, подходы, задачи, 2019. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://habr.com/ru/company/jetinfosystems/blog/453792/ Дата звернення: Лютий 19, 2022.

References

1. V. Kucheruk, M. Hlushko, «Pokrashchennia alhorytmu "item to item" metodu kolaboratyvnoi filtratsii dlia rozrobky rekomendatsiinykh system na osnovi kosynusnoi miry shliakhom otsinky relevantnosti», ScienceRise, № 1, s. 20-24. 2018. https://doi.org/10.15587/2313-8416.2018.120886

2. O2O Commerce: The New Key to Growth of the Retail Industry., 2021. [Online]. Avalible: https://www.simicart.com/blog/what-is-o2o-commerce. Accessed on: February 19, 2022.

3. E-commerce as share of total U.S. retail sales from 1st quarter 2010 to 3rd quarter 2021., 2021. [Online]. Avalible: https://www.statista.com/statistics/187439/share-of-e-commerce-sales-in-total-us-retail-sales-in-2010/. Accessed on: February 20, 2022.

4. V. Kucheruk, M. Hlushko, «Pokrashchennia tochnosti rekomendatsiinoi systemy «s эtym avto takzhe yshchut» na osnovi alhorytmu kolaboratyvnoi filtratsii item-to-item» na 2nd International scientific and practical conference. MDPC Publishing, Miunkhen, Nimechchyna, 2015. s. 83-88

5. V. Kucheruk, M. Hlushko. «Improving Accuracy of Recommender systems based on Collaborative Filtering Algorithm Item-To-Item» in Technical research and development: collective monograph, – Boston, 2021. pp. 119-125 https://doi.org/10.46299/ISG.2021.MONO.TECH.I

6. Kucheruk, M. Hlushko, «Metod podibnosti zhakkara dlia pokrashchennia yakosti rekomendatsiinykh system» na V Mizhnarodnii naukovo-praktychnii konferentsii «Upravlinnia yakistiu v osviti ta promyslovosti: dosvid, problemy ta perspektyvy» Lviv, 20-21 travnia 2021, s. 143

7. Rekomendatelnыe systemы: ydey, podkhodы, zadachy, 2019. [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: https://habr.com/ru/company/jetinfosystems/blog/453792/ Data zvernennia: Liutyi 19, 2022.

https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-70-2-10
УДК 681.325.5

Олексій СТАХОВ
Вінницький національний технічний університет
https://orcid.org/0000-0002-4901-3211

МЕТОДИ ПОБУДОВИ ВИСОКОПРОДУКТИВНИХ АЦП ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СТРУКТУРНОЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНОЇ НАДЛИШКОВОСТІ

У роботі наведено результати досліджень методів побудови високопродуктивних багаторозрядних (n≥12 біт) АЦП із застосуванням структурної та інформаційної надлишковості на базі надлишкових позиційних систем числення (НПСЧ). Розглянуто застосування структурної надлишковості на прикладі двоступінчастого паралельно-послідовного АЦП та наведено його структурну схему, проаналізовано принцип його дії, а також метод формування результату перетворення. Показано можливість збільшення розрядності таких АЦП шляхом нарощування числа ступенів пристрою.

Ключові слова: продуктивність, аналого-цифрове перетворення, структурна та інформаційна надлишковість, АЦП порозрядно-слідкувального врівноваження.

Olexiy STAKHOV
Vinnytsia National Technical University

METHODS OF BUILDING HIGH-PERFORMANCE ADC USING STRUCTURAL AND INFORMATION REDUNDANCY

The paper presents the results of research on methods of building high-performance multi-bit (n≥12 bits) ADCs using structural and informational redundancy based on redundant positional computing systems (RPSCs).

The application of structural redundancy is considered on the example of a two-stage parallel-serial ADC. The structural diagram of such an ADC is presented and the principle of its operation, as well as the method of forming the conversion result, are analyzed. The possibility of increasing the bit rate of such ADCs by increasing the number of stages of the device is shown. It was stated that the use of the principle of information redundancy allows to significantly increase the performance of the ADC. It is proposed to significantly increase speed, and, accordingly, productivity, to use a higher level of redundancy, in particular, a calculation system of the "golden" ratio type (· =1.62), which allows to increase speed, compared to the binary analogue, by 5–8 times. Options for building such ADCs with weight redundancy based on the counting system with bit coefficients [0, 1] and [-1, 1] are given and analyzed. The functioning of such devices is considered. It is indicated that for a further level of productivity, it is expedient to use both informational and combined structural methods, in particular, in the ADC of bit-by-bit tracking balancing with weight redundancy. The peculiarity of such a device is that after entering the monitoring mode, the source code is formed in only one cycle, that is, the performance of the proposed ADC approaches the reading ADC and, even more, due to the increase in the number of digits of the conversion results. The structural diagram of the ADC of bit-by-bit tracking balancing with weight redundancy, the balancing diagram, as well as the graph-scheme of the functioning algorithm are given.

Key words: performance, analog-digital conversion, structural and informational redundancy, bit-by-bit sequential balancing ADC.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Базовими параметрами, що визначають продуктивність АЦП і ЦАП (перетворювачів форми інформації – ПФІ) є число розрядів та кількість перетворень за визначений інтервал часу. Продуктивність, у свою чергу, характеризується кількістю отриманих розрядів (бітів) за заданий час (секунду або мікросекунду).

Безумовно, найвищу продуктивність має АЦП зчитування, оскільки в ньому вхідний сигнал $A_{вх}$ перетворюється в код всього за один такт. При цьому слід зазначити, що розрядність такого АЦП є відносно невеликою (10–12 розрядів), а спроба збільшення їх кількості призводить до істотного нарощування обладнання та споживаної потужності. Таким чином, підвищення продуктивності АЦП доцільно вирішувати за умови мінімізації додаткових апаратних витрат. Особливо важливим є підвищення багаторозрядних АЦП ($n \geq 12$ біт).

Формулювання цілей статті

Метою роботи є підвищення продуктивності АЦП із застосуванням структурної та інформаційної надлишковості.

Завдання дослідження є такими:

- запропонувати метод структурно-функціональної організації двоступінчастого паралельно-послідовного АЦП, а також принцип формування результату перетворення;
- розробити метод побудови високопродуктивного АЦП порозрядно-слідкувального врівноваження з ваговою надлишковістю.

Аналіз досліджень та публікацій

Варто вказати, що проблемами підвищення продуктивності та швидкодії займалися представники українських наукових шкіл Кондалєва А. І., Орнатського П. П., Швецького Б. Й., Туза Ю. М., Володарського Є.Т.

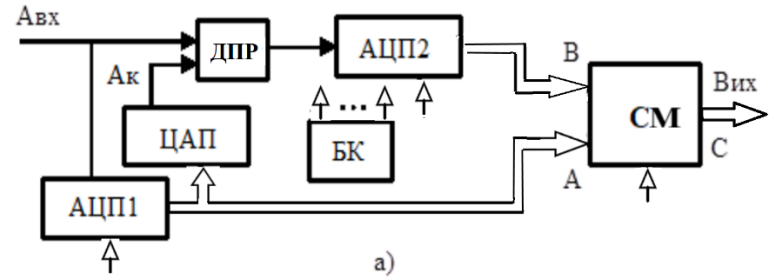
Питаннями покращення статичних і динамічних характеристик АЦП займалися відомі науковці США, а саме: Ф. Гудінаф, В. Кестер, З. Боєсиглер, С. Соклоф, М. Ризенман, Брубакер Д., Руді Дж. Ван Де Плаше та ін.

Разом із тим, питання підвищення продуктивності АЦП у системному плані не є достатньо опрацьованим, що і зумовлює актуальність обраної у даній статті теми досліджень.

Структурно-функціональна організація двоступінчастого паралельно-послідовного АЦП

Варто відзначити, що підвищення швидкодії високорозрядних АЦП досягається двома шляхами. Перший орієнтується на використання досконалої елементної бази. Другий – пов'язаний із уведенням у пристрій, що проєктується, надлишковості, зокрема, структурної. Суть його відображається паралельно-послідовним принципом перетворення.

Структурну схему паралельно-послідовного АЦП зображено на рис. 1 [1].



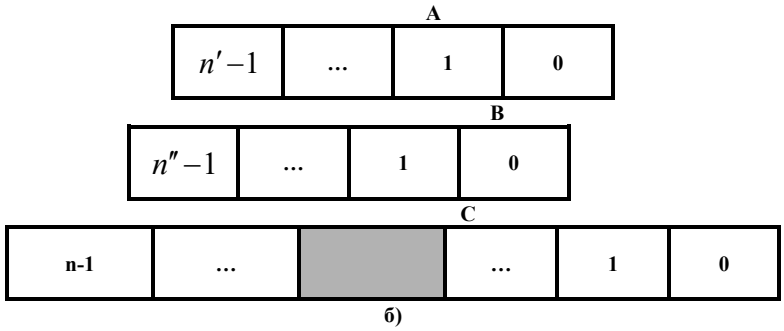


Рис. 1. Двоступінчастий паралельно-послідовний АЦП: а) − структурна схема; б) − метод формування результату

На рис. 1: АЦП1 −перетворювач аналог-код з розрядністю n'; АЦП2 − з розрядністю n''; ЦАП − високоточний перетворювач з розрядністю n'; ДПР − диференціальний підсилювач різниці $\Delta A=A_{вх}-A_к$; СМ − суматор; БК − блок керування, що забезпечує функціонування пристрою.

Принцип дії АЦП є таким. Вхідний сигнал $A_{вх}$ на першому такті перетворюється в код А в АЦП1 (першого ступеня). Різниця сигналів ΔА на другому такті підсилюється ДП і надходить на вхід АЦП2 (другого ступеня), на виході якого формується код В. Коди А та В подаються на вхід СМ, на виході якого з'являється сума С:=А+В. У такий спосіб результат перетворення $A_{вх}$, формується за два такти у вигляді коду С як сума кодів А (старші розряди) і В (молодші розряди).

Варто відзначити, що безпосереднім стикуванням вихідних кодів не можна одержати точність, що відповідає $n=n'+n''$-розрядам. Це пов'язано з тим, що ΔА складається не тільки із залишку неврівноваженої частини $A_{вх}$, але і похибки, що виникають через неідеальність АЦП1 і ДП. Тому для формування правильного результату (рис. 1, б) застосовується метод перекриття шкал [1]. Для корекції ЦАП, статична похибка якого повинна відповідати n-розрядному перетворенню, може застосовуватися допоміжний ЦАП і ПЗП з таблицею поправок [2], а також ОЗП і мікропроцесор [2]. Паралельно-послідовний принцип використовується при 12-14 розрядному аналого-цифровому кодування з частотою відліків 1− 20 мГц. Недолік його полягає в ускладненні схеми аналогової частини, значних апаратурних витратах, високому енергоспоживанні і низькій завадостійкості. Певним компромісом у цьому плані можуть слугувати структури паралельно-послідовних АЦП із числом ступенів врівноваження більше двох, розроблені у роботах [1−3].

АЦП порозрядного врівноваження підвищеної швидкодії з інформаційною (ваговою) надлишковістю

Наприкінці 70-х і у 80-х роках для підвищення швидкодії при порозрядному аналого-цифровому перетворенні починають застосовуватися надлишкові позиційні системи числення. Першим серійним виробом, що використовує цей підхід, був 14-розрядний АЦП ICL 7115 фірми Intersil [4]. Структурну схему такого пристрою, виготовленого за КМОН- технології, наведено на рис. 2.

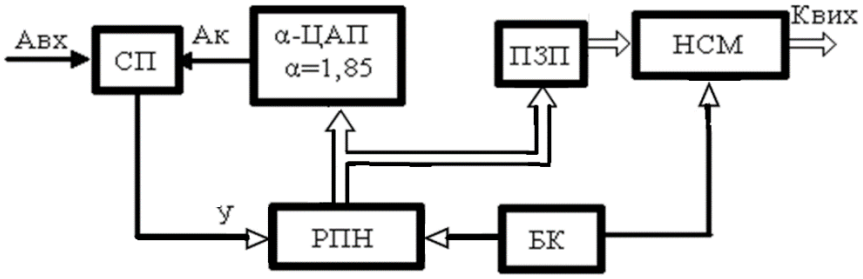


Рис. 2. Структурна схема швидкодіючого програмно-каліброваного АЦП ICL 7115

На рис. 2: СП − схема порівняння, РПН − регістр послідовного наближення, НСМ – нагромаджуючий суматор, БК – блок керування. Особливістю такого програмно-каліброваного АЦП є застосування надлишкового (відносно двійкового) 17-розрядного ЦАП з відношенням ваг α=1,85. Це дозволило здійснювати автоматичну компенсацію динамічних похибок, що виникають у процесі врівноваження, і досягти часу перетворення ≤40 мкс.

Діапазон перетворення ICL 7115 на 18% більше, ніж для двійкового при значно меншій точності виготовлення резисторів ЦАП. Відхилення ваг розрядів від ідеальних значень визначаються після виготовлення кристалу і штучного його старіння, а потім у вигляді двійкових еквівалентів заносяться в ПЗП. Вихідний 14-розрядний двійковий код $K_{вих}$ по мірі врівноваження послідовно формується в НСМ. Цифровий еквівалент вхідного коду $K_{вих}$ відображає компенсуючу величину $A_к$, значення якої пропорційне:

$$K_{вих} = \sum a_i K_i ,$$

де a_i є {0,1} − двійковий коефіцієнт і-го розряду надлишкового ЦАП;

K_i − цифровий двійковий еквівалент реальної ваги і-го -розряду.

Проте виграш по швидкодії, що досягається в цьому випадку, є невисоким (біля двох разів) унаслідок низького рівня надлишковості, що вводиться. Крім того, програмне калібрування ваг розрядів, коди яких занесено в ПЗП, є неефективним під час змінення умов зовнішнього середовища, оскільки це призводить до зміни ваг розрядів.

У роботах [1, 3, 5] запропоновано високоточні самокалібровані швидкодіючі АЦП на основі НПСЧ. Показано, що «повільнодіючі» самокалібровані АЦП на основі НПСЧ [3, 6, 7] можна перетворити на «швидкодіючі» шляхом незначного ускладнення цифрової частини.

Структурна схема швидкодіючого самокаліброваного АЦП на основі знакорозрядної НПСЧ, що наведена на рис. 3 [1].

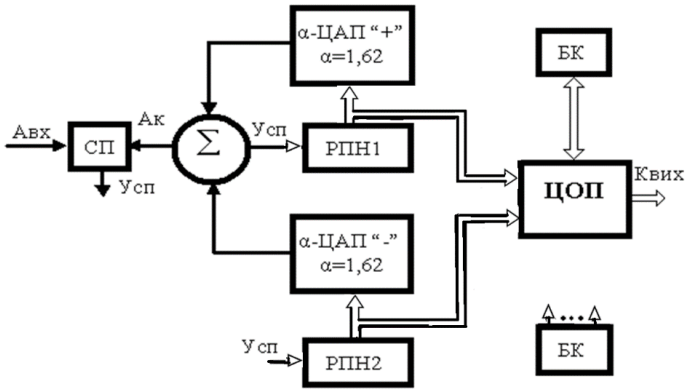


Рис. 3. Структурна схема швидкодіючого самокаліброваного АЦП на основі НПСЧ (1, -1)

Цей АЦП містить два цифроаналогових перетворювачі: додатний (ЦАП «+») і від'ємний (ЦАП «-»); регістри послідовного наближення РПН1 та РПН2, суматор аналогових сигналів (Σ), цифровий

обчислювальний пристрій (ЦОП), блок пам'яті (БП), схему порівняння (СП) і блок керування (БК). АЦП працює в двох режимах: самокалібрування й основного перетворення. В процесі самокалібрування визначаються коди реальних ваг розрядів ЦАП «+», ЦАП «-» і $\Delta A_{зм}$, що фіксуються в БП. У режимі основного перетворення прискорене аналого-цифрове врівноваження здійснюється за рахунок автокомпенсації динамічних похибок. При цьому мінімальна припустима тривалість такту перетворення визначається рівнем надлишковості використовуваної НПСЧ. У розроблених пристроях відношення ваг розрядів НПСЧ α≈1,62 (золота пропорція), що дозволяє підвищити швидкодію в порівнянні з двійковим АЦП у 5-8 разів.

Структурна схема швидкодіючого самокаліброваного АЦП на основі НПСЧ (0,1), яку наведено на рис. 4, містить [1]: аналоговий комутатор (АК), блок допоміжних сигналів (БДС), блок елементів АБО, регістр зсуву та ін.

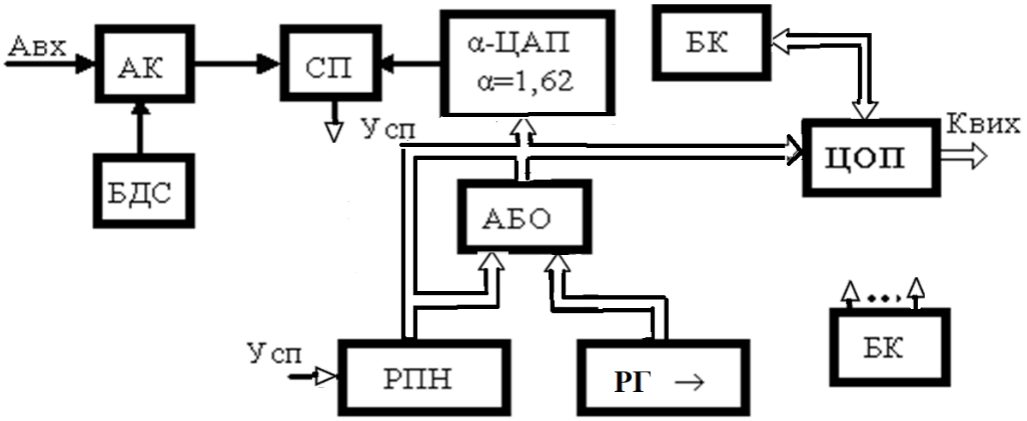


Рис. 4. Структурна схема швидкодіючого самокаліброваного АЦП на основі НПСЧ (0, 1)

У режимі самокалібрування визначаються коди реальних ваг розрядів α-ЦАП і $\Delta A_{зм}$. Причому значення додаткових аналогових сигналів, що формуються БДС, можуть задаватися з низькою точністю. Прискорене врівноважування здійснюється з використанням на кожному *l*-му такті аналогових сигналів, що форсують і генеруються молодшими (i<*l*) розрядами ЦАП. В разі перетворення вимірювальних сигналів у схеми вводиться прецизійне джерело опорної напруги (струму), за допомогою якого коригується масштабний коефіцієнт М.

Слід зазначити, що введення інформаційної надлишковості у формі НПСЧ, дозволяє організувати процедуру самокалібрування і компенсації динамічних похибок ваг розрядів АЦП і використовувати ці принципи для побудови високоточних швидкодіючих перетворювачів аналог-код, точносні характеристики яких не погіршуються під час змінення умов зовнішнього середовища і функціонуванні протягом тривалих проміжків часу [1].

Метод високопродукутивного ацп порозрядно-слідкувального врівноваження з ваговою надлишковістю

За методом високопродуктивного АЦП порозрядного перетворення організації перетворення під час кодування аналогового сигналу спочатку встановлюється режим порозрядного врівноваження, що є необхідним для прискореного виходу в режим слідкувального врівноваження [8, 9]. Далі встановлюється режим слідкувального врівноваження, за якого застосовується швидкодіючий лічильник. У випадку суттєвого змінення аналогового сигналу Авх знову здійснюється короткочасний перехід до порозрядного врівноважування, після чого встановлюється слідкувальний режим. Залежно від режиму перетворення по-різному формується вихідний код Квих. У режимі порозрядного врівноваження він дорівнює коду в регістрі порозрядного наближення Квих=Кр. Під час слідкувального врівноваження код на виході АЦП визначається станом швидкодіючого лічильника Квих=Кл. На рис. 5 до структури АЦП входять: БК – блок керування, БВР – блок визначення різниці аналогових сигналів, ЦАП у СЧВН, СЧВН-АЦПзч – АЦП зчитування у СЧВН на два розряди, РПН – регістр послідовного наближення, СЧВН-РЛіч – реверсивний лічильник у СЧВН, цифровий комутатор ЦК та вихідний регістр Рв [10, 11].

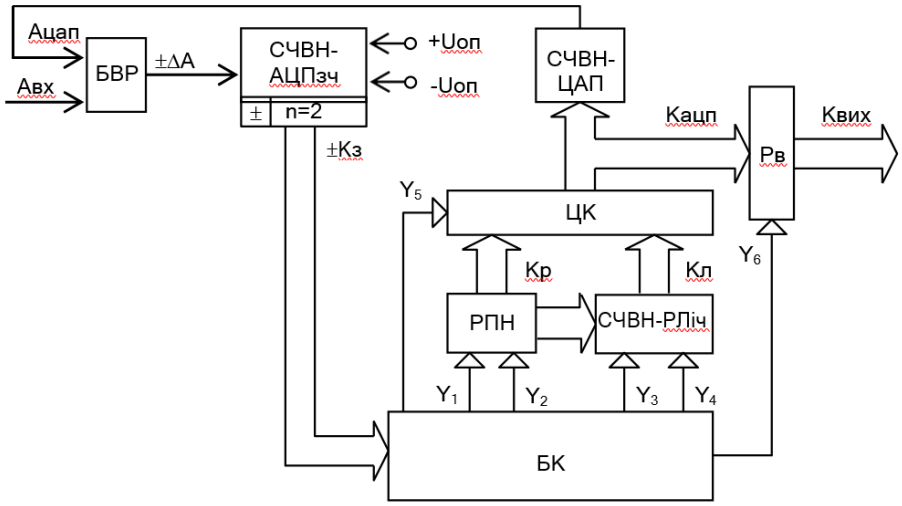


Рис. 5. Структурна організація порозрядно-слідкувального АЦП у СЧВН

На рис. 6 показано послідовність зміни режимів порозрядно-слідкувального АЦП у процесі кодування аналогового сигналу, що може зазнавати різких змін амплітуди [11].

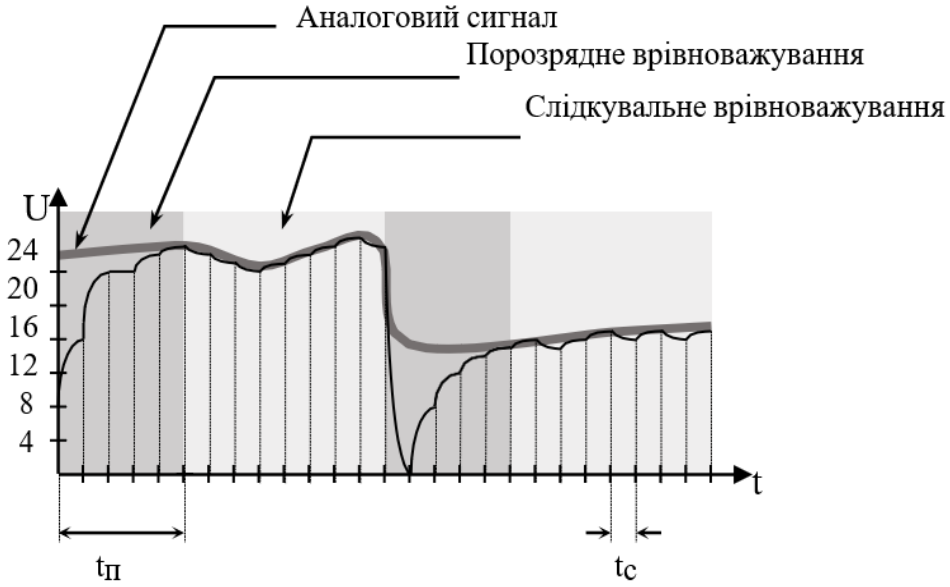


Рис. 6. Графік 5-розрядного порозрядно-слідкувального АЦ-перетворення

Якщо відбувається перехід з режиму порозрядного наближення у слідкувальний режим, то код регістра послідовного наближення переписується у реверсивний лічильник. Отже, режим порозрядного врівноваження фактично слугує для швидкого виходу на режим слідкувального перетворення (рис. 5).

Розглянемо основні аспекти роботи запропонованого порозрядно-слідкувального АЦП на основі СЧВН. При поданні на вхід АЦП аналогового сигналу Авх він поступає на вхід блока визначення різниці. БВР встановлює на своєму виході аналоговий сигнал ±ΔА, який дорівнює різниці аналогових сигналів Авх і Ацап. СЧВН-ЦАП призначений для перетворення у аналоговий сигнал Ацап коду, який поступає з виходу цифрового комутатора. БК отримує з СЧВН-АЦПзч код ±Кз сигналу ±ΔА і встановлює на своєму виході керуючі сигнали Y1-Y5. РПН встановлює СЧВН-код Кр амплітуди аналогового сигналу Авх у режимі послідовного наближення. СЧВН-РЛіч формує СЧВН-код Кл амплітуди аналогового сигналу Авх у слідкувальному режимі. ЦК перемикає на свій вихід Кр або Кл і формує вихідний код Квих, який поступає на вхід Рв. Блок-схему роботи блока керування представлено на рис. 7.

Розглянемо процес роботи порозрядно-слідкувального АЦП, схему якого зображено на рис. 7 [9, 11].

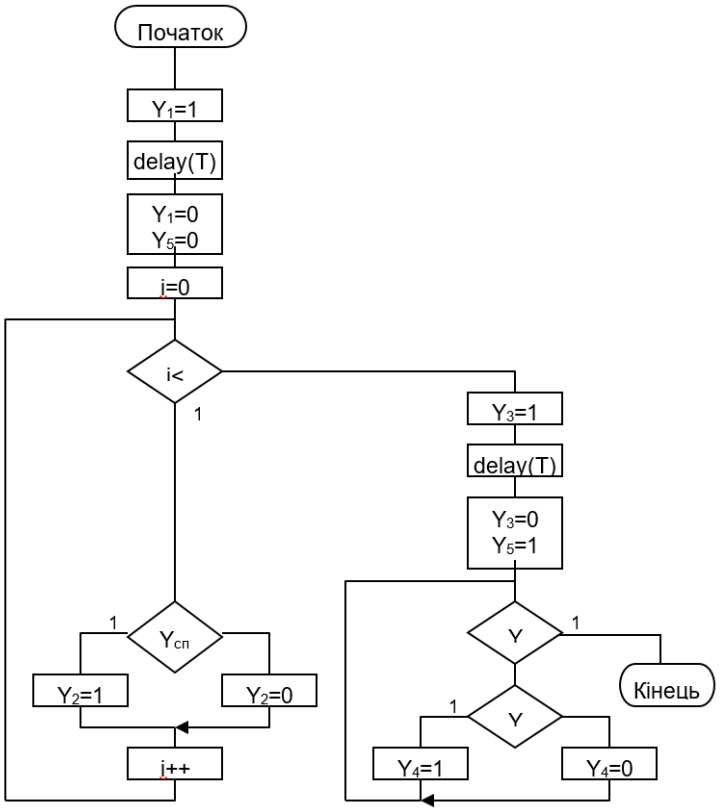


Рис. 7. Блок-схема алгоритму функціонування БК

БК генерує керуючі сигнали. Одразу після вмикання АЦП він генерує сигнал Y1, який встановлює у нуль розряди регістра послідовного наближення. Після цього ним генерується керуючий сигнал Y5, який поступає на вхід ЦК і переводить його у режим комутації на свій вихід коду Кр з виходу РПН. РПН, починаючи зі старших, встановлює свої розряди в 0 або в 1 в залежності від керуючого сигналу Y2, який формується блоком керування і залежить від коду ±Кз, що надходить з виходу СЧВН-АЦПз. Після завершення циклу послідовного перетворення АЦП переходить у режим слідкувального перетворення. При цьому за допомогою керуючого сигналу Y3 відбувається запис коду з виходу РПН у СЧВН-РЛіч. Одночасно керуючий сигнал Y5 встановлюється в одиничне значення і перемикає ЦК у режим комутації коду з виходу СЧВН-РЛіч на вхід СЧВН-ЦАП і на вхід Рв. Тобто, у режимі слідкувального врівноваження Квих=Кл. Якщо у цьому режимі амплітуда вхідного сигналу Авх значно змінюється, то БК знову переходить у режим порозрядного врівноваження.

Таким чином, у запропонованому АЦП встановлення режиму порозрядного врівноваження на початку роботи і у випадку значної зміни амплітуди вхідного сигналу дозволяє набагато швидше виходити наслідкувальний режим. Якщо у цих випадках використовувати лічильник, то для виходу на слідкувальний режим потрібно буде приблизно α^n тактів (де α – це співвідношення між вагами сусідніх розрядів системи числення з ваговою надлишковістю, n – розрядність аналого-цифрового перетворювача). Введення режиму порозрядного врівноваження дозволяє виходити на режим слідкувального врівноважування всього за n – тактів. У режимі послідовного перетворення використання СЧВН в АЦП дозволяє на порядок підвищити його швидкодію за рахунок компенсації динамічної похибки другого роду. Використання швидкодіючого СЧВН-лічильника дозволяє підвищити швидкість слідкувального врівноваження приблизно в n разів порівняно із слідкувальним АЦП у класичній двійковій системі числення.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У даній статті запропоновано методи підвищення продуктивності багаторозрядних АЦП, зокрема, метод структурно-функціональної організації двоступінчастого паралельно-послідовного АЦП, метод побудови високопродуктивного АЦП порозрядно-слідкувального врівноваження з ваговою надлишковістю.

Доведено, що метод порозрядно-слідкувального врівноваження дозволяє збільшити продуктивність кодування до n-біт на один такт, що наближається до продуктивності АЦП зчитування із значно меншими витратами додаткового обладнання.

Література

1. Азаров О. Д. Аналого-цифрове порозрядне перетворення на основі надлишкових систем числення з ваговою надлишковістю: монографія / Азаров О. Д. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 231 с. ISBN 966-641-089-9.

2. Азаров, О. Д. Методи та засоби високоточного слідкувального аналогоцифрового перетворення з ваговою надлишковістю : монографія / О. Д. Азаров, О. В. Дудник. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 120 с. ISBN 978-966-641-580-9.

3. Азаров, О. Д. Швидкодійні високоточні АЦП із перерозподілом заряду з ваговою надлишковістю, що самокалібруються : монографія / О. Д. Азаров, Н. О. Біліченко, С. М. Захарченко. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 140 с. ISBN 978-966-641-665-3.

4. Walt Kester Drive Circuitry is Critical to High-Speed Sampling ADCs / Walt Kester // Electronic Design Special Analog Issue. – 1994. – Nov. 7. – P. 43–50.

5. Преобразователи формы информации: современное состояние и перспективы развития / В. А. Багацкий, П. С. Клочан, В. А. Романов [та ін.] // Комп`ютерні засоби, мережі та системи. – 2003. – № 2. – С. 40–46.

6. Азаров, О. Д. Високолінійні порозрядні АЦП із перерозподілом заряду з ваговою надлишковістю, що самокалібруються : монографія / О. Д. Азаров, Н. О. Біліченко, С. М. Захарченко. Вінниця : ВНТУ, 2016. 140 с.

7. Азаров О. Д., Богомолов С. В., Стахов О. Я. Багатоканальна швидкодіюча система АЦП-ЦАП на базі високолінійних перетворювачів струм-струм. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. Т. 53. № 1. 2021. С. 69-79. URL : https://doi.org/10.31649/1999-9941-2021-50-1-69-79 (Дата звернення 29.07.22).

8. Alexey D. Azarov, Svitlana A. Kyrylashchyk, Sergey V. Bogomolov, Oleksiy Y. Stakhov, Andrzej Kotyra, Orken Mamyrbaev. Selection of the calculus system base for ADC and DAC with weight redundancy. Proc. SPIE 11176, *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and HighEnergy Physics Experiments 2019*, 1117662. P. 1117662.1 − 1117662.7. (6 November 2019); doi: 10.1117/12.2537197.

9. Olexiy D. Azarov, Sergii V. Pavlov, Olexandr I. Chernyak, Igor D. Ivasyuk, Waldemar Wójcik, Aigul Syzdykpayeva. Principles of fast count in modified Fibonacci numerical system. Proc. SPIE 10808. *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*. 1080829. P.1080829.1 − 1080829.8 (1 October 2018); doi: 10.1117/12.2501565.

10. Азаров О., Черняк О., Туйчев В. Векторний метод локалізації помилок підвищеної ефективності. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія.* № 2. 2021. С. 60-67. URL : https://doi.org/10.31649/1999-9941-2021-51-2-60-67 (Дата звернення 29.07.22).

11. Азаров О. Д., Черняк О. І., Стахов О. Я. АЦП порозрядно-слідкувального врівноваження з ваговою надлишковістю. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2020. Т.49. № 3. С. 37 – 44. https://doi.org/10.31649/1999-9941-2020-49-3-37-44 (Дата звернення 29.07.22).

References

1. Azarov O. D. Analoho-tsyfrove porozriadne peretvorennia na osnovi nadlyshkovykh system chyslennia z vahovoiu nadlyshkovistiu: monohrafiia / Azarov O. D. – Vinnytsia : VNTU, 2010. – 231 s. ISBN 966-641-089-9.

2. Azarov, O. D. Metody ta zasoby vysokotochnoho slidkuvalnoho analohotsyfrovoho peretvorennia z vahovoiu nadlyshkovistiu : monohrafiia / O. D. Azarov, O. V. Dudnyk. – Vinnytsia : VNTU, 2014. – 120 c. ISBN 978-966-641-580-9.

3. Azarov, O. D. Shvydkodiini vysokotochni ATsP iz pererozpodilom zariadu z vahovoiu nadlyshkovistiu, shcho samokalibruiutsia : monohrafiia / O. D. Azarov, N. O. Bilichenko, S. M. Zakharchenko. – Vinnytsia : VNTU, 2016. – 140 s. ISBN 978-966-641-665-3.

4. Walt Kester Drive Circuitry is Critical to High-Speed Sampling ADCs / Walt Kester // Electronic Design Special Analog Issue. – 1994. – Nov. 7. – P. 43–50.

5. Preobrazovately formы ynformatsyy: sovremennoe sostoianye y perspektyvы razvytyia / V. A. Bahatskyi, P. S. Klochan, V. A. Romanov [ta in.] // Komp`iuterni zasoby, merezhi ta systemy. – 2003. – № 2. – S. 40–46.

6. Azarov, O. D. Vysokoliniini porozriadni ATsP iz pererozpodilom zariadu z vahovoiu nadlyshkovistiu, shcho samokalibruiutsia : monohrafiia / O. D. Azarov, N. O. Bilichenko, S. M. Zakharchenko. Vinnytsia : VNTU, 2016. 140 s.

7. Azarov O. D., Bohomolov S. V., Stakhov O. Ya. Bahatokanalna shvydkodiiucha systema ATsP-TsAP na bazi vysokoliniinykh peretvoriuvachiv strum-strum. Informatsiini tekhnolohii ta kompiuterna inzheneriia. T. 53. № 1. 2021. S. 69-79. URL : https://doi.org/10.31649/1999-9941-2021-50-1-69-79 (Data zvernennia 29.07.22).

8. Alexey D. Azarov, Svitlana A. Kyrylashchyk, Sergey V. Bogomolov, Oleksiy Y. Stakhov, Andrzej Kotyra, Orken Mamyrbaev. Selection of the calculus system base for ADC and DAC with weight redundancy. Proc. SPIE 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and HighEnergy Physics Experiments 2019, 1117662. P. 1117662.1 − 1117662.7. (6 November 2019); doi: 10.1117/12.2537197.

9. Olexiy D. Azarov, Sergii V. Pavlov, Olexandr I. Chernyak, Igor D. Ivasyuk, Waldemar Wójcik, Aigul Syzdykpayeva. Principles of fast count in modified Fibonacci numerical system. Proc. SPIE 10808. Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018. 1080829. P.1080829.1 − 1080829.8 (1 October 2018); doi: 10.1117/12.2501565.

10. Azarov O., Cherniak O., Tuichev V. Vektornyi metod lokalizatsii pomylok pidvyshchenoi efektyvnosti. Informatsiini tekhnolohii ta kompiuterna inzheneriia. № 2. 2021. S. 60-67. URL : https://doi.org/10.31649/1999-9941-2021-51-2-60-67 (Data zvernennia 29.07.22).

11. Azarov O. D., Cherniak O. I., Stakhov O. Ya. ATsP porozriadno-slidkuvalnoho vrivnovazhennia z vahovoiu nadlyshkovistiu. Informatsiini tekhnolohii ta kompiuterna inzheneriia. 2020. T.49. № 3. S. 37 □ 44. https://doi.org/10.31649/1999-9941-2020-49-3-37-44 (Data zvernennia 29.07.22).

https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-70-2-11
УДК 621.3

Ганна ФІГАС
Вінницький національний технічний університет
https://orcid.org/0000-0003-1380-8394

БАГАТОРОЗРЯДНИЙ ЦАП ІЗ ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ З ВИХОДОМ ПО СТРУМУ

У статті викладено метод побудови багаторозрядних ЦАП із ваговою надлишковістю з виходом по струму. Такі ЦАП дозволяють істотно (на порядок) підвищити швидкодію АЦП порозрядного кодування. Показано, що такий ЦАП має високу швидкодію, а також забезпечує нерозривність характристики перетворення, навіть за умов застос

ування неточної елементної бази. Наведено схеми АЦП, що реалізують алгоритми прискореного врівноваження на основі різних надлишкових позиційних систем числення. Розглянуто принципові та функціональні схеми двотактних підсилювачів постійного струму зі зворотним зв'язком по струму для підвищення вихідного опору цифроаналогових перетворювачів. Наведено оцінки вихідного опору розглянутих двотактних підсилювачів постійного струму за результатами аналітичних обчислень та комп'ютерного моделювання.

Ключові слова: вихід по струму, резистивна матриця, вагова надлишковість, двотактний підсилювач постійного струму, ЦАП.

Ganna FIGAS
Vinnytsia National Technical University

METHODS OF BUILDING HIGH-PERFORMANCE ADC USING STRUCTURAL AND INFORMATION REDUNDANCY

Most of the parasitic parameters of integrated circuits are capacitors, the application of the principles of amplification and conversion of currents has an advantage compared to the principle of conversion and amplification of voltages and digital-to-analog converters with current output are relevant. There are significant advantages of using redundant counting systems for the weights of digital-to-analog converters, which avoids gaps in the conversion characteristics of such digital-to-analog converters. The article describes the method of building multi-bit DACs with weight redundancy with current output. Such DACs make it possible to significantly (by an order of magnitude) increase the speed of bit-by-bit coding ADCs. It is shown that such a DAC has a high speed, and also ensures the continuity of the conversion characteristics, even under the conditions of using an imprecise element base. Methods of building multi-bit current digital-analog converters based on resistive matrices, especially on the basis of generators of the same bit currents, are considered. The methods of reducing the error of the superposition of the discharge weights in such digital-to-analog converters due to the use of discharge current generators with high output resistance have been investigated. The methods of using redundancy in multi-bit current digital-to-analog converters to increase the speed of the bit-by-bit balancing ADC, which they are part of, are analyzed. ADC circuits implementing accelerated balancing algorithms based on redundant positional counting systems are presented. The principle and functional schemes of push-pull DC amplifiers with current feedback for increasing the output resistance of digital-to-analog converters are presented. Estimates of the output resistance of the considered two-stroke DC amplifiers based on the results of analytical calculations and computer simulations are given.

Key words: current output, resistive matrix, weight redundancy, two-stroke DC amplifier, DAC.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Перетворення між аналоговими й цифровими величинами – основна операція в обчислювальних і керуючих системах, оскільки фізичні параметри, такі як температура, переміщення, напруга, аудіо і т. п., є аналоговими, а методи оброблення, обчислення й прийняття керуючих рішень − цифровими. ЦАП і АЦП є важливою частиною технологій, що стали доступними й широко поширилися в епоху цифрової революції. Підвищення точності, швидкодії, енергоефективності, надійності та інших параметрів сучасних АЦП та ЦАП є важливою метою.

Слід зазначити, що для побудови ЦАП можна використовувати різні підходи щодо структурно-схемної реалізації [1−5]. Найбільш класичний тип: розрядно-зважені ЦАП на базі резистивних матриць (з формуванням розрядно-зважених струмів), конденсаторних матриць (з формуванням розрядно-зважених електричних розрядів), подільників струмів з наступним підсумовуванням розрядно-зважених компонентів. Важливо відзначити, що оскільки більша чисто паразитних параметрів інтегральних схем являє собою ємності, то застосування принципів підсилення і перетворення струмів має перевагу порівняно з принципом перетворення і підсилення напруг [1, 2, 5] і тому ЦАП з виходом по струму широко розповсюджені в сучасну епоху. Також значні переваги має використання надлишкових систем числення для ваг розрядів ЦАП [6,7]. Використання надлишкових систем числення дозволяє уникнути розривів в характеристиці перетворення ЦАП. Також використання надлишкових систем числення дозволяє здійснювати процедуру самокорекції ваг розрядів, завдяки чому похибка ваг розрядів лінеаризується і відбувається значне покращення лінійності перетворювача. Також для струмових ЦАП мають значення такі компоненти, як ППС

[1, 2, 8]. ППС можуть використовуватися для покращення навантажувальної здатності ЦАП, а також для додаткового підсилення сигналу в вихідних каналах. Вказані підходи є недостатньо розробленими, тому вивчення принципів побудови багаторозрядних ЦАП з ваговою надлишковістю та виходом по струму, є надзвичайно важливим.

Питанням побудови ЦАП, зокрема, багаторозрядних, присвячено багато наукових праць. Водночас, базовими можна вважати [1 − 5, 9]. Варто зазначити, що часто ЦАП є складовою частиною аналого-цифрових перетворювачів (АЦП). Від статичних і динамічних параметрів ЦАП істотно залежать аналогічні параметри АЦП. Зауважимо, що час перетворення АЦП порозрядного врівноваження можна істотно скоротити (на порядок), якщо використовувати ЦАП із ваговою надлишковістю у вигляді надлишкових позиційних систем числення (НПСЧ) [7]. Водночас, наукова спільнота недостатньо ознаймлена із цим напрямом, що і зумовлює актуальність обраної теми досліджень.

Отже, метою дослідження є розроблення методу побудови багаторозрядного ЦАП із виходом по струму, високою навантажувальною здатністю та відсутності розривів в характеристиці кодування, що уможливлює застосування такого ЦАП у системах реєстрації аналогових сигналів.

Розв’язання задач досліджень

Струмові ЦАП можуть будуватися на основі резистивних матриць та генераторів розрядних струмів [1 − 4]. Такі генератори легко реалізуються на основі біполярної технології. Схема струмового ЦАП на основі генераторів зважених струмів зображена на рис 1.

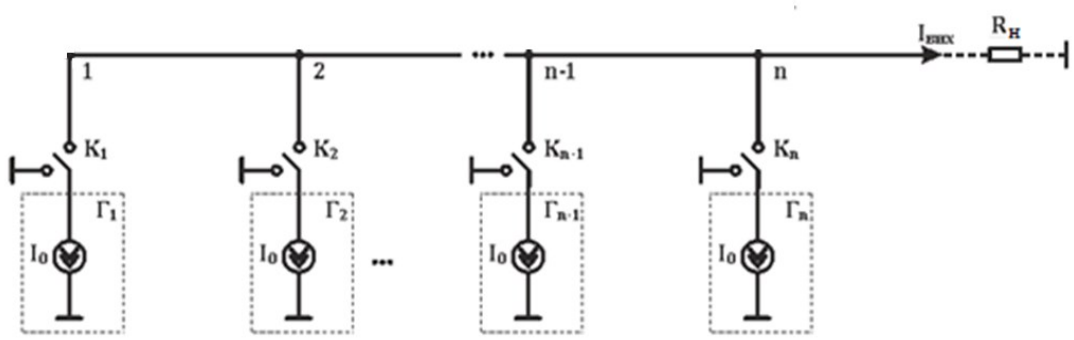


Рис. 1. Струмовий ЦАП на основі генераторів зважених розрядних струмів

Резистивна матриця використовується в генераторах зважених струмів і на рисунку не зображена.

Схема включає в себе n генераторів зважених розрядних струмів $Г_1$, ..., $Г_n$. Виходи генераторів $Г_1$, ..., $Г_n$ за допомогою ключів $К_1$, ..., $К_n$ керованих вхідним цифровим кодом підключаються (або відключаються) до виходу схеми. Сумарний вихідний сигнал формується на виході схеми. Розрядні струми в цій схемі різні і це буде вносити похибку. Для її компенсації біполярні транзистори, що входять до складу генераторів розрядних струмів в старших розрядах включаються паралельно в такій кількості, щоб через кожен з них протікав струм рівний струму молодшого розряду, або площі емітерів транзисторів повинні пропорційно збільшуватися для забезпечення такої ж щільності струму, як в емітері транзистора молодшого розряду, все це складно піддається реалізації для ЦАП високої розрядності. Також складно реалізувати для ЦАП високої розрядності великий діапазон номіналів резисторів при використанні двійковозважених резисторів. Цю проблему можна розв’язати, використовуючи матрицю типу R-2R, але проблема з необхідністю збільшення площі емітерів відповідних транзисторів залишається.

Низки недоліків, властивих ЦАП на основі генераторів зважених струмів, позбавлена схема, зображена на рис. 2. У ній резистивна матриця використовується як дільник однакових розрядних струмів.

Схема містить *n* генераторів розрядних струмів $Г_1$, ..., $Г_n$. Виходи генераторів $Г_1$, ..., $Г_n$ за допомогою ключів $К_1$, ..., $К_n$ керованих вхідним цифровим кодом підключаються (або відключаються) до вузлів резистивної матриці 1, …, *n*. Сумарний вихідний сигнал формується на виході резистивної матриці. Оскільки генератори розрядних струмів однакові, це виключає звязані з цим похибки характерні для попередньої схеми. Також в силу того, що всі транзистори однакові, скорочується площа, яку вони займають на кристалі. Але під час роботи такого ЦАП потенціали у вузлах резистивної матриці і відповідно напруги на виходах генераторів розрядних струмів $Г_1$, ..., $Г_n$ будуть змінюватися. Внаслідок цього буде з'являтися струм похибки через внутрішній опір генераторів струмів і буде з'являтися похибка ваг розрядів, що порушує принцип їх суперпозиції і обмежує точність ЦАП.

ISSN 2219-9365

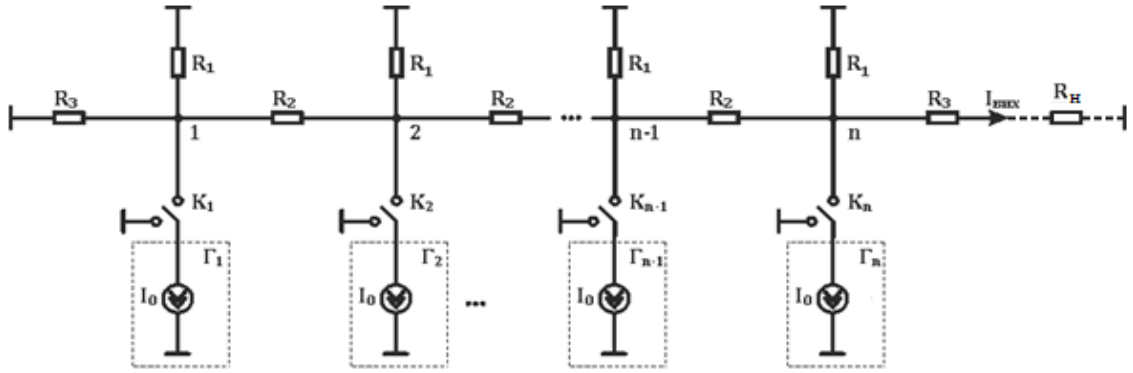


Рис. 2. Струмовий ЦАП на основі генераторів однакових розрядних струмів із використанням резистивної матриці в якості дільника струмів

Значення відносної похибки вихідного струму такого ЦАП буде дорівнювати:

$$\delta I_{ВИХ} = \frac{\Delta I_{ВИХ}}{I_{МЗР}} = \frac{2^n}{3} \cdot \frac{R}{r_Г} \cdot \sum_{j=0}^{n-1} \left(\frac{a_j}{2^{n-1-j}} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} \frac{a_i}{2^{|i-j|}} \right) \quad (1)$$

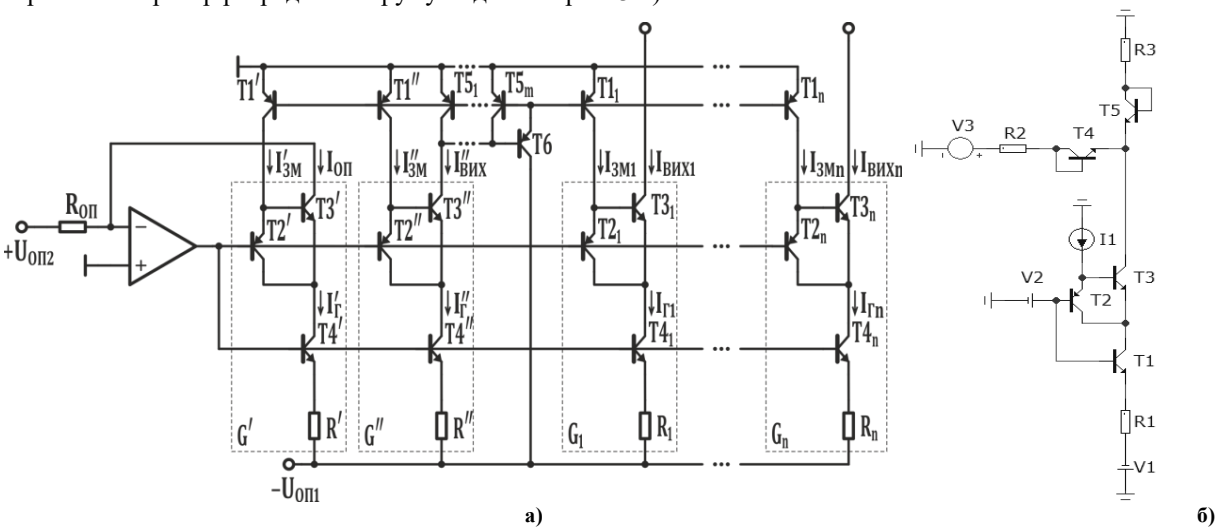
де $\{a_0, a_1, \ldots a_n\}$ – вхідний цифровий код;

R – деякий базовий номінал резисторів матриці;

$r_Г$, – внутрішній опір генератора розрядного струму;

$I_{МЗР}$ – величина кванту молодшого розряду.

Під час використання найпростіших генераторів однакових розрядних струмів мінімально можливе співвідношення ($R/r_Г$) досягає величини 10^{-3}-10^{-4}, і, отже, максимально досяжна розрядність такого ЦАП становитиме 9…12 розрядів. Для зменшення похибки суперпозиції ваг розрядів ЦАП із підсумовуванням однаково струмів у вузлах резистивної матриці [8] було запропоновано створення генераторів однакових розрядних струмів із високим вихідним опором. Один із варіантів схеми такого ЦАП представлено на рис. 3 а), окремий генератор розрядного струму подано на рис. 3 б).



а) **б)**

Рис. 3: а) ЦАП з генераторами однакових розрядних струмів зі струмами зміщення;
б) окремий генератор розрядного струму

Схема окремого генератора струму на рис. 3 б) містить первинний генератор струму на транзисторі T1 і резисторі R1 і вихідний каскад на транзисторах T2 і T3 і джерело струму I1, що задає струм зміщення для транзистора T2. Вихідний струм генератора формується на колекторі транзистора T3. Якщо вихідна напруга збільшиться на du, тоді струм бази T3 зменшиться, а струм колектора T3 збільшиться на $du/r_{K(T3)}$. Оскільки струм емітера транзистора T2 $I_{E(T2)}=I_{ЗМ}–I_{Б(T3)}$, то він і відповідно струм колектора T2 також збільшиться на $du/r_{K(T3)}$. Також оскільки струм емітера T3 $I_{E(T3)}=I_Г–I_{K(T2)}$, то також він і відповідно струм колектора T3 зменшиться на $du/r_{K(T3)}$, тобто в першому наближенні зміна вихідного струму внаслідок зміни вихідної напруги компенсується. Тут r_K – диференційний опір колектора транзистора в режимі з загальною базою.

У роботах [6, 7] широко досліджуються методи використання вагової надлишковості при АЦП та ЦАП.

Надлишкові системи числення – це системи з набором ваг розрядів $\{Q_0, Q_1, ..., Q_i, ...\}$, якщо значення розряду належить множині $\{0, 1\}$, то для *i*-го розряду виконується умова:

$$Q_i < \sum_{j=0}^{i-1} Q_j \,. \tag{2}$$

Відносне значення надлишковості і-го розряду такої системи числення буде визначатися виразом:

$$\delta Q_i = \frac{\sum_{j=0}^{i-1} Q_j - Q_i}{Q_i} = \frac{-\alpha^{i+1} + 2\cdot\alpha^i - 1}{\alpha^i \cdot (\alpha - 1)} \approx \frac{2-\alpha}{\alpha - 1} \,. \tag{3}$$

Швидкодія АЦП на основі надлишкових позиційних систем числення (НПСЧ) може бути істотно збільшена завдяки витраті частини надмірності ваг розрядів на автокомпенсацію динамічних похибок із сигналу, що компенсує (з виходу компенсуючого ЦАП) [7].

Наявність при аналого-цифровому перетворенні динамічних похибок може призвести до появи розривів кодувальної характеристики, інакше кажучи наприкінці врівноважування похибка недовстановлення повинна бути менше половини молодшого розряду [7]:

$$\Delta_g\left(t_{np}\right) = \left| A_{BX} - \sum_{i=0}^{N} Q_i\left(t - t_i\right) \right| \le q/2 \,, \tag{4}$$

де Δ_g – динамічна похибка квантування;

$Q_i(t - t_i)$ – вага *i*-го розряду;

$t_{np} = \Delta t \cdot N$ – загальний час перетворення;

Δt – тривалість такту зрівноважування.

Похибка на кожному з тактів врівноваження може привести до невключення необхідного розряду або до помилкового включення розряду, що перевищує по своїй вазі нескомпенсований сигнал. У АЦП на основі двійкової системи числення зазначені помилки не можуть бути скомпенсовані на наступних тактах зрівноважування, що приводить до похибок врівноважування та проявляються в розривах передатної характеристики.

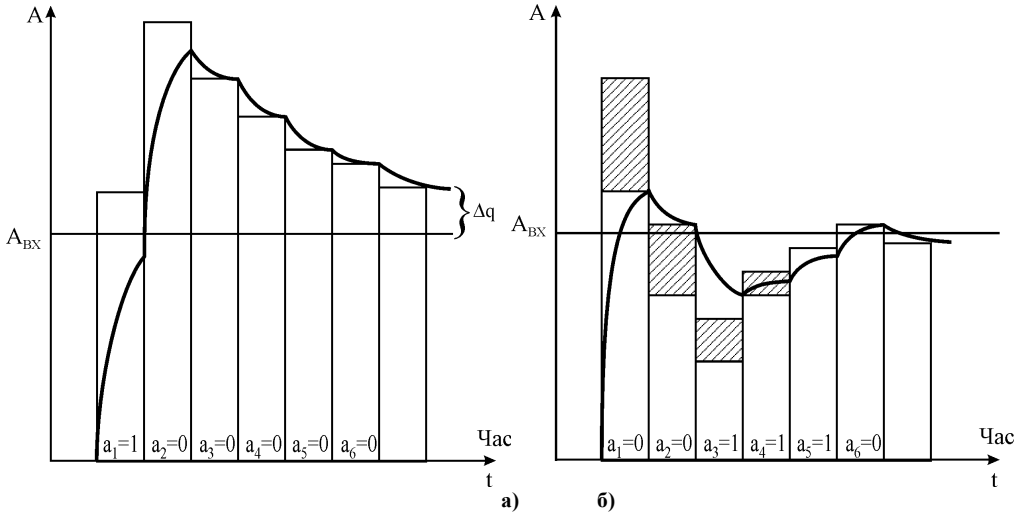
В АЦП на основі НПСЧ поява помилок типу «невключення» розряду компенсується на наступних тактах перетворення за рахунок включення групи більш молодших розрядів. Усунення похибок через помилкове включення *i*-го розряду може бути досягнуто введенням додаткового аналогового сигналу $Q_{доп.i}$, що вмикається на час такту порівняння. При цьому відбувається «форсування» перехідних процесів і відпадає потреба домагатися точного встановлення сигналу, що компенсує.

На рис. 4 а) і рис. 4 б) наведено ілюстрацію перехідних процесів на виході схеми порівняння. Причому показано виникнення похибки квантування через помилкове включення розряду в АЦП, що функціонує за класичним принципом порозрядного наближення. На рис. 4 б) наведено функціонування АЦП на основі НПСЧ за модифікованим способом й використанням додаткового аналогового сигналу. Значенню додаткового сигналу $Q_{доп}$ відповідає заштрихована ділянка на рис. 4 б). З наведених рисунків видно, що введення додаткового аналогового сигналу запобігає неправильному включенню старшого розряду. Аналого-цифрове перетворення в другому випадку було виконано правильно, незважаючи на наявність значних динамічних похибок. Оптимальне значення додаткового сигналу для коду «золотої» пропорції на кожному такті зрівноважування дорівнює:

$$Q_{доп.i} = Q_i \cdot \alpha^{-1}/2 \approx 0.3 \cdot Q_i \,. \tag{5}$$

Варто зазначити, що описаний модифікований спосіб порозрядного наближення є простим у технічній реалізації. Для формування $Q_{доп.i}$ використовуються молодші стосовно *i*-го розряду основного ЦАП, що підключають за допомогою трохи зміненого регістра послідовного наближення. Отже, для збільшення швидкодії потрібно змінити тільки алгоритм роботи цифрової частини АЦП. Граничне значення динамічної похибки, компенсоване в модифікованому способі для НПСЧ на основі «золотої» пропорції,

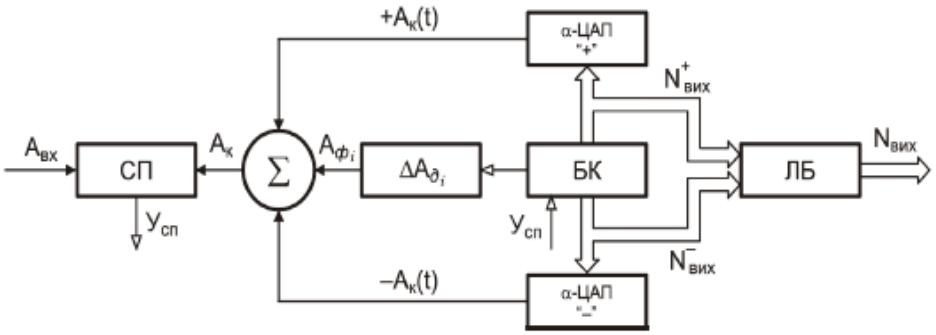
становить $\alpha^{-3}\approx 0{,}236$ (23,6%) від ваги розряду. При експонентному перехідному процесі тривалість такту перетворення при цьому становить $1{,}5\tau$. Для порівняння: у двійковому 16-ти розрядному АЦП тривалість такту не повинна бути менше 12τ. Виграш у швидкодії з урахуванням подовження розрядної сітки становить 5,3 рази.



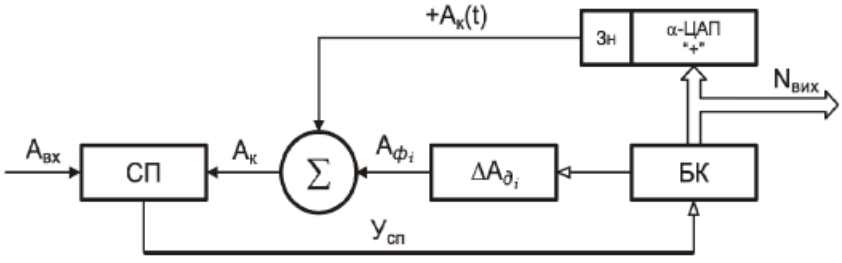
а) **б)**

Рис. 4. Перехідні процеси: а) в АЦП послідовного наближення на основі двійкової СЧ; б) в АЦП послідовного наближення на основі НПСЧ

Таким чином, в АЦП на основі НПСЧ, що функціонує за модифікованим способом порозрядного наближення, вдається, незважаючи на подовження розрядної сітки, істотно збільшити швидкодію.



а)



б)

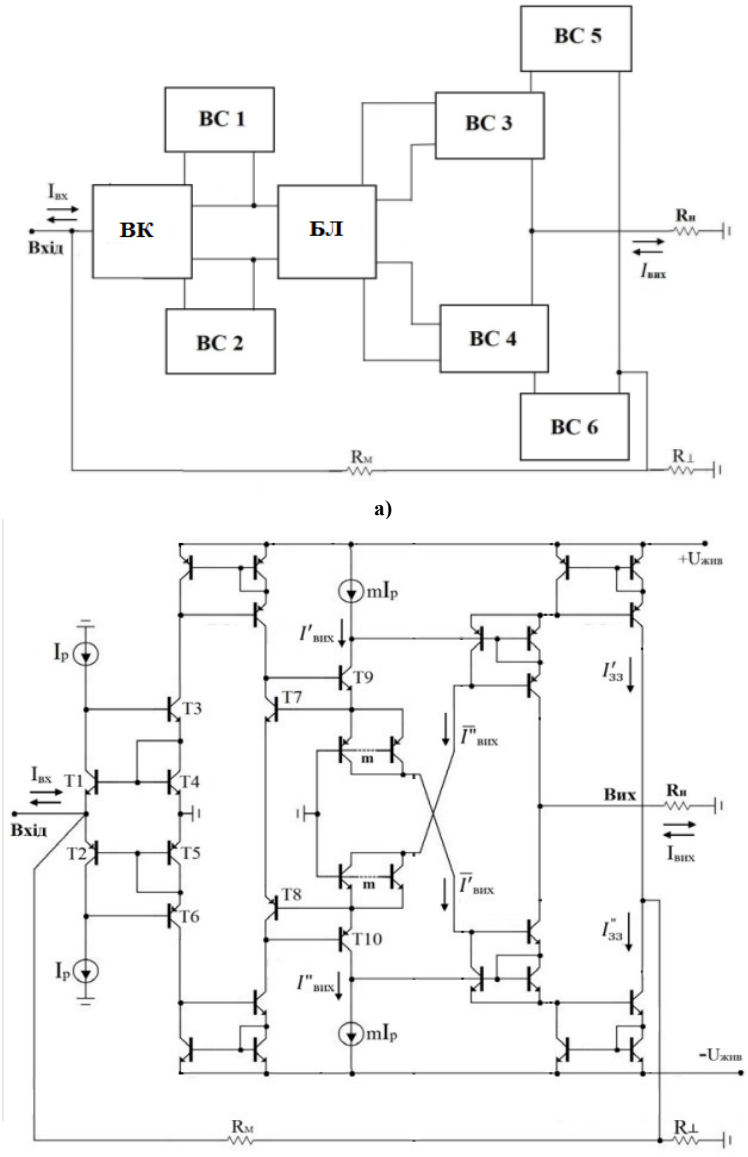
Рис. 5. Структурні схеми АЦП, що реалізують алгоритми прискореного врівноваження: а) на основі НПСЧ (1,-1); б) на основі НПСЧ (1,0)

Структурну схему АЦП на основі НПСЧ (1, -1), що реалізує прискорене форсоване врівноваження, наведено на рис. 5 а), де: СП − схема порівняння, «Σ» − суматор аналогових сигналів; $\Delta A_{ДІ}$ − генератор аналогових сигналів, що форсують ; ЛБ – логічний блок для формування вихідного коду $N_{ВИХ}$; БК − блок керування, що забезпечує функціонування пристрою. В окремому випадку генератор $\Delta A_{ДІ}$ може бути відсутнім. Його роль можуть виконувати цифро-аналогові перетворювачі α-ЦАП «+» і α-ЦАП «–». Ця обставина зумовлена тим, що процес перетворення здійснюється від старших розрядів до молодших. При

цьому, поки йде формування коду результату $N_{ВИХ}$ у старших розрядах, молодші «незайняті» розряди можуть використовуватися для генерування $\Delta A_{ДІ}$.

Можливості розглянутих способів збільшення швидкодії можуть бути досягнуті тільки з урахуванням ряду факторів, пов'язаних з динамічними характеристиками ЦАП і схеми порівняння. У реальних пристроях перехідні процеси відбуваються складніше: позначаються затримки включення розрядів, комутаційні перешкоди, перерегулювання, «затягування» і т. п. Вплив зазначених ефектів може бути зменшене за рахунок переходу на струмовий принцип побудови пристрою квантування й розробкою відповідних схемних рішень [1, 2].

Разом із тим, такий струмовий ЦАП має недолік, який полягає в тому, що його вихідний опір становить лише R, де R – деякий базовий номінал резисторів матриці. Для усунення цього недоліка пропонується використовувати [10, 11] високолінійні двотактні підсилювачі-масштабатор струму (ДПМС) на біполярних транзисторах. Фунціональну та принципову схеми такого підсилювача зображено на рис. 6.



а)

б)

Рис. 6. Високолінійний двотактний підсилювачі-масштабатор струму на біполярних транзисторах: а) фунціональна схема; б) принципова схема

У ДПМС застосовується двотактний принцип підсилення струмів, що забезпечує покращення лінійності передатної характеристики. Він складається зі вхідного каскаду (ВК), зібраного на транзисторах Т1—Т6, а також балансиру з чотирма виходами (БЛ), складеного на транзисторах Т7—Т10 двох груп з *n-p-n* і *p-n-p* транзисторів, що разом з Т7 і Т8 утворюють внутрішній балансний зворотний зв'язок. На виходах балансира формуються прямі та інверсні струми, які надходять на входи ВС блока формування струмів зворотного зв'язку $I_{ЗЗ}$, та вихідного струму $I_{ВИХ}$. Варто зазначити, що відбивачі струму ВС2 і ВС3, на

виходах яких формується Івих, включено послідовно з ВС1 і ВС4, на виходах яких генерується струм зворотного зв'язку $I_{ЗЗ}$, який в свою чергу подається на дільник струму, зібраний на резисторах $R_{\perp}$ і R_M. Така конфігурація дозволяє істотно (на порядки) збільшити вихідний опір ДПМС.

Визначимо деякі показники ДПМС, зокрема, малосигнальний коефіцієнт передачі струму $K_{пі}$ зі входу на вихід, враховуючи, що зазвичай $K_i >> 1$:

$$K_{ni} = \frac{I_{BX}}{I_{ВИХ}} = \frac{K_i}{1 + K_{ЗЗ} \cdot K_i} \approx \frac{R_M + R_{\perp}}{R_{\perp}} \tag{6}$$

де K_i – коефіцієнт підсилення струму ДПМС у разі розірваної петлі зворотного зв'язку.

Треба створити умови однонаправленості зворотного зв'язку, принаймні виконання нерівності $R_M > R_{вх}$, де $R_{вх}$ – максимальний вхідний опір ДПМС.

$$R_{BX} = 2\frac{\beta_1 \cdot \beta_2}{\beta_1 + \beta_2} \cdot \frac{r_{e1} \cdot r_{e2}}{r_{e1} + r_{e2}} \tag{7}$$

де r_{e1}, r_{e2} – малосигнальні емітерні опори;

β_1 і β_2 – коефіцієнтами передачі колекторного струму npn та pnp транзисторів.

Малосигнальний вихідний опір схеми $R_{вих}$ ДПМС, залежить як від вихідних опорів ВС2 і ВС3 так, і глибини зворотного зв'язку. Оскільки струмовий зворотний зв'язок істотно збільшує вихідний опір, то буде:

$$R_{ВИХ} = \frac{r_{k1} \cdot r_{k2}}{r_{k1} + r_{k2}} \cdot \left(1 + K_i \cdot \frac{R_{\perp}}{R_M + R_{\perp}}\right) \tag{8}$$

де r_{K1}, r_{K2} – диференційні опори колекторів транзисторів в режимі з загальною базою.

Для оцінювання вихідного опору ДПМС доцільно здійснити комп'ютерне моделювання, зокрема, із застосованих інтегрованих пакетів схемо технічного аналізу MicroCap 11. При цьому значення $R_{ВИХ}$ доцільно здійснити через амплітудно-частотну характеристику. Робочий струм зміщення $I_Р$=1.0мА, напруги живлення $U_Ж$=10В, використовуються інтегральні транзистори *npn* - NUHFARRY та *pnp* - PUHFARRY. Вихідний опір для схеми, виходячи з АЧХ, що наведена на рис. 7, дорівнює ≈1.54ГОм.

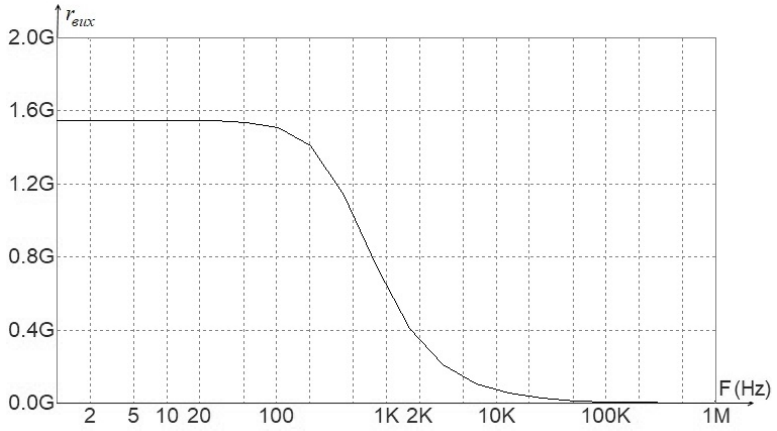


Рис. 7. АЧХ для схеми ДПМС

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. Проаналізовано методи побудови багаторозрядних струмових ЦАП на базі генераторів зважених та однакових розрядних струмів, показані переваги ЦАП на базі генераторів однакових струмів і запропоновані методи зменшення похибки суперпозиції ваг розрядів в них.

2. Проаналізовано методи використання надлишковості в багаторозрядних струмових ЦАП для швидкодії АЦП порозрядного врівноваження, до складу яких вони входять, запропонована структурна схема АЦП прискореного врівноваження.

3. Проаналізовано методи використання двотактних підсилювачів постійного струму (ДППС) зі зворотнім зв'язком по струму для підвищення навантажувальної здатності ЦАП із виходом по струму (вихідного опору ЦАП), показано задовільні вихідні характеристики вказаних схем ($R_{ВИХ}$≈1.54ГОм).

Література

1. Alan B. Grebene. Analogue Integrated Circuit Design (Microelectronics series). R. E. Krieger Publishing Company, 1978. 401 p.

2. Alan B. Grebene. Bipolar and MOS Analog Integrated Circuit Design. Wiley Classics library. 2003. P. 437−443.

3. W. Kester. Data Conversion Handbook (Analog Devices). Analog Devices Inc. Engineeri. Newnes; 1st edition. December 16, 2004. 976 p. ISBN-10: 0750678410. ISBN-13: 978-0750678414.

4. Walt Kester. Data Conversion Handbook (with the technical staff of Analog Devices). A Volume in the Analog Devices Series. Newnes is an imprint of Elsevier30 Corporate Drive, Suite 400, Burlington, MA 01803, USALinacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, UK. ISBN: 0-7506-7841-0.

5. D. Kress, The Spectrum of Current Sensing: From DC to Light. 2014. URL : https://www.analog.com/en/education/education-library/webcasts/the-spectrum-of-current-sensing.html (Дата звернення 29.07.2022 р.).

6. Patent № 2091507 A GB, IPC H03K 13/02. Analog-to-digital converter [Text] / A. P. Stakhov, A. D. Azarov, V. A. Luzhetsky (USSR). - № 19820004360; filed 28.07.1980; issued 28.07.1982.

7. Азаров О. Д. Аналого-цифрове порозрядне перетворення на основі надлишкових систем числення з ваговою надлишковістю: монографія / Азаров О. Д. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 231 с. ISBN 966-641-089-9.

8. Азаров О., Обертюх М. Генератори однакових струмів із високими вихідними опорами для багаторозрядних ЦАП. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2019. Т. 3. № 46. С. 33 −39. DOI: 10.31649/1999-9941-2019-46-3-28-38

9. J. Graham, J. Tobey, L. Hulsman. Operational Amplifiers; Design and Applications. McGraw-Hill; First Edition (June 1, 1971). 512 p. ISBN-10: 0070649170. ISBN-13: 978-0070649170.

10. Азаров О., Генеральницький Є., Фігас Г. Високолінійні двотактні масштабатори - перетворювачі струмів на базі високоомних струмових дзеркал. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія.* № 3. 2021. С. 60-69. URL: https://doi.org/10.31649/1999-9941-2021-52-3-60-69. (Дата звернення 13.04.22).

11. Азаров О. Д., Генеральницький Є. Високолінійний двотактний підсилювач-масштабатор струму на біполярних транзисторах із заземленим навантаженням. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. №5. С. 55 − 61. 2019. ISSN 1997-9266. https://doi.org/10.31649/1997-9266-2019-146-5-55-61

References

1. Alan B. Grebene. Analogue Integrated Circuit Design (Microelectronics series). R. E. Krieger Publishing Company, 1978. 401 p.

2. Alan B. Grebene. Bipolar and MOS Analog Integrated Circuit Design. Wiley Classics library. 2003. P. 437−443.

3. W. Kester. Data Conversion Handbook (Analog Devices). Analog Devices Inc. Engineeri. Newnes; 1st edition. December 16, 2004. 976 p. ISBN-10: 0750678410. ISBN-13: 978-0750678414.

4. Walt Kester. Data Conversion Handbook (with the technical staff of Analog Devices). A Volume in the Analog Devices Series. Newnes is an imprint of Elsevier30 Corporate Drive, Suite 400, Burlington, MA 01803, USALinacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, UK. ISBN: 0-7506-7841-0.

5. D. Kress, The Spectrum of Current Sensing: From DC to Light. 2014. URL : https://www.analog.com/en/education/education-library/webcasts/the-spectrum-of-current-sensing.html (Data zvernen¬nia 29.07.2022 r.).

6. Patent № 2091507 A GB, IPC H03K 13/02. Analog-to-digital converter [Text] / A. P. Stakhov, A. D. Azarov, V. A. Luzhetsky (USSR). - № 19820004360; filed 28.07.1980; issued 28.07.1982.

7. Azarov O. D. Analoho-tsyfrove porozriadne peretvorennia na osnovi nadlyshkovykh system chyslennia z vahovoiu nadlyshkovistiu: monohrafiia / Azarov O. D. – Vinnytsia: VNTU, 2010. – 231 s. ISBN 966-641-089-9.

8. Azarov O., Obertiukh M. Heneratory odnakovykh strumiv iz vysokymy vykhidnymy oporamy dlia bahatorozriadnykh TsAP. Informatsiini tekhnolohii ta kompiuterna inzheneriia. 2019. T. 3. № 46. S. 33 −39. DOI: 10.31649/1999-9941-2019-46-3-28-38

9. J. Graham, J. Tobey, L. Hulsman. Operational Amplifiers; Design and Applications. McGraw-Hill; First Edition (June 1, 1971). 512 p. ISBN-10: 0070649170. ISBN-13: 978-0070649170.

10. Azarov O., Heneralnytskyi Ye., Fihas H. Vysokoliniini dvotaktni masshtabatory - peretvoriuvachi strumiv na bazi vysokoomnykh strumovykh dzerkal. Informatsiini tekhnolohii ta kompiuterna inzheneriia. № 3. 2021. S. 60-69. URL: https://doi.org/10.31649/1999-9941-2021-52-3-60-69. (Data zvernennia 13.04.22).

11. Azarov O. D., Heneralnytskyi Ye. Vysokoliniinyi dvotaktnyi pidsyliuvach-masshtabator strumu na bipoliarnykh tranzystorakh iz zazemlenym navantazhenniam. Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. №5. S. 55 − 61. 2019. ISSN 1997-9266. https://doi.org/10.31649/1997-9266-2019-146-5-55-61

ISSN 2219-9365

За зміст повідомлень редакція відповідальності не несе

Підп. до друку 30.06.2022. Ум. друк. арк. – 12,88. Обл.-вид. арк. – 11,36.
Формат 30×42/4, папір офсетний. Друк різографією.
Наклад 100, зам. № 014/22

Тиражування здійснено з оригінал-макета редакційно-видавничим відділом
Хмельницького національного університету.
29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1, тел. (0382) 77-33-63.
Свідоцтво про внесення в Державний реєстр, серія ДК № 4489 від 18.02.2013 р.