

ПРОФЕСОРУ БОРИСУ ІВАНОВИЧУ МОКІНУ – 80 РОКІВ

3 січня 2023 року виповнилося 80 років від дня народження члена редколегії нашого журналу з дня його заснування Бориса Івановича Мокіна – Академіка Національної академії педагогічних наук України, Заслуженого діяча науки і техніки України, доктора технічних наук, професора.



Борис Іванович працює у Вінницького національного технічного університеті (ВНТУ) з 1971 року на посадах асистента, старшого викладача, доцента, завідувача кафедри, проректора. У 1989 року обраний колективом університету на посаду ректора і очолював його по 2010 рік. За його керівництва Вінницький політехнічний інститут у 1994 році отримав статус Вінницького державного технічного університету, а у 2003 році – статус Вінницького національного технічного університету. На сьогодні Б. І. Мокін є професором кафедри системного аналізу та інформаційних технологій ВНТУ.

Успішно працює створена й керована ним наукова школа за напрямом «Розробка математичних моделей процесів, що протікають в енергетичних та екологічних системах, інформаційно-вимірювальних систем та систем автоматичного і автоматизованого керування цими процесами». Як науковий керівник, Борис Іванович підготував 5 докторів, 31 кандидата наук і 3 докторів філософії за галузями «Інформаційні технології» і «Електрична інженерія» та сприяв підготовці багатьох дисертацій, які представлялись і представляються до захисту науковцями університету. Його учні й послідовники успішно працюють як в університеті, так і за його межами.

Професор Б. І. Мокін є одноосібним автором або співавтором більше 70 винаходів та понад 400 наукових праць, у т. ч. 23 монографії та 11 навчальних посібників, опублікованих видавництвами України, Литви, Естонії, Білорусі, Польщі, Бельгії, Італії, Австрії, Хорватії, Фінляндії. На виставках винаходів в Ясах (Румунія) та Будапешті (Угорщина), які організовувались Всесвітньою федерацією винахідницьких асоціацій (IFIA) у 1994, 1996, 2000 та 2002 роках, винаходи, зроблені під керівництвом Б. І. Мокіна, були удостоєні Золотих медалей. За внесок у розвиток винахідницької діяльності Б. І. Мокіну у 1988 р. присвоєне звання «Заслужений винахідник СРСР», а у 2002 році він нагороджений Почесною золотою медаллю Генрі Коанда.

Б. І. Мокін представляв Україну, виступаючи з доповідями на Всесвітніх конгресах: в 1994 році – в Турині, в 1997 році – в Тампері, в 2000 році – у Відні на XIII, XIV та XVI конгресах ІМЕКО, а також в 1999 році – в Брюсселі на Всесвітньому конгресі ректорів університетів країн – членів ЮНЕСКО.

За досягнення в науковій та науково-методичній діяльності Мокін Б. І. у 1987 році став лауреатом третьої, а в 1990 році – першої премії Мінвузу УРСР. В 1992 році він обраний академіком Академії педагогічних наук України. У 1995 році Президентом України йому присвоєне почесне звання Заслужений діяч науки і техніки України.

Б. І. Мокін є головним редактором наукового журналу «Вісник Вінницького політехнічного інституту» з моменту його заснування (1993 р.). Журнал входить до Переліку фахових видань України у галузі технічних наук (категорія Б) за 32 спеціальностями.

Академік Б. І. Мокін визнаний одним з кращих освітян України у 1999 році і удостоєний премії «Засвіти вогонь», а в 2000 році нагороджений Орденом «За заслуги» III ступеня.

Б. І. Мокін відомий не лише науковими працями, але й 14 історико-публіцистичними книгами, за перші 10 з яких президія Національної спілки журналістів України нагородила його Золотою медаллю української журналістики. Відомий Б. І. Мокін і як політик – він був народним депутатом Верховної Ради УРСР 12-го скликання і Верховної Ради України 1-го скликання, а проголосувавши і за Декларацію про суверенітет у 1990 році і за Акт про незалежність України у 1991 році він увійшов до когорти засновників незалежної української держави.

Борис Іванович користується заслуженим авторитетом і глибокою повагою у колективі ВНТУ. Редколегія журналу «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія» щиро бажає ювіляру міцного здоров'я, щастя, успіхів у роботі, звершення всіх задуманих планів та ідей.

Редколегія журналу «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія»

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ТЕОРІЯ КОДУВАННЯ

УДК 004.4

А. О. Азарова, Д. С. Щур

ПОБУДОВА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ
АУДИОЛОКАЦІЇ ЗАГРОЗ

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Анотація. У статті розглянуто процес побудови системи пошуку напрямку джерела звуку із використанням методу кінцевих різниць для оброблення оцифрованих даних звукових сигналів. Здійснено модифікацію методу кінцевих різниць шляхом використання взаємно кореляційної функції, яка спрощує оброблення оцифрованого сигналу за рахунок покращення алгоритму розрахунку і переходу від диференційного до числового формату вхідних даних, що значно зменшує кількість розрахунків та спрощує їх. Запропоновано статистичне оброблення отриманих результатів для зменшення похибки пошуку абсолютного кута до програмно відтвореного джерела звуку. Було розроблено ПЗ, що уможливило комп'ютерну реалізацію системи аудіолокації на базі принципів об'єктно-орієнтованого програмування, що використовує оцифровані дані сигналів для розрахунків і моделювання результатів роботи алгоритму. Створення програми відбувалося на платформі ОС Windows у середовищі Windows Studio з дотриманням парадигм об'єктно-орієнтованого програмування. Застосування авторами модифікованого алгоритму у процесі програмної реалізації звукометричної системи дозволило проаналізувати роботу методу та розробити конфігурації приймачів, які дозволяють підвищити точність результатів. Експериментальні (лабораторні) дослідження розробленої системи за умови використання обґрунтованої авторами конфігурації та статистично оброблених даних дозволили отримати результати пошуку напрямку до джерела звуку, що мають похибку менше 1°. Основним науковим результатом проведеного дослідження є удосконалення алгоритмів оброблення даних аудіолокаційного пошуку, що, на відміну від існуючих підходів, дозволяє на основі застосування взаємно кореляційної функції та подальшого її математичного коригування підвищити точність такого процесу. Практична цінність отриманих результатів полягає в легкій адаптації розробленої та протестованої в лабораторних умовах звукометричної системи для роботи у військових польових умовах.

Ключові слова: звукометрична система, аудіолокація, метод кінцевих різниць, взаємно кореляційна функція, кореляція, абсолютний кут, джерело звуку, дисперсія.

Abstract. The article discusses the process of building a system for finding the direction of a sound source using the finite difference method for processing digitized sound signal data. The finite difference method has been modified by using the cross-correlation function which simplifies the processing of the digitized signal due to the improvement of the calculation algorithm and the transition from the differential to the numerical format of the input data which significantly reduces the number of calculations and simplifies them. Statistical processing of the obtained results is proposed to reduce the error of finding the absolute angle to the software-generated sound source. The software was developed which enables the computer implementation of the audio location system based on the principles of object-oriented programming. It uses digitized signal data for calculations and modeling of the results of the algorithm. The program was created on the Windows OS platform in the Windows Studio environment in compliance with object-oriented programming paradigms. The use of the modified algorithm by the authors in the process of software implementation of the sound-metric system made it possible to analyze the operation of the method and develop receiver configurations that allow increasing the accuracy of the results. Experimental (laboratory) studies of the developed system under the condition of using a configuration justified by the authors and statistically processed data, made it possible to obtain results of searching the direction of the sound source with an error of less than 1°. The main scientific result of the conducted research is the improvement of data processing algorithms for audio-location search which, unlike existing approaches, allows to increase the accuracy of such a process based on the application of the mutual correlation function and its subsequent mathematical adjustment. The practical value of the obtained results is an easy adaptation of the sound-metric system developed and tested in laboratory conditions for operation in military field conditions.

Key words: audiometric system, audio location, finite difference method, cross-correlation function, correlation, absolute angle, sound source, dispersion.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-56-1-5-12>.

Вступ

Існують різні способи розвідки на місцевості, практично кожен з яких потребує мінімальної дистанції до досліджуваного об'єкту. Реалізація такого процесу здійснюється засобами аудіолокації, що полегшує та прискорює його. Вона представляє собою спеціальний спосіб розвідки, який часто використовують військові різних країн з метою визначення напрямку розташування джерела звуку.

Розпізнавання джерела звуку розкриває потужні можливості для ведення ефективних військових операцій та роботи правоохоронних органів. Аудіолокація (звукова розвідка) в поєднанні із системами безпеки дозволяють точно визначити місцезнаходження загрози, що, у свою чергу, уможливило мінімізацію потенційної шкоди для людини.

Серед провідних дослідників у галузі аудіолокації слід зазначити тих, хто стояли біля витоків цієї науки, зокрема, Бенуа М. А., Валлаха Г., Джеффреса Л., Маха Е., Ньюмена Е. Б., Стівенса С. С., Стретта Д. В., а також сучасних науковців: Бугайова М. В., Кочана Р. В., Крупельницького Л. В., Ніколайчука Я. М., Сяофей Лі, Трембача Р. Б., Хаман Мануеля, Хун'ян Сіна та ін. [1–11].

Зауважимо, що переважна більшість дослідників працювала над розпізнаванням напрямку звуку як процесу, що відбувається в мозку людини. Напрацьований досвід у цій площині був трансформований Лю Ц. із біологічної площини в апаратну: він розробив систему, що використовує мікрофони для пошуку джерел звуку. Висвітлення подальших досліджень у напрямку покращення чи використання процесу локалізації звуку в науковій літературі є слабким, оскільки вивченням цього процесу зайнялися відомі світові

корпорації, що співпрацюють із військовими, що, у свою чергу, спричинило засекречування таких розробок. Сьогодні вони надають лише готові до використання системи, які є дорогими та монолітними, що ускладнює їх експлуатацію та усунення несправностей.

Актуальність

У теперішній час існує чимало компаній, що спеціалізуються на військовому обладнанні, в тому числі й на виробництві та розробленні аудіолокаційних військових систем. Прикладами таких компаній є QinetiQ, Raytheon, Acoem-Metravib, Microflown Avisa, Ultra Electronics та ін. Разом із тим, розробки цих компаній не позбавлені численних недоліків, зокрема: зависока ціна, мала дальність ефективного використання (здебільшого до 400 м), складність систем та їх експлуатації, обслуговування обладнання і розміри унеможливають їх масове виробництво. Вище перелічені недоліки не дозволяють придбання та використання таких систем для вирішення важливих військових задач в різних країнах, зокрема й в Україні. Разом і тим, наша країна зараз конче потребує подібних систем, що дозволило б значно підвищити ефективність ведення бою та роботи українських розвідників.

Отже, актуальними є подальші дослідження у напрямку розроблення власної аудіолокаційної системи, яка позбавлена описаних вище недоліків.

Мета

Мета статті полягає в підвищенні точності аудіолокації загроз шляхом розроблення та застосування відповідної системи, що реалізує модифікований алгоритм із використанням взаємно кореляційного оброблення оцифрованих сигналів.

Задачі

1. Модифікувати та застосувати метод кінцевих різниць для підвищення точності процесу аудіолокації загроз.
2. Покращити метод за допомогою використання взаємно кореляційної функції.
3. Розробити конфігурації приймачів для системи аудіолокації.
4. Виконати статистичне коригування отриманих на базі складеної системи результатів.

Структурна будова системи аудіолокації загроз

Складовими елементами пропонованої авторами системи аудіолокації є:

- блок джерела звуку;
- блок приймача звуку;
- блок перетворювача аналогового сигналу на цифровий;
- блок оброблення даних;
- блок візуалізації результатів.

Блок джерела звуку є окремим елементом, що використовується для відтворення процесу надходження звуку. Він пов'язаний лише із блоком прийому сигналів даних, що передаються. Варто зазначити, що блок джерела звуку по суті не входить до складу аудіолокаційної системи, він належить до звукометричної системи взагалі, при цьому авторами системи здійснюється моделювання процесу надходження звуку з унікальною затримкою до певного приймача (із запропонованої конфігурації приймачів), а отже необхідно долучити джерело звуку до схеми програмної моделі звукометричної системи.

Блок приймача звуку опрацьовує звуковий сигнал, що надійшов від блоку джерела звуку, перетворює його на аналоговий та передає на блок аналогово-цифрового перетворювача, оскільки методи оброблення даних, що використовуються, передбачають роботу саме із цифровими сигналами.

Для спрощення розрахунків і прискорення оброблення сигналів було прийнято рішення моделювати передавання звуку в форматі оцифрованих даних, що дозволяє пропустити повторення перетворень звуку і прискорити процес аудіолокації. За польових умов випробовування системи ці чинники необхідно враховувати і використовувати АЦП.

Блок оброблення даних виконує процес розрахунку напрямку кута до джерела звуку шляхом використання покращеного методу кінцевих різниць, що буде подано нижче. У результаті обчислень отримаємо набори даних для кожного вхідного набору оцифрованих даних звукового сигналу, з яких визначається шуканий кут до джерела звуку. Отримані результати виводяться на пристрій виводу інформації, який в даному випадку був монітором пристрою, на якому проводились розрахунки.

Отже, структурну будову системи аудіолокації представлено на рис. 1.

Модифікація методу кінцевих різниць

Для визначення напрямку джерела звуку необхідно, використовуючи за основу оцифрований сигнал, розробити метод оброблення вхідних сигналів. Використані оцифровані дані сигналу являють собою файл із розширенням .Wav. Цей формат вирізняється серед інших тим, що дозволяє зберігати бітовий потік аудіосигналу. Якщо дослідити дані, що містяться у файлі, розкодувати їх та відобразити графічно фрагмент, то отримаємо такий сигнал, що використовувався для роботи (рис. 2).



Рисунок 1 – Структурна будова системи аудіолокації загроз

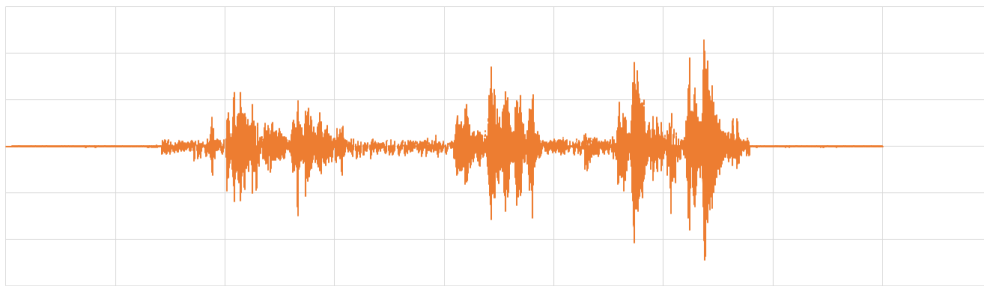


Рисунок 2 – Представлення сигналу з файлу

На базі вхідних даних розпочнемо розроблення системи, що моделює затримки в надходженні сигналів, у основу якої покладемо метод кінцевих різниць у часовій області. Використання цього методу було обрано через те, що традиційно локалізація джерела звуку потребує на використання диференційного числення, а даний метод, за умови алгебраїчного розв'язання диференційних систем рівнянь, дозволяє знайти шукані значення функції з меншими витратами часу.

Для виконання цих розрахунків необхідно:

- задати область розрахунків, сітку, граничні умови, які відповідають умові задачі і можуть бути поглинаючими або періодичними;
- задати джерело хвиль;
- згенерувати кінцеві в часі хвилі;
- перевести в частотне представлення отриманих значень.

Разом із тим, виходячи зі специфіки роботи з оцифрованим сигналом, автори пропонують здійснити певну модифікацію описаного методу. Лічильній області буде відповідати час, а граничні умови та сітка не використовуватимуться, оскільки програмна реалізація системи локалізації не використовуватиме стандартний метод кінцевих різниць, а його модифіковану під програмні розрахунки версію. Джерелом є файл із записаними значеннями. Оскільки файл містить у собі дані справжнього сигналу, то маємо кінцеву в часі хвилю. Розрахунок за допомогою використання перетворень Фур'є не використовуватиметься, натомість метод модифікується завдяки використанню взаємно корельованої функції (ВКФ) двох сигналів. Таким чином, алгоритм розрахунку фактично реалізує процес оброблення масивів вхідних даних.

Використання ВКФ двох сигналів для модифікації методу кінцевих різниць

Для проведення розрахунків процесу локалізації джерела звуку необхідно створити початкові вхідні умови. Оскільки ВКФ розраховується для двох сигналів, то алгоритм буде працювати лише за наявності двох вхідних наборів даних, що відповідають одному і тому ж звуковому сигналу, проте, які надійшли на різні два приймачі в конфігурації.

Промодельоємо процесу пошуку звуку, що йде від джерела до приймачів. У результаті отримаємо два набори даних. Графічно їх можна представити так, як зображено на рис. 3.

Із рис. 3 видно, що наявні 2 сигнали, що зміщені один щодо іншого. Оскільки в реальності один і той самий звук надходить до кожного із мікрофонів через певний час, то той мікрофон, що є ближчим до джерела звуку, і отримає сигнал раніше. Із рис. 3 також можна помітити, що графіки не є ідентичними, це результат штучної зміни даних, яка моделює певний ступінь зашумленості, так як в дійсності звукові сигнали, які отримують мікрофони, матимуть спотворення.

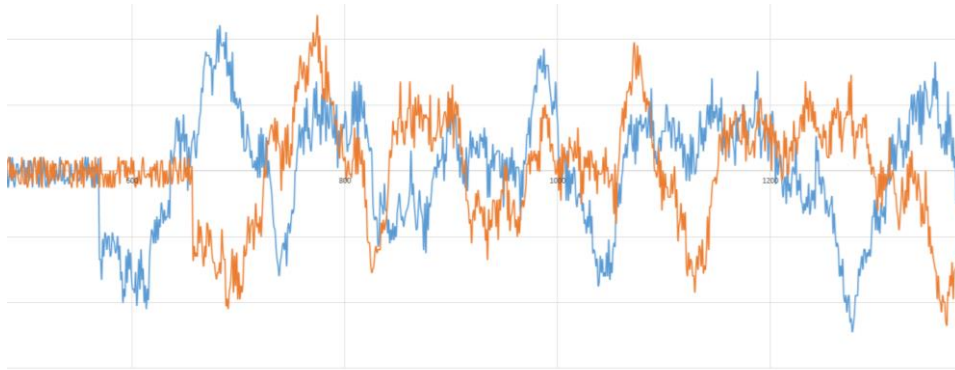


Рисунок 3 – Змодельовані сигнали, що надійшли на два мікрофони

Отже, застосуємо ВКФ для модифікації методу кінцевих різниць, що дозволяє запропонувати авторам статті систему аудіолокації загроз. Щоб визначити кореляцію сигналів, необхідно розрахувати результат значень $(x(t), y(t))$ при аргументах (t, t') . Використаємо для цього таку залежність

$$K_{xy}(t, t') = M[\dot{x}(t)\dot{y}(t')].$$

Знайшовши результат цієї залежності, отримаємо момент кореляції для (t, t') . Проте, для визначення результатів, що відповідають найбільшій кореляції, необхідно провести також розрахунок для $((t - n, t'), \dots, (t - 1, t'), (t + 1, t'), (t + 2, t'), \dots, (t + n, t'))$. Для пошуку n скористаємося залежністю

$$n = F \frac{l}{v},$$

де n – кількість необхідних елементів для розрахунку;

l – відстань між мікрофонами;

F – частота дискретизації приймачів;

v – швидкість поширення звуку у просторі.

Провести розрахунки потрібно для $2n$ випадків, оскільки зміщенням може бути як перший масив, так і другий, то потрібно перевірити кореляцію першого на основі другого n разів і перевірити кореляцію другого на основі першого n разів. Після розрахунку ВКФ отримаємо набір значень, що відображено на рис. 4.

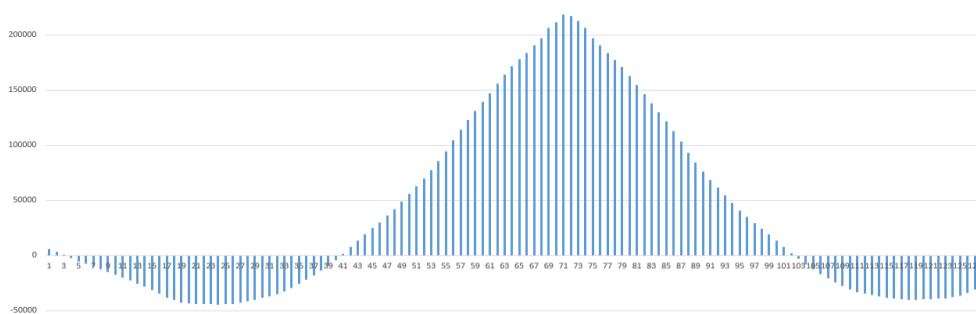


Рисунок 4 – Значення ВКФ для двох наборів даних

Отже, маємо графік із максимумом, що відповідає значенню 71, що і є шуканою величиною. На рис. 4 схематично зображено процес локалізації джерела звуку.

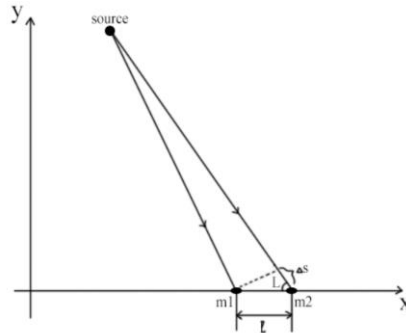


Рисунок 5 – Схематичне зображення процесу локалізації звуку

Із рис. 5 бачимо, що при надходженні звуку від джерела до приймачів m_1 та m_2 звук проходить різну відстань, знайдемо цю різницю так:

$$\Delta S = l \cdot \cos(\alpha).$$

Оскільки $\Delta S = vt$, а $t = T \cdot n$, де $T = \frac{1}{F_{discr}}$, то отримаємо таку залежність:

$$\cos(\alpha) = \frac{v \cdot n}{l \cdot F_{discr}},$$

де v – швидкість поширення звуку;

n – індекс найбільшого значення результуючого масиву;

l – дистанція між приймачами у парі;

F_{discr} – частота дискретизації.

Завдяки розрахованій вище залежності для косинуса і властивості арккосинуса $\cos(y) = x$ та, враховуючи, що $\arccos(x) = y$, знайдемо арккосинус кута.

Побудуємо 2 кола із центрами, яким відповідатимуть мікрофони із мікрофонної пари і визначимо координати можливих точок, що відповідатимуть напрямом до джерела звуку. Отримаємо 2 точки перетинів кіл. Через неоднорідність функції арккосинуса, позиція джерела відносно пари мікрофонів може суттєво впливати на точність розрахунків, наведених у табл.1.

Таблиця 1 – Неоднорідність функції арккосинуса

Зсув n	$\cos(a)$	a в радіанах	a в градусах
0	0	1,570796	90
1	0,125	1,445468	82,81924
2	0,25	1,318116	75,52249
3	0,375	1,1864	67,97569
4	0,5	1,047198	60
5	0,625	0,895665	51,31781
6	0,75	0,722734	41,40962
7	0,875	0,505361	28,95502
8	1	0	0

Підвищення точності розрахунків

Оскільки позиція джерела відносно пари мікрофонів позначається на точності розрахунків, то наступним кроком є підвищення точності визначення цих точок на колі. Для цього автори здійснили розробку мікрофонних конфігурацій, що мають 4 вершини та 6 мікрофонних пар. Розглянемо одну з найбільш точних, за результатами лабораторних досліджень, дельтоїдну конфігурацію. Її вигляд та розташування пар на кутовому діапазоні 360о наведено на рис. 6. Кожна пара мікрофонів показує найкращий результат при кутах відносно бази, значення яких становлять 75о – 105о та 165о – 195о.



Рисунок 6 – Мікрофонна конфігурація: а) дельтоїдна; б) розташування пар конфігурації на кутовому діапазоні

Оскільки на кожену пару припадає по 2 можливих точки на колі, які являють собою джерела звуку, то потрібно визначити, яке із двох значень точок є хибним. Під час оброблення результатів алгоритму завжди є значення кутів, які від абсолютного кута майже не відрізняються, або ж мають несуттєву похибку від 2 до 10 градусів. Найгірший результат має та пара, щодо якої джерело звуку знаходиться найближче до 0о чи 90о. Оскільки для правильного кута розкид значень є найменшим, то слід визначити найменшу дисперсію. У результаті роботи методу було отримано 26, тобто 64 варіанти комбінацій результатів пошуку кутів. Визначивши найменшу дисперсію, визначимо і правильні шукані значення кутів для кожної пари.

Фінальне значення абсолютного кута визначається як середнє арифметичне всіх кутів за найменшої дисперсії. Виходячи з особливості тригонометричної функції арккосинуса, маємо таке значення кута у одній із пар, яке вносить відчутну похибку в результат. Для того, щоб мінімізувати вплив такої пари, значення знайденого нею кута відкидається і результат розраховується на основі середнього арифметичного 5 пар, що залишилися. Це дозволяє отримати похибку у визначенні абсолютного кута, що є меншою за 2о.

Результати проведених авторами статті лабораторних досліджень за різних співвідношень шум-сигнал (SNR – signal-to-noise ratio), різних відстанях та кутах розташування джерела звуку щодо розробленої системи подано в табл. 2 – табл. 4.

Таблиця 2 – Вплив рівню шуму на результати

SNR, dB	Справжній кут, °	Відстань, м	Похибка конфігурації, °
45	80	500	0,3
25	80	500	0,3
5	80	500	0,5
-15	80	500	1,8

Таблиця 3 – Результати для різних кутів до джерела

SNR, dB	Справжній кут, °	Відстань, м	Похибка, °
45dB	90°	440	0,7
45dB	85°	440	0,3
45dB	80°	440	1,3
45dB	75°	440	0,8
45dB	70°	440	0,1
45dB	65°	440	0,2
45dB	60°	440	0,9

Таблиця 4 – Вплив відстаней до джерела на визначення кута

SNR, dB	Справжній кут, °	Відстань, м	Похибка, °
45dB	60°	500	0,5
45dB	60°	450	0,6
45dB	60°	400	0,4
45dB	60°	350	0,5
45dB	60°	300	0,8
45dB	60°	250	0,3
45dB	60°	200	0,8
45dB	59,4°	150	0,6
45dB	61,4°	100	0,4
45dB	60,7°	50	0,3

Висновки

Перевагами запропонованої системи є модульність складових, простота їх заміни, дешевизна створення, точність, можливість подальшого використання розробленої системи в умовах бойових дій за умови правильної модифікації.

Отже, в основних результатах дослідження, що висвітлюється в статті є:

- здійснено структурне моделювання та програмну реалізацію системи аудіолокації, побудованої на основі модифікованого методу кінцевих різниць;
- покращено метод кінцевих різниць шляхом використання ВКФ та адаптації до автоматизації запропонованої авторами системи;
- обґрунтовано конфігурації приймачів, що дозволяють підвищити точність роботи такої системи;
- проаналізовано результати роботи системи, що уможливило подальше статистичне оброблення даних для підвищення точності результатів;
- виконано перевірку готової моделі звукометричної системи в лабораторних умовах.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в розробленні системи аудіолокації з використанням удосконалених алгоритмів оброблення даних аудіолокаційного пошуку, що, на відміну від існуючих підходів, дозволяє на основі застосування взаємно кореляційної функції та подальшого її математичного коригування підвищити точність такого процесу.

Практичне значення отриманих результатів полягає в легкій адаптації розробленої та протестованої в лабораторних умовах звукометричної системи для роботи у військових польових умовах.

Список літератури

- [1] М. В. Бугайов, «Алгоритм виявлення акустичних сигналів безпілотних літальних апаратів», *Вісник ЖДТУ*, т. 74, № 3, с. 46–53, 2016. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://vtn.ztu.edu.ua/article/view/65584>. Дата звернення: 19 груд. 2022.
- [2] Р. В. Кочан, О. В. Кочан та Б. Р. Трембач, «Методична похибка пеленгування цілі системою звукової артилерійської розвідки», *Вимірювальна техніка та метрологія*, т. 80, № 3, с. 10–14, 2019. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ena.lpnu.ua/items/fa4d4479-7a42-4987-904c-6f49084cc264>. Дата звернення: 19 груд. 2022.
- [3] Р. В. Кочан, Б. Р. Трембач та Р. Б. Трембач, «Концепція розподіленої автоматичної системи звукової артилерійської розвідки на базі стільникового зв'язку», *Вісник Хмельницького національного університету*, т. 2, с. 101–104, 2016. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/pdfbase/2016/2016_2/\(235\)%202016-2-t.pdf](http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/pdfbase/2016/2016_2/(235)%202016-2-t.pdf). Дата звернення: 19 груд. 2022.
- [4] Я. М. Николайчук, *Теорія джерел інформації*. Тернопіль: ТНЕУ, 2008. 536 с.
- [5] A. Dehghan Firoozabadi, P. Irarrazaval, P. Adasme, D. Zabala-Blanco, P. P. Játiva та C. Azurdia-Meza, «3D Multiple Sound Source Localization by Proposed T-Shaped Circular Distributed Microphone Arrays in Combination with GEVD and Adaptive GCC-PHAT/ML Algorithms», *Sensors*, т. 22, № 3, с. 1011, січ. 2022. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/s22031011>. Дата звернення: 20 груд. 2022.
- [6] M. Nahmann, E. Fernandez-Grande, H. Gunawan та P. Gerstoft, «Sound source localization using multiple ad hoc distributed microphone arrays», *JASA Express Lett.*, т. 7, № 2, с. 22–28, 2022. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://doi.org/10.1121/10.0011811>. Дата звернення: 19 груд. 2022.
- [7] Jia M, Wu Y, Bao C та Wang J, «Multiple Sound Sources Localization with Frame-by-Frame Component Removal of Statistically Dominant Source», *Sensors (Basel)*, т. 11, № 18, с. 36 – 43, 2018. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/s18113613>. Дата звернення: 19 груд. 2022.
- [8] X. Li, L. Girin, F. Bodeig та R. Horaud, «Reverberant Sound Localization with a Robot Head Based on Direct-Path Relative Transfer Function». [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://arxiv.org/https://arxiv.org/pdf/2012.03574v1.pdf>. Дата звернення 19 груд. 2022.
- [9] H. Xing, X. Yang, X. Ji та H. Wu, «A fusion algorithm of passive sound source localization based on the two-plane four-element cross array», *Review of Scientific Instruments*, т. 91, № 3, с. 23–33, 2020. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://doi.org/10.1063/1.5080761>. Дата звернення: 19 груд. 2022.
- [10] K. Xu, W. Liu та M. Wang, «Sound source localization based on improved adaptive beamforming», *Journal of Physics: Conference Series*, т. 1971, № 1, с. 012063, лип. 2021. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1971/1/012063>. Дата звернення: 20 груд. 2022.
- [11] L. Zhang, D. Ding, D. Yang, J. Wang та J. Shi, «Sound Source Localization Using Non-Conformal Surface Sound Field Transformation Based on Spherical Harmonic Wave Decomposition», *Sensors*, т. 17, № 5, с. 1087, трав. 2017. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/s17051087>. Дата звернення: 20 груд. 2022.

Стаття надійшла: 20.12.2022.

References

- [1] M. V. Bugayev, «Algorithm for detection of acoustic signals of unmanned aerial vehicles», *Bulletin of ZHTU*, vol. 74, no. 3, p. 46–53, 2016. [Online]. Available: <http://vtn.ztu.edu.ua/article/view/65584>. Accessed on: 20. 12. 2022 [in Ukrainian].
- [2] R. V. Kochan, B. R. Trembach, O. V. Kochan, «Metodychna pokhybka pelenhuvannia tsili systemoiu zvukovoi artyleriiskoi rozvidky» [Methodical error of target bearing by the sound artillery reconnaissance system], *Measuring technique and metrology*, vol. 80, no. 3, p. 10–14, 2019. [Online]. Available: <https://ena.lpnu.ua/items/fa4d4479-7a42-4987-904c-6f49084cc264>. Accessed on: 20. 12. 2022 [in Ukrainian].
- [3] R. V. Kochan, B. R. Trembach, and R. B. Trembach «Kontseptsiia rozpodilenoї avtomatychnoi systemy zvukovoi artyleriiskoi rozvidky na bazi stil-nykovoho zviazku» [The concept of a distributed automatic system of sound artillery reconnaissance based on table-to-arm communication], *Bulletin of the Khmelnytskyi National University*, vol. 2, p. 101–104, 2016. [Online]. Available: [http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/pdfbase/2016/2016_2/\(235\)%202016-2-t.pdf](http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/pdfbase/2016/2016_2/(235)%202016-2-t.pdf). Accessed on: 20. 12. 2022 [in Ukrainian].
- [4] Y. M. Nikolaychuk, *Teoriia dzherel informatsii [Theory of sources of information]*. Ternopil: TNEU, 2008. 536 p. [in Ukrainian].
- [5] A. Dehghan Firoozabadi, P. Irarrazaval, P. Adasme, D. Zabala-Blanco, P. P. Játiva та C. Azurdia-Meza «3D Multiple Sound Source Localization by Proposed T-Shaped Circular Distributed Microphone Arrays in Combination with GEVD and Adaptive GCC-PHAT/ML Algorithms», *Sensors*, vol. 22, no. 3, p. 1011, Jan. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s22031011>. Accessed on: 20. 12. 2022.
- [6] M. Hahmann, E. Fernandez-Grande, H. Gunawan та P. Gerstoft, «Sound source localization using multiple ad hoc distributed microphone arrays», *JASA Express Lett.*, v. 7, no. 2, p. 22–28, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1121/10.0011811>. Accessed on: 20. 12. 2022.
- [7] Jia M, Wu Y, Bao C та Wang J., «Multiple Sound Sources Localization with Frame-by-Frame Component Removal of Statistically Dominant Source», *Sensors (Basel)*, vol. 11, no. 18, p. 36–43, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s18113613>. Accessed on: 20. 12. 2022.
- [8] X. Li, L. Girin, F. Bading та R. Horaud, «Reverberant Sound Localization with a Robot Head Based on Direct-Path Relative Transfer Function». [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/2012.03574v1.pdf>. Accessed on: 20. 12. 2022.
- [9] H. Xing, X. Yang, X. Ji та H. Wu, «A fusion algorithm of passive sound source localization based on the two-plane four-element cross array», *Review of Scientific Instruments*, vol. 91, no. 3, p. 23–33, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.5080761>. Accessed on: 20. 12. 2022.
- [10] K. Xu, W. Liu та M. Wang, «Sound source localization based on improved adaptive beamforming», *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1971, no. 1, p. 012063, July 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1971/1/012063>. Accessed on: 20. 12. 2022.
- [11] L. Zhang, D. Ding, D. Yang, J. Wang та J. Shi, «Sound Source Localization Using Non-Conformal Surface Sound Field Transformation Based on Spherical Harmonic Wave Decomposition», *Sensors*, vol. 17, no. 5, p. 1087, May 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s17051087>. Accessed on: 20. 12. 2022.

Відомості про авторів

Азарова Анжеліка Олександрівна – кандидат технічних наук, професор.

Щур Дмитро Сергійович – студент групи ІКІ-21м факультету інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії.

A. O. Azarova, D. S. Shchur

CONSTRUCTION OF THE AUTOMATED AUDIOLOCATION SYSTEM OF THREATS

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia

УДК 004.891

О. В. Бісікало, О. В. Кудрик

БАЗА ЗНАТЬ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ПРОГНОЗУВАННЯ ФАЗОВОЇ СТАБІЛЬНОСТІ ТВЕРДИХ РОЗЧИНІВ

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Анотація. Дана дослідницька робота присвячена розробці бази знань для розв'язання актуальної задачі прогнозування фазової стабільності твердих розчинів. Під базами знань розуміється сукупність фактів і правил виводу, що допускають логічний висновок і цілеспрямовану обробку інформації. Найбільш важливою властивістю інформації, що зберігається в базах знань, є достовірність конкретних і узагальнених відомостей у базі даних і релевантність вихідної інформації, одержуваної з використанням правил виведення, закладених в базу знань. Кращі бази знань включають саму релевантну, достовірну і свіжу інформацію, мають досконалі системи пошуку інформації, ретельно продуману структуру і формат знань. Експертна система втілює методологію адаптації алгоритму успішних рішень однієї сфери науково-практичної діяльності в іншу. З поширенням комп'ютерних технологій – це тотожна інтелектуальна комп'ютерна програма, що містить знання й аналітичні здібності одного чи кількох експертів в деякій галузі застосування і здатна робити логічні висновки на основі цих знань, тим самим забезпечуючи вирішення специфічних завдань. Інтелектуальна інформаційна система (ІС) – це один з видів автоматизованих інформаційних систем, який являє собою комплекс програмних, лінгвістичних і логіко-математичних засобів для реалізації основного завдання, яке зазвичай полягає у інтерпретації даних та прогнозуванні. Інтерпретація даних – це одне з традиційних завдань для експертних систем. Під інтерпретацією розуміється процес визначення змісту даних, результати якого мають бути погодженими і коректними. Зазвичай передбачається багатоваріантний аналіз даних, а виведені з цієї моделі сліdstва складають основу для прогнозів з ймовірними оцінками. Прогнозування дозволяє передбачати наслідки деяких подій або явищ на підставі аналізу наявних даних. У прогнозуючій системі зазвичай використовується параметрична динамічна модель, в якій значення параметрів встановлюються під задану ситуацію. У результаті розробки було побудовано модель бази знань для прогнозування фазової стабільності твердих розчинів за допомогою множини продукційних правил, предикатів, функцій та операторів.

Ключові слова: інтелектуальна інформаційна система, база знань, продукційні правила, предикати, оператори.

Abstract. This research work is devoted to the development of a knowledge base for solving the current problem of forecasting the phase stability of solid solutions. Knowledge bases mean a set of facts and inference rules that allow logical conclusion and purposeful processing of information. The most important property of information stored in knowledge bases is the reliability of specific and generalized information in the database and the relevance of the original information obtained using the rules of inference embedded in the knowledge base. The best knowledge bases include the most relevant, reliable and fresh information, have perfect information search systems, a carefully thought-out structure and format of knowledge. The expert system embodies the methodology of adapting the algorithm of successful solutions from one sphere of scientific and practical activity to another. With the spread of computer technologies, it is an identical intelligent computer program that contains the knowledge and analytical abilities of one or more experts in some field of application and is able to draw logical conclusions based on this knowledge, thereby providing a solution to specific tasks. An intelligent information system (IIS) is one of the types of automated information systems, which is a complex of software, linguistic and logical-mathematical tools for the implementation of the main task, which usually consists of data interpretation and forecasting. Data interpretation is one of the traditional tasks for expert systems. Interpretation means the process of determining the content of data, the results of which must be agreed and correct. A multivariate analysis of the data is usually assumed, and the findings from this model form the basis for probabilistic estimates. Forecasting allows you to predict the consequences of some events or phenomena based on the analysis of available data. A parametric dynamic model is usually used in the forecasting system, in which parameter values are set for a given situation. As a result of the development, a knowledge base model was built for predicting the phase stability of solid solutions using a set of production rules, predicates, functions and operators.

Key words: intellectual information system, knowledge base, production rules, predicates, operators.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-56-1-13-21>.

Вступ

База знань – сукупність систематизованих основних відомостей, що стосуються певної галузі знань і засобів, за допомогою яких відбуваються накопичення, збереження, оновлення та використання знань.

Відмінністю бази знань від бази даних є можливість формування нових знань [1].

Головні функції бази знань стосовно систем автоматизованого проектування (САПР):

- опис предметної галузі САПР;
- підтримка інтелектуальних методів розв'язання задач, що входять до складу САПР;
- реалізація можливостей експертного аналізу проектних завдань.

Продукційні правила – це форма представлення знань людини у вигляді речення типу ЯКЩО (умова), ТО (дія). Правила забезпечують формальний спосіб представлення рекомендацій, вказівок або стратегій. Вони ідеально підходять в тих випадках, коли знання предметної області виникають з емпіричних асоціацій, накопичених за роки роботи по вирішенню завдань у тій чи іншій галузі.

Продукційна модель – це набір продукційних правил, яка, з одного боку, близька до логічних моделей, що дозволяє організувати на ній ефективні процедури виведення, а з іншого боку, більш наочно відображає знання.

Продукційні правила використовуються в системах штучного інтелекту (як приклад, експертні системи) [2], як одна з найпоширеніших форм представлення знань, на ряду з логічними моделями, фреймами та семантичними мережами [3].

Експертна система – це методологія адаптації алгоритму успішних рішень однієї сфери науково-практичної діяльності в іншу. З поширенням комп'ютерних технологій – це тотожна (подібна, заснована на оптимізуючому алгоритмі чи евристиках) інтелектуальна комп'ютерна програма, що містить знання й аналітичні здібності одного чи кількох експертів в деякій галузі застосування і здатна робити логічні висновки на основі цих знань, тим самим забезпечуючи вирішення специфічних завдань (консультування, навчання, діагностування, тестування, проектування тощо) без участі експерта (фахівця в конкретній проблемній галузі). Визначається також як система, яка використовує базу знань для вирішення завдань (видачі рекомендацій) у певній предметній галузі. Цей клас програмного забезпечення спочатку розроблявся дослідниками штучного інтелекту в 1960-ті та 1970-ті та здобув комерційне застосування, починаючи з 1980-х. Часто термін система, заснована на знаннях, використовується як синонім експертної системи, однак можливості експертних систем ширші за можливості систем, заснованих на детермінованих (обмежених, реалізованих на поточний час) знаннях [4].

Інтелектуальна інформаційна система (ІІС) – це один з видів автоматизованих інформаційних систем, інколи ІІС називають системою, засновану на знаннях. ІІС є комплексом програмних, лінгвістичних і логіко-математичних засобів для реалізації основного завдання: здійснення підтримки діяльності людини і пошуку інформації в режимі розширеного діалогу природною мовою [5].

Мета

Мета статті – розробка бази знань для інтелектуальної інформаційної системи прогнозування фазової стабільності твердих розчинів.

Побудова бази знань

Розглянемо модель бази знань продукційного типу для прогнозування фазової стабільності твердих розчинів, що складається з множини відношень, продукційних правил, предикатів, функцій та операторів. Представимо модель, що розробляється, як

$$KnowledgeBase = \langle Re, Rule, Pr, Func, Op \rangle ,$$

що складається з відношень *RE*, продукційних правил

$$Rule = \{ ParamsR, ParamsChargeR, ParamsChargeCoordinationR, TypeAddR, TypeAdd \},$$

предикатів $Pr = \{ A(p_i), B(pc_j), C(pcc_n), TypeAdd_j, Type_j, PA(a_j), AD(s_d), AL(prm_j) \},$

функцій

$$Func = \{ ElementParams, ElementParamsCharge, ElementParamsCoordination, ElementTypeAdd, ElementType, PredAnalysis, AnalysisData, PredTypeAlgorithm \},$$

та операторів

$$Op = \{ Oprint, Oanalysis, OdataCheck, Opred, OsaveResult, OreturnResult \}.$$

Формальними відношеннями, які дозволяють розглядати інформаційну складову «Інтелектуальної системи фазової стабільності твердих розчинів» у термінах реляційної моделі даних будемо вважати:

$$RE = \{ element_grp, sub_element_grp, element, elm2elm, charge_element, cordination_element, atom_length, sum_atom_length, volume_cell, structure_solid, term_system, tsys_crde, stored_system, stored_result \}, \quad (1)$$

де, *element_grp* – відношення для характеристики групи елементів; атрибути, з яких складається це відношення, позначають: *elmg_id* (унікальний ід-код певної групи елементів), *elmg_name* (назва групи елементів).

$$Element_grp \subset elmg_id \times elmg_name \quad (2)$$

sub_element_grp – відношення для характеристики підгрупи елементів; атрибути, з яких складається це відношення, позначають: *selmg_id* (унікальний ід-код певної підгрупи елементів), *elmg_name* (назва підгрупи елементів).

$$Sub_element_grp \subset selmg_id \times selmg_name \quad (3)$$

Element – відношення для характеристики підгрупи елементів; атрибути, з яких складається це відношення, позначають: *elm_id* (унікальний ід-код певного елемента), *elm_selmg* (ідентифікатор підгрупи), *elm_name* (назва елемента), *elm_code* (хімічний код), *elm_count* (кількість атомів елемента).

$$Element \subset elm_id \times elm_selmg \times elm_name \times elm_code \times elm_count \quad (4)$$

Elm2elm – відношення для характеристики складного елемента; атрибути, з яких складається це відношення, позначають: *e2e_id* (унікальний ід-код певного складного елемента), *e2e_che_par* (ідентифікатор заряду батьківський), *e2e_che_ch* (ідентифікатор заряду дочірній), *e2e_sort* (сортування).

$$Elm2elm \subset e2e_id \times e2e_che_par \times e2e_che_ch \times e2e_sort \quad (5)$$

Charge_element – відношення для характеристики зарядів елементів; атрибути, з яких складається це відношення, позначають: *che_id* (унікальний ід-код певного заряду елемента), *che_elm* (ідентифікатор елемента), *che_value* (значення заряду).

$$Charge_element \subset che_id \times che_elm \times che_value \quad (6)$$

Cordination_element – відношення для характеристики координаційних номерів зарядів; атрибути, з яких складається це відношення, позначають: *crde_id* (унікальний ід-код певного координаційного номера заряду), *crde_che* (ідентифікатор заряду елемента), *crde_value* (значення координаційного числа).

$$Cordination_element \subset crde_id \times crde_che \times crde_value \quad (7)$$

Atom_length – відношення для характеристики атомних довжин між зарядами елементів; атрибути, з яких складається це відношення, позначають: *atml_id* (унікальний ід-код певної атомної довжини між зарядами елементів), *atml_che_from* (ідентифікатор заряду елемента 1), *atml_che_to* (ідентифікатор заряду елемента 2) *atml_value* (значення атомних довжин), *atml_strs* (ідентифікатор структури твердого розчину).

$$Atom_length \subset atml_id \times atml_che_from \times atml_che_to \times atml_value \times atml_strs \quad (8)$$

Sum_atom_length – відношення для характеристики суми атомних довжин між зарядами елементів; атрибути, з яких складається це відношення, позначають: *satml_id* (унікальний ід-код певної суми атомної довжини між зарядами елементів), *satml_che_from* (ідентифікатор заряду елемента 1), *satml_che_to* (ідентифікатор заряду елемента 2), *satml_value* (значення сум атомних довжин), *satml_strs* (ідентифікатор структури твердого розчину).

$$Sum_atom_length \subset satml_id \times satml_che_from \times satml_che_to \times satml_value \times satml_strs \quad (9)$$

Volume_cell – відношення для характеристики обсягу комірок між зарядами елементів; атрибути, з яких складається це відношення, позначають: *volc_id* (унікальний ід-код певного обсягу комірок між зарядами елементів), *volc_che_from* (ідентифікатор заряду елемента 1), *volc_che_to* (ідентифікатор заряду елемента 2), *volc_value* (значення обсягу) *volc_strs* (ідентифікатор структури твердого розчину).

$$Volume_cell \subset volc_id \times volc_che_from \times volc_che_to \times volc_value \times volc_strs \quad (10)$$

Structure_solid – відношення для характеристики структури твердого розчину; атрибути, з яких складається це відношення, позначають: *strs_id* (унікальний ід-код певної структури розчину), *strs_name* (назва групи елементів).

$$Structure_solid \subset strs_id \times strs_name \quad (11)$$

Term_system – відношення для характеристики термодинамічної системи; атрибути, з яких складається це відношення, позначають: *tsys_id* (унікальний ід-код певної термодинамічної системи), *tsys_crde* (ідентифікатор координаційного елемента), *tsys_elm* (ідентифікатор елемента).

$$Term_system \subset tsys_id \times tsys_crde \times tsys_elm \quad (12)$$

Tsys_crde – відношення для характеристики елементів, пов’язаних з певною термодинамічною системою; атрибути, з яких складається це відношення, позначають: *tsysc_id* (унікальний ід-код певного елемента термодинамічної системи), *tsysc_tsys* (ідентифікатор термодинамічної системи), *tsysc_crde* (ідентифікатор координаційного елемента).

$$Tsys_crde \subset tsysc_id \times tsysc_tsys \times tsysc_crde \quad (13)$$

Stored_system – відношення для характеристики дані системи, яка була розрахована; атрибути, з яких складається це відношення, позначають: *stds_id* (унікальний ід-код певних даних про систему, яка була розрахована), *stds_strs* (ідентифікатор структури системи), *stds_ln1* (ідентифікатор лантаноїда 1), *stds_ln2* (ідентифікатор лантаноїда 2), *stds_anion* (ідентифікатор аніона), *stds_eps* (крок обчислень).

$$Stored_system \subset stds_id \times stds_strs \times stds_ln1 \times stds_ln2 \times stds_anion \times stds_eps \quad (14)$$

Stored_result – відношення для характеристики дані про розрахунки системи; атрибути, з яких складається це відношення, позначають: *stdr_id* (унікальний ід-код певних даних про розраховану систему), *stdr_std* (ідентифікатор розрахованої системи), *stdr_x* (результат x), *stdr_x1* (результат x1), *stdr_x2* (результат x2), *stdr_t* (результат t), *stdr_t_crit* (результат t_crit), *stdr_q* (результат q), *stdr_method* (результат method), *stdr_err_message* (текст помилки).

$$Stored_result \subset stdr_id \times stdr_stds \times stdr_x \times stdr_x1 \times stdr_x2 \times stdr_t \times stdr_t_crit \times stdr_q \times stdr_method \times stdr_err_message \quad (15)$$

Схему формальних відношень можна побачити на рисунку 1 [6].

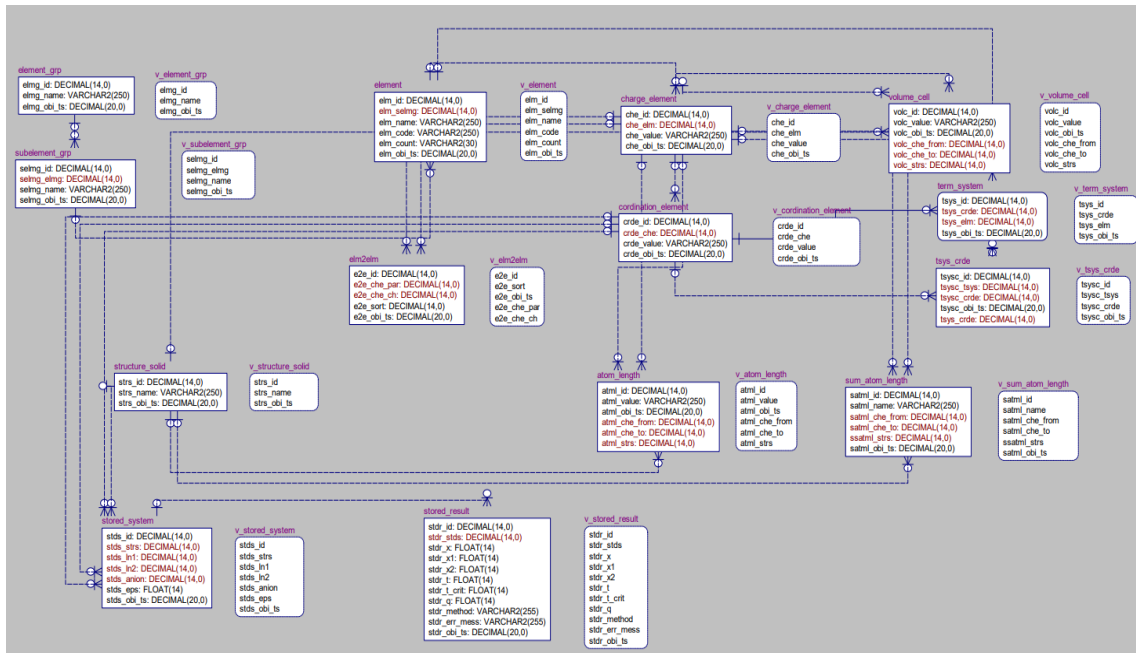


Рисунок 1 – Схема формальних відношень

Під терміном елемент будемо розуміти складову, яка визначається через певні параметри. У загальному випадку параметри змінюються в залежності від виду елемента. Використовуючи *id* елемента з таблиці *element*, можливо з’єднати декілька елементів, які у подальшому формують складний елемент. Для цього розроблено базу знань продукційного типу інтелектуального модуля “Елементи”, що складається з множини продукційних правил, предикатів, функцій та операторів. Зокрема:

1. В процесі створення елемента враховано можливість внесення загальних параметрів до елемента (функція *ElementParams*). Так, для кожного елемента потрібно забезпечити отримання показників з бази даних. Отже, якщо параметр r_i деякого i -го елемента з N відсутній в системі, обирається універсальне значення r_{def} , інакше необхідно ввести значення r_i . Формально визначимо продукцію *ParamsR*:

Якщо $A(p_i)$ тоді $ElementParams(p_i)$ інакше $ElementParams(p_{def})$, де предикат $A(p_i)$ визначається так:

$$\exists p_i \mid i \in \{1, 2, \dots, N\} \rightarrow A(p_i) = True$$

На рисунку 2 показано приклад введення загальних параметрів.

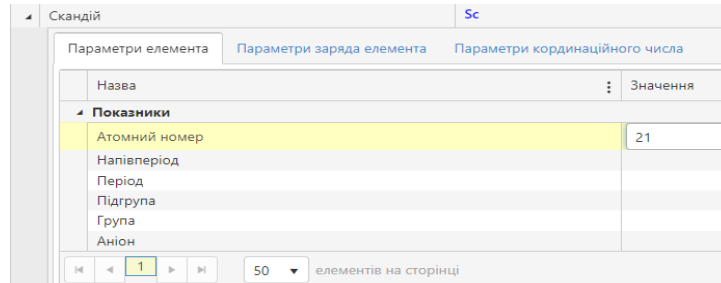


Рисунок 2 – Введення загальних параметрів

2. В процесі створення елемента враховано можливість внесення параметрів заряду до елемента (функція $ElementParamsCharge$). Так, для кожного елемента потрібно забезпечити отримання показників з бази даних. Отже, якщо параметр pc_j деякого j -го елемента з M відсутній в системі, обирається універсальне значення pc_{def} , інакше необхідно ввести значення pc_j . Формально визначимо продукцію $ParamsChargeR$:

Якщо $B(pc_j)$ тоді $ElementParamsCharge(pc_j)$ інакше $ElementParamsCharge(pc_{def})$, де предикат $B(pc_j)$ визначається так:

$$\exists pc_j \mid j \in \{1, 2, \dots, M\} \rightarrow B(pc_j) = True$$

На рисунку 3 показано приклад введення параметрів заряду елемента.

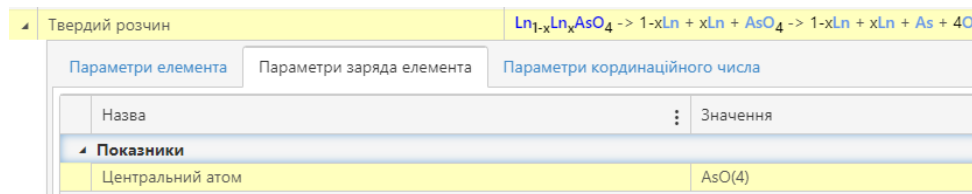


Рисунок 3 – Введення параметрів заряду елемента

3. В процесі створення елемента враховано можливість внесення параметрів координаційного числа до елемента (функція $ElementParamsChargeCoordination$). Так, для кожного елемента потрібно забезпечити отримання показників з бази даних. Отже, якщо параметр pcc_n деякого n -го елемента з K відсутній в системі, обирається універсальне значення pcc_{def} , інакше необхідно ввести значення pcc_n . Формально визначимо продукцію $ParamsChargeCoordinationR$:

Якщо $C(pcc_n)$ тоді $ElementParamsChargeCoordination(pcc_n)$ інакше $ElementParamsChargeCoordination(pcc_{def})$, де предикат $C(pcc_n)$ визначається так:

$$\exists pcc_n \mid n \in \{1, 2, \dots, K\} \rightarrow C(pcc_n) = True$$

На рисунку 4 показано приклад введення параметрів заряду елемента.

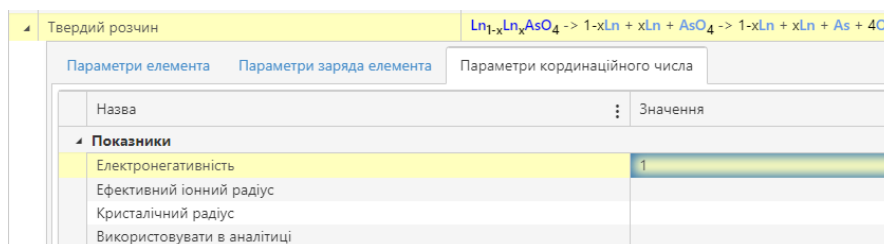


Рисунок 4 – Введення параметрів координаційного числа до елемента

4. Користувачі системи мають змогу самостійно редагувати вид елемента, який їм потрібно. З метою підтримки гнучкості розроблено випадаючий список у вікні елемента: “Складний” та “Простий”. Через меню “Складний” користувачі мають змогу обрати ті j -ті стрічки r_j з LR таблиці елемент, які потрібні для побудови складного елемента (2+ елементів) $ElementTypeAdd$, а через меню “Простий” є змога обирати елементи (до 2-х елементів) у певні j -ті поля з LF таблиці елемент функцією $ElementType$. Формально визначимо продукції $TypeAddR$ та $TypeR$:

Якщо $TypeAdd_j$ тоді $ElementTypeAdd(r_j)$ інакше $ElementTypeAdd(Null)$, де предикат $TypeAdd_j$ визначається так:

$$\exists TypeAdd_j \mid j \in \{1, 2, \dots, LR\} \rightarrow TypeAdd_j = True$$

Якщо $Type_j$ тоді $ElementType(r_j)$ інакше $ElementType(Null)$, де предикат $Type_j$ визначається так:

$$\exists Type_j \mid j \in \{1, 2, \dots, LF\} \rightarrow Type_j = True$$

На рисунку 5 показано приклад зміни виду елемента.



Рисунок 5 – Зміна виду елемента

5. Для того, щоб можна було візуально легко показати, як створився елемент та які елементи занесено до системи, було створено функцію – друк таблиці елементів $PrintElement$. Власне кожен елемент формується з певного набору полів: elm_id (унікальний ід-код певного елемента), elm_selmg (ідентифікатор підгрупи), elm_name (назва елемента), elm_code (хімічний код), elm_count (кількість атомів елемента). Формально оператор друку елемента

$$O_{print} : (elm_id, elm_selmg, elm_name, elm_code, elm_selmg) \rightarrow PrintElement.$$

На рисунку 6 показано приклад друку таблиці елементів

 A screenshot of a spreadsheet application showing a table of elements. The table has columns labeled A through H. The data is as follows:

Id	Id заряду	Id координаційного числа	Назва	Формула	Кількість	Заряд	Координаційне число
42	42	61	Скандій	Sc	1	3	8
42	42	42	Скандій	Sc	1	3	6
101	101	101	Ванадій	V	1	5	6
112	112	112	Арсеніум	As	1	5	6
114	114	114	Иттрий	Y	1	3	6
41	41	41	Лантан	La	1	3	6
22	25	22	Церій	Ce	1	3	6
103	103	103	Празеодим	Pr	1	3	6
104	104	104	Неодим	Nd	1	3	6
105	105	105	Прометий	Pm	1	3	6
21	24	21	Самарій	Sm	1	3	6
61	61	63	Європій	Eu	1	3	6
81	81	81	Гадоліній	Gd	1	3	6
106	106	106	Тербій	Tb	1	3	6
107	107	107	Диспрозій	Dy	1	3	6
108	108	108	Гольмій	Ho	1	3	6
43	43	43	Ербій	Er	1	3	6
43	43	62	Ербій	Er	1	3	8
109	109	109	Тулій	Tm	1	3	6
110	110	110	Иттербий	Yb	1	3	6
111	111	111	Лютецій	Lu	1	3	6
24	22	45	Оксиген	O	4	-2	

Рисунок 6 – Друк таблиці елементів

Під терміном прогнозування будемо розуміти складову, яка починається з моменту аналізу, обробки даних та закінчуючи виведенням даних на інтерфейс користувача. Використовуючи дані з таблиць: *element*, *charge_element*, *coordination_element*, *volume_cell*, *term_system*, *atom_length*, *sum_atom_length*, *stored_system*, *stored_result*, проаналізувавши їх та обробивши, можливо отримати дані, які буде виведено на інтерфейс користувача у вигляді графіку та таблиці. Для цього розроблено базу знань продукційного типу інтелектуального модуля "Прогнозування", що складається з множини продукційних правил, предикатів, функцій та операторів. Зокрема:

1. В процесі прогнозування спочатку відбувається аналіз даних (функція *PredAnalysis*). Для кожної системи необхідно забезпечити отримання показників кожного елемента з бази даних та проаналізувати, чи можливо зробити прогнозування. Отже, якщо параметр a_i деякого i -го елемента з AN відсутній в системі, обирається універсальне значення a_{def} , інакше необхідно ввести значення a_i . Формально визначимо продукцію *Analysis*:

Якщо $PA(a_i)$ тоді *PredAnalysis* (a_i) інакше *PredAnalysis* (a_{def}), де предикат $PA(a_i)$ визначається так:

$$\exists a_i \mid i \in \{1, 2, \dots, AN\} \rightarrow PA(a_i) = True$$

2. Для того, щоб можна було візуально легко показати, які помилки виникли при аналізі даних, було створено функцію – виведення помилок *PredAnalysisErr*. Функції необхідно передати певний набір полів: *elm_id* (унікальний ід певного елемента-системи), *strs_id* (ідентифікатор структури розчину), *elm_id_ln* (ід певного лантаніда), *eps* (крок обчислень). Формально оператор виведення помилок при аналізі системи

$$O_{analysis} : (elm_id, strs_id, elm_id_ln, eps) \rightarrow PredAnalysisErr.$$

На рисунку 7 показано приклад виведення помилки при аналізі системи.

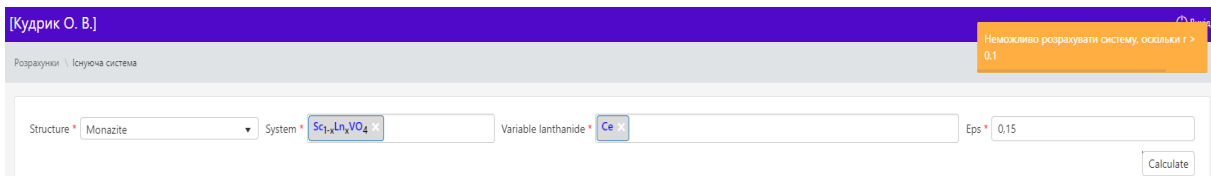


Рисунок 7 – Виведення помилки при аналізі системи

3. Під час аналізу даних, також, перевіряється, чи не була вже така система з тим самим набором вхідних даних розрахована (функція *PredAnalysisData*), якщо була розрахована, то виводимо знайдені дані. Проводиться аналіз та порівняння даних з бази даних, а саме в таблиць: *stored_system* та *stored_result*. Отже, якщо дані s_d деякого d -го елемента з SR наявні в системі, передаємо значення s_d , інакше s_{found} . Формально визначимо продукцію *AnalysisData*:

Якщо $AD(s_d)$ тоді *AnalysisData* (s_d) інакше *AnalysisData* (s_{found}), де предикат $AD(s_d)$ визначається так:

$$\exists s_d \mid d \in \{1, 2, \dots, AD\} \rightarrow AD(s_d) = True$$

4. Також було створено функцію – *PredAnalysisDataCheck*, яка перевіряє, чи раніше розраховувалась система. Функції необхідно передати певний набір полів: *elm_id* (унікальний ід певного елемента-системи), *strs_id* (ідентифікатор структури розчину), *elm_id_ln* (ід певного лантаніда), *eps* (крок обчислень). Формально оператор виведення помилок при аналізі системи

$$O_{dataCheck} : (elm_id, strs_id, elm_id_ln, eps) \rightarrow PredAnalysisDataCheck.$$

5. Після аналізу даних відбувається вибір алгоритма прогнозування (функція *PredTypeAlgorithm*). Система аналізує та порівнює наявність параметрів у елемента з бази даних, до уваги беруться такі параметри: міжатомні довжини, сума міжатомних довжин, об'єм елементарних комірок та іонний радіус. Отже, якщо параметр prm_j деякого j -го елемента з $PARAM$ відсутній в системі, обирається алгоритм з використанням іонних радіусів prm_{ion} , інакше встановлюється алгоритм prm_j . Формально визначимо продукцію *Algorithm*:

Якщо $AL(prm_j)$ тоді *PredTypeAlgorithm* (prm_j) інакше *PredTypeAlgorithm* (prm_{ion}), де предикат $AL(prm_j)$ визначається так:

$$\exists prm_j | j \in \{1, 2, \dots, PARAM\} \rightarrow AL(prm_i) = True$$

6. Для обробки даних, після встановлення типу алгоритма прогнозування, було створено функцію – Prediction. Функції необхідно передати певний набір полів: elm_id (унікальний ід певного елемента-системи), str_id (ідентифікатор структури розчину), elm_id_ln (ід певного лантаноїда), eps (крок обчислень), algorithm_tp (тип алгоритма). Формально оператор прогнозування має вигляд

$$O_{pred} : (elm_id, str_id, elm_id_ln, eps, algorithm_tp) \rightarrow Prediction.$$

7. Після обробки даних, зберігаємо результати в спеціально розроблених таблицях - stored_system та stored_result. Ці таблиці в подальшому будуть використовуватись на етапі аналізу даних, для того, щоб перевірити, чи раніше проводились розрахунки з тими ж самими вхідними даними.

Отже, було створено функцію – SaveResult.

Функції необхідно передати певний набір полів: stds_strs (ідентифікатор структури системи), stds_ln1 (ідентифікатор лантаноїда 1), stds_ln2 (ідентифікатор лантаноїда 2), stds_anion (ідентифікатор аніона), stds_eps (крок обчислень), stdr_stds (ідентифікатор розрахованої системи), stdr_x (результат x), stdr_x1 (результат x1), stdr_x2 (результат x2), stdr_t (результат t), stdr_t_crit (результат t_crit), stdr_q (результат q), stdr_method (результат method), stdr_err_mesage (текст помилки).

Формально оператор прогнозування має вигляд:

$$O_{saveResult} : (stds_strs, stds_ln1, stds_ln2, stds_anion, stds_eps, stdr_stds, stdr_x, stdr_x1, stdr_x2, stdr_t, stdr_t_crit, stdr_q, stdr_method, stdr_err_method) \rightarrow SaveResult.$$

8. Для відображення даних на інтерфейсі користувача, було створено функцію – ReturnResult. Функції необхідно передати певний набір полів: stdr_id (унікальний ід-код даних про розраховану систему). Формально оператор відображення даних на інтерфейсі користувача

$$O_{returnResult} : (stdr_id) \rightarrow ReturnResult.$$

На рисунку 8 показано приклад відображення даних на інтерфейсі користувача

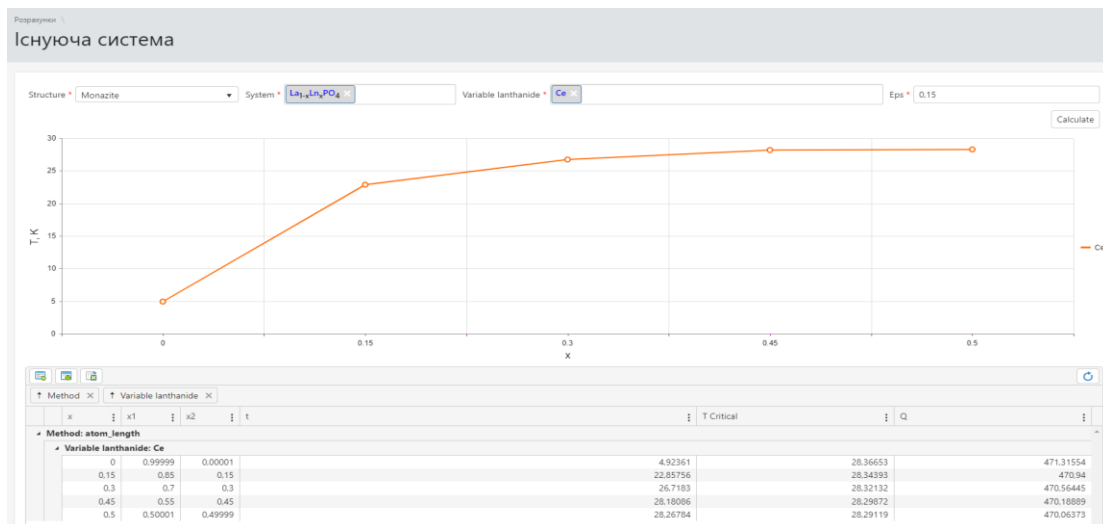


Рисунок 8 – Відображення даних на інтерфейсі користувача

Висновки

В даній роботі вперше створено модель бази знань для прогнозування фазової стабільності твердих розчинів, яка, на відміну від існуючих, враховує унікальну границю заміщень кожного лантаноїду за допомогою множини продукційних правил, предикатів, функцій та операторів, що дозволяє підвищити точність розрахунку енергії змішування та обчислити точну, а не загальну критичну температуру розкладання відповідного лантаноїду.

Список літератури

- [1] Z. Nagy, *Artificial Intelligence and Machine Learning Fundamentals*. Packt Publishing, 330 p., 2018.

- [2] С. О. Субботін, А. О. Олійник, О. О. Олійник, *Неітеративні, еволюційні та мультиагентні метод синтезу нечіткологічних і нейромережних моделей: Монографія*. Запоріжжя: ЗНТУ, 375 с., 2009.
- [3] В. В. Пасічник, Н. Б. Шаховська, *Сховища та простори: Монографія*. Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 244 с., 2009.
- [4] П. Джексон, *Введення в експертні системи*. Видавництво Вільямс, 2001. ISBN 5-8459-0150-2, ISBN 0-201-87686-8.
- [5] В. І. Шинкарук, *Логіко-інформаційна система*. Інститут філософії імені Григорія Сковороди НАН України: Абрис, 742 с., 2002.
- [6] O. V. Kudryk O. V. Bisikalo, Yu. A. Oleksii, S. V. Radio, «Intelligent information system for predicting chemicals with interactive possibilities», *CoLInS, Computational Linguistics and Intelligent Systems*. CoLInS 2021. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://ceur-ws.org/Vol-2870/paper68.pdf>. Дата звернення: 09.02.23.

Стаття надійшла: 09.02.2023.

References

- [1] Z. Nagy, *Artificial Intelligence and Machine Learning Fundamentals*. Packt Publishing, 330 p., 2018.
- [2] S. O. Subbotin, A. O. Oliynyk, O. O. Oliynyk, *Non-iterative, evolutionary and multi-agent methods of synthesis of fuzzy-logical and neural network models: Monograph*. Zaporizhzhia: ZNTU, 375 p., 2009 [in Ukrainian].
- [3] V. V. Pasichnyk, N. B. Shakhovska, *Storage and spaces: Monograph*. Lviv: National Publishing House «Lviv Polytechnic University», 244 p., 2009 [in Ukrainian].
- [4] P. Jackson, *Introduction to Expert Systems*. Williams Publishing, 2001. ISBN 5-8459-0150-2, ISBN 0-201-87686-8 [in Ukrainian].
- [5] V. I. Shinkaruk, *Logic-informational system*. Hryhoriy Skovoroda Institute of Philosophy of the National Academy of Sciences of Ukraine: Outline, 742 p., 2002 [in Ukrainian].
- [6] O. V. Kudryk O. V. Bisikalo, Yu. A. Oleksii, S. V. Radio, Intelligent information system for predicting chemicals with interactive possibilities, *CoLInS, Computational Linguistics and Intelligent Systems*. CoLInS 2021. [Online]. Available: <http://ceur-ws.org/Vol-2870/paper68.pdf>. Accessed on: 09.02.2023.

Відомості про авторів

Бісікало Олег Володимирович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій.

Кудрик Олексій Володимирович – аспірант групи 126-21а, кафедра автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій.

O. V. Bisikalo, O. V. Kudryk

KNOWLEDGE BASE IN INTELLIGENT INFORMATION SYSTEM FOR PREDICTING OF PHASE STABILITY OF SOLID SOLIDS

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia

УДК 004.422

Л. А. Савицька, М. Г. Тарновский, О. С. Герасик
**ПРОГРАМНИЙ МОДУЛЬ ІНТЕРАКТИВНОГО
 ТЕСТУВАННЯ ЗНАНЬ**

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Анотація. На теперішній час в Україні продовжується процес стрімкого наповнення новими засобами інформаційних технологій вищої освіти, що призводять до якісної оцінки знань, використовуючи всі можливі сучасні методи навчального процесу. Стрімкий розвиток інформаційних технологій, наповнює суспільство новітніми можливостями, які, в свою чергу, полегшують діяльність людини в усіх сферах життя. Створення єдиного освітнього інформаційного середовища, при використанні нових інформаційних технологій значно підвищує якість освіти в Україні і є пріоритетним завданням інформатизації системи освіти нашої країни та забезпечить рівні можливості громадянам на отримання освіти різних ступенів і рівнів, а також інтегрується у світовий освітній та інформаційний простір України. Контроль за навчальною діяльністю учнів є найважливішим компонентом педагогічної системи і складовою частиною навчального процесу, який призначено для визначення успішності навчання для кожного учня або студента, аналізу отриманих результатів і, в подальшому, для корекції процесу навчання. Вдосконалення системи оцінювання, модернізація діагностики навчання учнів виступає інструментом підвищення якості освіти разом із реформуванням її змісту. У сучасних умовах розвитку новітніх технологій актуальним є завдання постійного оновлення знань спеціалістів. Комп'ютерні засоби навчання відіграють важливу роль у вирішенні цієї проблеми. Використання інформаційних технологій у навчанні дозволяє індивідуалізувати навчальні процеси, забезпечити оперативний самоконтроль та контроль за допомогою діагностики помилок та зворотного зв'язку. Тестування як форма контролю та діагностики знань студентів набуває широкого розповсюдження в навчальному процесі, як і у сфері професійної педагогічної діяльності, оскільки має багато переваг над іншими формами контролю умінь та знань, зокрема можливість охоплення великого обсягу матеріалу. У сучасних умовах професійно-технічної освіти в Україні набуває значущості можливість автоматизованого формування тесту, можливість автоматизованої перевірки результатів тестування, підвищення об'єктивності оцінювання та зменшення упередженості при оцінюванні знань.

Ключові слова: тестування, інтерактивне тестування, методи генерації, удосконалений алгоритм генерації.

Abstract. At the present time, the process of rapid filling with new means of information technologies of higher education, which lead to qualitative assessment of knowledge, using all possible modern methods of the educational process, continues in Ukraine. The rapid development of information technologies fills society with the latest opportunities, which, in turn, facilitate human activity in all spheres of life. The creation of a unified educational information environment, when using new information technologies, significantly increases the quality of education in Ukraine and is a priority task of informatization of the education system of our country and will provide equal opportunities for citizens to receive education of various degrees and levels, as well as integrate into the world educational and information space of Ukraine. Control over the educational activity of students is the most important component of the pedagogical system and an integral part of the educational process, which is intended to determine the success of education for each student or student, to analyze the results obtained, and, subsequently, to correct the educational process. Improvement of the assessment system, modernization of the diagnosis of student learning is a tool for improving the quality of education along with reforming its content. In modern conditions of the development of the latest technologies, the task of constantly updating the knowledge of specialists is urgent. Computer-based learning tools play an important role in solving this problem. The use of information technologies in education allows for the individualization of educational processes, providing operational self-monitoring and control with the help of error diagnosis and feedback. Testing as a form of control and diagnosis of students' knowledge is becoming increasingly widespread in the educational process and in the field of professional pedagogical activity, as it has certain advantages over other forms of control of knowledge and skills, in particular, the possibility of covering a large amount of material. In the modern conditions of professional and technical education in Ukraine, the possibility of automated formation of the test, the possibility of automated verification of test results, increasing the objectivity of evaluation and reducing bias in the evaluation of knowledge is gaining importance.

Key words: testing, interactive testing, generation methods, improved generation algorithm.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-56-1-22-29>.

Вступ

Ефективність процесу навчання багато в чому залежить від ґрунтовності опрацювання методів контролю знань. Контроль знань необхідний кожній системі освіти та кожній організації навчального процесу. Це інструмент управління навчальною діяльністю учнів. Але для досягнення функцій навчання, крім функції перевірки, необхідно створити певні умови, головною з яких є об'єктивність перевірки знань.

Важливою ланкою навчально-виховного процесу є діагностика знань, умінь і навичок учнів. Результат навчання багато в чому залежить від його правильної організації. У процесі діагностики виявляються сильні та слабкі сторони знань і вмінь студентів, що дає змогу керувати навчальним процесом, удосконалювати форми і методи навчання.

Актуальність

Тестування як форма контролю та діагностики знань студентів набуває широкого розповсюдження в навчальному процесі і у сфері професійної педагогічної діяльності, оскільки має певну кількість переваг над іншими формами контролю знань та умінь, зокрема можливість охоплення великого обсягу матеріалу. У сучасних умовах професійно-технічної освіти в Україні набуває значущості можливість автоматизованого формування тесту, можливість автоматизованої перевірки результатів тестування, підвищення об'єктивності оцінювання та зменшення упередженості при оцінюванні знань.

Мета

Метою статті є розширення функціональних можливостей при генерації тестів для тестування знань.

Задачі

1. Використання засобів інтерактивного тестування для діагностики знань, умінь і навичок учнів.
2. Застосування удосконаленого алгоритму генерації тесту для підвищення об'єктивності оцінювання та зменшення упередженості при оцінюванні знань

Тестування знань

Багато науковців при розгляді поняття «тест» у більшості мають на увазі вузьке значення даного терміна, а саме: тест – це один з видів навчальних завдань, що використовуються для контролю та діагностики знань. Слід зауважити, що його застосування не обмежене тільки формою контролю, а ще тестування використовується і як форма засвоєння певних визначених аспектів змісту навчання.

Тест - це сукупність завдань, які зорієнтовані на визначення та вимірювання певного рівня засвоєння частин змісту навчання, при цьому ці завдання повинні надаватися послідовно із наростаючою складністю. Тест, як правило, являє собою стандартизований метод визначення певного рівня і структури підготовки студентів. При такому тесті усі учасники мають отримати однакові завдання, при однакових умовах та з однаковими правилами оцінювання їх відповідей. Такий метод дозволяє встановити відповідне відношення порядку між учасниками за рівнем їх знань та об'єктивно визначити місце в групі або рейтинг кожного студента.

Головні переваги використання тестового контролю знань студентів виділено такі [1]:

- застосування для усіх видів контролю: поточного та тематичного, базового та початкового, рубіжного та залікового, підсумкового та екзаменаційного та самоконтролю;
- можливість кожного змістового модуля дисципліни детальної перевірки рівня засвоєння;
- наявність чіткої однозначної відповіді, стандартне оцінювання на основі цінника;
- економія навчального часу та об'єктивність оцінювання результатів навчання;
- емоційний вплив викладача на студента мінімальний.

Крім цього, традиційно до переваг тестування відносяться [2]:

- можливість здійснення контролю за роботою кожного студента, тобто індивідуальний характер, а також можливість отримання результатів успішності групи, що допоможе оцінити викладачеві ефективність методів та прийомів, які застосовуються на заняттях;
- регулярне та систематичного проведення тестового контролю на всіх етапах процесу навчання;
- поєднання тестування з іншими традиційними формами педагогічного контролю;
- об'єктивність тестового контролю, яка виключає суб'єктивні оціночні висновки та судження викладача;
- можливість проведення комп'ютеризованого та паперового варіанта тестування;
- урахування індивідуальних особливостей студентів, які потребують застосування відповідно до їх особливостей певної методики розробки тесту та тестових завдань та залежно від рівня їх мовленнєвої компетенції;
- включення дидактичних одиниць програми навчання в завдання тесту дають високу змістовну обґрунтованість тестового контролю.

Інтерактивне тестування знань

Тепер розглянемо переваги найоптимальнішого із засобів тестування – інтерактивного тестування:

1. Зручне та швидке отримання результатів тестування;
2. Вірність та об'єктивність отриманої оцінки;
3. З точки зору студентів, є більш захоплюючим та цікавим у порівнянні із традиційними іспитами;
4. Тестування є справедливим методом оцінювання отриманих знань, так як всі студенти однієї групи опиняються в однакових умовах;
5. Рівень отриманих знань студента можливо визначати по окремій частині курсу в цілому і по дисципліні взагалі;
6. Економічно ефективно тестування за рахунок тривалого використання бази запитань;
7. Більш гуманний інструмент, так як виключає нервову напругу, яка присутня перед традиційними іспитом і досить суттєво впливає на отриману оцінку;
8. Аналізуючи дані, які отримано після проходження тестування, можна оцінити труднощі засвоєння навчального матеріалу по конкретні темі.

Недоліки інтерактивного тестування:

1. У деяких випадках причини поганого написання тесту є об'єктивними та заслуговувати на підтримку з боку викладача, а під час тестування цього помітити не можливо.
2. Навіть коли питання та задачі для проведення інтерактивного тестування створене грамотно та зрозуміло для студента, вони все одно не зможуть показати творчий рівень знань студента.
3. Інколи студентам просто не вистачає встановленого часу для проходження тесту.
4. Для того, щоб кожного разу завдання, тобто питання відповідних рівнів, не повторювалися, в базі даних з самого початку створення тесту необхідно внести стільки питань, щоб при кожній іншій спробі

студент не отримував одні й ті ж самі питання. Інакше кажучи, це вимагає від викладача творчого підходу до складання тестових завдань для того, щоб можна було впевнено в об'єктивності та справедливості отриманої оцінки.

5. В інтерактивному тестуванні, як й при будь-якому процесі, неможна забувати про елемент випадковості. Тобто, іноді студент, який сумлінно вчиться, не дав відповіді на питання першого рівня. А студент, який не володіє навчальним матеріалом, з легкістю відповів на питання другого та третього рівнів. Причиною цього може бути, як некоректне поставлене питання першого рівня, так і елементарне вгадування відповіді на питання другого рівня. Як наслідок, результати тестування мають спотворений характер.

Проаналізувавши вище вказані переваги та недоліки щодо інтерактивного тестування дисциплін, очевидним є той факт, що у порівнянні з традиційними формами проведення іспитів, пропонуємий різновид контролю знань є об'єктивним та якісним, який зменшує вплив суб'єктивних факторів на оцінку, яку отримав студент в процесі перевірки цього рівня знань з тієї чи іншої дисципліни [3].

На сьогодні існує велика кількість засобів, які забезпечують процес тестування знань. Усі вони схожі за набором характеристик та методів тестування. Найпопулярніші серед таких ресурсів є:

- learningapps ;
- online test pad;
- classmarker.

LEARNINGAPPS – це сервіс для підтримки навчального процесу шляхом створення та підтримки інтерактивних вправ ігрового характеру. Орієнтована на школярів та дорослих. Завдання найбільш придатні для узагальнення та систематизації знань з певної дисципліни. Вправи або блоки завдань не заміняють повноцінного уроку, вони можуть бути лише частиною певного виду діяльності під час уроку.

Цей сайт буде особливо цікавим для учнів молодших та середніх класів, оскільки вправи побудовані у формі незвичайних інтелектуальних ігор. Ви можете вибрати рівень складності завдань. Платформа підтримує 18 типів завдань: знайти пару, кросворди, класифікацію, хронологічний рядок, просте впорядкування, сортувати зображення, вводити текст, вікторину, заповнювати прогалини, сіткові програми, аудіо / відео вміст, «Хто хоче стати мільйонером?», Пазл «Вгадай-ка», шибениця, слова з букв, гра «Парочки». Категорія предметів найрізноманітніша: англійська, німецька, французька, іспанська, італійська, українська, російська та інші мови, інформатика, історія, інструменти, астрономія, біологія, географія, економіка, математика, мистецтво, музика, здоров'я, навколишній світ, політологія, релігієзнавство, професійну освіту, філософія, психологія, технічні науки, праці, фізкультура, фізика та хімія. Існує широкий діапазон мов інтерфейсу, включаючи українську. Викладач повинен створити обліковий запис із зазначенням його / її логіна / електронної пошти та пароля. Студенти також повинні зареєструватися, після чого викладач зможе додати їх до свого класу. Посилання на завдання можуть бути надіслані як QR-код, який система автоматично генерує для кожного завдання. Ви також можете додати посилання для вправ на свій сайт. На додаток до підготовлених вправ для інших користувачів, платформа дозволяє створювати власні завдання. Також можна залишити текст зворотного зв'язку за умови надання правильної відповіді. Створене завдання може бути відкритим (буде видимим для всіх користувачів) або закритим (доступне вам і студентам, яким ви надіслали посилання). Ваші власні завдання зберігаються, ви можете редагувати їх, якщо потрібно, змінювати видимість для конкретних користувачів тощо [4].

ONLINE TEST PAD – безкоштовний багатофункціональний сервіс для навчального процесу та тестування через Інтернет. Зручний веб-сайт для створення різних навчальних матеріалів та типів завдань та структурування їх у папки. Крім того, веб-сайт має величезну кількість завдань з предметів початкової школи. Інтерфейс представлений кількома мовами, включаючи українську. Він включає інтегрований конструктор тестів з безліччю налаштувань для типів запитань та результатів, статистичних звітів та стилів завдань. Формат тестових питань включає 17 варіантів: один або кілька правильних відповідей, відповідь у вільній формі, встановлення послідовності і відповідностей, заповнення пропусків, слайдер, службовий текст, завантаження файлу, послідовне виключення, інтерактивний диктант.

Конструктор кросвордів дозволяє створити 5 типів завдань: класичний кросворд, сканворд, японський кросворд, кольоровий японський кросворд, філворд. Платформа містить детальні вказівки, як зробити онлайн опитування за допомогою «Конструктора опитувань». У розділі «Діалогові симулятори» можна створювати розмовні ситуації з віртуальними учасниками різного ступеня складності, розгалуження та об'єктами. Подальша побудова мовної ситуації залежить від вибору перших фраз. Хороша можливість для вивчення іноземних мов. Розділ "Складні завдання" включає комбінацію необмеженої кількості тестових питань, кросвордів та логічних ігор. Цей формат підходить як для домашніх завдань, так і для індивідуальних та контрольних робіт. Завдання будь-якого типу можуть бути опубліковані для загального доступу до Інтернету. Вчитель отримує спеціальний html-код, який дозволить розмістити завдання на власному веб-сайті, в блозі. Вчитель може додавати нових користувачів, групувати їх у групи та організації [5].

CLASSMARKER – Сервіс англійською мовою для швидкого побудови тестових завдань та опитувань із найширшим форматом відповідей. Вчитель може створювати та редагувати свої тести та зберігати їх у банку завдань у своєму профілі. Вчитель створює свій клас, надсилаючи інформацію про реєстрацію студентів на електронну пошту кожного учня або надсилаючи реєстраційний код. Безкоштовна версія дозволяє виготовити максимум 100 тестів. Пакети розширених функцій коштують 16,50 доларів за 400 тестів на місяць або 33 долари за 1000 тестів на місяць. Якщо ви використовуєте Google Chrome, текст платформи може бути автоматично перекладений на російську мову. Цей ресурс також дозволяє продавати тести в Інтернеті з комісією в розмірі 10% від зазначеної суми.

До тестових завдань можна отримати швидкі посилання. До запитання можна додати зображення, аудіофайл, формулу чи відео. Далі визначаємо кількість варіантів відповіді. Також можна включити питання щодо зворотного зв'язку, кількості балів, шкали оцінок [6].

Одним із основних недоліків наявних програмних рішень являється неможливість автоматизовано генерувати тести для проходження. Відповідальним за тест особам доводиться самим генерувати тести з наявного банку питань, які вони створили, що передбачає значні витрати часу на створення варіацій одного і того ж тесту. Також вони не контролюють складність завдань в кожному тесті, що зменшує об'єктивність оцінювання та збільшує упередженість при оцінюванні.

Удосконалений алгоритм генерації тесту

Методи генерації тесту:

- параметризованих тестів;
- семантичних мереж;
- понятійно-тезисної моделі [7].

Метод параметризованих тестів полягає у тому, що різні студенти подають шаблонне завдання, яке відрізнятиметься де-якими параметрами, які генеруються автоматично [8]. Індивідуальне завдання отримує кожен студент, а система за певним алгоритмом чи формулою, підставляючи ці параметри, отримує правильну відповідь для подальшого порівняння її із правильною відповіддю, що була введена студентом. Недоліком такого підходу є його вузька предметна спрямованість.

Переваги методу:

- відсутність лексичних та семантичних невідповідностей;
- складність завдань є визначеною та відсутні повторення тестових завдань.

Тести добре підходять для організації контролю практичних навичок саме у точних науках і програмуванні, але їх не можна використовувати для перевірки теоретичних знань, а також контролю у гуманітарних науках – це є недолік параметризованого тестування.

Метод на основі семантичних мереж ґрунтується на використанні тріад [9]. Завдання тесту будують упущенням однієї із ланок тріади і запитанням про ланку, якої не вистачає.

Можливість контролю знань в різних науках – це перевага цього підходу.

Недоліками цього підходу є:

- лінгвістична незрозумілість, а іноді – недоцільність завдань, що генеруються;
- складність завдань не є визначеною та можливе повторення тестових завдань.

Метод понятійно-тезисної моделі - один із сучасних підходів. Основною ідеєю для формування тестових завдань є зв'язок "навчальний матеріал"—"тези"—"поняття" [10]. Створюються тестові шаблони, на основі яких відбувається генерація тестів. Модель цього методу передбачає можливість розширення множини класів користувачькими класами тез, що дозволяє розширювати модель і налаштовувати її для різних предметних областей.

Переваги даного методу:

- краща лексична зрозумілість у порівнянні із семантичними мережами;
- можливість контролю знань в різних науках.

Заздалегідь невизначена складність завдань і можливість повторення тестових завдань – є недоліками цього методу.

Порівняльна характеристика методів наведена в таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика методів

Назва методу	Відсутність семантичних та лексичних невідповідностей	Можливість контролю знань в різних науках	Заздалегідь визначена складність завдання	Неможливість повторення тестових завдань
Параметризованих тестів	+	-	+	+
Семантичних мереж	-	+	-	-
Понятійно-тезисної моделі	+	+	-	-

Отже, описані вище підходи не керують складністю тестових завдань, допускають значні семантичні та лексичні невідповідності, а також тестові завдання можуть повторюватися та мати одну тематику. Враховуючи всі згадані недоліки слід використовувати метод автоматичної генерації тестових завдань на основі методу параметризованих тестів, який має такі особливості:

- тематики тестових завдань не повторюються, за виключенням, коли тестових завдань буде більше, чим тематик;
- тестові завдання не повторюються;
- тестові завдання будуть заздалегідь прописані, що дасть змогу уникнути семантичних та лексичних помилок;
- заздалегідь буде визначена складність тестових завдань;
- використання для перевірки теоретичних та практичних знань.

Такий алгоритм складатиметься з етапів:

1. Створення банку тематичних тестових завдань та занесення їх у відповідну базу тестів
2. Налаштування тесту (визначення тривалості тестування, кількості питань кожного рівня складності, можливості повторення тем тестових завдань, співвідношення теоретичних та практичних питань).
3. Генерація тестового завдання, що містить визначену кількість тематичних тестів з урахуванням заданих налаштувань.

Деталізований алгоритм автоматизованої генерації *i*-го тесту представлено UML-діаграмою активності на рисунку 1 та містить такі кроки:

Крок 1. Зчитування налаштувань обраного тесту.

Крок 2. Вибір випадкового запитання низької складності.

Крок 3. Якщо запитання вже існує, то перехід до кроку 2, ні – крок 4.

Крок 4. Якщо необхідну кількість згенеровано, то перехід до кроку 5, ні – крок 2.

Крок 5. Вибір випадкового запитання середньої складності.

Крок 6. Якщо запитання вже існує, то перехід до кроку 5, ні – крок 7.

Крок 7. Якщо необхідну кількість згенеровано, то перехід до кроку 8, ні – крок 5.

Крок 8. Вибір випадкового запитання високої складності.

Крок 9. Якщо запитання вже існує, то перехід до кроку 8, ні – крок 10.

Крок 10. Якщо необхідну кількість не згенеровано, то перехід до кроку 11, ні – крок 8.

Крок 11. Кінець генерації

Запропонований алгоритм забезпечує відсутність повторень тематичних тестових завдань та складатиметься з їх встановленої кількості з певною визначеною складністю.

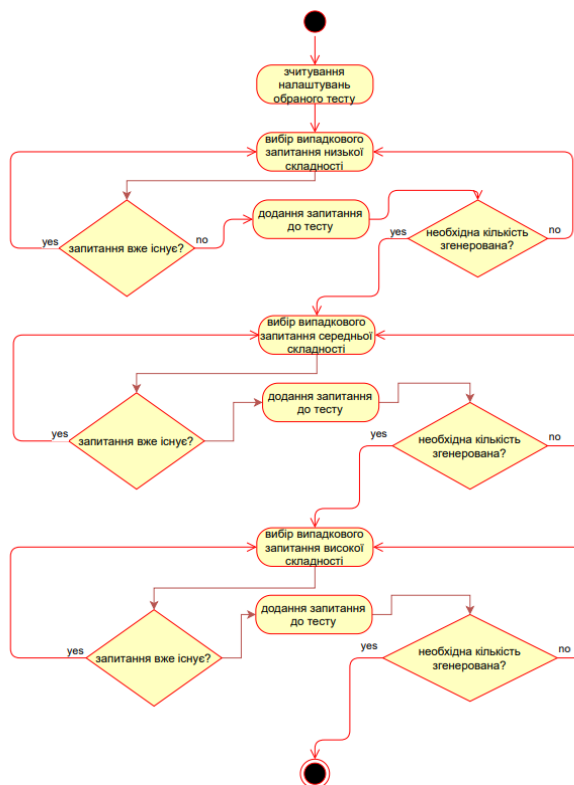


Рисунок 1 – UML-діаграма активності автоматизованої генерації тесту

Проектування структури програмного модуля інтерактивного тестування знань

Програмний модуль інтерактивного тестування знань має виконувати такі функції:

- виведення списку тестів для проходження;
- генерації тесту;
- виведення тестових завдань;
- підрахунку результату;
- виведення результату;
- створення тесту ;
- редагування тесту.

Для реалізації означених функцій модуль інтерактивного тестування знань повинен включати: 1) модуль генерації; 2) модуль тестування; 3) модуль створення та редагування банку завдань.

Генерацію тесту виконує модуль генерації. Головна задача модуля генерації – автоматизована генерація тесту. Також він дає змогу редагувати тест, а саме змінити його налаштування та згенерувати його знову.

Модуль взаємодіє з базою даних: отримує налаштування обраного тесту; отримує всі завдання, які знаходяться у базі даних; зберігає автоматизовано згенерований інтерактивний тест до бази даних.

Окремий модуль реалізує такі важливі функції як: виведення тематичних тестових завдань; виведення можливих для проходження інтерактивних тестів; підрахунок правильних відповідей; виведення результату проходження інтерактивного тесту.

Це модуль тестування. Модуль взаємодіє з базою даних, а саме отримує список інтерактивних тестів, також отримує завдання тесту та відповіді до них. Модуль функціонує за таким узагальненим алгоритмом:

1. Виводить список інтерактивних тестів доступних для проходження.
2. Після початку тестування він отримує завдання відповідного тесту та правильну відповідь.
3. Виводить запитання інтерактивного тесту та його відповіді.
4. Зчитує та запам'ятовує відповіді користувача.
5. Після закінчення інтерактивного тесту видає результат проходження, в якому детально описано правильність даних відповідей. Якщо відповідь буде правильною, користувач отримає повідомлення про правильність даної відповіді на дане запитання. Також, якщо відповідь невірна, буде видано повідомлення про неправильність відповіді на дане запитання.

За функції створення та редагування банку завдань відповідає модуль створення та редагування банку завдань, який взаємодіє з базою даних, а саме отримує інформацію, записує інформацію та редагує інформацію в базі даних. Модуль дає можливість: створювати тематичні завдання в базі даних; редагувати тематичні завдання в базі даних; видаляти тематичні завдання в базі даних; виставляти тип тематичного завдання; виставляти тему тематичного завдання; виставляти рівень складності тематичного завдання.

Взаємодія між складовими програмного модуля інтерактивного тестування знань наведена на рисунку 2.

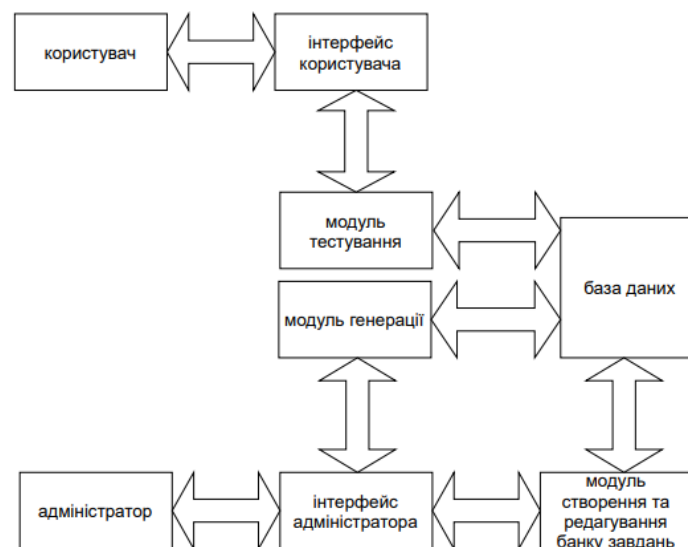


Рисунок 2 – Взаємодія між складовими програмного модуля інтерактивного тестування знань

Висновки

1. Проаналізовано переваги та недоліки стосовно інтерактивного тестування дисциплін. Очевидним є той факт, що в порівнянні з традиційними формами іспитів, пропонуємий різновид контролю є у достатній мірі об'єктивним та якісним, який по можливості зменшує вплив суб'єктивних факторів на отриману оцінку студентом у процесі перевірки рівня знань з тієї чи іншої дисципліни.
2. Проаналізовано методи генерації тесту, виявлено їх переваги та недоліки, завдяки чому розроблено удосконалений алгоритм генерації тесту, наведено його основні кроки та UML-діаграма.
3. Розроблено структуру програмного модуля інтерактивного тестування знань та наведена детальна взаємодія модулів між собою.

Список літератури

- [1] В. В. Божкова, Л. Ю. Сагер, «Тестування як форма контролю знань: переваги та недоліки», *Сучасні проблеми вищої освіти України в контексті інтеграції до європейського освітнього простору*, с. 113-115.
- [2] С. І. Мединська, «Тестування як засіб організації та реалізації диференціації навчання при викладанні іноземних мов у немовному ВНЗ», *Вісник Дніпропетровського університету імені Альфреда Нобеля*, № 2 (2), с. 71-82.
- [3] Інтерактивне тестування, переваги та недоліки інтерактивного тестування. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.smartboard.com.ua/articles/130>. Дата звернення: 05 груд. 2022.
- [4] Learningapps. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://learningapps.org>. Дата звернення: 05 груд. 2022.
- [5] Online test pad. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://onlinetestpad.com>. Дата звернення: 05 груд. 2022.
- [6] Classmarker. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.classmarker.com/onlinetesting>. Дата звернення: 05 груд. 2022.
- [7] Методи та засоби автоматичної генерації тестових завдань. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://svitppt.com.ua/rizne/metodi-ta-zasobi-avtomatichnoi-generacii-testovih-zavdan.html>. Дата звернення: 05 груд. 2022.
- [8] Метод параметричних тестів. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://dspace.wunu.edu.ua/bitstream/316497>. Дата звернення: 05 груд. 2022.
- [9] Метод семантичних мереж. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://ki.lutsk-ntu.com.ua/node/118>. Дата звернення: 05 груд. 2022.
- [10] Метод генерації тестових завдань на основі понятійно-тезисної моделі. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/332470453>. Дата звернення: 05 груд. 2022.

Стаття надійшла: 05.12.2022.

References

- [1] V. V. Bozhkova, L.Yu. Sager, «Testing as a form of knowledge control: advantages and disadvantages», *Modern problems of higher education of Ukraine in the context of European integration educational space*, с. 113-115 [in Ukrainian].
- [2] S. I. Medinska, «Testing as a means of organizing and implementing the differentiation of learning in the teaching of foreign languages in a non-linguistic university», *Bulletin of the Dnipropetrovsk Alfred Nobel University*, no. 2 (2), p. 71-82 [in Ukrainian].
- [3] Interactive testing, advantages and disadvantages of interactive testing. [Online]. Available: <http://www.smartboard.com.ua/articles/130> [in Ukrainian]. Accessed on: 05. 12. 2022.
- [4] Learningapps. [Online]. Available: <https://learningapps.org>. Accessed on: 05. 12. 2022.
- [5] Online test pad. [Online]. Available: <https://onlinetestpad.com>. Accessed on: 05. 12. 2022.
- [6] Classmarker. [Online]. Available: <https://www.classmarker.com/online-testing>. Accessed on: 05. 12. 2022.
- [7] Methods and means of automatic generation of test tasks. [Online]. Available: <https://svitppt.com.ua/rizne/metodi-ta-zasobi-avtomatichnoi-generacii-testovih-zavdan.html>. Accessed on: 05. 12. 2022 [in Ukrainian].
- [8] The method of parametric tests. [Online]. Available: <http://dspace.wunu.edu.ua/bitstream/316497>. Accessed on: 05. 12. 2022 [in Ukrainian].
- [9] Method of semantic networks. [Online]. Available: <http://ki.lutsk-ntu.com.ua/node/118>. Accessed on: 05. 12. 2022. [in Ukrainian].
- [10] The method of generating test tasks based on the conceptual-thesis model. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/332470453V>. Accessed on: 05. 12. 2022 [in Ukrainian].

Відомості про авторів

Савицька Людмила Анатоліївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри обчислювальної техніки.

Тарновський Микола Генадійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри обчислювальної техніки.

Герасик Олександр Сергійович – студент групи 2КІ-21м, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії.

L. A. Savytska, M. H. Tarnovskyi, O. S. Gerasyk

**INTERACTIVE KNOWLEDGE TESTING SOFTWARE
MODULE**

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia

УДК 04.31

О. К. Тесленко, Г. О. Тарасенко, Я. М. Клятченко

НЕРОЗДІЛЬНІ БЛОЧНІ 9-РОЗРЯДНІ ЗАВАДОСТІЙКІ КОДИ ДЛЯ ВИПРАВЛЕННЯ ОДНОРАЗОВОЇ ПОМИЛКИ

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

Анотація. З бурхливим розвитком цифрових телекомунікаційних технологій актуалізується використання нових методів для підвищення швидкості та надійності передачі даних. До таких методів можна віднести кодування даних, що засновано на штучному введенні надмірності і дозволяє стороні одержувача не тільки виявляти спотворення переданих даних, а й формувати правильні значення. Роздільні коди (наприклад, коди Хемінга) поступаються нероздільним корегуючим кодам у швидкості. Але підвищення швидкості передачі даних для нероздільних кодів вимагає використання складних, багатомісних алгоритмів для пошуку максимальних кодів. Це збільшує час визначення завадостійких кодів в порівнянні з роздільними кодами, але підвищує швидкість передавання даних в експлуатації при однакових можливостях завадостійкості. Пропонується технологія, яка заснована на використанні 9-розрядних нероздільних блочних кодів та кодеків/декодерів для них, враховуючи, що загальна теорія їх побудови на даний момент відсутня. Враховуючи особливості реалізації спеціалізованих пристроїв на інтегральній технології, найбільш сприятливим є використання технології ПЛІС. Для практичної реалізації універсальних кодеків/декодерів 9-розрядних нероздільних кодів пропонується підхід із використанням ПЛІС, які можуть бути налаштовані на будь-який із цих кодів з будь-якими десятковими цифрами (нероздільні коди не мають інформаційних та перевірочних частин). Такі властивості нероздільних блочних кодів дозволяють збільшити швидкість передачі двійково-кодованих десяткових слів. Також, отримані результати можуть бути підґрунтям для розвитку теорії і практики застосування блочних нероздільних кодів при зростанні розміру блока та можуть бути обнадійливим фактором що стосується аналізу нероздільних кодів у випадку виправлення двох і більше помилок.

Ключові слова: корекція помилок, передача даних, булева функція, код Хемінга, нероздільні блочні коди.

Abstract. With the rapid development of digital telecommunication technologies, the usage of new methods to increase the speed and reliability of data transfer is becoming more relevant. Examples may include data encoding based on the artificial introduction of redundancy and enabling the receiving side not only to detect data distortions but also to form correct values. The separable codes (for example, the Hamming codes) are inferior to non-separable error correction codes in speed. But the increase in the speed of data transmission requires utilising complex, multipositional algorithms for searching maximal codes. This leads to an increase in the time of static proof codes determination compared to separable codes, although the speed of data transmission in operation is increased as well, having identical capacities for fault resistant. Technology is proposed that is based on using 9-bit non-separable codes and the encoders/decoders for them, factoring in the fact of absence of the generalised theory of building them. Factoring in the aspects of specialised devices implementation based on an integral technology, the usage of FPGA technology is the most opportune. For practical implementation of universal encoders/decoders for 9-bit non-separable codes, an approach is proposed utilising FPGA that can be configured to any of these codes with any decimal numbers (the non-separable codes do not contain informational and test parts). Such properties of non-separable codes enable increasing the transmission speed of BCD words. Additionally, the obtained results could be a basis for the further development of a theory and practice for employing the block inseparable codes when the block size increases and it is a reassuring factor as for the analysis of non-separable codes in case of two or more errors correction.

Key words: error-correcting code, data transmission, boolean functions, Hamming code, non-separable block codes.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-56-1-30-34>.

Вступ

Теоретична швидкість блочних завадостійких кодів визначається як $R = (\log_2 N_k)/n$, де N_k – кількість кодослів у коді, n – їх розрядність, d – найменша відстань Хемінга між будь-якими кодословами коду (у випадку виправлення одноразової помилки $d=3$) [1]. Значного розвитку набула теорія та практика побудови блочних роздільних кодів, де існує чіткий розподіл між інформаційними та додатковими бітами. Прикладами таких кодів є коди Хемінга, Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема та ін. Перевагою у використанні таких кодів є те, що можна аналітично визначити дозволені комбінації, а також те, що можна порівняно нескладно реалізувати такі кодеки та декодери. У нероздільних блочних кодах надлишковість вводиться шляхом знаходження множини дозволених кодів, в якій між кожною парою кодових слів відстань за Хемінгом не менша ніж d [2]. В той же час значно менше вивчені нероздільні коди, де не існує розділу на інформаційні та додаткові біти. Перевага нероздільних кодів може полягати в збільшенні швидкості завдяки збільшенню N_k при одній і тій же розрядності. Так, наприклад, для 8-розрядного коду Хемінга $N_k = 16$. В [3] теоретично доведено, що для 8-розрядного нероздільного коду $N_k = 20$. Недоліком нероздільних кодів є складність їх побудови, оскільки визначення N_k пов'язано з пошуком максимальної кліки в графі. Така задача в загальному випадку відноситься до NP – повних задач [4].

Актуальність

В роботі [5] наведено 8-розрядний нероздільний блочний код на максимальну кількість 20 кодослів в коді, запропонована реалізація на ПЛІС кодеків та декодерів такого коду у випадку передачі послідовності із упакованих двійково-десяткових чисел. Показано, що швидкість передачі всього потоку збільшується на 25% порівняно з 8-розрядними кодами Хемінга. Можна очікувати, що при використанні 9-розрядного нероздільного коду швидкість передачі потоку ще можна збільшити.

О.К. Тесленко, Г. О. Тарасенко, Я. М. Клятченко, 2023

Мета

Метою даної роботи є визначення ефективних рішень із використанням 9-розрядного нероздільного коду для підвищення швидкості передачі потоку.

Задачі

1. Визначення блочних нероздільних 9-розрядних кодів.
2. Реалізація кодеків/декодерів для цих послідовностей.
3. Оцінка результатів з точки зору підвищення швидкості передачі даних.

Розв'язання задач

Один із можливих методів визначення таких кодів базується на тому факті, що максимальна кількість кодослів 9-розрядного коду для виправлення однієї помилки дорівнює 40 [5]. Його можна побудувати із двох 8-розрядних нероздільних кодів. Дійсно, зафіксувавши один із розрядів кожного кодослова, ми розіб'ємо 9-розрядний код на два 8-розрядні коди – з 0 або 1 у вибраному розряді. Кожен з цих утворених кодів не може мати більше ніж 20 кодослів [4]. При цьому дистанція між ними не менша за 2. Дистанцію між двома кодами $C_1(n, N_1, d)$ та $C_2(n, N_2, d)$ будемо визначати як найменшу відстань між будь-якими кодословами двох кодів. Для пошуку можна скористатись результатами визначення всіх 8-розрядних нероздільних кодів, наведеними в [6]. Загальна кількість різних максимальних 8-розрядних кодів значна – 403200. Перебір всіх можливих пар можна значно скоротити, оскільки в різних кодах є кодослова, що збігаються, тому відстань між ними буде дорівнювати нулю. Наприклад, більша частина всіх 8-розрядних кодів мають в своєму складі нульове кодослово.

Експериментальним шляхом було визначено декілька пар з відстанню між кодами, що дорівнює 2. Приклад однієї із таких пар наведений в табл. 1.

Таблиця 1 – Варіанти кодослів

0	7	25	30	42	53	75	84	108	115	140	147	161	175	182	184	197	218	226	253
13	18	35	60	70	72	81	95	101	122	138	149	164	187	195	220	233	238	240	247

Побудова 9-розрядного коду полягає в установці дев'ятого розряду в кодословах одного із 8-розрядних кодів в 0 і в 1 – в іншому.

Із результату по табл.1 можна отримати наступні два максимальні 9-розрядні коди на 40 кодослів (табл. 2 та табл. 3).

Таблиця 2 – Перший 9-розрядний код $C(9,40,3)$

0	7	25	30	42	53	75	84	108	115	140	147	161	175	182	184	197	218	226	253
---	---	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Таблиця 2 (продовження)

269	274	291	316	326	328	337	351	357	378	394	405	420	443	451	476	489	494	496	503
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Таблиця 3 – Другий 9-розрядний код $C(9,40,3)$

13	18	35	60	70	72	81	95	101	122	138	149	164	187	195	220	233	238	240	247
----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Таблиця 3 (продовження)

256	263	281	286	298	309	331	340	364	371	396	403	417	431	438	440	453	474	482	509
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Для реалізації кодеків та декодерів для кодів $C(9,40,3)$ розглянемо наступне. Як і в [5], будемо розглядати передавання потоку з упакованих двійково-десяткових чисел. Позначимо через j номер чергового байту послідовності двійково-десяткових чисел ($j \in \{1, 2, \dots\}$). Сорок кодових слів обумовлюють встановлення порядку для кодування двійково-десяткових цифр та двох бітів наступної цифри, як наведено в таблиці 4.

Таблиця 4 – Порядок кодування

Цифра 2_j				Цифра 2_{j-1}			
Біт 3	Біт 2	Біт 1	Біт 0	Біт 3	Біт 2	Біт 1	Біт 0

Кодування залишку попереднього байту та наступного байту згідно з табл. 5.

Таблиця 5 – Порядок кодування залишку

Цифра 2_{j+1}				Цифра 2_j			
Біт 3	Біт 2	Біт 1	Біт 0	Біт 3	Біт 2	Біт 1	Біт 0

Кодек може бути реалізований як комбінаційна схема (КС1) на шість входів і дев'ять виходів, для чого знадобиться лише 9 блоків LUT FPGA [7]. Кожен з блоків LUT можна налаштувати на реалізацію булевої функції від 6 змінних, які створюються згідно з налаштуваннями, як показано в табл.6.

Таблиця 6 – Налаштування ПЛІС для реалізації кодека C(9,40,3)

In	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09
Out	0	7	25	30	42	53	75	84	108	115
In	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Out	140	147	161	175	182	184	197	218	226	253
In	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
Out	269	274	291	316	326	328	337	351	357	378
In	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
Out	394	405	420	443	451	476	489	494	496	503

На інших входах булеві функції невизначені, і їм можуть бути задані будь-які значення з метою оптимізації по інших критеріях. Реалізований таким чином кодек можна використати для кодування як згідно табл. 4, так і табл. 5. Формування окремого кодека по табл. 5 є недоцільним.

Декодер, що може бути реалізовано згідно з табл. 4, виглядатиме як комбінаційна схема (КС2) на дев'ять входів та сім виходів. Із них 6 виходів-для значень розрядів результату декодування. Вони визначаються по табл. 4, якщо входи і виходи поміняти місцями та за умови відсутності помилок. Таким порядком визначаються булеві функції лише на 40 із 512 можливих вхідних даних. На інших $Nk \cdot n = 360$ вхідних даних булеві функції визначаються як результат виправлення одноразових помилок. Приклад такого визначення наведено в табл. 7.

Таблиця 7 – Декодування значень в результаті одноразової помилки

Input: значення в результаті одноразової помилки в кодослові 0									Output
256	128	64	32	16	8	4	2	1	00
Input: значення в результаті одноразової помилки в кодослові 7									
263	135	71	39	23	15	3	5	6	01
...									
Input: значення в результаті одноразової помилки в кодослові 269									Output
13	397	333	301	285	261	265	271	268	29
...									
Input: значення в результаті одноразової помилки в кодослові 496									Output
240	368	432	464	480	504	500	498	241	38
Input: значення в результаті одноразової помилки в кодослові 503									Output
247	375	439	471	487	511	499	501	502	39

Решта вхідних значень можуть з'явитись лише в результаті двох і більше помилок. На сьомому виході КС2 з'являється ознака багатократних помилок при передаванні даних по каналу зв'язку. Булева функція від 9 змінних на сьомому виході приймає значення 0 на вхідних даних згідно з порядком в табл. 6 і табл. 7. На інших наборах вхідних даних ця функція приймає значення 1 як ознаку багатократних спотворень, які виявляє декодер. Для побудови декодера згідно з табл.5 ця функція додатково приймає значення 1 і на вхідних даних, заданих відповідно до останнього рядка табл. 6.

Реалізація декодера на ПЛІС дещо складніша, ніж реалізація кодека. Використовуючи розклад Шеннона, будь-яку булеву функцію від 9 змінних можна реалізувати не більше ніж на трьох слайсах (slices) сучасних ПЛІС FPGA. На двох слайсах реалізуються дві будь-які функції від 8 змінних, а на третьому –

функція від 9 змінних. Таким чином, знадобиться не більше ніж 21 слайс, що значно менше за їх загальну кількість в одній мікросхемі.

Далі виконаємо оцінку швидкості передавання даних. Теоретично перевага у швидкості запропонованого 9-розрядного нероздільного коду перед 9-розрядним кодом Хемінга з п'ятьма інформаційними та чотирма додатковими розрядами очевидна при передаванні будь-яких даних. Дійсно, показник теоретичної швидкості для 9-розрядного нероздільного коду $R=(\log 2Nk)/n = (\log 240)/9$ – не менше 0.59, а 9-розрядного коду Хемінга – не більше 0.56. Але у випадку передавання послідовностей десяткових чисел ця перевага збільшується.

Зауважимо, що показник теоретичної швидкості для нероздільного 8-розрядного коду [5]- 0.54.

Нехай необхідно передавати потік із s десяткових чисел або $4s$ біт. Для забезпечення стійкості від одиничних спотворень послідовність $4s$ біт розбивається на блоки по 6 біт, які потім кодуєм нероздільного 9-ти розрядного коду перетворюються у 9-бітні блоки. Об'єм даних для передавання – $(4s/6)*9 = 6s$ біт.

У випадку 9-розрядного коду Хемінга маємо – $(4s/5)*9 = 7,2s$ біт. Отже, об'єм переданих даних збільшується у 1,2 рази.

Висновки

1. Таким чином, збільшення швидкості передачі даних для нероздільних кодів вимагає використання трудомістких алгоритмів пошуку максимальних кодів. Це збільшує час визначення завадостійких кодів в порівнянні з роздільними кодами, але підвищує швидкість передавання даних в експлуатації при однакових можливостях завадостійкості.

2. Ефективне застосування ПЛІС-технологій дозволяє значно скоротити витрати на практичну реалізацію кодеків та декодерів, що є надійним підґрунтям застосування таких нероздільних кодів. Порівняно незначні за кількістю витрати елементів дозволяють отримати прийнятні результати для засобів передачі інформації на ПЛІС, що входять до складних пристроїв обробки інформації.

3. Одержані результати є підґрунтям для розвитку теорії і практики застосування блочних нероздільних кодів при зростанні розміру блока. Подальші дослідження стосуються аналізу нероздільних кодів у випадку виправлення двох і більше помилок.

Список літератури

- [1] Richard E. Blahut, *Theory and practice of error control codes*. Addison-Wesley Pub. Co. edition, in English, 1983.
- [2] Elwyn R. Berlekamp (2014), *Algebraic Coding Theory*, World Scientific Publishing (revised edition).
- [3] Maryna S. Viazovska, "The sphere packing problem in dimension 8", *Annals of Mathematics SECOND SERIES*, vol. 185, no. 3 (May, 2017), pp. 991-1015.
- [4] Johnston, H. C. (1976), "Cliques of a graph—variations on the Bron–Kerbosch algorithm", *International Journal of Parallel Programming*, 5 (3): 209–238.
- [5] Y. Klyatchenko, O. Tarasenko-Klyatchenko, G. Tarasenko, O. Teslenko, "The Problems and Advantages of Using Non-separable Block Codes", *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies this link is disabled*, Springer, April 2022, 134, pp. 271–278. https://doi.org/10.1007/978-3-031-04812-8_23.
- [6] Звіт про науково-дослідну роботу МЕТОДИ ОЦІНКИ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НЕОБХІДНОГО РІВНЯ ТЕХНІЧНОЇ БЕЗПЕКИ РОБОТИ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ БАГАТОПРОЦЕСОРНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ. Науковий керівник Романкевич О. М. № держреєстрації 0115U000323, 2017, 158 с.
- [7] Summary of Virtex-6 FPGA Features. Virtex-6 Family Overview. XILINX DS150 (v2.5) August 20, 2015.

Стаття надійшла: 06.02.2023.

References

- [1] Richard E. Blahut, *Theory and practice of error control codes*. Addison-Wesley Pub. Co. edition, in English, 1983.
- [2] Elwyn R. Berlekamp (2014), *Algebraic Coding Theory*, World Scientific Publishing (revised edition).
- [3] Maryna S. Viazovska, "The sphere packing problem in dimension 8", *Annals of Mathematics SECOND SERIES*, vol. 185, no. 3 (May, 2017), pp. 991-1015.
- [4] Johnston, H. C. (1976), "Cliques of a graph—variations on the Bron–Kerbosch algorithm", *International Journal of Parallel Programming*, 5 (3): 209–238.
- [5] Y. Klyatchenko, O. Tarasenko-Klyatchenko, G. Tarasenko, O. Teslenko, "The Problems and Advantages of Using Non-separable Block Codes", *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies this link is disabled*, Springer, April 2022, 134, pp. 271–278. https://doi.org/10.1007/978-3-031-04812-8_23.

- [6] Report on research work METHODS FOR EVALUATION AND PROVISION OF THE REQUIRED LEVEL OF TECHNICAL SAFETY OF SPECIALISED MULTIPROCESSOR CONTROL SYSTEMS. Supervisor: Romankevich O.M. State registration number 0115U000323, 2017, 158 p. [in Ukrainian].
- [7] Summary of Virtex-6 FPGA Features. Virtex-6 Family Overview. XILINX DS150 (v2.5) August 20, 2015.

Відомості про авторів

Тесленко Олександр Кирилович – кандидат технічних наук, доцент кафедри системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем.

Тарасенко Георгій Олегович – аспірант кафедри системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем.

Клятченко Ярослав Михайлович – кандидат технічних наук, доцент кафедри системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем.

O. K. Teslenko, G. O. Tarasenko, Ya. M. Klyatchenko

NON-SEPARABLE BLOCK 9-BIT FAULT RESISTANT SINGLE ERROR CORRECTION CODES

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv

УДК 004.4

Т. А. Чупілко, О. С. Чупілко, М. Ф. Мормуль

ПРОЕКТУВАННЯ І ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ВІДВІДУВАНОСТІ ТА АНАЛІЗУ ДАНИХ В ЗАКЛАДАХ ОСВІТИ

Університет митної справи та фінансів, Дніпро

Анотація. Робота присвячена дослідженню оптимального способу контролю відвідуваності закладів освіти учнями як викладачами, так і батьками: проектуванню і реалізації автоматизованої системи, яка дозволяє спростити цей процес, розробити необхідні звіти, включаючи оповіщення батьків інформацією про відвідуваність їх дітей; створення модулів для аналізу отриманої інформації з використанням методів математичного моделювання та мови програмування Python і бібліотек для обробки даних. Принцип роботи системи полягає в тому, що інформація про учня, який прийшов до закладу освіти, зчитується сканером та пересилається на локальний комп'ютер, де вона і зберігається. На цьому ж комп'ютері проводиться аналіз збереженої інформації та формуються необхідні звіти. Також в іншому підході до розробки системи використовується хмарний сервер. Аналізуються проблеми і недоліки, що виникають при різних можливостях організації автоматизованої системи. Для збереження інформації на комп'ютері, до якого приєднаний сканер, розглядаються підходи, засновані на використанні мови Python, що дозволяє легко переносити дані в різні бази даних, включаючи Access та MySQL, та інший, де сканована інформація одразу зберігається у базі даних Access, яка розташована на комп'ютері, до якого приєднаний сканер. Розроблено і реалізовано структури бази даних для збереження і обробки інформації. Система генерує різні звіти з необхідною інформацією, що може бути підставою для прийняття певних рішень: наприклад, звіт для столової про кількість учнів по класам, про загальну кількість дітей в школі, загальну кількість присутніх та відсутніх в абсолютних значеннях та відносних і т.ін. Для надсилання повідомлень було використано сучасний месенджер Telegram. Для реалізації ідеї було використано BotFather та функцію даної платформи, що дозволяє створювати автоматичних роботів для виконання завдань розсилки її користувачам. Логіка боту контролюється за допомогою HTTPS запитів до API системи для роботів. За допомогою SQL-запитів вилучається потрібна інформація, яка передається у розроблений програмний модуль для проведення аналізу по окремій групі учнів або в цілому по закладу. Використовуються регресійні методи аналізу в програмному режимі за допомогою інструментів Python. Роботу зі створення реалізації автоматизованої інтелектуальної системи було виконано на замовлення закладу середньої освіти.

Ключові слова: автоматизована система, база даних, Python, аналіз даних, моделювання.

Abstract. The work is devoted to the research of the optimal method of monitoring the attendance of educational institutions by students, both teachers and parents: the design and implementation of an automated system that allows to simplify this process, to develop the necessary reports, including notifying parents with information about the attendance of their children; creating modules for analyzing the received information using mathematical modeling methods and the Python programming language and libraries for data processing. The principle of operation of the system is that the information about the student who came to the educational institution is read by a scanner and sent to the local computer, where it is stored. On the same computer, the stored information is analyzed and the necessary reports are generated. Another approach to system development also uses a cloud server. Problems and shortcomings arising from various possibilities of organizing an automated system are analyzed. To save information on the computer to which the scanner is connected, approaches based on the use of the Python language are considered, which allows easy transfer of data to various databases, including Access and MySQL, and another where the scanned information is immediately stored in the Access database, which is located on the computer to which the scanner is connected. Database structures for storing and processing information have been developed and implemented. The system generates various reports with the necessary information, which can be the basis for making certain decisions: for example, a report for the dining hall on the number of students by class, on the total number of children in the school, the total number of people present and absent in absolute and relative terms, etc. The modern Telegram messenger was used to send messages. To implement the idea, Bot Father and the function of this platform were used, which allows you to create automatic robots to perform mailing tasks to its users. The bot logic is controlled using HTTPS requests to the bot system API. With the help of SQL queries, the necessary information is extracted, which is transferred to the developed software module for analysis on a separate group of students or on the institution as a whole. Regression analysis methods are used in software mode using Python tools. The work on the creation and implementation of an automated intellectual system was carried out on the order of a secondary education institution.

Key words: automated system, databases, Python, data analysis, modeling.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-56-1-35-43>.

Вступ

В освіті завжди є важливим питання надання якісних освітніх послуг. Це стосується закладів і середньої, і вищої освіти. Наразі в освітньому процесі найбільш розповсюдженою є модель змішаної форми навчання: заняття проводиться в оф-лайн і он-лайн режимах. Успішність засвоєння навчального матеріалу залежить від багатьох чинників. Важливу роль відіграють заняття в аудиторії. Особливо важливим стає облік присутніх студентів під час епідемії або воєнних дій в країні. Інформаційні технології використовуються в багатьох сферах нашого життя. Але в закладах освіти залишається багато рутинної паперової роботи, що пов'язана з навчальним процесом. Зокрема, облік і аналіз відвідуваності, пов'язані з цим якісні показники успішності проводяться деканатами і викладачами зазвичай вручну, в найкращому випадку – з допомогою електронних таблиць. Серед нагальних потреб в удосконаленні навчального процесу є проблеми, пов'язані з різноманітною звітністю, де використовуються одні й ті самі відомості по студентам, викладачам, дисциплінам і т. ін. Як і 20 років тому, всі відомості збираються кожного разу заново, враховуючи необхідну форму звітності. Давно вже настав час впровадити автоматизацію в навчальний процес для різних завдань, що виникають в закладах освіти.

Найкраще було б вирішити цю проблему на рівні країни, щоб заклади освіти мали готові автоматизовані інформаційні системи, розроблені фахівцями і запроваджені МОН.

Тож, однією з багатьох проблем є автоматичний облік відвідувань студентами аудиторних занять, участі в конференціях, різного типу засіданнях та інших заходах і аналіз даних, отриманих на основі зібраних відомостей. Також аналогічні питання постають в закладах середньої освіти, але ускладнюється тим, що потрібен зв'язок з батьками неповнолітніх учнів. Є відомі приклади застосування обмежених аналогів в школах деяких країн, зокрема, в Фінляндії система «Robo» та в Китаї «Розумна форма». В 2000-х р.р. була спроба в Україні створити студентський квиток з чипом, який міг використовуватися не тільки як документ, що посвідчує особу, а і в якості документа для електронної ідентифікації, що використовується для проведення фінансових операцій, оплати проїзду в транспорті і т. ін. З іншого погляду, автоматизована система може знайти застосунок і в школах, і в інших закладах, де здобувачі освіти не мають електронних документів з чипами. В нашому побуті наразі присутні технології ідентифікації особи за розпізнаванням обличчя, скануванням відбитку пальців або сітківки ока. Однак, зазначені технології авторизації не можуть використовуватися для публічної інформації. Найбільш прийнятний спосіб для зазначеної проблеми – використання електронної картки як підтвердження особи.

В цій роботі запропоновано проект і програмну реалізацію автоматизованої системи збору інформації щодо відвідувань, а також інтелектуальну обробку отриманих даних. Програмний проект зорієнтовано на потреби середньої освіти, тобто закладів освіти, де потрібен зв'язок з батьками учнів. Збір інформації проводиться при вході учнів до школи за допомогою сканерів магнітних карток, смарт-карт або QR-кодів, які підключені до комп'ютера через usb-порт. Кожен учасник навчального процесу має картку (брелок) з унікальним ідентифікатором, який зчитується сканером при вході у навчальний заклад. Зчитаний код разом з поточним часом і датою передається в базу даних для збереження, після чого батькам студента (учня) відправляється на Telegram повідомлення про те, що їх дитина прийшла до закладу. В повідомленні вказується ім'я та прізвище дитини, клас, час приходу до школи. Крім того, у визначений час автоматично генеруються звіти, необхідні для прийняття рішень за результатами аналізу даних з відвідування учнями школи. Серед них дані для столової щодо кількості учнів по класам, що снідають у школі в поточний день, аналіз даних про відсоток відвідуваності в період епідемій та інше. Також в системі присутній модуль, що дозволяє моделювати, прогнозувати дані і графічно представляти результати досліджень в програмному режимі за допомогою Python.

Актуальність

Актуальність обраної теми обумовлена тим, що в навчальних закладах для організації навчального процесу та пов'язаного з цим документообігу, упорядкуванню і аналізу різного типу даних практично відсутня автоматизація та інтелектуальна обробка за допомогою комп'ютерних технологій. В цій роботі представлено проект і реалізацію частини такої автоматизованої системи в навчальному закладі, яка може бути доповнена і розширена на інші види обробки даних в деканатах, бібліотеках, кафедрах або фахових комісіях, особистих застосунках викладачів і т. ін. для створення потрібної звітності і аналізу досліджуваних показників. Відвідуваність, під якою ми розуміємо систему присутності студентів або учнів на заняттях з метою засвоєння освітньої програми, є важливою складовою освітнього процесу. Навчальна відвідуваність тісно пов'язана з вирішенням низки організаційних завдань навчального процесу, моральних та соціальних проблем сім'ї та освітньої установи, істотно впливає на їх зв'язок між собою, а також на створення іміджу освітньої установи та визнання високої кваліфікації педагогічних працівників. Відвідування навчальних занять – один із обов'язків учнів. Несумлінне її виконання пов'язане з низкою проблем самих учнів, освітньої установи та суспільства. Моніторинг відвідуваності занять і різних заходів в установах освіти є важливим засобом керування освітнім процесом.

Новітні технології дають можливість оптимізувати, зокрема, способи контролю відвідуваності учнів та студентів як викладачами, так і батьками, а також реалізувати автоматизовану систему, яка дозволить спростити цей процес. Окрім того, існують сучасні підходи до аналізу показників. Технології опрацювання даних визначаються характером даних та метою дослідження. Наразі мова програмування Python та велика кількість бібліотек є популярним і потужним інструментом, що дозволяють ефективно працювати з різними даними, використовуючи сумісну можливість написання коду та готові рішення.

Моделювання охоплює різні галузі, і наразі існують інструменти для високоефективної та швидкої обробки даних, що дають змогу аналізувати певні тенденції, прогнозувати, оцінювати якість побудованих моделей. Аналітика даних сприяє покращенню процесу прийняття рішень у будь-якій сфері діяльності і, зокрема, в закладах освіти. Тож, поєднання в одній системі інструментів автоматизації і моделювання показників є досить актуальною інтелектуальною проблемою за відсутності централізованого підходу до розробки подібних систем.

Мета

Метою роботи є вивчення оптимального способу контролю відвідуваності студентів (учнів) як викладачами (деканатами), так і батьками; проектування і реалізація автоматизованої системи, яка

дозволить спростити цей процес, розробити необхідні звіти, включаючи оповіщення батьків інформацією про відвідуваність їх дітей; створення модулів для аналізу отриманої інформації з використанням методів математичного моделювання та мови програмування Python і бібліотек для обробки даних.

Задачі

1. Виявити аспекти у порядку ведення контролю відвідуваності, які можна автоматизувати та систематизувати.
2. Розробити інформаційну систему та створити додатки для автоматизації ведення відвідуваності.
3. Спроекувати систему аналізу даних, на підставі яких розробити необхідні звіти для навчального закладу, а також оповіщення батьків інформацією про відвідуваність їх дітей.
4. Розробити програмний застосунок для моделювання показників відвідуваності.

Розв'язання задач

СХЕМИ ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ

Найпростіший варіант інформаційної системи обліку і аналізу відвідування навчальних занять (надалі ІС) складається з одного комп'ютера, до якого через USB-порт приєднаний зчитувач магнітних карток, смарт-карт або QR-кодів.

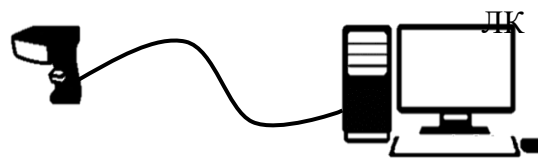


Рисунок 1 – Найпростіша схема

Принцип роботи вказаної системи простий: інформація про учня, що прийшов до закладу освіти, зчитується сканером та пересилається на локальний комп'ютер (ЛК), де вона і зберігається. На цьому ж комп'ютері проводиться аналіз збереженої інформації та формуються необхідні звіти.

Але ця проста система має суттєві недоліки:

- доступ до інформації про відвідування занять може бути тільки з комп'ютера, де зберігаються дані;
- розташування комп'ютера, який є інструментом для аналізу даних по відвідуванню учнями школи, не найкраще – біля вхідних дверей,
- труднощі аналізу даних у випадку, якщо учні входять до школи через два-три входи, кожен з яких повинен реєструвати учнів, які зайшли до школи.

Вказані недоліки усуваються, якщо локальні комп'ютери, до яких приєднані сканери, включити до шкільної мережі. В цьому випадку вся інформація зі сканерів через локальні комп'ютери (ЛК) може одразу передаватися на шкільний сервер даних (СД), який буде зберігати інформацію з декілька сканерів і який забезпечить доступ до інформації з робочих місць (РМ), де треба мати необхідні звіти.

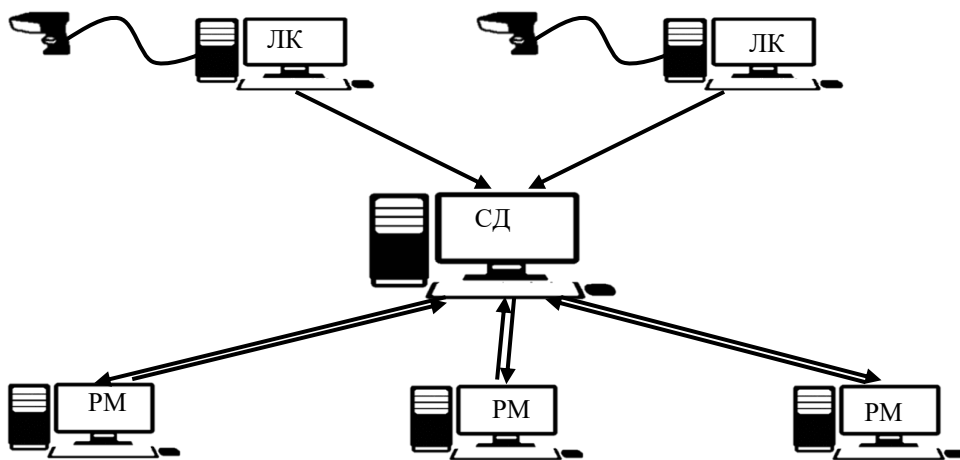


Рисунок 2 – Інформаційна система з сервером закладу освіти

Але, якщо шкільний сервер працює не цілодобово, а включається на початку робочого дня, дана система має суттєвий недолік, який пов'язаний з тим, що більшість учнів приходять до школи до включення сервера даних, і тому їх приход зареєструвати в системі буде неможливо.

Якщо сервер даних розташувати у хмарному середовищі, то проблеми з часом роботи сервера існувати не буде.

Дані зі сканерів будуть одразу пересилатися у хмарне сховище і там зберігатися. Доступ до них буде постійним. Крім того, доступ до них можна організувати з будь-яких пристроїв: комп'ютерів, планшетів, мобільних телефонів.

Але, ця система має недолік: при поганому інтернет-з'єднанні будуть проблеми зі збереженням вхідної інформації на сервері, що може привести до повної непрацездатності програми збереження вхідної інформації.

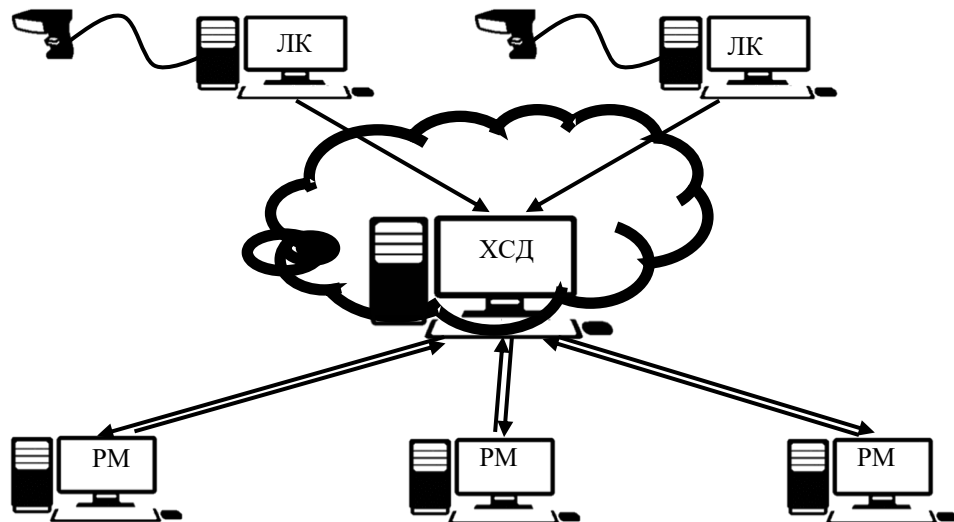


Рисунок 3 – Інформаційна система з хмарним сервером даних

Створена інформаційна система мінімізує проблеми збереження вхідних даних наступним чином:

- дані, які скануються, зберігаються в локальній базі даних на комп'ютері, до якого безпосередньо відключено сканер;
- в якості комп'ютера використовується ноутбук, який може працювати автономно не менше 4 годин;
- на одному з робочих комп'ютерів (або на локальному сервері) встановлюється програма, яка пересилає дані з локальної бази даних в базу даних, розташовану на сервері;
- всі робочі комп'ютери для обробки даних використовують дані сервера.

Вхідні дані при такому рішенні обробляються з деякою затримкою, але така схема вирішує проблему поганого інтернет-зв'язку та відсутність електропостачання.

ОСНОВНІ ЕТАПИ СТВОРЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Для збереження інформації на комп'ютері, до якого приєднаний сканер, було розглянуто два незалежних підходи.

У першому підході використовувалась мова Python. Дані зберігалися у файлі формату .csv. Цей формат підтримується багатьма мовами програмування і дозволяє легко переносити дані в різні бази даних, включаючи Access та MySQL. Головна доцільність використання такого підходу в тому, що на вході замість відносно дорогих ноутбуків можна використовувати недорогі мікрокомп'ютери Raspberry PI або Arduino. В них використовується Linux і вони добре підтримують мову Python, а також формат файлів .csv.

Другий підхід використовує СУБД Access [1], [2]: сканована інформація одразу зберігається у базі даних Access, яка розташована на комп'ютері, до якого приєднаний сканер. Якщо в якості комп'ютера використовувати ноутбук, то система збору інформації буде повністю автономною. Вона не буде залежати від інтернету, від електрики. Це значно підвищує її надійність.

Для збереження даних про відвідуваність на локальному комп'ютері створюється база даних, яка містить всього три об'єкти:

- таблицю Signal, яка зберігає ID-коди учнів, які відвідали школу,
- таблицю UserLocal, яка містить відомості про учнів,

- форму для відображення інформації про учня, який на даний момент проходить реєстрацію:
 - прізвище учня,
 - час і дату реєстрації у системі.

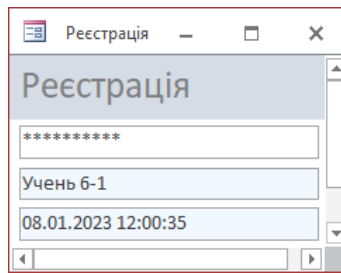


Рисунок 4 – Форма відображення інформації в момент реєстрації

Якщо сервер даних знаходиться у хмарному середовищі, то їх потрібно туди скопіювати з локальних баз даних, що знаходяться на локальних комп'ютерах. Це можна зробити за допомогою запитів, які можуть бути розташовані на локальних комп'ютерах, або на одному з робочих комп'ютерів (РМ), які використовуються персоналом для аналізу даних про відвідування. У першому випадку запити передають тільки дані на локальних комп'ютерах. У другому – дані спочатку збираються зі всіх локальних комп'ютерів, а потім передаються в базу даних, яка розташована у хмарному середовищі.

Якщо сервер даних знаходиться у закладі, то можна не переносити дані з локальних комп'ютерів на сервер, на якому можна розмістити тільки програми для створення необхідних звітів. При цьому програму спочатку збирає дані зі всіх локальних комп'ютерів, а потім обробляє їх разом, генеруючи необхідні звіти.

Але, на наш погляд, краще всі дані зберігати в одному місці. В цьому випадку перенесення даних на сервер даних закладу освіти проводиться аналогічно перенесенню даних на сервер у хмарному середовищі.

У створеній ІС всі дані знаходяться на шкільному сервері даних. Їх обробка може проводитися на комп'ютерах, які підключені до шкільної мережі і мають доступ до бази даних. Ці комп'ютери краще розташовувати на робочих місцях, де необхідна інформація про відвідування. Наприклад, на комп'ютерах директора, декана, куратора і т. ін., тобто тих працівників, кого стосується питання відвідування занять.

Крім цього, програма генерує деякі спеціальні звіти, які використовують для рішення інших задач. Наприклад, система генерує звіт для столової про кількість учнів по класам, які будуть «на сьогодні» приймати їжу. Іншим прикладом є звіт про загальну кількість дітей в школі, загальну кількість присутніх та відсутніх в абсолютних значеннях та відносних (відсотках). Ця інформація може бути підставою для прийняття певних рішень: наприклад, про об'явлення карантину в закладі чи групі та інше.

НАДСИЛАННЯ ПОВІДОМЛЕНЬ БАТЬКАМ

Про те, що діти прийшли до закладу освіти, батькам бажано знати вже за декілька хвилин після їх приходу. Ця опція реалізується в інформаційній системі через Telegram.

Після того, як учень прийшов до школи і зареєструвався в системі, за його ідентифікаційним номером визначаються батьки, яким висилається інформація про те, що їх дитина прийшла до закладу, вказується дата та час її реєстрації в системі.

Для надсилання повідомлень було використано сучасний популярний месенджер Telegram. Для реалізації ідеї було використано функцію даної платформи, що дозволяє створювати автоматичних роботів для виконання завдань розсилки її користувачам.

Боти – це спеціальні акаунти у Telegram, створені для того, щоб автоматично обробляти та надсилати повідомлення. Користувачі можуть взаємодіяти з ботами за допомогою повідомлень, що надсилаються через звичайні або групові чати. Логіка боту контролюється за допомогою HTTPS запитів до API системи для роботів.

Створюються роботи за допомогою BotFather. Це офіційний інструмент для створення ботів та управління ними. З його допомогою було створено бота з певною назвою та нікнеймом. Далі BotFather надає посилання на створений бот і токен для звернення до нього.

Для взаємодії з роботом Telegram було використано мову програмування Python. Створений додаток має модульну структуру. За відправку повідомлень відповідає клас telegram, який забезпечує взаємодію з платформою за допомогою API. Дані для надсилання повідомлень наша програма отримує з бази даних mysql, розташованої на віддаленому сервері.

За виконання запитів на сервер відповідає бібліотека requests:

```
import requests
```

Метод setChat класу telegram задає чат одержувача і зберігає його ID у властивість класу:

```
def setChat(self, chat_id):
    self.chat_id = chat_id
pass
```

Метод sendMessage відповідає за відправлення повідомлень: формує посилання нашого бота з методом надсилання повідомлень і передає дані методом POST.

```
def sendMessage(self, text):
    if self.chat_id == 0:
        raise Exception('chat_enter_error')
        link='https://api.telegram.org/bot'+ self.bot_id+'!'+self.token+'/sendMessage'
    answer = requests.post(link, data = {
        'chat_id': self.chat_id,
        'text': text
    })
    if answer.status_code != 200:
        raise Exception('post_text_error')
    return answer
```

За взаємодію з базою даних відповідає клас database, який реалізовано за допомогою стандартної бібліотеки pymysql мови програмування Python:

```
import pymysql
```

Метод connect відповідає за з'єднання з базою даних SQL:

```
def connect(self, host, user, password, db):
    connection = pymysql.connect(
        host = host,
        user = user,
        password = password,
        db = db
    )
    print ('connect successful!!')
    return connection
```

Метод getRows відповідає за отримання ID чатів одержувачів та текст, який потрібно їм відправити:

```
def getRows(self, connection):
    try:
        with connection.cursor() as cursor
            sql = 'SELECT `chat_id`, `text` FROM `signal`'
            cursor.execute(sql)
            rows = []
            for row in cursor:
                rows.append(row)
            return rows
    except:
        print('Database Connection Error')
    finally:
        print('end')
```

Сам код створеної програми виглядає так:

```
from classes.database import database
from classes.telegram import telegram
db = database()
messenger = telegram()
connection = db.connect('localhost', 'root', 'root', 'signal')
rows = db.getRows(connection)
for row in rows:
```

```

messenger.setChat(row[0])
result = messenger.sendMessage(row[1])
print(result)

```

Створюється об'єкт класів, викликаються методи, задаються потрібні параметри та виводиться результат.

ПРОГРАМНІ ІНСТРУМЕНТИ ДЛЯ АНАЛІЗУ ВІДВІДУВАНOSTІ І МОДЕЛЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ

Як було вище зазначено, в розробленій системі створено базу даних, в яку вносяться автоматично всі дані по відвідуваності. Структура бази даних і приклад моделювання будуть представлені в наступній роботі. За допомогою SQL-запитів можна вилучити потрібну інформацію, яка передається у розроблений програмний модуль для проведення аналізу по окремій групі учнів, факультету або в цілому по закладу. Дослідження в програмному застосунку проводиться регресійними методами математичної статистики. Для оцінювання якості моделей і прогнозування використовуються економетричні методи і критерії Фішера і Стьюдента. Можна розширити функціонал, додавши багатофакторний, кластерний аналіз, що буде напрямом подальшої розробки.

Функціонал застосунку для аналізу реалізується за допомогою мови програмування Python і відповідних бібліотек. Коротко наведемо можливості основних програмних модулів, що використовуються при аналізі даних [3].

NumPy – основний пакет для виконання наукових розрахунків на Python. Поверх NumPy побудовано інші бібліотеки.

Основні можливості пакету:

- швидкий і ефективний об'єкт багатовимірного масиву ndarray;
- функції для виконання обчислень з елементами одного масиву або математичних операцій з декількома масивами;
- засоби для читання і запису на диски наборів даних, представлених у вигляді масивів;
- операції лінійної алгебри, перетворення Фур'є і генератор випадкових чисел;
- засоби для інтеграції з кодом, що написаний на C, C++ або Fortran.

Крім прискорення роботи з масивами, однією з основних цілей NumPy стосовно аналізу даних є організація контейнера для передачі даних поміж алгоритмами. Як засіб зберігання і маніпуляції даними масиви NumPy значно ефективніші вбудованих в Python структур даних.

Багато засобів обчислень орієнтовано на Python та використовують масиви NumPy як основні структури даних.

Бібліотека pandas надає структури даних і функції для роботи зі структурованими даними. Основні об'єкти pandas – DataFrame – двовимірна таблиця, в якій рядки і стовпці мають мітки, і Series – об'єкт одновимірного масиву з мітками.

У бібліотеці pandas поєднуються висока продуктивність засобів роботи з масивами, притаманна NumPy, і гнучкі можливості маніпулювання даними, властиві електронним таблицям і реляційним базам даних (наприклад, на основі SQL). Оскільки маніпулювання даними, їх підготовка і очищення грають дуже велику роль в аналізі даних [3], [4], pandas є одним з основних інструментів.

Основні можливості бібліотеки:

- розвинені засоби індексування, що дозволяють просто змінювати форму наборів даних, формувати зрізи, виконувати агрегування і вибирати підмножини;
- структури даних з позначеними осями підтримують автоматичне або явне вирівнювання даних, що виключає появу типових помилок при роботі з невіривняні даними і даними з різних джерел, які по-різному індексовані;
- вбудована функціональність часових рядів;
- одні і ті ж структури даних підтримують як тимчасові ряди, так і дані інших видів;
- арифметичні операції;
- гнучка обробка відсутніх даних;
- інтеграція даних;
- підтримка з'єднання і інших реляційних операцій, наявних в популярних базах даних (наприклад, на основі SQL).

Сама назва pandas утворена від panel data (панельні дані), що застосовуються в економетричних дослідженнях для позначення багатовимірних структурованих наборів даних.

Бібліотека matplotlib – інструмент Python для створення графіків і інших способів візуалізації двовимірних даних. Вона підходить для створення графіків, придатних для публікації. Існують також інші бібліотеки візуалізації, але matplotlib використовується найчастіше і тому добре інтегрована з іншими частинами екосистеми.

SciPy – збір пакетів, призначених для вирішення різних стандартних обчислювальних задач:

- scipy.integrate – підпрограми чисельного інтегрування і розв'язання диференціальних рівнянь;

- `scipy.linalg` – підпрограми лінійної алгебри і розкладання матриць, доповнюють ті, що включені в `numpy.linalg`;
- `scipy.optimize` – алгоритми оптимізації функцій (знаходження екстремумів) і пошуку коренів;
- `scipy.signal` – засоби обробки сигналів;
- `scipy.sparse` – алгоритми роботи з розрідженими матрицями і розв'язання розріджених систем лінійних рівнянь;
- `scipy.special` – обгортка навколо SPECFUN, написаної на Fortran-бібліотеці, що містить реалізації багатьох стандартних математичних функцій, в тому числі гамма-функції;
- `scipy.stats` – стандартні безперервні і дискретні розподіли ймовірностей (функції щільності ймовірності, формування вибірки, функції безперервного розподілу ймовірності), різні статистичні критерії і додаткові описові статистики.

Бібліотека `scikit-learn` – основний інструментарій машинного навчання на Python. Є підмодулі для наступних моделей:

- класифікація: метод опорних векторів, метод найближчих сусідів, випадкові ліси, логістична регресія і т. ін.;
- регресія: Lasso, гребнева регресія і т. ін.;
- кластеризація: метод k середніх, спектральна кластеризація і т. ін.;
- зниження розмірності: метод головних компонент, відбір ознак, матрична факторизація і т. ін.;
- вибір моделі: пошук на сітці, перехресний контроль, метрики;
- попередня обробка: виділення ознак, нормування.
- `scikit-learn` орієнтований головним чином на передбачення.

`Statsmodels` – пакет статистичного аналізу, містить алгоритми класичної статистики та економетрики. У нього входять наступні підмодулі:

- регресійні моделі: лінійна регресія, узагальнені лінійні моделі, лінійні моделі зі змішаними ефектами і т. ін.;
- дисперсійний аналіз (ANOVA);
- аналіз часових рядів: AR, ARMA, ARIMA, VAR і інші моделі;
- непараметричні методи: ядерна оцінка щільності, ядерна регресія;
- візуалізація результатів статистичного моделювання.

Пакет `statsmodels` орієнтований більшою мірою на статистичне виведення, він дає оцінки невизначеності і р-значення параметрів.

Використовується разом з NumPy і pandas.

Всі зазначені інструменти використовуються для створення масивів інформації та різного роду аналізу, прогнозування і візуалізації показників. В попередніх роботах [5], [6], [7] було наведено приклад аналізу і прогнозування даних з використанням описаних програмних застосунків.

Розроблена інформаційна система на даний момент знаходиться на тестуванні, в результаті якого у програму вносяться додаткові опції і функції. Після успішного проходження тестування програму планується використовувати у закладі середньої освіти, за замовленням якого проведено представлено роботу.

Висновки

1. Виявлено аспекти у порядку ведення контролю відвідуваності, які можна автоматизувати та систематизувати.
2. Створено інформаційну систему обліку, що дозволяє автоматизувати збір інформації про відвідування навчальних занять, аналізувати її з метою отримання необхідних звітів.
3. Результат використання роботи представлено у вигляді файлу БД Access, який містить структуру спроектованих таблиць, схему даних зі зв'язками між таблицями, екранні форми для занесення вхідних даних та екранні форми для перегляду результатів їх обробки, запити для аналізу даних, звіти. В систему інтегрована програма, яка створена на Python, для надсилання повідомлень батькам про прихід їх дитини до закладу освіти.
4. В систему інтегровано програмний застосунок для моделювання та прогнозування даних.
5. Створена система може бути основою для подальшого розвитку і додавання нових функцій і можливостей.
6. Подібні автоматизовані системи у поєднанні з інструментами штучного інтелекту для різнопланового аналізу даних можуть використовуватися закладами освіти і моделюватися у відповідності до їх потреб.

Список літератури

- [1] О. Шпортько, *Розробка баз даних в СУБД Microsoft Access*. К.: Видавничий дім "Кондор", 2018, 184 с.

- [2] І. Бардус, М.І. Лазарев, А. Ніценко, *Бази даних у схемах*. Харків: Вид-во "Діса плюс", 2017, 133 с.
- [3] Christian Hill, *Learning Scientific Programming with Python. Second Edition*. Cambridge University Press, 2020, 646 p.
- [4] William McKinney, *Python for Data Analysis. Data Wrangling with Pandas, NumPy, and IPython. Second Edition*. O'REILLY, 2018, 365 p.
- [5] Т. Чупілко, Ю. Ульяновська, М. Мормуль і А. Лагода, "Python для обробки даних і моделювання фінансово-економічних показників", ІТКІ, т. 51, вип. 2, с. 68-77, 2021. DOI: <http://doi.org/10.31649/1999-9941-2021-51-2-68-77>
- [6] Т. Чупілко, "Актуальні проблеми високоефективної обробки даних. Моделювання показників за допомогою мови програмування Python" у *Актуальні напрями розвитку технічного та виробничого потенціалу національної економіки*. Дніпро, Україна: Пороги, 2021, с.151-163
- [7] Tetjana Chupilko, Yulia Ulianova, Mykola Mormul and Olexandr Shchitov, "Python for Data Processing and Modeling Indicators of Economic Security of the Country" in International conference "Challenges and realities of the IT space: software engineering and cyber security", Online Scientific Publishers OWN, ISBN 978-83-7712-049-1, № 9156, October 2022. Url: <https://easychair.org/publications/preprint/WW2F>.

Стаття надійшла: 21.02.2023.

References

- [1] O. Shportko, *Rozrobka baz danyx v SUBD Microsoft Access*. K.: Vydavnychii dim "Kondor", 2018, 184 s. [in Ukrainian].
- [2] I. Bardus, M. Lazarev, A. Nicenko, *Bazy danyx u schemax*. Kharkiv: Vydavnytctvo «Disa plus», 2017, 133 s. [in Ukrainian].
- [3] Christian Hill, *Learning Scientific Programming with Python. Second Edition*. Cambridge University Press, 2020, 646 p.
- [4] William McKinney, *Python for Data Analysis. Data Wrangling with Pandas, NumPy, and IPython. Second Edition*. O'REILLY, 2018, 365 p.
- [5] T. Chupilko, Yu. Ulianova, M. Mormul, A. Lagoda, "Python dlya obrobky danyx i modeluvannya finansovo-ekonomichnyx pokaznykiv", ІТКІ, т. 51, в. 2, с. 68-77, 2021. DOI: <http://doi.org/10.31649/1999-9941-2021-51-2-68-77> [in Ukrainian].
- [6] T. Chupilko, "Aktualni problemy vysokoeffektyvnoi obrobky danykh. Modeliuvannya pokaznykiv za dopomohoiu movy proqramuvannya Python" u *Aktualni napriamy rozvytku tekhnichnoho ta vyrobnychoho potentsialu natsionalnoi ekonomiky*. Dnipro: Porohy, 2021, s.151-163 [in Ukrainian].
- [7] Tetjana Chupilko, Yulia Ulianova, Mykola Mormul and Olexandr Shchitov, "Python for Data Processing and Modeling Indicators of Economic Security of the Country" in *International conference "Challenges and realities of the IT space: software engineering and cyber security"*, Online Scientific Publishers OWN, ISBN 978-83-7712-049-1, № 9156, October 2022. Url: <https://easychair.org/publications/preprint/WW2F>.

Відомості про авторів

Чупілко Тетяна Анатоліївна – кандидат технічних наук, доцент.

Чупілко Олександр Сергійович – здобувач ступеня магістра.

Мормуль Микола Федорович – кандидат технічних наук, доцент.

T. A. Chupilko, O. S. Chupilko, M. F. Mormul

DESIGN AND SOFTWARE IMPLEMENTATION OF THE AUTOMATED ATTENDANCE SYSTEM AND DATA ANALYSIS IN EDUCATIONAL INSTITUTIONS

University of Customs and Finance, Dnipro

КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ ТА КОМПОНЕНТИ

УДК 621.375.024

В. О. Багацький¹, С. В. Богомолів², С. М. Захарченко²
**ВИСОКОЛІНІЙНІ БУФЕРИ НАПРУГИ ДЛЯ
ВИСОКОПРОДУКТИВНИХ АЦП І ЦАП**¹Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України, Київ²Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Анотація. У статті проаналізовано запропоновані методи структурно-функціональної організації високолінійних буферів напруги які побудовано за двотактними симетричними структурами. У першому методі передбачається підвищення опору виходів по струму. Завдяки цьому можна забезпечити стабілізацію напруги переходу колектор-емітер транзисторів вихідних каскадів. У другому методі пропонується зменшення впливу струму баз транзисторів вихідних каскадів, що дозволить зменшити похибку лінійності. У третьому методі запропоновано підвищення лінійності без зменшення рівня швидкодії, шляхом стабілізації напруг колектор-емітер вихідних каскадів. Показано, що використання стабілізації напруг переходів колектор-емітер, дає змогу покращити на 1÷2 порядки характеристики схем. Виведено аналітичні залежності, що описують похибки лінійності ядер буферів напруги, які побудовано за двотактною симетричною структурою. Показано, що запропоновані підходи дозволяють на порядок і більше зменшити похибки лінійності та зсуву нуля. Для визначення складових, які впливають на появу похибки розглянуто еквівалентну схему заміщення виходу ядра буфера напруги. Визначено, що запропоновані методи побудови буферів напруги мають спільний недолік, а саме, низьку навантажувальну здатність, яка визначається вихідними опорами схем. Розглянуто підхід, що дозволяє підвищити навантажувальну здатність буферів напруги. Показано, що він дає змогу на 2÷3 порядки зменшити вихідний опір. Щоб підвищити навантажувальну здатність та зберегти задану лінійність схеми буферів напруги запропоновано доповнити двотактним двоканальним підсилювачем струму. Використання запропонованих методів та підходів для побудови буферів напруги, дозволяє отримати такі пристрої, які мають необхідні характеристики та можуть застосовуватись у складі високопродуктивних АЦП і ЦАП.

Ключові слова: високолінійний, високопродуктивний, буфер напруги, АЦП, ЦАП, двотактна структура.

Abstract. The article analyzes the proposed methods of structural and functional organization of highly linear voltage buffers built according to two-stroke symmetrical structures. In the first method, it is assumed to increase the resistance of the current outputs. Thanks to this, it is possible to stabilize the collector-emitter junction voltage of the transistors of the output stages. In the second method, it is proposed to reduce the influence of the base current of the transistors of the output stages, which will reduce the linearity error. In the third method, it is proposed to increase the linearity without reducing the speed level, by stabilizing the collector-emitter voltages of the output stages. It is shown that the use of voltage stabilization of the collector-emitter transitions makes it possible to improve the circuit characteristics by 1÷2 orders of magnitude. Analytical dependencies describing the linearity errors of the cores of voltage buffers, which are built according to a two-stroke symmetrical structure, are derived. It is shown that the proposed approaches allow to reduce the errors of linearity and zero shift by an order of magnitude or more. To determine the components that affect the appearance of the error, an equivalent scheme for replacing the output of the voltage buffer core is considered. It was determined that the proposed methods of building voltage buffers have a common drawback, namely, low load capacity, which is determined by the output resistances of the circuits. An approach that allows increasing the load capacity of voltage buffers is considered. It is shown that it makes it possible to reduce the output resistance by 2÷3 orders of magnitude. In order to increase the load capacity and maintain the specified linearity of the voltage buffer scheme, it is proposed to supplement it with a two-stroke two-channel current amplifier. The use of the proposed methods and approaches for the construction of voltage buffers allows obtaining such devices that have the necessary characteristics and can be used as part of high-performance ADCs and DACs.

Key words: high-linearity, high-performance, voltage buffer, ADC, DAC, push-pull structure.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-56-1-44-51>.

Вступ

Буферні пристрої є аналоговими елементами, що часто використовуються у складі високопродуктивних АЦП і ЦАП, які, в свою чергу, є частиною високоточних аналого-цифрових і цифро-аналогових систем [1-2]. Буферний пристрій дозволяє узгодити опір генератора сигналу та навантаження. У цьому випадку буфер напруги (БН) діє як перетворювач опорів з високим вхідним і низьким вихідним опором. Коефіцієнт передачі напруги БН дорівнює 1. БН забезпечує набагато більший струм до навантаження, ніж вхідний струм. БН також відомий як повторювач напруги. З іншого боку, буфер струму (БС) має низький вхідний і високий вихідний опір. Коефіцієнт передачі струму БС дорівнює 1 і не залежить від опору навантаження.

У більшості випадків буферні пристрої будують на базі операційних підсилювачів [1,2]. Однак такий підхід обмежує їх швидкість. Рішення цього полягає у використанні емітерних повторювачів або двотактних структур на основі біполярних або польових транзисторів.

Актуальність

Двотактні схеми буферних пристроїв можуть забезпечити високу лінійність передатної характеристики і необхідну швидкодію [2]. Відомі буферні пристрої за двотактною структурою, що забезпечують високу швидкодію і лінійність, є розбалансованими, характеризуються великими похибками зсуву нуля і високим температурним дрейфом. Праці, присвячені високолінійним буферним пристроям на базі двотактних симетричних структур для високопродуктивних АЦП і ЦАП, є неструктурованими та у літератур-

них джерелах описані частково. Тому тема статті, присвячена побудові високолінійних буферних пристроїв на базі двотактних симетричних структур для високопродуктивних АЦП і ЦАП, є актуальною.

Мета

Аналіз запропонованих методів схемотехнічної організації високолінійних буферів напруги на базі двотактних симетричних структур для високопродуктивних АЦП і ЦАП.

Постановка задач

1. Проаналізувати запропоновані методи структурно-функціональної організації високолінійних буферів напруги, які побудовано за двотактними симетричними структурами.
2. Вивести аналітичні залежності, що описують похибки лінійності ядер буферів напруги, які побудовано за двотактною симетричною структурою.
3. Розглянути підхід, що дозволяє підвищити навантажувальну здатність буферів напруги.

Розв'язання поставлених задач

Так, відома схема [3], яку наведено на рисунку 1, має значну похибку зсуву нуля. Причиною тому є незбалансованість напруги переходу база-емітер транзисторів T6 і T7 відповідно.

Щоб стабілізувати напруги колекторних переходів транзисторів T6 і T7, які є вихідними каскадами ядра, у схему додано каскоди, які побудовано на базі транзисторів T1, T5 і T4, T8 відповідно. Такий підхід, дозволяє ефективно стабілізувати робочі точки транзисторів T6 і T7, а саме, струми колекторів та напруги переходів база-емітер і знизити рівні похибок лінійності і масштабу. Проте, транзистори T5 і T8 каскодів є неідеальними, адже коефіцієнт передачі β кожного транзистора залежить від напруг переходів база-емітер. У свою чергу, це впливає на зміну їх базових струмів, що в подальшому, не дозволить мінімізувати ці складові. Як наслідок, це призведе до зміни величини струмів емітерів вхідних транзисторів T2 і T3 та напруг їх переходів база-емітер, що призводить до появи похибки зсуву нуля, яка в подальшому, передається на вихід схеми. Як відомо, для інтегральних транзисторів рівні похибок зсуву нуля рівний 10÷50 мВ.

Похибки лінійності і масштабу досить сильно залежать від зміни напруг на переходах колектор-емітер транзисторів ядра.

Основними причинами негативного впливу на характеристики схеми, є:

1. Залежність напруг переходів база-емітер U_{be} транзисторів від напруг переходів колектор-емітер U_{ce} .
2. Залежність колекторного струму I_K транзисторів від напруги переходу колектор-емітер, через обмеженість значення опору колекторного переходу r_K^* .
3. Залежність коефіцієнту передачі β транзисторів від напруг переходів колектор-емітер U_{ce} .

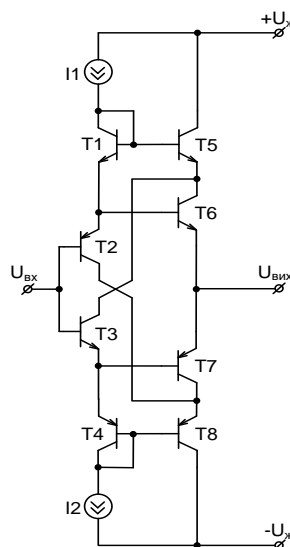


Рисунок 1 – Схемотехнічна організація відомого ядра буфера напруги

Для визначення складових, які впливають на появу статичної похибки $\Delta U_{вих}$ доцільно розглянути еквівалентну схему заміщення виходу ядра буфера напруги, яку зображено на рисунку 2, а.

Тут: $r_{\delta}^{\prime}, r_{\delta}^{\prime\prime}$ – опір бази транзисторів Т5 і Т8 відповідно, $r_{\kappa}^{*}, r_{\kappa}^{*\prime\prime}$ – опір колектора транзисторів Т5 і Т8 відповідно, $r_e^{\prime}, r_e^{\prime\prime}$ – опір емітера транзисторів Т5 і Т8 відповідно, причому $r_e^{\prime} = r_e^{\prime\prime} = r_e$, $r_{\delta}^{\prime}, r_{\delta}^{\prime\prime}$ – опір р-п переходу транзисторів Т6 і Т7 відповідно, причому $r_{\delta}^{\prime} = r_{\delta}^{\prime\prime} = r_{\delta} = r_e$, $U^{\prime}, U^{\prime\prime}$ – напруга додатної і від'ємної шин живлення відповідно.

Схему можна представити у вигляді, як зображено на рисунку 2, б.

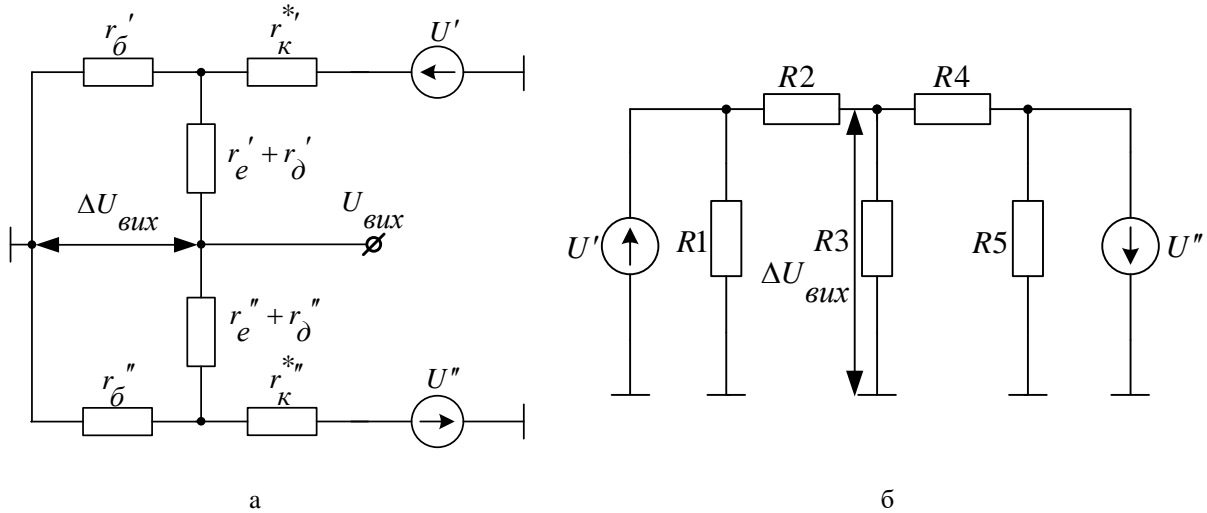


Рисунок 2 – Еквівалентні схеми заміщення ядра буфера напруги: а) до перетворення; б) після перетворення

У цьому випадку:

$$R1 = r_{\kappa}^{*} + r_{\delta}^{\prime} + \frac{r_{\kappa}^{*} \cdot r_{\delta}^{\prime}}{2 \cdot r_e}; \quad R2 = 2 \cdot r_e + r_{\kappa}^{*} + \frac{2 \cdot r_e \cdot r_{\kappa}^{*}}{r_{\delta}^{\prime}};$$

$$R3 = \frac{R3' \cdot R3''}{R3' + R3''}, \text{ де } R3' = 2 \cdot r_e + r_{\delta}^{\prime} + \frac{2 \cdot r_e \cdot r_{\delta}^{\prime}}{r_{\kappa}^{*}}; R3'' = 2 \cdot r_e + r_{\delta}^{\prime\prime} + \frac{2 \cdot r_e \cdot r_{\delta}^{\prime\prime}}{r_{\kappa}^{*\prime\prime}}; \quad (1)$$

$$R4 = 2 \cdot r_e + r_{\kappa}^{*\prime\prime} + \frac{2 \cdot r_e \cdot r_{\kappa}^{*\prime\prime}}{r_{\delta}^{\prime\prime}}; \quad R5 = r_{\kappa}^{*\prime\prime} + r_{\delta}^{\prime\prime} + \frac{r_{\kappa}^{*\prime\prime} \cdot r_{\delta}^{\prime\prime}}{2 \cdot r_e}.$$

Використовуючи метод суперпозиції можна записати статичну похибку $\Delta U_{вих}$ у вигляді:

$$\Delta U_{вих} = \Delta U'_{вих} + \Delta U''_{вих}, \quad (2)$$

де $\Delta U'_{вих} = f(U^{\prime}), \Delta U''_{вих} = f(U^{\prime\prime})$ – приріст напруг у верхньому і нижньому ярусах, які можна визначити, як:

$$\begin{aligned}\Delta U'_{вих} &= U' \cdot \frac{R3}{R2 + R3}; \\ \Delta U''_{вих} &= U'' \cdot \frac{R3}{R4 + R3}.\end{aligned}\quad (3)$$

З урахуванням попередніх залежностей та рівняння (2), запишемо:

$$\Delta U_{вих} = \frac{[U' \cdot (R4 + R3) + U'' \cdot (R2 + R3)] \cdot R3}{(R2 + R3) \cdot (R4 + R3)}.\quad (4)$$

Шляхом підстановки в рівняння (4) значень з (2), отримаємо абсолютну похибку. Відносна ж похибка визначається у вигляді:

$$\delta = \frac{\Delta U_{вих}}{U_{вих}} \cdot 100\%.$$

Якщо підставити у рівняння (3) значення з рівнянь (1) і врахувати, що в існуючих схемах $r_{\delta}' \ll r_{\kappa}'$, $r_{\delta}'' \ll r_{\kappa}''$ і $r_{\delta}' \approx r_{\delta}''$ матимемо:

$$\Delta U'_{вих} \approx U' \cdot \frac{2 \cdot r_e}{r_{\kappa}'}; \quad \Delta U''_{вих} \approx U'' \cdot \frac{2 \cdot r_e}{r_{\kappa}''}.$$

Можна побачити, що на похибку лінійності в основному впливає величина r_{κ}' і r_{κ}'' , а також r_e , значення якого на 2-3 порядки менше значень r_{κ}' і r_{κ}'' .

Для побудови високолінійних буферів напруги запропоновано наступні методи:

1. Ввести до ядра каскодів на польових транзисторах.
2. Будувати каскоди ядра з використанням складених транзисторах Шиклаї.
3. Застосувати параметричну стабілізацію напруг зміщення транзисторів ядра.

У першому методі передбачається підвищення опору виходів по струму [4] (рисунок 3, а).

Завдяки цьому можна забезпечити стабілізацію напруги переходу колектор-емітер транзисторів Т6 і Т9. При цьому, струми бази цих транзисторів можна не враховувати. З урахуванням рівняння (3), можна записати приріст напруг по верхньому і нижньому ярусах:

$$\Delta U'_{вих} \approx U' \cdot \frac{2 \cdot r_e}{r'_{св} (1 + S' \cdot R'_e)}; \quad \Delta U''_{вих} \approx U'' \cdot \frac{2 \cdot r_e}{r''_{св} (1 + S'' \cdot R''_e)};$$

де $r'_{св}, r''_{св}$ – вихідні диференційні опори, S', S'' – крутизни передатних характеристик, R'_e, R''_e – опори витоків n- і p-канальних польових транзисторів Т5 і Т10 відповідно [4]. Застосування каскодів на польових транзисторах призводить до підвищення лінійності на 1-2 порядки.

У другому методі запропоновано зменшення впливу струму баз транзисторів Т9 і Т14 в β' і β''

разів відповідно (рисунок 3, б). У цьому випадку похибку лінійності можна зменшити в $\frac{\beta_{\min}}{2}$ разів,

де β_{\min} – найменше значення β транзисторів Т9 і Т14 відповідно. З урахуванням рівняння (3), можна записати приріст напруг у верхньому і нижньому ярусах:

$$\Delta U'_{вих} \approx U' \cdot \frac{4 \cdot r_e}{r'_{вих} \cdot \beta'}; \quad \Delta U''_{вих} \approx U'' \cdot \frac{4 \cdot r_e}{r''_{вих} \cdot \beta''}, \quad (5)$$

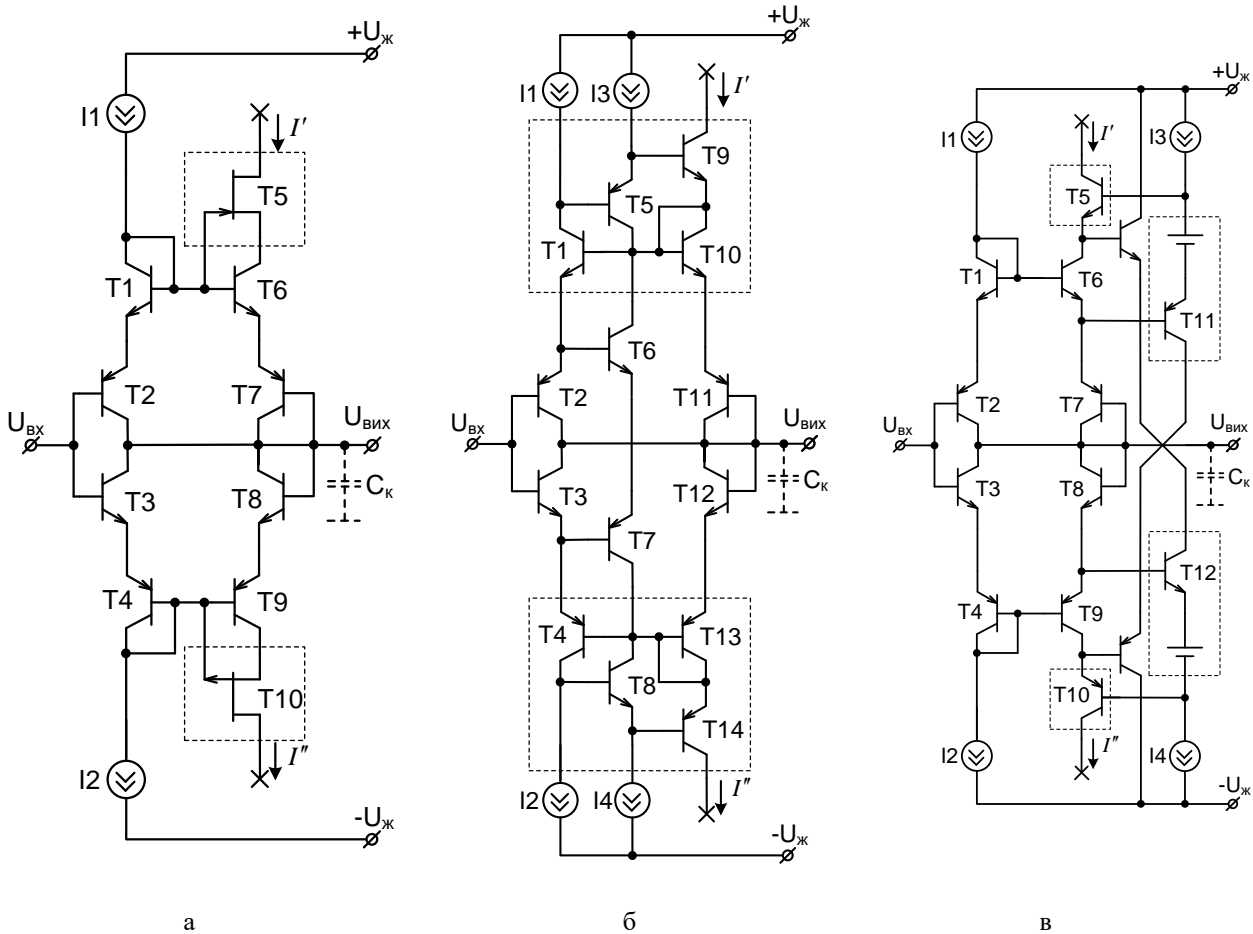


Рисунок 3 – Схемно-функціональна організація входних кіл високолінійних буферів напруги: а) на польових транзисторах; б) на відбивачах струму на складених транзисторах Шиклаї; в) із стабілізаванням напруг колектор-емітер

Проте необхідно вживати заходів щодо коригування перехідної характеристики, оскільки на високих частотах використання складених транзисторів призведе до появи додаткового полюсу.

У третьому методі запропоновано підвищення лінійності без зменшення рівня швидкодії (рисунок 3, в). У такому випадку величина похибки лінійності трохи менша, ніж у схемі із на рисунку 2, б. Для такої схеми природи напруги, описуються рівнянням (5).

Графіки похибок лінійності та масштабу високолінійних буферів напруги наведено на рисунку 4. На графіках криві 1-3 відповідно для схем на рисунку 3, а-в.

Водночас, розглянуті схеми мають спільний недолік, а саме, низьку навантажувальну здатність, яка визначається вихідними опорами схем $r_{вих}$. При цьому:

$$r_{вих} = r_e,$$

де $r_e = \frac{\varphi_T}{I_e}$, $\varphi_T \approx 25 \text{ мВ}$ – термопотенціал, I_e – емітерний струм.

Вихідний опір схеми призводить до появи нелінійності передатної характеристики та зміни масштабу.

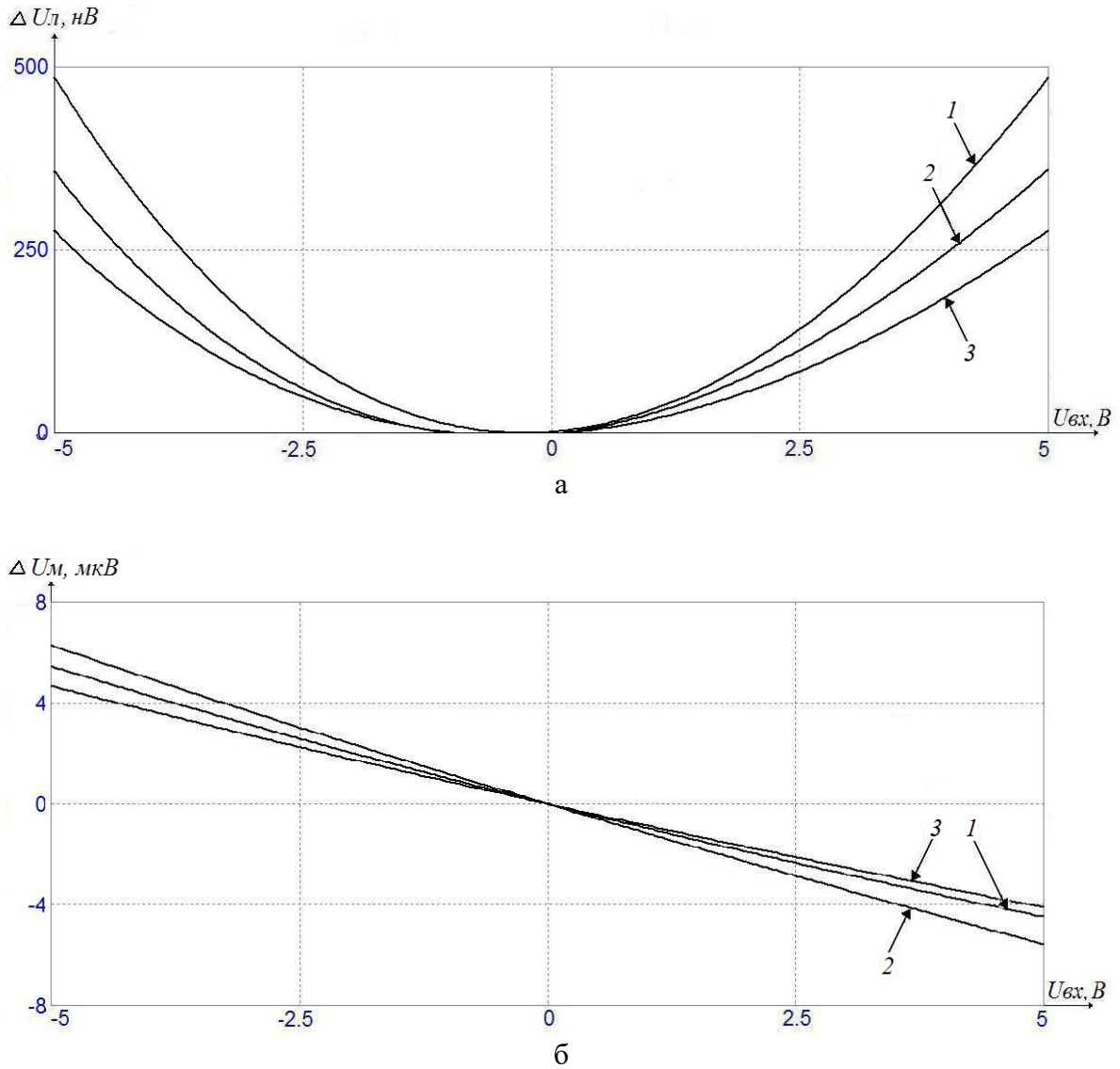


Рисунок 4 – Похибки ядер високолінійних буферів напруги: а) лінійності; б) масштабу

Щоб підвищити навантажувальну здатність та зберегти задану лінійність, доречно доповнити схеми буферів напруги двотактним двоканальним підсилювачем струму (ДПС). Структурно-функціональну схему такого буферного пристрою показано на рисунку 5.

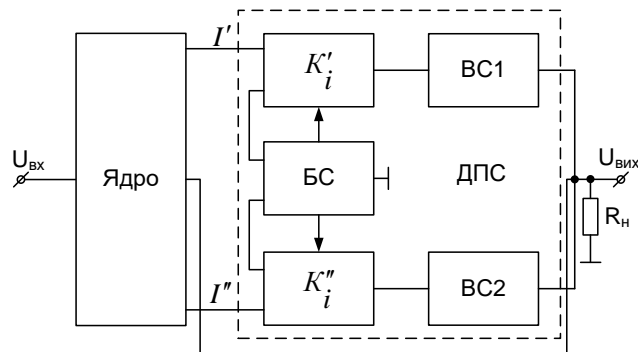


Рисунок 5 – Структурно-функціональна організація високолінійного буферного пристрою на базі двотактної симетричної структури

Він складається із підсилювальних каскадів K'_i і K''_i , балансної схеми (БС) і відбивачів струму BC1 і BC2 [5]. Завдяки застосуванню БС отримуємо пропорційну залежність коефіцієнтів передачі і вирівняним їх значенням у діапазоні сигналу. Головною умовою самобалансування є:

$$\frac{I'}{I_p} = \frac{I_p}{I''},$$

де I_p – робочий струм. У такому випадку: $K'_i = K''_i$.

Використання ДДПС у колі зворотного зв'язку між ядром буфера напруги і навантаженням, дозволить зменшити вихідний опір до рівня:

$$r_{вих} = \frac{r_e}{K_i},$$

де K_i – сумарний коефіцієнт підсилення ДДПС, який рівний:

$$K_i = \frac{2 \cdot K'_i \cdot K''_i}{K'_i + K''_i}.$$

Реалізований високолінійний буферний пристрій, побудований за вищезгаданою структурно-функціональною організацією, дає змогу забезпечити такі характеристики:

- діапазон вхідного сигналу: $\pm 5\text{В}$;
- діапазон вихідного струму: $\pm 5\text{ мА}$;
- похибки:
 - зсуву нуля $\Delta U_{зс0} \leq 50\text{ мкВ}$;
 - масштабу $\delta_M = 5 \cdot 10^{-5}\%$;
 - лінійності $\delta_L = 5 \cdot 10^{-7}\%$.

Запропоновані буферні пристрої з вищенаведеними характеристиками можуть застосовуватись у складі високопродуктивних АЦП і ЦАП.

Висновки:

1. Проаналізовано запропоновані методи структурно-функціональної організації високолінійних буферів напруги, які побудовано за двотактними симетричними структурами. Показано, що використання стабілізування напруг переходів колектор-емітер, дає змогу покращити (на 1÷2 порядки) характеристики схем.
2. Виведено аналітичні залежності, що описують похибки лінійності ядер буферів напруги, які побудовано за двотактною симетричною структурою. Показано, що запропоновані підходи дозволяють (на порядок і більше) зменшити похибки лінійності та зсуву нуля.
3. Розглянути підхід, що дозволяє підвищити навантажувальну здатність буферів напруги. Показано, що він дає змогу (на 2÷3 порядки) зменшити вихідний опір.

Список літератури

- [1] Walt Kesler, *Analog-digital conversion*. ADI Central Application Department, 2004, 1127 p.
- [2] Alan V. Grebene, *Bipolar and MOS analog integrated circuit design*. New Jersey: Wiley Classic Library, 2002, 915 p.
- [3] О. Д. Азаров, О. В. Дудник, С. В. Богомолів, О. В. Кадук, «Буферний каскад,» *Патент України Н03К 5/22, G05B 1/00. №51014 МПК (2009)*, 25.06.2010.
- [4] U. Tietze, Ch. Schenk, E. Gamm, *Electronic Circuits: Handbook for Design and Application*. 2nd ed., Springer, USA, 2008, 1543 p.

- [5] О. Д. Азаров, В. А. Гарнага, *Двотактні підсилювачі постійного струму для багаторозрядних перетворювачів форми інформації, що самокалібруються*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2011, 156 с.
- [6] О. Д. Азаров, С. В. Богомолів, В. Я. Стейскал, «Похибки лінійності передатної характеристики вхідного каскаду двотактних підсилювачів струму,» *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. Вінницький національний технічний університет*, №3(19), с. 4-12. 2010.

Стаття надійшла: 24.01.2023.

References

- [1] Walt Kesler, *Analog-digital conversion*. ADI Central Application Department, 2004, 1127 p.
- [2] Alan B. Grebene, *Bipolar and MOS analog integrated circuit design*. New Jersey: Wiley Classic Library, 2002, 915 p.
- [3] O. D. Azarov, O. V. Dudnyk, S. V. Bogomolov, O. V. Kaduk, "Buffer Cascade," *Patent of Ukraine H03K 5/22, G05B 1/00. No. 51014 IPC (2009)*, 25.06.2010 [in Ukrainian].
- [4] U. Tietze, Ch. Schenk, E. Gamm, *Electronic Circuits: Handbook for Design and Application*. 2nd ed., Springer, USA, 2008, 1543 p.
- [5] O. D. Azarov, V. A. Garnaga, *Push-pull direct current amplifiers for multi-bit self-calibrating information form converters*. Vinnytsia, Ukraine: VNTU, 2011, 156 p. [in Ukrainian].
- [6] O. D. Azarov, S. V. Bogomolov, V. Ya. Stejskal, "Transfer linearity errors of the input stage of push-pull current amplifiers," *Information Technology and Computer Engineering. Vinnytsia National Technical University*, no. 3(19), p. 4-12. 2010 [in Ukrainian].

Відомості про авторів

Багацький Валентин Олексійович – доктор технічних наук, провідний науковий співробітник інституту кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України.

Богомолів Сергій Віталійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри обчислювальної техніки.

Захарченко Сергій Михайлович – кандидат технічних наук, доцент кафедри обчислювальної техніки.

V. O. Bagatsky¹, S. V. Bogomolov², S. M. Zakharchenko²

HIGH-LINE VOLTAGE BUFFERS FOR HIGH-PERFORMANCE ADCS AND DACS

¹V. M. Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine, Kyiv

²Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

УДК 681.325

Г. Г. Бортник, Т. Б. Мартинюк

АНАЛОГО-ЦИФРОВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ З КОРИГУВАННЯМ ПОХИБОК ЛІНІЙНОСТІ

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Анотація. Широке застосування аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) у комп'ютерних системах стримується низькою роздільною здатністю при перетворенні сигналів у широкій смузі частот. Ці проблеми пов'язані як з відсутністю необхідної елементної бази, так і зі складністю процесів аналого-цифрового перетворення випадкових у часі широкопasmових сигналів, математичне представлення яких у часовому і частотному вимірі є досить складним. Наслідком цього є високі похибки лінійності АЦП, що знижують ефективність функціонування пристроїв аналого-цифрового перетворення широкопasmових сигналів у складі комп'ютерних систем. Запропоновано розв'язання задачі підвищення роздільної здатності пристроїв аналого-цифрового перетворення широкопasmових сигналів можна здійснювати за рахунок підвищення лінійності АЦП. Наведено модифікований метод підвищення лінійності АЦП шляхом її коригування у динамічному режимі. Таке коригування виконується шляхом використання статистичної методології оцінювання характеристик широкопasmових сигналів. Обґрунтовано використання при калібруванні АЦП тестового впливу у вигляді багатотонального сигналу. Запропонований тестовий сигнал має збагачений основними гармоніками частотний спектр і його можна реалізувати при використанні широкого класу стандартних генераторів синусоїдальних сигналів з нормованими метрологічними характеристиками. Водночас такий тестовий сигнал дає змогу забезпечити режими роботи АЦП, що адекватні реальним умовам функціонування перетворювачів аналог-код. З метою збереження високої швидкодії АЦП запропоновано коригування здійснювати шляхом заміни вихідного коду АЦП скоригованим кодом. Розроблено структурну схему пристрою аналого-цифрового перетворення широкопasmових сигналів з коригуванням похибок лінійності, в якій застосовуються цифро-аналогове формування тестового сигналу і табличне формування скоригованих кодів. Виконано аналіз динамічних параметрів АЦП з коригуванням похибок лінійності, який підтвердив високу ефективність запропонованого методу статистичного оцінювання та коригування похибок і високу роздільну здатність побудованої структури АЦП.

Ключові слова: аналого-цифровий перетворювач, широкопasmові сигнали, похибки лінійності, роздільна здатність.

Abstract. The widespread use of analog-to-digital converters (ADC) in computer systems is hindered by low resolution when converting signals in a wide frequency band. These problems are related both to the lack of the necessary elementary base and to the complexity of the processes of analog-digital conversion of broadband signals random in time, the mathematical representation of which in the time and frequency dimensions is quite complex. This results in high linearity errors of the ADC, which reduce the efficiency of the analog-to-digital conversion of broadband signals in computer systems. It is proposed to solve the problem of increasing the resolution of broadband analog-to-digital conversion devices by increasing the linearity of the ADC. A modified method of increasing the linearity of the ADC by adjusting it in the dynamic mode is presented. Such adjustment is performed by using a statistical methodology for evaluating the characteristics of broadband signals. The use of a test effect in the form of a multi-tone signal during calibration of the ADC is justified. The proposed test signal has a frequency spectrum enriched with fundamental harmonics and can be implemented using a wide class of standard sinusoidal signal generators with normalized metrological characteristics. At the same time, such a test signal makes it possible to ensure the operation modes of the ADC that are adequate to the real conditions of operation of analog-to-code converters. In order to maintain the high speed of the ADC, it is proposed to perform the adjustment by replacing the source code of the ADC with the corrected code. A structural diagram of the device for analog-to-digital conversion of broadband signals with correction of linearity errors has been developed, in which digital-to-analog formation of the test signal and tabular formation of corrected codes are used. An analysis of the dynamic parameters of the ADC with linearity error correction was performed, which confirmed the high efficiency of the proposed method of statistical evaluation and error correction and the high resolution of the constructed ADC structure.

Key words: analog-to-digital converter, broadband signals, linearity errors, resolution.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-56-1-52-57>.

Вступ

Аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) є обов'язковими компонентами комп'ютерних систем різноманітного призначення. Параметри та характеристики АЦП безпосередньо впливають на ефективність функціонування автоматизованих систем діагностування та контролю технологічних процесів, систем вимірювання параметрів випадкових процесів і полів, засобів ідентифікації сигналів та пристроїв розпізнання зображень [1]. Ефективність практичного застосування сучасних комп'ютерних систем і компонентів у різних галузях визначається як рівнем, так і перспективами розвитку таких АЦП, що є перетворювачами форми інформації та виконують з високою точністю перетворення неперервних сигналів у цифрові.

Актуальність

Проблема розробки теорії АЦП з високими точнісними характеристиками є актуальною на даний час, тому що від її вирішення безпосередньо залежать технічні характеристики різновидів комп'ютерних систем: інформаційно-вимірювальних і контрольно-діагностичних.

Широке застосування АЦП у комп'ютерних системах стримується низькою роздільною здатністю при перетворенні сигналів у широкій смузі частот [2]. Ці проблеми пов'язані як з відсутністю необхідної елементної бази, так і зі складністю процесів аналого-цифрового перетворення випадкових у часі широкопasmових сигналів, математичне представлення яких у часовому і частотному вимірі є досить склад-

ним. Наслідком цього є високі похибки лінійності АЦП, що знижують ефективність функціонування пристроїв аналого-цифрового перетворення ширококутових сигналів у складі комп'ютерних систем [3]. Отже, існує необхідність у підвищенні роздільної здатності пристроїв аналого-цифрового перетворення ширококутових сигналів.

Мета

Метою роботи є підвищення роздільної здатності аналого-цифрових перетворювачів шляхом коригування похибок лінійності, що виникають при перетворенні ширококутових сигналів.

Задачі

1. Виконати розробку модифікованого методу коригування похибок лінійності АЦП.
2. Розробити структуру пристрою аналого-цифрового перетворення ширококутових сигналів.
3. Проаналізувати ефективність АЦП ширококутових сигналів з коригуванням похибок лінійності.

Розв'язання задач

Розв'язання задачі підвищення роздільної здатності пристроїв аналого-цифрового перетворення ширококутових сигналів можна здійснювати за рахунок підвищення лінійності АЦП. Тому пропонується на базі результатів аналізу нелінійності АЦП, розробити модифікований метод підвищення лінійності АЦП шляхом її коригування у динамічному режимі. Таке коригування можна виконати шляхом використання статистичної методології оцінювання характеристик ширококутових сигналів.

Основний принцип коригування похибок АЦП у динамічному режимі функціонування з тестовим контролем полягає в ідентифікації параметрів характеристики перетворення (ХП) АЦП. Такий контроль відображає із заданою точністю властивості функцій похибок перетворення для широкого класу вхідних сигналів АЦП. Для запропонованого методу коригування необхідно реалізувати такі етапи:

- 1) визначення ХП АЦП у динамічному режимі для заданого вхідного сигналу;
- 2) ідентифікація параметрів досліджуваного АЦП;
- 3) визначення коригувальних поправок для заданих вхідних сигналів АЦП;
- 4) формування коригувальних сигналів АЦП.

Перший та другий етапи процесу коригування вважаються етапами контролю параметрів АЦП. Третій і четвертий етапи відносяться до робочого режиму АЦП. Для реалізації усіх цих етапів в АЦП необхідно ввести додаткові блоки.

Узагальнена структурна схема процесу коригування вихідного коду АЦП містить послідовно ввімкнені АЦП і таблицю скоригованих кодів (ТСК). Згідно такого підходу вихідний код АЦП, що підлягає коригуванню є адресою скоригованого коду АЦП. Таким чином, виконується заміна коду АЦП $y(i)$ скоригованим кодом $y_c(i)$: $y(i) \rightarrow y_c(i)$. Якщо в АЦП виникла похибка $\Delta y(i)$, то в ТСК записується код $y_c(i)$. Отже, коригування результатів аналого-цифрового перетворення виконується шляхом зіставлення вихідного коду АЦП $y(i)$ з відповідною адресою таблиці $A(i)$. Такий принцип коригування використовує одну послідовну ввімкнену ланку оброблення вихідного коду АЦП, що дає змогу покращувати характеристики швидкодії АЦП. Тому коригування із заміною при реалізації ТСК на базі ПЗП створює умови для збереження високої швидкодії АЦП.

Визначення похибок лінійності досліджуваного АЦП при перетворенні ширококутових сигналів пропонується здійснювати шляхом оцінювання спотворень функції розподілу тестового сигналу. Для цього потрібно визначити густину ймовірності миттєвих значень тестового сигналу $\omega(U)$. На базі відомої густини ймовірності миттєвих значень тестового сигналу $U(t)$ можна знайти ймовірність появи i -го коду [4]:

$$p(i) = \int_{U_i}^{U_{i+1}} \omega(U) dU. \quad (1)$$

Ймовірність $p(i)$ є мірилом диференціальної нелінійності досліджуваного АЦП, оскільки $\omega(U)$ в інтервалі $[U_i, U_{i+1}]$ майже не змінюється. Вираз (1) можна записати у такому вигляді

$$p(i) = \omega(U_i + \varepsilon)(U_{i+1} - U_i); \quad U_i \leq \varepsilon < U_{i+1}. \quad (2)$$

Диференціальна нелінійність з урахуванням виразу (2) для кроку квантування h дорівнює

$$\Delta_{dn}(i) = h - (U_{i+1} - U_i) = h - \frac{p(i)}{\omega(U_i + \varepsilon)}. \quad (3)$$

Імовірність появи вихідного коду $i < j$, що знаходиться як

$$p(i < j) = \sum_{i=0}^{j-1} p(i) = \sum_{i=0}^{j-1} \int_{U_i}^{U_{i+1}} \omega(U) dU = \int_0^{U_j} \omega(U) dU, \quad (4)$$

може слугувати мірилом похибки лінійності досліджуваного АЦП. Звідси можна записати:

$$\Delta_n(j) = \frac{1}{\omega(U_j + \varepsilon)} [p_0(i < j) - p_0(i < j)]. \quad (5)$$

За відомою густиною ймовірності миттєвих значень тестового сигналу розраховується дискретний розподіл ймовірностей $p(i)$ для номінальної ХП досліджуваного АЦП. Потім визначається обсяг вибірки M та здійснюється експериментальне дослідження АЦП. Накопичений масив вихідних кодів АЦП у вигляді $M_j; \{i = 0, N - 1\}$ використовується для подальшого оцінювання диференціальної нелінійності. Спочатку визначається оцінка $\tilde{p}(i)$, а потім знаходиться оцінка динамічної похибки лінійності АЦП за таким виразом

$$\tilde{\Delta}_n[j] = \frac{h}{p(j)} \sum_{i=0}^{j-1} [p(i) - \tilde{p}(i)]. \quad (6)$$

Для випадкового тестового сигналу, що має рівномірну густину розподілу доля кодів M_j у загальному обсязі кодів M є мірилом диференціальної нелінійності Δ_{dn} . Після накопичення M_j і M оцінка диференціальної нелінійності АЦП знаходиться за виразом: $\tilde{\Delta}_{dn}(j) = h - U_m \frac{M_j}{M}$.

З метою підвищення адекватності процесу коригування лінійності АЦП при перетворенні широко-смугових сигналів пропонується як тестовий використовувати багатотональний сигнал. Такий сигнал має збагачений основними гармоніками частотний спектр і тому функція розподілу такого процесу відрізняється від гауссового закону. Багатотональний тестовий сигнал можна представити як суму деякого числа m взаємно незалежних складових U_1, U_2, \dots, U_l . У випадку багатотонального сигналу, для якого всі складові характеризуються однаковими розподілами та відповідно однаковими характеристичними функціями $\theta_1(V)$, можна записати [4]

$$\theta_l(V) = [\theta_1(V)]^l. \quad (7)$$

Для багатотонального сигналу, що містить l гармонічних складових з однаковими амплітудами та випадковими взаємозалежними фазами, характеристична функція з урахуванням (7) знаходиться як

$$\theta_l(V) = \left[J_0 \left(\frac{V}{\sqrt{l}} \right) \right]^l, \quad (8)$$

де $J_0(V)$ – функція Бесселя нульового порядку першого роду.

Знаходження густини ймовірності багатотонального сигналу виконується шляхом обчислення інтегралу відповідно до виразу (8)

$$\omega_l(U) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \left[J_0 \left(\frac{V}{\sqrt{l}} \right) \right]^l \cdot \cos(VU) \cdot dV. \quad (9)$$

Такий сигнал можна вважати оптимальним типом тестового сигналу досліджуваного АЦП. Багатотональний тестовий сигнал можна реалізувати при використанні широкого класу стандартних генераторів синусоїдальних сигналів з нормованими метрологічними характеристиками. Водночас такий тестовий сигнал дає змогу забезпечити режими роботи АЦП, що адекватні реальним умовам функціонування перетворювачів аналог-код.

Структурна схема пристрою аналого-цифрового перетворення ширококутових сигналів на базі методу статистичного оцінювання і коригування похибок лінійності наведена на рис. 1.

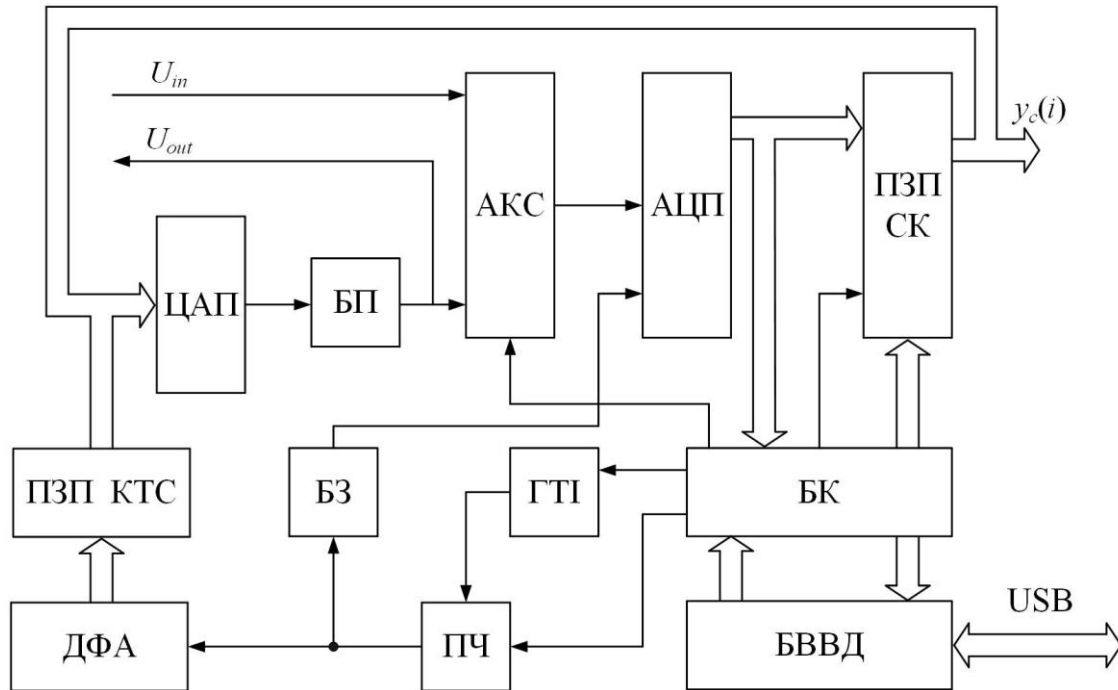


Рисунок 1 – Структурна схема пристрою аналого-цифрового перетворення ширококутових сигналів з коригуванням похибок лінійності

Наведена вище структура містить: вхідну шину U_{in} , вихідну цифрову шину $y_c(i)$, вихідну аналогову шину U_{out} , шину інтерфейсу USB, буферний підсилювач (БП), аналоговий комутатор сигналів (АКС), цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП), базовий АЦП, постійний запам'ятовувальний пристрій скоригованих кодів (ПЗП СК), постійний запам'ятовувальний пристрій кодів тестового сигналу (ПЗП КТС), генератор тактових імпульсів (ГТІ), блок керування (БК), блок затримки (БЗ), двійковий формувач адреси (ДФА), подільник частоти (ПЧ), блок введення-виведення даних (БВВД).

Пристрій аналого-цифрового перетворення ширококутових сигналів працює у двох режимах. Спочатку в режимі калібрування відбувається формування псевдовипадкового тестового сигналу за допомогою внутрішнього цифро-аналогового генератора. Генерація тестового сигналу у заданій частотній смузі базується на формуванні адрес відліків сигналу. Блок ПЗП зберігає цифрові еквіваленти тестових сигналів заданої форми. ЦАП відповідної розрядності та швидкодії перетворює цифровий сигнал в аналоговий, який додатково підсилюється за допомогою буферного підсилювача.

Потім у робочому режимі відбувається коригування результатів аналого-цифрового перетворення ширококутових сигналів шляхом заміщення вихідних кодів АЦП, які є адресами комірок скоригованих кодів. Тобто, в ПЗП СК зберігається результат $y_c(i) = y(i) + \Delta y(i)$. Залежно від режиму роботи через АКС за сигналом керування з БК подається чи тестовий сигнал з вхідної шини чи вхідний сигнал U_{in} з виходу БП.

Виконаємо аналіз ефективності запропонованого АЦП з коригуванням похибок лінійності. Ефективне число розрядів n_{ef} вважається узагальненим динамічним параметром АЦП. Цей параметр є завжди меншим, ніж номінальне число розрядів АЦП n і характеризує якість функціонування перетворювача аналог-код у заданому динамічному режимі. Ефективне число розрядів АЦП пов'язане з відношенням сигнал/шум таким виразом [5]

$$n_{ef} = \frac{S/N}{6,02} + n \cdot \log_2 \frac{h}{\sqrt{6,02} \cdot U_m}, \quad (10)$$

де S/N – відношення сигнал/шум АЦП.

Різниця між ефективним числом розрядів ідеальної моделі АЦП та ефективним числом розрядів досліджуваного АЦП з коригуванням похибок лінійності дорівнює

$$\Delta n_{ef} = n_{ef_{id}} - n_{ef_c} = 0,5 \cdot \log_2 \left(1 + \frac{3\sigma_B^2}{h^2} \right), \quad (11)$$

де σ_B^2 – дисперсія диференціальної нелінійності ХП АЦП.

Отримані параметри наочніше характеризують динамічні властивості та точність АЦП при перетворенні широкосмугових сигналів. На рис. 2 наведено графіки залежностей $\Delta S/N$ і Δn_{ef} від співвідношення $\frac{\sigma_B^2}{h^2}$, що характеризує динамічну похибку АЦП.

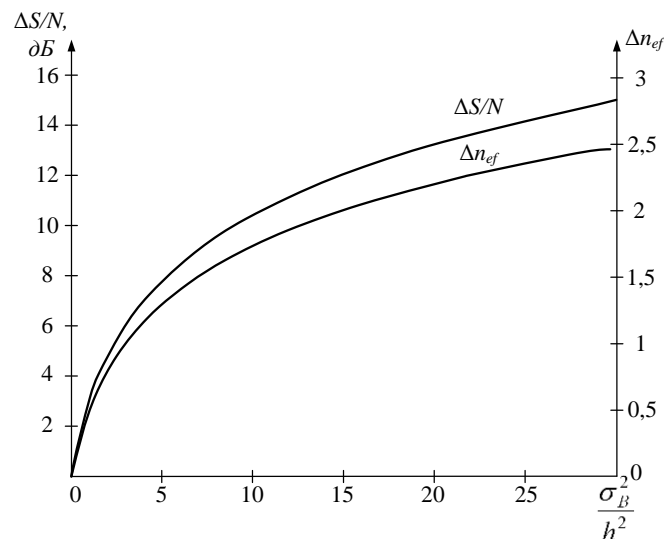


Рисунок 2 – Залежність втрати відношення сигнал/шум і ефективного числа розрядів від динамічної похибки АЦП

Аналіз графіку дозволяє зробити висновок, що отримання максимальної ефективності коригування АЦП при перетворенні широкосмугових сигналів на базі методу статистичного оцінювання та коригування похибок можливе у діапазоні значень дисперсії диференціальної нелінійності базового АЦП від 1 до 15 одиниць молодшого розряду.

Висновки

1. Удосконалено метод коригування похибок лінійності АЦП при перетворенні широкосмугових сигналів, який на відміну від існуючих, базується на процедурі оцінювання спотворень функції розподілу багатотонального тестового сигналу у режимі калібрування перетворювача. Це дає можливість повніше

оцінити динамічні властивості контрольованого АЦП, що створює умови для підвищення роздільної здатності АЦП у режимі коригування.

2. Розроблено структуру пристрою аналого-цифрового перетворення широкопasmових сигналів з коригуванням похибок лінійності, в якій застосовуються цифро-аналогове формування тестового сигналу і табличне формування скоригованих кодів.

3. Виконано аналіз динамічних параметрів АЦП з коригуванням похибок лінійності, який підтвердив високу ефективність запропонованого методу статистичного оцінювання та коригування похибок і високу роздільну здатність побудованої структури АЦП.

Список літератури

- [1] Г. Г. Бортник, С. Г. Бортник, та В. М. Кичак, *Методи та засоби аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2014.
- [2] P. E. Pasaquian, J. M. Dela Cruz, "High Speed Data Converters", *Analog Dialogue*, № 2, p. 1-7. 2021.
- [3] M. Looney, "Advanced Digital Post-Processing Techniques Enhance Performance in Time-Interleaved ADC Systems", *Analog Dialogue*, № 8, p. 1-5. 2018.
- [4] A. Veloni, N. Miridakis, and E. Boukouvala, *Digital and Statistical Signal Processing*. Boca Raton, USA: CRC Press, 2019.
- [5] Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, та Р. М. Вітер, "Метод розширення динамічного діапазону аналого-цифрових трактів засобів цифрового оброблення високочастотних сигналів", *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, № 1, с. 48-51. 2020.

Стаття надійшла: 25.02.2023.

References

- [1] G. G. Bortnyk, S. G. Bortnyk, ta V. M. Kychak, *Metody ta zasoby analoho-tyfrovoho peretvorennia vysokochastotnykh syhnaliv*. Vinnytsia, Ukraina: VNTUY, 2014 [in Ukrainian].
- [2] P. E. Pasaquian, J. M. Dela Cruz, "High Speed Data Converters", *Analog Dialogue*, № 2, p. 1-7. 2021.
- [3] M. Looney, "Advanced Digital Post-Processing Techniques Enhance Performance in Time-Interleaved ADC Systems", *Analog Dialogue*, № 8, p. 1-5. 2018.
- [4] A. Veloni, N. Miridakis, and E. Boukouvala, *Digital and Statistical Signal Processing*. Boca Raton, USA: CRC Press, 2019.
- [5] G. G. Bortnyk, M. V. Vasylykivskyi, ta R. M. Viter, "Metod rozshyrennia dynamichnoho diapazonu analoho-tyfrovyykh traktiv zasobiv tyfrovoho obrobлення vysokochastotnykh syhnaliv", *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*, № 1, s. 48-51. 2020 [in Ukrainian].

Відомості про авторів

Бортник Геннадій Григорович – кандидат технічних наук, професор, професор кафедри інфокомунікаційних систем і технологій.

Мартинюк Тетяна Борисівна – доктор технічних наук, професор, професор кафедри обчислювальної техніки.

G. G. Bortnyk, T. B. Martyniuk

ANALOG-DIGITAL CONVERTER OF WIDEBAND SIGNALS WITH CORRECTION OF LINEARITY ERRORS

Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

УДК 004.422.8

Л. Б. Петришин

ДВОКВАДРАНТНЕ АНАЛОГО-ЦИФРОВЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ МОНТЕ-КАРЛО

AGH науково-технологічний університет, Краків, Польща

Анотація. В сучасних умовах технологічного розвитку та за минулорічних обставин застосування мобільних засобів віддаленого контролю та перетворення інформації є обґрунтоване зручністю застосування, надійністю, безпекою операторів-пілотів та економічною ефективністю. Актуальним завданням дослідження є розробка та впровадження ефективних методів та засобів аналого-цифрового перетворення. В системах управління ряд джерел інформації мають характер інтегрального накопичення миттєвих значень параметру. Обґрунтовано, що для перетворення такої інформації ефективним є метод статистичних досліджень Монте-Карло. Застосування такого методу було обмежено потребою реалізації генераторів псевдовипадкових кодових послідовностей із рівномірним розподілом. Запропонована в статті розробка методу аналого-цифрового перетворення Монте-Карло базувалась на застосуванні кодових впорядкувань, породжених рефлексивно відображеними функціями Радемахера. Проведені дослідження показали одні з кращих показники рівномірності розподілу відліків сигналу сканування аналого-цифрових перетворювачів Монте-Карло. На базі запропонованого методу генерування псевдовипадкових кодових послідовностей із рівномірним розподілом вперше розроблено цифрові генератори-формувачі сигналів віднесення у складі аналого-цифрових перетворювачів Монте-Карло. Розроблена та досліджена схема аналого-цифрового перетворювача Монте-Карло, який здійснює двоквадрантне аналого-цифрове перетворення роздільно «+» та «-» складових перетворюваного сигналу, а також його інтегрального значення. Наведено осцилограми та часові діаграми формування числових імпульсів, як результату перетворення. Запропонований метод та пристрій аналого-цифрового перетворення Монте-Карло мають перспективу застосування в системах обліку споживання ресурсів, зокрема, облік електричної енергії, палива, газу, води та інших носіїв.

Ключові слова: аналого-цифрове перетворення, Монте-Карло, імовірність.

Abstract. In the current conditions of technological development and under last year's circumstances, the use of mobile means of remote control and information transformation is justified by ease of use, reliability, safety of pilot operators and economic efficiency. An urgent task is the development and implementation of effective methods and means of analog-digital conversion. In control systems, a number of sources of information have the character of integral accumulation of instantaneous parameter values. It is substantiated that the method of Monte Carlo statistical research is effective for the transformation of such information. The application of this method was limited by the need to implement generators of pseudo-random code sequences with a uniform distribution. The development of the Monte Carlo analog-to-digital conversion method proposed in the article was based on the application of code orderings generated by reflectively mapped Rademacher functions. The conducted studies showed one of the best uniformity distribution indicators of the scanning signal of the analog-to-digital Monte Carlo converters. Based on the proposed method of generating pseudo-random code sequences with uniform distribution, digital generators-formers of reference signals as part of Monte Carlo analog-to-digital converters were developed for the first time. The circuit of the Monte Carlo analog-to-digital converter, which carries out two-quadrant analog-to-digital conversion separately of the "+" and "-" components of the converted signal, as well as its integral value, was developed and investigated. A Monte Carlo analog-to-digital conversion scheme has been developed. Oscillograms and time diagrams of the formation of numerical pulses as a result of the conversion are given. The proposed Monte Carlo analog-to-digital conversion method and device have the prospect of application in resource consumption accounting systems, in particular, accounting for electric energy, fuel, gas, water, and other media.

Key words: analog-digital conversion, Monte Carlo, probability.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-56-1-58-65>.

Вступ

Перетворення форми інформації є однією із основних системних функцій в системах керування аеромобільними системами моніторингу (АМСМ). Техніка безпілотного керування накладає жорсткі вимоги щодо оперативного контролю параметрів АМСМ, серед яких визначено параметри із необхідним контролем як поточних значень в режимі реального часу, так і їх інтегральних величин [1-11]. Із множини таких параметрів слід виділити параметри контролю забортової інформації, перетворення якої здійснює АМСМ, а також техніко-економічних характеристик функціонування самого АМСМ.

Перевагою застосування АМСМ є безпечний для пілота-оператора автоматизований процес моніторингу екологічного забруднення чи вимірювання розподілів параметрів атмосфери в просторі. Інформація про просторові розподіли фізико-хімічних параметрів атмосфери необхідна для забезпечення безпеки польотів авіаційної і космічної техніки, моніторингу екологічного стану навколишнього середовища в умовах надзвичайних ситуацій, метеорологічного забезпечення екологічно небезпечних об'єктів. Вона також необхідна для прогнозування поширення забруднюючих домішок, оцінки наслідків аварій на атомних станціях і хімічних підприємствах, лісових пожеж та оптимізації заходів щодо їх подолання [1, 2, 7, 9-11]. Іншим прикладним аспектом є математичне моделювання екологічних ситуацій, атмосферних явищ і прогнозів погоди. Контроль параметрів атмосфери поблизу земної поверхні не дозволяє отримати повну і достовірну інформацію про екологічний і метеорологічний стан навколишнього середовища. Натомість АМСМ дозволять здійснити вимірювання просторових розподілів сукупності екологічних і метеорологічних параметрів атмосфери та оперативно передавати їх в систему обробки даних. На борту АМСМ встановлюють прилади для визначення газового і аерозольного складу атмосфери, концентрації забруднюючих домішок, радіаційного фону, апаратуру для точного визначення нижніх і верхніх меж хмарності, електрофізичних параметрів атмосфери та системи оперативного інфообміну. Використання контактних методів перетворення фізико-хімічних параметрів на борту АМСМ дозволяє

проводити вимірювання розподілу параметрів атмосфери з максимально можливою точністю, з високою просторовою роздільною здатністю в режимі реального часу [2, 3, 6, 11]. Аналого-цифрове (АЦ) перетворення поточних та інтегрованих значень таких параметрів, особливо екологічного, хімічного та радіаційного забруднення, є актуальним завданням технічної реалізації засобів первинного перетворення форми вхідної інформації.

Актуальність

Необхідність моніторингу та документування техніко-економічних характеристик АМСМ зумовлена переходом на безперервну інформаційну підтримку літальних апаратів виробниками протягом усього їх життєвого циклу. Метою такого електронного контролю є безпаперове формування інформаційної моделі програмно-технічного комплексу, що включає визначені дані про його експлуатацію з урахуванням міжнародних стандартів [3, 4, 8, 10]. В техніці АМСМ **актуальним** постає завдання створення системи рушіїв з високим ККД для задоволення вимог щодо енергетичної ємності і питомої потужності при забезпеченні максимальної тривалості і скритності переміщення в просторі. Розробляються та впроваджуються енергетичні технології з використанням альтернативних джерел енергії, зокрема сонячної енергії, акумуляторів надвеликої питомої ємності, паливних елементів. Забезпечення надійної експлуатації багатороторних АМСМ та оперативне діагностування потенційних насправностей передбачають здійснення оперативного контролю поточних та інтегральних характеристик споживання енергії чи палива кожного із двигунів, фіксування режимів асиметрії енергоспоживання на режимах стабільного польоту та перехідних режимах [1-4, 8, 11]. Важливим є показник інтегрованого споживання енергії силовою установкою АМСМ за висотою профілю польоту – підйом/зниження.

Мета

Метою проведеного дослідження було опрацювання методів та бортових засобів АЦ перетворення вхідної інформації АМСМ із формуванням цифрових значень параметрів реального часу, а також автоматичне інтегрування та запам'ятовування їх значень протягом визначеного періоду часу, як правило, польоту.

Наукова новизна результатів дослідження полягає у розробці методу та засобів генерування псевдовипадкових опорних сигналів на основі кодових впорядкувань теоретико-числового базису рефлексно відображених функцій Радемахера в трактах АЦ перетворення вхідної інформації методом статистичних досліджень Монте-Карло [13-18]. Це дозволило здійснити перетворення в режимі реального часу та автоматичне інтегрування поточних відліків в регістрах чи пам'яті системи, знизити частоту сканування вхідного сигналу, усереднити похибку та підвищити достовірність результатів АЦ перетворення, знизити кошти впровадження та застосування АЦ перетворювачів.

Аналіз методів і засобів АЦ перетворення та обґрунтування застосування АЦП Монте-Карло

В залежності від спектрально-смугових, техніко-економічних та технологічних вимог до засобів перетворення вхідної інформації використовуються різноманітні методи та архітектури АЦ перетворення [14-17, 19]. АЦ перетворювачі (АЦП) в загальному випадку розрізняють на декілька класів згідно точності перетворення, швидкодії, архітектурних та економічних характеристик. Кожен клас характеризується співвідношенням числа компараторів, тактів періоду АЦ перетворення та пристроїв вибірки-зберігання, за умови наявності таких. В літературних джерелах наведено різноманітні класифікації методів АЦ перетворення, однак найбільшого поширення набула класифікація, яка характеризує часове та алгоритмічне представлення процесу перетворення [14, 16]. Виходячи з цього, АЦП підрозділяються на три основні класи: послідовні, паралельні та комбіновані.

Послідовні АЦП (інтегруючі, послідовного наближення, слідкуючі, напруга-частота) при високій точності та розрядності вихідного коду перетворення мають низьку швидкодію, проте порівняно низькі кошти виготовлення [14, 15, 20-22]. Паралельні АЦП функціонують згідно принципу одночасного перетворення сигналу за допомогою паралельного набору компараторів, володіють найвищою швидкістю, енергоспоживанням, габаритами та є найдорожчими внаслідок розпаралелювання архітектури перетворювачів [23-25]. Комбіновані структури АЦП функціонують згідно принципу багатоступінчатих алгоритмів перетворення та дозволяють досягнути компромісного співвідношення швидкодії, ступеня розпаралелювання архітектури перетворювача та його вартості [28-32]. При розробці та виготовленні кристалів АЦП необхідно враховувати різноманітність елементів в їх складі, технологічні вимоги та вимоги щодо характеристик точності, температурної і часової стабільності, регулярності структури та наявності нелінійних елементів.

Із вище наведеного, основні тенденції розвитку методів та засобів АЦ перетворення полягають в розширенні функціональних можливостей, піднятті швидкодії, виробничої та експлуатаційної надійності, підвищенні регулярності архітектури, зменшенні габаритів та кількості виводів кристалу, зниженні енергоспоживання, зменшенні вартості серійного виробництва. Зі збільшенням числа компараторів, зростає швидкодія, яка зумовлює спектральні характеристики, проте зростають габарити пристрою та його

вартість. Збільшення кількості тактів перетворення знижує швидкодію, але дозволяє зменшити кількість компараторів, спростити структуру АЦП та знизити вартість виготовлення [15-17].

Застосування статистичного методу сканування Монте-Карло дозволяє розширити частотну смугу сигналів перетворення та реалізувати багатовимірне інтегрування за умови інваріантного архітектурного вирішення та апаратних і грошових затрат у порівнянні з інтегруючими АЦП, що зумовлює актуальність проведення досліджень у вказаному напрямку [18].

Аналізуючи розвиток методів та схемотехніки АЦП, спостерігається чітка спеціалізація АЦ інтегральних схем щодо задач застосування [20, 21, 24-27, 29, 31, 32]. Спостерігаються такі тенденції в розробці ефективних АЦП: напрямок АЦ процесорів (на основі дельта-сігма АЦП), комбінування багатокаскадних структур з гібридною технологією виготовлення інтегральних схем та перехід до нових кодових систем перетворення [30]. Проте широкою залишається область застосування традиційних АЦП з подвійним інтегруванням, які дозволяють забезпечити значний динамічний діапазон (більше 14 розрядів). Сигнали для інтегруючого перетворювача легко мультиплекуються, проте межею частоти перетворення є 10-60 відліків/с в залежності від розрядності вихідного коду перетворення. Найближчим часом не передбачається тенденцій щодо витіснення інтегруючих та багатокаскадних новими спеціалізованими дельта-сігма АЦП [14-16]. Користувачі точних дельта-сігма перетворювачів вимушені застосовувати АЦП індивідуально на кожному із каналів внаслідок значного часу встановлення вхідних фільтрів, коли інтегруючі, багатокаскадні та АЦП послідовного перетворення дозволяють здійснювати багатоканальне мультиплексування.

Застосування методів перетворення в традиційних кодових системах набуло певного рівня насичення та обмеження перспективи подальшого їх застосування, що в значній мірі зумовило необхідність розробки таких складних процедур високоточного перетворення як дельта-сігма, із плаваючою комою, багатокаскадних, яким характерна висока неоднорідність структури, що спричинило ускладнення інтегральної, модульної і гібридної технологій процесу виготовлення та подорожання виробництва АЦП. Перехід до нових числових базисів та кодових систем дозволяє покращити ряд техніко-економічних показників [17, 18, 20, 21]. Результати дослідження визначили перспективним застосування надлишкових кодів в засобах АЦП, а також використання нових методів формування кодових упорядкувань АЦ перетворення [5, 29, 31].

Автором розвивається новий напрямок в методах та засобах АЦ перетворення в класі інтегруючих АЦП для вирішення задач статистичного аналізу інтегральних характеристик сигналів на основі застосування методу Монте-Карло [18]. На відміну від наведених в літературних джерелах методів [14-16] вперше вводиться теоретико-числовий базис рефлексно відображених функцій Радемахера, що є основою математичного моделювання відліків із рівномірним законом розподілу, на підставі якого розроблено ряд високоякісних генераторів псевдовипадкових величин в складі АЦП Монте-Карло. Вперше реалізована можливість і розроблено метод багатоквadrантного перетворення сигналів довільної форми з векторним перемноженням та розділеною індикацією "+" і "-" складових, а також як кожного із окремих параметрів, так і проміжних значень їх векторного добутку. Розроблено ряд архітектурних рішень АЦ перетворення одно- та двополярних сигналів, вимірювання із дво- та чотириквadrантним статистичним перемноженням двох та більше некорельованих сигналів, графічних одно- та багатоканальних АЦП.

Метод статистичного перетворення Монте-Карло

При реалізації системних функцій інфотехнологій часто виникає необхідність визначення одно- та багатовимірних інтегралів інформаційних параметрів. Для вирішення задач такого типу в техніці перетворення форми інформації застосовано метод статистичних досліджень Монте-Карло [14, 18], збіжність якого не залежить від кратності інтегралу, а кількість операцій зростає лінійно кратності, коли в звичайних методах інтегрування кількість операцій зростає в показниковій залежності. Похибка перетворення залежить від числа випробувань. Метод Монте-Карло володіє одними з кращих показниками збіжності порівняно із відомими методами та ґрунтується на інтерпретації результату вимірювання як імовірності появи певного роду подій модельованого псевдовипадкового процесу. Зв'язок між математичним очікуванням вимірюваного та модельованого процесів ґрунтується на таких положеннях.

Нехай інформаційний процес X має невідому функцію розподілу $\Phi(x)$, яка визначена на інтервалі $[0, 1]$ і рівна нулю $\Phi(x)=0$ при $x < 0$. Значення вимірюваної величини є нормованими на інтервалі визначення $[0, 1]$. Закладено, що модельований процес Y має відому функцію розподілу $G(y)$, визначену також на інтервалі $[0, 1]$. Розглянемо імовірність того, що $Y < x$ на інтервалі $0 \leq x \leq 1$.

Для дискретних величин

$$p\{Y < x\} = G(x).$$

Якщо Y має рівномірний закон розподілу, то

$$p\{Y < x\} = M[X].$$

Ця залежність визначає можливість обчислення математичного очікування $M[X]$ досліджуваного процесу за частотою виникнення події $P = Y < x$ / внаслідок оцінки значної серії незалежних послідовних випробувань.

Реалізація наведеного математичного співвідношення полягає в проведенні серії статистично незалежних досліджень із накопиченням результатів, причому додатний результат полягає в тому, що досліджувана функція є більшою за значення випадково генерованого відліку, а від'ємний – величина випадково генерованого відліку є більшою за поточне значення досліджуваної функції X . Характеристичною для методу Монте-Карло є оцінка невідомого математичного очікування деякої випадкової величини за значенням визначеної суми відліків, що і характеризує значення інтегралу досліджуваної функції в області визначення за результатами проведених досліджень на підставі відомого рівномірного імовірнісного розподілу. Для реалізації методу Монте-Карло необхідним є застосування генераторів випадкових значень опорних сигналів із різноманітними законами розподілу, причому основну роль в їхньому складі відіграють генератори із рівномірним розподілом [18].

Основи АЦ перетворення Монте-Карло

В цифровій кодовій послідовності з псевдовипадковим розподілом n -розрядні кодові фрагменти володіють псевдовипадковим характером розподілу, тому їхнє аналогове представлення теж відображає псевдовипадковий характер імовірнісного розподілу на площині сканування. АЦП реалізує математичну процедуру визначення значення математичного очікування вимірюваного сигналу на періоді розгортки опорного псевдовипадкового сигналу згідно залежності

$$M\{U_x(t)\} = n/N = p = \sum_0^l U_x(t) \Delta t,$$

де n – кількість додатних результатів імовірнісного дослідження в серії із N дослідів;

p – імовірнісна міра кількісної характеристики процесу $U_x(t)$.

На основі однополярного АЦП перейдемо до реалізації двоквадрантних перетворювачів змінних сигналів.

Метод та реалізація двоквадрантного аналого-цифрового перетворення Монте-Карло

У відомих засобах перетворення змінних величин застосовують різноманітні методи їх випрямлення у відповідну функцію одного знаку із подальшим однополярним перетворенням, або ж швидке АЦ перетворення із частотою дискретизації, значно вищою верхньої спектральної складової вхідного сигналу перетворення [14 – 16]. Проте, аналогові засоби попереднього перетворення форми інформації вносять значні апаратні спотворення, що знижує точність та достовірність результату перетворення. Метод АЦ перетворення Монте-Карло в класі інтегруючих АЦП дозволив вперше здійснити безпосереднє перетворення інтегральних характеристик двополярних сигналів довільної форми та їх асиметрії в значеннях "+" та "-" – складових. Вперше реалізована можливість розділеного і сумарного вимірювання та індикації обох знакових складових змінного сигналу. На рис. 1 наведено структурну схему двоквадрантного АЦП Монте-Карло, а на рис. 2 – часові діаграми його функціонування.

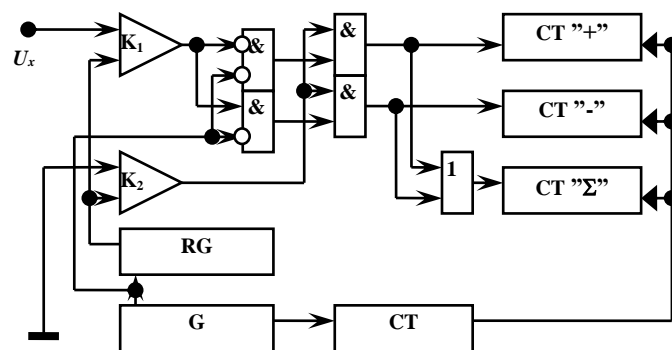


Рисунок 1 – Структурна схема двоквадрантного АЦП Монте-Карло

На перший вхід компаратора K_1 (рис. 1) подається нормоване значення вимірюваного двополярного сигналу U_x , яке порівнюється із дискретними відліками аналогової псевдовипадкової розгортки сигналу сканування U_{on} (рис. 2 а), 3 а)) із виходу генератора псевдовипадкового сигналу RG . Цифро-аналоговий перетворювач в складі генератора RG ввімкнений в режимі формування двополярної симетричної відносно аналогового нуля розгортки сканування в діапазоні $\pm U_{x \max}$ (рис. 2, 3). Вихідні повідомлення із виходу компаратора K_1 стробуються логічним елементом $\&$ імпульсами тактування з виходу генератора G

та детектуються цифровим нуль-детектором, на другі входи якого подається сигнал із виходу компаратора K2, що виконує функцію аналогового нуль-детектора. Із виходів цифрового нуль-детектора число-імпульсні послідовності, що є функцією значення параметру перетворення, подаються на розділене по "+" і "-" складових та загальне сумування лічильниками СТ"+", СТ"- і СТ"Σ". Показники значення суми імпульсів кожного із лічильників характеризують відповідно значення інтегралів "+"-складової, "-"-складової та сумарного значення (рис. 2 б), 3 б)).

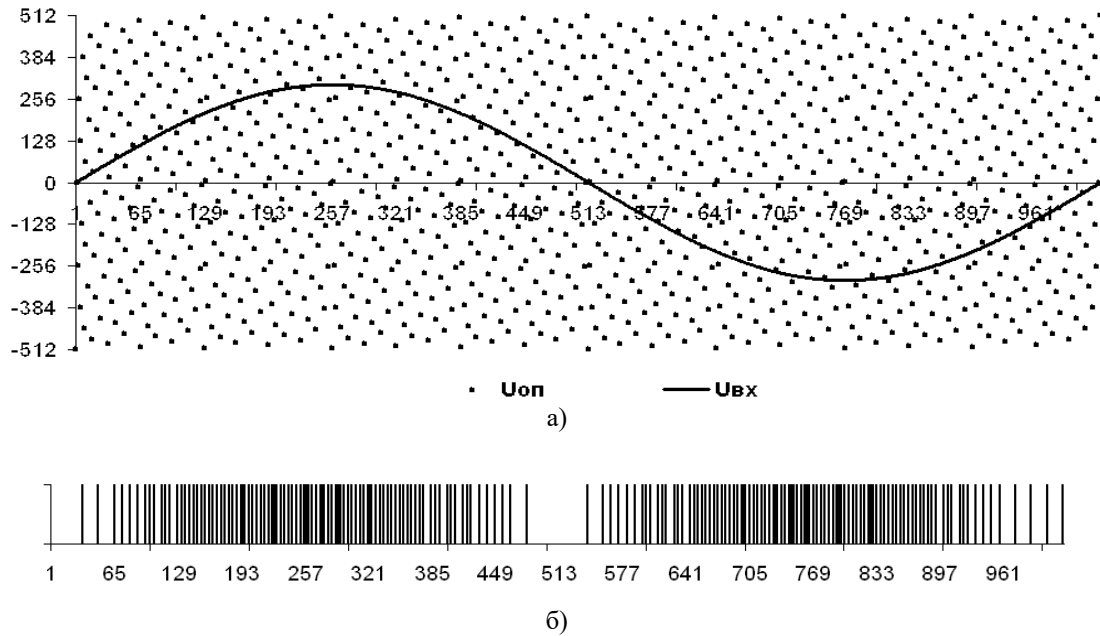


Рисунок 2 – Часові діаграми АЦ перетворення симетричного відносно 0 змінного сигналу

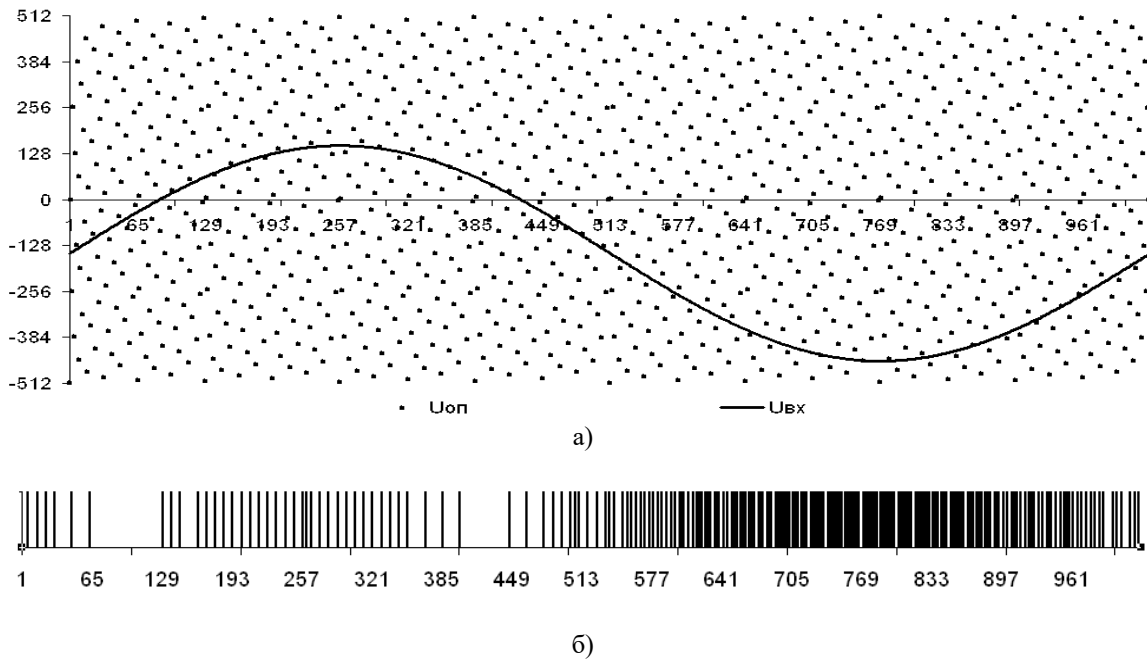


Рисунок 3 – Часові діаграми АЦ перетворення асиметричного відносно 0 змінного сигналу

Із розширенням кількості відліків на періоді дослідження точність АЦП підвищується внаслідок реалізації статистичного усереднення.

Висновки

Досліджено концепції розвитку та проблематику застосування перспективних методів АЦ перетворення, в результаті чого визначено шляхи покращення техніко-економічних показників АЦ перетворювачів. Встановлено, що за останні роки техніка АЦ перетворення під впливом потреб споживачів дозволила значно підвищити рівень технічних параметрів в основному за рахунок технологічних досягнень. Тенденції подальшого розвитку ринку АЦП полягають у скороченні числа інтегральних перетворювачів загального призначення, а переважний розвиток отримують спеціалізовані перетворювачі, орієнтовані на специфіку джерел повідомлень. Досліджено і обґрунтовано ефективність застосуванням методу Монте-Карло на базі генераторів псевдовипадкових рефлексивно відображених послідовностей Радемахера із лінійним імовірнісним розподілом аналогового подання скануючих сигналів, що дозволило розробити методи багатоквadrантного перетворення та структури АЦП двополярних сигналів довільної форми, із векторним перемноженням сигналів, багатоканального та "графічного" перетворення.

References

- [1] E. H. Currie, *Mixed-Signal Embedded Systems Design. A Hands-on Guide to the Cypress PSoC*. Springer Cham. Published: 2021, 860 p. 335 b/w illustrations, 182 illustrations in colour. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-70312-7>. Hardcover ISBN 978-3-030-70311-0, Softcover ISBN 978-3-030-70314-1, eBook ISBN 978-3-030-70312-7.
- [2] J. Ganssle, T. Noergaard and more, *Embedded Hardware: Know It All*. Elsevier, 2007. eBook ISBN: 9780080560748.
- [3] H. Bernstein, *Measuring Electronics and Sensors. Basics of Measurement Technology, Sensors, Analog and Digital Signal Processing*. Springer Wiesbaden, Published: 2021, 343 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-35067-3>. Softcover ISBN 978-3-658-35066-6, eBook ISBN 978-3-658-35067-3.
- [4] V. L. N. Komanapalli, N. Sivakumaran, S. Hampannavar, Eds, "Advances in Automation, Signal Processing, Instrumentation, and Control". *Select Proceedings of i-CASIC 2020*. Springer Singapore. Published: 2021, 3329 p., 588 b/w illustrations, 1554 illustrations in colour. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-8221-9>. Hardcover ISBN 978-981-15-8220-2, Softcover ISBN 978-981-15-8223-3, eBook ISBN 978-981-15-8221-9, ISSN 1876-1100, E-ISSN 1876-1119.
- [5] O. Azarov, Y. Heneralnytskyi, N. Rybko, "Multi-channel digital-analog system based on current-current converters". *Informatyka, Automatyka, Pomiarzy w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. Politechnika Lubelska. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej. vol.10, nr 4. pp. 43-46.
- [6] S. F. Barrett, "Analog to Digital Conversion (ADC)", In *Arduino Microcontroller Processing for Everyone!*. Synthesis Lectures on Digital Circuits & Systems. Springer, Cham, 2013, pp 163-215. https://doi.org/10.1007/978-3-031-79864-1_5. Print ISBN 978-3-031-79863-4, Online ISBN 978-3-031-79864-1.
- [7] S. Motahhir, B. Bossoufi Editors, "Digital Technologies and Applications". *Proceedings of ICDTA 21*, Fez, Morocco. Springer Cham. Published: 2021, 1836 p. 295 b/w illustrations, 840 illustrations in colour. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-73882-2>. Softcover ISBN 978-3-030-73881-5, eBook ISBN 978-3-030-73882-2, Series ISSN 2367-3370, Series E-ISSN 2367-3389.
- [8] L. Tan, J. Jiang, *Digital Signal Processing. Fundamentals and Applications*. Elsevier, 2018, 902 p. eBook ISBN: 9780128150726, Paperback ISBN: 9780128150719.
- [9] E. I. Chumachenko, L. B. Petryshyn, V. V. Konchinsky, "Traffic sign detection and recognition using single shot multibox detectorissn". 1990-5548. *Electronics and Control Systems*. 2021, nr 1(67): pp. 26-32.
- [10] J. Luecke, *Analog and Digital Circuits for Electronic Control System Applications*. Elsevier, 2004. Paperback 978-0-7506-7810-0, eBook 978-0-08-047581-3.
- [11] M. Wolfc, *Embedded System Interfacing. Design for the Internet-of-Things (IoT) and Cyber-Physical Systems (CPS)*. Elsevier Inc. 2019. Paperback ISBN: 9780128174029, eBook ISBN: 9780128174036, <https://doi.org/10.1016/C2018-0-00203-0>.
- [12] L. Petryshyn, M. Petryshyn, "Error protected data transmission on the recursive encryption base", in: *2019 IEEE 5th international conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)*: October 22–24, 2019, Kyiv, Ukraine: proceedings / IEEE Ukraine Section SP/AES Societies Joint Chapter, National Aviation University: IEEE, cop. 2019, pp. 282–285. e-ISBN: 978-1-7281-2592-3.
- [13] A. Agarwal, J. Lang, *Foundations of Analog and Digital Electronic Circuits*. 2005. Paperback 978-1-55860-735-4, eBook 978-0-08-050681-4.
- [14] M. J. M. Pelgrom, *Analog-to-Digital Conversion*. Springer Cham. 4 edition. Published: 2022, 1011 p. 328 b/w illustrations, 454 illustrations in colour. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-90808-9>. Hardcover ISBN 978-3-030-90807-2, Softcover ISBN 978-3-030-90810-2, eBook ISBN 978-3-030-90808-9.

- [15] D. Sheingold, Ed., *Analog-Digital Conversion Handbook*. Analog Devices/Prentice-Hall, 1986. [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/education/education-library/analog-digital-conversion-1986.html> Accessed on: March 07, 2023.
- [16] W. Kester, Ed., *The Data Conversion Handbook*. Newnes, 2005, ISBN 0-7506-7841-0. Also published as *Analog-Digital Conversion*, Analog Devices, Inc. 2004, ISBN 0-916550-27-3. [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/education/education-library/data-conversion-handbook.html>. Accessed on: March 07, 2023.
- [17] S. W. Smith, *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. Second Edition, California Technical Publishing, 1999. ISBN 0-9660176-7-6, ISBN 0-9660176-4-1, ISBN 0-9660176-6-8. [Online]. Available: https://www.analog.com/en/education/education-library/scientist_engineers_guide.html. Accessed on: March 07, 2023.
- [18] L. Petryshyn, "Monte Carlo Multi-Quadrant Analog-to-Digital Conversion of Parameters of Unmanned Aerial Vehicles". *2021 IEEE 6th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD)* DOI: 10.1109/APUAVD53804.2021. 19-21 Oct. 2021, pp. 139-143.
- [19] Y. Zheng, Y. Zhao, N. Zhou, H. Wang, D. Jiang, "A short review of some analog-to-digital converters resolution enhancement methods". *Measurement*, vol. 180, August 2021, 109554. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109554>.
- [20] M. Deghat, P. Karimaghvae, "A new method for integrating analog to digital conversion based on error reduction". *Measurement*. vol. 40, iss. 9-10, 2007, pp. 919-927. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2006.10.013>.
- [21] N. Guangshan, L. Cong, Z. Jianwei, L. Xuetao, L. Xiangdong, "Research progress of time-interleaved analog-to-digital converters". *Integration*, vol. 81, November 2021, pp. 313-321. <https://doi.org/10.1016/j.vlsi.2021.08.007>.
- [22] B. Haraoubia. *Analog-to-Digital and Digital-to-Analog Converters: in Non-Linear Electronics 2: Flip-Flops, ADC, DAC and PLL*. Elsevier Inc. 2019, pp. 99-190. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-301-1.50002-7>.
- [23] L. Kumre, N. V. Ramesh, "Design and Implementation of Flash Analog to digital Converter": in *Materials Today: Proceedings*. vol. 5, iss. 1, part 1, 2018, pp. 1104-1113. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.189>.
- [24] E. G. Clara, Z. H. Wilkins, "A 16-bit 10Gbps current steering RF DAC in 65 nm CMOS achieving 65dBc ACLR multi-carrier performance at 4.5 GHz Fout". In: *Symposium on VLSI circuits digest of technical papers*, 2015, pp. 166-167.
- [25] A. T. Ramkaj, M. J. M. Pelgrom, M. S. J. Steyaert, F. Tavernier, *Multi-Gigahertz Nyquist Analog-to-Digital Converters. Architecture and Circuit Innovations in Deep-Scaled CMOS and FinFET Technologist*. Springer Cham. Published: 2023, 269 p. 36 b/w illustrations, 131 illustrations in colour. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-22709-7> Hardcover ISBN 978-3-031-22708-0, Softcover ISBN 978-3-031-22711-0, eBook ISBN 978-3-031-22709-7, ISSN 1872-082X, E-ISSN 2197-1854.
- [26] M. Alavi, J. Mehta, R. Staszewski, *Radio-Frequency Digital-to-Analog Converters*. Elsevier. 2016. eBook 978-0-12-802503-1, Hardcover 978-0-12-802263-4.
- [27] D. Li, X. Zhao, S. Liu, M. Liu, R. Ding, Y. Liang, Z. Zhu, "Radio frequency analog-to-digital converters: Systems and circuits review". *Microelectronics Journal*, vol. 119, 2022, 105331. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2021.105331>.
- [28] C. C. Lee, M. P. Flynn, "A SAR-assisted two-stage pipeline ADC". *IEEE J Solid-State Circuits* 46, 2011, pp. 859-869.
- [29] O. Azarov, L. Krupelnitskyi, H. Rakytyanska, J. Fesl, "Reconstruction of Acoustic Surfaces Incomplete Data as an Identification Problem Based on Fuzzy Relations". RWTH Aachen University. 2022. *CEUR Workshop Proceedings*: pp. 208-226.
- [30] C. F. Hsieh, T. H. Tsai, C. S. Chen, Y. H. Hsieh, "Implementation of a Delta-Sigma Analog-to-Digital Converter". In: Juang, J. (ed.) *Proceedings of the 3rd International Conference on Intelligent Technologies and Engineering Systems (ICITES2014)*. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 345. Springer, Cham. 2016, pp. 257-262. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17314-6_34. Print ISBN 978-3-319-17313-9, Online ISBN 978-3-319-17314-6.
- [31] O. Azarov, L. Krupelnitskyi, H. Rakytyanska, "Sound field reconstruction from incomplete data by solving fuzzy relational equations". – Lecture Notes in Computational Intelligence and Decision Making: *2020 International Scientific Conference "Intellectual Systems of Decision-making and Problems of Computational Intelligence"*, Springer International Publishing, 2021, pp. 547-566.
- [32] A. Pourahmad, R. Dehghani, S. A. A. Mehr, R. Lotfi, "Versatile DAC-less successive approximation ADC architecture for medium speed data acquisition". *Microelectronics Journal*, vol. 129, November 2022, 105585. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2022.105585>.

Стаття надійшла: 22.02.2023.

Відомості про автора

Петришин Любомир Богданович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри управління підприємством, AGH науково-технологічний університет, Краків, Польща.

L. B. Petryshyn

**TWO-QUADRANT ANALOG-DIGITAL CONVERSION OF
MONTE CARLO**

AGH University of Science and Technology, Cracow, Poland

УДК 004.42

Л. А. Савицька, Н. В. Добровольська, В. О. Кондратюк

ПРОГРАМНИЙ МОДУЛЬ ПОПЕРЕДНЬОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ПАЦІЄНТІВ НА ОСНОВІ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ КОХОНЕНА

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Анотація. Як відомо, діагностування – це надважливий аспект в процесі відновлення здоров'я. Коли пацієнт звертається з певними скаргами за медичною допомогою, то в більшості випадків, кожний лікар призначить йому загальний або розширений (біохімічний) аналіз крові. Це є базова діагностична процедура. Загальний аналіз дозволить встановити відповідний факт порушення в роботі організму. Біохімічний же аналіз крові надасть вже більш точну інформацію про стан більшості життєво важливих органів, і дозволить оцінити основні обмінні процеси. Високу значимість мають результати аналізу саме на етапі діагностики, і, в подальшому, при моніторингу процесу одужання. Моніторинг потрібен при необхідності контролю ефективності терапії. То ж у статті розглядаються актуальні та важливі питання розробки програмного модуля для попереднього діагностування пацієнтів за аналізом крові. Тому важливим є час виконання та швидкість отримання результатів аналізу крові. Програмний модуль, що пропонується до вашої уваги, має за основу нейронну мережу Кохонена. Так як така нейронна мережа є мережею, що навчається, то вона стає відмінним помічником в нашій задачі в цілому та й при подальшому діагностуванні. Діагностування відбувається на основі результатів аналізу, при цьому зберігається велика кількість важливих параметрів при достатньо швидкій роботі алгоритму. Отже, цей програмний модуль необхідний для збільшення достовірності попереднього діагностування, відносно конкурентів, а також, для достатньо великої економії часу лікарів і пацієнтів за рахунок швидкості роботи алгоритму. У статті наведено структуру, математичну модель та порядок функціонування нейронної мережі Кохонена. Розглянуто архітектуру програмного модуля нейронної мережі. Розроблено алгоритм функціонування програмного модуля, та й вже готового додатку.

Ключові слова: нейронна мережа кохонена, програмний модуль, діагностування пацієнтів.

Abstract. As you know, diagnosis is an extremely important aspect in the process of restoring health. When a patient seeks medical help with certain complaints, in most cases, each doctor will prescribe a general or extended (biochemical) blood test. This is a basic diagnostic procedure. A general analysis will allow establishing the corresponding fact of a violation in the body's work. Biochemical analysis of blood will provide more accurate information about the state of most vital organs, and will allow to evaluate the main metabolic processes. The results of the analysis are of high importance precisely at the stage of diagnosis, and, subsequently, when monitoring the recovery process. Monitoring is necessary if it is necessary to control the effectiveness of therapy. At the same time, the article deals with current and important issues of developing a software module for preliminary diagnosis of patients by blood analysis. Therefore, the time of execution and the speed of obtaining blood test results are important. The program module offered to your attention is based on the Kohonen neural network. Since such a neural network is a learning network, it becomes an excellent assistant in our task as a whole and in further diagnostics. Diagnosis is based on the results of the analysis, while a large number of important parameters are preserved with sufficiently fast operation of the algorithm. Therefore, this software module is necessary to increase the reliability of preliminary diagnosis, relative to competitors, and save time for doctors and patients. The article describes the structure, mathematical model and order of functioning of Kohonen's neural network. The architecture of the neural network software module is considered. An algorithm for the functioning of the software module and the ready-made application has been developed.

Key words: Kohonen neural network, software module, patient diagnosis.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-56-1-66-74>.

Вступ

Традиційний процес діагностування пацієнтів у лікарнях є доволі тривалим та багатостадійним – хворий має пройти реєстрацію, консультацію у сімейного лікаря, отримати направлення до лікаря-спеціаліста, який з деякою ймовірністю може визначитись хибно стосовно реальної хвороби пацієнта. Щоб підтвердити або спростувати діагноз потрібно пройти низку аналізів, що може призвести через довготривалість цього процесу до загострення хвороби або поставлення хибного діагнозу.

Також є недостатньо ефективними наявні автоматизовані методи діагностики, так як більшість систем орієнтована на визначення якогось конкретного захворювання, що за специфікою медичної галузі, має високу ймовірність виявитись хибним, а також, мають невиправдану складність використовуваних алгоритмів та їх програмну реалізацію, та й можуть використовуватись лише медичними фахівцями.

Актуальність

Відсутність точних, загальнодоступних та швидких програмних засобів діагностування є причиною невірної визначення хвороб пацієнтів у лікарнях, витрат часу на очікування у чергах, реєстрацію та проведення непотрібних аналізів. У даній ситуації бажаним є створення програмного засобу для діагностування пацієнтів, що зможе забезпечити високу достовірність та швидкодію діагностування різноманітних хвороб, який не потребує спеціального апаратного забезпечення для свого функціонування.

Мета досліджень

Метою статті є підвищення достовірності попереднього медичного діагностування пацієнтів за рахунок створення програмного модуля кластеризації пацієнтів на основі нейронної мережі Кохонена за аналізом крові.

Постановка задач

Загальний аналіз крові – це лабораторне дослідження, що включає підрахунок всіх видів клітин крові (лейкоцитів, еритроцитів, тромбоцитів), визначення їх параметрів, лейкоцитарної формули, вимірювання рівня гемоглобіну, визначення співвідношення клітинної маси до плазми (гематокрит). При більшості захворювань і профілактичних обстеженнях проводиться загальний аналіз крові і включає в себе 15 показників, кожен з яких при відхиленні від норми сигналізує про наявність певних хвороб.

Програмний модуль повинен забезпечувати швидкість та достовірність визначення попереднього діагнозу, зручність користування, використання доступних апаратних та програмних засобів користуванням.

Необхідно виконати наступні завдання для досягнення поставленої мети:

- проаналізувати модель попереднього діагностування пацієнтів на основі нейронної мережі Кохонена;
- розробити структуру програмного модуля;
- розробити алгоритм роботи програмного модуля попереднього діагностування пацієнтів.

Структура та математична модель нейронної мережі Кохонена

Мережа Кохонена використовує неконтрольоване навчання, а навчальна множина складається лише із значень вхідних змінних. Розпізнаючи кластери в навчальних даних, мережа розподіляє дані до відповідних кластерів. І якщо в подальшому мережа зустрічається з набором даних, що не схожі ні з одним із відомих зразків, тоді вона переносить його до нового кластеру. Якщо ж в даних містяться мітки класів, тоді мережа може вирішувати задачі класифікації. Мережі Кохонена можна використовувати і в задачах, де класи відомі – перевага буде у спроможності мережі виявляти подібність між різноманітними класами [1].

Мережа Кохонена має всього два шари: вхідний і вихідний, що називають самоорганізованою мапою. Елементи мапи розташовуються в деякому просторі – як правило двовимірному (рис. 1).

Методом послідовних наближень навчається мережа Кохонена. Обирається випадковим чином вихідне розташування центрів, а потім алгоритм поступово вже покращується для кластеризації навчальних даних.

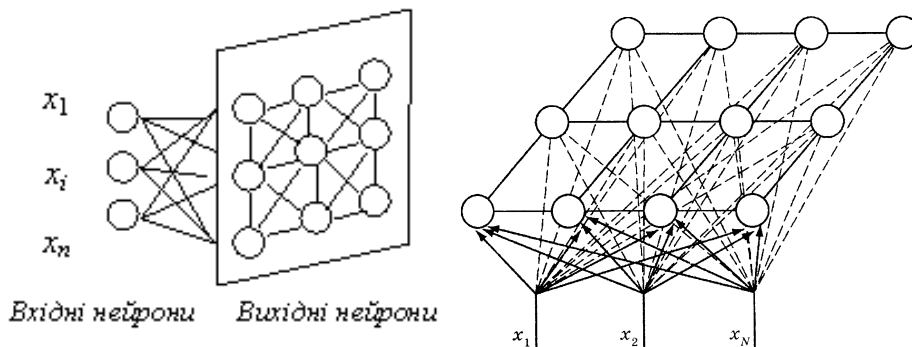


Рисунок 1 – Двовимірна структура мережі Кохонена

Основний ітераційний алгоритм Кохонена традиційно проходить послідовно ряд епох. На кожній з цих епох опрацьовується якийсь один навчальний приклад. Далі - вхідні сигнали - вектори дійсних чисел – послідовно пред'являються до мережі. Не визначаються бажані вихідні сигнали. Синаптичні ваги мережі визначають кластери після пред'явлення достатньої кількості вхідних векторів. А ваги організуються так, що топологічно близькі вузли є чутливими до схожих вхідних сигналів[3].

Для реалізації алгоритму необхідно визначити зону сусідства нейронів (окіл нейрона-переможця). На рис. 2 показано зони топологічного сусідства нейронів на карті ознак в різні моменти часу. $NE_j(t)$ – множина нейронів, які є сусідами нейрона j у момент часу t . Зони сусідства зменшуються з часом.

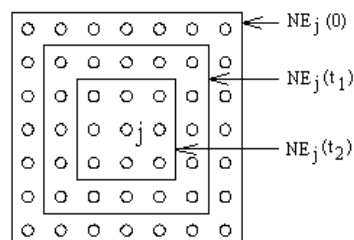


Рисунок 2 – Зони топологічного сусідства на карті ознак у різні моменти часу

Потенційними функціями сусідства можуть бути визначені такі:

а) функція «мексиканський капелюх», яка обчислюється за формулою (рис. 3);

$$f_{\text{gauss2}}(d, \sigma) = \left(1 - \left(\frac{d}{\sigma}\right)^2\right) \cdot e^{-\left(\frac{d}{\sigma}\right)^2}$$

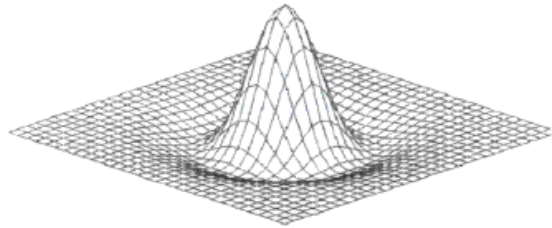


Рисунок 3 – Функція «мексиканський капелюх»

б) дзвоноподібна функція Гауса, яка обчислюється за формулою (рис. 4);

$$f_{\text{gauss1}}(d, \sigma) = e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}},$$

де σ^2 – дисперсія відхилення;

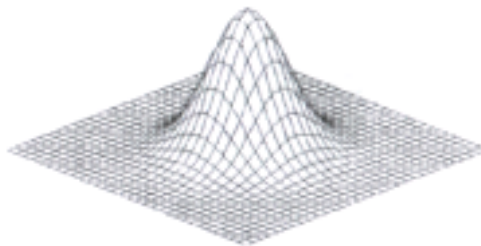


Рисунок 4 – Дзвоноподібна функція Гауса

в) косинусоїдна функція, яка обчислюється за формулою (рис. 5);

$$f_{\text{cos}}(d, \sigma) = \begin{cases} \cos\left(\frac{d\pi}{2\sigma}\right), & d < \sigma; \\ 0, & d \geq \sigma; \end{cases}$$

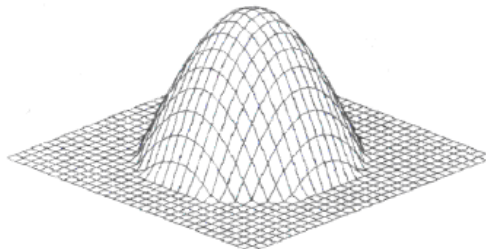


Рисунок 5 – Косинусоїдна функція

г) циліндрична функція, яка обчислюється за формулою (рис. 6);

$$f_{cylinder}(d, \sigma) = \begin{cases} 1, & d < \sigma; \\ 0, & d \geq \sigma; \end{cases}$$

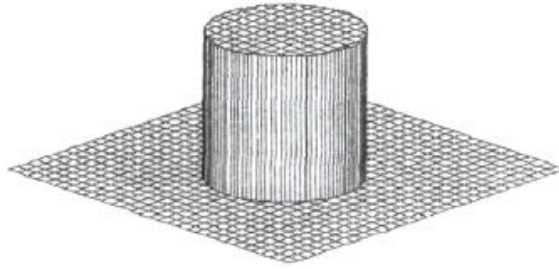


Рисунок 6 – Циліндрична функція

д) конусоподібна функція, яка обчислюється за формулою (рис. 7);

$$f_{cone}(d, \sigma) = \begin{cases} 1 - \frac{d}{\sigma}, & d < \sigma; \\ 0, & d \geq \sigma; \end{cases}$$

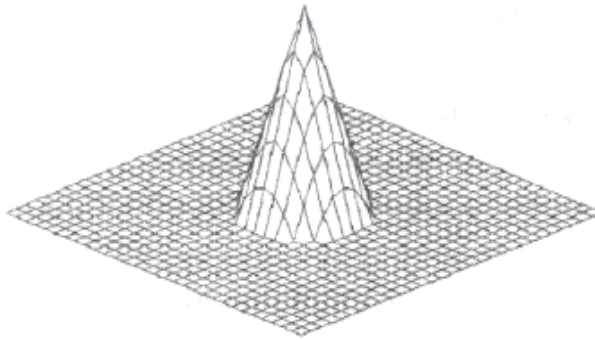


Рисунок 7 – Конусоподібна функція

е) функція «французький капелюх», яка обчислюється за формулою (рис. 8);

$$h(p) = \begin{cases} 1, & |p| \leq \alpha, \\ -\frac{1}{3}, & \alpha < |p| \leq 3\alpha \\ 0, & |p| \geq 3\alpha \end{cases}$$

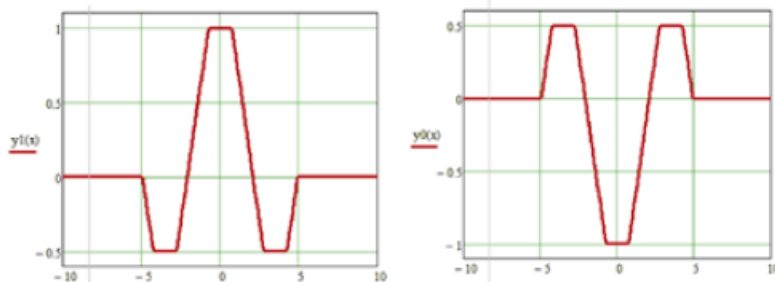


Рисунок 8 – Функція «французький капелюх»

Порядок функціонування нейронної мережі Кохонена

Загальний алгоритм функціонування мережі Кохонена:

1. Ініціалізація (створення) мережі. Ваговим коефіцієнтам мережі надаються малі випадкові значення.
2. Пред'явлення мережі нового вхідного вектору.
3. Обчислення відстані вхідного вектора до всіх нейронів мережі:
Відстані d_j від вхідного вектору до кожного нейрона j визначаються за формулою .

$$d_j = \sum_{i=1}^N (x_i(t) \cdot w_{ij}(t))^2$$

де x_i – i -ий елемент вхідного сигналу в момент часу t , $w_{ij}(t)$ – вага зв'язку від i -го елемента вхідного сигналу до нейрона j у момент часу t .

1. Вибір нейрона з найменшою відстанню (рис. 9):
Вибирається нейрон-переможець j^* , для якого відстань d_j мінімальна.

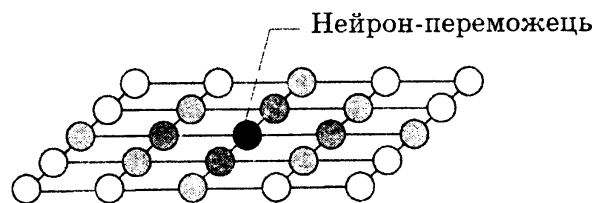


Рисунок 9 – Нейрон-переможець на шарі мапи Кохонена

2. Налаштування ваг нейрона j^* і його сусідів (рис. 10):

Робиться налаштування ваг для нейрона j^* і всіх нейронів з його околу. Нові значення ваг обчислюються за формулою .

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + r(t)(x_i(t) - w_{ij}(t))$$

де $r(t)$ – швидкість навчання, що зменшується з часом (додатне число, менше одиниці).

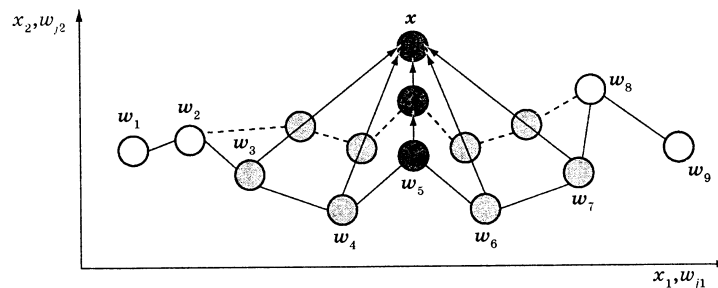


Рисунок 10 – Зміна ваг мапи Кохонена при навчанні

3. Повернення до кроку 2.

В цьому алгоритмі використовується коефіцієнт швидкості навчання, що поступово зменшується для кращої корекції на новій епосі. В результаті позиція центру встановлюється в такій позиції, яка кластеризує задовільним чином приклади, для яких даний нейрон є переможцем.

За допомогою використання поняття околу досягається властивість топологічної впорядкованості в алгоритмі. Окіл (радіус сусідства) – це декілька нейронів, які оточують нейрон-переможець. Розмір околу поступово зменшується, відповідно до швидкості навчання, таким чином, що спочатку до нього належить досить велика кількість нейронів (можливо вся мапа), а вже на самих останніх етапах окіл стає нульовим та складається лише тільки з нейрона-переможця. Корекція застосовується в алгоритмі навчання не тільки до нейрона-переможця, але і до всіх нейронів з його поточного околу. В результаті такої зміни околу, початкові, досить великі ділянки мережі – мігрують у бік навчальних прикладів. Мережа формує

укрупнену вже структуру топологічного порядку, при якій активуються групи нейронів за рахунок схожих прикладів, що знаходяться поруч на топологічній мапі. З кожною новою епохою коефіцієнт швидкості навчання та розмір околу зменшуються, тим самим всередині ділянок мапи виявляють більш тонкі розходження, які, зрештою, призводять до точнішого налаштування кожного нейрона. Навчання часто розбивають на дві фази зумисно: більш тривалу з малою швидкістю навчання і нульовими або майже нульовими околами і більш коротку, з великою швидкістю навчання і великих околів [2].

Алгоритм функціонування програмного модуля

Загальний алгоритм роботи програмного модуля попереднього діагностування пацієнтів на основі нейронної мережі Кохонена наведений на рисунку 11.

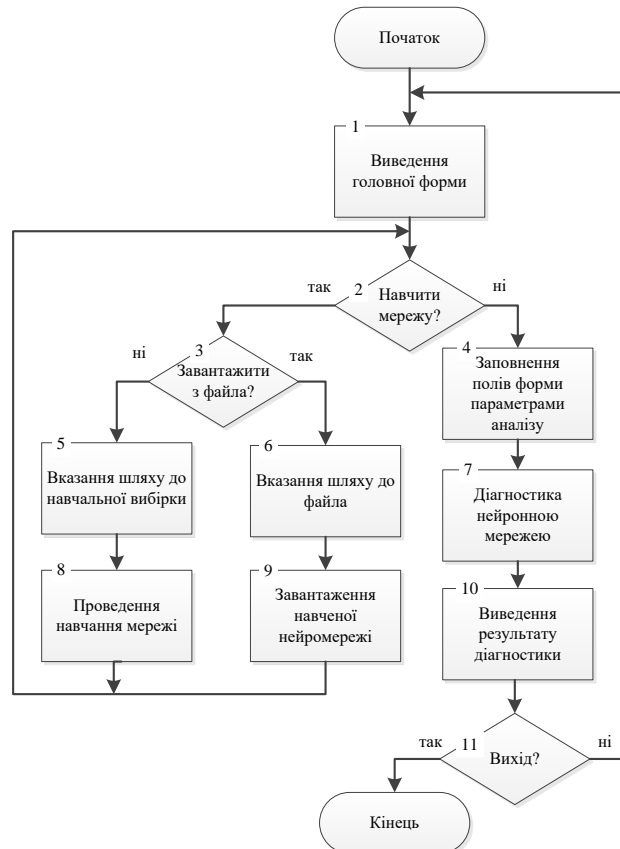


Рисунок 11 – Загальний алгоритм роботи програмного модуля попереднього діагностування пацієнтів на основі нейронної мережі Кохонена

Архітектура розроблюваного програмного модулю попереднього діагностування пацієнтів на основі нейронної мережі Кохонена складається з двох шарів нейронів (рис. 12). Перший шар не є фактично нейронним шаром, він тільки отримує вхідні дані і передає їх на другий шар. Кожен нейрон другого шару має свій вектор ваг, розмірність якого збігається з розмірністю вхідного шару. Нейрони з'єднуються з сусідніми нейронами, що визначає топологію і структуру мапи Кохонена. Нейрони вихідного шару ще називають кластерними елементами, їх кількість визначає максимальну кількість груп, на які система може розділити вхідні дані. Збільшуючи кількість нейронів другого шару, можна збільшувати деталізацію результатів процесу кластеризації. Оскільки програмний модуль буде визначати 12 груп хвороб для чоловіків та 12 для жінок, доцільним є задання кількості нейронів шару Кохонена не менше 24 (по одному нейрону на кожен кластер). А оскільки для надійної роботи мережі потрібно передбачити певну кількість «запасних» нейронів, то оберемо кількість нейронів шару Кохонена 30.

Була проведена модифікація даної мережі, так як стандартна реалізація мережі Кохонена не передбачає визначеної кількості кластерів, та й їх початкові центри приймають випадкові малі значення. Модифікація полягає у попередньому визначенні кількості кластерів та їх центрів, що відповідають відхиленням від норми та нормальним значенням показників загального аналізу крові.

Мережа має два шари: вхідний та вихідний (шар Кохонена) (рис.12). Шар Кохонена складається з певної кількості n паралельно діючих лінійних елементів. Всі ці елементи мають однакову кількість

входів m і отримують один і той самий вектор вхідних сигналів $x=(x_1...x_m)$ на свої входи. На виході j -го лінійного елемента ми отримуємо сигнал, який розраховується за такою формулою:

$$y_j = w_{j0} \sum_{i=1}^m w_{ji} x_i$$

де w_{ji} – ваговий коефіцієнт i -го входу j -го нейрону, w_{j0} – пороговий коефіцієнт.

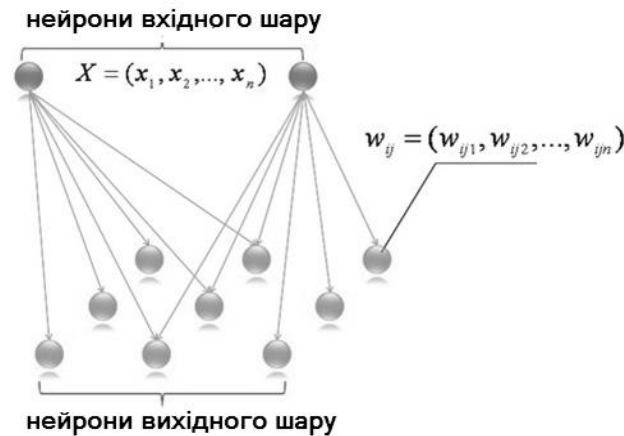


Рисунок 12 – Структура мережі Кохонена розроблюваного програмного модулю

Після проходження шару лінійних елементів сигнали подаються на обробку за таким правилом «переможець забирає все»: серед вихідних сигналів y_i шукається максимальний; його номер $j_{\max} = \arg \max_j \{y_j\}$. Остаточню, на виході сигнал з номером j_{\max} дорівнює одиниці, а всі інші – нулю. Якщо ж максимум одночасно досягається для декількох j_{\max} , тоді приймають всі сигнали рівними одиниці.

Навчання розроблюваної мережі відбувається так. На початку роботи визначається кількість кластерів та їх центри. Дана інформація визначена заздалегідь: кількість кластерів становить 30, початкові центри кластерів відповідають наборам показників хвороб для визначених груп хвороб. Потім деякий вхідний вектор із набору навчальних вибирається і встановлюється на вході нейронної мережі. На даному етапі відмінності між всіма векторами та вхідним вектором обчислюються за такою формулою :

$$D_{ij} = |X^l - W_{ij}| = \sqrt{(x_1 - w_{ij1})^2 + \dots + (x_n - w_{ijn})^2}$$

де i та j – це показники нейронів у вихідному шарі. Після чого нейронна мережа вже обирає нейрон-переможець із переліку визначених центрів кластерів, тобто саме такий, щоб його ваговий вектор був схожий на вхідний за формулою:

$$D(k_1, k_2) = \min_{i,j} D_{i,j}$$

де k_1 та k_2 – показники нейрона-переможця. Після чого проводиться корекція вагових векторів переможця та сусідніх з ним нейронів. Близькі до переможця нейрони визначаються топологічною функцією сусідства «Мексиканський капелюх», яка розраховується за формулою:

$$h(p, t) = \exp\left(-\frac{p^2}{\sigma^2(t)}\right) \left(1 - \frac{2}{\sigma^2(t)} p^2\right)$$

де p – відстань до нейрона переможця, яку можна знайти за формулою :

$$p = \sqrt{(k_1 - i)^2 + (k_2 - j)^2}$$

де σ – функція, яка визначає радіус сусідства. На початку функціонування програмного модуля ця функція включає весь простір сенсорного поля (сітки), та з часом значення її зменшується.

Після обчислення топологічної функції ваги усіх нейронів переобчислюються за формулою.

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \alpha(t)h(p,t)(x^l(t) - w_{ij}(t))$$

де $\alpha(t)$ – функція швидкості навчання, що змінюється з часом.

Якщо нейрон виявляється переможцем чи сусіднім до нього, тоді його вектор ваг оновлюється або ж залишається незмінним. Нейронна мережа на кожному кроці визначає нейрон, у якого ваговий вектор є найбільш подібним до вхідного, та коригує його ваги та ваги сусідів так, щоб наблизити їх до вхідного вектора (рис. 13) [4].

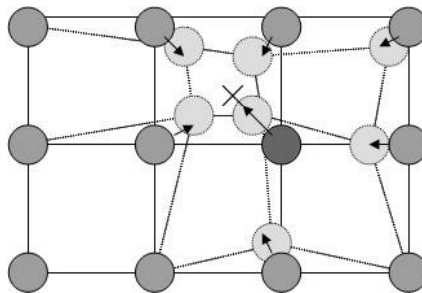


Рисунок 13 – Оновлення нейрона - переможця і його сусідів та «підштовхування» у бік вхідного вектора, який позначений «X» на рисунку. Пунктирні та суцільні лінії визначають ситуацію до та після оновлення нейрону, відповідно.

Нейронній мережі представляється кожен вхідний вектор з навчальної вибірки, і це навчання триває доки різниця між вхідним і ваговим векторами досягне заданого значення ϵ або ж деяке фіксоване число циклів. Різниця між сусідніми нейронами зменшується з плином часу, і, отже, вони організуються в групи (кластери), що відповідають одному з класів з навчальної множини.

Для оптимальних розрахунків запропонованої мережі, що використовується при розробці програмного модуля, було введено процедуру попередньої обробки вхідних даних. При такій процедурі величини ознак, які утворюють вхідний вектор, приводяться до де-якого заданого діапазону. Оскільки вихідні значення ознак змінюються в достатньо великому діапазоні, то необхідна нормалізація, тому й існує ймовірність недостатньо коректної роботи цієї нейронної мережі з такими даними. Так, значення, що відрізняються один від одного на кілька порядків можуть міститися в одному вхідному векторі. Наприклад: стандартний рівень гемоглобіну – 120 – 180 г/л, колірний показник – 0,85 – 1,15 %. Такий дисбалансом між значеннями показників може бути викликана погана стійкість роботи моделі, погіршувати результати навчання і уповільнювати весь його процес. Всі значення вхідних ознак будуть приведені до деякого вузького діапазону після нормалізації, тобто – [0 ... 1] що дозволить мережі працювати коректніше з даними [5].

Нормалізація вхідних даних була використана для реалізації запропонованого підходу до діагностування за формулою :

$$y = \frac{(x - x_{\min})(d_2 - d_1)}{x_{\max} - x_{\min}} + d_1$$

де: x – значення, що підлягає нормалізації;

$[d_1, d_2]$ – інтервал значень x ;

$[x_{\min}, x_{\max}]$ – інтервал, до якого буде зведено значення x .

Таким чином, був розроблений алгоритм, за яким буде у подальшому працювати програмний модуль попереднього діагностування пацієнтів на основі нейронної мережі Кохонена.

Висновки

Попереднє діагностування пацієнтів займає чимало часу та зазвичай має низьку достовірність, що дуже часто призводить до неправильно поставленого діагнозу, чи загострення хвороби. Саме тому було вирішено спроектувати програмний модуль, який забезпечить високу швидкість роботи, достовірність та надійність. Мережа кохонена ідеально підходить для вирішення такої задачі, оскільки навчається за допомогою методу послідовних наближень та виконує задачі кластеризації.

Спроекований програмний модуль забезпечує високу швидкість роботи та достовірність результатів попереднього діагностування пацієнтів. Також перевагою цього модуля є те, що його можна навчати базою пацієнтів, яка належить до тої, чи іншої етнічної групи в певному регіоні, що робить його ще більш універсальним і широкозастосовуваним.

Список літератури

- [1] В. В. Акіменко, Штучні нейронні мережі в задачах групування та аналізу інформації [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://csc.knu.ua/media/study/asp/art_net_group_inf_akimenko/lecture/lec1.pdf. Дата зверення: 05.12.2022.
- [2] С. О. Субботін, *Нейронні мережі: теорія та практика: навч. посіб.* Житомир: Вид. О. О. Євенок, 2020, 184 с.
- [3] Teuvo Kohonen, *Self-organizing maps*. Berlin; Heidelberg: New York; Barselona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Singapore; Tokyo; Springer, 2001. [Online]. Available: <https://www.amazon.com/Self-Organizing-Maps-Teuvo-Kohonen/dp/3540679219?asin=3540679219&revisionId=&format=4&depth=1>. Accessed on: 05.12.2022.
- [4] E. Oja, S. Kaski, *Kohonen Maps*. Elsevier Science B. V., 1999.
- [5] M. Kantardzic, *Data Mining: Concepts, Models, Methods, and Algorithms*. 2nd edition. John Wiley & Sons, Inc, 2011.
- [6] J. Tan, *Developments in Healthcare Information Systems and Technologies: Models and Methods*. IGI Global, 2010.

Стаття надійшла: 05.12.2022.

References

- [1] V. V. Akimenko, Shtuchni neironni merezhi v zadachakh hrupuvannia ta analizu informatsii. [Online]. Available: http://csc.knu.ua/media/study/asp/art_net_group_inf_akimenko/lecture/lec1.pdf. Accessed on: 05.12.2022 [in Ukrainian].
- [2] S. O. Subbotin, *Neironni merezhi: teoriia ta praktyka: navch. posib.* Zhytomyr: Vyd. O. O. Yevenok, 2020, 184 p. [in Ukrainian].
- [3] Teuvo Kohonen, *Self-organizing maps*. Berlin; Heidelberg: New York; Barselona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Singapore; Tokyo; Springer, 2001. [Online]. Available: <https://www.amazon.com/Self-Organizing-Maps-Teuvo-Kohonen/dp/3540679219?asin=3540679219&revisionId=&format=4&depth=1>. Accessed on: 05.12.2022.
- [4] E. Oja, S. Kaski, *Kohonen Maps*. Elsevier Science B. V., 1999.
- [5] M. Kantardzic, *Data Mining: Concepts, Models, Methods, and Algorithms*. 2nd edition. John Wiley & Sons, Inc, 2011.
- [6] J. Tan, *Developments in Healthcare Information Systems and Technologies: Models and Methods*. IGI Global, 2010.

Відомості про авторів

Савицька Людмила Анатоліївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри обчислювальної техніки.

Добровольська Наталія Вікторівна – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри обчислювальної техніки.

Кондратюк Володимир Олексійович – студент групи 2КІ-21м, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії.

L. A. Savytska, N. V. Dobrovolska, V. O. Kondratiuk

SOFTWARE MODULE FOR PRELIMINARY DIAGNOSIS OF PATIENTS BASED ON KOHONEN NEURAL NETWORK

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МЕТОДИ

УДК 004.92

Є. К. Завальнюк, О. Н. Романюк, О. П. Прозор, А. В. Снігур

ЕНЕРГЕТИЧНО-КОРЕКТНА МОДЕЛЬ ОСВІТЛЕННЯ,
ОСНОВАНА НА РОЗРАХУНКУ КУТА МІЖ ВЕКТОРАМИ

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Анотація. Комп'ютерна графіка дозволяє суттєво збільшити пропускну спроможність інформаційного каналу, через який здійснюється двосторонній зв'язок користувача і комп'ютера, у зв'язку з чим роль і значення графічного подання результатів обчислень у промисловості та науково-дослідній практиці безупинно зростає. При формуванні тривимірних графічних зображень велику увагу приділяють реалістичності, яка дає можливість адекватно відобразити об'єкти і процеси. При формуванні таких зображень важливо реалістично відтворити кольори, градація яких створює ефект об'ємності. При відтворенні спекулярної складової кольору використовується двопротенева функція відбивної здатності поверхні, яка показує, яка доля світла відбивається від поверхні до спостерігача. Найпоширенішими є моделі Блінна та Фонга. На жаль, ці моделі не відповідають закону збереження енергії, що, безумовно, впливає на реалістичність формування графічних сцен. У роботі приведено детальний аналіз найпоширеніших моделей освітлення. Як базу для модифікації обрано дистрибутивну функцію, яка оперує кутом між середнім вектором і вектором нормалі. У статті описано знаходження формул нормуючого коефіцієнта для моделі відбивної здатності на основі розрахунку кута між векторами, що апроксимує модель Блінна-Фонга. Проаналізовано особливості апроксимованої моделі. Розраховано вихідні дані для знаходження формул нормуючого коефіцієнта на виділених проміжках. На основі бібліотеки Python `gplearn` розроблено програму для підбору формул нормуючого коефіцієнта. Налаштовано параметри генетичного алгоритму для підбору формул. Обчислено точність апроксимації тренувального набору. Наведено таблицю абсолютних відхилень напівсферичної інтегральної відбивної здатності. Отримана модель відбивної здатності поверхні може бути використана у системах високореалістичної комп'ютерної графіки для формування тривимірних сцен.

Ключові слова: ДФВЗ Шліка, ДФВЗ Фонга, ДФВЗ Блінна-Фонга, затухання відблиску, епіцентр відблиску.

Abstract. Computer graphics allows to significantly increase the bandwidth of the information channel, through which two-way communication between the user and the computer is created, and therefore the value of graphical presentation of calculation results in industry and research practice is increasing. While creating the three-dimensional graphic images, a great attention is paid to realism, which makes it possible to adequately display objects and processes. During the formation of such images it is important to realistically reproduce colors, the gradation of which creates the effect of volume. During the reproduction the specular component of color the bidirectional reflectance distribution function is used, which shows how much light is reflected from the surface to the observer. The most common are the Blinn and Fong models. Unfortunately, these models do not comply with the law of conservation of energy, which certainly affects the realism of the formation of graphic scenes. The work provides a detailed analysis of the most widespread reflectance models. As a base for the modification, the distribution function is chosen, which uses an angle between the median vector and the normal vector. The article describes the search of the normalized coefficient formula for the reflectance model based on the calculation of the angle between the vectors that approximates the Blinn-Fong model. The features of the approximated model are analyzed. The initial data for finding the normalizing coefficient formula on the selected intervals were calculated. Using the Python `gplearn` library, a program for selecting the normalizing coefficient formula has been developed. The parameters of the genetic algorithm for selecting formulas have been adjusted. The approximation accuracy of the training set is calculated. A table of absolute errors of the hemispherical integral reflectivity is given. The resulting surface reflectance model can be used in highly realistic computer graphics systems to create three-dimensional scenes.

Key words: Schlick BRDF, Phong BRDF, Blinn-Phong BRDF, glow attenuation, glow epicenter.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-56-1-75-82>.

Вступ

Для підвищення пропускну здатності інформаційного каналу між людиною та комп'ютером застосовуються засоби комп'ютерної графіки [1]. Візуалізація даних забезпечує більш глибоке розуміння користувачем наданої інформації.

Основними вимогами до візуалізації об'єктів є висока реалістичність сформованого зображення та прийнятна швидкість. Для забезпечення високої реалістичності відтворення об'єктів моделі відбивної здатності поверхні повинні відповідати закону збереження енергії. Кількість розсіяної над поверхню світлової енергії не може перевищувати кількість енергії, яка потрапила на поверхню [2].

Тому актуальною є розробка нових фізично коректних моделей відбиття світла.

Аналіз літературних джерел

Методи моделювання освітлення оперують з трьома складовими світла [3]: розсіяною, дифузною, спекулярною. Розсіяна складова подає відбите від зовнішнього середовища світло. Дифузна складова відповідає за видимість об'єктів [4]. Спекулярна складова відповідає за відображення відблисків на поверхні об'єктів.

Розрахунок спекулярної складової включає обчислення двопротеневої функції відбивної здатності (ДФВЗ).

ДФВЗ визначають, яка частка випромінювання, що надійшло з напрямку \vec{L} , буде відбито у напрямку \vec{V} (рисунок 1) [4].

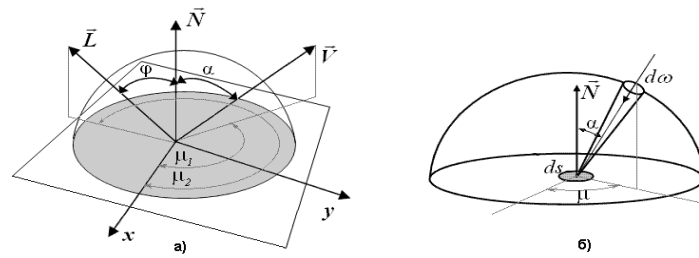


Рисунок 1 – Вихідні дані для розрахунку ДФВЗ

ДФВЗ обчислюється за формулою [5]

$$BRDF = \frac{dI(\vec{V}_i)}{I(L_i) \cos \alpha_i d\omega_i},$$

де $d\omega$ – диференціальний тілесний кут, у межах якого падає променевий потік, $I(\vec{V}_i)$ – інтенсивність випромінювання у відбитому напрямку, $I(L_i)$ – інтенсивність випромінювання у напрямку падіння.

Серед типів ДФВЗ [4] можна виділити фізично-точні, емпіричні на основі скалярного добутку векторів, емпіричні на основі розрахунку кута між векторами.

Емпіричні ДФВЗ є найбільш простими, на відміну від фізично-точних. Вони не враховують шорсткість і фасетне подання поверхні.

Емпіричні ДФВЗ, як правило, включають визначення косинуса кута між векторами. Перевагою їх є простота обчислення косинуса кута. До найпопулярніших ДФВЗ на основі скалярного добутку належать моделі Фонга та Блінна [4], що обчислюються за формулою

$$\cos(x)^n,$$

де n коефіцієнт спекулярності поверхні, x – кут між вектором відбиття світла \vec{V} і вектором дзеркального відбиття \vec{R} для моделі Фонга, кут між нормаллю та вектором $\vec{H} = (\vec{L} + \vec{V}) / |\vec{L} + \vec{V}|$ для моделі Блінна.

Недоліком [4]. моделей Блінна та Фонга є значна обчислювальна складність при великих значеннях n .

Емпіричні функції на основі розрахунку кута між векторами вимагають додаткових затрат на обчислення кута, однак дозволяють апроксимувати ДФВЗ Блінна-Фонга функцією низького степеня.

ДФВЗ на основі визначення кута між векторами для апроксимації моделі Блінна-Фонга обчислюються за формулою [6]

$$\cos(a \cdot x)^k,$$

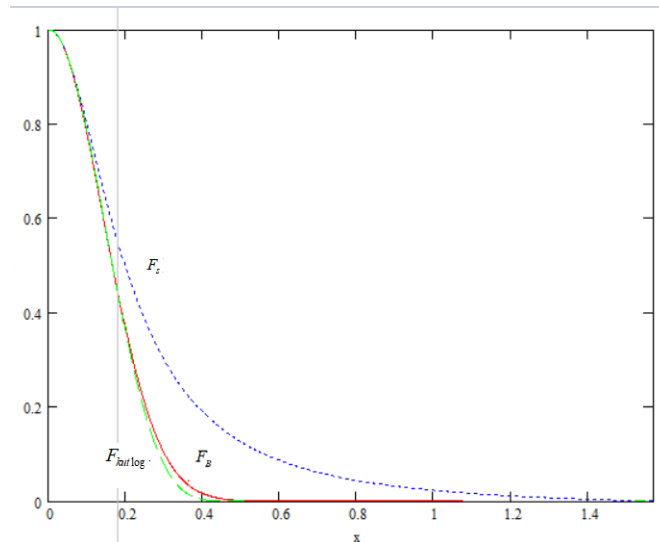
де k – степінь функції (зазвичай беруться найменші значення), a – коефіцієнт.

Одна з форм ДФВЗ на основі визначення кута між векторами (позначимо $F_{kut \log}$) обчислюється за формулою [6]

$$\cos^k \left(\frac{a \cos(e^{\frac{\ln Q}{k}})}{a \cos(\text{signum}(Q)^n \cdot |Q|^{\frac{1}{n}}) \cdot x} \right),$$

де Q – значення ДФВЗ Блінна-Фонга, відносно якого визначається коефіцієнт аргумента $F_{kut \log}$.

На рисунку 2 зображено графіки $F_{kut \log}$, ДФВЗ Блінна-Фонга (F_B), ДФВЗ Шліка (F_s) при $Q = 0.5, n = 50, k = 5$.

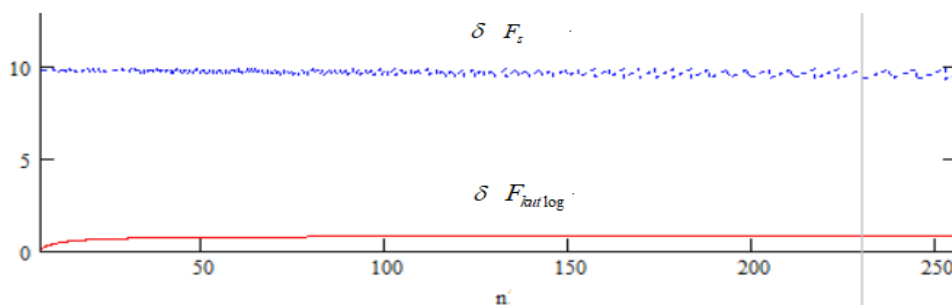
Рисунок 2 – Графіки F_{kutlog} , F_B , F_s при $Q = 0.5, n = 50, k = 5$

У таблиці 1 надано значення максимальних відносних похибок δF_{kutlog} від F_B залежно від Q, k на проміжках $n \in [k+1; 1000]$ у зоні епіцентру [1] відблиску.

Таблиця 1 – δ (у %) залежно від Q, k .

Q/k	1	2	3	4	5
0.1	27	15	10	7	6
0.2	19	10	6	5	4
0.3	13	6	4	3	2
0.4	8	4	2	2	1.5
0.5	4	2	1.5	1	0.8
0.6	3	1	0.7	0.5	0.4
0.7	5	1.5	0.8	0.6	0.5
0.8	7	2.5	1.5	1	0.9
0.9	9.5	3.5	2.5	1.7	1.3

На рисунку 3 зображено δF_{kutlog} і F_s від F_B при $k = 5, Q = 0.5$ на проміжку $n \in [6, 1000]$.

Рисунок 3 – δF_{kutlog} і F_s від F_B при $k = 5, Q = 0.5$ у зоні епіцентру

Недоліком F_{kutlog} є невідповідність закону збереження енергії, тому для функції необхідний розрахунок нормуючого коефіцієнта.

Мета статті

Мета статті – розробка енергетично-коректної моделі освітлення, основаної на розрахунку кута між векторами.

Розробка енергетично-коректної моделі освітлення, основаної на розрахунку кута між векторами

Для дотримання закону збереження енергії величина напівсферичної інтегральної відбивної здатності поверхні не повинна перевищувати 1, що виражається умовою [7]

$$\int_{\Omega} f_r(\omega, \omega_r) * \cos(\theta) d\omega \leq 1,$$

де $d\omega = \sin(\theta)d\theta d\varphi$, $f_r(\omega, \omega_r)$ – ДФВЗ.

Для моделей, що не відповідають закону збереження енергії, необхідне введення нормуючого коефіцієнта.

Знайдемо формулу нормуючого коефіцієнта $coef$ для $F_{kut \log}$. Враховуючи умову максимізації енергії віддзеркаленого світла [8], отримуємо рівняння

$$coef(n, k, Q) \int_{\Omega} f_r(\omega, \omega_r) * \cos(\theta) d\omega = 1,$$

де $coef(n, k, Q)$ – шуканий нормуючий коефіцієнт.

У наведене рівняння підставляємо формулу $F_{kut \log}$. Перейдемо до сферичної системи координат. Тоді рівняння має вигляд

$$coef(n, k, Q) \int_0^{2\pi} \int_0^{gran(n, k, Q)} \cos^k \left(\frac{a \cos(e^{\frac{\ln Q}{k}})}{a \cos(\text{signum}(Q)^n \cdot |Q|^{\frac{1}{n}})} \cdot \theta \right) \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\varphi = 1,$$

де $gran(n, k, Q)$ – значення аргументу, при якому $F_{kut \log}$ досягає нуля. Для $Q > 0$

$$gran(n, k, Q) = \frac{\pi \cdot a \cos(Q^{\frac{1}{n}})}{2 \cdot a \cos(Q^{\frac{1}{k}})}$$

Інтегруємо ліву частину рівняння по $d\varphi$. Отримуємо

$$coef(n, k, Q) \cdot 2\pi \cdot \int_0^{gran(n, k, Q)} \cos^k \left(\frac{a \cos(e^{\frac{\ln Q}{k}})}{a \cos(\text{signum}(Q)^n \cdot |Q|^{\frac{1}{n}})} \cdot \theta \right) \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta = 1$$

Інтегральний вираз позначимо як $Int(n, k, Q)$

$$Int(n, k, Q) = \int_0^{gran(n, k, Q)} \cos^k \left(\frac{a \cos(e^{\frac{\ln Q}{k}})}{a \cos(\text{signum}(Q)^n \cdot |Q|^{\frac{1}{n}})} \cdot \theta \right) \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta$$

Згідно з рівнянням розрахуємо значення $coef(n, k, Q)$ за формулою

$$coef(n, k, Q) = \frac{1}{2\pi * Int(n, k, Q)}$$

Для $n \in [1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000]$, $k \in [1; 5]$, $Q \in [0.1; 0.9]$ обчислено значення $coef(n, k, Q)$.

На основі отриманих сукупностей значень n , k , Q , $coef(n, k, Q)$ сформовано два файли для знаходження формул $coef(n, k, Q)$ при $Q \in [0.1; 0.4]$ і $Q \in [0.5; 0.9]$ (рисунок 4).

Q, k, n, y	Q, k, n, y
0.5, 1, 1, 0.477	0.1, 1, 1, 0.477
0.5, 1, 2, 0.699	0.1, 1, 2, 0.569
0.5, 1, 3, 0.88	0.1, 1, 5, 0.928
0.5, 1, 4, 1.095	0.1, 1, 10, 1.57
0.5, 1, 5, 1.313	0.1, 1, 20, 2.873
0.5, 1, 7, 1.75	0.1, 1, 50, 6.797
0.5, 1, 10, 2.41	0.1, 1, 100, 13.344
0.5, 1, 20, 4.612	0.1, 1, 200, 26.438
0.5, 1, 50, 11.227	0.1, 1, 500, 65.722
0.5, 1, 100, 22.255	0.1, 1, 1000, 131.196
0.5, 1, 200, 44.312	
0.5, 1, 500, 110.482	
0.5, 1, 1000, 220.765	

Рисунок 4 – Сформовані файли зі значеннями n , k , Q , $coef(n, k, Q)$

Для знаходження формул $coef(n, k, Q)$ використано модуль SymbolicRegressor бібліотеки Python `gplearn`. Модуль поєднує засоби символічної регресії та генетичних алгоритмів.

Створюємо набір можливих операцій шуканої формули `function_set` (рисунок 5), що включає додавання (`add`), віднімання (`sub`), множення (`mul`) та ділення (`div`).

```
function_set = ['add', 'sub', 'mul', 'div']
```

Рисунок 5 – Формування набору можливих операцій $coef(n, k, Q)$

Здійснюємо налаштування процедури підбору формул $coef(n, k, Q)$ (рисунок 6). Встановлюємо чисельність популяції 300 для підбору першої формули $coef(n, k, Q)$, 400 – для підбору другої формули. Кількість поколінь встановлюємо 1000.

```
est_gp = SymbolicRegressor(population_size=300,function_set=function_set,
                           generations=1000, stopping_criteria=0.01,
                           p_crossover=0.7, p_subtree_mutation=0.1,
                           p_hoist_mutation=0.05, p_point_mutation=0.1,
                           max_samples=0.9, verbose=1,
                           parsimony_coefficient=0.01, random_state=0,feature_names=X_train.columns)

est_gp = SymbolicRegressor(population_size=400,function_set=function_set,
                           generations=1000, stopping_criteria=0.01,
                           p_crossover=0.7, p_subtree_mutation=0.1,
                           p_hoist_mutation=0.05, p_point_mutation=0.1,
                           max_samples=0.9, verbose=1,
                           parsimony_coefficient=0.01, random_state=0,feature_names=X_train.columns)
est_gp.fit(X_train, y_train)
```

Рисунок 6 – Налаштування процедури підбору формул нормуючого коефіцієнта

Відносно значень $Q \in [0.1; 0.4]$ отримуємо формулу нормуючого коефіцієнта

$$\frac{0.608 \cdot n \cdot (Q - 0.193)}{2Q + 2k} + 0.161n + 0.284$$

Точність апроксимації набору даних (коефіцієнт детермінації R2) – 0.99977 (рисунок 7).

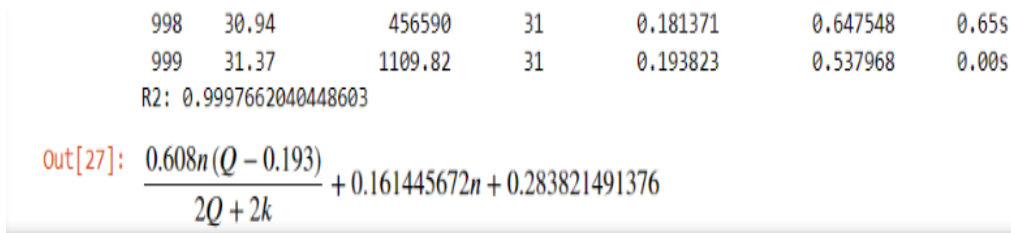


Рисунок 7 – Результат підбору формули нормуючого коефіцієнта відносно n, k при $Q \in [0.1; 0.4]$

Для діапазону $Q \in [0.5; 0.9]$ отримано формулу

$$\frac{0.743Q \cdot (-0.0133kn + 0.167n)}{k} + 0.167n + 0.245$$

Точність апроксимації набору даних – 0.99999 (рисунок 8).

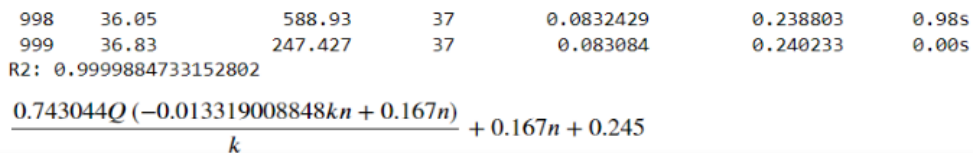


Рисунок 8 – Результат підбору формули нормуючого коефіцієнта відносно n, k при $Q \in [0.5; 0.9]$

Отже, формула нормуючого коефіцієнта для $F_{kut \log}$ розраховується

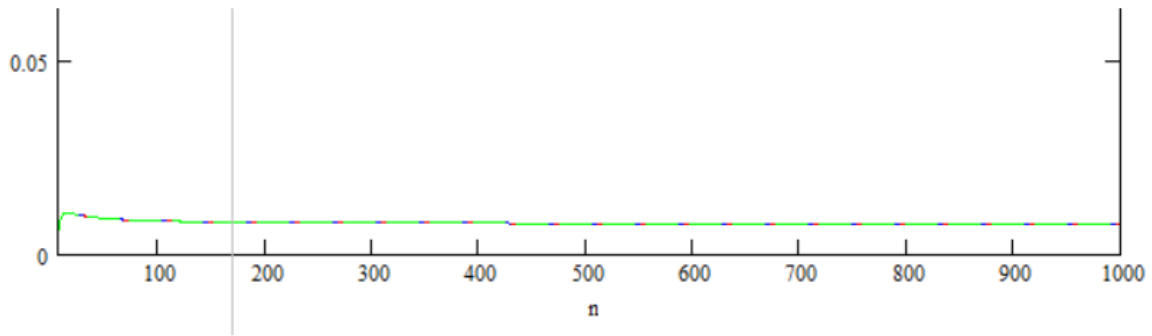
$$\begin{cases} \frac{0.608 \cdot n \cdot (Q - 0.193)}{2Q + 2k} + 0.161n + 0.284, Q \in [0.1; 0.4] \\ \frac{0.743Q \cdot (-0.0133kn + 0.167n)}{k} + 0.167n + 0.245, Q \in [0.5; 0.9] \end{cases}$$

У таблиці 2 подано інформацію про абсолютні похибки Δ виразу $coef(n, k, Q) \cdot 2\pi \cdot Int(n, k, Q)$ від 1 для $k \in [1; 5]$, $Q \in [0.1; 0.9]$ на проміжках $n \in [k + 1, 1000]$.

Таблиця 2 – Δ залежно від Q, k .

Q/k	1	2	3	4	5
0.1	$42 \cdot 10^{-3}$	$49 \cdot 10^{-3}$	$49 \cdot 10^{-3}$	$43 \cdot 10^{-3}$	$38 \cdot 10^{-3}$
0.2	$31 \cdot 10^{-3}$	$21 \cdot 10^{-3}$	$21 \cdot 10^{-3}$	$21 \cdot 10^{-3}$	$15 \cdot 10^{-3}$
0.3	$47 \cdot 10^{-3}$	$17 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$
0.4	$67 \cdot 10^{-3}$	$47 \cdot 10^{-3}$	$38 \cdot 10^{-3}$	$35 \cdot 10^{-3}$	$30 \cdot 10^{-3}$
0.5	$42 \cdot 10^{-3}$	$16 \cdot 10^{-3}$	$11 \cdot 10^{-3}$	$11 \cdot 10^{-3}$	$11 \cdot 10^{-3}$
0.6	$46 \cdot 10^{-3}$	$23 \cdot 10^{-3}$	$17 \cdot 10^{-3}$	$13 \cdot 10^{-3}$	$13 \cdot 10^{-3}$
0.7	$65 \cdot 10^{-3}$	$35 \cdot 10^{-3}$	$24 \cdot 10^{-3}$	$21 \cdot 10^{-3}$	$16 \cdot 10^{-3}$
0.8	$78 \cdot 10^{-3}$	$46 \cdot 10^{-3}$	$35 \cdot 10^{-3}$	$29 \cdot 10^{-3}$	$23 \cdot 10^{-3}$
0.9	$91 \cdot 10^{-3}$	$60 \cdot 10^{-3}$	$44 \cdot 10^{-3}$	$33 \cdot 10^{-3}$	$28 \cdot 10^{-3}$

На рисунку 9 зображено Δ на проміжку $n \in [6, 1000]$ при $k = 5, Q = 0.5$

Рисунок 9 – Δ на проміжку $n \in [6, 1000]$ при $k = 5, Q = 0.5$

Отже, максимальне значення Δ при $k \in [1; 5]$, $Q \in [0.1; 0.9]$, $n \in [k + 1; 1000] - 91 \cdot 10^{-3}$. Максимальне значення Δ при $Q = 0.6$, $k \in [1; 5]$ становить $46 \cdot 10^{-3}$ за умови, що досягається найбільш точна апроксимація зони епіцентру відблиску,

Приклад формування тривимірного об'єкту з використанням отриманої ДФВЗ наведено на рис. 10.



Рисунок 10 – Приклад зафарбовування тривимірної графічної фігури

Висновок

У статті отримано формули нормуючого коефіцієнта для моделі Блінна-Фонга за умови розрахунку кута між векторами. Введення нормуючого коефіцієнта для моделі забезпечує дотримання закону збереження енергії. Запропонована модель відбивної здатності поверхні є фізично коректною та може бути використана у високореалістичних системах комп'ютерної графіки.

Список літератури

- [1] О. Н. Романюк, *Комп'ютерна графіка: Навчальний посібник*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 1999.
- [2] Є. К. Завальнюк, О. Н. Романюк, С. В. Павлов, Р. П. Шевчук та Т. І. Коробейнікова, «Розробка фізично коректної моделі відбиття другого степеня», *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, вип. 44, №2, с. 19 – 2. 2022.
- [3] Є. К. Завальнюк, О. Н. Романюк, В. В. Войтко, О. В. Романюк та А. В. Снігур, «Розробка модифікованої моделі Шліка для визначення спекулярної складової кольору», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 3, с. 4-12. 2022.
- [4] О. Н. Романюк, «Класифікація дистрибутивних функцій відбивної здатності поверхні», *Наукові праці Донецького національного технічного університету*, №9, с. 145–151. 2008.
- [5] D. Guarnera, G. C. Guarnera, A. Ghosh, C. Denk and M. Glencros, «BRDF Representation and Acquisition», *Computer Graphics Forum*, vol. 35, №2, p. 625 – 650. 2016.
- [6] О. Н. Романюк та А. В. Чорний, *Високопродуктивні методи та засоби зафарбовування тривимірних графічних об'єктів*. Вінниця, Україна: УНІВЕСУМ-Вінниця, 2006.

- [7] E. P. Lafortune and Y. D. Willems, «Using the modified Phong reflectance model for physically based rendering», Department of Computer Science, K.U. Leuven, Belgium, Technical Report CW 197, 1994.
- [8] О. Н. Романюк, І. В. Абрамчук, С. А. Кирилашук та С. О. Романюк, «Моделювання спекулярного складника кольору з використанням енергетичнокоректних моделей відбивних здатностей поверхонь», *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*, №3, с. 153–157. 2019.

Стаття надійшла: 20.02.2023.

References

- [1] O. N. Romaniuk, *Kompiuterna hrafika: Navchalnyi posibnyk*. Vinnytsia, Ukraina: VNTU, 1999 [In Ukrainian].
- [2] Ye. K. Zavalniuk, O. N. Romaniuk, S. V. Pavlov, R. P. Shevchuk ta T. I. Korobeinikova, «Rozrobka fizychno korektnoi modeli vidbyttia drugoho stepenia», *Optyko-elektronni informatsiino-enerhetychni tekhnologii*, вип. 44, №2, с. 19 – 25. 2022 [In Ukrainian].
- [3] Ye. K. Zavalniuk, O. N. Romaniuk, V. V. Voitko, O. V. Romaniuk ta A. V. Snihur, «Rozrobka modifykovanoi modeli Shlika dlia vyznachennia spekuliarnoi skladovoi koloru», *Informatsiini tekhnologii ta kompiuterna inzheneriia*, № 3, с. 4-12. 2022 [In Ukrainian].
- [4] O. N. Romaniuk, «Klasyfikatsiia dystributyvnykh funktsii vidbyvnoi zdatnosti poverkhni», *Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, №9, с. 145–151, 2008 [In Ukrainian].
- [5] D. Guarnera, G. C. Guarnera, A. Ghosh, C. Denk and M. Glencros, «BRDF Representation and Acquisition», *Computer Graphics Forum*, vol. 35, №2, p. 625 – 650. 2016.
- [6] O. N. Romaniuk ta A. V. Chornyi, *Vysokoproduktyvni metody ta zasoby zafarbovuvannia tryvymirnykh hrafichnykh obektiv*. Vinnytsia, Ukraina: UNIVESUM-Vinnytsia, 2006 [In Ukrainian].
- [7] E. P. Lafortune and Y. D. Willems, «Using the modified Phong reflectance model for physically based rendering», Department of Computer Science, K.U. Leuven, Belgium, Technical Report CW 197, 1994.
- [8] O. N. Romaniuk, I. V. Abramchuk, S. A. Kyrylashchuk ta S. O. Romaniuk, «Modeliuvannia spekuliarno-ho skladnyka koloru z vykorystanniam enerhetychnokorektnykh modelei vidbyvnykh zdatnosti poverkhon», *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Seriia «Tekhnichni nauky»*, №3, с. 153–157. 2019 [In Ukrainian].

Відомості про авторів

Завальнюк Євген Костянтинович – пошукач кафедри програмного забезпечення.

Романюк Олександр Никифорович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри програмного забезпечення.

Прозор Олена Петрівна – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри вищої математики.

Снігур Анатолій Васильович – кандидат технічних наук, доцент кафедри обчислювальної техніки.

Ye. K. Zavalniuk, O. N. Romanyuk, O. P. Prozor, A. V. Snigur

ENERGETICALLY CORRECT REFLECTANCE MODEL BASED ON THE CALCULATION OF THE ANGLE BETWEEN VECTORS

Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ

УДК 621.391

М. В. Васильківський, О. С. Городецька, Б. С. Климчук, В. В. Говорун

СТРАТЕГІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО РОЗВИТКУ
АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ РАДІОМЕРЕЖ

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Анотація. Розглянуто технології побудови телекомунікаційних систем та мереж на основі технології 6G, які зможуть забезпечити доступ до нових функціональних можливостей та інформаційних послуг з використанням інноваційних бездротових технологій та методів штучного інтелекту. При цьому, інфокомунікаційні системи на основі 6G характеризуються новими функціональними параметрами та пристроями, зокрема новий спектр, нові канали, нові матеріали, нові антени, нові обчислювальні технології та нові кінцеві пристрої з врахуванням можливості одночасного використання ТГц-діапазону для зв'язку та процесу сканування. Робота систем зв'язку та сканування в нових високочастотних діапазонах на основі нових матеріалів та антен базується на застосуванні кремнієвої фотоники, фотонних кристалів, гетерогенних, реконфігурованих, фотоелектричних та плазмонних матеріалів. При цьому, також виникає необхідність використання нових типів антен для діапазонів ТГц частот. Це особливо важливо, оскільки через значні втрати при передачі в ТГц-діапазоні антени істотно відрізняються від звичайних, які підключаються до радіочастотних систем через коаксіальні кабелі або мікросмужкові лінії. Враховуючи, що закон Мура незабаром втратить свою актуальність, здійснено дослідження нових обчислювальних технологій, таких як обчислення на основі структур штучного інтелекту та квантові обчислення. Розглянуто ключові показники ефективності майбутніх телекомунікаційних кінцевих пристроїв у складі інфокомунікаційних радіомереж 6G та визначено їх функціональні можливості. Виконано дослідження архітектури систем терагерцового зв'язку на двох різних підходах побудови апаратного забезпечення: електронного, де радіочастоти множаться до ТГц; та фотонного, де оптичні частоти діляться до ТГц. Визначено, що більшість таких систем та мереж використовуються для зв'язку на малих відстанях усередині приміщень через високе атмосферне згасання в ТГц-діапазоні. Розглянуто передумови досягнення більш високих характеристик за рахунок додавання нових матеріалів в кремнієвий чіп, таких як фотонні кристали, фотоелектричні елементи і плазмові поверхні. В результаті, нові конструкції антени на кристали та в корпусі, поряд із технологією компактних лінз, такий як RIS зможуть забезпечити більш точну реалізацію бажаних характеристик антени, а також зменшити розмір системи. Визначено можливість використовувати нові методи зв'язку та візуалізації, але реалізація терагерцових систем, заснованих на електроніці, оптоелектроніці та фотоніці, залежатиме від сценарію використання та робочих частот.

Ключові слова: нанофотодетектор, штучний інтелект, телекомунікаційний пристрій, інфокомунікаційна мережа, каналне кодування, безпроводний зв'язок, машинне навчання, віртуальний пристрій, ключовий показник ефективності.

Abstract. Technologies for building telecommunication systems and networks based on 6G technology, which will be able to provide access to new functionality and information services using innovative wireless technologies and artificial intelligence methods, are considered. At the same time, information communication systems based on 6G are characterized by new functional parameters and devices, in particular, a new spectrum, new channels, new materials, new antennas, new computing technologies and new end devices, taking into account the possibility of simultaneous use of the THz range for communication and the scanning process. The operation of communication and scanning systems in new high-frequency ranges based on new materials and antennas is based on the application of silicon photonics, photonic crystals, heterogeneous, reconfigurable, photoelectric and plasmonic materials. At the same time, there is also a need to use new types of antennas for the THz frequency ranges. This is especially important, because due to significant transmission losses in the THz range, antennas are significantly different from conventional antennas that are connected to radio frequency systems via coaxial cables or microstrip lines. Given that Moore's law will soon lose its relevance, research into new computing technologies, such as computing based on artificial intelligence structures and quantum computing, has begun. The key indicators of the effectiveness of future telecommunication terminal devices as part of 6G information communication radio networks are considered and their functional capabilities are determined. The study of the architecture of terahertz communication systems was carried out using two different approaches to the construction of hardware: electronic, where radio frequencies are multiplied up to THz; and photonic, where optical frequencies are divided up to THz. It has been determined that most of such systems and networks are used for communication over short distances inside premises due to high atmospheric attenuation in the THz range. The prerequisites for achieving higher characteristics due to the addition of new materials to the silicon chip, such as photonic crystals, photovoltaic elements and plasma surfaces, are considered. As a result, new on-chip and in-body antenna designs, along with compact lens technology such as RIS, can provide more accurate implementation of the desired antenna characteristics, as well as reduce system size. Opportunities to use new communication and visualization methods have been identified, but implementation of terahertz systems based on electronics, optoelectronics, and photonics will depend on the usage scenario and operating frequencies.

Key words: nanophotodetector, artificial intelligence, telecommunication device, information communication network, channel coding, wireless communication, machine learning, virtual device, key performance indicator.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-56-1-83-91>.

Вступ

Накопичений досвід практичного застосування міліметрового діапазону сформував передумови для освоєння ТГц-діапазону – поки що хоча б кількох частотних смуг. Очікується, що комбінація міліметрового та терагерцового діапазонів забезпечить швидкість передачі даних у діапазоні Тбіт/с та доставку зображень з високою роздільною здатністю. З появою нових спектрів, варіантів використання та апаратних технологій (таких як інтелектуальна поверхня) виникла гостра необхідність у розробці оновленої моделі каналу, яка може достатньо точно відображати поширення радіохвиль ТГц-діапазону [1].

Інноваційна структура телекомунікаційних засобів, що використовує одночасно як спільний орбітальний кутовий момент, так і масивну архітектуру МІМО (технологія передачі для 6G), покращує продуктивність системи та забезпечує мультиплікативний вигравш ефективності використання робочого спектра.

Зрештою, оскільки закон Мура скоро перестане діяти, а кремнієва технологія наближається до фізичної межі, передбачається фундаментальний стрибок обчислювальної потужності, який стане наслідком розвитку двох нових концепцій – нейроморфних та квантових обчислень.

Актуальність

Стрімкий розвиток цифрового зв'язку протягом багатьох років можна охарактеризувати як наслідок значного прогресу в напівпровідникових технологіях. При наближенні до більш високочастотної частини спектру у рамках ТГц-діапазону в значній мірі починають використовуватись сучасні фотонні матеріали. Зокрема фотонні кристали дозволяють виготовляти оптичні компоненти з низькими втратами. Крім того, фотоелектричні матеріали перетворюють світловий потік на електричні сигнали і дозволяють фотодетекторам виконувати ключові функції фотонної системи ТГц-діапазону. Оскільки ТГц-система може бути реалізована на фотонній платформі, при цьому терагерцові хвилі можна генерувати, пропускаючи фотострум через фотопровідну антену (photoconductive antenna, PCA) або електрооптичний кристал. При освітленні лазерними променями на певних частотах в деяких напівпровідникових підкладках, наприклад InP і GaAs, може генеруватися струм фотопровідності, який в подальшому може випромінюватись у простір у вигляді ТГц-хвилі за допомогою антени [2].

Нанопотодетектори мають схожий принцип роботи, з тією різницею, що вони вимірюють фотострум, що генерується, за допомогою схеми, призначеної для візуалізації/зчитування. Завдяки невеликому розміру і низькому енергоспоживанню нанопотодетектори демонструють величезний потенціал застосування в мобільних засобах і пристроях.

Завдяки розсіювачам з ретельно вивіреними формами і відстанями між ними інтелектуальні поверхні, такі як решітки, що відбивають і передають, можуть служити плоскими «відбивачами» або «лінзами». У такі поверхні зазвичай вбудовують компоненти, що реконфігуруються для забезпечення гнучкого підстроювання до різних рівнів освітленості радіохвилями. Метаповерхні підтримують розумну функціональність, забезпечуючи задану користувачем реакцію на певний рівень освітленості. У майбутньому для програмування цієї реакції можна буде використовувати цифровий контролер і такі інтелектуальні поверхні гарантовано забезпечать компактні, високоефективні та недорогі системи зв'язку в ТГц-діапазоні.

Мета досліджень

Мета статті є дослідження способів підвищення продуктивності телекомунікаційних радіосистем за допомогою інноваційних технічних засобів у складі інфокомунікаційних мереж 6G.

Постановка задач

Бездротові революції, безумовно, неможливі без розробки передових технологій та революційних застосувань для них. В результаті виникають передумови для появи нового покоління бездротових технологій. Саме це сталося, коли відбулася конвергенція мобільного голосового та цифрового радіозв'язку та коли мобільний інтернет об'єднався з радіочастотною технологією підвищеної пропускної здатності, адаптованою до протоколу IP. Нова мережа 5G покликана зробити бездротовими всі канали зв'язку - як високонавантажені, так і надвисоконадійні, з'єднуючи все, чим ми користуємося, і прискорюючи цифрову трансформацію кожного бізнесу. Спираючись на фундамент 5G, бездротова мережа 6G передбачає повсюдну інтелектуальну революцію. Фактично апаратно-програмне забезпечення на основі 6G буде служити нейронною мережею в масштабі людства і сполучною ланкою між двома світами, фізичним та цифровим [3]. Штучний інтелект (ШІ), що базується на машинному навчанні, стане основою технології 6G, і в цій сфері наше суспільство повністю перейде від підключених людей та підключених речей до підключеного інтелекту. Інакше висловлюючись, бездротова мережа 6G націлена на надання послуги ШІ кожній людині, будинку та бізнесу, що, своєю чергою, призведе до появи загального інтелекту. З точки зору бездротових технологій нам вперше надається можливість відчувати навколишнє середовище та предмети, використовуючи радіохвилі бездротового зв'язку. Таким чином, крім передачі бітів даних, бездротова мережа 6G може служити як мережеві органи почуттів – сенсорів, які отримують знання і великі дані з фізичного світу в реальному часі. Ця отримана інформація не тільки матиме велике значення для покращення передачі даних, але й сприятиме машинному навчанню для служб ШІ. Зрозуміло, це бачення майбутнього є надзвичайно амбітним, а його реалізація суттєво вплине як на наше суспільство, так і на економіку [4]. До того ж бездротову мережу 6G не вдасться створити без застосування революційних технологічних інновацій у галузі зв'язку, обчислень, матеріалів та алгоритмів. Враховуючи сказане, в даній статті розв'язуються такі задачі:

- аналіз апаратного забезпечення радіотехнічного обладнання;
- дослідження сучасних інформаційних систем ТГц-діапазону;
- особливості створення інноваційних телекомунікаційних пристроїв для систем 6G;
- дослідження ефективного каналного кодування радіосигналів в мережах 6G.

Аналіз апаратного забезпечення радіотехнічного обладнання

Розвиток кремнієвої платформи послужило поштовхом до розвитку фотонних систем [4, 5]. Очікується, що прогрес, досягнутий в області кремнієвої платформи, призведе до того, що в найближчому майбутньому ми станемо свідками більш досконалих компактних і недорогих фотонних і електронних телекомунікаційних пристроїв.

Фотонні інтегральні схеми можуть отримати суттєвий вииграш від використання гетерогенних платформ. Зокрема, з'єднання різних шарів матеріалів III-V на одній матриці дозволяє оптимізувати будову кожного компонента. Іншими словами, для кожного компонента можна вибрати свої оптимальні матеріали та конструкцію, а потім інтегрувати їх на одному кремнієвому кристалі. Інноваційна гетерогенна система «мережа на кристалі» включає повний набір компонентів фотонного зв'язку, зокрема лазери, модулятори і підсилювачі різних стеках шарів III-V [1].

Використовуючи матеріали з властивостями, що електрично змінюються, можна створювати пристрої з підвищеною функціональністю, меншими розмірами та меншими витратами. По суті, різні матеріали, що налаштовуються, використовують для гнучкого і динамічного керування властивостями системи передавання. Наприклад, нанесенням на інтелектуальну поверхню матеріалів, що реконфігуруються і з'єднавши її з цифровою схемою керування можна реалізувати програмовану реконфігуровану інтелектуальну поверхню RIS. Матеріали з фазовим переходом (PCM) реконфігуруються шляхом нагрівання та охолодження, в результаті чого відбувається перемикання між аморфним (ізолюючим) та кристалічним (провідним) станами. Перемикачі PCM швидкі, компактні і мають низькі втрати. У порівнянні з мікроелектромеханічними системами (MEMS), PCM показали кращу надійність та швидкодію на частотах міліметрового діапазону.

Найбільш прямим і очевидним застосуванням фотоелектричної технології, ймовірно, можна вважати сонячні елементи, але при цьому не потрібно ігнорувати CMOS-сенсори, які використовуються в цифрових камерах і багатьох інших додатках. Традиційно для сонячних елементів використовувалися напівпровідникові матеріали, такі як кремній. Згодом для підвищення ефективності фотоперетворення до складу структури було додано метал, що призвело до розробки чутливих фотодетекторів, наприклад, детектора Шоткі. Крім того, було доведено, що застосування нанорозмірних світлозловлюючих шарів, таких як металеві наночастинки, збільшує концентрацію світла та розсіювання, що, у свою чергу, збільшує фотоелектричний ефект. Більш того, металеві ґратки також можуть сприяти збудженню поверхневих плазмонних хвиль, тим самим збільшуючи взаємодію між фотонами та електронами.

Фотодетектори на основі фотоелектричних матеріалів мають багато застосувань. Наприклад, квантові точки використовувалися для збільшення поглинання світла під час моніторингу стану здоров'я [6]. При цьому показано, що матриця фотоприймачів на основі вуглецевих нанотрубок [2] може створювати зображення з високою роздільною здатністю. В результаті виготовлено браслет на основі масиву графенових фотодетекторів для моніторингу стану здоров'я [3]. Оскільки потреба у фотонних системах зростає, використання фотоелектричних матеріалів, як і раніше, буде зумовлювати створення компактних, а також високопродуктивних фотонних пристроїв для сучасних радіосистем та мереж.

Плазмонні матеріали використовують енергію світла для генерації резонансних коливань носіїв заряду – плазмонів. При цьому, плазмонні наноструктури використовуються у фотоелектричних пристроях для підвищення ефективності фотоперетворення. Використовуючи ефект збудження на плазмонних метаповерхнях, інтелектуальні багатофункціональні поверхні можуть виконувати функції біосенсорів. При досягненні поглибленого розуміння природи SPP, а також поведінки матеріалів, що підтримують SPP, знайдуться нові цікаві застосування для плазмонних матеріалів.

Дослідження сучасних інформаційних систем ТГц-діапазону

Отже, система ТГц-діапазону може бути реалізована за допомогою електронного або фотонного підходу. Зокрема, фотонна технологія в основному використовує верхні частоти ТГц-діапазону, електронна технологія може забезпечити рішення в нижніх частотах діапазону. Максимальна частота, на якій може працювати терагерцова електронна схема, залежить від максимальної частоти f_{\max} транзистора, виготовленого за певним твердотільним техпроцесом.

Розробка різних компонентів ТГц-діапазону, придатних для розміщення на високоінтегрованій платформі, дозволила освоїти безліч пристроїв ТГц-діапазону. Наприклад, платформи на основі SiGe використовувалися у системах для бездротового зв'язку, сканування та візуалізації в ТГц-діапазоні, переважно на частотах нижче 300 ГГц [4]. Крім цього, розвиток технологій матеріалів III-V - наприклад, з використанням InP - показав, що на їх основі можна створювати швидкодійні ТГц-системи. Гетерогенна інтегрована платформа III-V/кремній є перспективним варіантом для створення як комерційних, так і промислових портативних ТГц-систем.

Результати досліджень параметрів та характеристик сучасних систем бездротового зв'язку в діапазоні від 275 ГГц до 450 ГГц показали, що електронна та оптоелектронна технології продемонстрували швидкість передачі даних до 100 Гбіт/с, хоча відстань зв'язку в більшості випадків становить менше двох метрів. Зокрема система передавання на основі технології InP – НЕМТ забезпечує швидкість передачі

даних до 120 Гбіт / с на відстані 9,8 м. Оптиелектронна система, що використовує приймач на основі технології InGaAs HEMT здатна забезпечувати швидкість передачі даних до 100 Гбіт/с на відстані 15 м.

Технологія побудови зображень у ближньому полі в ТГц-діапазоні може подолати фундаментальну дифракційну межу та надати зображення надвисокої роздільної здатності, що відкриває великі перспективи для медичних застосувань, таких як візуалізація біомолекул.

Спектроскопічну візуалізацію в ТГц-діапазоні можна розділити на спектроскопію в часовій області (TDS) і безперервну спектроскопію хвилі (CWS). У TDS генерується імпульс ТГц-діапазону, який спрямовується на зразок матеріалу. Передані або відображені сигнали збираються і потім перетворюються на частотну область. Цей записаний спектр містить унікальний відбиток зразка, який можна використовувати для визначення властивостей матеріалу, з якого складається зразок.

Радіолокаційна візуалізація в ТГц-діапазоні використовує принцип радарного далекоміра і може забезпечити високу роздільну здатність/якість зображення. Попит на радарні датчики в автомобільних системах, охороні здоров'я, мобільних пристроях та інших додатках останнім часом суттєво збільшився – перспективним кандидатом для задоволення таких вимог є кремнієва платформа.

Досягнення технології напівпровідників типу III-V/кремній дозволили виконувати гетерогенну інтеграцію різних високопродуктивних компонентів, таких як електронні, фотонні, магнітні та графенові компоненти. Тому для забезпечення оптимальних характеристик необхідна комплексна платформа, яка була б одночасно компактною та дуже різномірною, а також вбирала б у себе всі згадані компоненти. Більше того, останні досягнення в галузі плазмонних технологій відкрили перспективи інтеграції плазмонних компонентів на кристал кремнію [3, 4]. Отже, оптимізована інтеграція гетерогенних компонентів на одній кремнієвій пластині може призвести до створення електронно-фотонної/плазмонної системи, здатної забезпечити високу продуктивність поряд з оптимальним балансом між вартістю, ефективністю та програмованістю, – системи для наступного покоління комерційних та промислових пристроїв ТГц-діапазону.

Особливості створення інноваційних телекомунікаційних пристроїв для систем 6G

Інноваційні можливості засобів 6G радикально змінюють не лише конструкцію, а й роль мобільних пристроїв у нашому житті. При цьому, мобільні пристрої отримують такі можливості:

- сприйняття на рівні людини (необмежена смуга пропускання для візуального/звукового сприйняття на рівні людини та реалістичного спілкування між людьми [1]);
- сканування навколишнього середовища (можливість отримання мультиспектральних зображень з близької відстані [2] та високоточного позиціонування);
- взаємодія людини і кіберпростору (голографічні дисплеї для взаємодії людини з кіберсвітом [3]);
- збирання енергії (бездротова зарядка та одночасна бездротова передача інформації та енергії).

Нові можливості перетворюють нинішній світ «інтелектуальних помічників» на світ «кіберфізичної взаємодії».

Сучасні смартфони діють як шлюзи, що з'єднують фізичний світ із кіберсвітом, переважно забезпечуючи доступ до інтернету. Передбачається, що мобільні бездротові пристрої перетворяться на мобільні гіпертермінали у світі кіберфізичної взаємодії – так зване «цифрове Я». Ці пристрої будуть перевершувати людські можливості по ряду напрямків, таких як інтелектуальне розпізнавання та сприйняття навколишнього середовища.

Враховуючи перераховані функціональні можливості, можна виділити чотири основні тенденції розробки мобільних пристроїв, як показано на рис. 1.



Рисунок 1 – Телекомунікаційні пристрої наступних поколінь

Отже, завдяки технологічним досягненням нові пристрої будуть: розумнішими – смартфони стануть не лише потужнішими, а й отримають опцію доповненої реальності для автоматизації навколишнього життя. Обчислювальна потужність донедавна зростала відповідно до закону Мура, що сприяло розвитку штучного інтелекту та машинного навчання в останні роки. Крім того, успіхи, досягнуті у виробництві напівпровідників, відкривають шлях до більш високої обчислювальної продуктивності, кращої енергоефективності, меншого розміру мікросхем та підвищеної щільності розміщення транзисторів.

Збільшення продуктивності смартфонів зумовлює покращену реалізацію можливості штучного інтелекту. Тому, все більше смартфонів оснащується спеціалізованими вбудованими модулями нейронної обробки для обчислень зі штучним інтелектом. Алгоритми машинного навчання можуть використовуватися для виконання безлічі обчислювально-ресурсоемних завдань, таких як доповнена реальність, розпізнавання осіб та розпізнавання голосу та мовлення.

У той же час парадигма граничних обчислень (edge computing) дозволяє переносити ресурсоемні завдання з мобільних пристроїв до граничних хмар. При цьому, граничні обчислення потребують від бездротових мереж наступного покоління надвисокої швидкості передачі даних, наднизкої затримки та надвисокої надійності. У майбутньому пристрої стануть більш інтелектуальними, а також забезпечать захист конфіденційності за рахунок використання розподілених обчислень та навчання завдяки граничним обчисленням, хмарним обчисленням, а також потужним локальним процесорам, графічним процесорам та спеціалізованому обладнанню для прискорення ШІ.

Досягнення технологій зв'язку малого радіусу дії та алгоритмів штучного інтелекту дозволили групам дронів, транспортних засобів та роботів локально взаємодіяти один з одним та з навколишнім середовищем. Подібні групи пристроїв можуть досягати своїх цілей, використовуючи децентралізоване та самоорганізоване керування (інтелект рою та групову робототехніку). При вдосконаленні технологій ближнього зв'язку 6G та алгоритмів штучного інтелекту / машинного навчання зростатиме інтелектуальна складова пристроїв, а якість обслуговування та продуктивність поліпшуватимуться за рахунок більшої автоматизації всіх аспектів нашого життя.

У майбутньому підтримка бездротового зв'язку стане фундаментальною функцією будь-якого пристрою, оскільки вона буде необхідна для кожної людини, будинку, організації та галузі. Мережа 6G може досягати пропускну здатності в діапазоні Тбіт/с, забезпечуючи при цьому затримку передачі менше 1 мс. Це підтримує плавний обмін мультисенсорною інформацією VR, включаючи відео з високою реалістичністю, аудіо та навіть тактильні відчуття.

Крім зв'язку, нові можливості сканування будуть підтримуватись об'єднаними технологіями зв'язку та сканування. Завдяки цьому мобільні пристрої майбутнього зможуть підтримувати багато нових функцій, зокрема радіозв'язок у ТГц-діапазоні може використовуватися для візуалізації та спектроскопії, надаючи нам персональні «рентгенівські знімки» на молекулярному рівні. Крім того, моніторинг стану здоров'я (серцебиття, падіння тощо), порушення кордонів переміщення та розпізнавання жестів за допомогою безконтактної взаємодії з пристроями також можуть бути реалізовані за допомогою бездротового сканування та машинного навчання.

В результаті розвитку технології хмарних обчислень та ІоЕ та завдяки можливості підключення 6G збільшується кількість фізичних пристроїв 6G із можливістю отримання віртуального двійника у хмарі (рис. 2). Завдяки децентралізації персональні дані користувачів можуть зберігатися на віртуальних пристроях під контролем користувачів, а не на мобільних пристроях або в централізованих сховищах, що належать третій стороні, що позбавляє користувачів від побоювань з приводу потенційних проблем з конфіденційністю. На основі концепції віртуалізованих пристроїв з'являться загальні пристрої 6G, які зазвичай знаходяться у громадських місцях та використовуються по запиті. Завдяки інтеграції біометрії, штучного інтелекту, персоналізованого автоматичного налаштування та технологій захисту конфіденційності пристрої 6G зможуть надавати прості у використанні функції, такі як біометрична автентифікація та гіперперсоналізовані конфігурації. Це дозволить кінцевим користувачам отримувати доступ до бажаних послуг через спільні пристрої у будь-який час та в будь-якому місці. Перелік типів загальних пристроїв 6G може бути досить великим, включаючи автомобілі, що орендуються, конференц-зали, хмарні пристрої та будь-які інші пристрої з можливостями вводу/виводу та обчислювальними можливостями, які можна використовувати спільно або орендувати в громадських місцях.



Рисунок 2 – Схема реалізації віртуального пристрою

Крім того, деякі пристрої 6G підтримуватимуть хмарні обчислення. При цьому, користувачі зможуть отримати пристрої 6G з підтримкою приватних хмарних обчислень, що задовольнить більш високі вимоги до обчислювальних сховищ для більш інтелектуальної голосової підтримки, зберігання особистих зображень та відео.

У найближчій перспективі платформи на основі кремнію за рахунок гетерогенної інтеграції напівпровідників типу III–V, фотонних/плазмонних та інших передових матеріалів продовжуватимуть сприяти підвищенню продуктивності інтегральних схем та розширенню їх функціональності. Нові обчислювальні архітектури, такі як спеціалізовані обчислювальні системи, обладнання та оптимізовані алгоритми, допоможуть підвищити продуктивність обчислень за рахунок модернізації програмного забезпечення. У довгостроковій перспективі лише дві обчислювальні технології зумовлять фундаментальний стрибок в продуктивності математичних розрахунків. Одна з них – це технології нейроморфних обчислень та глибокого навчання, які дозволять підвищити ефективність оброблення інформації. Інша – квантові обчислення, що використовують переваги поліноміальної суперпозиційної природи кубітів для зменшення обчислювального навантаження.

Нейроморфні обчислення імітують обробку інформації на біологічному рівні та функціонують на компактній та енергоефективній платформі. Ця технологія є перспективним претендентом для досягнення рівня справжнього машинного інтелекту, і вона продовжуватиме розвиватися із вдосконаленням технології штучного інтелекту.

При розробці нового програмного забезпечення ключовим питанням є перепроєктування існуючих алгоритмів та програмних середовищ для практичної реалізації переваг, що пропонується спеціалізованим обладнанням. Крім оптимізації алгоритмів ще однією проблемою є витрати, пов'язані з переміщенням даних. При цьому, загальну складність обчислень не слід розраховувати лише на основі кількості операцій із плаваючою комою; швидше, слід також враховувати складність примусового переміщення даних, яких потребує алгоритм. Отже, у новому програмному забезпеченні бажано використовувати оптимізовану топологію доступу до пам'яті/даних, наприклад, неоднорідний доступ до пам'яті [7].

Для телекомунікаційного обладнання необхідна повна переробка апаратного забезпечення для вирішення проблеми вузьких місць у пам'яті, оскільки вони обмежують енергоефективність. Перспективним варіантом вирішення цієї проблеми є кремнієва фотоніка з використанням хвилеводів з низькими втратами для зменшення витрат енергії на переміщення даних.

Ефективне каналне кодування радіосигналів в мережах 6G

Каналне кодування сигналів використовується для усунення впливу несприятливих та динамічно змінних факторів впливу середовищ каналів для забезпечення надійного зв'язку та високої якості обслуговування. Оскільки технологія 6G охоплюватиме безліч різноманітних варіантів використання, деякі з яких мають екстремальні вимоги, такі як надвисока швидкість передачі даних, наднизькі затримка та енергоспоживання, необхідні інновації в кодуванні каналів 6G, що здатні забезпечити побудову оптимального коду для заданого стану каналу та сценарію використання.

Каналне кодування може застосовуватися до P2P-комунікацій по каналах AWGN, а також до зв'язку мультиточка-точка (MP2P), точка-мультиточка (P2MP) і мультиточка-мультиточка (MP2MP) по не-AWGN або нестационарних каналах. У мережі 6G з великою кількістю комунікацій машина-машина та людина-машина для підвищення загальної ефективності використання спектра в сценаріях зв'язку MP2P, P2MP та MP2MP бажано застосовувати мережне кодування. Основна ідея мережного кодування - об'єднати кілька пакетів в один для кращого кодування. Інший важливий аспект використання мережного кодування – це придушення завад у цифровій чи аналоговій області. Виграш від використання мережного кодування можуть отримати всі пристрої мережі. Мережеве кодування зазвичай виконується на прикладному рівні, але також може виконуватися і на фізичному рівні в системі 6G через вимоги до затримки та пропускну здатності [8].

Каналне кодування характеризується високим коефіцієнтом кодування, що розширює покриття мережі та покращує якість обслуговування, особливо на межах стільника. Крім того, високорозпаралельний декодер збільшує пікові швидкості передачі даних; а проста, зручна для апаратної реалізації схема суттєво знижує енергоспоживання, тим самим збільшуючи термін служби батареї. Ці переваги сформували ключову ефективність бездротових пристроїв попередніх поколінь. Стандарти 5G NR передбачають використання поляричних кодів та кодів LDPC для каналів керування та каналів даних відповідно.

Для сценаріїв використання технології 6G будуть потрібні характеристики, що перевершують можливості 5G: підвищені швидкості передачі даних, підвищена надійність, зменшені складність та енергоспоживання.

Каналне кодування в системах 6G передбачає підвищення пікової швидкості передачі даних до значень Тбіт/с (сьогоднішня швидкість декодування даних eMBB становить 10–20 Гбіт/с), усунення помилок декодування блоку для URLLC та наближення показників декодування коротких блоків для mMTC до межі продуктивності кінцевої довжини [7]. На рис. 3 показані ключові показники ефективнос-

ті, що досягаються за рахунок використання полярних кодів для каналів керування в системах 5G NR та кодами LDPC для каналів даних в системах 5G NR та рознесеного каналного кодування в системах 6G.

Оскільки схеми каналного кодування, що налаштовуються для конкретних випадків використання характеризуються підвищеною складністю реалізації, тому існує сильна мотивація щодо розроблення сімейства кодів, які повторно використовують обладнання і підходять до різних сценаріїв і специфікацій, або використання структури, яка ефективно адаптує кілька кодів до різних випадків застосування.

Така уніфікована та гнучка структура, що поєднує коди компонентів або базові коди має бути адаптивною, щоб відповідати вимогам різних сценаріїв використання технології 6G: єдина та гнучка структура на основі полярних кодів; адаптація кількох кодів.

При розробці схеми кодування для каналів передавання зі швидкістю порядку 1 Тбіт/с слід віддавати пріоритет низькій складності та високому рівню паралелізму декодування, приділяючи особливу увагу апаратній реалізації [9]. Наприклад, коди, що реалізовані на основі більш простих схем маршрутизації, вимагатимуть меншої площі кристала і демонструватимуть більш високий рівень регулярності як при кодуванні, так і при декодуванні. В якості альтернативи деякі існуючі коди можуть бути оптимізовані для більш високого паралелізму, більш високої регулярності та нижчої складності або на стороні декодування [3] або як при кодуванні, так і при декодуванні [6].

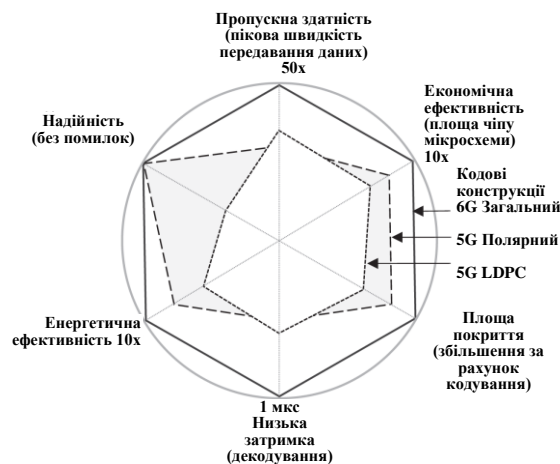


Рисунок 3 – Ключові показники ефективності використання каналів в телекомунікаційних системах передавання

Паралелізований полярний код (сімейство GN-суміжно-групових кодів) включає полярні коди та коди Ріда-Маллера і може підтримувати високопродуктивне декодування з паралелізмом та регулярністю. GN-суміжні коди можуть бути лінійними блочними кодами з такою ж утворюючою матрицею, що і полярні коди, але з різними наборами інформації. Алгоритм паралельного декодування може бути використаний на факторному графі кодів GN-коду [3]. Цей алгоритм демонструє високий паралелізм та високу регулярність. Для уникнення послідовного декодування зовнішніх кодів, алгоритм або будує еквівалентний граф декодування, змінюючи місцями зовнішній та внутрішній коди у попередньому графі факторів, як показано на рис. 4 або декодує внутрішні коди на обох графах декодування.

На додаток до звичайних широкосмугових телекомунікаційних пристроїв технологія 6G передбачає безліч критично важливих застосувань, що вимагають гарантовано високих функціональних параметрів. Існуючі схеми кодування далеко не завжди здатні надати такі гарантії навіть теоретично, тому в деяких випадках необхідно розробляти коди для конкретних застосунків.

- Надзвичайно висока надійність телекомунікаційних пристроїв, від 10^{-7} до 10^{-10} без нижньої межі припустимих помилок із заданою швидкодією. Хоча при використанні LDPC та інших кодів, які ітеративно декодуються, можна знизити мінімальний рівень помилок нижче 10^{-10} . Теоретично було доведено, що полярні коди та пов'язані конструкції кодів не мають мінімального рівня помилок і тому підходять для більшості застосувань. Для подальшого підвищення надійності телекомунікаційних пристроїв можуть використовуватися додаткові функції, такі як недвійкові або згорткові кодові конструкції.

- Надзвичайно низька затримка, від 1 до 0,1 мс, для підтримки задач автономного водіння та промислової автоматизації. Ці програми зазвичай вимагають високої надійності поряд з надзвичайно низькою затримкою кодування та декодування. При цьому, можуть стати в нагоді алгебраїчні коди, але водночас існуючі схеми вимагають декодування на основі порядкової статистики, що занадто складно для застосування з обмеженою затримкою. Для підтримки такого варіанта використання необхідно використовувати нові кодові конструкції та схеми декодування. Визначено, що затримка декодування для коротких поля-

рних кодів дуже мала [2] і може бути додатково знижена за допомогою сегментованого декодування [3] або паралельного декодування [4].

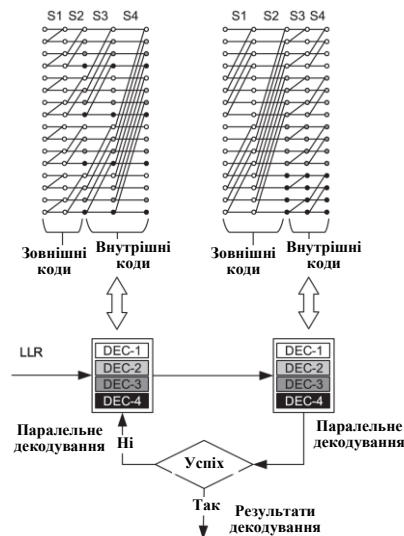


Рисунок 4 – Схема кодування для систем передавання даних із швидкістю Тбіт/с

- Надзвичайно низька потужність і собівартість для безбатарейних та енергозберігаючих телекомунікаційних засобів з терміном служби від 10 років до нескінченності. Інтелектуальні пристрої будуть модулювати та відображати прийняті радіочастотні сигнали або збирати та накопичувати радіочастотну енергію навколишнього середовища для сеансів радіочастотних передач. У таких пристроях зазвичай використовується недороге обладнання, що потребує надзвичайно низького споживання енергії. Це можна досягти з допомогою спільної конструкції вузла кодової модуляції, у якому каналне кодування здійснюється разом із коригуванням форми сигналу і формуванням опорних сигналів [5].

- Надзвичайно висока щільність підключення до 100 млн пристроїв на км². У щільно розгорнутих системах IoT слід очікувати на виникнення численних колізій. При цьому, коди повинні містити інформацію про ідентифікацію обладнання і про дані, що передаються. Тому, необхідно використовувати схему кодування спільної послідовності з надзвичайно великим простором послідовності/коду, що підтримує некогерентне детектування/декодування.

Висновки

Зростання попиту на підвищені швидкості передачі і меншу затримку означає, що збільшення носійної частоти і ширини смуги пропускання стають дедалі важливішими під час розробки систем зв'язку. Дослідження архітектури систем терагерцового зв'язку базується на двох різних підходах побудови апаратного забезпечення: електронний, де радіочастоти множаться до ТГц; та фотонний, де оптичні частоти діляться до ТГц. Слід зазначити той факт, що більшість таких систем та мереж розробляються в основному для зв'язку на малих відстанях усередині приміщень, частково через високе атмосферне згасання в ТГц-діапазоні. Однак цього можна певною мірою уникнути, вибравши «вікно частот», в якому втрати в атмосфері низькі, наприклад 140, 220 і 300 ГГц.

З точки зору апаратного забезпечення гетерогенна платформа на матеріалах типу III-V може ще більше підвищити продуктивність кремнієвої системи за рахунок оптимізації кожного компонента на одному кристалі. Для досягнення більш високих характеристик в кремнієвий чіп можуть бути додані нові матеріали, такі як фотонні кристали, фотоелектричні елементи і плазмові поверхні. Нові конструкції антени на кристалі та в корпусі, поряд із технологією компактних лінз, такий як RIS зможуть забезпечити більш точну реалізацію бажаних характеристик антени, а також зменшити розмір системи. ТГц-технологія дозволить використовувати нові методи зв'язку та візуалізації, але реалізація терагерцових систем, заснованих на електроніці, оптоелектроніці та фотоніці, залежатиме від сценарію використання та робочих частот.

Список літератури

- [1] H. Wang, S. K. Gupta, B. Xie, and M. Lu, “Topological photonic crystals: a review”, *Frontiers of Optoelectronics*, 2020, pp. 1–23.
- [2] H. Hamada, T. Tsutsumi, H. Matsuzaki, T. Fujimura, I. Abdo, A. Shirane, K. Okada, G. Itami, H.-J. Song, H. Sugiyama et al., “300-GHz-band 120-Gb/s wireless front-end based on InP-HEMT PAs and mixers”, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 55, no. 9, 2020, pp. 2316–2335.

- [3] I. Dan, P. Szriftgiser, E. Peytavit, J.-F. Lampin, M. Zegaoui, M. Zaknounge, G. Ducournau, and I. Kallfass, "A 300-GHz wireless link employing a photonic transmitter and an active electronic receiver with a transmission bandwidth of 54 GHz", *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 10, no. 3, 2020, pp. 271–281.
- [4] H. Xie, Z. Qin, G. Y. Li, and B.-H. Juang, "Deep learning enabled semantic communication systems", arXiv preprint arXiv:2006.10685, 2020.
- [5] J. Tong, H. Zhang, X. Wang, S. Dai, R. Li, and J. Wang, "A soft cancellation decoder for parity-check polar codes", arXiv preprint arXiv:2003.08640, 2020.
- [6] H. Zhu, B. Smida, and D. J. Love, "Optimization of two-way network coded HARQ with overhead", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, no. 6, 2020, pp. 3602–3613.
- [7] Dmytro V. Mykhalevskiy & Oksana S. Horodetska, "Investigation Of Wireless Channels According To The Standard 802.11 In The Frequency Range Of 5 Ghz For Two Subscribers", *Journal of Mechanical Engineering Research & Developments (JMERC)*, Zibeline International Publishing, vol. 42(2), March., pages 50-57. 2019.
- [8] Д. В. Михалевський, О. С. Городецька, "Розробка моделі оцінювання впливу архітектурних перешкод на основні параметри безпроводного каналу стандарту 802.11", *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: технічні науки*, том 31 (70) ч.1, №3, с. 48-53. 2020.

Стаття надійшла: 02.12.2023.

References

- [1] H. Wang, S. K. Gupta, B. Xie, and M. Lu, "Topological photonic crystals: a review", *Frontiers of Optoelectronics*, 2020, pp. 1–23.
- [2] H. Hamada, T. Tsutsumi, H. Matsuzaki, T. Fujimura, I. Abdo, A. Shirane, K. Okada, G. Itami, H.-J. Song, H. Sugiyama et al., "300-GHz-band 120-Gb/s wireless front-end based on InP-HEMT PAs and mixers", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 55, no. 9, 2020, pp. 2316–2335.
- [3] I. Dan, P. Szriftgiser, E. Peytavit, J.-F. Lampin, M. Zegaoui, M. Zaknounge, G. Ducournau, and I. Kallfass, "A 300-GHz wireless link employing a photonic transmitter and an active electronic receiver with a transmission bandwidth of 54 GHz", *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 10, no. 3, 2020, pp. 271–281.
- [4] H. Xie, Z. Qin, G. Y. Li, and B.-H. Juang, "Deep learning enabled semantic communication systems", arXiv preprint arXiv:2006.10685, 2020.
- [5] J. Tong, H. Zhang, X. Wang, S. Dai, R. Li, and J. Wang, "A soft cancellation decoder for parity-check polar codes", arXiv preprint arXiv:2003.08640, 2020.
- [6] H. Zhu, B. Smida, and D. J. Love, "Optimization of two-way network coded HARQ with overhead", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, no. 6, 2020, pp. 3602–3613.
- [7] Dmytro V. Mykhalevskiy & Oksana S. Horodetska, "Investigation Of Wireless Channels According To The Standard 802.11 In The Frequency Range Of 5 Ghz For Two Subscribers", *Journal of Mechanical Engineering Research & Developments (JMERC)*, Zibeline International Publishing, vol. 42(2), March., pages 50-57. 2019.
- [8] D. V. Mikhalevskiy, O. S. Horodetska, "Development of a model for assessing the influence of architectural obstacles on the main parameters of the wireless channel of the 802.11 standard", *Scholarly notes of V. I. Vernadskyi. Series: technical sciences*, volume 31 (70) part 1, number 3, pp. 48-53. 2020 [in Ukrainian].

Відомості про авторів

Васильківський Микола Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інфокомунікаційних систем і технологій.

Городецька Оксана Степанівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри обчислювальної техніки.

Климчук Богдан Сергійович – студент групи ТКС-21м, кафедра інфокомунікаційних систем і технологій.

Говорун Володимир Валерійович – студент групи ТКС-21м, кафедра інфокомунікаційних систем і технологій.

M. V. Vasylykivskiy, O. S. Horodetska, B. S. Klymchuk, V. V. Hovorun

STRATEGIES OF TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT OF HARDWARE OF INFOCOMMUNICATION RADIO NETWORKS

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia

УДК 621.391

М. В. Васильківський, О. С. Городецька, О. В. Стальченко, Б. С. Климчук

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ
МЕРЕЖ МІМО НА ОСНОВІ 6G

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Анотація. Визначено способи підвищення ефективності мереж радіодоступу 6G за рахунок нових принципів проектування та критеріїв оптимізації структури МІМО. Досліджена гнучка та універсальна мережа із можливістю розширення не тільки за рахунок досягнень в існуючих технологіях, а й за рахунок численних нових технологій, таких як ELAA, RIS, штучний інтелект, сканування, нових матеріалів, а також нових конструкцій та структур антен. Розглянуті технології нададуть універсальний набір інструментів збільшення пропускної здатності мережі. Досліджено досягнення в галузі радіочастотних компонентів, обробки сигналів та антенного зв'язку, які вплинуть на різні аспекти систем МІМО, включаючи модулятори, форми сигналів та конструкції приймачів. Розглянуті функціональні параметри трансиверів на основі електронних, фотонних та комбінованих технологій. Досліджено використання інтелектуальних радіоканалів, які значно покращують якість зв'язку, продуктивність системи, покриття стільника та якість зв'язку на межі стільника в бездротових мережах, що було доведено численними результатами моделювання у різних сценаріях. Визначено перспективний напрямок досліджень для надмасивних МІМО 6G, який є актуальним при використанні ґраток з надвеликою апертурою (ELAA). Визначено мету ELAA, яка полягає в тому, щоб всі користувачі використовували взаємно ортогональні канали з пропускною здатністю для кожного користувача, аналогічно каналу з адитивним гаусовим білим шумом. Досліджено інтелектуальний масивний МІМО в мережі 6G на основі ШІ, що забезпечує полегшення навчання та підвищує його ефективність. Розглянуто технологію ОАМ для високошвидкісної передачі на основі мультиплексування доступу з розділенням мод. Досліджено практичне застосування технології ОАМ при транзитній передачі між базовими станціями, передачі від пристрою до пристрою (D2D) та зв'язку між штучними супутниками, де відносно легко отримати необхідне вирівнювання осі. Здійснено аналіз розвитку технології МІМО враховуючи характеристики ТГц-каналу, зокрема виконано дослідження реконфігурованих інтелектуальних поверхонь, які характеризуються простотою апаратної архітектури, низькою апаратною складністю, низьким енергоспоживанням і високою ефективністю використання спектру. Визначено особливості створення антенних ґраток з надвеликою апертурою при застосуванні нових схем мультиплексування, використовуючи інформацію про просторову глибину для поділу потоків або обладнання за допомогою попереднього кодування. Здійснено підвищення ефективності МІМО з використанням штучного інтелекту, який здатний мінімізувати BER та підвищити спектральну ефективність масивного МІМО міліметрового діапазону та суттєво зменшуючи обчислювальну складність. Виконано дослідження альтернативних технологій МІМО.

Ключові слова: мережа радіодоступу 6G, штучний інтелект, пропускна здатність мережі, функціональний параметр трансиверу, бездротова мережа, канал з адитивним гаусовим білим шумом, інтелектуальний масивний МІМО, мультиплексування доступу з розділенням мод.

Abstract. Methods of increasing the efficiency of 6G radio access networks due to new design principles and optimization criteria of the MIMO structure have been determined. A flexible and versatile network with the possibility of expansion not only due to advances in existing technologies, but also due to numerous new technologies, such as ELAA, RIS, artificial intelligence, scanning, new materials, as well as new designs and structures of antennas, has been studied. The considered technologies will provide a universal set of tools for increasing network bandwidth. Advances in RF components, signal processing, and antenna communications that will affect various aspects of MIMO systems, including modulators, waveforms, and receiver designs, are explored. Functional parameters of transceivers based on electronic, photonic and combined technologies are considered. The use of intelligent radio channels, which significantly improve the quality of communication, system productivity, cell coverage, and the quality of communication at the cell boundary in wireless networks, was investigated, which was proven by numerous simulation results in various scenarios. A promising direction of research for super-massive MIMO 6G, which is relevant when using lattices with an extra-large aperture (ELAA), has been determined. The goal of ELAA is defined, which is that all users use mutually orthogonal channels with a per-user bandwidth similar to an additive Gaussian white noise channel. Intelligent massive MIMO in the 6G network based on AI has been studied, which facilitates learning and increases its efficiency. The OAM technology for high-speed transmission based on multiplexing access with mode separation is considered. The practical application of OAM technology in transit transmission between base stations, device-to-device (D2D) transmission, and communication between artificial satellites, where it is relatively easy to obtain the necessary axis alignment, has been studied. An analysis of the development of MIMO technology was carried out, taking into account the characteristics of the THz channel, in particular, a study of reconfigurable intelligent surfaces, which are characterized by the simplicity of the hardware architecture, low hardware complexity, low energy consumption and high efficiency of spectrum use, was carried out. The peculiarities of creating antenna arrays with an ultra-large aperture when applying new multiplexing schemes, using spatial depth information to separate streams or equipment using pre-coding, are determined. MIMO efficiency has been improved using artificial intelligence, which is capable of minimizing BER and increasing the spectral efficiency of massive MIMO of the millimeter range and significantly reducing computational complexity. A study of alternative MIMO technologies was carried out.

Key words: 6G radio access network, artificial intelligence, network bandwidth, transceiver functional parameter, wireless network, additive Gaussian white noise channel, intelligent massive MIMO, mode division access multiplexing.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-56-1-92-101>.

Вступ

Бездротовий зв'язок з кількома передаючими антенами, що перевершує можливості фазованих антенних решіток [1], став популярною темою досліджень наприкінці ХХ століття. Протягом цього періоду з'явилося безліч нових схем передачі та прийому, таких як просторово-часові блокові коди (STBC) [1], код Аламоуті [2], багатощаровий простір-час Bell Laboratories (BLAST) [3] та сферичне декодування [4]. Це значно покращило пропускну здатність каналу та надійність кількох передавальних антен.

Незабаром ці нові технології були впроваджені у 3GPP. Його перша версія (1G LTE) підтримувала до чотирьох портів передавальної антени на низхідному каналі, які могли бути ідентифіковані користувачами за допомогою опорних стільникових сигналів (CRS). Для задоволення постійно зростаючого попиту на ущільнення користувачів, пропускну здатність і надійність, разом з новими версіями

LTE поступово покращувалася і підтримка MIMO. Пізніше, при застосуванні нового радіоінтерфейсу, масивний MIMO спочатку підтримувався через архітектуру MIMO на основі променів, особливо в діапазонах TDD, які полегшили масове розгортання MIMO (через простіше отримання інформації про канал).

Для досягнення строгих ключових показників ефективності (KPI) мережі 6G повинні піддаватися ущільненню, що дозволяє розмішувати ширшу смугу пропускання у вузьких діапазонах та використовувати MIMO підвищеного порядку. Крім величезної кількості частотних ресурсів, терагерцовий MIMO сприятиме досягненню інших ключових показників ефективності 6G, таких як локалізація та сканування.

Актуальність

Незважаючи на те, що в NR був досягнутий значний прогрес у підвищенні надійності та пропускну́ї спроможності каналів MIMO, подальше вдосконалення для створення ще більш швидких та надійних каналів MIMO є бажаним та досяжним.

В даний час NR має широку підтримку MIMO як низько-, так і в середньочастотному діапазоні нижче 7,125 ГГц, відомому як частотний діапазон 1 (FR1) [1], а також у діапазонах високих частот від 24,250 до 52,6 ГГц (відомих як FR2) [2]. Однак подальша підтримка MIMO в епоху 6G пов'язана з низкою проблем. Наприклад, при збільшенні кількості антенних елементів, розгорнутих у кожному вузлі, і променів передачі/прийому також збільшуються витрати вимірювання радіосигналу, керування променем та отримання інформації про стан каналу.

Мета досліджень

Мета статті є підвищення ефективності мереж радіодоступу 6G за рахунок нових принципів проектування та критеріїв оптимізації структури MIMO.

Постановка задач

MIMO є одною з ключових технологій, яка дозволяє мережам 6G досягти цільових показників ефективності з точки зору користувальницької та мережевої пропускну́ї спроможності, надійності, маневреності та енергозбереження. Успіх технології MIMO у мережах 6G залежить не тільки від удосконалень існуючих технологій 5G, а й від нових рішень. Зокрема, очікується, що майбутні системи MIMO включатимуть передові досягнення в галузі радіочастотних технологій, а також нові матеріали, архітектури антен та методи обробки сигналів. Розглянемо нові технології MIMO у 6G та їх можливості і проблеми.

Передбачається, що в мережах 6G відбудеться суттєве розширення діапазону спектру, в якому може працювати технологія радіодоступу. Спектральний діапазон охоплюватиме хвилі від менше 1 ГГц до міліметрових та терагерцеву частину спектру. Також у мережах 6G з'являться різні нові типи наземних та неназемних мережевих вузлів, включаючи супутники, NAPS, БПЛА та навіть RIS. З урахуванням цих змін MIMO в мережі 6G використовуватиме архітектуру наземного/повітряного мовлення, що охоплює всі частини відведеного спектру порівняно з традиційним наземним MIMO, встановленим на стаціонарних платформах.

Передбачено, що точки приймання-передавання (TRP) включатимуть різні типи антен, які можуть бути активними або пасивними, фіксованими або рухомими. Всі антени утворюють віртуальну велику антенну решітку, яка зможе інтелектуально та гнучко обслуговувати мобільних користувачів, задовольняючи вимоги KPI 6G. Така гнучка та універсальна мережа розширюється не тільки за рахунок досягнень в існуючих технологіях, а й за рахунок численних нових технологій, таких як ELAA, RIS, штучний інтелект, сканування, нові матеріали, а також нові конструкції та структури антен. Ці технології нададуть універсальний набір інструментів збільшення пропускну́ї здатності мережі. Щоб скористатися цими технологіями з максимальною віддачею, необхідно прийняти нові принципи проектування та критерії оптимізації структури MIMO у мережах 6G, які будуть розглянуті в роботі. Враховуючи сказане, в даній статті розв'язуються такі задачі:

- аналіз розвитку технології MIMO враховуючи характеристики ТГц-каналу;
- дослідження реконфігурованих інтелектуальних поверхонь, які характеризуються простотою апаратної архітектури, низькою апаратною складністю, низьким енергоспоживанням і високою ефективністю використання спектру;
- особливості створення антенних ґраток з надвеликою апертурою при застосуванні нових схем мультиплексування, використовуючи інформацію про просторову глибину для поділу потоків або обладнання за допомогою попереднього кодування;
- підвищення ефективності MIMO з використанням штучного інтелекту, який здатний мінімізувати BER та підвищити спектральну ефективність масивного MIMO міліметрового діапазону та суттєво зменшуючи обчислювальну складність;
- дослідження альтернативних технологій MIMO.

Розвиток технології MIMO

Постійно зростаючий попит на бездротові дані, що передаються зі швидкостями порядку Тбіт/с на короткі відстані, може бути задоволений тільки за рахунок використання широкого субТГц-спектру ча-

стот. На використання ТГц-спектру впливає безліч різних аспектів побудови мережі. Вивченню цих впливів присвячено багато досліджень [1, 2]. Смуга частот ТГц-діапазону займає діапазон між міліметровими хвилями та інфрачервоним світлом, які пов'язані з радіочастотними та оптичними пристроями відповідно. Досягнення в галузі радіочастотних компонентів, обробки сигналів та антенного зв'язку вплинуть на різні аспекти систем МІМО, включаючи модулятори, форми сигналів та конструкції приймачів. У нових трансиверах можуть використовуватися електронні, фотонні або комбіновані технології [2, 3]. Нова антенна технологія може використовувати решітки з активних та пасивних елементів для покращення формування діаграми спрямованості та покриття.

Між міліметровими хвилями та ТГц-діапазоном є багато спільного, що робить розгортання МІМО у цих частинах спектру схожим. Тому було б природно поширити рішення та архітектури міліметрового діапазону на терагерцевий діапазон. Однак існують важливі характеристики та практичні міркування щодо відмінностей цих двох діапазонів. До них відносяться: характеристики каналу, конструкція пристрою та генерація сигналів, а також антенна технологія [4].

Терагерцевим хвилям характерні високі втрати при поширенні в радіолінії. Визначено, що втрати на трасі збільшуються квадратично зі збільшенням несучої частоти у вільному просторі [2]. Крім цих величезних втрат у тракті передачі, з ТГц-хвилями пов'язані й інші проблеми, такі як низька ефективність підсилювачів потужності та проблеми, спричинені погодними умовами. Природні фактори, такі як молекулярне поглинання або сцинтиляція через тепло та вологість, обмежують використання ТГц-діапазону локальними сценаріями, такими як внутрішні мережі, розумні офіси та розумні фабрики [3]. Більше того, оскільки бездротові канали ТГц-діапазону практично не зазнають розсіювання, їх охоплення обмежене фізичними завадами, такими як стіни та стелі. Крім того, через незначну дифракцію хвиль бездротові канали складаються в основному з шляхів прямої видимості і, можливо, з кількох шляхів відображення, створюваних стінами або меблями.

Дуже широка смуга пропускання, доступна на частотах ТГц, пов'язана зі специфічними проблемами. Потужність теплового шуму лінійно пропорційна робочій смузі пропускання, що призводить до дуже низького співвідношення сигнал/шум навіть на середніх відстанях Tx-Rx [4]. Широкосмугові радіочастотні схеми дорожчі і потенційно розсіюють більше енергії, що призводить до ще нижчої енергоефективності терагерцевих трансиверів [5]. Структура решітки з антенних ґраток (AoSA) ТГц-трансиверів поряд з дуже широкою смугою пропускання призводить до явища відхилення або розщеплення променя [6]. Це виникає через необхідність підтримувати прийнятну апертуру антени. Розміри антеної панелі не можуть лінійно зменшуватися зі змінюючою смугою частот, тоді як тривалість імпульсів скорочується в міру збільшення доступної смуги пропускання. В результаті різні антенні елементи (що належать або до однієї, або до різних антенних ґраток) володіють різницею в часі проходження дистанції, що співрозмірна з тривалістю імпульсу або більшу за неї. Ця різниця в часі призведе до того, що промені в робочих частинах смуги пропускання будуть спрямовані в різних напрямках, як показано на рис. 1. Це явище відхилення призводить до того, що надзвичайно вузькі передавальні та приймальні промені поширюються у різних (і небажаних) напрямках. Можливим рішенням цього явища є використання попереднього кодування із затримкою [7].

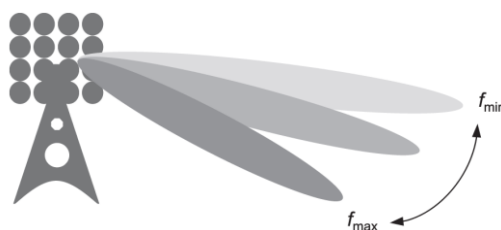


Рисунок 1 – Відхилення променя у ТГц-діапазоні

Іншою проблемою для терагерцевих ліній є непродуктивне навантаження пілот-сигналу та зворотного зв'язку, що необхідне для формування та підтримки пар променів між передавачем та приймачем.

Пошук променя вимагає сканування на обох кінцях бездротового зв'язку. Незначний рух або поворот з будь-якої сторони може призвести до втрати променя [4]. Отже, гнучке керування променем з низькими накладними витратами та високою надійністю є ключем до успіху розгортання мережі у ТГц-діапазоні. Хоча послідовне формування діаграми спрямованості залишається можливим рішенням для низьковитратного пошуку вузьких променів, але характеризується двома недоліками: дуже низьким бюджетом каналу на етапі пошуку широкого променя і великою затримкою через збільшення кількості вимірювань на кожному кроці. Така затримка та накладні витрати, якщо вони не будуть усунені, обмежать використання та переваги зв'язку у ТГц-діапазоні. Враховуючи проблеми з керуванням променем та інші

характеристики ТГц-каналу, для протоколів вищого рівня, таких як протоколи MAC, потрібні ефективніші рішення [1].

Дослідження реконфігурованих інтелектуальних поверхонь

Інтелектуальні реконфігуровані поверхні (RIS) відносно недавно стали багатообіцяючою парадигмою проектування бездротових мереж і режимів бездротової передачі. Вони також можуть створювати інтелектуальні радіосередовища (або інтелектуальні радіоканали), тобто можна керувати поширенням радіохвиль у навколишньому середовищі для створення персоналізованого каналу зв'язку [5]. У узагальненій моделі, зображеній на рис. 2, мережа RIS формується між кількома TRP для створення великомасштабних інтелектуальних радіоканалів, які обслуговують кількох користувачів. При відсутності керованого середовища архітектура бездротової системи та режим передачі можуть бути оптимізовані лише відповідно до статистичних властивостей фізичних каналів та/або інформації, що повертається від приймача до передавача. У керованому середовищі RIS спочатку визначають дані середовища поширення і повертають в систему. Виходячи з цих даних, система оптимізує режим передачі та параметри RIS по інтелектуальних радіоканалах на стороні передавача, каналу та приймача.

Завдяки підтримці формування променя, пов'язаного з RIS, використання інтелектуальних радіоканалів може значно покращити якість зв'язку, продуктивність системи, покриття стільника та якість зв'язку на межі стільника в бездротових мережах, що було доведено численними результатами моделювання у різних сценаріях [6]. Не всі панелі RIS мають однакову структуру через їх різні можливості регулювання фази, які змінюють режим від плавного керування фазою до дискретного керування тільки з кількома рівнями. Дослідження показали, що при великій кількості блоків RIS обмежених регулюванням фаз на блок достатньо для значного покращення загальних характеристик системи [7].

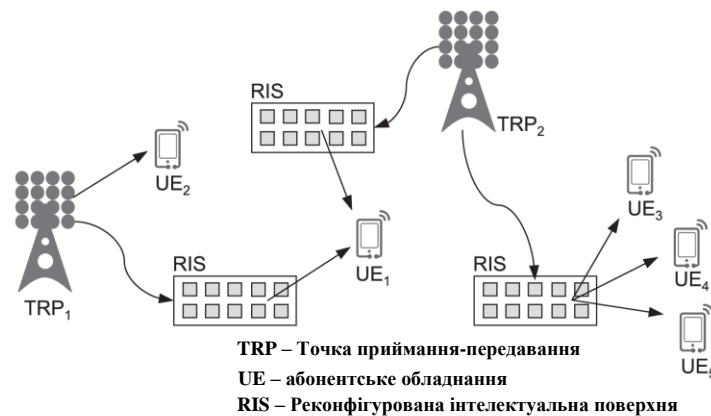


Рисунок 2 – Схема бездротової передачі з інтегрованими RIS

Іншим застосуванням RIS є передавачі, які безпосередньо модулюють властивості падаючих радіохвиль, такі як фаза, амплітуда, поляризація та частота, без необхідності в активних компонентах (як того вимагають радіочастотні схеми у традиційних передавачах MIMO) [2, 3]. Нещодавно було випробувано модуляцію 256QAM на основі RIS [4]. Передавачі на основі RIS мають багато переваг, такі як проста апаратна архітектура, низька апаратна складність, низьке енергоспоживання і висока ефективність використання спектру [2, 3]. Таким чином, RIS є новим напрямком у розробці передавачів в радіосистемах.

MIMO із підтримкою RIS має інші потенційні застосування, ніж ті, що ми вже обговорювали раніше. Наприклад, його можна використовувати для швидкого формування променя з використанням точного позиціонування або для подолання ефектів блокування за рахунок збору даних про канали в системі міліметрових хвиль [4]. Його також можна використовувати в NOMA для підвищення надійності при дуже низькому відношенні сигнал/шум, що дозволяє розмістити більше користувачів і використовувати схеми з модуляцією вищого порядку [3]. RIS також потенційно можуть бути використані для організації передачі з вбудованою фізичною безпекою, бездротової передачі енергії (або одночасної передачі даних та бездротової передачі енергії) та гнучких голографічних екранів [1-3].

Особливості створення антенних ґраток з надвеликою апертурою

За останні 10 років були розроблені та протестовані різні пристрої, алгоритми та системні компоненти, що розширюють межі застосування MIMO. Перспективним напрямком досліджень для надмасивних MIMO 6G є особливості використання ґраток з надвеликою апертурою (ELAA).

ELAA можна характеризувати як ґратку, що складається з сотень антенних елементів, які спільно обслуговують розподілених користувачів. Кінцева мета ELAA полягає в тому, щоб всі користувачі вико-

ристовували взаємно ортогональні канали з пропускнуою здатністю для кожного користувача, аналогічною каналу з адитивним гаусовим білим шумом [4]. На додаток до розширення послуг мобільного широкопasmового зв'язку, що становлять велику частину бездротового трафіку [2], велику просторову роздільну здатність ELAA також можна використовувати для просторового мультиплексування великої кількості пристроїв зв'язку.

Значна кількість досліджень була зосереджена на пошуку нових алгоритмів, які відповідають особливим вимогам ELAA. Оскільки методи обробки MMSE можуть використовуватися для придушення міжстільникових завад, отже, ELAA може ефективно працювати при розгортанні в стільниках.

Дослідження ELAA виявило у них унікальні властивості, які значно відрізняються від традиційних масивних МІМО: при збільшенні розміру апертури решітки в ELAA хвильовий фронт стає відчутно сферичним і, отже, може бути апроксимований як плоска хвиля. Отже, при поширенні електромагнітного випромінювання починає переважати так зване ближнє випромінювальне поле. Використовуючи сферичну форму хвильового фронту, антена решітка може визначати не лише просторові кути хвилі, тобто кут приходу (AoA) та кут виходу (AoD), а й просторову глибину, яку пройшла хвиля. Ця нова функція додатково дозволяє застосовувати нові схеми мультиплексування, використовуючи інформацію про просторову глибину для поділу потоків або обладнання за допомогою попереднього кодування; у випадку коли апертура ґратки охоплює сотні довжин хвиль, бездротовий канал може стати нестационарним. Це означає, що розсіювачі видно лише частково або їх внесок у потужність може значно змінюватись по всіх ґратках. Нестационарність привносить у систему характерну розрідженість каналів, коли сигнал від будь-якого користувача з'являється лише у невеликій частині решітки. Подібна розрідженість каналів сприяє спрощенню схем обробки сигналів, таких як придушення завад від підрешітки, та методів передачі повідомлень. Тому, для покращення параметрів системи при розробці ELAA необхідно враховувати зазначені унікальні особливості.

Ефективне МІМО зі штучним інтелектом

Завдяки своїй винятковій здатності отримувати характеристики з інформаційних даних машинне навчання стало багатобічним рішенням багатьох прикладних завдань, включаючи проблеми передачі на фізичному рівні [3]. Загалом машинне навчання можна використовувати для підвищення продуктивності існуючих алгоритмів, щоб наблизитися до оптимальної продуктивності алгоритму з меншою складністю. Його навіть можна використовувати для пошуку рішень шляхом моделювання завдань, які не можуть бути вирішені іншими способами.

Машинне навчання використовувалося у широкому спектрі додатків МІМО. Деякі типові приклади включають керування потужністю МІМО [1], детектування інформації про стан каналу [2], оцінку каналу [3], попереднє кодування МІМО [4] та детектування [5].

У машинному навчанні штучний інтелект вивчає основні характеристики цільового параметру на основі даних, які йому надали, а потім може застосувати ці знання до іншого завдання. Це можна розглядати як оновлення традиційних підходів до вирішення проблем, коли деякі параметри оптимізуються на основі спрощеної математичної моделі цільової характеристики. Подібні традиційні підходи обмежені точністю і складністю математичних моделей, які часто не можуть точно врахувати основні характеристики параметру, що розглядається. Як показують поточні дослідження, схеми МІМО зі штучним інтелектом завжди перевершують звичайні схеми. Наведемо приклади МІМО із використанням штучного інтелекту (ШІ). Отримання інформації про стан каналу за допомогою ШІ, де використовувалися пари мереж кодер/декодер для отримання більш ефективного зворотного зв'язку про стан каналу. Замість використання випадкової проєкції, кодер вивчає перетворення (від вихідних даних каналів до стислих уявлень) за допомогою навчальних даних. Тим часом декодер так само вивчає зворотне перетворення (із стислих уявлень у вихідні дані каналів). Згідно з результатами тестування, цей базований на даних метод може отримати більш точну оцінку каналу, ніж звичайні методи. Подальшого підвищення якості навчання можна досягти, якщо МІМО зі штучним інтелектом додатково використовуватиме моделювання алгоритмів у процесі навчання. Інтегруючи стратегії, засновані на моделях, у звичайне навчання на основі даних, можна досягти більш швидкої збіжності та більш точного висновку. Схема попереднього кодування за допомогою ШІ, де запропоновано засновану на глибокому навчанні структуру МІМО міліметрового діапазону для ефективного гібридного попереднього кодування. Цей підхід спрямований на те, щоб вийти за фундаментальні обмеження існуючих гібридних схем попереднього кодування. Ці обмеження включають високу складність та погане використання просторової інформації. У цьому дослідженні кожен з прекодерів, необхідних для отримання оптимізованого декодера, розглядається як відображення в глибоку нейромережу. Результати показують, що цей підхід здатний мінімізувати BER та підвищити спектральну ефективність масивного МІМО міліметрового діапазону, при цьому суттєво зменшуючи обчислювальну складність. Найкращі результати також спостерігаються під час детектування МІМО за допомогою машинного навчання. В результаті, запропоновано мережу глибокого навчання для високоякісного детектування МІМО. Звичайний детектор максимальної правдоподібності є оптимальним з погляду мінімізації ймовірності помилки при одночасному детектуванні символів, але має дуже високу

складність. Запропонована глибока нейромережа отримана з використанням методу прогнозованого градієнтного спуску. Моделювання показує, що ця мережа забезпечує майже оптимальні показники детектування – точність, аналогічну детектору максимальної правдоподібності, але при цьому більш ефективна і надійна; вона працює як мінімум у 30 разів швидше. Оцінка каналу MIMO за допомогою ШІ є актуальним завданням, оскільки швидке та якісне оцінювання каналу стає все більш складним завданням для стільникових мереж з масивним MIMO при збільшенні кількості антен. При цьому, запропоновано метод оцінки каналу на основі глибокого навчання для багатостільникових систем MIMO з обмеженими завданнями. Оцінювач використовує спеціально розроблену глибоку нейромережу. Запропонований метод включає лише два кроки: по-перше, шумопридушення прийнятого сигналу, а по-друге, оцінку каналу за допомогою звичайного алгоритму найменших квадратів. Моделювання доводить, що цей модуль оцінки може наблизитись до мінімальної середньоквадратичної помилки (MMSE) для сигналів великої розмірності, уникаючи при цьому складних перетворень каналів і не вимагаючи визначення коваріаційної матриці каналу. Ця оцінка також стійка до зашумлення пілотного сигналу і за певних умов може його повністю усунути.

Виходячи із значних покращень показників системи, зафіксованих у ході поточних досліджень, передбачено, що ШІ зумовлює забезпечення більш надійного та ефективного MIMO у 6G. Однак, перш ніж ШІ можна буде широко застосовувати в системах MIMO, необхідно вирішити різні проблеми. По-перше, існуючі проекти MIMO зі штучним інтелектом можуть навчатися на вхідних даних, але погано узагальнюються на модифікований розподіл чи нестационарність. Недостатнє використання знань є ще одним ключовим недоліком поточних моделей MIMO з використанням штучного інтелекту. Крім того, неадекватне вилучення даних може обмежити ефективність та точність алгоритмів MIMO з використанням штучного інтелекту. Всі перераховані фактори ускладнюють досягнення балансу між витратністю навчання і точністю виведення в MIMO широкого застосування з використанням ШІ.

Завдяки своїй чудовій здатності до узагальнення, точного визначення ознак і високого паралелізму ШІ може покращити показники систем MIMO. Але насамперед ШІ має сприяти впровадженню MIMO у 6G, зокрема допоможе впоратися з великими розмірами решітки та все більш різноманітними мережевими сценаріями. Основними проблемами при збільшенні розмірів решітки в пристроях 6G є високопродуктивне логічне виведення каналів, попереднє кодування/формування діаграми спрямованості та схеми детектування. Отже, незалежно від використання SU-MIMO, MU-MIMO або відстеження променя робота MIMO залежить від високоточного детектування CSI та подальшого попереднього кодування. Однак досягнення високоточного попереднього кодування стає все складнішим завданням. Частково це пов'язано з різким збільшенням обсягу потрібних обчислень. Аналогічні проблеми виникають під час детектування MIMO. Для вирішення цих проблем при проектуванні MIMO за допомогою ШІ, необхідно приділяти увагу збору та використанню даних, розвитку теорії навчання та новаторським схемам для різних сценаріїв MIMO. Розглянемо такі рішення докладніше.

Розвинені та опрацьовані схеми збору, перевірки та використання даних мають вирішальне значення для забезпечення точного засвоєння (потенційно) величезних обсягів даних, що надаються приймальними пристроями та датчиками у системах 6G. Ці дані дозволяють ШІ робити прямі або опосередковані висновки та прогнозувати відповідну інформацію для отримання CSI, керування променем, мобільності, передачі обслуговування, кешування (наприклад, дальність дії пристрою, швидкість та орієнтація), доплерівський зсув, AoA та AoD. Отже, при отриманні CSI, завдяки великій кількості даних, що надаються пристроями та датчиками, ШІ може отримувати більше корисних характеристик з інформації про кут та відстань, щоб відновити або спрогнозувати CSI.

Подальші дослідження в галузі теорії навчання та виведення дозволять реалізувати більш точні та ефективні проекти MIMO за допомогою ШІ. Наприклад, вивчення інтерпретованості глибоких нейромереж, ймовірно, допоможе нам розробити методологію вибору правильної моделі ШІ та її подальшого ефективного навчання, що послужить фундаментом для створення вбудованого ШІ. Покращуючи способи повторного використання та розбиття на модулі попередньої інформації, що надається шляхом сканування, можна покращити навчання та логічне виведення ШІ MIMO на основі моделей та даних, а у свою чергу навчання на основі моделей та даних покращить показники системи MIMO з точки зору точності прогнозування та накладних витрат на навчання (наприклад, обсяг навчальних даних та час).

Грунтуючись на внутрішніх відмінностях між традиційними рішеннями MIMO на основі моделей та схемами, що залежать від даних, MIMO за допомогою ШІ внесе фундаментальні зміни до традиційної структури MIMO. Зокрема, системи на основі автоенкодерів можуть ефективно замінити традиційні складні канали. Схема модуля фізичного рівня для наскрізного каналу E2E має бути розрахована на спільну оптимізацію приймачів. Враховуючи потенційно величезні обсяги даних та очікуваний розвиток теорії машинного навчання, можна припустити, що MIMO за допомогою ШІ стане невід'ємною рисою 6G. Наведемо принципи проектування та можливі напрямки досліджень для MIMO з підтримкою штучного інтелекту.

Завдяки використанню штучного інтелекту МІМО у мережах 6G повинен мати надзвичайно низькі накладні витрати на вимірювання каналу, зворотний зв'язок, керування променем та демодуляцію даних. Завдяки своїм вражаючим аналітичним здібностям ШІ може повністю дослідити внутрішню структуру багатовимірних каналів та проводити надзвичайно ефективні вимірювання. Використовуючи свою здатність до висновків з використанням часової кореляції, ШІ може додатково покращити поточні (або навіть майбутні) вимірювання на основі даних попередніх вимірювань. В результаті, незалежно від того, яку форму має антена, виведення каналу буде реалізовано в системах МІМО з надзвичайно низькими витратами пілот-сигналу. Це можливо завдяки здатності ШІ розуміти внутрішню структуру каналів. ШІ також може брати участь у інтелектуальному формуванні променя. На основі штучного інтелекту можна побудувати більш ефективну, інноваційну та менш складну систему керування променем.

Використовуючи складні логічні та обчислювальні можливості ШІ можна ефективно вирішити кілька традиційних проблем з вузькими місцями МІМО (наприклад, детектування МІМО, керування завданнями та розподіл ресурсів), щоб наблизитися до теоретичних меж продуктивності. Отже, детектування за принципом максимальної правдоподібності може забезпечити оптимальну роботу з існуючими детекторами; проте при збільшенні кількості змінних, що визначають рішення, його складність зростає експоненційно. Незважаючи на великий інтерес до реалізації неоптимальних алгоритмів детектування, сучасні алгоритми страждають від проблем із надійністю та затримкою. Вивчаючи правила детектування на основі даних, ШІ може надати новий підхід для досягнення майже оптимального детектування з меншою складністю.

Штучний інтелект добре відомий своїм точним визначенням параметрів із різних типів даних. За наявності достатньої кількості навчальних даних ШІ може отримати ефективніші уявлення CSI. Для прикладу області, яка може бути покращена, можна назвати детектування CSI NR, яке завжди використовує просту модель відображення і квантування, що призводить до відносно поганого використання розрізаних ознак. З іншого боку, ШІ забезпечує більш точне визначення ознак CSI з даних за рахунок використання методів, що залежать від даних, для створення ефективніших уявлень CSI. Крім того, завдяки різноманітності даних із зовнішніх пристроїв також може бути гарантована універсальність.

Для отримання справді інтелектуального масивного МІМО в мережі 6G необхідно розробити більш надійний, ефективніший і простіший у реалізації МІМО за допомогою ШІ. Для досягнення цієї мети слід використовувати зрозумілий ШІ, що забезпечить полегшення навчання та підвищить його ефективність. Для забезпечення покращеної та диференційованої взаємодії з користувачем потрібна структура, націлена на пріоритет користувача. Нарешті, для надійного навчання ШІ в наскрізному каналі E2E всі структури і рішення повинні мати двоспрямованість.

Альтернативні технології МІМО

У 2007 році Бо Тіде та ін розширили концепцію ОАМ (кутовий момент електромагнітного променя) на радіочастоті, що призвело до появи радіочастотного ОАМ (далі - ОАМ) [3]. Форми електромагнітних хвиль, що несуть моди ОАМ, які називають променями ОАМ, можна розділити на кілька типів, наприклад гаусовий промінь, промінь Лагера-Гауса, промінь Бесселя і Бесселя-Гауса. В бездротовому зв'язку, в галузі радіочастот, промені ОАМ збільшують нестационарність бездротових каналів і вносять спіральну фазову структуру в радіальний напрямок поширення. Попередні дослідження підтвердили здійсненність ОАМ як з теоретичної [4], так і з практичної [5] точки зору.

Класичні методи приймання на основі ОАМ-мультиплексування наведені в табл. 1. Для адаптації ОАМ до великих відстаней та повільної мобільності були запропоновані методи на основі двовимірних кругових решіток з керованим променем [4], метод псевдодоплерівської інтерполяції [5], метод відбитків електромагнітного поля [6] та метод модульного сталого фазового градієнта [7].

Всі поточні дослідження вказують на ОАМ як на ефективний метод використання просторової області, особливо коли передавач і приймач знаходяться в ближньому полі, тобто ближче, ніж відстань Релі (визначена в даному випадку як осьова відстань з різницею фаз $\pi/8$ між осьовим та крайовими променями) [2]. Для отримання вигоди від просторового рознесення в умовах динамічного каналу з використанням уніфікованого обладнання запропоновано інтегровану структуру ОАМ плюс МІМО, яку називають також багаторежимно-багатопросторовою (MOMS) [3].

До недоліків використання променів ОАМ можна віднести: відсутність можливості сформувати новий незалежний ступінь свободи в системі бездротового зв'язку і неможливість підвищення пропускну здатності МІМО за рамки традиційної з тим самим каналним середовищем. Отже, технологія ОАМ не може підвищити ефективність використання спектру систем МІМО у класичних сценаріях бездротового зв'язку, таких як мережі мобільного радіодоступу. Проте в деяких сприятливих сценаріях (наприклад, мікросотах і малих сотах всередині приміщень) ОАМ може забезпечити підвищену ефективність використання спектру у порівнянні із системами МІМО з простими і неоптимальними декодерами. Це пов'язано з тим, що множинні моди ОАМ покращують позиційне число (condition number) каналу.

Таблиця 1 – Класичні методи приймання на основі ОАМ-мультиплексування

Метод приймання	Апертура приймальної антени
Скалярно-фазовий градієнт	Повна
Спектральний аналіз	Повна
Просторове співвідношення на основі нейромережі	Повна
Скалярно-фазовий градієнт	Часткова
Векторно-фазовий градієнт	Часткова
Псевдодоплерівський	Часткова

Незважаючи на ці недоліки, існує подвійна кінцева вигода від впровадження передачі ОАМ. По-перше, коли канал задовольняє параксильному обмеженню та умові LOS, інформація, що переноситься ортогональними променями ОАМ, може бути ефективно демультимплексована без складного післяоброблення сигналу, як показано на рис. 3. Ця низька складність обробки має велике значення для надвисокої швидкості бездротового зв'язку (наприклад, пропускна здатність Тбіт/с у міліметрових та ТГц-діапазонах). По-друге, промені ОАМ можна розглядати як спеціальний метод просторової фільтрації, який можна комбінувати з обробкою сигналів МІМО для отримання гнучкого компромісу між мультиплексуванням та вирашем від рознесення у більш загальних умовах каналу [4]. Така комбінована схема особливо підходить для антенних решіток міліметрового діапазону на малих відстанях.

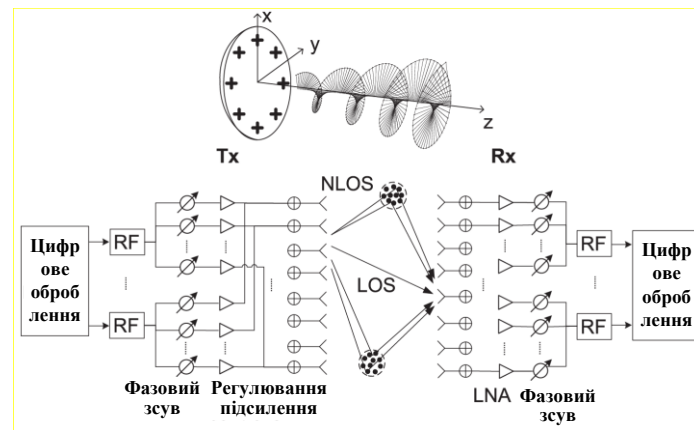


Рисунок 3 – Система бездротового зв'язку на основі ОАМ

На практиці технологію ОАМ можна використовувати для високошвидкісної передачі шляхом введення мультиплексування доступу з розділенням мод. Зокрема, її можна використовувати при транзитній передачі між базовими станціями, передачі від пристрою до пристрою (D2D) та зв'язку між штучними супутниками, де відносно легко отримати необхідне вирівнювання осі.

Теоретична ємність систем потужних МІМО зростає зі збільшенням кількості антен. Це означає, що теоретично завжди краще мати більше антен, а оптимальна кількість є нескінченно великою [3]. Однак на практиці виникають проблеми із постійним збільшенням кількості антен. Наприклад, одна проблема полягає в тому, як реалізувати дуже велику кількість антен в обмеженому просторі у формі просторово безперервної апертури передачі/приймання. Іншою проблемою є обмеження пропускної спроможності МІМО при розгляді електромагнітного ефекту між щільно розташованими антенами. Дослідження, спрямовані на вирішення таких проблем, стосуються категорії досліджень голографічного МІМО (Holo-MIMO). Однак подібне дослідження отримало кілька інших назв, включаючи дослідження голографічного радіо, голографічних радіочастотних систем [4] або навіть голографічного масивного МІМО та голографічного формування променю [5].

Ноло-МІМО визначається як єдина форма просторово-обмеженої системи із множиною антен, в якій кількість антен може необмежено зростати при збереженні обмеженого розміру апертури (тобто приблизно безперервної апертури). Ця конструкція заснована на принципах, протилежних конструкції E-LAA, де висока глибина різкості досягається за рахунок збільшеної апертури решітки антени. Однією з потенційних переваг системи Ноло-МІМО є те, що безперервна апертура може забезпечити підвищену просторову роздільну здатність у бездротовому зв'язку, ніж дуже велика кількість звичайних дискретних антен. Ще одна перевага полягає в тому, що безперервна апертура дозволяє створювати та приймати електромагнітні хвилі з довільними просторово-частотними компонентами без небажаних бічних пелюсток.

При дослідженні ступенів свободи суцільних та обмежених апертур було показано, що глибина різкості лінійно залежить від добутку розміру апертури та кутового розкиду згідно з випадковим поширенням поза прямою видимістю (NLOS). Тому об'ємні апертури можуть асимптотично призводити до дворазового збільшення доступної глибини різкості порівняно з плоскими апертурами, незалежно від того, наскільки тонкими є об'ємні апертури. Для досягнення вираженого ефекту надрознесення може бути використане взаємне зв'язування близько розташованих антен за допомогою попереднього кодування.

Призначенням голографічного радіо є створення активної безперервної електромагнітної апертури, яка забезпечить просторове мультиплексування на рівні голографічних зображень надвисокої щільності та пікселізації з надвисокою роздільною здатністю. Просторовий синтез та модуляція поля радіочастотної хвилі дозволяють отримати тривимірне електромагнітне поле, структуроване на рівні пікселів (простір мультиплексування з високою щільністю в голографічному радіо), яке відрізняється від розрідженого простору променя, пов'язаного з традиційним масивним MIMO. В результаті, формування зображення з голографічною інтерференцією може бути використане для отримання спектральної голограми радіопередавальних джерел (примосування користувача). У такому випадку є можливість уникнути необхідності у звичайних процедурах передачі пілот-сигналу та оцінки стану каналу.

Однією із проблем голографічних радіосистем є вартість реалізації активних безперервних апертур. При цьому, можливе рішення об'єднати велику кількість антенних елементів у компактний простір як метаповерхні. Однак цей метод обмежений пасивним відображенням через властивості метаповерхні. Тому він не підходить для активних ґраток. Альтернативним (і більш перспективним) рішенням є використання жорстко пов'язаних ґраток (ТСА) ширококугових антен. Ця технологія заснована на токовій пластині фотодетекторів з одностороннім рухом носіїв (UTC-PD), де ущільнена високочастотна мережа живлення замінена волоконно-оптичними лініями, перевагами яких є низька вартість і мале енергоспоживання [6].

Іншою проблемою голографічного радіо є складність обробки сигналів, що виникає внаслідок величезної кількості даних, що генеруються майже нескінченною кількістю антенних елементів усередині безперервної апертури. Одним з рішень є перетворити радіосигнали на оптичні та обробляти їх безпосередньо в оптичній галузі, де можливі підвищення швидкості обробки та менше енергоспоживання. Перетворення на оптичні сигнали може бути досягнуто за допомогою оптичного швидкого перетворення Фур'є [7].

Точні переваги упаковки більшої кількості антен в апертурі обмеженого розміру залишаються неясними. Поточні дослідження показують, що глибина різкості досі обмежена розміром апертури. Через відсутність моделей голографічне радіо потребує особливої теорії та техніки моделювання для зближення теорій зв'язку та електромагнетизму. В результаті, оцінка показників зв'язку Holo-MIMO вимагає спеціальних обчислень у галузі електромагнетизму, таких як алгоритми та інструменти моделювання, пов'язані з обчислювальним електромагнетизмом та комп'ютерною голографією.

Висновки

Здійснено аналіз розвитку технології MIMO враховуючи характеристики ТГц-каналу, зокрема виконано дослідження реконфігурованих інтелектуальних поверхонь, які характеризуються простотою апаратної архітектури, низькою апаратною складністю, низьким енергоспоживанням і високою ефективністю використання спектру. Визначено особливості створення антенних ґраток з надвеликою апертурою при застосуванні нових схем мультиплексування, використовуючи інформацію про просторову глибину для поділу потоків або обладнання за допомогою попереднього кодування. Здійснено підвищення ефективності MIMO з використанням штучного інтелекту, який здатний мінімізувати BER та підвищити спектральну ефективність масивного MIMO міліметрового діапазону та суттєво зменшуючи обчислювальну складність. Виконано дослідження альтернативних технологій MIMO.

Список літератури

- [1] Y. Yifei, Z. Yajun, Z. Baiqing, and P. Sergio, "Potential key technologies for 6G mobile communications", in *SCIENCE CHINA Information Sciences*, Springer, vol. 63, pp. 1–19. 2020.
- [2] E. Balevi, A. Doshi, and J. G. Andrews, "Massive MIMO channel estimation with an untrained deep neural network", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 3, pp. 2079–2090. 2020.
- [3] H. He, C.-K. Wen, S. Jin, and G. Y. Li, "Model-driven deep learning for MIMO detection", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 68, pp. 1702–1715. 2020.
- [4] Y. Yuan, Y. Zhao, B. Zong, and S. Parolari, "Potential key technologies for 6g mobile communications", *Science China Information Sciences*, vol. 63, pp. 1–19. 2020.
- [5] Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, В. А. Челоян, "Спектральний метод оцінювання джитеру в телекомунікаційних системах", *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 2, с. 109–114. 2010.

- [6] Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, В. М. Кичак, *Методи та засоби підвищення ефективності оцінювання фазового дрижання сигналів у телекомунікаційних системах: Монографія*. Вінниця: ВНТУ, 2015. 140 с.
- [7] Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, О. В. Стальченко, "Пристрій аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів", *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 2, с. 82–85. 2013.

Стаття надійшла: 25.12.2023.

References

- [1] Y. Yifei, Z. Yajun, Z. Baiqing, and P. Sergio, "Potential key technologies for 6G mobile communications", in *SCIENCE CHINA Information Sciences*, Springer, vol. 63, pp. 1–19. 2020.
- [2] E. Balevi, A. Doshi, and J. G. Andrews, "Massive MIMO channel estimation with an untrained deep neural network", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 3, pp. 2079–2090. 2020.
- [3] H. He, C.-K. Wen, S. Jin, and G. Y. Li, "Model-driven deep learning for MIMO detection", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 68, pp. 1702–1715. 2020.
- [4] Y. Yuan, Y. Zhao, B. Zong, and S. Parolari, "Potential key technologies for 6g mobile communications", *Science China Information Sciences*, vol. 63, pp. 1–19. 2020.
- [5] G. G. Bortnyk, M. V. Vasykivskyi, V. A. Cheloyan, "Spectral method of jitter estimation in telecommunication systems", *Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute*, no. 2, pp. 109-114. 2010 [in Ukrainian].
- [6] G. G. Bortnyk, M. V. Vasykivskyi, V. M. Kychak, *Methods and means of increasing the efficiency of evaluating the phase jitter of signals in telecommunication systems: Monograph*. Vinnytsia: VNTU, 2015. 140 p. [in Ukrainian].
- [7] G. G. Bortnyk, M. V. Vasykivskyi, O. V. Stalchenko, "Device for analog-digital conversion of high-frequency signals", *Measuring and computing equipment in technological processes*, no. 2, pp.82–85. 2013 [in Ukrainian].

Відомості про авторів

Васильківський Микола Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри інфокомунікаційних систем і технологій.

Городецька Оксана Степанівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри обчислювальної техніки.

Стальченко Олександр Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри інфокомунікаційних систем і технологій.

Климчук Богдан Сергійович – студент групи ТКС-21м, кафедра інфокомунікаційних систем і технологій.

M. V. Vasykivskyi, O. S. Horodetska, O. V. Stalchenko, B. S. Klymchuk
INCREASING THE EFFICIENCY OF MIMO 6G SMART NETWORKS

Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

ДО ВІДОМА АВТОРІВ

Найновіші правила оформлення і подання статей знаходяться на сайті журналу
<http://itce.vntu.edu.ua/>