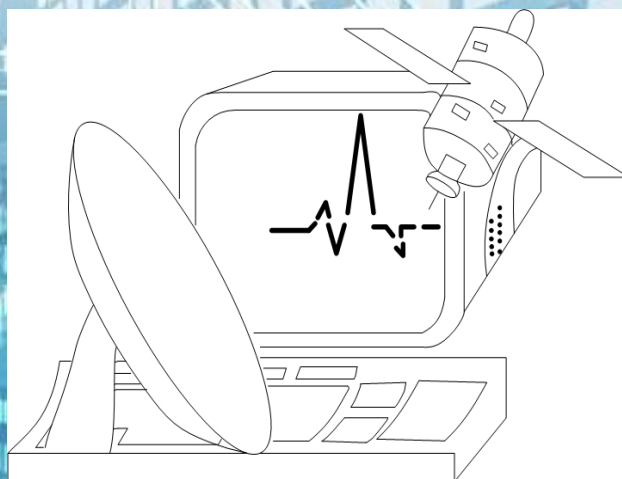




СПІРН-2025



**СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ
ІНФОКОМУНІКАЦІЙ,
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ ТА
НАНОСИСТЕМ
(СПІРН-2025)**

Матеріали X Міжнародної науково-технічної
конференції

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Національний технічний університет
«Київський політехнічний університет імені Ігоря Сікорського»
Харківський національний університет радіоелектроніки
Національний університет «Львівська політехніка»
Харківський національний університет Повітряних Сил
імені Івана Кожедуба
Новий Лісабонський університет (Португальська республіка)
Люблінська політехніка (Польща)

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ІНФОКОМУНІКАЦІЙ, РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ ТА НАНОСИСТЕМ (СПРН-2025)

Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції

05 – 07 листопада 2025 року

Збірник наукових праць

Електронне наукове видання

Вінниця
ВНТУ
2025

УДК 621.38+621.39(062)

С91

Видається за рішенням Вченої ради Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України

Редакційна колегія:

В. Кичак, Л. Коваль, О. Осадчук, С. Павлов, С. Тимчик

За загальною редакцією Сергія ТИМЧИКА

Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем
С91 (СПРН-2025). Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції, 05 – 07 листопада 2025 року : збірник наукових праць [Електронний ресурс]. – Вінниця : ВНТУ, 2025. – (PDF, 209 с.)

ISBN 978-617-8163-75-4

Збірник містить матеріали доповідей X Міжнародної науково-технічної конференції за основними напрямками роботи конференції та в контексті підготовки фахівців технічних спеціальностей.

Роботи публікуються в авторській редакції. Редакційна колегія не несе відповідальності за достовірність інформації, яка наведена в роботах, та залишає за собою право не погоджуватись з думками авторів на розглянути питання.

УДК 621.38+621.39(062)

ISBN 978-617-8163-75-4

© Вінницький національний технічний
університет, укладання, оформлення, 2025

Зміст

Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем

Інфокомунікаційні системи і технології

<i>Дмитро Валерійович Михалевський, Дмитро Романович Бриль</i> ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МЕРЕЖ СТАНДАРТУ WI-FI НА БАЗІ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ.....	1
<i>Олена Олександрівна Семенова, Андрій Васильович Джус, Володимир В'ячеславович Мартинюк</i> МЕТОДИ ШИФРУВАННЯ ДАНИХ У БЕЗПРОВІДНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ НА ОСНОВІ ГЕНЕТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ.....	3
<i>Алла Павлівна Гірман</i> ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНА ПОЛІТИКА МІЖНАРОДНИХ ОРГАНІЗАЦІЙ.....	5
<i>Єгор Іванович Кирилов</i> МЕХАНІЗМИ ШВИДКОЇ ПЕРЕМАРШРУТИЗАЦІЇ В IP-МЕРЕЖАХ.....	7
<i>Павло Ігорович Кость</i> СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО СТВОРЕННЯ НАДІЙНИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ У РАДІАЦІЙНО-НАВАНТАЖЕНИХ СЕРЕДОВИЩАХ.....	9
<i>Володимир Іванович Панченко, Павло Дмитрович Ткаченко, Григорій Павлович Цяпа</i> ОПТИМІЗАЦІЯ ПЕРЕДАЧІ ВІДЕО ВИСОКОЇ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ЧЕРЕЗ КАНАЛИ З ОБМЕЖЕНОЮ ПРОПУСКНОЮ ЗДАТНІСТЮ.....	11
<i>Геннадій Григорович Бортник, Олександр Геннадійович Бортник, Сергій Васильович Чубатюк</i> ВИСОКОПРОДУКТИВНИЙ МЕТОД СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ.....	13
<i>Геннадій Григорович Бортник, Сергій Геннадійович Бортник</i> АНАЛОГО-ЦИФРОВИЙ ТРАКТ ЗАСОБІВ ЦИФРОВОГО ОБРОБЛЕННЯ СИГНАЛІВ В ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ.....	15
<i>Микола Володимирович Васильківський, Андрій Олегович Олійник, Максим Петрович Коваль</i> ОПТИМІЗАЦІЯ ДОСТУПУ У ШИРОКОСМУГОВИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ.....	17
<i>Микола Володимирович Васильківський, Михайло Володимирович Будаш, Микола Миколайович Вікулов</i> ОПТИМІЗАЦІЯ МОБІЛЬНОСТІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ.....	20
<i>Микола Володимирович Васильківський, Андрій Володимирович Прикмета, Іван Володимирович Карпенко</i> АРХІТЕКТУРА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ 6G.....	23
<i>Олександр Олегович Харжевський, Василь Мартинович Кичак</i> АНАЛІЗ ВТРАТ СИГНАЛУ В РАДІОКАНАЛАХ МЕРЕЖ 5G/6G В УМОВАХ МІСЬКОЇ ЗАБУДОВИ.....	27
<i>Микола Володимирович Васильківський, Андрій Володимирович Прикмета, Андрій Олегович Васильківський</i> ОПТИМІЗАЦІЯ СПЕКТРАЛЬНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ У МЕРЕЖАХ ЗВ'ЯЗКУ ШОСТОГО ПОКОЛІННЯ.....	29
<i>Микола Володимирович Васильківський, Михайло Володимирович Будаш, В'ячеслав Олександрович Бобров</i> ОПТИМІЗАЦІЯ ОБСЛУГОВУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО ТРАФІКУ В МУЛЬТИСЕРВІСНОМУ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОМУ ОБЛАДНАННІ.....	32
<i>В'ячеслав Олександрович Онищук, Василь Мартинович Кичак</i> ЗАСТОСУВАННЯ БЛОКЧЕЙНУ ДЛЯ БЕЗПЕКИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ.....	36

<i>Ігор Іванович Ентін</i> АНАЛІЗ НЕЗАЛЕЖНИХ КОМПОНЕНТ ЯК МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОЗАХИЩЕНОСТІ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ	39
<i>Олена Костянтинівна Полонська</i> AUDITING AND MONITORING ACCESS IN IAM SYSTEMS: ENSURING REGULATORY COMPLIANCE AND DETECTING ANOMALIES	41
<i>Ірина Свид, Віталій Кащенко</i> ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ MLAT ДЛЯ МОДЕРНІЗАЦІЇ РАДІОТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОЛЬОТІВ	44
<i>Микола Володимирович Васильківський, Андрій Олегович Олійник, Володимир Олександрович Вальдимідт</i> ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО НАВАНТАЖЕННЯ В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ	46
<i>Микола Володимирович Васильківський, Назарій Віталійович Грабчак, Олег Федорович Березюк</i> ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ БЕЗДРОТОВІ MESH-МЕРЕЖІ	49
<i>Максим Юрійович Дмитрук, Олег Володимирович Онищук, Дмитро Володимирович Карлов</i> ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ НА ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ	53
<i>Микола Володимирович Васильківський, Назарій Віталійович Грабчак, Олександр Олександрович Щербік</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ WI-FI 7 У СУЧАСНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ	55
<i>Олександр Жихарєв, Ірина Свид</i> АНАЛІЗ ТОЧНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНОЛОГІЇ MLAT	58
<i>Владислав Павлович Іщук, Олександр Володимирович Стальченко</i> ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ПО UART ПРИ НАЯВНОСТІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕШКОД	60
<i>Олександр Сергійович Комарніцький, Василь Мартинович Кичак</i> «ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІМПУЛЬСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА ОСНОВІ MOSFET-ТРАНЗИСТОРІВ»	63
Радіотехніка	
<i>Олександр Володимирович Осадчук, Ярослав Олександрович Осадчук, Костянтин Віталійович Шикун</i> АВТОГЕНЕРАТОРНИЙ МІКРОЕЛЕКТРОННИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ТИСКУ	66
<i>Олександр Володимирович Осадчук, Ярослав Олександрович Осадчук, Віталій Іванович Петренко</i> ВИКОРИСТАННЯ ГЕНЕРАТОРІВ ХАОСУ В РОЗРОБЦІ ЕЛЕКТРОННО-КОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ	68
<i>Elena König, Олександр Володимирович Осадчук, Ярослав Олександрович Осадчук</i> ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИГОТОВЛЕННЯ ШВИДКОДІЮЧОГО МІКРОЕЛЕКТРОННОГО ПРИСТРОЮ З ВІД'ЄМНИМ ДИФЕРЕНЦІЙНИМ ОПОРОМ НА ОСНОВІ 2D НАНОМАТЕРІАЛУ МООЗ	70
<i>Микола Сергійович Тимчик</i> ВИКОРИСТАННЯ FMCW РАДАРІВ ДЛЯ ВІДСТЕЖЕННЯ БПЛА	72
<i>Oleksandr Anatoliiovuch Khizhnyuk, Віктор Мимхайлович Бондаренко, Данило Сергійович Бейнарович, Тетяна Романівна Гарматюк</i> РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ ФОРМУВАННЯ ТА ОБРОБКИ ШИРОКОСМУГОВИХ ІМПУЛЬСНИХ СИГНАЛІВ	

НА ОСНОВІ ПОХІДНОЇ СИСТЕМИ КОДІВ БАРКЕРА-УОЛША ДЛЯ РАДІОЛОКАТОРІВ З АНТЕННИМИ РЕШІТКАМИ	74
<i>Антон Анатолійович Хльоба, Андрій Олександрович Семенов</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ФАЗОВИХ ПОРТРЕТІВ ГЕНЕРАТОРІВ ДИНАМІЧНОГО ХАОСУ ТА ЇХ ВІЗУАЛІЗАЦІЯ В ПСЕВДО 3D-ПРОСТОРИ	76
<i>Андрій Юрійович Воловик, Максим Сергійович Ніколенко</i> ОПТИМАЛЬНИЙ ОЦІНЮВАЧ ЗІ СТРУКТУРНОЮ АДАПТАЦІЄЮ.....	79
<i>Павло Юрійович Костенко, Катерина Олександрівна Решетняк, Роман Анатолійович Лук'янюк</i> НЕПАРАМЕТРИЧНИЙ МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ SG-СТАТИСТИКИ В УМОВАХ ДІЇ МУЛЬТИПЛІКАТИВНИХ ЗАВАД	81
<i>Данило Сергійович Ігнатович, Павло Юрійович Костенко, Руслан Олександрович Качайло</i> МЕТОД РАДІОМОНІТОРИНГУ СИГНАЛЬНО-ЗАВАДОВОЇ ОБСТАНОВКИ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНДЕКСУ ПЕРЕДБАЧУВАНOSTI.....	84
<i>Іван Володимирович Таранюк, Олександр Володимирович Стальченко</i> ЗАСТОСУВАННЯ ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНОЇ МОДУЛЯЦІЇ ДЛЯ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ КУЛЕРА	87
<i>Кирило Дмитрович Троян</i> ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ НАВІГАЦІЇ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН НА ОСНОВІ БАГАТОПОЗИЦІЙНОЇ ДАЛЕКОМІРНОЇ СИСТЕМИ	89
<i>Данило Юрійович Ковальов</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХІВ ІНТЕГРАЦІЇ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ ДО СУЧАСНИХ ЗАСОБІВ (СИСТЕМ) РАДІОТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОЛЬОТІВ ДЕРЖАВНОЇ АВІАЦІЇ.....	91
<i>Максим Олегович Адардасов</i> ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ, ЩО ЗАЗНАЮТЬ ДОПЛЕРІВСЬКОГО ЗСУВУ ЧАСТОТИ, ДЛЯ ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ РУХУ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ В РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОЛЬОТІВ ДЕРЖАНОЇ АВІАЦІЇ.....	93
<i>Андрій Валерійович Кристофоров, Андрій Олександрович Семенов</i> АНАЛІЗ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ СИСТЕМ ІоТ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ МЕРЕЖ ОПАЛЕННЯ ПОБУТОВИХ СПОЖИВАЧІВ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ.....	96
<i>Олександр Петрович Мулярчук, Андрій Олександрович Семенов</i> ДРУКОВАНА БАГАТОШАРОВА АНТЕНА ВІВАЛЬДІ ДЛЯ НАДШИРОКОСМУГОВИХ РАДАРНИХ СИСТЕМ	98
<i>Максим Олександрович Притула, Нікіта Анатолійович Карелов</i> РАДІОТЕХНІЧНА СИСТЕМА ДОСТУПУ ТА КЛІМАТКОНТРОЛЮ БОМБОСХОВИЩА.....	100
<i>Мирослав Олександрович Гладкий, Андрій Олександрович Семенов</i> ЗАСОБИ РАДІОКЕРУВАННЯ ДРОНАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ	103
<i>Микола Юрійович Круглюк, Андрій Олександрович Семенов</i> ФАЗОВАНА АНТЕННА РЕШІТКА З 3×3 ЕЛЕМЕНТІВ ЯГІ–УДА ДЛЯ РЛС ДЕЦИМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ	105
<i>Андрій Андрійович Попенко, Андрій Олександрович Семенов</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ ЦИЛІНДРИЧНОЇ РУПОРНОЇ АНТЕНИ.....	107

Інформаційно-вимірювальні технології

<i>Максим Євгенович Завальнюк, Олександр Володимирович Осадчук</i> АНАЛІЗ АРХІТЕКТУРНИХ ПІДХОДІВ ДО ОБРОБКИ ДАНИХ У ВУЗЛАХ БЕЗПРОВІДНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ НА БАЗІ ЧАСТОТНИХ ДАВАЧІВ	109
<i>Вікторія Валентинівна Бровченко, Ігор Андрійович Дудатьєв, Максим Олександрович Притула</i> ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ЧАДНОГО ТА ПРИРОДНОГО (МЕТАНУ) ГАЗІВ	112
<i>Євгеній Андрійович Романенко, Ігор Андрійович Дудатьєв, Максим Олександрович Притула</i> ІНФРАЧЕРВОНІЙ PIR-СЕНСОР ДЛЯ СИСТЕМИ ВИЯВЛЕННЯ РУХУ ТА ВИМІРЮВАННЯ ВІДСТАНІ.....	116
<i>Андрій Юрійович Воловик, Микола Артемович Шутило</i> ДІАГНОСТИКА ДИНАМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ МЕТОДОМ РОЗДІЛЬНОГО ОЦІНЮВАННЯ	119
<i>Ігор Андрійович Дудатьєв</i> ЗАСІБ КОНТРОЛЮ КОНЦЕНТРАЦІЇ ШКІДЛИВИХ ДОМІШОК У ВОДІ.....	122
<i>Ігор Андрійович Дудатьєв, Сергій Васильович Мальцев</i> БЕЗПІЛОТНИЙ ЗАСІБ КОНТРОЛЮ КОНЦЕНТРАЦІЇ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН У АТМОСФЕРІ ВЕЛИКИХ МІСТ	125

Біометрична інженерія

<i>Юрій Євгенович Поуданєн, Андрій Вікторович Кожем'яко</i> ЗОРОВІ ТРАНСФОРМЕРИ В ЕНДОСКОПІІ.....	128
<i>Олег Сергійович Швидюк, Владислава Владиславівна Шолота</i> ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ МАКЕТУ ТРИХВИЛЬНОГО ПОЛЯРИМЕТРА ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ БІОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ.....	131
<i>Олег Олександрович Сидорук, Леонід Григорович Коваль</i> АЛГОРИТМИ ПЕРСОНАЛІЗОВАНОГО ПІДБОРУ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ІМПЛАНТА.....	134
<i>Андрій Юрійович Марчук</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ОСВІТЛЕННЯ ТА КУТА СПОСТЕРЕЖЕННЯ НА ЯКІСТЬ ОТОСКОПІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ	138
<i>Сергій Володимирович Костішин, Дмитро Олександрович Пантелейчук</i> МОДЕЛЬ ВПЛИВУ МІКРОКЛІМАТУ ПРИМІЩЕННЯ НА ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ЛЮДИНИ-ОПЕРАТОРА.....	141
<i>Сергій Володимирович Костішин, Олександр Володимирович Поліщук</i> АРХІТЕКТУРНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ РЕЄСТРАЦІЇ БІОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ЛЮДИНИ З ВИКОРИСТАННЯМ МОБІЛЬНИХ ПЛАТФОРМ	144
<i>Антон Олександрович Пастушенко, Леонід Григорович Коваль</i> СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО РОЗПІЗНАВАННЯ НАМІРУ РУХУ ТА УПРАВЛІННЯ МІОЕЛЕКТРИЧНИМИ ПРОТЕЗАМИ РУК	148
<i>Олексій Михайлович Мормітко, Сергій Васильович Тимчик</i> СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО КОМПЛЕКСНОГО ОЦІНЮВАННЯ ЗОРОВОЇ СИСТЕМИ ЗА ДОПОМОГОЮ ОПТИЧНИХ СЕНСОРІВ	151
<i>Олександр Володимирович Карась, Ярослав Сергійович Кузьмінов</i> СИСТЕМА ІНТЕРВАЛЬНОЇ ГІПОКСИЧНОЇ ТЕРАПІЇ З БІОЗВОРОТНИМ КОНТРОЛЕМ У РЕАБІЛІТАЦІЇ ВІЙСЬКОВИХ.....	154
<i>Олександр Миколайович Кругліков</i> ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ У КЕРУВАННІ ДОЗУВАННЯМ ІНСУЛІНУ: АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ПОРІВНЯННЯ.....	157

<i>Олександр Андрійович Каплунський</i> ВИЗНАЧЕННЯ МІШЕНЕЙ ДЛЯ ПОШУКУ ПІД ЧАС АНАЛІЗУ НЕКОДУЮЧИХ ДІЛЯНОК ДНК ЛЮДИНИ	160
<i>Вадим Валентинович Сорочинський</i> РОЗВИТОК МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СТАНУ ПРАЦІВНИКА НА РОБОЧОМУ МІСЦІ.....	163
<i>Сергій Володимирович Павлов, Юлія Олександрівна Пилипець</i> ВИКОРИСТАННЯ РОБОТИЗОВАНИХ СИСТЕМ У ТЕЛЕМЕДИЧНІЙ РЕАБІЛІТАЦІЇ ПАЦІЄНТІВ ІЗ ПОЛІТРАВМАМИ.....	167
<i>Леонід Коваль, Валентина Василенко</i> ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ ДОСЛІДЖЕНЬ У ГАЛУЗІ БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ	170
<i>Леонід Григорович Коваль, Антон Олександрович Пастушенко, Олег Олександрович Сидорук, Дмитро Леонідович Коваль</i> МЕТОДИ 3D ДРУКУ В РЕАБІЛІТАЦІЙНІЙ МЕДИЦИНІ: ПЕРСОНАЛІЗАЦІЯ, БІОІНТЕГРАЦІЯ ТА ОРТОРЕГЕНЕРАЦІЯ	172
<i>Олександр Володимирович Карась, Ярослав Сергійович Кузьмінов</i> СИСТЕМА ІНТЕРВАЛЬНОЇ ГІПОКСИЧНОЇ ТЕР АПІЇ З БІОЗВОРОТНИМ КОНТРОЛЕМ У РЕАБІЛІТАЦІЇ ВІЙСЬКОВИХ.....	174
<i>Іван Олександрович Криворучко, Леонід Григорович Коваль</i> СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПЕРЕШКОДИ ВПРОВАДЖЕННЯ 3D-ДРУКУ В ОРТОПЕДИЧНОМУ ПРОТЕЗУВАННІ	177
<i>Олександр Володимирович Карась, Оркен Мамирбаєв</i> ПІДХІД НА ОСНОВІ ТРАНСФОРМЕРІВ ДЛЯ АНАЛІЗУ ЗОБРАЖЕНЬ ОЧНОГО ДНА ПРИ ДІАГНОСТУВАННІ ДІАБЕТИЧНОЇ РЕТИНОПАТІЇ	180
<i>Олександр Володимирович Карась, Дмитро Іванович Радлінський</i> СИСТЕМА АНАЛІЗУ ЖУВАЛЬНО-ПОСТУРАЛЬНИХ М'ЯЗІВ	182
<i>Богдан Віталійович Гончар, Дмитро Хуанович Штофель</i> ВИЗНАЧЕННЯ ТВЕРДОСТІ КУКСОПРИЙМАЛЬНИХ ГІЛБЗ ПРОТЕЗІВ ЗА МЕТОДОМ ШОРА.....	184
<i>Дмитро Хуанович Штофель, Віктор Олексійович Гомолінський</i> АЛГОРИТМІЗАЦІЯ АДАПТИВНОЇ СТИМУЛЯЦІЇ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ФАНТОМНОГО БОЛЮ В АМПУТОВАНИХ КІНЦІВКАХ.....	187
<i>Вікторія Корчевська, Сергій Васильович Тимчик</i> БІОНІЧНІ ПРОТЕЗИ З НЕЙРОІНТЕРФЕЙСОМ: СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ	190
Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології	
<i>Владислава Владиславівна Шолота, Дмитро Леонідович Рачинський</i> АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА СИСТЕМ ПОЛЯРИЗАЦІЙНОГО ОЦІНЮВАННЯ ОПТИЧНОЇ АНІЗОТРОПІЇ ДВОШАРОВИХ БІОЛОГІЧНИХ ТКАНИН ПРИ ЇХ ДІАГНОСТИЦІ.....	192
<i>Владислав Євгенович Поуданєн</i> МАТРИЧНІ МЕТОДИ ПОЛЯРИЗАЦІЙНОГО АНАЛІЗУ ОПТИЧНО АКТИВНИХ ЗРАЗКІВ	195
<i>Наталія Іванівна Заболотна, Сергій Олександрович Смоляренко</i> КОНЦЕПЦІЯ ПОБУДОВИ ЗОБРАЖАЛЬНОГО ФУР'Є-ПОЛЯРИМЕТРА З АВТОМАТИЗОВАНИМ АНАЛІЗОМ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ БІОЛОГІЧНИХ ШАРІВ.....	200

ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МЕРЕЖ СТАНДАРТУ WI-FI НА БАЗІ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

В роботі наведено результати дослідження можливості застосування нейронних мереж для операцій оцінювання параметрів безпроводних мереж стандарту Wi-Fi.

Ключові слова: моніторинг, оцінювання параметрів, нейронні мережі, регресійна модель, безпроводна мережа Wi-Fi.

Abstract

In this paper, presents the results of a study of the possibility of using neural networks for operations of evaluating the parameters of wireless networks of the Wi-Fi standard.

Keywords: monitoring, parameter estimation, neural networks, regression model, Wi-Fi wireless network.

На сьогодні, безпроводні мережі стандарту Wi-Fi є ключовою інфраструктурою для передачі інформації у приватних, корпоративних та промислових середовищах. Зростання кількості пристроїв, що підключаються до мережі, призводить до ускладнення процесів керування ресурсами для забезпечення відповідної якості інфокомунікаційних сервісів, що потребує оптимізації пропускної здатності та мінімізації затримок [1]. Традиційні методи та моделі часто не враховують складних нелінійних залежностей між параметрами мереж та факторами впливу із динамічними характеристиками, що потребує створення вдосконалених механізмів моніторингу та оцінювання [2]. У цьому контексті перспективним напрямком є застосування нейронних мереж, що відкривають нові можливості для підвищення ефективності оцінювання параметрів мереж стандарту Wi-Fi.

При оцінюванні параметрів мереж стандарту Wi-Fi можна розглядати основні технічні показники [3-5]: рівень сигналу (RSSI, Received Signal Strength Indicator); пропускна здатність каналу (Throughput); затримка (Latency); імовірність втрати пакетів (Packet Loss Rate); спектральна ефективність; коефіцієнт використання каналу (Channel Utilization). Ці параметри взаємопов'язані та залежать від багатьох факторів, таких як довжина каналу, тип та форма перешкод, кількість активних безпроводних каналів, параметрів середовища та ін. [6]. Враховуючи складність отримання характеристики передачі інформації у безпроводних каналах [7], можна застосувати нейронну мережу для узгодження параметрів середовища та параметрів мережі із знаходженням середньостатистичної моделі. Для цього застосуємо регресійну модель нейромережі на базі перцептрона із функцією активації (MLP - Multi-Layer Perceptron) [8]. Така модель є досить простою та доступною при реалізації програмними засобами мови Python, й її доцільно використовувати для прогнозування рівня сигналу та пропускної здатності на основі відстані, частотного діапазону, кількості архітектурних перешкод.

Для досліджень було обрано нейронну мережу із двома прихованими шарами, на 32 та 16 нейронів із функцією активації ReLU (Rectified Linear Unit). На вихідному шарі застосовувався один нейрон для оцінювання рівня сигналу, а також функція втрат для оцінювання похибки та оптимізатор Adam. В якості перешкод, використовувався умовний індекс складності середовища для тренування нейромережі у частотному діапазоні 2,4 ГГц. Як базовий сценарій без додаткових стін, перегородок чи інших об'єктів умовний індекс позначено як «перешкода 0». Для умови – одна стіна між точкою доступу та приймачем, або еквівалентна кількість завад, позначено «перешкода 1» та для двох стін чи більш складного середовища – «перешкода 2». Результати оцінювання наведено на рис. 1.

Таким чином, застосування нейронних мереж для оцінювання параметрів безпроводних мереж стандарту Wi-Fi є перспективним напрямком, що дозволяє підвищити точність

прогнозування та оптимізації, але потребує великої кількості даних при навчанні, для підвищення точності обчислень, оскільки існування значної кількості факторів впливу приводить до появи помилок, як показано на рис. 1 б.

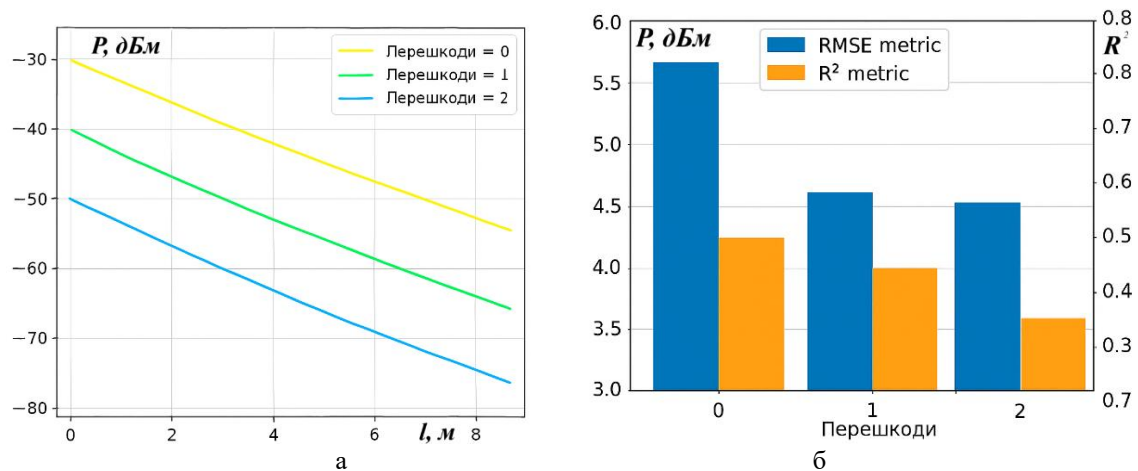


Рис. 1. Результати оцінювання: а – рівня сигналу на базі перцептрона; б – точності отриманих результатів від типу перешкод

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ibrahim Sammour. Performance Enhancement in Wi-Fi Networks using Machine Learning. Machine Learning [cs.LG]. Université Clermont Auvergne, 2023. English. ffnNT : 2023UCFA0041ff. 111 p.
2. Mykhalevskiy D. V. Evaluation of wireless information transmission channel settings of 802.11 wi-fi standardю EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies. 2014. ,Vol.. 6. Issue 9 (72). Pp. 22-25. DOI: 10.15587/17294061.2014.31666..
3. Mykhalevskiy D. Investigation of Sensitivity Impact of Receiver to Effective Data Transmission Rate. Proceeding of the 1th IEEE International Conference on Data Stream Mining & Processing. Conference Proceeding. August 23–27. 2016. Lviv, Ukraine. Pp. 369-372.
4. Михалевський Д.В., Городецька О.С. Оцінка ефективної швидкості передачі інформації для сімейства стандартів 802.11x у діапазоні 2.4 ГГц. Sword. 2015. В. 3(40). Том 3. С. 43–47.
5. Михалевський Д.В., Красота Р.О., Гузь М.Д. Передача трафіку у мережах Wi-Fi при дії інтерференційних завад. Sword. 2014. № 4(37) Том 5. С. 13–16.
6. Михалевський Д.В., Номировська В.В., Постернак О.М. Дослідження передачі інформації в умовах суміщеного та сусіднього інтерференційного каналів для стандарту 802.11n. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2015. № 2. С. 155–159.
7. Liu Y. F., Chang T. H., Hong M., Wu Z., So A. M. C., Jorswieck E. A., Yu W. A Survey of Recent Advances in Optimization Methods for Wireless Communications. arXiv:2401.12025v3. 2024. Pp. 1-39.
8. Vishwakarma R., Joshi R.B., Mishra S. IndoorGNN: A Graph Neural Network based approach for Indoor Localization using WiFi RSSI. arXiv:2312.07609v1. 2023. Pp. 1-13.

Михалевський Дмитро Валерійович — д.т.н., професор кафедри інфокомунікаційних систем і технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Бриль Дмитро Романович — аспірант, кафедри інфокомунікаційних систем і технологій, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: dsma.bril.96@ukr.net

Mikhalevsky Dmytro V. — Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Infocommunication Systems and Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

Bryl Dmytro R. — postgraduate student at the Department of Infocommunication Systems and Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: dsma.bril.96@ukr.net

МЕТОДИ ШИФРУВАННЯ ДАНИХ У БЕЗПРОВІДНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ НА ОСНОВІ ГЕНЕТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглядаються шляхи застосування генетичних алгоритмів для оптимізації шифрування в БСМ, а також переваги та виклики використання цих алгоритмів.

Ключові слова: безпроводні сенсорні мережі, шифрування, генетичний алгоритм.

Abstract

The paper examines ways to apply genetic algorithms to optimize encryption in WSN, as well as the advantages and challenges of using these algorithms.

Keywords: wireless sensor networks, encryption, genetic algorithm.

Вступ

У сучасному світі безпроводні сенсорні мережі (БСМ) набули великого поширення завдяки своїй здатності ефективно збирати і передавати інформацію у різноманітних сферах застосування: від охорони навколишнього середовища до військових та медичних систем. Ці мережі складаються з численних маленьких датчиків (сенсорів), які можуть взаємодіяти між собою через безпроводні канали зв'язку, збираючи дані про різні параметри навколишнього середовища, наприклад, температуру, вологість, тиск або рух.

Проте, незважаючи на численні переваги, БСМ мають і ряд суттєвих обмежень. Одним з найбільших викликів є обмеження ресурсів, таких як енергоспоживання, обчислювальна потужність сенсорів і обмежений обсяг пам'яті. Це ускладнює використання стандартних методів шифрування, які потребують значної обчислювальної потужності або великих обсягів пам'яті.

З цієї причини важливим завданням є розробка ефективних методів шифрування, які забезпечують захист даних, але при цьому враховують обмеження ресурсів сенсорів. Одним із найбільш перспективних підходів до вирішення цієї проблеми є використання генетичних алгоритмів (ГА). Вони є як частиною класу еволюційних алгоритмів, можуть бути використані для оптимізації процесів шифрування, зокрема для пошуку ефективних методів генерації та розподілу ключів, а також для побудови адаптивних криптографічних систем, що враховують зміни умов роботи мережі.

Результати дослідження

У БСМ існує безліч потенційних загроз, що ставлять під сумнів безпеку та цілісність даних, передаваних мережею. Основні загрози включають: підслуховування, фальсифікацію даних, атаки на цілісність мережі, атаки на енергозабезпечення, фізичні атаки [1].

Класичні методи шифрування, незважаючи на їх надійність і безпеку, мають кілька суттєвих обмежень у контексті безпроводних сенсорних мереж. Оскільки ці мережі працюють в умовах обмежених ресурсів (пам'ять, обчислювальна потужність, енергоспоживання), їх використання може бути неефективним [2].

Одним із перспективних підходів для забезпечення ефективного шифрування в БСМ є використання генетичних алгоритмів [3]. ГА є частиною класу еволюційних алгоритмів, які можуть використовуватися для вирішення складних оптимізаційних задач, таких як пошук оптимальних шифрувальних ключів або налаштувань криптографічних систем. Вони імітують процес природного відбору, де "найкращі" рішення, що забезпечують найкращий результат для заданої задачі, виживають і передають свої

властивості наступним поколінням та ґрунтуються на ідеях еволюції, що включають мутації, схрещування та відбір.

ГА можуть бути особливо корисними для шифрування в безпроводних сенсорних мережах з кількох причин. Вони можуть автоматично адаптуватися до змін у мережі. Оскільки БСМ можуть зазнавати змін у топології або в ресурсах, ГА здатні підлаштовувати параметри шифрування в реальному часі, забезпечуючи баланс між безпекою та енергоспоживанням. ГА можуть використовуватися для пошуку оптимальних параметрів шифрування, таких як розміри ключів, методи генерації ключів або алгоритми шифрування, які максимально підходять для умов конкретної мережі. ГА можуть допомогти в пошуку ефективних стратегій для мінімізації енергозатрат під час шифрування та передачі даних. Наприклад, можна оптимізувати частоту генерації нових ключів або використовувати методи шифрування, які вимагають менших обчислювальних ресурсів. Також, ГА можуть допомогти створити нові методи шифрування, комбінуючи різні криптографічні підходи для досягнення більш високого рівня безпеки в БСМ.

Попри значний потенціал, застосування генетичних алгоритмів для шифрування в БСМ стикається з кількома серйозними викликами та проблемами, які потребують подальшого дослідження і вирішення. Так, ГА можуть бути обчислювально затратними, оскільки вимагають значної кількості ітерацій для досягнення оптимального результату. Це може бути проблемою в умовах БСМ, де сенсори мають обмежені обчислювальні можливості. Також застосування генетичних алгоритмів вимагає налаштування кількох параметрів, таких як розмір популяції, кількість ітерацій, параметри схрещування та мутації. Це може бути складно для реальних мереж, де сенсори часто працюють в умовах змінної топології та обмежених ресурсів. Інтеграція генетичних алгоритмів у вже існуючі мережі потребує значних зусиль для забезпечення стабільності та ефективності шифрування в реальному часі.

Висновки

Генетичні алгоритми є перспективним інструментом для оптимізації шифрування в безпроводних сенсорних мережах, оскільки вони дозволяють забезпечити адаптивність, підвищити безпеку і знизити енергозатрати. Проте їх застосування має певні обмеження, такі як високі обчислювальні витрати і складність налаштування в реальних мережах. Для подальшого розвитку цієї технології необхідно вдосконалювати алгоритми з урахуванням ресурсних обмежень сенсорів і забезпечувати їх ефективну інтеграцію в існуючі мережі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. S. B. Sasi, N. Sivanandam, and Emeritus, "A Survey on Cryptography using Optimization algorithms in WSNs," Indian Journal of Science and Technology, vol. 8, no. 3. Indian Society for Education and Environment, p. 216, Feb. 01, 2015. doi: 10.17485/ijst/2015/v8i3/59585.
2. Burhan, I. M., Ibrahim, S. khalil, Jebur, Z. T., Abdul Zahra, M. M., Salih, M. A., & Adnan Jaleel, R. (2021). Secure wireless sensor network using cryptographic technique based hybrid genetic firefly algorithm. In Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN) (Vol. 9, Issue 4, p. 1159). International University of Sarajevo. <https://doi.org/10.21533/pen.v10i1.2608>
3. Hamici, Z. (2018). Towards Genetic Cryptography for Biomedical Wireless Sensor Networks Gateways. In IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics (Vol. 22, Issue 6, pp. 1814–1823). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <https://doi.org/10.1109/jbhi.2018.2860980>

Семенова Олена Олександрівна – канд. техн. наук, доцент кафедри інфокомунікаційних систем і технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: semenova.o.o@vntu.edu.ua

Джус Андрій Васильович – аспірант групи 172-23а, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет

Мартинюк Володимир В'ячеславович – аспірант групи 172-23а, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет

Semenova Olena O. – Cand. Sc. (Eng), Associate professor at the Department of Infocommunication systems and technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: semenova.o.o@vntu.edu.ua

Dzhus Andrii V. – post-graduate student of 172-23a group, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University

Martyniuk Volodymyr V. – post-graduate student of 172-23a group, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНА ПОЛІТИКА МІЖНАРОДНИХ ОРГАНІЗАЦІЙ

Університет митної справи та фінансів, м. Дніпро

Анотація.

Розглянуто сутність, цілі та основні напрями реалізації інформаційно-комунікаційної політики міжнародних організацій в умовах сучасної глобалізації. Визначено, що інформаційно-комунікаційна політика стає ключовим інструментом формування міжнародного середовища, зміцнення довіри до інституцій та забезпечення ефективної взаємодії зі світовою громадськістю. Особливу увагу приділено впливу цифровізації, соціальних мереж і штучного інтелекту на трансформацію комунікаційних стратегій міжнародних структур. Визначено основні виклики, пов'язані з поширенням дезінформації, маніпуляціями у медіапросторі та просуванням медіаграмотності

Ключові слова: інформаційно-комунікативна політика, міжнародні організації, стратегічні комунікації, цифрова трансформація, цифровізація, медіа.

Abstract. *The paper examines the essence, objectives, and main directions of implementing the information and communication policy of international organizations in the context of modern globalization. It has been determined that information and communication policy is becoming a key instrument for shaping the international environment, fostering trust in institutions, and ensuring effective interaction with the global public. Particular attention is paid to the influence of digitalization, social networks, and artificial intelligence on the transformation of communication strategies of international structures. The main challenges related to the spread of disinformation, media manipulation, and the promotion of media literacy are identified.*

Keywords: information and communication policy, international organizations, strategic communications, digital transformation, digitalization, media.

Інформаційне суспільство характеризується домінуванням інформації як основного явища навколо якого формуються та існують більшість державних і недержавних інститутів. Інформація стає найважливішим ресурсом і способом комунікації між різноманітними групами. Через інформацію суспільство транслює свої інтереси органам державної влади, а на міжнародному рівні – держави світовому співтовариству.

У сучасному світі артикуляцію та агрегування інтересів держав здійснюють міжнародні організації. Міжнародні організації відіграють ключову роль у світовій політиці, сприяючи підтримці миру, сприяючи економічному співробітництву, просуваючи права людини та вирішуючи глобальні проблеми, такі як екологічні та гуманітарні питання. Їх роль полягає у створенні майданчиків для діалогу, розробці стандартів, координації дій держави та надання допомоги у кризових ситуаціях.

Інформаційно-комунікаційна політика міжнародних організацій є невід'ємною складовою їх зовнішньої та внутрішньої діяльності. В умовах глобалізації, гібридних загроз і розвитку цифрових медіа ефективна комунікація стає інструментом впливу, формування іміджу та підтримки легітимності міжнародних інституцій.

Сьогодні інформаційна взаємодія міжнародних структур виходить далеко за межі офіційних звітів і пресрелізів – вона охоплює цифрові платформи, соціальні мережі, мультимедійні кампанії, кризові комунікації, а також аналітичну роботу з громадською думкою.

Інформаційно-комунікаційна політика (ІКП) розглядається як система принципів, стратегій і практик, спрямованих на управління інформаційними потоками, формування публічного іміджу та налагодження діалогу з цільовими аудиторіями [1].

Основними цілями ІКП міжнародних організацій є:

- забезпечення прозорості та підзвітності діяльності;
- формування глобального дискурсу навколо ключових цінностей і цілей;
- підвищення рівня довіри та залучення громадськості;
- протидія дезінформації та маніпуляціям у медіапросторі [2].

Практика реалізації ІКП міжнародних організацій досить різноманітна. Так, до прикладу, ООН формує глобальні комунікаційні стратегії через Департамент глобальних комунікацій (Department of Global Communications), який координує кампанії з просування прав людини, сталого розвитку (ЦСР), гендерної рівності та світу. Платформи UN News, UN Web TV та соціальні мережі ООН мають багатомовний формат, що сприяє інклюзивності глобального дискурсу.

Інформаційна політика ЄС базується на принципах відкритості та «єдиної комунікаційної стратегії» для всіх інституцій. Єврокомісія використовує інтерактивні платформи («EU in my Region», «Together.eu»), офіційні блоги та соціальні мережі для поширення інформації про політику ЄС. З 2020 року активно розвивається напрямок «Європейська стратегічна комунікація», спрямований на протидію дезінформації та пропаганді.

Альянс НАТО створив потужну систему стратегічних комунікацій (NATO STRATCOM), що послужило публічною дипломатією, психологічними операціями та інформаційним аналізом. Комунікативна політика НАТО орієнтована на формування позитивного іміджу організації, а також на протидію інформаційним впливам противників.

Натомість інформаційна політика ЮНЕСКО акцентує увагу на гуманітарних цінностях, освіті, культурній спадщині та свободі слова. Організація підтримує проекти з розвитку медіаграмотності, свободи медіа та захисту журналістів, що є основою сталих демократичних комунікаційних систем [3-5].

Однак, слід зауважити, що поширення штучного інтелекту, великі дані, соціальні платформи та діджиталізація комунікацій створюють як нові можливості, так і ризики.

Серед викликів:

- інформаційні війни та кібератаки;
- маніпулювання громадською думкою через соцмережі;
- поширення фейкових новин;
- зростання потреби у медіаграмотності.

У відповідь міжнародні організації посилюють цифрову комунікаційну етику, впроваджують політику фактчекінгу та етичного використання ШІ у сфері інформаційного впливу.

Інформаційно-комунікаційна політика міжнародних організацій сьогодні є стратегічним чинником формування глобального порядку денного. Вона визначає не лише імідж організації, а й ефективність її дій у кризових ситуаціях.

Забезпечення балансу між відкритістю, надійністю інформації та стратегічним контролем за інформаційними потоками є запорукою довіри, стійкості та легітимності міжнародних інституцій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Панченко, О., & Сердюк, І. (2020). Інформаційна державна політика на шляху цифровізації. *Аспекти публічного управління*, 8 (1 SI), 107-109. <https://doi.org/10.15421/152053>
2. Силаєв В., Горінов П. (2024). Політика інформаційної безпеки в умовах цифрової трансформації України: виклики та шляхи попередження. *Наукові праці Міжрегіональної Академії управління персоналом. Політичні науки та публічне управління*, (3(75)), 81-87. [https://doi.org/10.32689/2523-4625-2024-3\(75\)-12](https://doi.org/10.32689/2523-4625-2024-3(75)-12)
3. United Nations Department of Global Communications (2023). *Annual Report*. New York.
4. European Commission (2023) Strategic communication programs. Brussels
5. UNESCO (2023). *World Trends in Freedom of Expression and Media Development*. Paris.

Гірман Алла Павлівна, к.політ.н., доцент кафедри міжнародних відносин Університету митної справи та фінансів м.Дніпро, girmanap77@gmail.com

Alla Pavlivna Girman, Ph.D. in Political Science, Associate Professor of the Department of International Relations, University of Customs and Finance, Dnipro. girmanap77@gmail.com

МЕХАНІЗМИ ШВИДКОЇ ПЕРЕМАРШРУТИЗАЦІЇ В IP-МЕРЕЖАХ

Харківський національний університет радіоелектроніки

Анотація

Досліджено механізми швидкої перемаршрутизації в IP-мережах. Розглянуто принципи роботи та особливості основних технологій. Проведено порівняльний аналіз їхніх часових характеристик, рівня покриття відмов, вимог до топології та залежності від протоколів маршрутизації.

Ключові слова: IP FRR, швидка перемаршрутизація, відмовостійкість, маршрутизація.

Abstract

Investigate fast reroute mechanisms in IP networks. The principles of operation and features of the main technologies are considered. Their performance in terms of convergence time, fault coverage, and topological requirements is compared. The study defines the advantages and limitations of each mechanism and outlines the conditions for their practical application in different network environments.

Keywords: IP FRR, fast rerouting, reliability, fault tolerance, routing.

У сучасних інфокомунікаційних мережах забезпечення безперервності передавання даних є ключовою вимогою до якості сервісів реального часу. Для досягнення високої відмовостійкості використовуються механізми fast reroute [1], які дозволяють миттєво перенаправляти трафік при відмові вузлів або каналів без очікування повної конвергенції протоколів маршрутизації.

Одним із базових механізмів IP FRR є Loop-Free Alternate, стандартизований у RFC 5286. Його принцип дії полягає у попередньому обчисленні альтернативного маршруту, який відповідає умові відсутності петель. У разі збою основного каналу маршрутизатор миттєво перенаправляє трафік через задалегідь обчисленого сусіда (LFA-вузол), що забезпечує час перемикавання менше 50 мс [2]. LFA простий у реалізації, проте забезпечує лише часткове покриття топологій.

Для підвищення рівня захисту застосовується механізм maximally redundant trees, який забезпечує побудову двох остовних дерев – синього та червоного з максимально розділеними маршрутами. Це дозволяє мінімізувати спільні точки відмови та гарантувати відновлення зв'язку при будь-яких одиничних відмовах [3]. MRT забезпечує повне покриття, проте вимагає значних обчислювальних ресурсів та складної конфігурації.

Технологія equal-cost multi-path використовує множину рівноцінних маршрутів до однієї точки призначення. Завдяки хешуванню потоків даних досягається балансування навантаження і підвищується надійність. ECMP дозволяє одночасно використовувати декілька активних шляхів, забезпечуючи миттєве перемикавання у разі відмови. Разом з тим, її ефективність залежить від рівномірності хешування і підтримується лише для маршрутів з однаковою метрикою [4].

Особливе місце серед механізмів FRR займає EIGRP Fast Reroute, який базується на алгоритмі diffusing update algorithm. Цей підхід використовує попередньо обчислені резервні маршрути – feasible successors, що дозволяє досягати часу перемикавання менше 50 мс без перерахунку таблиць маршрутизації [5]. Умова feasibility condition гарантує відсутність петель при переході на резервний маршрут.

Порівняльний аналіз показує, що всі розглянуті механізми забезпечують час відновлення менше 50 мс, проте різняться рівнем покриття та вимогами до топології. LFA доцільно застосовувати у мережах із помірною зв'язністю, MRT – для критичних систем з необхідністю повного захисту, ECMP – у дата-центрах із задачами балансування навантаження, а EIGRP FRR – у Cisco-орієнтованих мережах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Shand M. RFC5714: IP Fast Reroute Framework [Електронний ресурс] / Mike Shand, Stewart Bryant. – Режим доступу: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc5714>.
2. Atlas A. RFC 5286: Basic Specification for IP Fast Reroute: Loop-Free Alternates [Електронний ресурс] / Alia Atlas, Alex Zinin. –

Режим доступу: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc5286>.

3. Envedi G. RFC 7811: An Algorithm for Computing IP/LDP Fast Reroute Using Maximally Redundant Trees (MRT-FRR) [Електронний ресурс] / Gabor Envedi [та ін.] – Режим доступу: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7811>
4. Palo Alto Networks. PAN-OS Networking Administrator's Guide [Електронний ресурс] / Palo Alto Networks. – Режим доступу: <https://www.juniper.net/documentation/us/en/software/junos/flow-packet-processing/topics/topic-map/security-ecmp-flow-based-forwarding.html>.
5. Cisco. IP Routing: EIGRP Configuration Guide, Cisco IOS XE Fuji 16.8.x [Електронний ресурс] / Cisco – Режим доступу: https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/ios-xml/ios/iproute_eigrp/configuration/xe-16-7/ire-xe-16-8-book/ire-ipfrr.pdf

Кирилов Єгор Іванович – студент Харківського національного університету радіоелектроніки, факультет Інфокомунікацій, кафедра Інфокомунікаційної інженерії імені В.В. Поповського, група ІКІм-24-1, м. Харків, e-mail: yehor.kyrylov@nure.ua

Науковий керівник: Лемешко Олександр Віталійович – професор, доктор технічних наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, факультет Інфокомунікацій, кафедра Інфокомунікаційної інженерії імені В.В. Поповського, група ІКІм-24-1, м. Харків

Yehor Kyrylov – student of the Kharkiv National University of Radio Electronics, Faculty of Infocommunications, Department of Information and Communication Engineering named after V. V. Popovskiy, group IKIm-24-1, Kharkiv, e-mail: yehor.kyrylov@nure.ua

Scientific supervisor: Oleksandr Lemeshko – professor, Doctor of Technical Sciences, Kharkiv National University of Radio Electronics, Faculty of Infocommunications, Department of Information and Communication Engineering named after V. V. Popovskiy, Kharkiv

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО СТВОРЕННЯ НАДІЙНИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ У РАДІАЦІЙНО-НАВАНТАЖЕНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Національний університет «Львівська політехніка»

Анотація. У роботі проведено аналіз сучасних підходів до забезпечення стабільної передачі слабких сигналів у термоядерних реакторах в умовах впливу іонізуючого та нейтронного випромінювання. Розглянуто переваги та обмеження коаксіальних, мінерально-ізолюваних, оптичних і гібридних ліній передачі. Запропоновано концепцію гібридних трактів, що поєднують мінерально-ізолювані та оптичні елементи з цифровими методами компенсації спотворень і системами самодіагностики.

Ключові слова: термоядерний реактор, слабкі сигнали, іонізуюче та нейтронне випромінювання, радіаційностійкі лінії передачі, цифрова компенсація спотворень, самодіагностика, стабільність сигналу.

Вступ

У сучасних термоядерних установках, таких як ITER, Wendelstein-7X, JT-60SA, передавання сигналів від сенсорів до обчислювальних систем відбувається в умовах іонізуючого та нейтронного випромінювання, високих температур і магнітних полів, що ускладнює збереження якості сигналів [1].

Надійність трактів слабких сигналів визначає точність вимірювання параметрів плазми та стабільність керування магнітними контурами [2]. Випромінювання змінює електричні властивості матеріалів, що призводить до фазових і амплітудних спотворень у довгих лініях та зниження SNR [3].

Метою роботи є розроблення підходів до створення надійних систем передавання даних у радіаційно-навантажених середовищах шляхом удосконалення структури трактів, добору стійких матеріалів і впровадження гібридних технологій із цифровою компенсацією та самодіагностикою.

Результати дослідження

Аналіз сучасних досліджень показує, що традиційні коаксіальні лінії з полімерною ізоляцією (PTFE, FEP) мають обмежену придатність до роботи в умовах інтенсивного іонізуючого випромінювання. При дозах понад 10^4 Gy спостерігається деградація діелектрика, зростання втрат на 15–25 % і поява фазових спотворень, що знижує достовірність переданих сигналів [2].

Мінерально-ізолювані кабелі на основі оксидів магнію (MgO) та алюмінію (Al₂O₃) демонструють суттєво вищу радіаційну стійкість – до 10^7 Gy і робочі температури до 900 °C (табл. 1). Вони зберігають електричні параметри навіть після тривалого опромінення, проте відзначаються високою жорсткістю і складністю монтажу, що обмежує їх застосування у складних конструкціях реакторних діагностичних систем [4].

Таблиця 1. Порівняльні характеристики типів ліній передачі

Тип лінії	Радіаційна стійкість (Gy)	Температура, °C	SNR, dB	Примітка
Коаксіальна (PTFE)	10^4	до 250	45-50	Обмежена стабільність
Мінерально-ізолювана (MgO)	10^7	до 900	60-70	Висока надійність
Оптична	10^5	до 300	80+	Радіаційне затемнення скла
Гібридна (оптика + мідь)	10^6 - 10^7	до 600	70-80	Оптимальне рішення

Оптичні лінії передачі характеризуються високою пропускнуою здатністю (до сотень Гбіт/с), електромагнітною сумісністю та стабільними хвильовими характеристиками. Водночас, під

впливом радіації у скляному волокні виникає ефект радіаційного затемнення, який погіршує прозорість матеріалу та збільшує загасання сигналу при дозах понад 10^5 Gy [1].

Перспективним напрямом розвитку є гібридні тракти передачі (комбінація оптичних і мінерально-ізолюваних елементів), які забезпечують компроміс між гнучкістю конструкції, радіаційною стійкістю та стабільністю параметрів. Такі системи демонструють високу адаптивність до зовнішніх умов і збереження стабільності сигналу при тривалому опроміненні [3].

Висновки

Проведений огляд показав, що забезпечення надійної передачі слабких сигналів у радіаційно-навантажених середовищах можливе за рахунок комплексного підходу, який включає використання радіаційностійких матеріалів (MgO, Al₂O₃, кварцове волокно), впровадження гібридних трактів передачі, що поєднують мінерально-ізолювані та оптичні компоненти, а також застосування цифрових методів компенсації спотворень. Додаткову стабільність забезпечують системи самодіагностики, здатні в реальному часі контролювати параметри лінії та адаптивно компенсувати вплив деградаційних процесів. Запропонований підхід формує основу для створення високонадійних інформаційних систем у термоядерній енергетиці та інших галузях, де наявні умови інтенсивного опромінення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Wang, Y., Li, J., & Zhao, M. Radiation-resistant fiber optic sensors for fusion reactor diagnostics [Електронний ресурс] // *Fusion Engineering and Design*. - 2024. - Vol. 198. - Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0920379624000139> (дата звернення: 21.10.2025). - Назва з екрана.
2. Kozlov, A., & Shurygin, V. Development of radiation-resistant materials for data transmission in fusion facilities [Електронний ресурс] // *Journal of Fusion Energy*. - 2022. - Vol. 41, № 2. - Режим доступу: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10894-022-00334-8> (дата звернення: 21.10.2025). - Назва з екрана.
3. Pezzini, A., Mora, A., & Jackson, D. Advances in radiation-hardened signal processing electronics for plasma diagnostics [Електронний ресурс] // *Frontiers in Physics*. - 2024. - Vol. 12. - Режим доступу: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11125778/> (дата звернення: 23.10.2025).
4. International Science and Technology Center (ISTC). Development of radiation-resistant data transmission systems for nuclear applications [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.istc.int/projects/584> (дата звернення: 26.10.2025).

Кость Павло Ігорович – аспірант, спеціальності G5 Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, e-mail: pavlo.kost.asp.2025@lpnu.ua

Науковий керівник: **Гліненко Лариса Костянтинівна** - кандидат технічних наук, доцент кафедри електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, e-mail: larysa.k.hlinenko@lpnu.ua

MODERN APPROACHES TO CREATING RELIABLE DATA TRANSMISSION SYSTEMS IN RADIATION-LOADED ENVIRONMENTS

Abstract. The paper analyses modern approaches to ensuring stable transmission of weak signals in thermonuclear reactors under the influence of ionising and neutron radiation. The advantages and limitations of coaxial, mineral-insulated, optical and hybrid transmission lines are considered. A concept of hybrid paths combining mineral-insulated and optical elements with digital distortion compensation methods and self-diagnostic systems is proposed.

Keywords: thermonuclear reactor, weak signals, ionising and neutron radiation, radiation-resistant transmission lines, digital distortion compensation, self-diagnostics, signal stability.

Kost Pavlo Ihorovich – postgraduate student, specialising in G5 Electronics, Electronic Communications, Instrument Engineering and Radio Engineering, Lviv Polytechnic National University, Lviv, e-mail: pavlo.kost.asp.2025@lpnu.ua

Scientific supervisor: **Hlinenko Larysa Kostiantynivna** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electronic Means of Information and Computer Technologies, Lviv Polytechnic National University, Lviv, e-mail: larysa.k.hlinenko@lpnu.ua

ОПТИМІЗАЦІЯ ПЕРЕДАЧІ ВІДЕО ВИСОКОЇ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ЧЕРЕЗ КАНАЛИ З ОБМЕЖЕНОЮ ПРОПУСКНОЮ ЗДАТНІСТЮ

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Анотація.

Роботу присвячено проблемі оптимізації передачі відео високої роздільної здатності через канали з обмеженою пропускнуою здатністю. Розглянуто сучасні стандарти стиснення H.264/AVC, H.265/HEVC, VP9 та AV1, які забезпечують ефективне зменшення обсягу даних без суттєвої втрати якості. Описано принципи адаптивного кодування бітрейту (MPEG-DASH), що дозволяють динамічно змінювати параметри потоку залежно від стану мережі. Проаналізовано використання транспортних протоколів RTP, RTCP і QUIC для забезпечення стабільності передачі та мінімізації втрат.

Ключові слова: Відеопередача, H.265, AV1, MPEG-DASH, RTP, QUIC, FEC, оптимізація.

Вступ

Передача відео високої роздільної здатності через канали з обмеженою пропускнуою здатністю є складною інженерною задачею, що потребує поєднання методів стиснення, кодування, буферизації та керування потоком даних. Зі зростанням обсягів відеоконтенту та розповсюдженням сервісів потокової трансляції, відеоконференцій і телеметричних систем актуальним є створення технологій, здатних забезпечити високу якість відтворення при мінімальному навантаженні на мережеві ресурси.

Основний матеріал

Основним напрямом оптимізації є застосування ефективних алгоритмів стиснення, які мінімізують кількість переданих бітів без суттєвої втрати якості. Сучасні стандарти, такі як H.264/AVC, H.265/HEVC, VP9 та AV1, реалізують багаторівневі методи кодування, що базуються на блокових перетвореннях, компенсації руху та міжкадровому передбаченні. У стандарті H.264 використовується технологія Discrete Cosine Transform та motion compensation, які дозволяють ефективно зменшувати надлишковість між сусідніми кадрами. HEVC розширює ці принципи, застосовуючи Quad-Tree Partitioning для гнучкого поділу кадрів на блоки, Sample Adaptive Offset для покращення відновлення пікселів після квантування та Context-Adaptive Binary Arithmetic Coding для зменшення обсягу бітстріму [1].

Формат AV1 представляє подальший розвиток і використовує Constrained Directional Enhancement Filters, Warped Motion Compensation, а також Multi-Symbol Entropy Coding, що підвищує ефективність стиснення до 30 % у порівнянні з HEVC при однаковій якості. Крім того, у VP9 реалізовано Loop Restoration Filters і Adaptive Reference Frames, що забезпечують кращу стійкість при передачі через мережі зі втратами [2]. Такі алгоритми дають змогу передавати відео з роздільною здатністю 4K і вище навіть при пропускну здатності менше 10 Мбіт/с.

Для підвищення ефективності при передачі в реальному часі застосовується адаптивне кодування бітрейту. Цей підхід реалізується, зокрема, у стандартах MPEG Dynamic Adaptive Streaming over HTTP, де відеопотік розділяється на сегменти різної якості, а клієнтський модуль динамічно вибирає оптимальний варіант залежно від поточної швидкості каналу. Алгоритми ABR, такі як Buffer Occupancy-based Lyapunov Algorithm, Festive, Pensieve та Rate-based Adaptation, використовують інформацію про буфер, затримку і доступну пропускну здатність для прийняття оптимального рішення про зміну якості потоку.

Важливим компонентом системи оптимізації є транспортний рівень. Для забезпечення стабільності передачі та контролю якості обслуговування використовуються протоколи RTP/RTCP та QUIC, які дозволяють адаптивно керувати чергами, зменшувати затримки і втрати

пакетів. Використання Forward Error Correction підвищує стійкість до втрат даних, тоді як Automatic Repeat Request забезпечує повторну передачу пошкоджених сегментів без переривання потоку. У системах із високою варіативністю пропускної здатності застосовується rate control – алгоритми керування швидкістю передачі, зокрема Leaky Bucket, Token Bucket, Dynamic Bitrate Allocation, які дозволяють підтримувати стабільну якість відео при змінних умовах мережі [3].

У процесі стиснення важливу роль відіграють алгоритми компенсації руху, такі як Hierarchical Motion Estimation та Sub-Pixel Motion Refinement, що зменшують часову надлишковість між кадрами. Для збереження високої якості зображення при агресивному стисненні застосовуються методи Perceptual Video Coding, які враховують особливості зору людини, зокрема чутливість до контрасту, кольору та руху [4].

Висновки

Оптимізація передачі відео високої роздільної здатності через канали з обмеженою пропускною здатністю базується на комплексному поєднанні технологій стиснення, адаптивного кодування та транспортного керування. Використання алгоритмів HEVC, AV1 та MPEG-DASH, разом із методами компенсації руху, адаптивного бітрейту, корекції помилок і керування чергами, дозволяє значно підвищити ефективність використання мережевих ресурсів і забезпечити високу якість відео при обмежених параметрах каналу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Goudarzi, P.; Tadayon, M.; Mousavinejad, M. An Optimization Theoretic Framework for Video Transmission with Minimal Total Distortion over Wireless Networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2009, 598063. doi: 10.1155/2009/598063.
2. Correa, G.; Assuncao, P.; Agostini, L.; Da Silva Cruz, L.A. Performance and Computational Complexity Assessment of High-Efficiency Video Encoders. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 22(12), 2012, pp. 1899–1909. doi: 10.1109/TCSVT.2012.2223411.
3. Hassan, M.M.; Farooq, U. Adaptive and Ubiquitous Video Streaming over Wireless Mesh Networks. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*, 28, 2016, pp. 432–446. doi: 10.1016/j.jksuci.2015.11.00.
4. Bin-Salem, A.; Wan, T.C. Survey of Cross-Layer Designs for Video Transmission Over Wireless Networks. *IETE Technical Review*, 29(3), 2012, 229. doi: 10.4103/0256-4602.98865.

Панченко Володимир Іванович – старший викладач кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, НТУ «ХПІ», Харків, Україна, e-mail: Volodymyr.Panchenko@khi.edu.ua

Ткаченко Павло Дмитрович – магістрант кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, НТУ «ХПІ», Харків, Україна

Цяпа Григорій Павлович – магістрант кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, НТУ «ХПІ», Харків, Україна

OPTIMIZATION OF HIGH-RESOLUTION VIDEO TRANSMISSION OVER BANDWIDTH-LIMITED CHANNELS

Abstract.

The work is devoted to the problem of optimizing the transmission of high-resolution video over channels with limited bandwidth. Modern compression standards H.264/AVC, H.265/HEVC, VP9 and AV1 are considered, which provide effective reduction of data volume without significant loss of quality. The principles of adaptive bitrate coding (MPEG-DASH) are described, which allow dynamically changing the stream parameters depending on the network state. The use of transport protocols RTP, RTCP and QUIC to ensure transmission stability and minimize losses is analyzed.

Key words: Video transmission, H.265, AV1, MPEG-DASH, RTP, QUIC, FEC, optimization.

Panchenko V. – Senior Lecturer, Department of Computer Engineering and Programming, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine, email: Volodymyr.Panchenko@khi.edu.ua

Tkachenko P. – Master's Student, Department of Computer Engineering and Programming, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine

Tsiapa H. – Master's Student, Department of Computer Engineering and Programming, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine

ВИСОКОПРОДУКТИВНИЙ МЕТОД СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ

¹ Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі представлено високопродуктивний метод цифрового спектрального аналізу широкосмугових сигналів, який базується на процедурі розділення масиву широкосмугового сигналу на ряд підпоследовностей. Сформовані підпоследовності обробляються згідно алгоритму швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). У рамках запропонованого методу отримано вирази для розрахунку параметрів структури ШПФ. Аналіз ефективності запропонованого методу підтвердив, що вдається підвищити продуктивність спектрального аналізу сигналів у 2,1÷4,7 разів залежно від об'єму аналізованої вибірки сигналу.

Ключові слова: швидке перетворення Фур'є, широкосмугові сигнали, спектр аналіз сигналів, роздільна здатність

Вступ

Існуючі засоби спектрального аналізу широкосмугових сигналів базуються на використанні методів цифрового оброблення сигналів (ЦОС), а саме – алгоритмів швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) [1]. Спектральний аналіз широкосмугових сигналів на базі алгоритмів ШПФ має ряд особливостей, що пов'язані з необхідною роздільною здатністю та високою продуктивністю оброблення [2]. При цьому безпосереднє застосування алгоритмів ШПФ для реалізації цих суперечливих вимог є складною науково-технічною задачею. Разом з тим, при розв'язанні задач, пов'язаних зі спектральним аналізом широкосмугових сигналів в інфокомунікаційних системах, продуктивність існуючих методів і засобів ЦОС виявляється недостатньою [2].

Метою роботи є підвищення продуктивності спектрального аналізу широкосмугових сигналів за рахунок розбиття реалізації сигналу на ряд підпоследовностей з подальшим їх обробленням у частотній області.

Результати дослідження

Для усунення недоліків класичного методу спектрального аналізу на базі ШПФ у роботі пропонується досліджувану реалізацію широкосмугового сигналу розділити на ряд підпоследовностей. Для кожної з цих підпоследовностей необхідно задати параметри ШПФ.

Виконаємо оцінку реального значення коефіцієнта перекриття k_r для реалізації ШПФ підпоследовності обсягом M . У високочастотній частині спектра досліджуваного сигналу значення k_r обмежено відносною шириною частотної смуги фільтра нижніх частот $k_B = \frac{f_S}{f_H}$, що усуває ефект «накладання спектрів». Звідси $f_S = k_B \cdot f_H$. У низькочастотній частині спектра коефіцієнт k_B обмежено допустимим значенням $\beta_{\max}$

$$f_L = \frac{f_S}{N \cdot \beta_{\max}}. \quad (1)$$

З урахуванням (1) отримаємо

$$k_r = \frac{N \cdot \beta_{\max}}{k_B}. \quad (2)$$

Нехай частотний діапазон широкосмугового сигналу розділено на m перекривних піддіапазонів з коефіцієнтом перекриття $k_i = \frac{f_{H_i}}{f_{L_i}}$. Тоді для i -піддіапазону маємо частотне розділення

$$\Delta f_i = \frac{f_{S_i}}{M_i} = f_{L_i} \cdot \beta_{\max_i}. \quad (3)$$

З виразу (3) видно, що при незмінному значенні $\beta_{\max_i}$ зменшення f_{L_i} призводить до необхідності зниження частоти дискретизації f_{S_i} або пропорційному збільшенню обсягу M_i . При переході до наступного піддіапазону згідно (3) маємо: $\Delta f_{i+1} = f_{L_{(i+1)}} \cdot \beta_{\max_{(i+1)}}$.

Звідси отримаємо

$$\frac{\Delta f_{i+1}}{\Delta f_i} = \frac{f_{L_{(i+1)}}}{f_{L_i}} \cdot \frac{\beta_{\max_{(i+1)}}}{\beta_{\max_i}}. \quad (4)$$

З виразу (4) отримаємо співвідношення між частотами дискретизації сусідніх піддіапазонів:

$$\frac{f_{S_{(i+1)}}}{f_{S_i}} = k_i \frac{\beta_{\max_{(i+1)}}}{\beta_{\max_i}} \cdot \frac{M_{i+1}}{M_i}. \quad (5)$$

Співвідношення (5) дає змогу оцінити для кожної підпоследовності, отриманої з масиву вибірок досліджуваного широкосмугового сигналу, основні параметри структури ШПФ.

Висновки

У роботі представлено метод спектрального аналізу широкосмугових сигналів, який базується на процедурі розділення досліджуваного сигналу на ряд підпоследовностей. Аналіз ефективності запропонованого методу підтвердив, що вдається підвищити продуктивність спектрального аналізу широкосмугових сигналів у 2,1÷4,7 разів залежно від об'єму аналізованої вибірки. Запропонований метод можна використовувати в інфокомунікаційних системах для спектрального аналізу широкосмугових сигналів у режимі реального масштабу часу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бортник Г. Г., Васильківський М. В., Кичак В. М. Методи та засоби первинного цифрового оброблення радіосигналів : монографія. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 168 с.
2. Бортник Г. Г., Васильківський М. В., Кичак В. М. Методи та засоби цифрового оброблення високочастотних сигналів для систем безпеки та моніторингу : монографія. – Вінниця : ВНТУ, 2020. – 126 с.

Бортник Геннадій Григорович – канд. техн. наук, професор кафедри інфокомунікаційних систем і технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: bgen88@gmail.com

Бортник Олександр Геннадійович – аспірант кафедри інфокомунікаційних систем і технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: alex.bortnik.it@gmail.com

Чубатюк Сергій Васильович – аспірант кафедри інфокомунікаційних систем і технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: ppifoxtrout@gmail.com

HIGH-PERFORMANCE METHOD FOR SPECTRAL ANALYSIS OF BROADBAND SIGNALS

Abstract

The paper presents a high-performance method for digital spectral analysis of broadband signals, which is based on the procedure of dividing a broadband signal array into a number of subsequences. The formed subsequences are processed according to the algorithm of the fast Fourier transform (FFT). Within the framework of the proposed method, expressions for calculating the parameters of the FFT structure are obtained. Analysis of the effectiveness of the proposed method confirmed that it is possible to increase the productivity of spectral analysis of signals by 2.1÷4.7 times depending on the volume of the analyzed signal sample.

Keywords: fast Fourier transform, broadband signals, spectrum signal analysis, resolution.

Bortnyk Gennadiy Grygorovych – Ph.D., Professor of the Department of Infocommunication Systems and Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, bgen88@gmail.com

Bortnyk Oleksandr Gennadiiovych – postgraduate of the Department of Infocommunication Systems and Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, alex.bortnik.it@gmail.com

Chubatiuk Serhii Vasylovych – postgraduate of the Department of Infocommunication Systems and Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, ppifoxtrout@gmail.com

АНАЛОГО-ЦИФРОВИЙ ТРАКТ ЗАСОБІВ ЦИФРОВОГО ОБРОБЛЕННЯ СИГНАЛІВ В ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

¹ Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі представлено метод розширення динамічного діапазону аналого-цифрових трактів засобів цифрового оброблення сигналів за рахунок цифрової фільтрації вихідних сигналів аналого-цифрового перетворювача. У рамках запропонованого методу отримано вирази для оцінювання нелінійних спотворень сигналів в аналого-цифровому тракті. Аналіз ефективності запропонованого методу підтвердив, що вдається розширити динамічний діапазон аналого-цифрового тракту на 8 – 10 дБ порівняно з існуючим методом аналогової смугової фільтрації вхідного сигналу.

Ключові слова: аналого-цифровий тракт, аналого-цифровий перетворювач, смугова фільтрація, цифрова фільтрація, динамічний діапазон

Вступ

Аналого-цифровий тракт (АЦТ) є одним з найважливіших складових сучасних і перспективних засобів цифрового оброблення сигналів (ЦОС) в інфокомунікаційних системах та в значній мірі визначає їх граничні можливості за швидкістю і за динамічним діапазоном [1]. Тому основну увагу розробники інфокомунікаційних систем зосереджують на розширенні динамічного діапазону АЦТ. Однак, використання відомих методів у покращенні характеристик АЦТ засобів ЦОС не дозволяють реалізувати потенційно досяжний динамічний діапазон [2]. Таким, чином актуальною задачею є розробка АЦТ з розширеним динамічним діапазоном при збереженні потенційно високої швидкодії засобів ЦОС.

Метою роботи є розширення динамічного діапазону АЦТ засобів оброблення сигналів за рахунок цифрової фільтрації вихідних сигналів аналого-цифрового перетворювача.

Результати дослідження

Оброблення сигналів в ідеальній аналоговій частині АЦТ, що не вносить власних шумів і спотворень, може змінити динамічний діапазон за рахунок смугової фільтрації. Така процедура використовується для забезпечення вимог теореми Котельнікова-Шеннона при дискретизації сигналів в аналого-цифровому перетворювачі (АЦП).

Смугова фільтрація повинна виконуватись за умови відсутності спотворень оброблюваних сигналів. Але смуга пропускання цього фільтра Δf_{bf} може бути вужчою, ніж частотна смуга вхідного РС Δf_{in} . Коефіцієнт фільтрації для ідеальної аналогової частини АЦТ дорівнює

$$Q_{iap} = 10 \log \frac{\Delta f_{in}}{\Delta f_{bf}}. \quad (1)$$

Цей вираз демонструє виграв у динамічному діапазоні для аналогової частини АЦТ, що не вносить власних спотворень і шумів.

Вираз для визначення коефіцієнта фільтрації цифрової частини має вигляд аналогічний виразу (1) і з урахуванням втрат α_d при цифровому обробленні сигналів набуде такого вигляду:

$$Q_{rdp} = 10 \log \frac{\Delta f_{bf}}{\Delta f_{out}} - \alpha_d. \quad (2)$$

Наявність втрат α_d обумовлено таким чинником, як вагове зважування (при цьому значення втрат залежать від типу застосованої віконної функції).

Структура АЦТ, що функціонує на базі запропонованого методу, представлена на рис. 1.

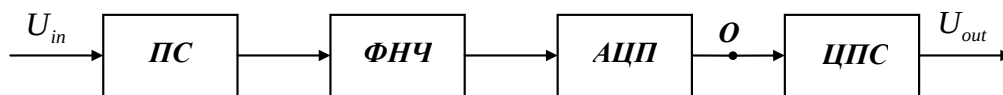


Рис. 1. Структура АЦТ з цифровою фільтрацією вихідного сигналу

Аналогова частина АЦТ містить послідовно ввімкнені каскади підсилення (ПС) та фільтра нижніх частот (ФНЧ). Вихідний сигнал АЦП обробляється у цифровому процесорі сигналів (ЦПС) за алгоритмом цифрової фільтрації.

При оцінюванні ефективності методу вважаємо, що динамічний діапазон вхідної аналогової частини АЦТ ширший, ніж динамічний діапазон аналого-цифрового перетворювача. Динамічний діапазон АЦП у робочій смузі частот дорівнює задекларованому у паспортних даних значенню D_{ADC} . Динамічний діапазон на виході АЦТ ширший динамічного діапазону в точці O на значення коефіцієнта фільтрації цифрової частини:

$$D_{ADT_{df}} = D_{ADC} + 10 \lg \frac{f_s}{2(c^2 + 1)\Delta f_{out}} - \alpha_d. \quad (3)$$

Таким чином, запропонований метод дає можливість суттєво розширити динамічний діапазон АЦТ засобів ЦОС та забезпечити функціонування інфокомунікаційних систем з широким класом сигналів.

Висновки

У роботі представлено метод розширення динамічного діапазону АЦТ засобів ЦОС, який базується на процедурі цифрової фільтрації вихідного сигналу АЦП. Аналіз ефективності запропонованого методу підтвердив, що завдяки розробленому методу вдається розширити динамічний діапазон АЦТ на 8 – 10 дБ порівняно з існуючим методом аналогової смугової фільтрації вхідного сигналу. Запропонований метод можна використовувати в інфокомунікаційних системах для ЦОС у режимі реального масштабу часу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бортник Г. Г., Кичак В. М., Стальченко О. В. Аналого-цифрові тракти комп'ютерних систем з цифровим обробленням високочастотних сигналів : монографія. – Вінниця: ВНТУ, 2016. – 140 с.
2. Бортник Г.Г., Бортник С.Г., Кичак В. М. Методи та засоби аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів : монографія. – Вінниця: ВНТУ, 2013. – 128с.

Бортник Геннадій Григорович – канд. техн. наук, професор кафедри інфокомунікаційних систем і технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: bgen88@gmail.com

Бортник Сергій Геннадійович – канд. техн. наук, доцент кафедри інфокомунікаційних систем і технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: sbortnyk@gmail.com

ANALOG-DIGITAL PATH OF DIGITAL SIGNAL PROCESSING DEVICES IN INFOCOMMUNICATION SYSTEMS

Abstract

The paper presents a method for expanding the dynamic range of analog-digital paths of digital signal processing devices by digital filtering of the output signals of the analog-digital converter. Within the framework of the proposed method, expressions for evaluating nonlinear signal distortions in the analog-digital path are obtained. Analysis of the effectiveness of the proposed method confirmed that it is possible to expand the dynamic range of the analog-digital path by 8-10 dB compared to the existing method of analog bandpass filtering of the input signal.

Keywords: analog-to-digital path, analog-to-digital converter, bandpass filtering, digital filtering, dynamic range.

Bortnyk Gennadiy Grygorovych – Ph.D., Professor of the Department of Infocommunication Systems and Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, bgen88@gmail.com

Bortnyk Serhii Gennadiiovych – Ph.D., docent of the Department of Infocommunication Systems and Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: sbortnyk@gmail.com

ОПТИМІЗАЦІЯ ДОСТУПУ У ШИРОКОСМУГОВИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ

¹ Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглянуто підходи до оптимізації архітектури доступу в широкосмугових телекомунікаційних мережах нового покоління. Проаналізовано еволюцію радіомережевого доступу (RAN) у напрямі віртуалізації, відкритості та дезагрегації функцій, що забезпечує гнучкий розподіл навантаження між центральними (CU) та розподіленими (DU) блоками. Проведено порівняльний аналіз варіантів функціонального поділу, визначених стандартами 3GPP (Options 2, 6, 7, 8), з урахуванням вимог до пропускної здатності, затримки та масштабованості мережі. Встановлено, що оптимізація RAN на основі раціонального вибору точки функціонального розподілу сприяє підвищенню ефективності використання ресурсів, зниженню енергоспоживання та забезпеченню високої якості користувацького досвіду. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні архітектур 5G/6G-мереж, орієнтованих на інтеграцію інтелектуальних технологій, хмарних обчислень та низьколатентного зв'язку.

Ключові слова: широкосмугова мережа, радіомережевий доступ (RAN), функціональний поділ, дезагрегація, затримка, ефективність.

Abstract

The paper examines approaches to optimizing the access architecture in next-generation broadband telecommunication networks. The evolution of the radio access network (RAN) is analyzed in the context of virtualization, openness, and functional disaggregation, enabling flexible load distribution between the Central Unit (CU) and Distributed Unit (DU). A comparative analysis of functional split options defined by 3GPP standards (Options 2, 6, 7, and 8) is presented, taking into account network capacity, latency, and scalability requirements. It is established that RAN optimization based on a rational choice of the functional split point contributes to improved resource utilization efficiency, reduced energy consumption, and enhanced quality of user experience. The obtained results can be applied in the design of 5G/6G network architectures focused on the integration of intelligent technologies, cloud computing, and low-latency communication.

Keywords: broadband network, radio access network (RAN), functional split, disaggregation, latency, efficiency.

Вступ

Стрімкий розвиток цифрової економіки, індустрії 4.0, інтелектуальних транспортних систем, телемедицини та Інтернету речей (IoT) зумовлює необхідність створення нових телекомунікаційних архітектур, здатних забезпечити надвисокі швидкості передавання даних, мінімальні затримки та масове підключення пристроїв. Сучасні широкосмугові бездротові мережі виступають не лише засобом передавання інформації, а й базовою платформою цифрової взаємодії між користувачем, машинами та навколишнім середовищем [1].

Перехід від четвертого до п'ятого покоління зв'язку (4G → 5G) став визначальним етапом еволюції мобільних систем, спрямованим на подолання обмежень попередніх технологій та формування основ для майбутніх мереж шостого покоління (6G). Архітектура 5G відзначається відкритістю, віртуалізацією функцій, гнучкістю сценаріїв доступу та інтеграцією передових технологій — таких як масивні антенні решітки (massive MIMO), обчислення на периферії мережі (MEC), віртуалізація функцій мережі (NFV) та сегментування мережі (network slicing) [2].

Подальший розвиток телекомунікаційних систем у напрямку 6G, що нині перебуває на етапі активних досліджень і стандартизації, орієнтований на глибоку інтеграцію комунікацій, штучного інтелекту (AI), квантових технологій, хмарних і туманних обчислень (cloud/fog

computing). Її концепція передбачає створення єдиної інтелектуальної екосистеми з конвергенцією наземних, повітряних і космічних мереж, що забезпечують самоорганізацію, адаптивне управління ресурсами та мінімальні затримки передавання даних [3].

У цьому контексті ключовим напрямом є оптимізація архітектури радіомережевого доступу (RAN), яка забезпечує ефективну взаємодію між користувацьким обладнанням та ядром мережі. Еволюція RAN передбачає перехід до гнучких моделей доступу, поєднання централізованих і розподілених обчислювальних ресурсів, а також підвищення рівня масштабованості, енергоефективності та стійкості до навантажень. Особливу увагу приділено аналізу варіантів функціонального поділу, визначених стандартами 3GPP, та оцінці їх ефективності з погляду сучасних вимог до продуктивності й затримки у широкосмугових телекомунікаційних мережах нового покоління [4].

Результати дослідження

У ході дослідження проведено системний аналіз еволюції бездротових технологій нового покоління, що забезпечують основу для розвитку мереж 5G та 6G. Визначено ключові тенденції у формуванні архітектури мережевого доступу, спрямовані на підвищення ефективності, пропускної здатності та гнучкості інфраструктури мобільних систем [5].

Показано, що технологія фіксованого бездротового доступу (FWA) на основі 5G NR є перспективним рішенням для усунення цифрової нерівності, забезпечуючи гігабітні швидкості у поєднанні з низькою затримкою. Використання mmWave-спектра, масивних антенних систем (massive MIMO) та формування променя (beamforming) дозволяє досягати продуктивності, порівнянної з волоконно-оптичними мережами, забезпечуючи високу якість користувацького досвіду та розширення сценаріїв застосування — від потокового мультимедіа до промислових IoT-рішень [6].

Доведено, що архітектура радіомережевого доступу (RAN) зазнала суттєвих змін у напрямі віртуалізації, відкритості та дезагрегації функцій, що забезпечує гнучкий розподіл навантаження між центральними (CU) та дистрибутивними (DU) блоками. Проведено порівняльний аналіз варіантів функціонального поділу, визначених у специфікаціях 3GPP, зокрема Options 2, 6, 7 та 8 [7]. Результати показали, що:

Option 2 (PDCP/RLC Split) забезпечує оптимальний баланс між централізацією обчислень і затримками передачі, підтримує Dual Connectivity та ефективну інтеграцію між 4G і 5G;

Option 6 зменшує вимоги до пропускної здатності фронтхолу, залишаючи централізованим управління плануванням радіоресурсів;

Option 7 (intra-PHY) забезпечує високий рівень спільного використання ресурсів і координації осередків, проте потребує підвищених вимог до затримки й пропускної здатності каналу;

Option 8 є найбільш централізованим, проте вимагає надвисоких характеристик фронтхолу, що обмежує його практичне застосування у великих мережах.

Установлено, що ефективність архітектури RAN визначається оптимальним вибором точки функціонального розподілу між CU і DU з урахуванням типу сервісу, топології мережі та вимог до затримки. Впровадження HLS (High Layer Split)-підходу забезпечує кращу масштабованість, зниження енергоспоживання та підвищення надійності роботи системи, тоді як LLS (Low Layer Split)-архітектури доцільні у сценаріях із високими вимогами до координації масивних антен [1-4].

Отримані результати підтверджують, що розвиток архітектури 5G створює фундамент для побудови інтелектуальних мереж шостого покоління (6G), які орієнтовані на глибоку інтеграцію з технологіями штучного інтелекту, хмарних обчислень, терагерцового спектра та фотонних рішень. Такі мережі матимуть здатність до самоорганізації, адаптивного розподілу ресурсів і забезпечення ультранизької затримки зв'язку у масштабі глобальної цифрової інфраструктури.

Висновки

У результаті проведеного дослідження встановлено, що оптимізація доступу у широкосмугових телекомунікаційних мережах є ключовим чинником підвищення ефективності функціонування сучасних систем зв'язку. Технологія 5G NR створює фундамент для реалізації гнучких і масштабованих архітектур, які забезпечують підтримку різномірних сервісів із різними вимо-

гами до швидкості, затримки та надійності передавання даних.

Проаналізовано особливості функціонального розподілу радіомережевого доступу (RAN) між Central Unit (CU) та Distributed Unit (DU), що дозволяє здійснювати дезагрегацію оброблення радіосигналів і оптимізувати використання мережевих ресурсів. Визначено, що високорівневі варіанти поділу (HLS) є придатними для сценаріїв із обмеженими вимогами до затримки, тоді як низькорівневі варіанти (LLS) забезпечують кращу координацію радіоресурсів і підвищену ефективність у щільних мережах, але потребують значно більшої пропускної здатності та стабільності транспортної інфраструктури.

З'ясовано, що вибір оптимального варіанта функціонального поділу має базуватись на комплексному врахуванні технічних (тип мережі, топологія, параметри затримки) та економічних (вартість інфраструктури, обсяг наданих послуг) факторів. Рациональне поєднання централізованого та розподіленого підходів дозволяє забезпечити баланс між продуктивністю, енергоефективністю та витратами на розгортання мережі.

Таким чином, удосконалення архітектури доступу у широкосмугових телекомунікаційних мережах на основі дезагрегації функцій RAN та оптимального вибору варіанту поділу є стратегічним напрямом розвитку мобільних систем зв'язку п'ятого та шостого покоління, орієнтованих на створення інтелектуальних, гнучких і самоорганізованих мереж майбутнього.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. N. Saba, J. Salo, K. Ruttik, R. Jäntti, Using existing base station sites for 5G millimeter-wave fixed wireless access: antenna height and coverage analysis, in IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), vol. 2024 (2024), pp. 1–6
2. P. Skokowski, K. Malon, M. Kryk, K. MaÅlanka, J.M. Kelner, P. Rajchowski, J. Magiera, Practical trial for low-energy effective jamming on private networks with 5G-NR and NB-IoT radio interfaces. IEEE Access 12, 51 523–51 535 (2024)
3. M. Klinkowski, Optimized planning of DU/CU placement and flow routing in 5G packet Xhaul networks. IEEE Trans. Netw. Serv. Manag. 21(1), 232–248 (2024)
4. P. Baguer, G.M. Yilma, E. Municio, G. Garcia-Aviles, A. Garcia-Saavedra, M. Liebsch, X. Costa-Pérez, Attacking O-RAN interfaces: threat modeling, analysis and practical experimentation. IEEE Open J. Commun. Soc. 5, 4559–4577 (2024)
5. Васильківський М., Коломієць А., Будах М., Прикмета А., Олійник А. Технологічні аспекти впровадження програмно-керованих мереж 5G та 6G. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. 2024. Вип. № 56. С. 335-344.
6. Vasylykivskiy M. V., Polishchuk L. K., Amirgaliyeva S., Iskakova A., Kaczmarek C. Optimal design of linear paths for flexible optical networks. Proc. SPIE 12985 «Optical Fibers and Their Applications 2023», 20 December 2023. 2023. 1298502. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.3022237>.
7. Васильківський М. В. Керування доступом до інформаційних даних в інтелектуальних інфокомунікаційних мережах [Текст] / М. В. Васильківський, Д. В. Нікітович, О. Болдирева // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2022. – № 4. – С. 5-17.

Васильківський Микола Володимирович — кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інфокомунікаційних систем і технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: mvasylkivskiy@gmail.com

Олійник Андрій Олегович — аспірант групи 172-22а, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: w0lfend00@gmail.com

Коваль Максим Петрович — студент групи ТСМ-24м, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: maks.koval95@icloud.com

Vasylykivskiy Mykola V. — candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Information Communication Systems and Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: mvasylkivskiy@gmail.com

Oliinyk Andrii O. — graduate student of group 172-22a, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: w0lfend00@gmail.com

Koval Maksym P. - student of group TSN-24m, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: maks.koval95@icloud.com

ОПТИМІЗАЦІЯ МОБІЛЬНОСТІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

¹ Вінницький національний технічний університет

Анотація

Доповідь присвячена дослідженню підходів до оптимізації мобільності та підвищення безпеки телекомунікаційних мереж транспортних систем на основі методів штучного інтелекту. Розглянуто архітектуру, сервіси та особливості функціонування мереж транспортних засобів типу VANET як складової інтелектуальних транспортних систем (ITS). Проаналізовано основні вимоги до таких мереж, зокрема мінімальну затримку передавання даних, високу надійність, масштабованість і стійкість до загроз безпеці. Обґрунтовано доцільність застосування методів глибинного навчання (DNN, CNN, RNN, DBN) для формування довіри, виявлення аномалій і прогнозування поведінки вузлів у мережах VANET. Запропоновано архітектурний підхід до інтеграції моделей штучного інтелекту у механізми управління мобільністю та безпекою. Отримані результати свідчать про перспективність інтеграції інтелектуальних алгоритмів у телекомунікаційні мережі транспортних систем для побудови надійних і безпечних комунікацій у «розумних містах».

Ключові слова: штучний інтелект, глибинне навчання, VANET, інтелектуальна транспортна система, оптимізація мобільності, довіра в мережах, безпека телекомунікацій, V2X-комунікації.

Abstract

The article is devoted to the study of approaches to optimizing mobility and enhancing the security of telecommunication networks in transportation systems based on artificial intelligence methods. The architecture, services, and operational features of vehicular ad hoc networks (VANETs) as a component of intelligent transportation systems (ITS) are considered. The main requirements for such networks are analyzed, including minimal data transmission delay, high reliability, scalability, and resilience to security threats. The feasibility of applying deep learning methods (DNN, CNN, RNN, DBN) is substantiated for trust management, anomaly detection, and behavior prediction of nodes in VANETs. An architectural approach to integrating artificial intelligence models into mobility and security management mechanisms is proposed. The obtained results demonstrate the potential of integrating intelligent algorithms into telecommunication networks of transportation systems to establish reliable and secure communications in smart cities.

Keywords: artificial intelligence, deep learning, VANET, intelligent transportation system, mobility optimization, network trust, telecommunication security, V2X communications.

Вступ

Стрімкий розвиток урбанізації та зростання кількості транспортних засобів призводить до перевантаження дорожньої інфраструктури, виникнення заторів та підвищення ризику дорожньо-транспортних пригод. Ці чинники негативно впливають на ефективність транспортних потоків і безпеку руху, особливо у великих мегаполісах та за несприятливих погодних умов. Для подолання зазначених проблем активно впроваджуються інтелектуальні транспортні системи (Intelligent Transportation Systems, ITS), які поєднують сенсорні технології, бездротові комунікації та методи штучного інтелекту для моніторингу, аналізу та управління дорожнім рухом у реальному часі [1].

В основі ITS лежать мережі VANET (Vehicular Ad-hoc Networks) — різновид мобільних самоорганізованих мереж (MANET), що забезпечують динамічний обмін даними між транспортними засобами (V2V), інфраструктурою (V2I), пішоходами (V2P) та іншими елементами (V2X). Такі мережі підтримують як сервіси безпеки (попередження про аварії, екстрене гальмування, моніторинг дорожніх умов), так і інформаційно-навігаційні сервіси. Однак висока мобільність

вузлів, динамічна топологія та жорсткі вимоги до затримки передачі даних створюють суттєві виклики для забезпечення стабільності та безпеки комунікацій у VANET.

Традиційні методи управління трафіком та довірою у таких мережах виявляються малоефективними за умов швидкої зміни середовища. У цьому контексті методи глибинного навчання та штучного інтелекту відкривають нові можливості для оптимізації мобільності телекомунікаційних мереж, прогнозування поведінки вузлів, виявлення аномалій і загроз, а також динамічного маршрутизаційного управління. Застосування згорткових (CNN), рекурентних (RNN, LSTM) та глибинних нейронних мереж (DNN, DBN) дозволяє підвищити точність класифікації, адаптивність та ефективність систем управління довірою в мережах ITS [2].

Таким чином, актуальність дослідження зумовлена потребою у створенні інтелектуальних підходів до оптимізації мобільності та безпеки телекомунікаційних мереж у сучасних транспортних системах. Використання методів штучного інтелекту сприятиме підвищенню надійності комунікацій, ефективності управління транспортними потоками та розвитку інфраструктури «розумних міст».

Результати дослідження

У результаті проведеного дослідження проаналізовано архітектуру, сервіси та засоби забезпечення безпеки у мережах транспортних засобів (VANET) як складовій інтелектуальних транспортних систем (ITS). Було визначено ключові структурні компоненти VANET — бортові вузли (OBU), прикладні модулі (AU) та дорожні інфраструктурні вузли (RSU), які забезпечують реалізацію комунікаційних сценаріїв типу V2V, V2I, V2P та V2X. Досліджено середовище обміну даними у V2X, що включає як короткодіапазонні технології DSRC, так і стільникові рішення C-V2X на базі LTE та 5G [3].

Встановлено, що основними вимогами до VANET є мінімальна затримка передавання (менше 100 мс), висока надійність, масштабованість та захищеність комунікацій. Розроблено узагальнену модель безпечної взаємодії транспортних вузлів, яка поєднує криптографічні механізми автентифікації з адаптивними схемами довіри, що дозволяє виявляти як зовнішні, так і внутрішні загрози мережевій безпеці.

Проведено порівняльний аналіз характеристик VANET і MANET, у результаті якого встановлено, що мережі VANET відрізняються високою мобільністю вузлів, частими змінами топології, відсутністю енергетичних обмежень та обмеженою траєкторією руху. Ці особливості визначають необхідність розроблення спеціалізованих алгоритмів маршрутизації та довіри, здатних до самоналаштування в реальному часі [4].

На основі огляду сучасних досліджень визначено доцільність використання методів глибинного навчання (Deep Learning) у задачах формування довіри та виявлення аномалій у VANET. Запропоновано архітектурний підхід, який інтегрує глибинні нейронні мережі (DNN, CNN, RNN, DBN) для динамічної оцінки довіри між вузлами. Експериментальне моделювання у середовищі міської мобільності (SUMO) із застосуванням даних OpenStreetMap показало, що моделі на основі DNN забезпечують підвищення точності класифікації довірених вузлів до 96–98%, зменшення кількості хибних попереджень до 3–5%, а час реакції системи не перевищує 80 мс при середній щільності транспортних вузлів [5].

Отримані результати підтверджують ефективність інтеграції методів глибинного навчання у механізми управління довірою та безпеки VANET. Застосування таких моделей дозволяє покращити стійкість мережі до атак типу «Sybil» та «Black Hole», а також забезпечити стабільність і достовірність передавання критично важливих повідомлень у режимі реального часу [1, 2].

Таким чином, результати дослідження демонструють перспективність поєднання інтелектуальних алгоритмів обробки даних з адаптивними схемами довіри в архітектурі VANET для побудови надійних і безпечних інтелектуальних транспортних систем майбутнього.

Висновки

У результаті проведеного дослідження встановлено, що мережі VANET є фундаментальною складовою інтелектуальних транспортних систем, забезпечуючи високошвидкісний та надійний обмін даними між транспортними засобами, дорожньою інфраструктурою та іншими учасниками руху через комунікаційні моделі V2X (V2V, V2I, V2P, V2N, V2G). Ключові компоненти

архітектури VANET — OBU, AU та RSU — формують основу для реалізації як сервісів безпеки (попередження про ДТП, екстрене гальмування, оповіщення про наближення спецтранспорту), так і інформаційно-навігаційних та розважальних сервісів.

Доведено, що традиційні алгоритми маршрутизації, запозичені з MANET, є малоефективними в умовах високої мобільності вузлів, динамічної топології та обмежень часу затримки, що зумовлює потребу у використанні спеціалізованих підходів до оптимізації комунікацій у VANET.

Застосування методів глибинного навчання (DNN, DBN, RNN, CNN, DMN) відкриває можливість для побудови адаптивних систем управління довірою, виявлення аномальної поведінки вузлів та прогнозування мережових подій у реальному часі. Такі методи підвищують точність класифікації, знижують ризики внутрішніх атак і забезпечують стабільність передавання критично важливих повідомлень.

Отримані результати підтверджують, що використання штучного інтелекту та глибинного навчання є перспективним напрямом для оптимізації мобільності та безпеки телекомунікаційних мереж у транспортних системах нового покоління. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення інтегрованих AI-моделей для динамічного маршрутизаційного управління та прогнозування стану мережі VANET в умовах інтенсивного трафіку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Cheong, C., Song, Y., Cao, Y., Zhang, Y., Cai, B., Ni, Q.: Multidimensional trust evidence fusion and path-backtracking mechanism for trust management in vanets. IEEE Internet Things J. 11 (2024). <https://doi.org/10.1109/JIOT.2024.3363755>

2. Ullah, F., Salam, A., Amin, F., Khan, I.A., Ahmed, J., Zaib, S.A., Choi, G.S.: Deep trust: a novel framework for dynamic trust and reputation management in the internet of things (IoT)- based networks. IEEE Access 12, 87407–87419 (2024). <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3409273>

3. Васильківський, М. В., Грабчак, Н. В., Бриль, Д. Р., & Олійник, А. О. (2025). Сценарії застосування технологій 6G-IoT в інфокомунікаційних мережах нового покоління. КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ: ОСВІТА, НАУКА, ВИРОБНИЦТВО, (60), 358-368. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-60-38>

4. Оптимізація інтелектуальних телекомунікаційних мереж [Текст] / М. В. Васильківський, А. В. Прикмета, А. Олійник, Д. В. Нікітович // Вісник Хмельницького національного університету. Серія «Технічні науки». – 2023. – № 1. (317). – С. 33–41.

5. Васильківський М. Інтелектуальний радіоінтерфейс з підтримкою штучного інтелекту [Текст] / М. В. Васильківський, Г. Варганюк, О. Болдирева // Вісник Хмельницького національного університету. Серія «Технічні науки». – 2023. – № 1. (317). – С. 26–32.

Васильківський Микола Володимирович — кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інфокомунікаційних систем і технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: mvasylkivskyi@gmail.com

Будаш Михайло Володимирович — аспірант групи 172-22а, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: mika@budash.dp.ua

Вікулов Микола Миколайович — студент групи TSM-24м, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: nikolayvikylov12356@gmail.com

Vasylkivskyi Mykola V. — candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Information Communication Systems and Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: mvasylkivskyi@gmail.com

Budash Mykhailo V. — graduate student of group 172-22a, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: mika@budash.dp.ua

Vikulov Mykola M. - student of group TSN-24m, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: nikolayvikylov12356@gmail.com

АРХІТЕКТУРА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ 6G

¹ Вінницький національний технічний університет

Анотація

У доповіді розглянуто концептуальні засади формування архітектури інтелектуальних телекомунікаційних мереж шостого покоління (6G), що є логічним етапом еволюції мобільних технологій після 5G. Проаналізовано ключові технологічні напрями, які визначають розвиток 6G, зокрема інтеграцію штучного інтелекту (AI) та машинного навчання (ML), використання терагерцового (THz) спектра, фотонних і оптичних систем, технологій масивного MIMO, beamforming та Інтернету речей (IoT). Особливу увагу приділено когнітивному управлінню ресурсами, автономній оптимізації мережесих процесів і створенню надширокопasmових, енергоефективних каналів зв'язку з наднизькою затримкою.

Показано, що архітектура 6G формується як багаторівнева адаптивна система, заснована на конвергенції хмарних, периферійних і туманних обчислень, інтегрованих з фотонними технологіями та інтелектуальними алгоритмами управління. Визначено перспективи використання квантово-стійких криптографічних методів, блокчейну та принципів «secure-by-design» для забезпечення безпеки мережесих інфраструктур.

Отримані результати свідчать, що 6G стане інтеграційною платформою для створення автономних, самоорганізованих і енергоефективних систем, що поєднують фізичний і цифровий простори, відкриваючи можливості для нових сервісів у галузях транспорту, промисловості, медицини, освіти та го-лографічних комунікацій.

Ключові слова: 6G, інтелектуальна телекомунікаційна мережа, штучний інтелект, машинне навчання, терагерцовий спектр, фотонна технологія, квантова безпека, хмарне обчислення.

Abstract

The report examines the conceptual foundations for developing the architecture of intelligent sixth-generation (6G) telecommunication networks, which represent a logical stage in the evolution of mobile technologies following 5G. The key technological directions shaping 6G development are analyzed, including the integration of Artificial Intelligence (AI) and Machine Learning (ML), the use of the terahertz (THz) spectrum, photonic and optical systems, massive MIMO, beamforming, and the Internet of Things (IoT). Particular attention is paid to cognitive resource management, autonomous network optimization, and the creation of ultra-broadband, energy-efficient communication channels with ultra-low latency.

It is shown that the 6G architecture is being formed as a multi-level adaptive system based on the convergence of cloud, edge, and fog computing, integrated with photonic technologies and intelligent control algorithms. The prospects for applying quantum-resistant cryptographic methods, blockchain, and “secure-by-design” principles to ensure network infrastructure security are outlined.

The obtained results indicate that 6G will become an integration platform for the creation of autonomous, self-organizing, and energy-efficient systems that combine physical and digital spaces, opening new opportunities for services in transportation, industry, healthcare, education, and holographic communications.

Keywords: 6G, intelligent telecommunication network, artificial intelligence (AI), machine learning (ML), terahertz spectrum, photonic technology, quantum security, cloud computing.

Вступ

Сучасний етап розвитку телекомунікаційних технологій характеризується стрімким зростанням обсягів передавання даних, різноманітністю цифрових сервісів і підвищеними вимогами до швидкодії, надійності та інтелектуальності мережевої інфраструктури. Еволюція мобільних технологій від 1G до 5G забезпечила поступовий перехід до високошвидкісного широкопasmового зв'язку, однак виклики, пов'язані з розвитком інтернету речей (IoT), автономних систем,

голографічних комунікацій, AR/VR-технологій і промислової автоматизації, потребують нової архітектури мереж — шостого покоління (6G). Концепція 6G передбачає створення інтелектуальної телекомунікаційної екосистеми, що інтегрує штучний інтелект (AI), машинне навчання (ML), фотонні технології, терагерцовий (THz) спектр, сенсорні системи та розподілені обчислювальні платформи [1].

Основними напрямками розвитку є впровадження когнітивного управління ресурсами, прогнозування трафіку, автономної оптимізації мережевих процесів і створення надширокопasmових, енергоефективних каналів зв'язку з наднизькою затримкою (менше 1 мс). Важливою складовою архітектури 6G є конвергенція хмарних, периферійних і туманних обчислень, що забезпечують розподілене опрацювання даних у реальному часі. Використання фотонних і оптичних технологій відкриває перспективи реалізації терабітних каналів передавання, а інтеграція AI/ML підвищує автономність, стійкість і якість користувацького досвіду. Таким чином, формування архітектури інтелектуальних мереж 6G є ключовим напрямом розвитку телекомунікацій, спрямованим на створення високопродуктивних, адаптивних і безпечних систем зв'язку майбутнього [2].

Результати дослідження

У ході дослідження визначено ключові технологічні напрями, що формують основу функціонування та розвитку мереж шостого покоління (6G), зокрема штучний інтелект (AI) і машинне навчання (ML), Інтернет речей (IoT), фотонні та оптичні технології, а також нові парадигми обчислень (edge, cloud, fog, dew, spatial computing) [3]. Отримані результати дозволяють сформулювати такі основні висновки:

Інтеграція штучного інтелекту (AI) та машинного навчання (ML) є визначальним фактором підвищення ефективності, автономності та надійності мереж 6G. Алгоритми AI забезпечують динамічну оптимізацію мережевих параметрів, прогнозування трафіку, адаптивне управління ресурсами та проактивне технічне обслуговування. Вони формують основу для інтелектуальної самоорганізації, самовідновлення й персоналізації сервісів у режимі реального часу [4].

Використання високочастотних діапазонів — міліметрового (mmWave) і терагерцового (THz) спектрів — відкриває можливості для надшвидкої бездротової передачі даних із мінімальною затримкою. Ці частоти є базовими для реалізації URLLC-застосувань, таких як автономний транспорт, віртуальна та доповнена реальність, а також дистанційна хірургія [5].

Технології масивного MIMO та формування променя (beamforming) забезпечують підвищену спектральну ефективність, стабільність сигналу та розширене покриття. Використання антенних решіток із великою кількістю елементів сприяє ефективному керуванню променями в умовах щільної міської забудови [6].

Інтеграція IoT і сенсорних мереж у 6G сприятиме створенню всеохопного середовища підключення для мільярдів пристроїв. Забезпечення наднизької затримки, масштабованості та енергоефективності дозволить реалізувати інтелектуальні системи у сферах розумних міст, промисловості, медицини, сільського господарства та транспорту [7].

Розподілені обчислювальні архітектури (cloud, edge, fog, dew computing) створюють єдину обчислювальну екосистему для оброблення даних у реальному часі.

Хмарні обчислення забезпечують масштабованість і централізоване управління ресурсами.

Периферійні (edge) обчислення мінімізують затримку, наближаючи аналітику до користувача.

Туманні (fog) обчислення підтримують локальну взаємодію пристроїв і спільну аналітику.

Dew computing доповнює систему децентралізованою локальною обробкою на рівні пристроїв, забезпечуючи автономність і стійкість систем.

Просторові (spatial) обчислення та технології AR/VR/MR у 6G створюють нову парадигму взаємодії людини з цифровим середовищем. Завдяки ультранизькій затримці, високій пропускній здатності й AI-персоналізації забезпечується безперервна інтеграція фізичного та цифрового просторів, що відкриває перспективи для телеприсутності, віддаленої співпраці та навчання [8].

Фотонні та оптичні технології визначають основу інфраструктури 6G:

Терагерцова комунікація (THz) забезпечує передачу даних на швидкостях до терабіт за се-

кунду.

Оптична бездротова комунікація (FSO) доповнює радіочастотні системи, забезпечуючи високошвидкісні канали в перевантажених зонах.

Інтегрована фотоніка сприяє створенню компактних, енергоефективних компонентів для оптичних систем 6G.

Волоконно-оптичні мережі залишаються магістральною основою backhaul/fronthaul-з'єднань, забезпечуючи надвисоку пропускну здатність і надійність.

Безпека та надійність у 6G забезпечуються впровадженням квантово-стійких криптографічних методів, блокчейну та принципів «secure-by-design». Це гарантує захист даних IoT-пристроїв, мережових з'єднань і хмарних сервісів від сучасних і майбутніх кіберзагроз [1-5].

Отримані результати підтверджують, що мережі шостого покоління стануть інтеграційною платформою для інтелектуальних, автономних та енергоефективних систем, які поєднують штучний інтелект, фотоніку, оптичні канали та розподілені обчислення. Така архітектура забезпечить технологічний фундамент для реалізації нових сервісів, підвищення ефективності цифрової економіки та формування глобального інтелектуального середовища майбутнього.

Висновки

Архітектура інтелектуальних телекомунікаційних мереж шостого покоління (6G) формується як багаторівнева, адаптивна та когнітивна система, що інтегрує штучний інтелект, квантові, фотонні та розподілені технології. Результати дослідження свідчать, що ключовими чинниками розвитку 6G є поєднання штучного інтелекту (AI) і машинного навчання (ML) з новими підходами до керування ресурсами, передавання даних і забезпечення безпеки. Це створює передумови для реалізації автономних, самонавчальних мереж із наднизькою затримкою, високою пропускну здатністю та підвищеною енергоефективністю.

Впровадження фотонних технологій, оптичних систем, бездротової передачі енергії (WPT) та механізмів енергозбирання забезпечує перехід до стійких, енергонезалежних і високопродуктивних мережових інфраструктур. Така еволюція сприяє появі нових сервісів у галузях охорони здоров'я, транспорту, виробництва, розумних міст і голографічних комунікацій.

Водночас подальший розвиток 6G вимагає вирішення питань стандартизації, кібербезпеки, управління даними та етичного використання технологій штучного інтелекту. Комплексне дослідження архітектурних принципів і міждисциплінарних рішень є запорукою ефективного впровадження 6G як основи для формування глобальної інтелектуальної цифрової екосистеми майбутнього.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Tyagi, A.K., Kumari, S., Chidambaram, N., and Sharma, A. (2024). Engineering applications of Blockchain in this smart era. In: Enhancing Medical Imaging with Emerging Technologies. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-5261-8.ch011>.
2. Ajanthaa, L. and Seranmadevi, R. (2024). Engineering applications of artificial intelligence. In: Enhancing Medical Imaging with Emerging Technologies (ed. P.H. Sree and A.K. Tyagi). <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-5261-8.ch010>.
3. Tyagi, A.K., Kukreja, S., Richa, and Sivakumar, P. (February 2024). Role of Blockchain Technology in Smart era: a review on possible smart applications. Journal of Information & Knowledge Management. <https://doi.org/10.1142/S0219649224500321>
4. Tyagi, A.K. and Tiwari, S. (2024). The future of artificial intelligence in Blockchain applications. In: Machine Learning Algorithms Using Scikit and TensorFlow Environments. IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-8531-6.ch018>.
5. Kumari, S., Thompson, A., and Tiwari, S. (2024). 6G-enabled internet of things-artificial intelligence-based digital twins: cybersecurity and resilience. In: Emerging Technologies and Security in Cloud Computing. IGI Global. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-2081-5.ch016>.
6. Tyagi, A.K. (2024). Dew computing: state of the art, opportunities, and research challenges. In: Machine Learning Algorithms Using Scikit and TensorFlow Environments. IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-8531-6.ch017>.

7. Оптимізація інтелектуальних телекомунікаційних мереж [Текст] / М. В. Васильківський, А. В. Прикмета, А. Олійник, Д. В. Нікітович // Вісник Хмельницького національного університету. Серія «Технічні науки». – 2023. – № 1. (317). – С. 33–41.

8. Підвищення ефективності інтелектуальних мереж МІМО на основі 6G [Текст] / М. В. Васильківський, О. С. Городецька, О. В. Стальченко, Б. С. Климчук // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2023. – № 1. – С. 92-101.

Васильківський Микола Володимирович — кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інфо-комунікаційних систем і технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: mvasylkivskyi@gmail.com

Прикмета Андрій Володимирович — аспірант групи 172-22а, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: botan.mua@gmail.com

Карпенко Іван Володимирович — студент групи ТСМ-24м, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: casko2003@gmail.com

Vasylkivskyi Mykola V. — candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Information Communication Systems and Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: mvasylkivskyi@gmail.com

Prykmeta Andrii V. — graduate student of group 172-22a, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: botan.mua@gmail.com

Karpenko Ivan V. - student of group TSN-24m, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: casko2003@gmail.com

АНАЛІЗ ВТРАТ СИГНАЛУ В РАДІОКАНАЛАХ МЕРЕЖ 5G/6G В УМОВАХ МІСЬКОЇ ЗАБУДОВИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Мобільні системи зв'язку п'ятого та шостого поколінь (5G/6G) відкривають новий етап розвитку бездротових технологій, забезпечуючи рекордну швидкість передавання даних і мінімальну затримку сигналу. Проте стабільність роботи таких мереж у міському середовищі значно знижується через багатопроменеве поширення, поглинання та відбиття хвиль. У цій роботі виконано аналітичну оцінку втрат сигналу в радіоканалах 5G і 6G із застосуванням моделей COST 231 та Okumura-Hata. Проведено порівняння частотних діапазонів 3,5 ГГц і 100 ГГц, досліджено вплив елементів міської інфраструктури на згасання сигналу та оцінено ефективність технологій Massive MIMO, Beamforming і малопотужних сот у компенсації втрат. Отримані результати дозволяють сформулювати підходи до проектування енергоефективних мереж нового покоління в урбанізованих умовах.

Ключові слова: 5G, 6G, радіоканал, урбанізація, втрати сигналу, Massive MIMO, Beamforming

Abstract

The fifth and sixth generation (5G/6G) mobile communication systems mark a new stage in wireless technology, providing record data rates and ultra-low latency. However, signal stability in dense urban environments is challenged by multipath propagation, absorption, and reflection. This paper presents an analytical assessment of signal loss in 5G and 6G radio channels using COST 231 and Okumura-Hata propagation models. A comparative analysis for 3.5 GHz and 100 GHz frequency bands was conducted, investigating the impact of urban infrastructure on path loss and evaluating the efficiency of Massive MIMO, Beamforming, and small-cell deployment in loss compensation. The obtained results provide a basis for designing energy-efficient next-generation networks in urban areas.

Keywords: 5G, 6G, radio channel, urban environment, signal loss, Massive MIMO, Beamforming

Вступ

Розгортання мобільних систем 5G і майбутніх 6G є одним із найважливіших напрямів розвитку сучасних інформаційно-комунікаційних технологій. Ці стандарти забезпечують надвисокі швидкості передавання даних, малі затримки та підтримку великої кількості одночасних підключень. Водночас забезпечення стабільної якості сигналу в умовах міської забудови залишається складною науково-практичною задачею через багатопроменеві ефекти, дифракцію, поглинання та відбиття від будівель. Метою роботи є оцінка втрат потужності сигналу в радіоканалах мереж 5G/6G у міських умовах і визначення ефективності сучасних технологій, спрямованих на підвищення енергетичної стійкості каналу.

Результати дослідження

Для аналітичного оцінювання параметрів поширення хвиль використано моделі COST 231 та Okumura-Hata, які враховують тип забудови, висоту антен і відстань між передавачем і приймачем. Розрахунки проводилися для частот 3,5 ГГц (характерної для 5G) і 100 ГГц (для 6G) при відстані 200 м між антенами [1, 3, 4].

Втрати сигналу у вільному просторі визначалися за формулою

$$L = 32,4 + 20 \log(f) + 20 \log(d)$$

де L – рівень згасання (дБ), f – частота (МГц), d – відстань (км).

Подальші поправки на умови міської забудови враховувалися відповідно до моделей COST 231 та Okumura-Hata. Також оцінювалися вплив коефіцієнта відбиття, ефективної площі антен і параметрів багатопроменевого середовища. На основі отриманих значень проведено оцінку відношення сигнал/шум (SNR) та ефективності методів його підвищення [1, 2, 4, 5].

Розрахунки показали, що при частоті 3,5 ГГц втрати сигналу становлять близько 100 дБ, тоді як при 100 ГГц — до 135 дБ. Вищі частоти характеризуються сильнішим ослабленням через меншу довжину хвилі, що сприяє поглинанню енергії матеріалами будівель і атмосферними втратами [2,3].

Технології Beamforming і Massive MIMO дають змогу ефективно компенсувати частину втрат за рахунок просторового спрямування сигналу та використання багатопроменевої передачі. При застосуванні цих технологій рівень сигналу може збільшуватися на 15–20 дБ, а середня пропускна здатність — на 60–80 % [1, 5].

Для покращення покриття в міських районах доцільним є впровадження малих сот (Small Cells), які зменшують середню довжину каналу та знижують затухання. Додатково, використання інтелектуальних відбивних поверхонь (RIS) у 6G дозволяє формувати адаптивні маршрути сигналу, мінімізуючи вплив перешкод і зон тіней [1, 3].

Висновок

Порівняльний аналіз продемонстрував, що зі зростанням частоти робочого діапазону суттєво знижується запас потужності сигналу, особливо при збільшенні кількості відбиттів і перешкод. В умовах міської забудови основний вплив на параметри радіоканалу мають коефіцієнт ослаблення, рівень шуму та багатопроменевість.

Використання комбінації Massive MIMO, Beamforming, малих сот і RIS дозволяє забезпечити стабільний рівень сигналу навіть при високих частотах, що підтверджує перспективність цих технологій для архітектури 6G. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні енергоефективних мереж нового покоління в умовах щільної міської забудови.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Andrews J. G., Buzzi S., Choi W., Hanly S. V., Lozano A., Soong A. C. K., та ін. *What will 5G be?* // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. — 2014. — Vol. 32, No. 6. — P. 1065–1082. — DOI: 10.1109/JSAC.2014.2328098.
2. Rappaport T. S., Sun S., Mayzus R., Zhao H., Azar Y., Wang K., Wong G. N., Schulz J. K., Samimi M., Gutierrez F. *Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: it will work!* // IEEE Access. — 2013. — Vol. 1. — P. 335–349. — DOI: 10.1109/ACCESS.2013.2260813.
3. Akyildiz I. F., Kak A., Nie S. *6G and Beyond: The Future of Wireless Communications Systems* // IEEE Access. — 2020. — Vol. 8. — P. 133995–134030. — DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3010896.
4. Tse D., Viswanath P. *Fundamentals of Wireless Communication*. — Cambridge: Cambridge University Press, 2005. — 585 p. — ISBN 0-521-84527-4.
5. Dahlman E., Parkvall S., Sköld J. *5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology*. — Oxford: Academic Press / Elsevier, 2018. — 468 p. — ISBN 978-0-12-814323-0.

Харжевський Олександр Олегович – студент групи РТ-23б, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: sasaharzevskij@gmail.com

Науковий керівник: Кичак Василь Мартинович, доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

Kharzhevskiy Oleksandr Olegovich – student of group RT-23b, Faculty of Information and Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: sasaharzevskij@gmail.com

Academic supervisor: Vasyl Martynovyuch Kychak, Doctor of Technical Sciences, Professor, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

ОПТИМІЗАЦІЯ СПЕКТРАЛЬНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ У МЕРЕЖАХ ЗВ'ЯЗКУ ШОСТОГО ПОКОЛІННЯ

¹ Вінницький національний технічний університет

Анотація

Стрімкий розвиток бездротових технологій і зростання вимог до швидкості, надійності та енерго-ефективності передавання даних зумовлюють необхідність підвищення спектральної ефективності в мережах шостого покоління (6G). У роботі запропоновано підхід до оптимізації спектрального використання частотного ресурсу шляхом інтеграції технологій beam-space MIMO, неортогонального мульти-доступу (NOMA), повнодуплексних D2D-комунікацій та Layered Division Multiplexing (LDM).

Проведено аналітичне й числове моделювання показників ймовірності відмови (outage probability) та ергодичної ємності (ergodic capacity) для ширококомовної mmWave MIMO-NOMA системи з D2D-підтримкою. Результати дослідження показали, що запропонована архітектура забезпечує суттєве підвищення спектральної ефективності, зниження ймовірності відмови користувачів і збільшення пропускну здатності порівняно з традиційними схемами TDM та LDM без D2D-зв'язку.

Оптимізація потужності повнодуплексного передавання дозволяє мінімізувати власні завади, а збільшення кількості антен базової станції сприяє покращенню якості обслуговування користувачів. Отримані результати можуть бути використані під час проектування високопродуктивних ширококомовних систем 5G/6G, орієнтованих на підтримку мультимедійних і критично важливих сервісів у майбутніх телекомунікаційних мережах.

Ключові слова: 6G, спектральна ефективність, mmWave, MIMO, NOMA, LDM, D2D-комунікації, Full-Duplex, beamforming, outage probability, ergodic capacity.

Abstract

The rapid development of wireless technologies and the growing demand for high data rate, reliability, and energy efficiency necessitate improving spectral efficiency in sixth-generation (6G) communication networks. This paper proposes an approach to optimizing spectral resource utilization through the integration of beam-space MIMO, non-orthogonal multiple access (NOMA), full-duplex D2D communications, and Layered Division Multiplexing (LDM) technologies.

Analytical and numerical modeling of outage probability and ergodic capacity has been performed for a broadcast mmWave MIMO-NOMA system with D2D support. The results show that the proposed architecture provides a significant improvement in spectral efficiency, reduces user outage probability, and increases system throughput compared to traditional TDM and LDM without D2D configurations.

Optimization of full-duplex transmission power enables minimizing self-interference, while increasing the number of base station antennas improves user service quality. The obtained results can be applied in the design of high-performance 5G/6G broadcast systems aimed at supporting multimedia and mission-critical services in future telecommunication networks.

Keywords: 6G, spectral efficiency, mmWave, MIMO, NOMA, LDM, D2D communications, Full-Duplex, beamforming, outage probability, ergodic capacity.

Вступ

Стрімкий розвиток бездротових технологій та зростання вимог до швидкості, надійності й енергоефективності передавання даних визначають потребу у підвищенні спектральної ефективності майбутніх мереж зв'язку шостого покоління (6G). Основними напрямками розвитку 6G є забезпечення надвисокої пропускну здатності, мінімальної затримки, підтримка масового підключення пристроїв і інтеграція інтелектуальних методів керування ресурсами [1].

Одним із ключових завдань є поєднання ширококомовного та одноадресного трафіку в єдиній

Висновки

У роботі проведено аналіз продуктивності широкомовної mmWave MIMO-NOMA системи з підтримкою повнодуплексних D2D-комунікацій з метою підвищення спектральної ефективності мереж шостого покоління. На основі аналітичного та числового моделювання отримано такі основні результати:

Запропонована архітектура перевищує традиційні схеми TDM та LDM без D2D-зв'язку за показниками ймовірності відмови та ергодичної ємності, що свідчить про її вищу спектральну ефективність та надійність передавання даних.

Підвищення потужності передавання і збільшення кількості антен базової станції забезпечують покращення пропускної здатності системи та зменшення ймовірності відмови користування.

Оптимізація потужності повнодуплексного передавання є критичною для зменшення власних завад і досягнення максимальної ефективності використання спектра.

Інтеграція технологій beamspace MIMO, NOMA, Full-Duplex D2D та LDM-мультиплексування створює передумови для побудови високопродуктивних бездротових мереж 6G з гнучким управлінням ресурсами, високою пропускною здатністю та низькою затримкою передачі.

Отримані результати можуть бути використані при розробленні енергоефективних архітектур широкомовних систем 5G/6G, орієнтованих на підтримку мультимедійних та критично важливих сервісів у майбутніх телекомунікаційних мережах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. N. Ye, X. Li, H. Yu, L. Zhao, W. Liu, X. Hou, Deepnoma: a unified framework for noma using deep multi-task learning. IEEE Trans. Wirel. Commun., 1 (2020)
2. Z. Wang, Q. Liu, M. Li, W. Kellerer, Energy efficient analog beamformer design for mmwave multicast transmission. IEEE Trans. Green Commun. Netw. 3, 552–564 (2019)
3. Стратегії технологічного розвитку апаратного забезпечення інфокомунікаційних радіомереж [Текст] / М. В. Васильківський, О. С. Городецька, Б. С. Климчук, В. В. Говорун // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2023. – № 1. – С. 83-91.
4. Оптимізація інтелектуальних телекомунікаційних мереж [Текст] / М. В. Васильківський, А. В. Прикмета, А. Олійник, Д. В. Нікітович // Вісник Хмельницького національного університету. Серія «Технічні науки». – 2023. – № 1. (317). – С. 33–41.
5. Оптимізація адаптивних радіосистем із використанням алгоритмів ШІ та МН [Текст] / М. Васильківський, Д. Нікітович, Н. Грабчак, і Н. Якубівська // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2023. – № 2. – С. 112–124.
6. Оптимізація програмно-конфігурованих літаючих мереж доступу [Текст] / М. Васильківський, А. Прикмета, А. Олійник, Н. Ксьондз // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. – 2023. – № 52. – С. 128-139.

Васильківський Микола Володимирович — кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інфокомунікаційних систем і технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: mvasylkivskyi@gmail.com

Прикмета Андрій Володимирович — аспірант групи 172-22а, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: botan.mua@gmail.com

Васильківський Андрій Олегович — студент групи ТСМ-24м, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: showavhip@gmail.com

Vasylykivskyi Mykola V. — candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Information Communication Systems and Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: mvasylkivskyi@gmail.com

Prykmeta Andrii V. — graduate student of group 172-22a, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: botan.mua@gmail.com

Vasylykivskyi Andrii O. - student of group TSN-24m, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: showavhip@gmail.com

ОПТИМІЗАЦІЯ ОБСЛУГОВУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО ТРАФІКУ В МУЛЬТИСЕРВІСНОМУ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОМУ ОБЛАДНАННІ

¹ Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглянуто проблематику підвищення ефективності обслуговування інформаційного трафіку в мультисервісному телекомунікаційному обладнанні за умов зростання обсягів даних та різномірності потоків. Запропоновано узагальнену модель вузла доступу, що реалізує динамічний розподіл ресурсів між різними типами трафіку з урахуванням параметрів якості обслуговування (QoS), пріоритетності сервісів і стану каналу. Основою моделювання є багатовимірні марковські процеси, які забезпечують можливість оцінювання ефективності функціонування системи та розроблення методів оптимізації пропускну здатності.

Результати моделювання доводять, що застосування технологій Network Slicing, NFV та SDN у мультисервісних вузлах доступу дозволяє підвищити ефективність використання радіоресурсів на 25–30 %, зменшити середню затримку пакетів на 15–20 % і забезпечити гарантовану пропускну здатність критичних сервісів. Розроблена модель сприяє формуванню адаптивних бізнес-моделей взаємодії між операторами зв'язку та віртуальними операторами (MVNO), що знижує капітальні витрати та підвищує конкурентоспроможність ринку.

Інтеграція технологій SDN, NFV, Network Slicing та гібридних хмарних середовищ у поєднанні з архітектурами IoT формує підґрунтя для створення гнучких, масштабованих і надійних телекомунікаційних систем нового покоління з гарантованою якістю обслуговування.

Ключові слова: мультисервісне телекомунікаційне обладнання, оптимізація трафіку, Network Slicing, NFV, SDN, IoT, QoS, пропускну здатність, моделювання, управління ресурсами.

Abstract

The paper addresses the problem of improving the efficiency of information traffic servicing in multiservice telecommunication equipment under conditions of increasing data volumes and traffic heterogeneity. A generalized access node model is proposed, which implements dynamic resource allocation among different traffic types considering quality of service (QoS) parameters, service priorities, and channel conditions. The modeling framework is based on multidimensional Markov processes, providing the ability to evaluate system performance and develop methods for optimizing throughput.

Modeling results demonstrate that the application of Network Slicing, NFV, and SDN technologies in multiservice access nodes increases the efficiency of radio resource utilization by 25–30%, reduces average packet delay by 15–20%, and ensures guaranteed throughput for critical services. The developed model facilitates the formation of adaptive business models for interaction between network operators and virtual operators (MVNOs), reducing capital expenditures and enhancing market competitiveness.

The integration of SDN, NFV, Network Slicing, and hybrid cloud environments in combination with IoT architectures provides a foundation for building flexible, scalable, and reliable next-generation telecommunication systems with guaranteed quality of service.

Keywords: multiservice telecommunication equipment, traffic optimization, Network Slicing, NFV, SDN, IoT, QoS, throughput, modeling, resource management.

Вступ

Стрімкий розвиток сучасних телекомунікаційних систем зумовлює зростання обсягів інформаційного трафіку та підвищення вимог до якості його обслуговування. Сучасні мережі передають значні масиви даних, що формуються не лише користувацькими пристроями, але й чис-

ленними технічними сенсорами, які забезпечують функціонування систем Інтернету речей, розумних міст та транспортних інфраструктур. Такі потоки характеризуються різномірністю структур, нерівномірністю інтенсивності надходження повідомлень, різними рівнями чутливості до затримок і втрат, а також наявністю або відсутністю еластичності трафіку [1].

У зв'язку з цим постає необхідність розроблення ефективних методів оптимізації процесів обслуговування гетерогенного трафіку у мультисервісному телекомунікаційному обладнанні. Недостатній урахунок особливостей формування інформаційних потоків може призвести до деградації показників якості обслуговування, зокрема до збільшення затримок, черг і ймовірності втрат пакетів [2].

Актуальним підходом до вирішення зазначеної проблеми є створення математичних моделей, що відображають процеси функціонування вузлів доступу та дозволяють оцінити ефективність диференційованого розподілу ресурсів між різними типами трафіку. Особливий науково-практичний інтерес становлять моделі на основі багатовимірних марковських процесів, які забезпечують можливість комплексного аналізу взаємозалежних потоків даних і пріоритетних сервісів.

Метою дослідження є підвищення ефективності обслуговування інформаційного трафіку в мультисервісному телекомунікаційному обладнанні шляхом побудови узагальненої моделі розподілу ресурсів та розроблення методів оцінювання характеристик якості обслуговування. Запропонований підхід передбачає використання методів декомпозиції моделі для розрахунку точних і наближених показників функціонування системи, що дозволяє сформувати практичні рекомендації щодо оптимізації пропускну здатності та підвищення надійності передачі даних.

Результати дослідження

У результаті проведеного дослідження розроблено узагальнену модель мультисервісного вузла доступу, що реалізує механізми динамічного розподілу ресурсів передавання інформації між різними типами трафіку на основі принципів мережевого сегментування (Network Slicing). Модель враховує показники якості обслуговування (QoS), стан радіоканалу, пріоритетність користувацьких потоків та обмеження пропускну здатності вузла [3].

Моделювання процесів управління ресурсами у вузлі доступу показало, що застосування технології Network Slicing забезпечує підвищення ефективності використання радіоресурсу на 25–30 % порівняно з традиційними статичними методами розподілу. Це досягається завдяки гнучкому перерозподілу частотних блоків і часових слотів між віртуальними сегментами мережі відповідно до поточного стану каналу та параметрів QoS [4].

Додатково встановлено, що використання адаптивних механізмів планування ресурсів у межах сегментів (з урахуванням показників CQI, SINR та QCI) дозволяє знизити середню затримку пакетів на 15–20 % і підвищити гарантовану пропускну здатність сервісів реального часу на 10–15 % [5].

Запропонована функціональна структура вузла доступу передбачає раціональний розподіл ресурсів між класами трафіку GBR і Non-GBR, що забезпечує стабільну якість обслуговування критичних до затримок сервісів (відеоспостереження, телеметрія, VoLTE) та ефективне використання радіоресурсів для фонових потоків даних [6].

Проведений аналіз сучасних підходів до побудови мультисервісних точок доступу підтвердив доцільність інтеграції технологій LTE/5G, Network Slicing, віртуалізації мережевих функцій (NFV) та програмно-визначених мереж (SDN). Використання NFV забезпечує розподіл апаратних і програмних функцій, зменшуючи витрати на розгортання та експлуатацію мережі на 30–40 %, а застосування SDN підвищує гнучкість і централізованість управління трафіком, скорочуючи час конфігурації мережевих політик на 45–60 % [1, 2].

Запропонована модель мережевого слайсингу дозволяє формувати логічно ізольовані сегменти інфраструктури для різних сервісів (відеоспостереження, IoT, критичні застосунки) з гарантованими параметрами QoS. Результати моделювання підтвердили, що динамічне керування слайсами підвищує ефективність використання пропускну здатності вузлів доступу до 25 %, а середню затримку передавання даних зменшує на 15–20 % порівняно зі статичними методами [3, 4].

У межах розробленої бізнес-моделі взаємодії між оператором зв'язку та віртуальними опе-

раторами (MVNO) обґрунтовано доцільність спільного використання фізичної інфраструктури, що дає змогу знизити капітальні витрати на 20–25 % та підвищити рівень конкуренції на ринку телекомунікаційних послуг [5, 6].

Також розглянуто перспективність поєднання гібридних хмарних середовищ з архітектурами IoT для підтримки інтелектуальних сервісів у реальному часі. Використання хмарних ресурсів для відеоаналітики, моніторингу та автоматизованого управління пристроями підвищує масштабованість систем і забезпечує безперервний доступ до сервісів навіть за умов зростання навантаження.

Підсумовуючи, проведене дослідження доводить, що інтеграція технологій SDN, NFV, Network Slicing у поєднанні з гібридними хмарами та IoT формує основу для побудови адаптивних бізнес-моделей мультисервісних точок доступу. Такі рішення дозволяють створювати гнучкі, масштабовані та надійні сервіси з гарантованою якістю обслуговування, що є ключовим чинником розвитку телекомунікаційних систем нового покоління.

Висновки

У результаті проведеного дослідження проаналізовано основні структурні параметри мереж мобільного зв'язку стандарту LTE, що визначають ефективність функціонування мультисервісних вузлів доступу. Встановлено, що пропускна здатність є ключовим параметром, який безпосередньо впливає на рівень якості обслуговування користувачських запитів. Визначено залежність пропускної здатності від типу з'єднання (Uplink/Downlink), ширини смуги пропускання, технології доступу (FDD, TDD), типу модуляції, алгоритму кодування, кількості антенних потоків (MIMO), рівня завантаженості вузла та виду наданих сервісів. Проведено порівняльний аналіз розрахункових і експериментальних значень швидкостей передавання даних, а також розглянуто принципи функціонування програмних калькуляторів, призначених для визначення пропускної здатності вузлів доступу.

Охарактеризовано сучасні концепції та бізнес-моделі, що впроваджуються у мультисервісних вузлах доступу для підвищення ефективності обслуговування користувачів. Зокрема, розглянуто мережеву сегментацію (Network Slicing), концепцію Інтернету речей (IoT) та впровадження інтелектуальних систем спостереження. Встановлено, що ці підходи забезпечують оптимізацію використання мережевих ресурсів, підвищують гнучкість управління трафіком і сприяють підтримці стабільної якості сервісів за умов зростання кількості користувачів і різноманітності типів послуг.

Показано, що ефективне впровадження сучасних технологій управління ресурсами вимагає розроблення оновлених моделей мультисервісних вузлів доступу, здатних враховувати комплексний вплив параметрів, які формують вхідні потоки даних і визначають процес їх обслуговування. До таких параметрів належать: залежність швидкості передавання від типу запиту, пріоритетність онлайн-навантаження, груповий характер надходження файлів, наявність еластичних властивостей даних, можливість затримки початку передавання та ефект старіння інформації. Урахування зазначених факторів дозволяє підвищити точність моделювання процесів маршрутизації та планування ресурсів, що є необхідною умовою для подальшої оптимізації обслуговування інформаційного трафіку в телекомунікаційних мережах нового покоління.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Khan S. Highly Accurate and Reliable Wireless Network Slicing in 5th Generation Networks: A Hybrid Deep Learning Approach / S. Khan, Y. Ali, Z. Ullah, [et. all] // Journal of Network and Systems Management. — 2022. — V. 30. — No. 2. — P. 29.
2. Kochetkova I. Controllable Queuing System with Elastic Traffic and Signals for Resource Capacity Planning in 5G Network Slicing / I. Kochetkova, K. Leonteva, I. Ghebrial, [et. all.] // Future Internet. — 2024. — V. 16. — No. 8. — P. 18.
3. Sayadi B. Network Applications: Opening up 5G and Beyond networks / B. Sayadi, C. Chang, C. Tranoris, [et. all]. 5G-PPP Software Network Working Group, 2023. — 78 p.
4. Васильківський М. В. Дослідження архітектури штучного інтелекту для інфокомунікаційних мереж 6G [Текст] / М. Васильківський, Г. Варгатюк, О. Болдирева // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 2022. — № 4. — С. 62–70.

5. Оптимізація адаптивних радіосистем із використанням алгоритмів ШІ та МН [Текст] / М. Васильківський, Д. Нікітович, Н. Грабчак, і Н. Якубівська // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2023. – № 2. – С. 112–124.

6. Підвищення ефективності інтелектуальних мереж МІМО на основі 6G [Текст] / М. В. Васильківський, О. С. Городецька, О. В. Стальченко, Б. С. Климчук // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2023. – № 1. – С. 92-101.

Васильківський Микола Володимирович — кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інфо-комунікаційних систем і технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: mvasylkivskyi@gmail.com

Будаш Михайло Володимирович — аспірант групи 172-22а, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: mika@budash.dp.ua

Бобров В'ячеслав Олександрович — студент групи ТСМ-24м, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: slav.vend@gmail.com

Vasylkivskyi Mykola V. — candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Information Communication Systems and Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: mvasylkivskyi@gmail.com

Budash Mykhailo V. — graduate student of group 172-22a, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: mika@budash.dp.ua

Bobrov Viacheslav O. - student of group TSN-24m, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: slav.vend@gmail.com

ЗАСТОСУВАННЯ БЛОКЧЕЙНУ ДЛЯ БЕЗПЕКИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У цій роботі досліджується застосування технології блокчейн для підвищення безпеки телекомунікаційних мереж нового покоління. Розглянуто принципи функціонування блокчейну, його ключові властивості - децентралізацію, незмінність даних і прозорість транзакцій. Проаналізовано сучасні напрямки впровадження технології в галузі зв'язку: захист даних користувачів, автентифікація абонентів, запобігання шахрайству, управління ресурсами в мережах 5G/6G та безпечна взаємодія між операторами. Показано, що використання блокчейну дозволяє знизити ризики атак типу DDoS, підробки ідентифікаторів SIM та несанкціонованого доступу до мережеских вузлів. Разом із тим виявлено низку проблем, серед яких масштабованість, затримка транзакцій і потреба у стандартизації.

Ключові слова: блокчейн, телекомунікаційна мережа, безпека, 5G, автентифікація, децентралізація, кіберзахист.

Abstract

This paper examines the application of blockchain technology to enhance the security of telecommunication networks. The basic principles of blockchain operation are described, including decentralization, data immutability, and transaction transparency. The main implementation areas are analyzed - data protection, user authentication, fraud prevention, resource management in 5G/6G networks, and secure inter-operator interaction. It is shown that blockchain helps reduce the risks of DDoS attacks, SIM identity spoofing, and unauthorized access to network nodes. However, several challenges remain, such as scalability, transaction latency, and the need for interoperability standards.

Keywords: blockchain, telecommunication network, security, 5G, authentication, decentralization, cyber protection.

Вступ

Сучасні телекомунікаційні мережі - це складні децентралізовані системи, що передають величезні обсяги даних у режимі реального часу. Зі зростанням кількості підключених пристроїв (IoT), впровадженням 5G та розвитком хмарних сервісів значно зросли ризики кібератак, шахрайства та витоку даних. Традиційні методи захисту (централізовані сервери, сертифікати та фаєрволи) поступово втрачають ефективність через складність інфраструктури та відсутність прозорого механізму довіри між учасниками мережі [1, 2].

Технологія блокчейн, спочатку створена для криптовалют, довела свою надійність у забезпеченні децентралізованого зберігання та перевірки інформації. Завдяки властивостям незмінності, прозорості та відсутності єдиної точки відмови, блокчейн розглядається як один із найперспективніших інструментів для підвищення рівня безпеки телекомунікаційних мереж [3, 5].

Аналіз результатів дослідження

Блокчейн - це розподілений реєстр, у якому всі транзакції зберігаються у вигляді ланцюга блоків, що захищені криптографічними алгоритмами. Кожен новий блок містить хеш попереднього, що забезпечує незмінність даних - зміна одного запису призводить до порушення всієї структури. Такий підхід дозволяє уникнути фальсифікації даних і забезпечує високий рівень довіри між учасниками мережі [1, 4].

У контексті телекомунікацій, блокчейн може виступати механізмом обліку, автентифікації та контролю доступу до мережевих ресурсів. Кожен вузол або пристрій має власний криптографічний ключ, що унеможливує підробку особистості користувача.

Одним із найважливіших напрямків є ідентифікація користувачів без центрального сервера. У традиційних системах автентифікації (наприклад, через SIM-центр) існує ризик компрометації даних. Блокчейн забезпечує зберігання записів автентифікації у розподіленій базі, до якої мають доступ лише авторизовані учасники. Це мінімізує ризики підробки SIM-ідентифікаторів і шахрайських схем із роумінгом [2, 6].

У 2024 році проведені пілотні проекти в ЄС показали, що впровадження блокчейн-автентифікації дозволило скоротити кількість шахрайських дій із SIM-заміною на 32 %. Оператори Vodafone, Deutsche Telekom і Orange використовують подібну модель для створення децентралізованої бази даних користувачів. Технологія блокчейн активно застосовується для виявлення та блокування фальшивих транзакцій у білінгових системах. Наприклад, платформи на базі Hyperledger Fabric дозволяють вести журнал усіх з'єднань між мережами операторів і перевіряти їх достовірність. Завдяки незмінності записів блокчейн виключає можливість прихованої зміни інформації про з'єднання, що особливо важливо для міжоператорських розрахунків. У звіті 360 Research Reports зазначається, що щорічні втрати операторів від шахрайства у сфері зв'язку перевищують 38 млрд доларів, а блокчейн-системи дозволяють зменшити цей показник на 20-25 % протягом перших двох років впровадження [3, 5].

З появою 5G мережі стали більш віртуалізованими, тобто логічно поділеними на сегменти (network slices), кожен із яких може обслуговувати окремий тип сервісів. Це створює складну задачу контролю доступу між сегментами.

У роботі Kouvakis V. et al. (2024) запропоновано архітектуру Hierarchical Blockchain RAN, у якій блокчейн використовується для реєстрації подій між вузлами та моніторингу стану мережі. Такий підхід дозволяє запобігати підробці даних конфігурації та мінімізує ризик внутрішніх атак.

Дослідження показало, що використання блокчейну в системі керування ресурсами 5G зменшує час виявлення несанкціонованих дій на 27 % і підвищує точність моніторингу трафіку. Основними перевагами використання технології блокчейн в телекомунікаціях : Децентралізація - відсутність єдиного вузла, який може стати точкою відмови. Прозорість і відстежуваність - усі транзакції фіксуються в реєстрі, доступному учасникам. Незмінність даних - виключає можливість несанкціонованої модифікації інформації. Автоматизація через смарт-контракти - забезпечує виконання політик без участі людини. Сумісність із IoT-пристроями - децентралізоване керування великими системами сенсорів [1, 3, 4, 6].

Попри переваги, технологія має низку обмежень: Масштабованість - публічні блокчейни не можуть обробляти тисячі транзакцій на секунду, що необхідно для телеком-мереж, затримка транзакцій (latency) - консенсус вимагає часу, що може бути критичним у реальному часі, високе енергоспоживання у деяких алгоритмах консенсусу (Proof-of-Work), інтероперабельність - відсутність єдиних стандартів для взаємодії між операторами [4, 5, 6].

Сучасні рішення спрямовані на створення приватних або гібридних блокчейнів, які поєднують безпеку публічних мереж і швидкість централізованих систем.

Очікується, що у 2025–2030 роках блокчейн стане ключовим елементом архітектури мереж 6G, забезпечуючи довіру між автономними пристроями та автоматичне розподілення ресурсів за допомогою смарт-контрактів [2, 4].

Дослідження Emergen Research (2025) прогнозує, що ринок блокчейн-рішень для телекомунікацій зросте з 0.7 млрд \$ у 2023 до 17.5 млрд \$ у 2033 році [6].

Таким чином, блокчейн уже переходить із експериментальної технології до реального інструмента кіберзахисту в галузі зв'язку.

Висновки

Технологія блокчейн є перспективним напрямом забезпечення безпеки телекомунікаційних мереж нового покоління. Її використання дозволяє створити децентралізовану систему довіри між операторами, підвищити рівень захисту даних, мінімізувати шахрайство та автоматизувати управління ресурсами. Результати аналізу показують, що блокчейн-рішення здатні зменшити втрати від кіберзагроз і покращити прозорість операцій. Основними напрямками подальших досліджень є вдосконалення

масштабованості, інтеграція зі штучним інтелектом, розробка галузевих стандартів і створення енергоефективних механізмів консенсусу.

Отже, блокчейн — це не лише технологія зберігання транзакцій, а фундаментальний елемент безпеки майбутніх телекомунікаційних систем 5G/6G та IoT-інфраструктури.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Nguyen D. C., Pathirana P. N., Ding M., Seneviratne A. Blockchain for 5G and Beyond Networks: A State of the Art Survey
2. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/1912.05062>
3. Porovicu C., Zhang Y., Lee S. Blockchain for Telecom: Opportunities and Challenges. IEEE Communications Magazine, 2023.
4. Blockchain in Telecom – Global Strategic Business Report. Research & Markets [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.researchandmarkets.com/reports/5303087/blockchain-in-telecom-global-strategic>
5. Kouvakis V., Trevlakis S. E., Boulogeorgos A.-A. et al. Hierarchical Blockchain Radio Access Networks: Architecture, Modelling, and Performance Assessment. arXiv, 2024. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2412.19838>
6. Blockchain in Telecom Market 2025–2033: Growth, Trends, and Market Share. 360 Research Reports [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.360researchreports.com/press-release/blockchain-in-telecom-market-outlook-2025-2033>

Онищук Вячеслав Олександрович – студент групи РТ-23б, факультету інформаційних електронних систем, Вінницький національний університет, м. Вінниця, e-mail: onushukvyatcheslav@gmail.com

Кичак Василь Мартинович – д.т.н., проф., завідувач кафедри інфокомунікаційних систем і технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: kychak.v.m@vntu.edu.ua

Viacheslav O. Onyshchuk – student of group RT-23b, faculty of information electronic systems, Vinnitsa National University, Vinnitsa, e-mail: onushukvyatcheslav@gmail.com

Vasyl M. Kychak – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of infocommunication systems and technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: kychak.v.m@vntu.edu.ua

АНАЛІЗ НЕЗАЛЕЖНИХ КОМПОНЕНТ ЯК МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОЗАХИЩЕНОСТІ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ

Вінницький національний технічний університет

Анотація.

У роботі розглянуто підхід до підвищення завадозахищеності систем зв'язку зі стрибкоподібною зміною несучої частоти (СЗНЧ) за допомогою методу аналізу незалежних компонент (АНК). Для виділення корисного сигналу в умовах дії шумів і перешкод застосовано алгоритм другого порядку сліпої ідентифікації (ДПСІ). Розроблена імітаційна модель у середовищі GNU Octave підтвердила ефективність АНК: ймовірність бітової помилки зменшується більш ніж у 100 разів за високих рівнів завад.

Ключові слова: завадозахищеність, СЗНЧ, аналіз незалежних компонент, адитивний білий гаусівський шум, імпульсна перешкода.

Системи зв'язку зі стрибкоподібною зміною несучої частоти (СЗНЧ) є одним із найефективніших засобів захисту інформації від перехоплення та завад, оскільки частота передачі постійно змінюється за визначеним законом або випадковою послідовністю. Проте у складних умовах радіоелектронної боротьби навіть такі системи можуть втрачати стійкість через потужні імпульсні або широкосмугові перешкоди.

Одним із сучасних напрямів підвищення завадостійкості є застосування методів сліпої обробки сигналів, серед яких аналіз незалежних компонент (АНК, англ. ICA — Independent Component Analysis) забезпечує ефективне виділення корисних сигналів без знання характеристик каналу чи типу завад [1–3].

АНК базується на припущенні, що спостережувані сигнали є сумішшю статистично незалежних джерел. Завдання полягає у знаходженні таких лінійних перетворень, які мінімізують статистичну залежність між компонентами. На відміну від методу головних компонент (РСА), який мінімізує кореляцію, АНК мінімізує вищі статистичні моменти (ентропію, ексцес, негайність), що дозволяє відновлювати сигнали навіть у випадках некорельованих, але залежних джерел [1, 2].

У загальному випадку спостережувані сигнали $X(t)$ є сумішшю незалежних джерел $S(t)$, що передаються через невідому матрицю змішування A :

$$X = A \cdot S + n \quad (1)$$

де n — вектор адитивного білого гаусівського шуму. Завдання АНК полягає у знаходженні такої матриці розділення W , щоб оцінені незалежні компоненти були статистично незалежними:

$$Y = W \cdot X \quad (2)$$

Відновлення джерел подається як:

$$\hat{S} = W \cdot X \approx A^{-1} \cdot X \quad (3)$$

Імітаційна модель СЗНЧ-системи реалізована у GNU Octave з урахуванням адитивного шуму та імпульсних перешкод різної потужності. Оцінювалася ймовірність бітової помилки (ЙБП) для традиційного приймача та після обробки за допомогою АНК.

Результати моделювання показали, що алгоритм ДПСІ ефективно виділяє корисний сигнал навіть за сильних імпульсних перешкод. При співвідношенні сигнал/шум понад 8 дБ досягнуто зменшення ЙБП з $2.5 \cdot 10^{-3}$ до $1.2 \cdot 10^{-5}$ що відповідає покращенню у понад 100 разів. Отримані результати підтверджують, що застосування АНК дозволяє підвищити завадозахищеність без потреби у додаткових каналах синхронізації чи попередньої оцінки характеристик середовища.

У роботі розглянуто метод аналізу незалежних компонент для підвищення завадостійкості СЗНЧ-систем. Запропонований алгоритм ДПСІ забезпечує значне зниження ЙБП при дії імпульсних і адитивних завад. АНК може бути інтегрований у цифрові приймачі для покращення їх стійкості без ускладнення апаратної реалізації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Hyvärinen A., Karhunen J., Oja E. Independent Component Analysis. Wiley-Interscience, 2001.
2. Comon P. Independent Component Analysis: a New Concept? Signal Processing, 36(3), 287–314, 1994.
3. Hyvärinen A. Fast and Robust Fixed-Point Algorithms for Independent Component Analysis. IEEE Trans. Neural Networks, 10(3), 626–634, 1999.

Ентін Ігор Іванович — аспірант групи 172-23а, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: igorentin90@gmail.com.

ANALYSIS OF INDEPENDENT COMPONENTS AS A METHOD OF INCREASING THE INTERFERENCE IMMUNITY OF COMMUNICATION SYSTEMS

Abstract.

The paper proposes a method for enhancing the interference immunity of frequency-hopping communication systems based on independent component analysis. The second-order blind identification algorithm was applied to separate useful signals from noise and interference. Simulation in GNU Octave showed a bit-error probability gain of more than 100 under strong impulse and Gaussian noise.

Keywords: noise immunity, frequency-hopping, independent component analysis, blind signal processing, impulse interference.

Entin Igor Ivanovich — postgraduate student of group 172-23a, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: igorentin90@gmail.com.

Полонська О. К.

AUDITING AND MONITORING ACCESS IN IAM SYSTEMS: ENSURING REGULATORY COMPLIANCE AND DETECTING ANOMALIES**Анотація**

В умовах зростаючих кіберзагроз критично важливим є ефективний контроль доступу до корпоративних даних. У статті розглядаються підходи до впровадження безперервного моніторингу та здійснення регулярного аудиту в системах управління ідентифікацією та доступом. Особливу увагу приділено використанню механізмів аналізу поведінки користувачів для швидкої ідентифікації аномалій та оперативного реагування на потенційні інциденти. Також пропонуються шляхи гармонізації внутрішніх політик інформаційної безпеки з актуальними регуляторними стандартами, що дає змогу суттєво знизити ризики несанкціонованого доступу та уникнути додаткових фінансових втрат через штрафи.

Ключові слова: аудит безпеки, моніторинг доступу, кібербезпека, виявлення аномалій, управління ідентифікацією.

Abstract

In the face of growing cyber threats, effective access control to corporate data is critically important. The article discusses approaches to implementing continuous monitoring and regular auditing in identity and access management systems. Particular attention is paid to the use of user behavior analysis mechanisms for rapid identification of anomalies and prompt response to potential incidents. It also suggests ways to harmonize internal information security policies with current regulatory standards, which allows significantly reducing the risks of unauthorized access and avoiding additional financial losses due to fines.

Keywords: security auditing, access monitoring, cybersecurity, Anomaly Detection, identity management.

In the development of a new generation of gadgets and technologies, it is difficult not to notice how quickly people are increasingly skillfully using technology to control, manage and ensure stability in the virtual environment of ordinary users' lives on the network. Identity and Access Management (IAM) is a system of policies, processes and technologies that helps manage digital identities and regulate user access to various resources in an organization. The term appeared in the 1990s, although it became widespread much later. Its functions are as follows: managing access to applications, databases, networks and individual files, if it needs to be configured on behalf of the administrator, which is called 'Centralized Management'. Auditing and accounting means monitoring the necessary, that is, permitted processes that are directly related to access. Authentication is the verification of the person who should be allowed access if the information about the person entered in the databases by the administrator of the settings. Authorization when the previous stage confirms that the person is "real", then this stage consists of determining what actions the user can perform according to the privileges (rights) granted to him. [1]

For cybersecurity, this system provides secure access to company resources such as databases, email and applications. Secure access is ensured using a combination of protocols, encryption algorithms and policies. The protocols used are OAuth 2.0 and OpenID Connect, where the first option is an access delegation that allows the user to grant third-party applications limited access to their data without transferring credentials, and the second option is a layer on top of OAuth 2.0 that adds authentication functionality, allowing clients to verify the user's identity and obtain basic information about them [2]. Encryption algorithms are used, namely: TLS/SSL, which encrypts data transmitted between the client and the server, ensuring the confidentiality and integrity of the connection. Password encryption, which focuses on modern hashing algorithms (e.g., bcrypt, scrypt) – for secure storage of passwords that cannot be recovered in their original form. Policies such as the "Principle of Least Privilege", which grants users only those permissions that are necessary to perform their tasks, which minimizes the potential harm from compromised credentials, and "multi-factor authentication (MFA)", which requires confirmation of the user's identity by multiple methods. The final component of software and hardware

security in this concept are 3 utilities: account administration, role management and user activity monitoring.

And speaking of IAM auditing, here are a few principles that are important and required of the responsible person performing this audit in the system:

1. Vulnerability detection: Find weaknesses in the access control system that can be exploited by attackers.

2. Regulatory Compliance: Ensure that the company complies with legal requirements and industry standards (e.g. GDPR, HIPAA) for data protection and access management.

3. Configuration Validation: Ensure that access rights are assigned correctly and comply with the principle of least privilege.

4. Activity Monitoring: Track and analyze user actions to detect suspicious or unauthorized behavior.

5. Process Optimization: Provide recommendations for improving identity and access management processes.

Let us move on to the very principle of operation of this important security system. Ensuring secure access to corporate resources involves two steps: identity management and access management.

Identity management: A login attempt is checked against a database that continuously records data about users with appropriate permissions. This data must be constantly updated due to employee turnover, changing roles and projects, and organizational scaling. Information recorded in the identity management database includes user names, job titles, manager or subordinate information, mobile phone numbers, and email addresses. Matching an employee's login information, such as username and password, with the identity information in the database is called authentication. Additional protections include: multi-factor authentication (a type of two-factor authentication) actor) – this requires only a mobile phone number, a gadget that directly reproduces the functionality of this number, or the user's email address. Access control is the second stage of IAM. In the first stage, IAM authenticates the identity of the user attempting to access, and in the second stage, it tracks the resources to which the user has permission. Most organizations provide different levels of access to resources and data, determined by factors such as position, length of service, security level, and project type [3]. Compliance with legal documents:

GDPR (General Data Protection Regulation) is a European Union Regulation that establishes rules for the processing and protection of personal data of EU citizens. Its purpose is to protect personal data, ensure citizens' rights to privacy, and manage the risks associated with this data. It applies to any organization that collects, stores, or processes personal data of EU residents. The only requirement is to obtain the user's consent to process the data, provide a privacy policy, and ensure data security.

ISO 27001 is an international standard that specifies requirements for establishing and maintaining an Information Security Management System (ISMS). Objective: to ensure the protection of a company's information assets, including the confidentiality, integrity and availability of data. Applies to any organization, regardless of size or type. Single Requirement: to identify and assess information security risks, implement appropriate controls and continually improve the security management system.

ISO 27001 compliance can help companies meet the requirements of the GDPR, as both standards are aimed at protecting information. ISO 27001 certification proves that a company has an effective information security management system, which strengthens the trust of customers and partners. [4]

GDPR, ISO 27001 and IAM (Identity and Access Management) are closely linked, as ISO 27001 provides the framework for establishing an Information Security Management System (ISMS) that encompasses IAM processes, while GDPR sets requirements for the protection of personal data that require strict access controls, such as through IAM. IAM is a key mechanism for complying with both standards, ensuring compliance with security policies, data access, role-based access control and auditing of user actions. [5]

Regarding the use and overall implementation of this system. Most organizations already have a basic identity management system in place, whether they recognize it as such or not. For example, Lightweight Directory Access Control (LDAP) or Active Directory can provide centralized user and password management. However, these solutions often lack the comprehensive functionality of an identity and access management system [2]. Regarding the financial plan, such a system is not

completely free, but there are free plans for basic needs (for example, up to 20 users in certain cloud versions). The cost is of course affected by the functionality, number of users, type of services and scale of the system itself. The main ways to use this system by students can be: creating different types of users (variety of roles or privileges for a specific person); applying JSON access policies (read-only for example); simulating scenarios from the smallest to the largest ‘highest’ privileges for the user, that is, in other words, the development of rights; CloudTrail log analysis (viewing log files) – a place where there is a record of successful and unsuccessful request attempts from specific users; simulating intentional denial of access (using restrictive policies) and attempting to perform prohibited actions.

REFERENCES

1. What is IAM? CircleCI. URL: [https://circleci.com/ru/topics/identity-access-management-iam/#:~:text=Управление%20идентификацией%20и%20доступом%20\(IAM,access%20k%20resursam%20vnoutery%20sistemy.](https://circleci.com/ru/topics/identity-access-management-iam/#:~:text=Управление%20идентификацией%20и%20доступом%20(IAM,access%20k%20resursam%20vnoutery%20sistemy.) (access date: 03.11.2025).
2. What is Identity and Access Management?. ISSP Training. URL: <https://www.issp.training/post/shcho-take-keruvannya-identyfikatsiyeyu-ta-dostupom> (access date: 03.11.2025).
3. What is an identity and access management system? | Microsoft Security Complex. Your request has been blocked. This could be due to several reasons. URL: <https://www.microsoft.com/uk-ua/security/business/security-101/what-is-identity-access-management-iam> (access date: 03.11.2025).
4. GDPR requirements and ISO 27001 standard. SIM-Networks – Dedicated Servers, Cloud Servers, VPS for Business. Your Goals, our Tech. URL: <https://www.sim-networks.com/ukr/blog/gdpr-requirements-and-iso-27001-standard#:~:text=Certification%20according%20to%20ISO%2027001,number%20of%20legislative%20acts,%20in particular%20GDPR> . (access date: 03.11.2025).
5. Obtaining ISO 27001 Certification for information technology. MILITARY LAWYER - LEGAL ASSISTANCE FOR MILITARY SERVICEMEN. URL: <https://inseinin.com.ua/tpost/6u8k0ho361-otrimannya-sertifkats-iso-27001-nformats#:~:text=What%20is%20ISO%2027001?,development%20of%20measures%20to%20minimize%20them> . (date of application: 03.11.2025).

Полонська Олена – курсант, Інститут спеціального зв’язку та захисту інформації, Національний Технічний Університет України “Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського”, м. Київ, c049smarttab@gmail.com

– cadet, Institute of Special Communications and Information Protection, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, c049smarttab@gmail.com

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ MLAT ДЛЯ МОДЕРНІЗАЦІЇ РАДІОТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОЛЬОТІВ

¹ Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба;

² Карпатський національний університет імені Василя Стефаника

Анотація

Запропоновано використання технології MLAT для модернізації радіотехнічного забезпечення польотів. Також проаналізовано перспективи використання у технології MLAT широкосмужових сигналів, що дозволить підвищити надійність, завадостійкість і скритність системи радіотехнічного забезпечення польотів.

Ключові слова: MLAT, аналіз, система, завадостійкість, надійність, скритність, широко-смужовий сигнал.

Abstract

The use of MLAT technology for the modernization of radio support of flights is proposed. The prospects for the use of broadband signals in MLAT technology are also analyzed, which will allow increasing the reliability, noise immunity and stealth of the radio-technical support system of flights.

Keywords: MLAT, analysis, system, noise immunity, reliability, stealth, wideband signal.

Вступ

MLAT – це система визначення місцеположення об'єкту (літака чи наземного транспортного засобу) шляхом вимірювання різниці часу приходу (TDOA) радіосигналу, випромінюваного об'єктом, на декілька (мінімум 3 для 2D, мінімум 4 для 3D [1, 2]) наземних приймальних станцій з точно синхронізованим часом [3-5]. MLAT використовується для вирішення складних радіотехнічних та обчислювальних проблем [6-7], і є однією із перспективних технологій для модернізації системи радіотехнічного забезпечення польотів [8-10]. Метою роботи є аналіз параметрів технології MLAT та розробки методу підвищення скритності системи радіотехнічного забезпечення польотів.

Результати дослідження

Технологія MLAT використовує визначення місцеположення повітряних об'єктів на основі вимірювання відстаней від нього до точок, координати яких відомі. На відміну від триангуляційних методів, такий підхід не передбачає вимірювання кутових величин. Тому реалізація MLAT не потребує вузькоспрямованих антен. Оскільки точок, відносно яких виконуються вимірювання, завжди декілька, тобто реалізується наземна багатопозиційна навігація.

Основні технічні аспекти MLAT:

- різниця часу приходу сигналу між двома приймачами відповідає гіперболоїду (у 3D), на якому лежить об'єкт. Перетин множини таких гіперболоїдів (створених парами приймачів) дозволяє точно визначити координати (x,y,z);

- використовує наявні імпульсні передачі літака, відповіді або автоматичні передачі від транспондерів SSR Mode A/C, Mode S та ADS-B (1090 МГц) [1, 2]. Ці сигнали є кодованими імпульсами, що мають відносно широку смугу (порядку 1 МГц) порівняно з вузькосмужовими навігаційними системами;

- для досягнення точності позиціонування на рівні одиниць метрів, необхідна синхронізація між наземними станціями з точністю до наносекунд (для 1 метра похибки потрібна точність $1 \text{ м} / (3 \times 10^8 \text{ м/с}) \approx 3.3 \text{ нс}$). Зазвичай, використовується високоточна синхронізація за допомогою GNSS-приймачів на кожній станції [1, 2];

- точність позиціонування залежить від трьох ключових факторів: 1) точність вимірювань (TDOA); 2) геометрія системи (Dilution of Precision, DOP); 3) алгоритм локалізації.

Декілька частотних діапазонів можуть використовуватися для застосування технології MLAT на

аеродромах для виявлення рухомих об'єктів, які можуть стати перешкодами для руху літаків по території аеропорту. З цією метою на кожному аеродромному транспортному засобі встановлюється прийомопередавач за аналогією з тим, як це зроблено на літаках. Інформація про місцезнаходження транспортного засобу має два незалежні джерела: приймач GPS, інтегрований у транспондер, і дані, отримані за допомогою технології MLAT.

Можливі варіанти застосування широко-смугових сигналів (ШСС) у технології MLAT:

- у біляаеродромних зонах відбиття від будівель створюють хибні часові затримки, що є головним джерелом помилок. Використання ШСС дозволило б підвищити роздільну здатність за часом, і застосовувати складні алгоритми подавлення багатопроменевості (наприклад, на основі узгодженої фільтрації тощо);

- обмеження геометрії розміщення приймачів через особливості поширення сигналів. Використання ШСС дозволило б розширити території розміщення приймачів, враховуючи особливості передавання ШСС;

- нелінійні спотворення сигналів. Використання ШСС дозволило б розробка та впровадження адаптивних алгоритмів оцінювання позицій об'єктів, стійких спотворень, перекручувань тощо.

Висновки

Показано, що застосування широко-смугових сигналів у технології MLAT дозволить: підвищити роздільну здатність за часом, розширити території розміщення приймачів, впровадження адаптивних алгоритмів оцінювання позицій об'єктів тощо. Загальне використання широко-смугових сигналів у MLAT підвищує надійність, завадостійкість і скритність системи радіотехнічного забезпечення польотів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ICAO: Airport Ground Vehicle Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (ADS-B) Out Squitter Equipment. 11/14/2011.
2. Державна авіаційна служба України. Авіаційні правила України. Нормативні документи щодо аеронавігаційного забезпечення польотів. Київ: ДАСУ, 2023.
3. Оцінка якості радіолокаційної інформації систем залежного кооперативного спостереження / І. В. Свид, та інші // Радіотехніка : Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. – Харків, 2024. – Вип. 216. – С. 131–136. - DOI: 10.30837/rt.2024.1.216.14.
4. Свид І. В. Обробка радіолокаційної інформації систем спостереження повітряного простору: монографія. / І. В. Свид. Дніпро : ЛПРА ЛТД, 2022. 224 с.
5. І. В. Свид, А. І. Обод. Інформаційні технології обробки даних систем спостереження. // Системи управління, навігації та зв'язку. Полтава, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, 2016. Вип. 4 (40). С. 91-93.
6. Свид І. В., Обод І. І. Завадостійкість радіолокаційних систем ідентифікації за ознакою «свій-чужий»: монографія. / І. В. Свид, І. І. Обод. Харків : Друкарня Мадрид, 2021. 254 с.
7. Svyd I. and at. Assessment of information support quality by "friend or foe" identification systems. Przegląd Elektrotechniczny. 2019. Vol. 1, no. 4. P. 129–133. URL: <https://doi.org/10.15199/48.2019.04.22>.
8. Svyd I. V., Tkach M. G., Obod I. I. Comparative analysis of interference protection of "Friend-Foe" radar identification systems. Radiotekhnika. 2022. No. 211. P. 101–113. URL: <https://doi.org/10.30837/rt.2022.4.211.08>
9. Andrusievych V., Obod I. Assessment of the quality of information support by air radar surveillance systems. Advanced Information Systems. 2021. Vol. 5, no. 2. P. 78–82. URL: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.2.10>.
10. Обод І.І., Стрельницький О.О., Андрусевич В.А. Інформаційна мережа систем спостереження повітряного простору. Харків : ХНУРЕ, 2015. 270 с.

Кащенко Віталій Олександрович — слухач групи 463С, факультет автоматизованих систем управління та наземного забезпечення польотів авіації, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, e-mail: kasenkovitalik70@gmail.com.

Свид Ірина Вікторівна — к.т.н., доцент, доцент кафедри авіаційних радіотехнічних систем навігації та посадки, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків; професор кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника, м. Івано-Франківськ.

Kaschenko Vitalii — student of group 463C, Faculty of Automated Control Systems and Ground Support of Aviation, Kharkiv National Air Force University named after Ivan Kozhedub, Kharkiv, email: kasenkovitalik70@gmail.com.

Svyd Iryna — PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Aviation Radio Navigation and Landing Systems, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv; Professor of the Department of Computer Engineering and Electronics, Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Ivano-frankivsk.

ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО НАВАНТАЖЕННЯ В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ

¹ Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглянуто підходи до прогнозування та оптимізації інформаційного навантаження в телекомунікаційних мережах нового покоління. Показано, що зростання обсягів і різноманітності трафіку у гетерогенних системах ускладнює управління ресурсами та забезпечення необхідного рівня якості обслуговування (QoS). Для підвищення ефективності функціонування мереж запропоновано застосування гібридних моделей прогнозування, які поєднують статистичні (ARIMA, GARCH) та інтелектуальні (LSTM, DNN) підходи. Проведено аналіз коротко- та довгострокових методів прогнозування, а також оцінено вплив самоподібності й мультифрактальності трафіку на точність передбачення. Результати моделювання показали, що комбіновані моделі дозволяють знизити середньоквадратичну похибку прогнозу на 10–15 % порівняно з традиційними статистичними підходами. Запропоновані методи можуть бути використані для інтелектуального управління ресурсами, балансування навантаження та підвищення стабільності роботи мереж 5G і 6G.

Ключові слова: прогнозування трафіку, гібридна модель, гетерогенна мережа, оптимізація ресурсів.

Abstract

The paper considers approaches to forecasting and optimizing information load in next-generation telecommunication networks. It is shown that the increasing volume and heterogeneity of traffic in heterogeneous systems complicate resource management and the provision of the required Quality of Service (QoS) level. To enhance network performance efficiency, the use of hybrid forecasting models combining statistical (ARIMA, GARCH) and intelligent (LSTM, DNN) approaches is proposed. Short-term and long-term forecasting methods are analyzed, and the influence of traffic self-similarity and multifractality on prediction accuracy is evaluated. The modeling results demonstrate that combined models can reduce the mean square forecasting error by 10–15% compared to traditional statistical approaches. The proposed methods can be applied for intelligent resource management, load balancing, and improving the operational stability of 5G and 6G networks.

Keywords: traffic forecasting, hybrid model, heterogeneous network, resource optimization.

Вступ

Сучасні телекомунікаційні системи характеризуються високим рівнем гетерогенності, динамічністю та зростанням обсягів різноманітного інформаційного трафіку. Це ускладнює процеси його оброблення, маршрутизації та управління, що, у свою чергу, створює додаткові виклики щодо забезпечення необхідної якості обслуговування (QoS) в умовах інтенсивного інформаційного навантаження. Ефективне прогнозування динаміки трафіку є ключовим чинником для оптимізації розподілу ресурсів, балансування навантаження та запобігання перевантаженням у телекомунікаційних мережах [1].

Складність моделювання полягає у необхідності врахування коротко- та довгострокових залежностей, самоподібності та мультифрактальних властивостей трафіку, притаманних сучасним інфокомунікаційним системам. Зменшення похибки прогнозу безпосередньо впливає на стабільність роботи мережі та ефективність використання її ресурсів [2].

Серед сучасних підходів до прогнозування мережевого трафіку особливу увагу приділено методам, заснованим на штучних нейронних мережах, зокрема архітектурам LSTM, які здатні ефективно відтворювати часові залежності. Водночас у сценаріях з обмеженими обчислюваль-

ними ресурсами, таких як середовища Mobile Edge Computing (MEC), доцільним є застосування статистичних або гібридних моделей — ARIMA, ARIMA–GARCH, що забезпечують високу точність короткострокового прогнозу при мінімальних обчислювальних витратах [3].

Актуальність дослідження зумовлена потребою у створенні гібридних моделей прогнозування інформаційного навантаження, що поєднують статистичні та інтелектуальні підходи. Це дозволить підвищити точність оцінювання майбутніх станів мережі, забезпечити адаптивне управління ресурсами та підвищити якість обслуговування користувачів у мережах 5G і 6G.

Результати дослідження

У результаті проведеного аналізу методів прогнозування мережевого трафіку встановлено, що ефективне управління ресурсами гетерогенних мереж потребує використання адаптивних моделей, здатних враховувати нелінійність, самоподібність і стохастичний характер трафіку. Порівняльна оцінка показала, що класичні статистичні моделі (ARIMA, SARIMA, FARIMA) забезпечують високу точність короткострокових прогнозів за умови стаціонарності даних, тоді як нейромережеві підходи (DNN, LSTM, GNN) демонструють кращі результати для складних, динамічних і багатовимірних мережесценаріїв [4].

Результати моделювання підтвердили, що комбіновані (гібридні) методи, зокрема ARIMA/GARCH або ARIMA-LSTM, здатні істотно підвищити точність прогнозу завдяки одночасному урахуванню трендів, сезонності та змінної дисперсії трафіку. Для задач короткострокового прогнозування у реальному часі найбільш доцільним є використання статистичних моделей, тоді як для довгострокового планування навантаження, оптимізації пропускну здатності та адаптивного розподілу ресурсів доцільно застосовувати моделі машинного навчання [5].

Проведений аналіз підтвердив, що властивість самоподібності мережевого трафіку суттєво впливає на точність прогнозування. Для її урахування доцільно використовувати моделі з авторегресійною умовною гетероскедастичністю (GARCH) або їх модифікації, здатні моделювати змінну дисперсію й «сплески» трафіку. Крім того, моделі, що базуються на рекурентних нейронних мережах (RNN, LSTM), виявилися ефективними для відображення довготривалих часових залежностей у гетерогенних мережах [6].

Запропонований ітеративний підхід до побудови прогнозних моделей, який включає етапи ідентифікації, оцінювання параметрів і валідації, забезпечує системне формування моделей для різних типів даних і дозволяє оптимізувати процес навчання. Експериментальні результати засвідчили, що використання поєднання методів машинного навчання та статистичного аналізу знижує середньоквадратичну похибку прогнозу (MSE) на 10–15 % порівняно з традиційними параметричними моделями [7].

Отримані результати можуть бути використані при розробленні інтелектуальних систем управління ресурсами у гетерогенних телекомунікаційних мережах, системах MEC та 5G/6G-інфраструктурах для забезпечення стабільності роботи мережі, зниження затримок і підвищення рівня якості обслуговування (QoS).

Висновки

Проведений аналіз сучасних досліджень показав, що зростання обсягів та різноманітності інформаційного трафіку в гетерогенних телекомунікаційних мережах ускладнює процеси управління ресурсами й забезпечення якості обслуговування (QoS). Для підвищення ефективності функціонування мереж необхідне впровадження методів прогнозування динаміки трафіку.

Встановлено, що моделі на основі часових рядів є ефективним інструментом для аналізу й передбачення поведінки трафіку, однак потребують урахування його нестаціонарності, багатокомпонентності та випадкових коливань. Аналіз часових рядів дозволяє виявляти тренди, сезонні коливання та випадкові відхилення, що є основою для прийняття рішень щодо управління мережею.

Показано, що для короткострокового прогнозування доцільно застосовувати статистичні моделі, зокрема ARIMA, які характеризуються невисокими обчислювальними витратами та придатністю для реалізації в режимі реального часу. Для довгострокових прогнозів більш ефективними є структурні та інтелектуальні моделі, що здатні враховувати складні часові залежності.

Визначено, що самоподібність і мультифрактальність є характерними властивостями сучасного мережевого трафіку. Тому при побудові моделей прогнозування необхідно враховувати як короткострокові, так і довгострокові часові залежності, що забезпечує більш точне відтворення динаміки мережевого навантаження.

Запропоновано використання ітераційного підходу до побудови прогнозних моделей, який дозволяє послідовно вдосконалювати структуру моделі, підвищуючи точність відображення часових залежностей у даних.

Проаналізовано застосування штучних нейронних мереж для прогнозування мережевого трафіку. Показано, що рекурентні нейронні мережі (RNN) і, особливо, їх модифікації типу LSTM ефективно моделюють часові залежності та забезпечують високу точність прогнозу для динамічних і нелінійних процесів у телекомунікаційних системах.

Узагальнено переваги та недоліки існуючих підходів. Статистичні моделі забезпечують простоту реалізації та швидкість обчислень, тоді як нейромережеві — вищу точність і адаптивність до складних залежностей. Поєднання цих підходів у гібридних моделях є перспективним напрямом підвищення ефективності прогнозування та оптимізації інформаційного навантаження в мережах 5G і 6G.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Rukkas, K., Morozova, A., Uzlov, D., Kuznietcova, V., & Chumachenko, D. (2024). "Optimizing information support technology for network control: a probabilistic-time graph approach". *Radioelectronic and Computer Systems*.
2. Dobruna, J., Limani Fazliu, Z., Humar, I., & Volk, M. (2025). "On Optimizing Resource Allocation: A Comparative Review of Resource Allocation Strategies in HetNets". *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 142(3).
3. Trofymchuk, V. (2025). "Development of a Mathematical Model to Improve the Efficiency of Telecommunication Networks". *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 4(2), 26-38.
4. "Algorithms for Load Balancing in Next-Generation Mobile Networks: A Systematic Literature Review". Ochoa-Aldeán, J., Silva-Cárdenas, C., Torres, R., González, J. I., & Fortes, S. (2025).
5. Zhang, Y., Ding, F., Liu, F., Jiang, S., & Wu, W. (2025). "Incorporated flexible load forecasting based on non-intrusive load monitoring: a TCN-based meta learning approach". *Frontiers in Energy Research*
6. Васильківський М. В. Керування телекомунікаційними мережами з використанням технологій AI/ML [Текст] / М. В. Васильківський, О. Болдирева, Г. Варгатюк, М. Будаш // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2023. – Вип. 1. – С. 89–100.
7. Васильківський М. В. Коригування параметрів мобільних систем МІМО із використанням штучного інтелекту [Текст] / М. Васильківський, О. Болдирева, Г. Варгатюк, Н. Грабчак // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. – 2023. – № 51. – С. 139-147.

Васильківський Микола Володимирович — кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних систем і технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: mvasylkivskyi@gmail.com

Олійник Андрій Олегович — аспірант групи 172-22а, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: w0lfend00@gmail.com

Вальдшмідт Володимир Олександрович — студент групи TCM-24м, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: Vladimirvaldsmidt@gmail.com

Vasyilkivskyi Mykola V. — candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Information Communication Systems and Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: mvasylkivskyi@gmail.com

Oliinyk Andrii O. — graduate student of group 172-22a, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: w0lfend00@gmail.com

Valdshmidt Volodymyr O. - student of group TSN-24m, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: Vladimirvaldsmidt@gmail.com

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ БЕЗДРОТОВІ MESH-МЕРЕЖІ

¹ Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі досліджено принципи побудови та вдосконалення алгоритмів маршрутизації в бездротових сіткових мережах (Wireless Mesh Networks, WMN), які розглядаються як перспективна основа телекомунікаційних систем нового покоління. Проаналізовано сучасні підходи до організації маршрутизації, зокрема адаптацію алгоритмів, розроблених для мобільних мереж ad hoc (MANET), до особливостей архітектури WMN. Показано, що традиційні протоколи, орієнтовані на мінімізацію кількості переходів, не забезпечують оптимального використання ресурсів, тому необхідним є впровадження мультифакторних метрик, які враховують якість каналу, пропускну здатність, затримки, рівень завад та енергоефективність.

Обґрунтовано доцільність використання міжрівневого (cross-layer) підходу до побудови інтелектуальних алгоритмів маршрутизації, які забезпечують адаптацію мережі до динамічних змін топології та навантаження. Запропоновано концепцію децентралізованого оновлення топології з використанням комбінованих механізмів передачі службових даних, що дозволяє підвищити точність маршрутизації та зменшити накладні витрати.

Розглянута узагальнена модель маршрутизації для інтелектуальних WMN передбачає використання адаптивних, розподілених ієрархічних алгоритмів, інтеграцію елементів штучного інтелекту для самоорганізації, прогнозування стану каналів і вибору оптимальних маршрутів. Отримані результати підтверджують, що підвищення ефективності маршрутизації в сіткових мережах можливе шляхом комплексного урахування міжрівневих параметрів, оптимізації ресурсів і впровадження інтелектуальних механізмів керування трафіком.

Ключові слова: бездротова сіткова мережа, маршрутизація, інтелектуальний алгоритм, міжрівнева взаємодія, якість обслуговування (QoS), оптимізація ресурсів.

Abstract

The paper explores the principles of designing and improving routing algorithms in Wireless Mesh Networks (WMN), which are considered a promising foundation for next-generation telecommunication systems. Modern approaches to routing organization are analyzed, including the adaptation of algorithms developed for mobile ad hoc networks (MANET) to the architectural features of WMN. It is shown that traditional protocols focused on minimizing the number of hops do not ensure optimal resource utilization; therefore, the implementation of multifactor metrics that consider channel quality, throughput, delay, interference level, and energy efficiency is necessary.

The feasibility of using a cross-layer approach to develop intelligent routing algorithms is substantiated. Such algorithms enable network adaptation to dynamic changes in topology and traffic load. A concept of decentralized topology updating is proposed, utilizing combined mechanisms for control data exchange, which improves routing accuracy and reduces overhead.

The proposed generalized routing model for intelligent WMNs involves the use of adaptive, distributed, and hierarchical algorithms, as well as the integration of artificial intelligence elements for self-organization, channel state prediction, and optimal route selection. The obtained results confirm that improving routing efficiency in mesh networks is achievable through comprehensive consideration of cross-layer parameters, resource optimization, and the implementation of intelligent traffic management mechanisms.

Keywords: wireless mesh network, routing, intelligent algorithm, cross-layer interaction, quality of service (QoS), resource optimization.

Вступ

Сучасний розвиток телекомунікаційних систем і зростання попиту на високошвидкісний бездротовий доступ до мережевих ресурсів зумовили інтенсивний розвиток багатоперехідних бездротових мереж (Wireless Mesh Networks, WMN). Такі мережі розглядаються як перспективна технологічна основа для побудови інфраструктури наступного покоління, здатної забезпечити гнучкість, надійність і масштабованість передавання даних у різноманітних середовищах [1].

На відміну від традиційних однохопових систем, WMN функціонують за принципом багатохопової маршрутизації, що дозволяє підвищити ефективність використання спектра, розширити зону покриття та підвищити стійкість до відмов окремих вузлів. Однак реалізація цих переваг супроводжується низкою складних технічних викликів, серед яких ключове місце посідає побудова оптимальних алгоритмів маршрутизації [2].

Алгоритми маршрутизації в бездротових сіткових мережах є центральним елементом їхньої архітектури, адже саме вони визначають шляхи передавання даних і забезпечують баланс між пропускну здатністю, затримкою, енергоспоживанням та надійністю. Процес маршрутизації у WMN ускладнюється динамічною зміною топології, впливом завад, взаємними перешкодами між вузлами, а також необхідністю урахування параметрів фізичного та канального рівнів [3].

Класичні алгоритми, розроблені для мобільних мереж типу ad hoc (MANET), не завжди ефективні у WMN через відмінності у структурі та призначенні мереж. Тому актуальним завданням є розроблення інтелектуальних алгоритмів маршрутизації, здатних адаптуватися до змінного середовища, забезпечувати необхідний рівень якості обслуговування (QoS) та оптимальний розподіл ресурсів між вузлами мережі [4].

Подальше підвищення ефективності маршрутизації у WMN пов'язане з упровадженням міжрівневої взаємодії (cross-layer interaction) та використанням методів штучного інтелекту для самоорганізації, прогнозування стану каналів і вибору оптимальних маршрутів. Це дозволяє створювати інтелектуальні бездротові Mesh-мережі, здатні до самонавчання, адаптації та оптимізації роботи в реальному часі [5].

Таким чином, дослідження принципів побудови та вдосконалення інтелектуальних алгоритмів маршрутизації у бездротових сіткових мережах є важливим напрямом розвитку телекомунікаційних систем нового покоління, що сприятиме підвищенню ефективності використання мережевих ресурсів і якості надання послуг зв'язку.

Результати дослідження

У ході дослідження встановлено, що бездротові сіткові мережі (Wireless Mesh Networks, WMN) поєднують властивості ad hoc-мереж і стаціонарних інфраструктурних систем, що зумовлює специфічні вимоги до організації маршрутизації на мережевому рівні. Проведений аналіз показав, що існуючі алгоритми маршрутизації, запозичені з MANET, не можуть бути безпосередньо застосовані в WMN через відмінності у структурі, мобільності вузлів і вимогах до енергоспоживання [6].

Розглянуті сучасні протоколи маршрутизації, такі як AODV, DSR, TBRPF, продемонстрували різні підходи до формування маршрутів і підтримання топології. У стандарті IEEE 802.11s протокол AODV використовується як базовий механізм маршрутизації, що підтверджує його ефективність у багатоперехідних бездротових системах. Проте виявлено, що традиційні метрики маршрутизації, орієнтовані на мінімізацію кількості переходів (hop count), не забезпечують оптимального використання ресурсів у WMN [1, 2].

Обґрунтовано, що для досягнення високої ефективності функціонування сіткових мереж необхідно застосовувати мультифакторні метрики, які враховують якість з'єднання, пропускну здатність, затримки, рівень завад та енергоефективність. Такий підхід дозволяє мінімізувати перевантаження окремих вузлів, забезпечити балансування трафіку та підвищити загальну стабільність мережі [3].

Дослідження підтвердило доцільність використання міжрівневого (cross-layer) підходу до проєктування алгоритмів маршрутизації, який передбачає взаємодію між мережевим, канальним і фізичним рівнями. Це дозволяє реалізувати адаптивні рішення, що враховують зміни топології, навантаження та параметри каналу в реальному часі.

Розроблена концепція виявлення та оновлення топології на основі децентралізованих меха-

нізмів забезпечує точне відображення структури мережі без суттєвого збільшення службового трафіку. Оптимізація процесів обміну топологічною інформацією досягається за рахунок комбінованого використання широкомовних і унікастних передач, а також залучення географічних координат для підвищення точності маршрутизації [4].

Результати оцінювання ефективності алгоритмів маршрутизації вказують, що головними критеріями оптимізації для WMN є QoS, пропускна здатність, стабільність маршрутів і справедливність розподілу ресурсів між потоками трафіку. Побудовано класифікацію параметрів ефективності за рівнями впливу — від одиничного потоку до всієї мережі, що дозволило систематизувати підходи до комплексного оцінювання продуктивності [5].

Удосконалена модель маршрутизації для інтелектуальних WMN передбачає: використання розподілених адаптивних алгоритмів замість централізованих рішень; впровадження гнучких топологічних механізмів, що реагують на зміни структури мережі; застосування ієрархічної маршрутизації для підвищення масштабованості системи; урахування інформації про якість каналу та завантаження вузлів під час вибору маршруту; інтеграцію елементів інтелектуального керування трафіком, які забезпечують самооптимізацію мережі [6].

Загалом, результати дослідження підтверджують, що ефективність маршрутизації в інтелектуальних бездротових mesh-мережах визначається узгодженістю топологічного аналізу, гнучким управлінням ресурсами та здатністю алгоритмів до адаптації в динамічному середовищі. Подальші дослідження мають бути спрямовані на розроблення інтелектуальних, навчальних алгоритмів маршрутизації, які поєднують методи штучного інтелекту, машинного навчання та багаторівневої оптимізації для підвищення автономності та продуктивності мереж нового покоління.

Висновки

У результаті проведеного аналізу теоретичних засад маршрутизації в бездротових сіткових мережах (Wireless Mesh Networks, WMN) можна сформулювати такі основні висновки:

Адаптація алгоритмів MANET. Алгоритми маршрутизації, розроблені для мобільних мереж типу ad hoc (MANET), можуть бути частково адаптовані для WMN завдяки схожості топологічних принципів і способів обміну даними. Проте через відмінності у мобільності вузлів, енергоспоживанні та функціональному призначенні елементів мережі пряме використання таких алгоритмів є обмеженим і потребує відповідної модифікації.

Фактори, що ускладнюють маршрутизацію. Ефективність функціонування WMN знижується через динамічність топології, взаємні перешкоди між вузлами, необхідність балансування навантаження, динаміку трафіку та міжрівневу залежність параметрів мережевої моделі. Це вимагає створення адаптивних алгоритмів маршрутизації, здатних гнучко реагувати на змінні умови середовища.

Ключові принципи побудови ефективних алгоритмів. Оптимізація процесів маршрутизації повинна ґрунтуватися на децентралізованому управлінні маршрутами, актуалізації топологічної інформації в реальному часі та використанні динамічних метрик, які враховують якість каналів, затримки, рівень завад і завантаження вузлів. При цьому важливо забезпечити масштабованість системи та мінімізацію службових накладних витрат.

Виявлення топології. Для підтримання коректності маршрутів доцільним є застосування адаптивних методів виявлення топології, що поєднують точність оновлення з мінімізацією службового трафіку. Найбільш ефективним підходом є децентралізований обмін топологічними даними між сусідніми вузлами за допомогою широкомовних або унікастових повідомлень, незалежно від частотного діапазону.

Метрики ефективності. Оцінювання якості маршрутизації повинно проводитися за комплексом параметрів, серед яких показники QoS, пропускна здатність, затримка, енергоефективність і справедливність розподілу ресурсів. Жоден окремий критерій не може відобразити повну ефективність, тому необхідне багатфакторне оцінювання.

Еволюція метрик. Традиційна метрика hop-count не відображає реальних характеристик якості з'єднання. Використання багаторівневих метрик, що враховують параметри фізичного, канального та мережевого рівнів, забезпечує підвищену стабільність і адаптивність мережі.

Перспективи розвитку. Подальше вдосконалення алгоритмів маршрутизації у WMN перед-

бачає розроблення крос-рівневих моделей взаємодії між MAC-, мережевим і транспортним рівнями, створення розподілених ієрархічних протоколів та впровадження адаптивних метрик, що інтегрують параметри QoS, енергоефективності й стабільності з'єднання.

Узагальнюючи, ефективна маршрутизація в інтелектуальних бездротових сіткових мережах нового покоління має базуватися на поєднанні точного виявлення топології, динамічної адаптації маршрутів і комплексного багатопараметричного аналізу ефективності. Такий підхід забезпечує високу продуктивність, надійність і гнучкість мережі за умов мінімальних службових витрат і підвищеного навантаження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Azzoug, Y., & Boukra, A., (2021). Bio-inspired VANET routing optimization: An overview. *Artificial Intelligence Review*, 54(2), 1005–1062.
2. Kartal, F., & Özveren, U., (2020). A deep learning approach for prediction of syngas lower heating value from CFB gasifier in Aspen plus®. *Energy*, 209, 118457.
3. Lata, A. A., & Kang, M., (2020). A survey on the evolution of opportunistic routing with asynchronous duty-cycled MAC in wireless sensor networks. *Sensors*, 20(15), 4112.
4. Ozonoh, M., Oboirien, B. O., & Daramola, M. O., (2020). Optimization of process variables during torrefaction of coal/biomass/waste tyre blends: Application of artificial neural network & response surface methodology. *Biomass and Bioenergy*, 143, 105808.
5. Васильківський М. В. Керування телекомунікаційними мережами з використанням технологій AI/ML [Текст] / М. В. Васильківський, О. Болдирева, Г. Варгатюк, М. Будаш // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2023. – Вип. 1. – С. 89–100.
6. Васильківський М. В. Коригування параметрів мобільних систем МІМО із використанням штучного інтелекту [Текст] / М. Васильківський, О. Болдирева, Г. Варгатюк, Н. Грабчак // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. – 2023. – № 51. – С. 139-147.

Васильківський Микола Володимирович — кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних систем і технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: mvasylkivskyi@gmail.com

Грабчак Назарій Віталійович — аспірант групи 172-23а, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: nazarihrabchak@gmail.com

Березюк Олег Федорович — студент групи ТСМ-24м, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: oleh.ber36@gmail.com

Vasylkivskyi Mykola V. — candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Information Communication Systems and Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: mvasylkivskyi@gmail.com

Hrabchak Nazarii V. — graduate student of group 172-23a, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: nazarihrabchak@gmail.com

Bereziuk Oleh F. - student of group TSN-24m, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: oleh.ber36@gmail.com

М. Ю. Дмитрук ¹

О. В. Онищук ²

Д. В. Карлов ²

ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ НА ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ

¹ Вінницький національний технічний університет

² Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба

Анотація

У доповіді розглядається інноваційний підхід до підвищення надійності інфокомунікаційних мереж шляхом використання технологій штучного інтелекту для прогнозування аварійних ситуацій. Запропонований підхід ґрунтується на застосуванні алгоритмів машинного навчання та нейронних мереж для аналізу великих обсягів даних і виявлення потенційних відмов мережевого обладнання. Використання інтелектуальних систем моніторингу дозволяє своєчасно ідентифікувати аномалії, мінімізувати ризики збоїв та підвищити ефективність управління інфраструктурою. Представлено огляд сучасних методів прогнозування, їх переваги, а також перспективні напрямки подальшого вдосконалення систем моніторингу інфокомунікаційних мереж.

Ключові слова: штучний інтелект, інфокомунікаційні мережі, прогнозування, аварійні ситуації, машинне навчання, нейронні мережі, моніторинг, надійність, аналіз даних.

Abstract

The report considers an innovative approach to increasing the reliability of infocommunication networks by using artificial intelligence technologies to predict emergency situations. The proposed approach is based on machine learning and neural network software algorithms to analyze large amounts of data and identify detected failed network devices. The use of intelligent monitoring systems allows you to safely identify anomalies, minimize the risks of failures and increase the efficiency of infrastructure management. An overview of modern forecasting methods, their advantages, as well as promising areas for further improvement of the infocommunication network monitoring system is presented.

Keywords: artificial intelligence, infocommunication networks, forecasting, emergencies, machine learning, neural networks, monitoring, reliability, data analysis.

Сучасні інфокомунікаційні мережі є складними багаторівневими системами, від безперебійної роботи яких залежить функціонування критично важливої інфраструктури, зокрема енергетики, транспорту, банківських систем та засобів зв'язку [1]. В умовах зростання кількості інфокомунікаційних мереж та збільшення кількості задіяного обладнання підвищується ризик виникнення аварійних ситуацій, що потребує впровадження інтелектуальних систем моніторингу та прогнозування. [2]

У цьому контексті особливої актуальності набуває розвиток технологій штучного інтелекту, які дедалі ширше застосовуються у різних галузях — від медицини та енергетики до телекомунікацій.

Використання алгоритмів машинного навчання, глибоких нейронних мереж і методів обробки великих даних забезпечує здатність систем самостійно аналізувати інформаційні потоки, виявляти приховані закономірності та приймати рішення без безпосереднього втручання людини [3]. У сфері інфокомунікацій штучний інтелект стає ключовим інструментом для автоматизації процесів управління, прогнозування відмов обладнання та підвищення ефективності функціонування мереж.

Застосування методів штучного інтелекту, зокрема машинного навчання та нейронних мереж, дозволить здійснювати раннє виявлення аномалій у роботі мережі на основі аналізу великих обсягів даних. Алгоритми класифікації та прогнозування, що базуються на основі минулих аварійних ситуацій, можуть визначати ймовірність виникнення аварії та попереджати операторів про потенційні ризики [4].

Для реалізації таких систем необхідне застосування моделей глибокого навчання, рекурентні нейронні мережі (RNN, LSTM) та багатоваріантні мережі, які забезпечують точне прогнозування змін у параметрах трафіку й стані мережевого обладнання. Важливою складовою є інтеграція інтелектуальних систем із системами моніторингу (SNMP, NetFlow, Zabbix) для автоматизованого аналізу даних у реальному часі [5].

Впровадження штучного інтелекту у процес прогнозування аварійних ситуацій підвищить надійність, безпеку інфокомунікаційних мереж та експлуатаційну стійкість, зменшить витрати на технічне обслуговування та скоротить час реагування на інциденти.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Куліш О. В. Інформаційні системи та мережі. — Київ : Кондор, 2021. — 312 с.
2. Величко В. В., Бондаренко І. М. Надійність і живучість інфокомунікаційних систем. — Харків : ХНУРЕ, 2020. — 276 с.
3. Дьяконов В. П. Штучний інтелект. Велика енциклопедія. — Київ : Діалектика, 2020. — 640 с.
4. Гнатюк С. О. Штучний інтелект у системах кібербезпеки // Наукові праці Одеської національної академії зв'язку ім. О. С. Попова. — 2022. — № 2. — С. 45–52.
5. Пилипенко О. О., Лисенко І. В. Методи машинного навчання для виявлення аномалій у комп'ютерних мережах // Вісник Вінницького національного технічного університету. — 2023. — № 1. — С. 58–64.

Дмитрук Максим Юрійович – студент групи ТСМ 25-м, факультет інформаційних електронних систем, e-mail: rordm279@gmail.com@gmail.com.

Онищук Олег Володимирович - к.т.н., доцент кафедри авіаційних радіотехнічних систем навігації та посадки Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, м. Харків, e-mail: onyschukoleg@gmail.com.

Карлов Дмитро Володимирович — доктор технічних наук, старший науковий співробітник, начальник кафедри авіаційних радіотехнічних систем навігації та посадки Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, м. Харків, e-mail: zeroua108@ukr.net

Maksym Yuriyovych Dmytruk - student, Faculty of Information Electronic Systems, e-mail: rordm279@gmail.com@gmail.com.

Onyshchuk Oleh -Ph.D., Associate Professor of Department of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, e-mail: onyschukoleg@gmail.com.

Karlov Dmitriy V. — Doctor of Engineering Science Senior Researcher Head of Department of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, e-mail: zeroua108@ukr.net

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ WI-FI 7 У СУЧАСНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

¹ Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі досліджено новітні можливості технології Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be) у контексті сучасних телекомунікаційних систем. З огляду на швидке зростання обсягів передавання даних, а також нові вимоги до швидкості, надійності та якості бездротових з'єднань, Wi-Fi 7 пропонує вдосконалення в порівнянні з попередніми стандартами. Основними перевагами є підтримка багатоканальної роботи (MLO), підвищення пропускної здатності до 36 Гбіт/с, зменшення затримки та зростання кількості одночасних з'єднань до 148. Метою роботи є аналіз технічних можливостей Wi-Fi 7, включаючи інноваційні технології, такі як 4K-QAM, агрегація каналів, та інтеграція з мережами 5G і 6G. Зроблено висновки щодо практичних аспектів застосування Wi-Fi 7 у корпоративних та побутових умовах, а також значення для розвитку гігабітних екосистем бездротового доступу.

Ключові слова: бездротова мережа, агрегація каналів, затримка, пропускна здатність, інтелектуальна мережа, оптимізація мережі, мобільний додаток.

Abstract

The paper explores the latest capabilities of Wi-Fi 7 technology (IEEE 802.11be) in the context of modern telecommunications systems. Given the rapid growth in data transmission volumes and the increasing demands for speed, reliability, and quality of wireless connections, Wi-Fi 7 offers improvements over previous standards. Key advantages include support for Multi-Link Operation (MLO), increased throughput of up to 36 Gbps, reduced latency, and the ability to handle up to 148 simultaneous connections. The aim of the study is to analyze the technical features of Wi-Fi 7, including innovative technologies such as 4K-QAM, channel aggregation, and integration with 5G and 6G networks. Conclusions are drawn regarding the practical applications of Wi-Fi 7 in both corporate and residential environments, as well as its significance for the development of gigabit wireless access ecosystems.

Keywords: wireless network, channel aggregation, latency, throughput, intelligent network, network optimization, mobile application.

Вступ

Сучасний етап розвитку інформаційно-комунікаційних технологій характеризується стрімким зростанням обсягів передавання даних, розширенням цифрових сервісів та зростанням вимог до швидкості, надійності та якості бездротових з'єднань. Враховуючи збільшення кількості пристроїв і розвиток технологій IoT, хмарних обчислень та AR/VR, виникає потреба у створенні високопродуктивних бездротових систем доступу [1].

Технології Wi-Fi стали основним інструментом для локальних бездротових з'єднань. Проте з ростом одночасних підключень та появою нових застосунків, які потребують значних ресурсів, виникає необхідність вдосконалення архітектури бездротових мереж. Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be) є наступним етапом розвитку, забезпечуючи високу пропускну здатність, масову одночасність з'єднань та низьку затримку завдяки інноваціям, таким як Multi-Link Operation, модуляція 4K-QAM та розширення смуги пропускання до 320 МГц [2].

Цей стандарт не тільки вдосконалює Wi-Fi 6, але й забезпечує інтеграцію з мережами 5G і 6G, що створює умови для майбутніх гігабітних екосистем бездротового доступу. Актуальність дослідження Wi-Fi 7 зумовлена необхідністю вивчення його технічних принципів, компонентів і можливостей оптимізації у реальних умовах [3].

Метою роботи є дослідження принципів побудови й оптимізації мереж Wi-Fi 7, аналіз осно-

вних технологій стандарту IEEE 802.11be та оцінка їх впливу на параметри пропускної здатності і затримки. Наукова новизна роботи полягає в узагальненні сучасних підходів до побудови бездротових мереж на основі Wi-Fi 7 та розробці рекомендацій для їхньої оптимізації. Практичне значення результатів полягає у можливості застосування підходів для проектування й оптимізації мереж Wi-Fi 7 у корпоративних і побутових умовах.

Результати дослідження

Wi-Fi 7, також відомий як IEEE 802.11be або Extremely High Throughput (EHT), є наступним етапом розвитку технологій бездротових мереж, який приносить значні покращення в порівнянні з попереднім стандартом Wi-Fi 6. Цей стандарт здатен досягти швидкості передачі даних до 36 Гбіт/с, що є втричі вищим за Wi-Fi 6. Одним із головних досягнень Wi-Fi 7 є підтримка багатоканальної роботи (MLO), що дозволяє одночасно використовувати кілька частотних діапазонів, підвищуючи загальну пропускну здатність та ефективність мережі [4].

Максимальна швидкість передачі даних у Wi-Fi 7 становить 36 Гбіт/с, що перевищує попередні стандарти Wi-Fi 6 та Wi-Fi 5. Це стало можливим завдяки збільшенню смуги пропускання каналу до 320 МГц (порівняно з 160 МГц у Wi-Fi 6) та застосуванню 4096-QAM (4K-QAM) для підвищення ефективності модуляції [1].

Wi-Fi 7 підтримує до 148 одночасних з'єднань, що забезпечує значне покращення ефективності в умовах високої щільності користувачів, таких як стадіони чи аеропорти. Це досягається завдяки розширенню технології OFDMA та агрегації каналів [2].

Однією з ключових переваг Wi-Fi 7 є значне зниження затримки передачі даних, що критично важливо для сервісів, чутливих до часу, таких як відеоконференції, відеоігри чи доповнена реальність (AR/VR). Затримка може бути зменшена на 50% порівняно з Wi-Fi 6, що значно покращує якість обслуговування [3].

Технологія Multi-Link Operation (MLO) дозволяє одночасно використовувати кілька частотних діапазонів (2,4 ГГц, 5 ГГц, 6 ГГц) для передавання і прийому даних, забезпечуючи таким чином високу пропускну здатність і знижуючи ймовірність затримок. MLO підтримує агрегацію частотних каналів, що дозволяє значно підвищити ефективність використання спектра [4].

Wi-Fi 7 пропонує розширені можливості для управління трафіком, надаючи пріоритет критичним додаткам, таким як голосові та відео сервіси, через різні канали зв'язку. Це здійснюється за допомогою механізмів QoS-ідентифікації, що дозволяє оптимізувати трафік в умовах багатозадачності [1].

Завдяки підтримці технології r-TWT (restricted Target Wake Time) Wi-Fi 7 забезпечує точніше планування активності пристроїв, що знижує споживану енергію та навантаження на мережу, одночасно підвищуючи ефективність обслуговування затримкочутливих додатків [2].

Wi-Fi 7 забезпечує значне покращення продуктивності та ефективності бездротових мереж завдяки новим технологіям, таким як багатоканальність, 4K-QAM, агрегація каналів і зменшення затримки. Це дозволяє створювати мережі, здатні ефективно обслуговувати велику кількість користувачів та забезпечувати високоякісні сервіси для додатків, чутливих до часу, таких як AR/VR, відео 8K, ігор в реальному часі, а також онлайн-конференцій. Відсутність значних затримок і підвищена масова одночасність робить Wi-Fi 7 ідеальним рішенням для місць із високою щільністю користувачів. Wi-Fi 7 є технологією майбутнього, яка має потенціал радикально змінити підхід до побудови бездротових мереж і сприяти розвитку інтернету речей, смарт-пристроїв та інших ресурсомістких сервісів [3].

Висновки

Wi-Fi 7 є значним кроком вперед у сфері бездротових мереж, орієнтуючись на забезпечення високошвидкісних та надійних з'єднань для новітніх сервісів, таких як розширена та віртуальна реальність (XR/VR), хмарні ігрові платформи та промисловий IoT. Технологія відкриває нові можливості для інтеграції бездротових мереж у майбутні інтелектуальні системи та цифрові екосистеми.

Використання модуляції 4K-QAM, підтримка ширини каналу до 320 МГц та багатоканальної передачі (Multi-Link Operation, MLO) дозволяють Wi-Fi 7 досягати рекордних швидкостей до 36 Гбіт/с. Це майже вдвічі перевищує можливості Wi-Fi 6 і відкриває шлях до інтеграції вищих

вимог до швидкості і пропускну здатності, необхідних для сервісів наступного покоління.

Технології MRU (Maximum Resource Unit), OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) та Preamble Puncturing забезпечують ефективне управління ресурсами мережі, дозволяючи підтримувати масштабованість для сотень одночасних з'єднань без втрати якості обслуговування (QoS). Це є критично важливим для застосувань у високощільних середовищах, таких як міста, спортивні арени та бізнес-центри.

Завдяки впровадженню технологій Restricted TWT (Target Wake Time), TXOP sharing та покращених механізмів QoS Characteristics, Wi-Fi 7 дозволяє досягати наднизьких затримок, що є критичним для забезпечення стабільної роботи сервісів реального часу. Це включає застосування в телемедицині, дистанційному керуванні, голографічному зв'язку та інших додатках, де мінімальна затримка має вирішальне значення.

Розвиток технології EasyMesh R5/R6 із підтримкою Virtualized BSS (Virtualized Basic Service Set) і multi-link mode забезпечує більш гнучке, стабільне та безшовне мережеве покриття в багатоточкових середовищах. Це особливо важливо для сучасних домогосподарств та бізнесів, де мережа повинна адаптуватися до змінних умов і забезпечувати стабільний зв'язок у великих і складних просторах.

Wi-Fi 7 створює міцну основу для наступного етапу розвитку бездротових мереж, забезпечуючи високу швидкість, масштабованість та надійність для майбутніх інтелектуальних систем. Цей стандарт дозволяє безперебійно підтримувати численні пристрої та додатки, що обробляють великий обсяг даних у реальному часі, і відкриває нові можливості для розвитку цифрових екосистем.

Отже, Wi-Fi 7 не тільки значно покращує технічні характеристики порівняно з попередніми стандартами, а й забезпечує нові можливості для інтеграції бездротових технологій у найсучасніші інтелектуальні та промислові системи, стаючи важливим елементом інфраструктури майбутнього.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Cheng, G., Qian, Z., Jiang, Y., Yang, Z., Rajamanickam, T. (2024). Wi-Fi 7: Principles, Technology, and Applications. Springer Singapore. SpringerLink
2. Henry, J., Hart, B., Gupta, B., Smith, M. (2024). Wi-Fi 7 In Depth: Your Guide to Mastering Wi-Fi 7, the 802.11be Protocol, and Their Deployment. Addison-Wesley Professional. Barnes & Noble
3. Васильківський М. В. Керування телекомунікаційними мережами з використанням технологій AI/ML [Текст] / М. В. Васильківський, О. Болдирева, Г. Варгатюк, М. Будаш // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2023. – Вип. 1. – С. 89–100.
4. Васильківський М. В. Коригування параметрів мобільних систем MIMO із використанням штучного інтелекту [Текст] / М. Васильківський, О. Болдирева, Г. Варгатюк, Н. Грабчак // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. – 2023. – № 51. – С. 139-147.

Васильківський Микола Володимирович — кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних систем і технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: mvasylkivskyi@gmail.com

Грубчак Назарій Віталійович — аспірант групи 172-23а, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: nazariihrabchak@gmail.com

Щербік Олександр Олександрович — студент групи TSM-24м, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: Foxsterlend@gmail.com

Vasyilkivskyi Mykola V. — candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Information Communication Systems and Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: mvasylkivskyi@gmail.com

Hrabchak Nazarii V. — graduate student of group 172-23a, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: nazariihrabchak@gmail.com

Shcherbik Oleksandr O. - student of group TSN-24m, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: Foxsterlend@gmail.com

АНАЛІЗ ТОЧІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНОЛОГІЇ MLAT

¹ Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба;

² Карпатський національний університет імені Василя Стефаника

Анотація

Проведено аналіз точісних характеристик технології MLAT. Показано, що точність MLAT є достатньо високою - 3-16 м, в залежності від зони роботи. Точісні характеристики MLAT залежні від геометрії системи, якості вимірювань різниці часу прибуття сигналу та ефективності алгоритмів обробки.

Ключові слова: MLAT, аналіз, точність, характеристика, надійність, ефективність, геометрія.

Abstract

The use of MLAT technology for the modernization of radio support of flights is proposed. The prospects for the use of broadband signals in MLAT technology are also analyzed, which will allow increasing the reliability, noise immunity and stealth of the radio-technical support system of flights.

Keywords: MLAT, analysis, accuracy, characteristics, reliability, efficiency, geometry.

Вступ

MLAT (англ. Multiateration) – це система радіолокаційної навігації, яка визначає місцеположення повітряних суден, вимірюючи відстані від них до кількох наземних точок з відомими координатами [1-3]. Точність визначення місцеположення в системі MLAT є критичною вимогою, що визначає її ефективність як засобу спостереження [4-7]. MLAT базується на вимірюванні різниці часу прибуття (Time Difference of Arrival, TDOA) сигналу, випромінюваного об'єктом (транспондером), до кількох просторово рознесених приймальних станцій [8-11]. Метою роботи є аналіз точісних характеристик технології MLAT.

Результати дослідження

Систему MLAT відносять до систем незалежного кооперативного спостереження. Незалежність системи означає те, що система не залежить від даних навігаційних систем повітряного судна, а кооперативність означає можливість отримання інформації як наземними станціями підрозділів управління повітряного руху, так і повітряними судами. MLAT використовує сукупність ідентичних приймачів, які розташовані визначеним чином. В основу роботи системи MLAT покладений різницево-далекомірний метод визначення координат.

На практичну точність системи MLAT впливають наступні чинники:

- точність вимірювання TDOA. Якість вимірювання TDOA залежить від: 1) часової синхронізації приймачів: використання високоточних джерел часу (наприклад, GPS-синхронізованих годинників) є критичним. Помилка синхронізації годинників безпосередньо вноситься в похибку TDOA; 2) ширини смуги та співвідношення сигнал/шум (SNR): Вищий SNR та ширша смуга сигналу забезпечують більш точне визначення часу прибуття імпульсу; 3) алгоритмів виявлення імпульсу: використання методів, таких як кореляційний прийом, для точного визначення фронту імпульсу тощо.

- ефекти поширення сигналу та багатопроменевість. Особливо в умовах аеродрому багатопроменевість може значно спотворити фактичний час прибуття, що призводить до зростання помилки позиціонування. Зміни в атмосферних умовах, такі як температура, тиск та вологість, впливають на швидкість поширення радіохвиль, викликаючи тропосферну затримку. Хоча ці ефекти можуть бути компенсовані моделями, їхня неповна корекція є джерелом систематичної помилки.

Практичні значення точності системи MLAT, згідно з документацією, демонструють високі показники:

- аеродром (злітно-посадкова смуга) – типова горизонтальна похибка 3 - 6 м – забезпечення безпечного руху на землі;

- термінальна зона – типова горизонтальна похибка 10 - 13 м (на відстані 16 км) – спостереження в термінальному районі;
- широка зона (WAM) – типова горизонтальна похибка дещо нижче 13 м (залежить від геометрії) – контроль на маршрутах.

Для підвищення точності технології MLAT можна застосувати:

- фільтрацію та згладжування: застосування розширених фільтрів, таких як фільтр Калмана та інших, для згладжування оцінок та врахування динаміки руху цілі;
- інтеграцію даних з різних джерел: інтеграція даних MLAT з іншими джерелами (наприклад, ADS-B, первинними/вторинними радарми) для підвищення надійності та точності, особливо в умовах аномалій або навмисних завад;
- методи регуляризації геометрії приймачів: використання методів для вирішення задачі локалізації, що виникає при несприятливій геометрії приймачів.

Висновки

Таким чином, технологія MLAT забезпечує високу точність локалізації, критично залежну від геометрії системи, якості вимірювань TDOA та ефективності алгоритмів обробки. Постійні дослідження спрямовані на мінімізацію впливу багатопроменевості та покращення адаптивних методів фільтрації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ICAO: Airport Ground Vehicle Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (ADS-B) Out Squitter Equipment. 11/14/2011.
2. Державна авіаційна служба України. Авіаційні правила України. Нормативні документи щодо аеронавігаційного забезпечення польотів. Київ: ДАСУ, 2023.
3. Свид І. В., Обод І. І. Завадостійкість радіолокаційних систем ідентифікації за ознакою «свій-чужий»: монографія. / І. В. Свид, І. І. Обод. Харків : Друкарня Мадрид, 2021. 254 с.
4. Свид І. В. Обробка радіолокаційної інформації систем спостереження повітряного простору: монографія. / І. В. Свид. Дніпро : ЛПРА ЛТД, 2022. 224 с.
5. Обод І.І., Стрельницький О.О., Андрусевич В.А. Інформаційна мережа систем спостереження повітряного простору. Харків : ХНУРЕ, 2015. 270 с.
6. A Model for Optimizing Packet Length in Airspace Surveillance Systems / I. Svyd et al. Lecture Notes in Networks and Systems. Cham, 2025. P. 501–518. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-89296-7_25.
7. Using the Interstage Data Processing Method to Improve the Efficiency of Airspace Surveillance Systems / I. Svyd et al. Lecture Notes in Networks and Systems. Cham, 2025. P. 519–535. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-89296-7_26.
8. Оцінка якості радіолокаційної інформації систем залежного кооперативного спостереження / І. В. Свид, та інші // Радіотехніка : Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. – Харків, 2024. – Вип. 216. – С. 131–136. - DOI: 10.30837/rt.2024.1.216.14.
9. Svyd I. V., Starokozhev S. V. Distributed processing of radar information in airspace surveillance systems. Radiotekhnika. 2023. No. 212. P. 155–165. URL: <https://doi.org/10.30837/rt.2023.1.212.15>.
10. Andruskevych V., Obod I. Assessment of the quality of information support by air radar surveillance systems. Advanced Information Systems. 2021. Vol. 5, no. 2. P. 78–82. URL: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.2.10>.
11. M. Barbary, A. S. Hafez and T. Crew. An Industrial Design and Implementation Approach of Secondary Surveillance Radar System // 2021 International Telecommunications Conference (ITC-Egypt), 2021, pp. 1 – 9. doi: 10.1109/ITC-Egypt52936.2021.9513961

Жихарєв Олександр Сергійович — слухач групи 463С, факультет автоматизованих систем управління та наземного забезпечення польотів авіації, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, e-mail: sasha.zhikhariev2020@ukr.net.

Свид Ірина Вікторівна — к.т.н., доцент, доцент кафедри авіаційних радіотехнічних систем навігації та посадки, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків; професор кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника, м. Івано-Франківськ.

Zhikhariev Oleksandr — student of group 463C, Faculty of Automated Control Systems and Ground Support of Aviation, Kharkiv National Air Force University named after Ivan Kozhedub, Kharkiv, email: sasha.zhikhariev2020@ukr.net.

Svyd Iryna — PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Aviation Radio Navigation and Landing Systems, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv; Professor of the Department of Computer Engineering and Electronics, Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Ivano-frankivsk.

ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ПО UART ПРИ НАЯВНОСТІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕШКОД

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі досліджуються методи захисту послідовного інтерфейсу UART від електромагнітних перешкод у промислових умовах. Проаналізовано основні джерела електромагнітної інтерференції та їх вплив на надійність передачі даних. Розглянуто технічні рішення для підвищення завадостійкості: апаратні методи виявлення помилок (CRC), багатократне зчитування біта для фільтрації шумів, застосування диференціального інтерфейсу RS-485 та правильне екранування кабелів.

Ключові слова: UART, електромагнітні перешкоди, CRC, RS-485, промислова комунікація, завадостійкість.

Abstract

The paper investigates methods of protecting the UART serial interface from electromagnetic interference in industrial environments. The main sources of electromagnetic interference and their impact on data transmission reliability are analyzed. Technical solutions for improving noise immunity are considered: hardware error detection methods (CRC), multiple bit sampling for noise filtering, differential RS-485 interface implementation, and proper cable shielding.

Keywords: UART, electromagnetic interference, CRC, RS-485, industrial communication, noise immunity.

Вступ

Інтерфейс UART залишається одним з найпоширеніших способів послідовної передачі даних у вбудованих системах. Його популярність пояснюється простотою реалізації та надійною екосистемою промислового обладнання. Проте в реальних умовах експлуатації, особливо на виробництві та в промислових об'єктах, системи на базі UART постійно зазнають впливу різноманітних електромагнітних перешкод. Це призводить до втрати даних, спотворення інформації і навіть повних відмов комунікації [4, 6].

Останні дослідження показують, що електромагнітні перешкоди можуть не тільки випадково спотворювати сигнали, але й створювати можливості для цілеспрямованих атак на послідовну комунікацію. З кожним роком кількість електронного обладнання зростає, а разом з ним зростає і рівень електромагнітного забруднення. Тому питання надійності передачі даних стає все більш критичним для промислових систем [11].

Джерела електромагнітних перешкод та методи виявлення помилок

Проблеми з UART комунікацією виникають через різні типи електромагнітних перешкод. Найчастіше це зовнішні перешкоди від електричного та механічного обладнання, яке працює поруч і створює електромагнітний шум. Також суттєвий вплив мають перехресні перешкоди від інших каналів комунікації, які розташовані на одній платі чи в одному кабельному джгуті. Окрему небезпеку становлять перешкоди від мережі живлення на частоті 50 -60 Гц, які через індуктивний зв'язок потрапляють у сигнальні лінії. Радіочастотні джерела теж можуть наводити перешкоди, особливо коли їхня частота збігається з резонансною частотою провідників на платі [4, 10].

Для боротьби з цими проблемами використовуються різні апаратні методи виявлення помилок. Найпростіший спосіб - це біт парності, коли при передачі кожного байту додається один додатковий біт, який вказує на парність або непарність кількості одиниць у даних. Приймач перевіряє цю парність і може виявити одиночну помилку. Але тут є суттєві обмеження: якщо спотворюються два біти одночасно, парність залишиться правильною і помилка не буде виявлена. До того ж біт парності тільки вказує на наявність помилки, але не дозволяє її виправити [5, 6].

Набагато надійнішим методом є додавання циклічного надлишкового коду, або CRC. Цей алгоритм використовує поліноміальне ділення для створення контрольної суми, яка додається до блоку даних. Дослідження підтверджують, що CRC набагато краще справляється з виявленням множинних помилок і пакетних спотворень порівняно з простою парністю. Саме тому для критичних застосувань рекомендується використовувати CRC замість простого біта парності. Сучасні розробки в галузі завадостійких систем UART пропонують цікаві рішення на рівні

обробки сигналів. Замість того, щоб зчитати стан лінії один раз у середині біта, приймач робить декілька зчитувань і приймає рішення на основі більшості результатів. Такий підхід багатократного зчитування з подальшим аналізом дозволяє системі краще відрізнити корисний сигнал від шуму і зберегти працездатність навіть при значних перешкодах. [2, 3, 4, 6].

Диференціальна передача та кабельна інфраструктура

Якщо говорити про фізичний рівень передачі, то найбільш ефективний спосіб боротьби з електромагнітними перешкодами - це перехід від звичайного однополярного UART (TTL або RS-232) до диференціального інтерфейсу RS-485. Суть диференціальної передачі в тому, що сигнал передається одночасно двома проводами з протилежною полярністю. Коли на лінію наводиться електромагнітна перешкода, вона впливає на обидва проводи приблизно однаково. Приймач же вимірює різницю між сигналами на двох проводах, тому перешкода компенсується і не впливає на результат. Це дає RS-485 чудову стійкість до перешкод і дозволяє передавати дані на відстань до 1200 метрів. Ще одна перевага - можливість працювати навіть при наявності різниці потенціалів землі на кілька вольтів [1, 7, 8].

Для кількісної оцінки, варто порівняти запас завадостійкості. У стандартного 5-вольтового TTL UART він часто складає менше 1 В, що робить його вразливим до будь-яких імпульсних наводок. Натомість RS-485 розроблений для придушення синфазних перешкод - шуму, що наводиться одночасно на обидва сигнальні дроти. Стандартні приймачі RS-485 здатні коректно розпізнавати сигнал при синфазній напрузі в діапазоні від -7В до +12В. Таким чином, стійкість до найпоширенішого типу промислових перешкод зростає не просто в рази, а щонайменше на порядок (в 10-20 разів), порівняно з імпульсом в 1-2В, який може бути фатальним для простого UART.

Драйвери RS-485 створюють диференціальну напругу мінімум 1,5 вольт, а приймачі здатні надійно розпізнавати сигнали від 200 мілівольт. Такий запас забезпечує стабільну роботу навіть при значному ослабленні сигналу через довгий кабель або перешкоди. Не менш важливий аспект - це вибір правильного кабелю та його монтаж. Використання екранованої витой пари суттєво знижує вплив зовнішніх електромагнітних полів. Сам факт скручування проводів вже дає певний захист: в різних частинах кабелю наведені струми мають протилежний напрямок і взаємно компенсуються [1, 8].

Екран додає ще один рівень захисту, але важливо правильно його заземлити. Найкраща практика - заземлювати екран тільки в одній точці, щоб уникнути заземлювальних петель. Якщо заземлити екран з обох кінців кабелю, через нього може потекти струм від різниці потенціалів землі, що тільки погіршить ситуацію. Для особливо критичних застосувань варто додати ще один рівень захисту на програмному рівні. Мається на увазі протокол з підтвердженням отримання даних і повторною передачею при виявленні помилок. Дані передаються пакетами, кожен пакет має контрольну суму або CRC. Якщо приймач виявляє помилку, він запитує повторну передачу конкретного пакета. Така схема значно підвищує надійність, хоча і ускладнює реалізацію та дещо знижує швидкість обміну даними. [3, 9].

Висновки

Досвід показує, що для надійної роботи UART в умовах електромагнітних перешкод потрібен комплексний підхід. Найкращі результати дає поєднання кількох методів: використання CRC замість простої парності для виявлення помилок, застосування алгоритмів багатократного зчитування біта, перехід на диференціальний інтерфейс RS-485 для фізичного рівня, правильний вибір кабелів з екрануванням і скручуванням, а також додавання протоколів підтвердження на рівні програми. Результати досліджень 2024 року підтверджують ефективність такого комплексного підходу. Правильно спроектовані системи UART з багаторівневим захистом демонструють високу надійність і можуть стабільно працювати навіть у складних промислових умовах з високим рівнем електромагнітного забруднення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Contributors to Wikimedia projects. Rs-485. *Wikipedia*. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/RS-485> (дата звернення: 26.10.2025).
2. Error correction and detection codes. *ElectronicsHub*. URL: <https://www.electronicshub.org/error-correction-and-detection-codes/> (дата звернення: 26.10.2025).
3. For UART, should I use parity on a board level?. *Electrical Engineering Stack Exchange*. URL: <https://electronics.stackexchange.com/questions/9108/for-uart-should-i-use-parity-on-a-board-level> (дата звернення: 26.10.2025).
4. Li R. Development and evaluation of a robust UART communication system with enhanced interference resistance. 29 жовт. 2024 р. URL: <https://doi.org/10.61173/h86z4q46> (дата звернення: 26.10.2025).

5. Parity bit. *Wikipedia*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Parity_bit (дата звернення: 26.10.2025).
6. Peña E., Legaspi M. G. UART: a hardware communication protocol understanding universal asynchronous receiver/transmitter. *Analog Dialogue*. URL: <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/uart-a-hardware-communication-protocol.html> (дата звернення: 26.10.2025).
7. Pini A. UARTs ensure reliable long-haul industrial communications over RS-232, RS-422, and RS-485 interfaces. *DigiKey*. URL: <https://www.digikey.com/en/articles/uarts-ensure-reliable-long-haul-industrial-communications> (дата звернення: 26.10.2025).
8. RS485, specifications and in depth tutorial - Lammert Bies. *Lammert Bies*. URL: <https://www.lammertbies.nl/comm/info/rs-485> (дата звернення: 26.10.2025).
9. Serial communications protocols - part four: RS-485 and baud rates. *Altium*. URL: <https://resources.altium.com/p/serial-communications-protocols-rs-485> (дата звернення: 26.10.2025).
10. What causes UART errors?. *Electrical Engineering Stack Exchange*. URL: <https://electronics.stackexchange.com/questions/83379/what-causes-uart-errors> (дата звернення: 26.10.2025).
11. Yan C. BitDance: Manipulating UART Serial Communication with IEMI. URL: <https://cyansec.com/files/articles/23RAID-BitDance.pdf> (дата звернення: 26.10.2025).

Ішук Владислав Павлович - студент групи РТ-23б, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: vlad.ischuck2006@gmail.com

Стальченко Олександр Володимирович - кандидат технічних наук, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: stalchenko.o.v@vntu.edu.ua.

Ishchuk Vladyslav Pavlovych – student of group RT-23b, Faculty of Information and Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: vlad.ischuck2006@gmail.com

Stalchenko Oleksandr Volodymyrovych - Candidate of Technical Sciences, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: stalchenko.o.v@vntu.edu.ua.

«ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІМПУЛЬСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА ОСНОВІ MOSFET-ТРАНЗИСТОРІВ»

Вінницький національний технічний університет;

Анотація.

У роботі проведено дослідження ефективності імпульсних перетворювачів постійної напруги, реалізованих на базі MOSFET-транзисторів. Визначено вплив основних параметрів ключових елементів — опору відкритого каналу, часу перемикавання та ємності затвора — на загальний ККД перетворювача. Виконано моделювання в середовищах LTspice та Proteus і проведено експериментальні вимірювання. Отримані результати дозволяють обґрунтувати вибір оптимальних режимів роботи для підвищення енергоефективності електронних систем.

Ключові слова: імпульсний перетворювач, MOSFET-транзистор, енергоефективність, моделювання, ККД.

Abstract.

The paper presents a study of the efficiency of DC-DC switching converters based on MOSFET transistors. The influence of key transistor parameters—on-resistance, switching time, and gate capacitance—on the overall efficiency was analyzed. Modeling in LTspice and Proteus, as well as experimental measurements, were performed. The results show that optimization of MOSFET parameters can significantly improve the energy efficiency of modern electronic systems.

Keywords: switching converter, MOSFET transistor, energy efficiency, modeling, efficiency factor.

Вступ

Постійне зростання вимог до енергоефективності електронних пристроїв зумовлює необхідність оптимізації схем джерел живлення та перетворювачів напруги. Імпульсні перетворювачі, на відміну від лінійних, забезпечують високий коефіцієнт корисної дії при компактних розмірах і незначних теплових втратах. Основним елементом таких схем є MOSFET-транзистори, що виконують роль комутаційних ключів. [1]

Параметри цих транзисторів істотно впливають на втрати енергії в процесі перемикавання, тому актуальним є дослідження ефективності їх використання в імпульсних перетворювачах з метою визначення оптимальних характеристик для конкретних умов експлуатації. [2]

Результати дослідження

Принцип дії імпульсних перетворювачів постійної напруги (ІППН) по-лягає в періодичному підключенні та відключенні (комутації) кола навантаження до первинного джерела електроенергії з напругою $U_{вх}$. Здійснюється це за допомогою електронних силових ключів – транзисторів, діодів, тиристорів.

Для одержання високого ККД використовуються імпульсні методи перетворення та регулювання постійної напруги (ІППН) [3]. В основі принципу дії ІППН лежить ключовий режим роботи регулюючого напівпровідникового приладу, за допомогою якого здійснюється періодичне підключення напруги джерела U_d до вихідного кола перетворювача (рис. 1.1,а). У результаті на виході формуються імпульси напруги (рис. 1,б). Малий спад напруги на регулюючому приладі у ввімкненому стані та малий струм у вимкненому стані обумовлює високий ККД перетворювачів даного типу.

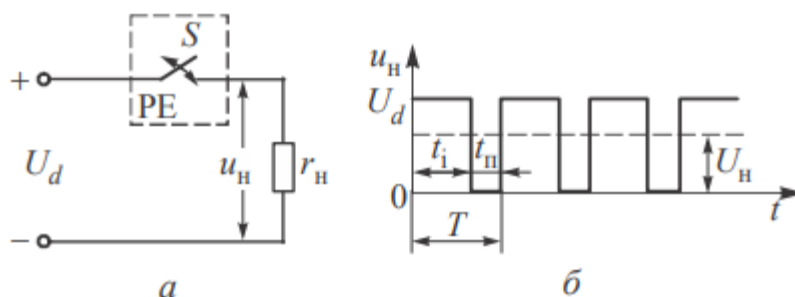


Рис.1 - Схема підключення напруги джерела та вихідні імпульси напруги

Сучасне імпульсне джерело живлення, або SMPS, використовує напівпровідникові перемикачі для перетворення не стабілізованої вхідної напруги постійного струму в регульовану та плавну вихідну напругу постійного струму на різних рівнях напруги. Вхідним джерелом живлення може бути постійна напруга від батареї або сонячної панелі або випрямлена постійна напруга. У багатьох програмах керування потужністю силовий транзистор MOSFET або IGFET працює в режимі перемикачання, коли він неодноразово вмикається та вимикається на високій швидкості. Основною перевагою цього є те, що енергоефективність стабілізатора може бути досить високою, оскільки транзистор або повністю відкритий та проводить (насичення), або повністю закритий (відсікання).

Знижувальний імпульсний стабілізатор є перетворювачем постійного струму в постійний і один з найпростіших і найпопулярніших типів імпульсних стабілізаторів. При використанні в конфігурації імпульсного джерела живлення понижувальний імпульсний стабілізатор використовує послідовний транзистор або силовий МОП-транзистор (в ідеалі біполярний транзистор із ізольованим затвором або IGBT) як основний перемикач, як показано на рис. 2.

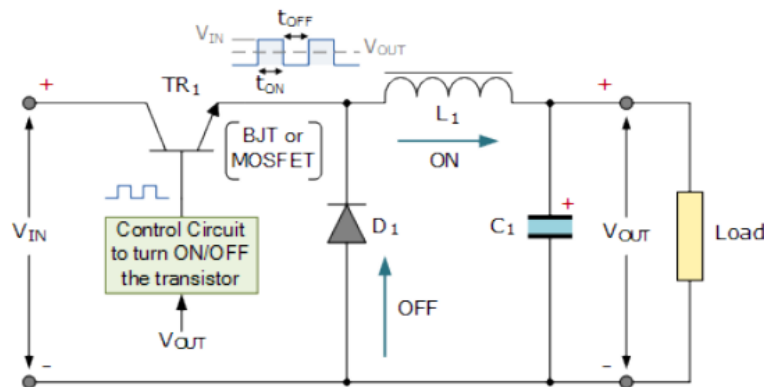


Рис.2 - Електрична схема імпульсного джерела живлення

Ця зворотна напруга викликає пряме усунення діода, тому накопичена енергія в магнітному полі індуктора змушує струм продовжувати текти через навантаження в тому ж напрямку і повертатися назад через діод.

Оскільки опір відкритого каналу сучасних MOSFET може бути дуже низьким (одиниці або десятки міліом), падіння напруги на ньому стає значно меншим, ніж у діода, що веде до істотного зниження втрат на провідність та підвищення ККД, особливо при вихідних напругах порядку 5 вольт та нижче. Це також зменшує тепловиділення, дозволяючи використовувати менші радіатори або взагалі обходитись без них, що дозволяє зменшити вагу та габарити готового пристрою.

Необхідно точно керувати моментами вмикання та вимикання синхронного ключа. Особливо критичним є забезпечення «мертвого часу» (dead-time) – короткого інтервалу, коли обидва ключі (основний та синхронний у відповідній гілці) гарантовано закриті. Занадто короткий «мертвий час» може призвести до наскрізного струму (shoot-through), а занадто довгий – до того, що струм почне протікати через паразитний діод синхронного MOSFET-а, збільшуючи втрати. Для ефективного керування MOSFET-ключами, особливо на високих частотах, потрібні потужні та швидкі драйвери затворів, здатні забезпечити необхідний струм для швидкого перезаряду ємності затвора.

Дослідимо на практиці:

Моделювання виконувалося в середовищі LTspice XVII на базі типової схеми buck converter із вхідною напругою 12 В, вихідною 5 В та струмом навантаження 2 А. Для аналізу використовувалися MOSFET-транзистори типів IRFZ44N, IRLZ34N та AO4407, що відрізняються параметрами та часом комутації.

Досліджували вплив:

- опору відкритого каналу в діапазоні 20–50 мОм;
- частоти комутації від 50 кГц до 400 кГц;
- часу

Для кожного режиму визначався коефіцієнт корисної дії за формулою:

$$\eta = (P_{\text{вих}} / P_{\text{вх}}) \times 100\%,$$

де $P_{\text{вих}}$ — вихідна потужність, $P_{\text{вх}}$ — вхідна потужність.

Аналіз показав, що основними джерелами втрат є:

- провідникові втрати через $R_{\text{DS(on)}}$;
- комутаційні втрати під час переходів між станами;
- втрати на заряд/розряд ємності затвора.

При зменшенні опору відкритого каналу з 50 мОм до 20 мОм ККД зріс з 85 % до 93 %.

Підвищення частоти комутації понад 300 кГц призводило до збільшення втрат через заряд затвора, що знижувало ККД на 2–3 %. Оптимальні результати отримано при використанні транзистора IRLZ34N на частоті 200–250 кГц, де досягнуто максимальний ККД 93 %. Експериментальна перевірка на макетній платі підтвердила результати моделювання — похибка між розрахунковими та вимірними даними не перевищила 2 %.

Висновок

Основними втратами енергії у MOSFET-транзисторах є провідникові та комутаційні втрати. Зменшення $R_{DS(on)}$ з 50 мОм до 20 мОм підвищує ККД перетворювача на 8 %. Оптимальна частота комутації для досліджуваних транзисторів становить 200–250 кГц. Отримані результати можуть бути використані при проєктуванні високоефективних джерел живлення для побутової та промислової електроніки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. What Are Power Forward and Flyback? What Is The Difference?. XFULLSTAR. URL: <https://www.xfullstartechs.com/info/what-are-power-forwardand-flyback-what-is-the-57079040.html> (дата звернення: 13.10.2025).
2. Островерхов М.Я., Сенько В.І., Чибеліс В.І. Імпульсні перетворювачі стабілізованої напруги: монографія. Київ: Ліра-К, 2020. 242 с
3. Новгородцев А.І., Піддубний М. Ю. Синхронний імпульсний стабілізатор напруги. МІЖНАРОДНА НАУКОВА КОНФЕРЕНЦІЯ молодих вчених ФІЗИКА, ЕЛЕКТРОНІКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА: тези доповідей. : Сумський державний університет, 2025. С. 126.

Комарницький Олександр Сергійович – студент групи ПЗТ-23б, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail : alexandrkom2006@gmail.com

Кичак Василь Мартинович – д.т.н., проф., завідувач кафедри інфокомунікаційних систем і технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: kychak.v.m@vntu.edu.ua

Oleksandr Serhiyovych Komarnytskyi – student of group PZT-23b, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: alexandrkom2006@gmail.com

Vasyl M. Kychak – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of infocommunication systems and technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: kychak.v.m@vntu.edu.ua

АВТОГЕНЕРАТОРНИЙ МІКРОЕЛЕКТРОННИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ТИСКУ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Запропоновано автогенераторний мікроелектронний перетворювач тиску на основі транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором з первинним тензочутливим елементом на базі тунельно-резонансного діода, причому первинний тензочутливий перетворювач є активним елементом схеми автогенератора, що спрощує конструкцію вимірювального перетворювача тиску. Виходячи з розгляду фізичних процесів у первинному тензочутливому елементі та в автогенераторі на основі методу перетворення енергії постійного електричного поля на вході первинного перетворювача у енергію змінного електричного поля на виході автогенератора, розроблено математичну модель автогенераторного перетворювача тиску.

Ключові слова: перетворювач тиску, автогенератор, від'ємний диференціальний опір, тунельно-резонансний діод.

На теперішній час в багатьох галузях виробництва і техніки, таких як газова і нафтова промисловість, автомобільна техніка, побутова техніка, медицина, будівельна промисловість, дослідження навколишнього середовища, атомна енергетика, космічні дослідження, військова техніка потрібно вимірювання тиску, що вимагає створення вимірювальних приладів високої точності та чутливості, високої швидкодії, здатність витримувати значні перевантаження, мати лінійні та безінерційні характеристики [1, 2, 3].

На сучасному етапі розвитку науки і техніки вимірювання тиску виконується за допомогою приладів ємнісного, магнітопружного, індуктивного, п'єзорезистивного, п'єзоелектричного та акустоелектричного типів. Прилади ємнісного типу мають високу точність і чутливість, термостабільність, проте вони не придатні працювати при високих тисках, а також мають високу вартість. П'єзорезистивні прилади тиску мають низькі вихідні сигнали, низьку точність, чутливі до зміни температури, проте мають високу міцність. П'єзоелектричні прилади мають низькі вихідні сигнали, низьку точність і чутливість недостатню стабільність, малий температурний діапазон. Одним з основних недоліків перетворювачів тиску є низький вихідний сигнал, окрім індуктивних сенсорів тиску, виготовлення яких несумісне з інтегральною мікроелектронною технологією. Це приводить до значних похибок вимірювання, внаслідок втрат інформації в каналі між виходом сенсора і входом підсилювально-перетворювальної апаратури, що обумовлює низьку точність і чутливість, низьку завадостійкість і швидкодію. Усунути вище перераховані недоліки можливо на основі автогенераторних перетворювачів, що працюють у режимі перетворення «тиск-частота», це дає можливість значно покращити їх метрологічні показники [4, 5]. Одним з перспективних наукових напрямків у створенні приладів вимірювання тиску є дослідження в області сенсорів з частотним вихідним сигналом на базі квантово-розмірних та транзисторних мікроелектронних структур з від'ємним диференціальним опором, що дозволяє створювати прилади з вихідним частотним сигналом. Автогенераторні перетворювачі тиску поєднують простоту і універсальність, які мають аналогові пристрої, з точністю і завадостійкістю, що характеризують прилади з кодовим виходом. Застосування принципу перетворення «тиск-частота» на базі автогенераторних параметричних приладів тиску суттєво знижує собівартість інформаційно-вимірювальної апаратури, дозволяє значно зменшити масогабаритні показники приладів тиску, підвищити точність і чутливість перетворення тиску у частотний сигнал [6].

Електрична схема перетворювача тиску являє собою інтегральну схему, що складається з двох біполярних транзисторів (інтегральна схема HFA3096), опорів R1-R5, а також тензочутливого елемента на основі тунельно-резонансного діода VD1, що дозволяє створити автогенераторний

пристрій. Коливальний контур пристрою реалізовано на основі еквівалентної ємності повного опору на електродах колектор-колектор біполярних транзисторів VT1 і VT2 та індуктивності L1. Електричне коло R3C1 забезпечує термостабільність приладу тиску.

При дії зовнішнього тиску на діод відбувається як зміна ефективної маси електронів, так і генерація п'єзоелектричних полів у квантовій ямі та потенціальних бар'єрах структури діода. Гідростатичний тиск викликає зміну ефективної маси електронів у квантовій ямі, що приводить до зміни розташування енергетичних рівнів електронів у квантовій ямі. Зміна енергії електронів у діоді приводить до зміни вольт-амперної характеристики. Це, у свою чергу, викликає зміну частоти електричних коливань у приладі тиску. Виходячи з розгляду фізичних процесів у первинному тензочутливому елементі і автогенераторі на основі методу перетворення енергії постійного електричного поля на вході первинного перетворювача у енергію змінного електричного поля на виході автогенератора, розроблено математичну модель приладу тиску.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Di Leo V, Speroni A, Ferla G, Blanco Cadena JD. Design and Validation of a Compact, Low-Cost Sensor System for Real-Time Indoor Environmental Monitoring. *Buildings*. 2025; 15(19):3440. <https://doi.org/10.3390/buildings15193440>
2. Han D, Kim K, Shin J, Park J. Gesture-Based Secure Authentication System Using Triboelectric Nanogenerator Sensors. *Sensors*. 2025; 25(16):5170. <https://doi.org/10.3390/s25165170>
3. Wang Y, Chen B, Wu G, Xue C, Gao L. Fiber-Optic Pressure Sensors: Recent Advances in Sensing Mechanisms, Fabrication Technologies, and Multidisciplinary Applications. *Sensors*. 2025; 25(20):6336. <https://doi.org/10.3390/s25206336>
4. Osadchuk I, Osadchuk O, Baraban S, Semenov A, Baraban M. Model-Based Design and Sensitivity Optimization of Frequency-Output Pressure Sensors for Real-Time Monitoring in Intelligent Rowing Systems. *Electronics*. 2025; 14(20):4049. <https://doi.org/10.3390/electronics14204049>
5. Osadchuk I.A.; Osadchuk, A.V.; Osadchuk, V.S. Semenov, A.O. Nanoelectronic Pressure Transducer with a Frequency Output Based on a Resonance Tunnel Diode // Proc. of IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, 25-29.02.2020, pp. 452-457. doi: 10.1109 / TCSET49122.2020.235474.
6. Osadchuk, A.V., Osadchuk, V.S., Osadchuk, I.A., Kisała P., Zyska T., Annabaev A., Mussabekov K. Radiomeasuring pressure transducer with sensitive MEMS Capacitor // *Przegląd Elektrotechniczny* 2017, R93(3), pp. 113–116.

Осадчук Ярослав Олександрович – д.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: osadchuk.j93@gmail.com

Осадчук Олександр Володимирович – д.т.н., професор, завідувач кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: osadchuk.av69@gmail.com

Шикун Костянтин Віталійович – аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: shykunkv@gmail.com

SELF-OSCILLATING MICROELECTRONIC PRESSURE TRANSDUCER

Abstract

A self-oscillating microelectronic pressure transducer based on a transistor structure with a negative differential resistance with a primary strain-sensitive element based on a tunnel-resonant diode is proposed, and the primary strain-sensitive transducer is an active element of the self-oscillating circuit, which simplifies the design of the measuring pressure transducer. Based on the consideration of physical processes in the primary strain-sensitive element and in the self-oscillating based on the method of converting the energy of a constant electric field at the input of the primary transducer into the energy of an alternating electric field at the output of the self-oscillating, a mathematical model of the self-oscillating pressure transducer is developed.

Keywords: pressure transducer, self-oscillating, negative differential resistance, tunnel-resonant diode.

Osadchuk Iaroslav Oleksandrovych - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department information radioelectronic technologies and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: osadchuk.j93@gmail.com

Osadchuk Oleksandr Volodymyrovych - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of information radioelectronic technologies and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: osadchuk.av69@gmail.com

Shygun Kostyantyn Vitaliyovych – postgraduate student of the Department of information radioelectronic technologies and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: shykunkv@gmail.com.

ВИКОРИСТАННЯ ГЕНЕРАТОРІВ ХАОСУ В РОЗРОБЦІ ЕЛЕКТРОННО-КОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У цій роботі представлено новий цифровий хаотичний пристрій для електронно-комунікаційної системи з частотно-модульованою хаотичною маніпуляцією зсуву, реалізований в програмованій венти́льній матриці (FPGA). Такі системи забезпечують високий рівень безпеки на фізичному рівні зв'язку та можуть бути використані в бездротових сенсорних мережах. Модифікований генератор хаосу на основі транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором та хаотична синхронізація з лінійним зворотним зв'язком за помилками реалізовані в FPGA.

Ключові слова: хаос, генератор хаосу, хаотична синхронізація, електронно-комунікаційна система, маніпуляція хаосу зсуву.

Застосування генераторів хаосу в створенні систем електронних комунікацій розглядається з початку ХХІ століття. Однією з основних переваг систем зв'язку, що використовують хаотичні коливання, є підвищена безпека [1]. Коли хаотичні коливання використовуються як несучий сигнал, важко виявити їхню присутність та правильно декодувати отриману інформацію, оскільки властивості хаотичного сигналу важко передбачити. Використання хаотичної синхронізації в схемах зв'язку з когерентним детектуванням ще більше збільшує рівень безпеки, бо для синхронізації та правильного прийому переданих даних на прийомному пристрої потрібно мати генератор хаосу з такими самими параметрами та конструкцією [2]. Крім того, хаотичний сигнал складно перехопити, а також він має певну стійкість до багатопроменевого поширення та завад, спрямованих на порушення зв'язку [3]. Такі особливості хаотичних систем роблять їх цікавими для наукових досліджень, а також перспективними для застосування в безпечних електронно-комунікаційних системах. Існують два підходи до побудови генераторів хаосу це аналоговий та цифровий. Аналогові генератори хаосу ґрунтуються на резисторах, конденсаторах, котушках індуктивності, операційних підсилювачах, біполярних транзисторах та діодах для отримання та підтримки нелінійних коливань кола в хаотичному режимі [3-5]. Їхню хаотичну поведінку можна точно математично описати за допомогою відносно простих звичайних диференціальних рівнянь. Практичне застосування аналогових генераторів хаосу в проектуванні систем зв'язку викликає кілька проблем, таких як дрейф номінальних значень компонентів через зміни температури, відносної вологості, напруги живлення та інших умов навколишнього середовища та експлуатації. Зміни параметрів аналогового генератора хаосу під час роботи неможливо ефективно компенсувати. Такі зміни параметрів системи роблять завдання хаотичної синхронізації досить складним, оскільки вона вимагає двох генераторів хаосу з однаковими параметрами, з'єднаних разом відповідним чином. Крім того, немає можливості контролювати початкові стани змінних стану аналогового генератора хаосу. Ці проблеми спонукали знайти альтернативні способи реалізації динамічних генераторів хаосу. Одним із підходів є використання дискретної реалізації в технології програмованих венти́льних матриць (FPGA). FPGA дозволяє з певним наближенням реалізувати генератор динамічного хаосу в дискретному середовищі шляхом синтезу повністю визначеної системи, яка вільна від проблеми дрейфу компонентів і має потенціал для високої пропускну здатності та обчислювальної потужності. Крім того, FPGA дозволяє швидко, дуже гнучке прототипування з мовою опису обладнання та швидко паралельну обробку даних у реальному часі за допомогою конвеєрної обробки. Ці функції можна ефективно використовувати для розробки хаотичної системи зв'язку на основі FPGA.

Прототип системи зв'язку FM-CSK на базі FPGA, розроблений у цьому дослідженні, включає цифрову та аналогову частини. Цифрова частина реалізована на FPGA та містить модулятор FM-

CSK, демодулятор, а також блоки обробки переданих і прийнятих сигналів. Водночас передача між передавачем і приймачем є аналоговою, використовуючи цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) та аналого-цифровий перетворювач (АЦП). Окрім прототипу FPGA, була розроблена верифікована математична модель цифрової частини системи зв'язку Simulink. Проаналізовано точність роботи прототипу та моделі. Виконано дослідження завадостійкості системи FM-CSK. Головною метою цього дослідження є демонстрація концепції прототипу нової хаотичної системи зв'язку, реалізованої на FPGA. Запропонована система зв'язку використовує FM-ACSK-модуляцію з хаотичною синхронізацією для передачі цифрових даних за допомогою хаотичних сигналів. Прототип системи зв'язку змодельовано в Simulink та реалізовано на платі розробки з FPGA Altera Cyclone IV. Математична модель використовується для порівняння продуктивності прототипу FPGA та її вузлів з моделюванням, що спрощує процес розробки прототипу та дозволяє перевірити поведінку кожного вузла системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Cirjulina D, Babajans R, Tjukovs S, Spinazzola E, Secco J, Vovchuk D, Pikulins D. Nonlinear Dynamics and Hybrid Synchronization of DC Biased Colpitts Chaotic Oscillators. *Electronics*. 2025; 14(20):4005. <https://doi.org/10.3390/electronics14204005>
2. Capligins F, Litvinenko A, Kolosovs D, Terauds M, Zeltins M, Pikulins D. FPGA-Based Antipodal Chaotic Shift Keying Communication System. *Electronics*. 2022; 11(12):1870. <https://doi.org/10.3390/electronics11121870>
3. Осадчук О.В., Осадчук Я.О., Скощук В.К., Петренко В.І. Генератор детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, 2025, №2. –С.240-249. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-82-33>
4. Осадчук О.В., Осадчук Я.О., Скощук В.К., Петренко В.І. Розробка генератора детермінованого хаосу на основі транзисторної структури з від'ємним опором // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології, 2025. Том 49. №1. –С.247-256. <https://oeipt.vntu.edu.ua/index.php/oeipt/article/view/777/709>
5. Осадчук О.В., Осадчук Я.О., Петренко В.І., Скощук В.К. Дослідження генератора детермінованого хаосу на основі транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором // Вчені записки ТНУ імені В.І.Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 36(75), №3 2025. –С.86-95.

Осадчук Олександр Володимирович – д.т.н., професор, завідувач кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: osadchuk.av69@gmail.com

Осадчук Ярослав Олександрович – д.т.н., доцент кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: osadchuk.j93@gmail.com

Петренко Віталій Іванович – аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

USE OF CHAOS GENERATORS IN THE DEVELOPMENT OF ELECTRONIC COMMUNICATION SYSTEMS

Abstract

This paper presents a new digital chaotic device for an electronic communication system with frequency-modulated chaotic shift manipulation, implemented in a field-programmable gate array (FPGA). Such systems provide a high level of security at the physical communication level and can be used in wireless sensor networks. A modified chaos generator based on a transistor structure with negative differential resistance and chaotic synchronization with linear error feedback are implemented in an FPGA.

Keywords: chaos, chaos generator, chaotic synchronization, electronic communication system, chaos shift manipulation.

Osadchuk Oleksandr Volodymyrovych - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of information radioelectronic technologies and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: osadchuk.av69@gmail.com

Osadchuk Iaroslav Oleksandrovych - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of information radioelectronic technologies and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: osadchuk.j93@gmail.com

Petrenko Vitaliy Ivanovych – Postgraduate Student of the Department of Information Radioelectronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИГОТОВЛЕННЯ ШВИДКОДІЮЧОГО МІКРОЕЛЕКТРОННОГО ПРИСТРОЮ З ВІД'ЄМНИМ ДИФЕРЕНЦІЙНИМ ОПОРОМ НА ОСНОВІ 2D НАНОМАТЕРІАЛУ MoO₃

¹Max Planck Institute for the Structure and Dynamics of Matter (MPSD), Hamburg, Germany

²Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, Ukraine

Анотація. Розроблено технологію виготовлення MoO₃-пристрою з від'ємним диференційним опором на основі 2D матеріалу, який представляє собою нанометрові шари товщиною в один атомний шар або елементарну комірку. За звичайних умов такі матеріали є хімічно стабільними та механічно міцними, але при цьому є гнучкими. Було розроблено декілька топологій різної конфігурації для виготовлення швидкодіючого мікроелектронного пристрою з від'ємним диференційним опором на основі 2d наноматеріалу MoO₃. Топологія складається з трьох шарів: 1й шар — це нижній електрод Ti/Au пристрою, другий шар — це напівпровідниковий матеріал аморфного триоксиду молібдену і третій шар — це верхній електрод пристрою також з Ti/Au.

Ключові слова: від'ємний диференційний опір, MoO₃-пристрій, топологія, мікроелектронна технологія.

В останнє десятиліття двовимірні (2D) матеріали викликають великий інтерес у науці [1]. 2D матеріали - це нанометрові шари товщиною в один атомний шар або елементарну комірку. Таким чином, вони утворюють клас найтонших матеріалів, які тільки можна собі уявити. За звичайних умов вони є хімічно стабільними та механічно міцними, але при цьому гнучкими [2, 3]. Завдяки особливим властивостям 2D матеріалів відкриваються абсолютно нові можливості для розробки сучасних мікро- та наноелектронних пристроїв [4]. Існують 2D-модифікації з ізоляційними, провідними та напівпровідниковими властивостями, що є основою для повноцінної 2D-електроніки [5]. Сполуки молібдену також належать до цих матеріалів. Для нашої роботи було обрано триоксид молібдену, оскільки цей матеріал має цікаві оптичні та тензометричні властивості. Оксид молібдену являє собою хімічну сполуку з хімічною формулою MoO₃ з температурою плавлення 795 °C та щільністю 4,69 г/см³.

Було розроблено кілька топологій різної конфігурації MoO₃-пристрою з від'ємним диференційним опором на основі 2D матеріалу, як окремі пристрої на одному чіпі, так і матриці по чотири елементи на чіпі. У даній роботі представлено два види топології 10μm x 10μm і 30μm x 30μm. Для цього використовувалась програма відкритого доступу K-Layout. Топологія складається з трьох шарів: 1й шар — це нижній електрод Ti/Au пристрою, другий шар — це напівпровідниковий матеріал аморфного триоксиду молібдену. Третій шар — це верхній електрод пристрою також з Ti/Au. Нижній електрод із золота має довжину 1400 μm і ширину 10 μm, верхній електрод із золота має довжину 2500 μm і ширину 10 μm, шар триоксиду молібдену між ними має форму квадрату, розміром 150 μm x 150 μm. Контактні площадки мають розмір 40 μm x 40 μm, що в нашому випадку залежить від приладу для пайки виводів пристрою.

Для виготовлення MoO₃-пристрою використовувався субстрат кремнію діаметром 6", товщиною в 700 μm, p-типу, з питомим опором до 50 Ом*см з орієнтацією кристалографічних осей (100) і термічно вирощеним шаром двооксиду кремнію товщиною в 650 нм фірми Nova Electronic materials Inc. На пластини для кращого процесу Lift-Off наносили подвійний фоторезистивний шар, який складається з двох фоторезистів: Lift-Off-фоторезист LOR 7B і позитивного фоторезисту ma-P 1205. Ця комбінація фоторезистів забезпечує необхідну товщину, підріз, важливий для подальшої обробки підкладок по технології Lift-Off, а також чутливість до ближнього УФ (375 нм) лазерного променю літографічної установки.

Двошаровий фоторезист експонувався в системі лазерної літографії μ PG 101 від Heidelberg Instruments GmbH. Лазерна літографічна установка μ PG 101 використовує режим прямого запису в ближньому ультрафіолетовому діапазоні, а саме з довжиною хвилі 375 нм. Доза опромінення на підкладці складала 127 мДж/см², що відповідало оптимальному контрасту. Усі зразки проявлялись в проявнику ma-D 331/S протягом 60 с, для припинення процесу використовувалась деіонізована вода. Зразки промивались в ізопропанолі та осушувались потоком сухого азоту. Для нанесення золотих провідників та контактних площадок використовувався випарник електронно-променевого типу HVB 100. При такому процесі покриття, гранульований матеріал, в нашому випадку золото високої чистоти 99,999%.

Напилення триоксиду молібдену здійснювалось при тиску $2 \cdot 10^{-5}$ мбар за допомогою напилювальної установки електронно-променевого типу HVB 100 з тигельної вставки типу FABMATE®. Для напилення триоксиду молібдену були вибрані три рампи потужності з досить довгим часом на збільшення потужності та їхньою тривалістю. Це дозволяло поступово нагріти матеріал до точки, коли може початися осадження, в нашому випадку сублимація.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Pan J, Zhang Y, Yin J, Guo P, Yang Y, Ren T-L. Principles and Applications of Two-Dimensional Semiconductor Material Devices for Reconfigurable Electronics. *Nanomaterials*. 2025; 15(3):201. <https://doi.org/10.3390/nano15030201>
2. Cao W., Bu H., Vinet M. *et al.* The future transistors. *Nature* 620, 501–515 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06145-x>
3. J. Wang, I. Verzhbitskiy and G. Eda. "Electroluminescent Devices Based on 2D Semiconducting Transition Metal Dichalcogenides" *Advanced Materials* 30, e1802687 (2018) DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201802687>
4. M. Ye, D. Zhang and Y. Yap. "Recent Advances in Electronic and Optoelectronic Devices Based on Two-Dimensional Transition Metal Dichalcogenides" *Electronics* 6, 43 (2017) DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics6020043>
5. K. S. Novoselov, A. Mishchenko, A. Carvalho and A. H. Castro Neto. "2D materials and van der Waals heterostructures" *Science* 353, aac9439 (2016) DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aac9439>

Elena König - Ph.D., Technical assistant (physics), SSU Ultrafast Electronics, Max Planck Institute for the Structure and Dynamics of Matter (MPSD), Hamburg, Germany

Осадчук Олександр Володимирович – д.т.н., професор, завідувач кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: osadchuk.av69@gmail.com

Осадчук Ярослав Олександрович – д.т.н., доцент кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: osadchuk.j93@gmail.com

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF MANUFACTURING A HIGH-PERFORMANCE MICROELECTRONIC DEVICE WITH NEGATIVE DIFFERENTIAL RESISTANCE BASED ON 2D NANOMATERIAL MoO₃

Abstract. A technology has been developed for manufacturing a MoO₃ device with negative differential resistance based on a 2D material, which is nanometer layers with a thickness of one atomic layer or unit cell. Under normal conditions, such materials are chemically stable and mechanically strong, but at the same time they are flexible. Several topologies of different configurations have been developed for manufacturing a high-performance microelectronic device with negative differential resistance based on 2d nanomaterial MoO₃. The topology consists of three layers: the 1st layer is the bottom electrode of the Ti/Au device, the second layer is the semiconductor material of amorphous molybdenum trioxide, and the third layer is the top electrode of the device also of Ti/Au.

Keywords: negative differential resistance, MoO₃ device, topology, microelectronic technology.

Elena König - Ph.D., Technical assistant (physics), SSU Ultrafast Electronics, Max Planck Institute for the Structure and Dynamics of Matter (MPSD), Hamburg, Germany

Osadchuk Oleksandr Volodymyrovych - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of information radioelectronic technologies and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: osadchuk.av69@gmail.com

Osadchuk Iaroslav Oleksandrovych - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of information radioelectronic technologies and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: osadchuk.j93@gmail.com

ВИКОРИСТАННЯ FMCW РАДАРІВ ДЛЯ ВІДСТЕЖЕННЯ БПЛА

Вінницький національний технічний університет

Анотація: У роботі розглянуто вимоги до радарів для відстеження безпілотних літальних апаратів та переваги використання FMCW MIMO-технологій.

Ключові слова: FMCW-радар, MIMO, ESCI, БПЛА.

Вступ

Стрімкий розвиток безпілотних літальних апаратів створює нові виклики для систем спостереження та безпеки. Через малі розміри й маневровість БПЛА їх важко виявити традиційними радарми. Ефективним рішенням є використання FMCW MIMO-радарів, що забезпечують високу точність, роздільну здатність і стійкість до завад.

Результат дослідження

Радари, призначені для відстеження безпілотних літальних апаратів, повинні відповідати ряду технічних вимог, що забезпечують їхню ефективність у складних умовах. Насамперед, вони мають володіти високою роздільною здатністю за дальністю, кутом та швидкістю, щоб виявляти малорозмірні та малопомітні цілі. Важливою є також висока чутливість приймача та низький рівень власних шумів, що дозволяє фіксувати слабкі відбиті сигнали від невеликих БПЛА. Радарна система повинна забезпечувати точне вимірювання дальності й швидкості навіть за наявності перешкод, зокрема від землі чи інших об'єктів. Крім того, сучасні радари мають бути компактними, енергоефективними та здатними працювати в реальному часі, підтримуючи обробку великих обсягів даних і взаємодію з системами штучного інтелекту для автоматичної класифікації цілей.

Сучасний розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА) створює нові виклики у сфері безпеки та оборони. Їхні малі розміри, низька швидкість польоту та можливість виконувати маневри на невеликих висотах ускладнюють виявлення традиційними радарми. Ефективним рішенням цієї проблеми є застосування радарів із частотно-модульованою безперервною хвилею (FMCW — *Frequency Modulated Continuous Wave*)[1] у поєднанні з технологією множинного входу та виходу (MIMO — *Multiple Input Multiple Output*).

FMCW-радари працюють за принципом безперервного випромінювання сигналу, частота якого лінійно змінюється з часом. Відбитий від об'єкта сигнал зміщується за частотою відносно переданого, що дозволяє виміряти відстань до цілі через аналіз різниці частот (так званого «частотного біту»). Завдяки цьому FMCW-радари забезпечують високу роздільну здатність за дальністю при відносно низькій потужності випромінювання. Крім того, шляхом аналізу доплерівського зсуву можна визначати швидкість руху об'єкта, що є важливим для відстеження БПЛА.

Використання MIMO-технології дозволяє суттєво підвищити просторову роздільну здатність радара. Кілька антен передавання та приймання формують віртуальну антенну решітку, еквівалентну великій кількості елементів. Це розширює можливості системи для побудови тривимірних карт радіолокаційного середовища, визначення азимуту та кута місця цілі. У контексті детекції БПЛА така архітектура дає змогу точно локалізувати малорозмірні об'єкти навіть у складних умовах — наприклад, у міських зонах або при наявності перешкод від землі.

FMCW MIMO-радари також відзначаються високою стійкістю до завад і низькою ймовірністю виявлення їхнього випромінювання. Це робить їх придатними для використання у системах пасивного спостереження або прихованого моніторингу повітряного простору. Поєднання цих властивостей дає можливість реалізувати ефективні системи раннього попередження про проникнення БПЛА, автоматизоване супроводження цілей та класифікацію типів об'єктів на основі радіолокаційних ознак.

FMCW MIMO-радар є перспективним інструментом для детекції та відстеження безпілотних літальних апаратів завдяки своїй високій точності, адаптивності та можливості тривимірного просторового аналізу. Подальші дослідження у цій галузі спрямовані на підвищення швидкодії систем обробки сигналів, інтеграцію з технологіями штучного інтелекту для автоматичної ідентифікації БПЛА та зменшення вартості апаратної реалізації таких радарних систем.

Висновки

FMCW MIMO-радар є ефективним та перспективним засобом для точного виявлення і відстеження безпілотних літальних апаратів у складних умовах спостереження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. T. Ince, "FMCW radar performance for atmospheric measurements," Radioengineering, vol. 19, pp. 129–135, 2010.

Тимчик Микола Сергійович — студент групи РТ24м, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: mykolatymchyk02@gmail.com

Науковий керівник: **Осадчук Олександр Володимирович** — доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

USING FMCW RADAR FOR UAV DETECTION

Abstract

The paper discusses the requirements for radars used in unmanned aerial vehicle (UAV) detection and the advantages of employing FMCW MIMO technologies.

Keywords: FMCW radar, MIMO, ESCI, UAV.

Tymchyk Mykola S. - student of the RT-24m group, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: mykolatymchyk02@gmail.com

Supervisor: **Oleksandr Volodymyrovych Osadchuk** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Information Radioelectronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

В. М. Бондаренко
Д. С. Бейнарович
Т. Р. Гарматюк
О. А. Хіжнюк

РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ ФОРМУВАННЯ ТА ОБРОБКИ ШИРОКОСМУГОВИХ ІМПУЛЬСНИХ СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ ПОХІДНОЇ СИСТЕМИ КОДІВ БАРКЕРА-УОЛША ДЛЯ РАДІОЛОКАТОРІВ З АНТЕННИМИ РЕШІТКАМИ

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

Анотація: У статті розглянуто актуальну проблему підвищення основних технічних характеристик радіолокаторів з антенними решітками, таких як дальність, роздільна здатність та завадостійкість. Запропоновано новий підхід до формування широкосмугових імпульсних сигналів з фазоковою модуляцією, який базується на синтезі похідної (складеної) системи сигналів на основі кодів Баркера та Уолша. Головною перевагою запропонованого методу є здатність значно збільшити енергію випромінювання за рахунок використання довгих послідовностей без зростання рівня бічних пелюсток автокореляційної функції (АКФ). Наведено результати моделювання в середовищі MathCAD, які підтверджують ефективність запропонованого способу. Показано, що сума АКФ всіх елементів похідної системи має чіткий головний пелюсток і значно знижений рівень бічних пелюстків завдяки їх компенсації в протифазі. Розроблено структурні схеми модуля формування сигналів та багатоканального корелятора для їх обробки. Моделювання демонструє високу завадостійкість системи, оскільки на виході суматора спостерігається чіткий кореляційний пік корисного сигналу на тлі значно ослабленого шуму.

Ключові слова: широкосмуговий сигнал, радіолокатор, фазована антенна решітка, фазова маніпуляція, код Баркера, код Уолша, похідна система сигналів, автокореляційна функція, багатоканальний корелятор.

Вступ. Відомо, що серед основних вимог до широкосмугових імпульсних сигналів, які використовуються в імпульсних радіолокаторах з антенними решітками, є забезпечення малого рівня бічних пелюсток їхніх автокореляційних функцій (АКФ), можливість збільшення енергії випромінювання, зменшення впливу доплерівського зсуву частоти, ефективне використання спектрів частот сигналів, завадостійкість [1, 2]. Існуючі рішення, такі як сигнали з лінійною частотною модуляцією (ЛЧМ) або обмежені за довжиною коди Баркера, не дозволяють повністю вирішити ці завдання. Метою даної роботи є розробка алгоритмів формування та обробки широкосмугових імпульсних сигналів з фазоковою модуляцією на основі похідної (складеної) системи сигналів для радіолокаторів з антенними решітками при використанні кодів Баркера та Уолша, а також проведення оцінки їх ефективності.

Матеріали та методи. Для досягнення мети було використано метод синтезу похідних систем сигналів шляхом по елементного складання за модулем 2 (операція XOR) кодів Уолша (вихідна система) та кодів Баркера (генеруюча система) [3].

Елемент похідної системи формується як:

$$\psi_n = wal(n\Theta) + (b_1, b_2, \dots, b_N) \quad (1)$$

Ефективність запропонованого способу оцінювалась за допомогою комп'ютерного моделювання в середовищі MathCAD, що включало розрахунок автокореляційних функцій, аналіз впливу доплерівського зсуву та оцінку завадостійкості в умовах шуму.

Результати та обговорення

В результаті дослідження було синтезовано похідну систему сигналів порядків $N=4$ та $N=8$. Моделювання показало, що елементи цієї системи успадковують низький рівень бічних

пелюсток АКФ (≤ 0.25) від кодів Баркера. Ключовим результатом є те, що сума АКФ всіх елементів похідної системи має різко виражену головну пелюстку і значно знижений рівень бічних пелюсток за рахунок їх компенсації в протифазі. На основі отриманих даних розроблено структурні схеми модуля формування сигналів та багатоканального корелятора обробки. Моделювання підтвердило високу завадостійкість системи: на виході суматора спостерігається чіткий кореляційний пік корисного сигналу на тлі значно ослабленого шуму, що пояснюється ефектом розширення спектру вузькосмугових завад при кореляційній обробці [4].

Висновки

Запропонований спосіб формування та обробки широкосмугових сигналів на основі похідної системи Баркера-Уолша дозволяє збільшити енергію випромінювання за рахунок використання довгих послідовностей, підвищити роздільну здатність і точність вимірювання дальності завдяки вузькому головному пелюстці сумарної АКФ, а також підвищити завадостійкість внаслідок властивостей кодового розділення сигналів. Отримані результати відкривають перспективи для впровадження в сучасних радіолокаційних системах з антенними решітками.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Richards, M. A. (2022). *Fundamentals of Radar Signal Processing*. McGraw-Hill Education.
2. Gaglione, D., Clemente, C., & Ilioudis, C. V. (2023). Waveform Diversity and Design for Advanced Radar Systems. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 38(1), 42-63.
3. Levanon, N., & Mozeson, E. (2020). *Radar Signals*. John Wiley & Sons.
4. Griffiths, H., Cohen, L., & Morse, C. (2024). Advanced Waveform Design for Modern Radar Systems. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 18(3), 255-270.
5. Chen, X., Wang, Y., & Li, Z. (2021). Sidelobe Suppression for Phase-Coded Radar Signals Using Genetic Algorithm. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 57(4), 2156-2168.

Бондаренко Віктор Михайлович, курсант, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, ORCID: 0009-0002-7681-3588

Бейнарівич Данило Сергійович, курсант, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, danilking717@gmail.com, ORCID: 0009-0008-1475-9006

Гарматюк Тетяна Романівна, курсант, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, catgarmatuc@gmail.com, ORCID: 0009-0005-6307-9320

Хізнюк Олександр Анатолійович, викладач кафедри, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, alexkotale@gmail.com, ORCID: 0009-0007-5855-2798

DEVELOPMENT OF ALGORITHMS FOR FORMATION AND PROCESSING OF BROADBAND PULSE SIGNALS BASED ON THE DERIVATIVE SYSTEM OF BARKER-WALSH CODES FOR RADAR WITH ANTENNA ARRAYS

Abstract: The article addresses the pressing issue of enhancing the key technical characteristics of phased array radars, such as range, resolution, and noise immunity. A novel approach to the formation of wideband phase-coded pulse signals is proposed, based on the synthesis of a derived (composite) signal system using Barker and Walsh codes. The main advantage of the proposed method is its ability to significantly increase the radiated energy through the use of long sequences without raising the level of the autocorrelation function (ACF) sidelobes. The results of simulation in the MathCAD environment, which confirm the effectiveness of the proposed method, are presented. It is shown that the sum of the ACFs of all elements of the derived system has a distinct main lobe and a significantly reduced level of sidelobes due to their compensation in antiphase. Structural diagrams of a signal formation module and a multichannel correlator for their processing have been developed. Simulation demonstrates the high noise immunity of the system, as a clear correlation peak of the useful signal is observed at the output of the adder against a background of significantly attenuated noise.

Keywords: wideband signal, radar, phased array, phase shift keying (PSK), Barker code, Walsh code, derived signal system, autocorrelation function, multichannel correlator.

Bondarenko Viktor, Cadet, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, ORCID: 0009-0002-7681-3588
Beinarovich Danylo, Cadet, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, danilking717@gmail.com, ORCID: 0009-0008-1475-9006

Harmatyuk Tetiana, Cadet, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, catgarmatuc@gmail.com, ORCID: 0009-0005-6307-9320

Khizhnyuk Oleksandr, Lecturer of the Department, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, alexkotale@gmail.com, ORCID: 0009-0007-5855-2798

ДОСЛІДЖЕННЯ ФАЗОВИХ ПОРТРЕТІВ ГЕНЕРАТОРІВ ДИНАМІЧНОГО ХАОСУ ТА ЇХ ВІЗУАЛІЗАЦІЯ В ПСЕВДО 3D-ПРОСТОРИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглядаються деякі приклади складних атракторів неавтономних та автономних генераторів динамічного хаосу на основі рівняння Ван дер Поля та підхід який дозволяє спростити розуміння заплутаної форми атрактора у фазовому просторі, шляхом обертання його проекції у псевдо 3Д. Для кращого розуміння наведено декілька повернутих атракторів з системи Спротта. Описано варіанти схем та запропоновано структурну схему приладу для обертання проекцій складних атракторів у фазовій площині.

Ключові слова: динамічний хаос, атрактор, генератор, фазова площина, пристрій, сигнал, моделювання.

Вступ

У більшості робіт які розглядають генератор динамічного хаосу ключовим є елемент з нелінійною вольт-амперною характеристикою (ВАХ). Однією з найпростіших схем в якій використовувався неоновий індикатор є генератор пилкоподібної хвилі. У 1927 році виходить робота під назвою «демультиплікація частоти» (явище при якому частота основного генератора становиться кратна частоті зовнішнього генератора під його впливом, у приведеному випадку вона зменшувалася). Ван дер Поля та ван дер Марк, спостерігали шум перед переходом на нову, нижчу частоту, але цьому не придали значення. У 1986 році Леон Чуа і Майкл Кеннеді, вже після представлення «схеми Чуа», повернулися до роботи Ван дер Поля і представили докази того що цей шум був явищем динамічного хаосу [1]. Таким чином ключовим елементом для такої поведінки був не тільки нелінійний елемент а й зовнішнє джерело. Варіація схеми і зовнішнього джерела може призводити до різноманітної поведінки системи, дослідження яких представляють великий інтерес для систем прихованої передачі інформації [1]. Одним з засобів фіксації переходу до хаотичної поведінки є відображення атрактора за допомогою осцилографу, але траєкторія системи може бути дуже заплутаною і давати лише приблизне уявлення про форму атрактора при проведенні експерименту, обертання його проекції у псевдо 3Д дає змогу вирішити цю проблему [2].

Результати дослідження

Аналіз робіт проведений у [1] дозволяє привести деякі випадки складних атракторів отриманих з схем заснованих на рівнянні Ван дер Поля. На рисунку 1 (а-в), наведено траєкторію системи яка генерується модифікованою автономною схемою Ван-дер-Поля-Даффінга (ADVР) на основі мемристора. Його поведінка описується системою чотирьох зв'язаних диференціальних рівнянь першого порядку [3]. Обертання можна провести за допомогою аналоговий приставки до осцилографу, можливі три варіанти реалізації схеми такого приладу, заснованого на матриці обертання. У першому використовується ряд $\sin/\cos$ потенціометрів та операційних підсилювачів, при цьому використовується найменша кількість деталей, але виникає проблема маленької смуги пропускання через РС властивості потенціометрів і обмеженого кута обертання. Другий варіант дозволяє розширити смугу пропускання за допомогою аналогових помножувачів (АП) та постійних запам'ятовуючих пристроїв, але потребує по 4 АП для реалізації тільки однієї матриці обертання, що сильно здорожує вартість такого приладу.

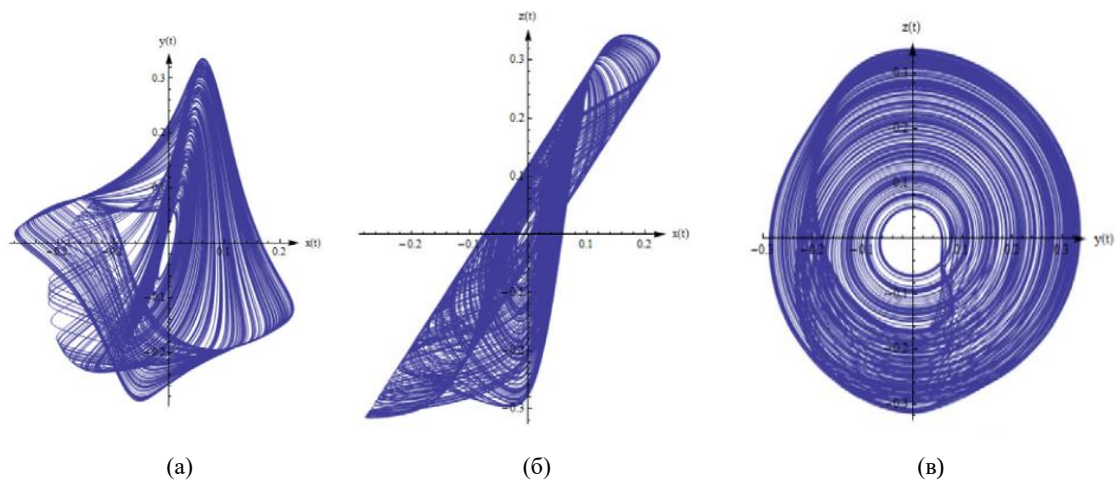


Рисунок 1 – Атрактор отриманий з модифікованого рівняння Ван дер Поля відображення на площини: XY (а), XZ (б), YZ (в) [3]

Останній варіант є компромісом між вартістю і смугою пропускання. Він використовує цифрові потенціометри, які можуть мати смугу пропускання від 1 до 10 МГц в залежності від максимального опору. Структурна схема такого пристрою наведена на рисунку 2. Використання шини I2C дозволяє зручно керувати великою кількістю мікросхем за допомогою мікроконтролера і виводити значення кута обертання на індикатори, автоматично керувати блоком розширення кута повороту і цифровими потенціометрами в залежності від введенного кута, наприклад, за допомогою енкодера або клавіатури. При цьому можна послідовно додавати необхідну (в залежності від числа вимірів 2-5Д) кількість матриць обертання. Пунктирна лінія лише умовно вказує на повторення усіх операцій, бо наступний поворот виконується не на першій а вже на іншій лінійці цифрових потенціометрів і інших необхідних компонентів. В якості наочної демонстрації наведеного підходу можна розглянути атрактор з системи Спротта, випадок Q [4], обертання виконано відносно осі Z на 0, 90 та 270 градусів (рисунок 3, а-в), проекція на площину X-Y.

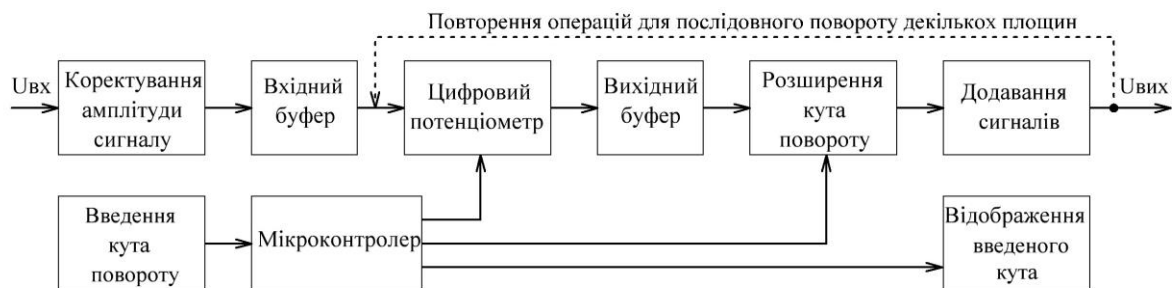


Рисунок 2 – Структурна схема пристрою для візуалізації складних атракторів у псевдо 3Д

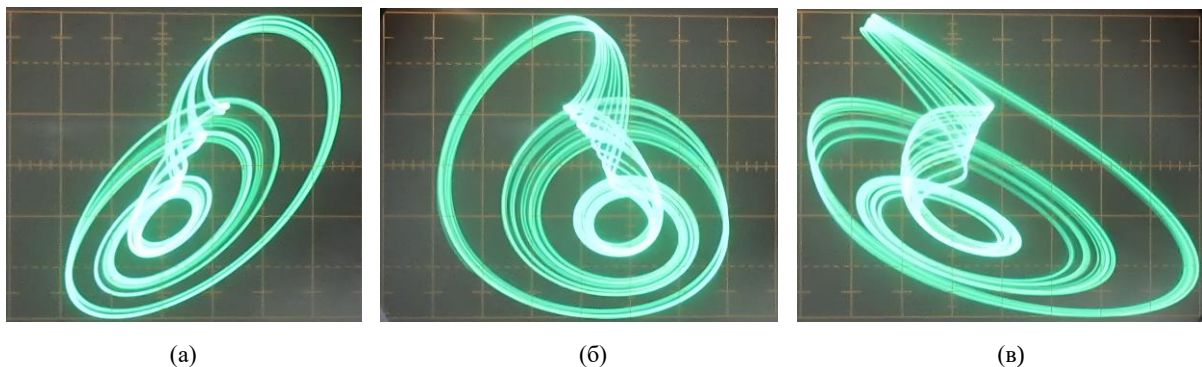


Рисунок 3 – Атрактор отриманий з системи Спротта і обертений, на 0 (а), на 90 (б), на 270 градусів (в) [4]

Висновки

Шляхом зміни джерела збудження неавтономних генераторів динамічного хаосу можна досягти різноманітних станів системи, що впливає на форму атрактору у фазовому просторі. Розглянутий підхід дозволяє відображати розвиток динаміки системи автономних і неавтономних генераторів динамічного хаосу, які побудовані на основі рівняння Ван дер Поля або його модифікаціях, у псевдо 3Д. Крім покращення просторового розуміння атрактору обертання можна використати щоб «розрізати» у необхідній площині сплутаний атрактор за допомогою перетину Пуанкаре. Можливе дослідження системи більш високого порядку, аніж три, дозволить розглядати взаємодію не окремої пари сигналів системи а усіх у чотирьох або п'яти вимірному просторі, шляхом спостереження за 3 вимірними зрізами. Слід зазначити що таким чином може бути досліджено будь-який генератор динамічного хаосу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Semenov A. O., Khloba A. A. Review of circuit solutions leading to deterministic chaos in oscillators based on the van der pol equation. Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences. 2025. Vol. 1, no. 2. P. 149–157. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/22>
2. Семенов А. О., Хльоба А. А. Пристрої керування відображеннями проєкцій у фазовому просторі дивних атракторів генераторів динамічного хаосу. Systems and Technologies. 2025. Т. 69, № 1. С. 269–277. DOI: <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2025-1-69.32>
3. Dynamical behavior, chaos control and synchronization of a memristor-based ADVP circuit / A. M. A. El-Sayed et al. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 2013. Vol. 18, no. 1. P. 148–170. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2012.06.011>
4. Sprott Systems Circuits. Glen's Stuff. URL: <https://glensstuff.com/sprotsystems/sprotsystems.htm> (дата звернення: 03.11.2025).

Хльоба Антон Анатолійович — аспірант, група 172-24а, кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: hlobaanton@gmail.com

Науковий керівник: **Семенов Андрій Олександрович** — д-р техн. наук, професор, професор кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: semenov.a.o@vntu.edu.ua

RESEARCH OF PHASE PORTRAITS OF DYNAMIC CHAOS GENERATORS AND THEIR VISUALIZATION IN PSEUDO 3D SPACE

Abstract

The paper considers some examples of complex attractors of non-autonomous and autonomous generators of dynamic chaos based on the Van der Pol equation and an approach that simplifies the understanding of the complex shape of the attractor in phase space by rotating its projection in pseudo 3D. For a better understanding, several rotated attractors from the Sprott system are presented. Variants of schemes are described and a structural diagram of a device for rotating projections of complex attractors in the phase plane is proposed.

Keywords: dynamic chaos, attractor, generator, phase plane, device, signal, simulation.

Khloba Anton Anatolyevich — postgraduate student, Department of Information Radioelectronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: hlobaanton@gmail.com

Supervisor: **Semenov Andriy Oleksandrovych** — Dr. Sc. (Eng.), Full Professor, Professor of the Department of Information Radioelectronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: semenov.a.o@vntu.edu.ua

ОПТИМАЛЬНИЙ ОЦІНЮВАЧ ЗІ СТРУКТУРНОЮ АДАПТАЦІЄЮ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Метою даної роботи є розробка адаптивного алгоритму фільтрації просторових даних рухомого динамічного об'єкту за умов апіорної траєкторної невизначеності. В основі рішення поставленої задачі лежить апроксимація траєкторії вільного руху динамічного об'єкту відомими моделями руху і поєднання відповідних їм оптимальних фільтрів у структурну єдність з подальшим імовірнісним механізмом формування підсумкової оцінки і структурної адаптації відповідно до динаміки руху об'єкту контролю.

Ключові слова: оптимальний фільтр, структурна адаптивна фільтрація, імовірнісний механізм адаптації.

Не зважаючи на те, що процес руху будь якого динамічного об'єкту є безперервним, для використання усіх переваг сучасних методів цифрової обробки інформації є доцільним перехід до дискретного еквівалента нелінійної моделі рівнянь в просторі станів :

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{A}_{k|k-1}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{G}_{k|k-1}\mathbf{u}_k + \mathbf{B}_{k|k-1}\mathbf{w}_k \quad (1)$$

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k$$

де $\mathbf{x}_k \in \mathcal{R}^n$ – вектор стану, компонентами якого є координати рухомого об'єкту та швидкості їх зміни; $\mathbf{A}_k \in \mathcal{R}^{n \times n}$ – системна перехідна матриця, структура якої залежить від характеру руху об'єкта стеження у просторі; $\mathbf{G}_k \in \mathcal{R}^{n \times p}$ – системна матриця входу; $\mathbf{u}_k \in \mathcal{R}^p$ – вектор вхідних керуючих впливів; $\mathbf{B}_k \in \mathcal{R}^{n \times q}$ – системна матриця збурень; $\mathbf{w}_k \in \mathcal{R}^q$ – гаусова біла послідовності з нульовим середнім значенням та апіорно заданою кореляційною матрицями $\mathbf{Q}_k \in \mathcal{R}^{q \times q}$; $\mathbf{z}_k \in \mathcal{R}^m$ – вектор спостережень, $\mathbf{C}_k \in \mathcal{R}^{m \times n}$ – матриця спостережень, структура якої визначається типом вимірювальних засобів та їх числом; $\mathbf{v}_k \in \mathcal{R}^m$ – похибка первинних вимірювань.

За умови наявності адекватної математичної моделі динаміки руху об'єкта стеження, в подібних випадках, стандартом для фільтрації траєкторних даних є фільтр Калмана [1]. Однак за умов апіорної траєкторної невизначеності, вище згаданий алгоритм втрачає оптимальні властивості з можливістю подальшого розбіжності процесу фільтрації. В представленому дослідженні для подолання апіорної траєкторної невизначеності запропоновано використати оптимальний оцінювач зі структурною адаптацією (рис1.).

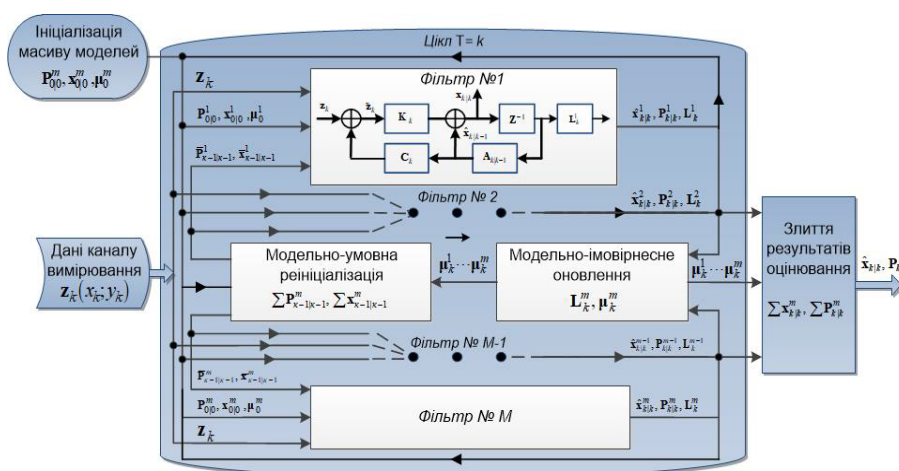


Рис. 1. Алгоритм оптимального оцінювача зі структурною адаптацією

Сутність запропонованого методу фільтрації просторових даних полягає у тому, що будь який вільний рух об'єкта спостереження, на певному інтервалі часу, можна апроксимувати одною з добре відомих моделей, а пристрій спостереження буде являти собою набір відповідних фільтрів Калмана з механізмом ймовірнісного керування який і буде визначати структуру пристрою у поточний момент часу відповідно до динаміки руху. У якості механізму керування обрано критерій максимуму функцій правдоподібності, при цьому субоптимальна оцінка вектору стану $\mathbf{x}_{k|k}$ на основі задіяних N структур являє собою виважену суму умовних математичних очікувань [2]:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \sum_{i=1}^N E \left[\mathbf{x}_k | m_k^{(i)}, \mathbf{z}_k \right] \mathbf{P} \left\{ m_k^{(i)} | \mathbf{z}_k \right\} = \sum_{i=1}^N \mathbf{x}_{k|k}^{(i)} \mu_k^{(i)}; \quad (2)$$

де $\mu_k^{(i)} = \mathbf{P} \left\{ m_k^{(i)} | \mathbf{z}_k \right\}$ - апостеріорна імовірність моделі.

Процедура фільтрації починає працювати з введення апріорних даних для кожної моделі та модельно-умовної реініціалізації входів фільтрів. На основі результатів роботи кожного окремого фільтру на такті k відбувається оновлення ймовірностей моделей. Фінальною стадією поточного такту є злиття оцінок та оновлення структури пристрою перед наступним кроком. Точність оцінювання визначається відповідною кореляційною матрицею:

$$\mathbf{P}_{k|k} = E \left[(\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_{k|k}) (\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_{k|k})^T | \mathbf{z}_k \right] = \sum_{i=1}^N E \left[(\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_{k|k}^{(i)}) (\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_{k|k}^{(i)})^T | \mathbf{z}_k \right] + (\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_{k|k}) (\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_{k|k})^T, \quad (3)$$

$$\mathbf{P} \left(m_k^i | \mathbf{z}_k \right) = \sum_{i=1}^N \left[\mathbf{P}_{k|k}^{(i)} + (\mathbf{x}_{k|k} - \hat{\mathbf{x}}_{k|k}^{(i)}) (\mathbf{x}_{k|k} - \hat{\mathbf{x}}_{k|k}^{(i)})^T \right] \mu_k^{(i)}.$$

Висновки

1. Кількість сучасних рухомих засобів та перевантаження ними навколишнього середовища змушує провідних виробників робити їх більш динамічними, здатними виконувати складні маневри в стиснутих часових рамках. Це вимагає непинного удосконалення засобів спостереження. Використання сучасних методів цифрової обробки інформації є перспективним напрямком підвищення точності траєкторного контролю та безпеки оточуючого нас світу в цілому.

2. Результати проведеного моделювання показують, що застосування оптимальних оцінювачів зі структурною адаптацією для вторинної обробки даних є достатньо ефективним методом, при цьому, відносний виграш у точності досягає 30-40 % у порівнянні зі стандартними алгоритмами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Volovyk A., Pyrih Y., Urikova O., Masiuk A., Shubyn B., Maksymuk T. Dynamic System State Estimation with a Resilience to Observation Data Anomalies. Contemp. Math. 2023 Nov. 27. Volume 5 Issue 1 (2024) PP 1-18. DOI: <https://doi.org/10.37256/cm.512024>.

[2] Воловик А.Ю. Адаптивне оцінювання параметрів руху повітряного судна у режимі дотримання заданої посадкової траєкторії. Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія. Львів, 2022 Вип. 2, № 2, С. 67–78. DOI: <https://doi.org/10.23939/ictee2022.02.067>.

Воловик Андрій Юрійович – д.т.н, доцент, професор кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: voland@vntu.edu.ua.

Ніколенко Максим Сергійович – аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: maximnikolenkokoic19b@gmail.com

STRUCTURALLY ADAPTABLE OPTIMAL OBSERVER

Abstract

The goal of this work is to develop an adaptive algorithm for filtering spatial data of a moving dynamic object under priori trajectory uncertainty. The solution to this problem is based on approximating the free dynamic object trajectory using known motion models and combining the corresponding optimal filters into a structural unity with a subsequent probabilistic mechanism for forming the final estimate and structural adaptation to the control object motion dynamics.

Keywords: optimal filter, structural adaptive filtering, probabilistic adaptation.

Volovyk Andrii U. – Dr. Sc. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Information Radioelectronic Technologies and Systems Department, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: voland@vntu.edu.ua.

Nikolenko Maksym Serhiyovych – postgraduate student of the Department of Information Radioelectronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: maximnikolenkokoic19b@gmail.com.

НЕПАРАМЕТРИЧНИЙ МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ SG-СТАТИСТИКИ В УМОВАХ ДІЇ МУЛЬТИПЛІКАТИВНИХ ЗАВАД

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

Анотація

Запропоновано новий непараметричний метод виявлення сигналів, що базується на використанні SG-статистики в умовах дії мультиплікативної завади. Запропонований метод виявлення не залежить від апріорної інформації щодо щільності розподілу імовірності завади та не враховує модель сигналу який спостерігається. Проведено порівняльний аналіз запропонованого непараметричного методу виявлення сигналів з класичними параметричними методами.

Ключові слова: непараметричний метод виявлення сигналів, мультиплікативна завада, SG-статистика, відношення передбачування.

Сучасні радіолокаційні системи посадки (РСП) працюють в умовах складної завадової обстановки, де якість виявлення сигналів значно погіршується через вплив на РСП як адитивних так і мультиплікативних завад. Мультиплікативні завади зазвичай виникають через роботу цивільних станцій мобільного зв'язку типу GSM (Global System for Mobile Communications) та роботи інших засобів зв'язку та радіотехнічного забезпечення в районах розміщення аеродромів. На відміну від адитивних завад, мультиплікативні завади модулюють амплітуду корисного сигналу, що призводить до нелінійного спотворення форми радіоімпульсу, зміни його ефективної тривалості та спектральних характеристик. Це робить неефективними параметричні та відомі класичні непараметричні методи виявлення сигналів, які покладаються на апріорне знання щільності імовірності розподілу шуму [2].

Традиційні непараметричні методи такі як знаковий та ранговий алгоритм також втрачають стійкість, оскільки мультиплікативні завади порушують незалежність спостережень та симетрію їх розподілу.

Метою роботи є розгляд непараметричного методу виявлення сигналів на основі SG-статистики, який забезпечує роботу системи в умовах дії мультиплікативних завад з невідомими статистичними характеристиками.

Для вирішення задачі виявлення сигналів в умовах дії мультиплікативних завад запропоновано використання непараметричного методу виявлення сигналів на основі SG-статистики. Цей метод не вимагає знання закону розподілу завад та сигналу і базується на використанні індексу передбачуваності SG.

У загальному випадку задача виявлення зводиться до вибору однієї з двох альтернативних гіпотез: H_0 – сигнал наявний у спостереженні та H_1 – сигнал відсутній, тобто наявні лише завади.

Нехай вхідний сигнал системи виявлення має вигляд:

$$y(t) = s(t) \cdot n(t) \quad (1)$$

де $s(t)$ – корисний сигнал; $n(t)$ – мультиплікативна завада [1].

В задачах виявлення сигналів для обґрунтованого вибору між гіпотезами H_1 та H_0 , фіксується значення помилки хибного виявлення α та визначається ймовірності правильного виявлення $D=1-\alpha$, а також поріг прийняття рішення, який у випадку адитивної завади обумовлюється критерієм відношенням правдоподібності (вирішальної статистики). Цей критерій є оптимальним у випадку адитивної завади з відомою щільністю розподілу імовірності.

У параметричних методах знання розподілу шуму дозволяє точно визначити порогове значення L , яке відповідає заданому рівню хибної тривоги α . Якщо характеристики шуму

змінюються, але закон розподілу відомий, поріг можна адаптувати, щоб підтримувати розрахункові показники.

При використанні непараметричної SG-статистики для вирішення задачі виявлення сигналу, в умовах його спотворення мультиплікативною завадою, пропонується використовувати відношення передбачуваності L , яке схоже на відношення правдоподібності, а саме:

$$L = \frac{SG_y}{SG_n} \quad (2)$$

де SG_y – значення SG-статистики спостереження сигналу, що спотворений завадою; SG_n – значення SG-статистики шуму [3].

Для вибору порогового значення l відношення L за умови що $L \geq l$ коли приймається рішення щодо присутності або відсутності сигналу для заданого рівня хибної тривоги α значення якого обумовлено критичним значенням щільності імовірності розподілу відношення L . В роботі досліджується щільність імовірності розподілу відношення L для різних довжин спостереження сигналу спотвореного мультиплікативною завадою з гаусівським розподілом імовірності. Слід зауважити, що при моделюванні методу виявлення сигналу вид закону розподілу імовірності завади не враховувався.

Якщо L має розподіл Стюдента або гаусівський коли кількості елементів часового ряду збільшується для визначення критичного значення щільності розподілу ймовірності можна скористатися відповідними таблицями.

В подальшому має сенс визначення ефективності роботи зазначеного методу виявлення сигналу, а також для вибору оптимального порогу прийняття рішення, провести дослідження залежності правильного виявлення сигналу від відношення сигнал/шум. Окрім цього дослідити чутливість обраного методу до виду розподілу завади з легкими та важкими хвостами наприклад: рівномірного, логарифмічного чи розподілу Коші.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Костенко П.Ю., Васюта К.С., Слободянюк В.В., Качайло Р.О., Чистов, В.І. Непараметричний метод виявлення сигналів з використанням SG-статистики. Вісті вищих учбових закладів. Харків: ХНУПС, 2024. 4с.
2. Свид І. В., Обод І. І. Завадостійкість радіолокаційних систем ідентифікації за ознакою «свій-чужий»: монографія. / І. В. Свид, І. І. Обод. Харків : Друкарня Мадрид, 2021. 254 с.
3. Костенко П.Ю., Васюта К.С., Слободянюк В.В., Чистов, В.І., Альонкін М.І. Застосування індексу передбачуваності для класифікації процесів в інформаційно-комунікаційних системах // Радіоелектроніка та системи зв'язку. 2024.: Стаття в журналі С. 154–158. doi: <https://doi.org/10.3103/S0735272724060013>

Костенко Павло Юрійович — д.т.н., професор, професор кафедри авіаційних радіотехнічних систем навігації та посадки, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, e-mail: kpyu@ukr.net

Решетняк Катерина Олександрівна — слухач групи 463С, факультет автоматизованих систем управління та наземного забезпечення польотів авіації, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, e-mail: katerinaresetnak08@gmail.com

Лук'янюк Роман Анатолійович — ад'юнкт штатний науково-організаційного відділу університету, факультет автоматизованих систем управління та наземного забезпечення польотів авіації, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, e-mail: romanlukianiuk94@gmail.com

NONPARAMETRIC SIGNAL DETECTION METHOD USING SG-STATISTICS UNDER MULTIPLICATIVE INTERFERENCE

Abstract

A novel nonparametric signal detection method is proposed, based on the use of SG-statistics under the influence of multiplicative interference. The proposed detection method does not depend on a priori information regarding the probability density distribution of the interference and does not consider the model of the observed signal. A comparative analysis of the proposed nonparametric signal detection method with classical parametric methods has been conducted.

Keywords: nonparametric signal detection method, multiplicative interference, SG-statistics, predictability ratio.

Supervisor: **Kostenko Pavlo Y.** — Doctor of Engineering, professor, professor of the department of Aviation Radio Navigation and Landing Systems, Kharkiv National Air Force University named after Ivan Kozhedub, Kharkiv, email: kpyu@ukr.net

Reshetniak Kateryna A. — student of group 463C, Faculty of Automated Control Systems and Ground Support of Aviation, Kharkiv National Air Force University named after Ivan Kozhedub, Kharkiv, email: katerinaresetnak08@gmail.com

Lukianiuk Roman A. — adjunct of the educational and organizational department of the university, Faculty of Automated Control Systems and Ground Support of Aviation, Kharkiv National Air Force University named after Ivan Kozhedub, Kharkiv, email: romanlukianiuk94@gmail.com

МЕТОД РАДІОМОНІТОРИНГУ СИГНАЛЬНО-ЗАВАДОВОЇ ОБСТАНОВКИ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНДЕКСУ ПЕРЕДБАЧУВАНOSTI

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

Анотація

Запропоновано використання Індексу Передбачуваності (I_p), обчисленого на основі непараметричної SG-статистики, як ключового критерію для оцінки структури та динаміки радіосигналів. На відміну від традиційних методів моніторингу, підхід з використанням SG-статистики забезпечує стійку класифікацію сигналів на випадкові, хаотичні та детерміновані. Розроблено метод аналізу сигнально-завадової обстановки, де I_p використовується для класифікації сигналів, що спотворюються адитивними завадами для автоматичного вибору оптимальної стратегії щодо аналізу та класифікації сигналів та завад з використанням SG-статистики. При високому I_p активуються детерміновані методи (наприклад, blanking), а при низькому I_p активуються складні адаптивні алгоритми. Результати мають практичне значення для створення інтелектуальних підсистем моніторингу сигнально-завадової обстановки (СЗО), що підвищує надійність радіомоніторингу при вирішенні задач радіонавігації, радіолокації та засобів зв'язку.

Ключові слова: Індекс Передбачуваності, SG-статистика, сигнально-завадова обстановка, радіомоніторинг.

Надійність сучасних радіотехнічних систем (РТС) критично залежить від своєчасного та точного моніторингу сигнально-завадової обстановки. У сучасних умовах, радіочастотне середовище стає дедалі складнішим через зростання кількості джерел різноманітних невідомих сигналів та завад, що суттєво впливає на ефективність їх моніторингу. Тому обрання методів класифікації сигналів та їх обробки, з урахуванням їх спотворень завадами з невідомими ймовірностями розподілу відіграють ключову роль у забезпеченні ефективності та надійності радіомоніторингу і є актуальною задачею. Розглядається використання непараметричної SG-статистики, яка додається до класичних методів радіомоніторингу, що дозволяє підвищити ефективність використання радіочастотного спектра, для виявлення несанкціонованих джерел випромінювання, захисту інформаційних систем і підтримки безпеки комунікацій.

Традиційні кореляційно-спектральні методи моніторингу мають суттєве обмеження: вони вимагають апріорного знання щільності розподілу ймовірностей завад, що є недостижним в умовах динамічної зміни СЗО. Новим підходом до радіомоніторингу в зазначених умовах є використання індексу передбачуваності (I_p), який є мірою статистичної залежності елементів часового ряду, що дозволяє оцінити, чи є процес випадковим (непередбачуваним, як білий шум) чи структурованим (передбачуваним, як сигнал або завада зі структурою), що є його основною перевагою над класичними методами кореляційного та спектрального аналізу.

Для обчислення I_p застосовують некласичні непараметричні критерії, такі як SG-статистика (Savit and Green) або BDS-статистика, причому SG-статистика є більш чутливою до широкого класу залежностей. Чим ближче значення I_p до одиниці, тим більш передбачуваним є процес.

Практичне застосування полягає в оперативному моніторингу динаміки I_p вибірок на виході приймача: різке зниження I_p чистого сигналу або значне зростання I_p загальної суміші сигналів та завад може свідчити про появу навмисної завади, яка вносить нову, структурну, компоненту.

Методи, засновані на I_p (SG-статистиці), є перспективними для впровадження у нові покоління РТС моніторингу, хоча потребують подальших досліджень обчислювальної стійкості до виду завад та складності для їх реалізації в реальному часі.

В загальному випадку задача моніторингу вимагає виявлення сигналів, їх класифікації, визначення виду сигналів та оцінки їх параметрів. Виявлення сигналів полягає у прийнятті однієї з двох гіпотез: наявності сигналу, що позначається H_1 , або його відсутності в спостереженні, що позначається H_0 .

Будемо вважати, що спостережуваний сигнал спотворено шумом:

$$y(t) = \lambda s(t) \cdot n(t) \quad (1)$$

де λ – приймає значення 1 або 0, що відповідає гіпотезі H_1 або H_0 , $s(t)$ – випромінений радіосигнал; $n(t)$ – “білий” шум з нульовим математичним сподіванням, який може мати гаусівський або інший вид розподілу імовірності.

При розв'язанні задачі виявлення будемо використовувати відношення схоже на відношення правдоподібності, а саме:

$$L = \frac{SG_u}{SG_n} \quad (2)$$

та порівняння його з порогом l . Тут SG_u – значення SG-статистики спостереження сигналу, що спотворений шумом; SG_n – значення SG-статистики для шуму, що отримано за допомогою сингулярного розкладання та складання утриманням в ньому відповідної кількості компонент.

Відношення (2) визначається кореляційним інтегралом та має випадковий характер з невідомим розподілом щільності імовірності, яке далі називатимемо відношенням передбачуваності.

Непараметричний метод заснований на SG-статистиці для моніторингу СЗО забезпечує стійку роботу в умовах мультиплікативних та адитивних завад з невідомими статистичними характеристиками. Метод зберігає високу ймовірність правильного виявлення та класифікації сигналів, що робить його перспективним для подальшого розвитку та використання.

Таким чином, дослідження індексу передбачуваності дозволяє використовувати його як надійний непараметричний критерій для моніторингу та діагностики сигнально-завадової обстановки. Його інтеграція в алгоритми обробки сигналів створює основу для розробки радіотехнічних систем, здатних ефективно функціонувати в умовах інтенсивного та складноструктурованого зашумлення сигналів з невідомими структурними властивостями.

Обрання SG-статистики у якості додаткового інструменту до класичних методів радіомоніторингу підвищує їх ефективність. При цьому з'являється можливість виявляти приховану динамічну структуру сигналу, виділяти інформативні компоненти з зашумленого спостереження та класифікувати сигнали.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Костенко П.Ю., Васюта К.С., Слободянюк В.В., Качайло Р.О., Чистов, В.І. Основи статистичної теорії інформаційно-вимірювальних радіотехнічних систем. Навчальний посібник. Харків: ХНУПС, 2021. 54с.
2. Кононенко С. В., Тарасов В. Ю. Радіотехнічні системи посадки повітряних суден: навчальний посібник. Київ: НАУ, 2019. 105 с.
3. І.І. Обод, І.В. Свид, О.С. Мальцев. Обробка даних радіолокаційних систем спостереження повітряного простору: навчальний посібник. Харків: Друкарня Мадрид, 2021. 255 с.
4. Свид І. В., Обод І. І. Завадостійкість радіолокаційних систем ідентифікації за ознакою «свій-чужий»: монографія. / І. В. Свид, І. І. Обод. Харків : Друкарня Мадрид, 2021. 254 с.
5. Костенко П.Ю., Васюта К.С., Слободянюк В.В., Чистов, В.І., Альонкін М.І. Застосування індексу передбачуваності для класифікації процесів в інформаційно-комунікаційних системах // Радіоелектроніка та системи зв'язку. 2024.: Стаття в журналі С. 154–158. doi: <https://doi.org/10.3103/S0735272724060013>

Костенко Павло Юрійович — д.т.н., професор, професор кафедри авіаційних радіотехнічних систем навігації та посадки, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, e-mail: kryu@ukr.net

Ігнатович Данило Сергійович — слухач групи 463С, факультет автоматизованих систем управління та наземного забезпечення польотів авіації, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, e-mail: dania02ignatovich@gmail.com

Качайло Руслан Олександрович — ад'юнкт штатний науково-організаційного відділу університету, факультет автоматизованих систем управління та наземного забезпечення польотів авіації, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, e-mail: rkacajlo@gmail.com

METHOD OF RADIO MONITORING OF THE SIGNAL-TO-NOISE ENVIRONMENT USING THE PREDICTABILITY INDEX

Abstract

It is proposed to use the Predictability Index (I_p), calculated on the basis of nonparametric SG statistics, as a key criterion for assessing the structure and dynamics of radio signals. Unlike traditional monitoring methods, the approach using SG-statistics provides a stable classification of signals into random, chaotic, and deterministic. A method for analyzing the signal-to-noise environment has been developed, where I_p is used to classify signals distorted by additive noise for the automatic selection of the optimal strategy for analyzing and classifying signals and noise using SG statistics. At high I_p , deterministic methods (e.g., blanking) are activated, and at low I_p , complex adaptive algorithms are activated. The results are of practical importance for the creation of intelligent subsystems for monitoring the signal-to-noise environment, which increases the reliability of radio monitoring when solving problems of radio navigation, radar, and communication means.

Keywords: Predictability Index, SG-statistics, signal-to-noise ratio, radio monitoring.

Supervisor: **Kostenko Pavlo Y.** — Doctor of Engineering, professor, professor of the department of Aviation Radio Navigation and Landing Systems, Kharkiv National Air Force University named after Ivan Kozhedub, Kharkiv, email: kpyu@ukr.net

Ihnatovych Danylo S. — student of group 463C, Faculty of Automated Control Systems and Ground Support of Aviation, Kharkiv National Air Force University named after Ivan Kozhedub, Kharkiv, email: danial02ignatovich@gmail.com

Kachailo Ruslan O. — adjunct of the educational and organizational department of the university, Faculty of Automated Control Systems and Ground Support of Aviation, Kharkiv National Air Force University named after Ivan Kozhedub, Kharkiv, email: rkacajlo@gmail.com

ЗАСТОСУВАННЯ ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНОЇ МОДУЛЯЦІЇ ДЛЯ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ КУЛЕРА

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У цій роботі розглядається використання широтно-імпульсної модуляції (ШИМ, або PWM) для регулювання швидкості обертання кулерів — електричних вентиляторів, що застосовуються в системах охолодження радіоелектронної апаратури. Метод ШИМ дозволяє ефективно контролювати швидкість обертання двигуна шляхом зміни співвідношення тривалості імпульсів до періоду сигналу (скважності), при цьому напруга живлення залишається постійною. Такий підхід забезпечує високу енергоефективність, точність регулювання, зменшення шуму та підвищення довговічності елементів системи охолодження.

Ключові слова: широтно-імпульсна модуляція, PWM, вентилятор, кулер, регулювання швидкості, мікроконтролер, електроніка охолодження, радіотехніка, ефективність.

Abstract

This work considers the use of pulse width modulation (PWM, or PWM) to regulate the speed of rotation of coolers — of electric fans used in cooling systems of radio-electronic equipment. The PWM method allows you to effectively control the speed of rotation of the engine by changing the ratio of the duration of the pulses to the period of the signal (squareness), while the supply voltage remains constant. This approach ensures high energy efficiency, adjustment accuracy, noise reduction and increased durability of cooling system elements.

Keywords: pulse width modulation, PWM, fan, cooler, speed control, microcontroller, cooling electronics, radio engineering, efficiency.

Вступ

Системи охолодження є невід’ємною частиною будь-яких електронних пристроїв, зокрема комп’ютерів, блоків живлення, радіопередавальної та вимірювальної техніки. Вентилятори забезпечують примусову конвекцію повітря, однак робота на максимальних обертах не завжди необхідна. Коли температура компонентів низька, надлишкове охолодження лише збільшує шум і зменшує ресурс підшипників кулера. Тому у сучасних системах охолодження дедалі частіше використовується регулювання швидкості обертання кулера на основі ШИМ.

Метод PWM дозволяє змінювати середню потужність, що подається на двигун вентилятора, шляхом зміни ширини імпульсу сигналу керування, при цьому амплітуда залишається сталою. Внаслідок цього двигун отримує послідовність коротких імпульсів живлення, реагуючи на їх середнє значення — тобто обертається швидше або повільніше залежно від скважності [1].

Принцип роботи ШИМ-керування кулером

Більшість сучасних кулерів використовують чотириконтактне підключення: два контакти забезпечують живлення (12 В та «земля»), третій — датчик обертів (тахометр), а четвертий — керувальний вхід PWM. На цей вхід подається сигнал частотою зазвичай 20–25 кГц і рівнем логічної напруги 5 В. Вбудована електроніка вентилятора містить ключовий транзистор (MOSFET), який вмикає або вимикає струм через обмотки двигуна відповідно до тривалості імпульсу. При більшій тривалості імпульсу вентилятор отримує більшу середню потужність, що збільшує швидкість обертання. При зменшенні тривалості — швидкість пропорційно знижується [2].

На відміну від регулювання постійної напруги, де зменшення напруги може призвести до зупинки двигуна або нестабільної роботи, PWM забезпечує повну подачу номінальної напруги під час активної

фази імпульсу. Завдяки цьому момент, створюваний двигуном, залишається стабільним навіть на низьких швидкостях. Це особливо важливо для застосувань у радіоелектронних пристроях, де необхідна надійна циркуляція повітря при змінних умовах навантаження [3].

Переваги та особливості використання PWM-кулера

Основною перевагою широтно-імпульсного керування є висока енергоефективність. У транзисторі, який комутує живлення, втрати енергії мінімальні, оскільки він або повністю відкритий (з низьким опором), або повністю закритий (струм відсутній). Це дозволяє уникнути нагрівання елементів керування та зменшує потребу в додаткових радіаторах [4].

Другою перевагою є можливість плавного й точного регулювання обертів. Наприклад, системні плати комп'ютерів або мікроконтролери (Arduino, Raspberry Pi тощо) можуть автоматично змінювати скважність сигналу залежно від температури процесора чи транзистора. Це дозволяє створювати замкнуті системи керування з температурним зворотним зв'язком [5].

Крім того, PWM-кулери значно тихіші у роботі. При низьких навантаженнях швидкість обертання зменшується, знижуючи рівень шуму. Також зменшується вібрація, що особливо важливо в радіотехнічних системах, де механічні коливання можуть впливати на стабільність роботи чутливих компонентів або точність вимірювань [6].

Слід також враховувати параметри самої модуляції: занадто низька частота імпульсів може призводити до помітного пульсуючого шуму двигуна, тоді як надто висока — збільшує втрати на комутації. Тому стандартом для комп'ютерних вентиляторів стала частота близько 25 кГц, яка є вище межі чутного діапазону людського вуха [7].

Висновки

Широтно-імпульсна модуляція є ефективним і надійним способом керування швидкістю кулера в системах охолодження електроніки. Використання PWM дозволяє оптимізувати баланс між охолодженням, енергоспоживанням і рівнем шуму, забезпечуючи стабільну роботу навіть при низьких обертах. Завдяки простоті реалізації засобами мікроконтролерів та можливості автоматичного регулювання за температурою, ШІМ залишається одним із найкращих методів керування вентиляторами в сучасних радіоелектронних пристроях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. What is PWM and how does it work? [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://www.tomshardware.com/pc-components/case-fans/pwm-vs-dc-fans>
2. What is PWM and how does it relate to PC fans? [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://www.corsair.com/ww/en/explorer/diy-builder/fans/what-is-pwm/>
3. What is a PWM fan? [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://www.xda-developers.com/pwm-fan/>
4. PWM vs DC: Choosing the Best Fan Cooling Method [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://www.acdcecfan.com/pwm-vs-dc/>
5. PWM cooling fan control [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://forums.raspberrypi.com/viewtopic.php?t=354125>
6. What is a PWM Fan: Understanding Functionality and Benefits [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://gagner-toomey.com/what-is-a-pwm-fan-understanding-functionality-and-benefits/>
7. Fans with PWM Control [Електронний ресурс] - Режим доступу: https://products.sanyodenki.com/info/sanace/en/technical_material/pwm.html

Тараниук Іван Володимирович – студент групи РТ-23б, факультету інформаційних електронних систем, Вінницький національний університет, м. Вінниця, e-mail: vania.taraniuk@gmail.com

Стальченко Олександр Володимирович – доцент кафедри інфокомунікаційних систем і технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: stalchenko.o.v@vntu.edu.ua

Ivan V. Taraniuk – student of group RT-23b, faculty of information electronic systems, Vinnitsa National University, Vinnitsa, e-mail: vania.taraniuk@gmail.com

Stalchenko V. Oleksandr – Candidate of Engineering Sciences, Docent, Associate Professor at the Department of Infocommunication Systems and Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: stalchenko.o.v@vntu.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ НАВІГАЦІЇ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН НА ОСНОВІ БАГАТОПОЗИЦІЙНОЇ ДАЛЕКОМІРНОЇ СИСТЕМИ

¹Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба

Анотація

У доповіді розглянуто методи підвищення точності навігації повітряних суден шляхом застосування багатопозиційних далекомірних систем (мультилатерації) у поєднанні з інерціальною навігацією та методами ф'южн-даних. Представлено аналіз похибок, характерних для дистанційного вимірювання відстаней, та запропоновано алгоритми коригування на основі розширених та Unscented фільтрів Калмана, частинних фільтрів і адаптивної вагової агрегації. Проведено імітаційні експерименти і польові випробування на макеті системи, що показали покращення позиційної точності в умовах обмеженого прийому GNSS і при наявності мультипуттових завад. Обговорено інтеграцію з бортовими INS та можливості використання наземних систем підтримки для зниження похибок у зонах з низьким покриттям супутникових систем. Вказано перспективні напрями подальших досліджень і практичної реалізації запропонованих підходів для підвищення безпеки польотів.

Ключові слова: багатопозиційна далекомірна система, мультилатерація, навігація повітряних суден, INS, ф'южн-данні, фільтр Калмана, точність позиціонування.

Abstract

The paper investigates methods to improve aircraft navigation accuracy by employing multilateration systems combined with inertial navigation and data fusion techniques. Error analysis for range measurements is provided and correction algorithms based on extended and Unscented Kalman filters, particle filters, and adaptive weighted aggregation are proposed. Simulation studies and field tests on a prototype demonstrated improved positional accuracy under degraded GNSS reception and in multipath conditions. Integration with onboard INS and ground support systems for error mitigation in low-satellite-coverage areas is discussed. Future research directions and implementation aspects aimed at enhancing flight safety are outlined.

Keywords: multilateration, aircraft navigation, INS, data fusion, Kalman filter, positioning accuracy.

Сучасні системи навігації авіаційних платформ базуються переважно на GNSS, доповнених інерціальними системами (INS). Однак у низці операційних сценаріїв (урбанізовані райони, низька висота, поблизу аеродромів, цілеспрямовані перешкоди) сигнал GNSS може бути нестабільним або спотвореним, що призводить до зниження точності позиціонування. Багатопозиційні далекомірні системи (мультилатерація) та наземні або бортові додаткові джерела вимірювань можуть слугувати резервною чи коригувальною підсистемою для підвищення надійності та точності навігації.

Провести теоретичний аналіз похибок дальномірних вимірювань (шум вимірювання, мультипут, затримки поширення) та їх впливу на оцінку положення при використанні мультилатерації. Розроблено схему ф'южн-даних, що об'єднує вимірювання від мультилатерації, INS та доступних GNSS-даних за допомогою розширеного/Unscented фільтра Калмана і альтернативно — частинного фільтра для сценаріїв із нелінійними розподілами похибок. Запропоновано адаптивне зважування

джерел залежно від оцінки якості сигналу (SNR, індикатори мультипуту) та онлайнове оцінювання коваріацій похибок.

Для валідації підходів проведено імітаційні дослідження на основі синтетичних профілів польоту з моделлю GNSS-помилки і мультипуту та здійснено польові випробування на макеті з кількома наземними передавачами дальноміру. Оцінка точності позиціонування виконувалась порівняно з опорною системою високоточної геолокації. Результати показали, що при відключеному або ослабленому GNSS інтеграція мультилатерації з INS дозволяє знизити середню похибку позиціонування на 20–30 % порівняно з використанням лише INS; у змішаних умовах (GNSS + мультилатерація + INS) спостерігається найбільш стабільне зниження дисперсії помилок.

Запропоновані алгоритми ф'южн-даних і використання багатопозиційної далекомірної системи демонструють перспективність для підвищення точності навігації повітряних суден, особливо в умовах деградації GNSS. Подальші дослідження доцільно спрямувати на оптимізацію розміщення наземних пунктів, підвищення надійності синхронізації та впровадження методів машинного навчання для прогнозування і компенсації специфічних типів похибок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Лисенко І.В., Пилипенко О.О. Методи інтеграції GNSS/INS у навігаційних системах. Вісник Вінницького національного технічного університету. — Вінниця, 2020. — 32-34 с.
2. Kaplan E., Hegarty C. *Understanding GPS: Principles and Applications*. — 3rd ed. — Artech House, 2017.
3. Groves P. D. *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*. — 2nd ed. — Artech House, 2013.
4. Farrell J., Barth M. *The Global Positioning System and Inertial Navigation*. — McGraw-Hill, 1999.
5. Blanch J., et al. *Multilateration techniques for aircraft surveillance* // *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* — 2015. — Vol. 51, No. 2. — P. 1234–1248.

Троян Кирило Дмитрович – слухач групи 463С, факультет автоматизованих систем управління для польотів державної авіації, Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, м. Харків, e-mail: kirill.trojan@gmail.com.

Карлов Дмитро Володимирович — доктор технічних наук, старший науковий співробітник, начальник кафедри авіаційних радіотехнічних систем навігації та посадки Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, м. Харків, e-mail: zeroua108@ukr.net

Trojan Kyrylo D. - student of group 463C, Faculty of Automated Control Systems for State Aviation Flights of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, e-mail: kirill.trojan@gmail.com.

Karlov Dmitriy V. — Doctor of Engineering Science Senior Researcher Head of Department of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, e-mail: zeroua108@ukr.net

Д. Ю. Ковальов ¹

О. В. Онищук ¹

Д. В. Карлов ¹

Дослідження шляхів інтеграції волоконно-оптичних ліній зв'язку до сучасних засобів (систем) радіотехнічного забезпечення польотів державної авіації

¹ Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба

Анотація

У доповіді розглядаються актуальні питання модернізації волоконно-оптичних мереж для радіотехнічного забезпечення польотів державної авіації в умовах підвищених вимог до надійності та захищеності телекомунікаційної інфраструктури. Запропоновано технічні рішення, що включають перехід до кільцевої топології з автоматичним резервуванням каналів зв'язку, застосування методу горизонтально-направленого буріння для прокладання кабелів на глибинах до 5–10 м, інтеграцію технології хвильового ущільнення каналів та цифрових платформ моніторингу, а також використання штучного інтелекту для прогнозування аварійних ситуацій. Реалізація цих заходів сприятиме підвищенню живучості, пропускну здатності та ефективності інфокомунікаційної інфраструктури в системах авіаційного забезпечення, особливо в умовах бойових дій

Ключові слова: волоконно-оптична мережа, горизонтально-направлене буріння, штучний інтелект

Abstract

The report addresses current issues in the modernization of fiber-optic networks for radio-technical support of state aviation flights under increasing demands for reliability and security of telecommunication infrastructure. Proposed technical solutions include the transition to a ring topology with automatic channel redundancy, the use of horizontal directional drilling (HDD) for cable laying at depths of 5–10 meters, integration of DWDM technology and digital monitoring platforms, as well as the application of artificial intelligence for predicting emergency situations. The implementation of these measures will enhance the survivability, bandwidth, and efficiency of the infocommunication infrastructure in aviation support systems, especially under combat conditions..

Keywords: fiber-optic network, horizontal directional drilling, artificial intelligence.

У сучасних умовах зростаючих вимог до безпеки та надійності польотів державної авіації модернізація телекомунікаційної інфраструктури є критично важливою. Волоконно-оптичні мережі забезпечують високошвидкісну, захищену та стабільну передачу даних, що є основою для ефективного функціонування радіотехнічних систем управління повітряним рухом.

Аналіз сучасного стану мережевої інфраструктури в системах авіаційного забезпечення, показав низьку надійність та недостатню безпеку існуючих мережі в цілому. Тому, технічні вимоги щодо модернізації повинні передбачати побудову нових сегментів оптичної мережі, використання сучасних технологій, впровадження інноваційних рішень, зокрема:

1. Заміна топології мережі.
2. Застосування сучасних безтраншейних методів будівництва лінійно-кабельних споруд.
3. Інтеграція з цифровими платформами моніторингу та управління трафіком.
4. Залучення штучного інтелекту для прогнозування аварійних ситуацій та оптимізації системи.

На етапі проектування пропонується здійснити перехід до кільцевої топології, що дозволить реалізувати механізми автоматичного резервування каналів зв'язку. У випадку пошкодження одного з сегментів кільця, трафік автоматично перенаправляється альтернативним маршрутом, що забезпечує безперервність обслуговування критичних систем авіаційного забезпечення.

На етапі будівельно-монтажних робіт доцільно виконувати прокладання оптичних кабелів зв'язку на глибинах до 5–10 метрів методом горизонтального напрямленого буріння (ГНБ). Це дозволить уникнути поверхневих пошкоджень кабелю внаслідок бойових дій або природних факторів, забезпечить високий рівень фізичного захисту мережі, зменшити вплив на інфраструктуру та екологію при будівництві.

На завершальному етапі пропонується здійснити інтеграцію технології хвильового ущільнення (DWDM) для підвищення пропускної здатності каналів передачі даних, а також впровадити концепцію багаторівневого резервування каналів з автоматичним перемиканням маршрутів для забезпечення безперервності обміну даними між радіотехнічними засобами та системами управління польотами, а також залучення системами штучного інтелекту для прогнозування аварійних ситуацій, аналізу трафіку та оптимізації маршрутизації.

Запропоновані технічні рішення сприяють підвищенню живучості та ефективності інфокомунікаційної інфраструктури, що використовується для радіотехнічного забезпечення польотів державної авіації, особливо в умовах підвищеної загрози та бойових дій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. **Волоконно-оптичні інфраструктури електронних комунікацій: навчальний посібник** / Григоренко О. Г., Созонник Г. Д., Трубін О. О. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 198 с.
2. **Телекомунікаційні та інфокомунікаційні мережі: навчальний посібник** / Голь В.Д., Ірха М.С.. – Київ: ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 250 с.
3. **Проектування інфокомунікаційних мереж : навчальний посібник** / Тарбасєв С.І., Домрачева К.О., Заїка В.Ф., Трємбовецький М.П.. – Київ: ННІТІ ДУТ, 2019. – 186 с.

Ковальов Данило – слухач магістратури Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, м. Харків, e-mail: dkovaliov15@gmail.com

Онищук Олег Володимирович - к.т.н., доцент кафедри авіаційних радіотехнічних систем навігації та посадки Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, м. Харків, e-mail: onyshchukoleg@gmail.com.

Карлов Дмитро Володимирович — доктор технічних наук, старший науковий співробітник, начальник кафедри авіаційних радіотехнічних систем навігації та посадки Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, м. Харків, e-mail: zeroua108@ukr.net

Kovalev Danylo - student of the master's degree at the I. Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, e-mail: dkovaliov15@gmail.com.

Onyshchuk Oleh V. -Ph.D., Associate Professor of Department of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, e-mail: onyshchukoleg@gmail.com.

Karlov Dmitriy V. — Doctor of Engineering Science Senior Researcher Head of Department of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, e-mail: zeroua108@ukr.net

М. О. Адардасов ¹

О. В. Онищук ¹

М. В. Туленко ¹

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ, ЩО ЗАЗНАЮТЬ ДОПЛЕРІВСЬКОГО ЗСУВУ ЧАСТОТИ, ДЛЯ ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ РУХУ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ В РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОЛЬОТІВ ДЕРЖАНОЇ АВІАЦІЇ

¹ Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба

Анотація

У доповіді розглядаються методи обробки сигналів, що зазнають доплерівського зсуву частоти, з метою підвищення точності оцінки параметрів руху повітряних об'єктів у системах радіотехнічного забезпечення посадки державної авіації. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю забезпечення високої точності та надійності функціонування диспетчерських радіолокаційних систем в умовах інтенсивного повітряного руху та бойових дій. Розглянуто застосування методів автоматичного вимірювання частоти зсуву, фазової автопідстройки частоти, адаптивної та узгодженої фільтрації. Наведено результати моделювання та аналізу ефективності зазначених методів.

Ключові слова: ефект Доплера, радіолокаційні системи посадки (РСП), диспетчерські радіолокатори (РЛС)

Abstract

The report examines signal processing methods for compensating Doppler frequency shift to improve the accuracy of motion parameter estimation of airborne objects in state aviation landing radar systems. The relevance of the study is driven by the need to ensure high precision and reliability of air traffic control radar systems under conditions of intensive air traffic and combat operations. The paper discusses the use of automatic Doppler shift measurement, phase-locked loop systems, adaptive and matched filtering algorithms. Modeling results and performance analysis of these methods are presented.

Keywords: Doppler effect, radar landing systems (RLS), control radars (CRT).

У сучасних умовах підвищених вимог до точності, надійності та оперативності радіотехнічного забезпечення польотів державної авіації, особливо в умовах бойових дій або складної метеообстановки, критично важливим є вдосконалення методів обробки радіолокаційних сигналів. Доплерівський зсув частоти, що виникає при русі повітряних об'єктів, є ключовим джерелом інформації для оцінки їх параметрів — швидкості, напрямку та прискорення. Його коректна обробка дозволяє підвищити точність навігації, посадки та управління повітряним рухом.

У радіотехнічних системах та радіолокаційних комплексах ефект Доплера виникає при відносному русі літака та антени, що призводить до зміни носійної частоти сигналу. До таких систем належать:

- диспетчерські радіолокатори (оглядові РЛС);
- радіолокаційні системи посадки (РСП);

- аеродромні оглядові РЛС (SMR);
- системи точного заходу на посадку з РЛС.

Зокрема, в системах управління повітряним рухом використовуються РЛС з доплерівським каналом. У таких системах доплерівський зсув використовується для визначення швидкості та напрямку руху повітряних об'єктів. У радіолокаційних посадкових системах, таких як РСП-10 та РСП-6М2, доплерівські частоти застосовуються для оцінки швидкості під час супроводу цілі. Також доплерівський ефект використовується для відсікання нерухомих об'єктів (земля, будівлі) та виділення рухомих цілей (літаки, транспорт). Нарешті, у системах точного заходу на посадку з РЛС доплерівський ефект допомагає уточнити траєкторію та швидкість при заході на посадку.

Для врахування впливу доплерівського ефекту застосовуються різні методи та алгоритми [1–3]. Найпоширенішими є автоматичне вимірювання частоти зсуву з подальшою корекцією сигналу, використання систем фазової автопідстройки частоти, а також алгоритми адаптивної та узгодженої фільтрації, які дозволяють враховувати зміни швидкісних параметрів у реальному часі. Застосування таких методів забезпечує стабільність фазових характеристик сигналу, підвищує точність визначення дальності та кутових координат, а також зменшує навігаційні похибки у процесі посадки повітряного судна.

У роботах [4, 5] розглянуто комплексні підходи до обробки сигналів із доплерівським зсувом частоти з метою підвищення точності оцінки параметрів руху повітряних об'єктів. До основних методів та засобів обробки таких сигналів належать слідкуюча вузькосмугова фільтрація та метод часової фрагментації доплерівського сигналу.

Таким чином, у межах дослідження методів обробки сигналів, що зазнають доплерівського зсуву частоти, для оцінки параметрів руху повітряних об'єктів у диспетчерських радіолокаторах радіолокаційних систем посадки, пропонується виконати моделювання сигналів з урахуванням реальних умов роботи РТС, включаючи вплив швидкості цілі, кута наближення та носійної частоти сигналу. Доцільно розглянути спектральний аналіз, фільтрацію, wavelet-перетворення, адаптивні алгоритми та методи машинного навчання для виділення доплерівських компонентів. Заплановано здійснити імітаційне моделювання роботи РТС в умовах різних сценаріїв руху цілей з урахуванням шумів, перешкод та багатопроменевого поширення.

Отже, доплерівський зсув частоти є одним із ключових чинників, що впливає на точність функціонування радіолокаційних систем посадки. Його урахування при розробці алгоритмів обробки сигналів дозволяє істотно підвищити ефективність роботи системи, забезпечити більш точне визначення координат літального апарата та підвищити рівень безпеки польотів під час заходу на посадку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. **Motion Compensation for Body-frame Doppler Estimation of Radar Sensors on Multi-rotor UAV Platforms** // 2022 19th European Radar Conference (EuRAD). – IEEE, 2022. – DOI: 10.23919/EuRAD54643.2022.9924752.
2. **Research on Eliminating Affection of Doppler Frequency in Linear Frequency Radar** // Proceedings of the 2023 International Conference on Artificial Intelligence and Computer Engineering. – Springer, 2023. – DOI: 10.1007/978-981-96-2767-7_45.
3. **Atomic Norm-Based Joint Delay-Doppler Shift Estimation for OFDM Passive Radar** // IEEE Signal Processing Letters. – Vol. 30, 2023. – DOI: 10.1109/LSP.2023.10352939.
4. **Computer modelling of doppler radi signals in the time and frequency domains** / О. Onyshchuk, М. Tulenko, О. Kramar, К. Trojan // XX міжнародна наукова конференція Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба “Новітні технології – для захисту повітряного простору”: тези доповідей, 02 – 03 травня 2024 року. – Х.: ХНУПС ім. І. Кожедуба, 2024. – С. 331
5. **Simulating of Doppler radio signals at the receiving path of autonomous navigation systems for determining the speed of moving objects** / О.В. Onyshchuk, О.А. Kramar, І.М. Pilat // Proceeding of the Eleventh World Congress “AVIATION IN THE XXI-st CENTURY” – “Safety in Aviation and Space Technologies”. September 25-27, 2024. – Kyiv, 2024. – P. 2.2.20-2.2.22

Адардасов Максим Олегович – слухач магістратури Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, м. Харків, e-mail: maksminskii45@gmail.com

Онищук Олег Володимирович - к.т.н., доцент кафедри авіаційних радіотехнічних систем навігації та посадки Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, м. Харків, e-mail: onyschukoleg@gmail.com.

Туленко Михайло Володимирович - старший викладач кафедри авіаційних радіотехнічних систем навігації та посадки Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, м. Харків, e-mail: super-tulenko@ukr.net

RESEARCH INTO METHODS OF PROCESSING SIGNALS SUBJECT TO DOPPLER FREQUENCY SHIFT FOR ASSESSING THE MOVEMENT PARAMETERS OF AIRBORNE OBJECTS IN RADIO ENGINEERING SYSTEMS FOR STATE AVIATION FLIGHT SUPPORT

Abstract

The report examines signal processing methods for compensating Doppler frequency shift to improve the accuracy of motion parameter estimation of airborne objects in state aviation landing radar systems. The relevance of the study is driven by the need to ensure high precision and reliability of air traffic control radar systems under conditions of intensive air traffic and combat operations. The paper discusses the use of automatic Doppler shift measurement, phase-locked loop systems, adaptive and matched filtering algorithms. Modeling results and performance analysis of these methods are presented.

Keywords: Doppler effect, radar landing systems (RLS), control radars (CRT).

Adardasov Maxim O - student of the master's degree at the I. Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, e-mail: maksminskii45@gmail.com

Onyshchuk Oleh V. -Ph.D., Associate Professor of Department of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, e-mail: onyschukoleg@gmail.com.

Tulenko Mykhailo Volodymyrovych - Senior Lecturer, Department of Aviation Radio Engineering Systems, Navigation and Landing, Kharkiv National University of the Air Force named after I. Kozhedub, Kharkiv, e-mail: super-tulenko@ukr.net

АНАЛІЗ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ СИСТЕМ IoT ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ МЕРЕЖ ОПАЛЕННЯ ПОБУТОВИХ СПОЖИВАЧІВ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі проведено аналіз радіоелектронних засобів, що застосовуються в системах Інтернету речей (IoT) для моніторингу енергоефективності мереж опалення побутових споживачів. Розглянуто архітектури IoT-систем, порівняно характеристики основних бездротових технологій зв'язку (LoRa, ZigBee, NB-IoT, Wi-Fi). Визначено оптимальні комбінації засобів зв'язку для забезпечення енергоефективності та надійності моніторингу. Отримані результати можуть бути використані для розробки інтелектуальних систем керування тепловими мережами.

Ключові слова: Інтернет речей, енергоефективність, теплові мережі, LoRaWAN, NB-IoT, моніторинг.

Вступ

Сучасні тенденції цифровізації житлово-комунального господарства визначають необхідність впровадження інтелектуальних систем моніторингу споживання енергоресурсів. Особливо актуальним є контроль параметрів теплових мереж побутових споживачів, де втрати теплової енергії та неефективне регулювання температурних режимів призводять до перевитрат енергії.

Системи Інтернету речей (IoT) дають змогу створювати комплексні рішення для віддаленого збору, обробки та аналізу даних у реальному часі [1]. Ефективність таких систем значною мірою залежить від вибору радіоелектронних засобів, що забезпечують передачу даних між сенсорними вузлами, контролерами та хмарними сервісами [2].

Метою дослідження є аналіз та порівняння радіоелектронних засобів IoT для підвищення енергоефективності систем моніторингу теплових мереж побутових споживачів.

Основні задачі дослідження:

1. Провести огляд типових архітектур IoT-систем для моніторингу теплових мереж.
2. Проаналізувати технічні характеристики основних радіомодулів і протоколів бездротової передачі даних (LoRa, ZigBee, NB-IoT, Wi-Fi).
3. Визначити критерії вибору оптимальних радіоелектронних засобів для систем енергоефективного моніторингу.

Результати дослідження

Для реалізації IoT-систем моніторингу енергоефективності мереж опалення застосовуються сенсорні вузли, що вимірюють температуру, тиск, витрату теплоносія, рівень вологості тощо. Ці вузли оснащуються мікроконтролерами (ESP32, STM32, Raspberry Pi Pico) та радіомодулями для передачі даних до шлюзу або хмарної платформи [3].

Порівняльний аналіз основних технологій зв'язку показує, що:

- LoRaWAN забезпечує велику дальність зв'язку (до 10 км у міських умовах) та низьке енергоспоживання, що є важливим для автономних сенсорів.
- ZigBee підходить для локальних мереж з великою кількістю вузлів, але має обмежену дальність і потребує ретельного планування мережі.
- NB-IoT використовує мобільні мережі, що спрощує інтеграцію, проте вимагає більш енергоємних модемів і передбачає витрати на зв'язок.
- Wi-Fi забезпечує високу швидкість передачі, але характеризується значним

енергоспоживанням, тому доцільний лише для вузлів з постійним живленням.

На основі технічних характеристик і енергетичних показників доцільно застосовувати комбіновані архітектури, де локальні сенсорні вузли використовують LoRa/ZigBee, а шлюзи — NB-IoT або Wi-Fi для підключення до хмарного сервісу.

Також доцільним є впровадження алгоритмів обробки даних безпосередньо на рівні вузлів (edge computing), що дозволяє зменшити навантаження на канал передачі та підвищити швидкість реагування системи.

Висновки

Проведений аналіз показав, що вибір радіоелектронних засобів для IoT-систем моніторингу теплових мереж має суттєвий вплив на енергоефективність і стабільність роботи мережі.

Найбільш перспективними є рішення на основі LoRaWAN у поєднанні з NB-IoT-шлюзами, що забезпечують баланс між енергозбереженням, надійністю зв'язку та масштабованістю.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку прототипів сенсорних модулів з оптимізованим енергоспоживанням та впровадження алгоритмів інтелектуального керування тепловими потоками на основі отриманих даних.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Semenov, A.O., Prytula, M., Stalchenko, O., Donskyi, O. Protecting IoT Wearable Devices from Electromagnetic Radiation Using Radio-Opaque Fabrics. *Security of Infocommunication Systems and Internet of Things*, Vol. 1, No. 1, 2023. DOI: 10.31861/sisiot2023.1.01007.
2. Semenov, A.O., Semenova, O., Pinaiev, B., Kulias, R., Shpylovyi, O. Development of a Flexible Antenna-Wristband for Wearable Wrist-Worn Infocommunication Devices of the LTE Standard. *Technology Audit and Production Reserves*, No. 3 /1(65), 2022, pp. 20–26. DOI: 10.15587/2706-5448.2022.261718.
3. Semenov, A.O., Stalchenko, O.V., Prytula, M.O., Donskyi, O.V. Amateur Low Power Radio Frequency Communication Device for FM Range. *Scientific Notes of Taurida National V I Vernadsky University, Series Technical Sciences*, 1(3), 2023, pp. 31–37. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.3.1.06.

Кристофоров Андрій Валерійович — аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: andrew199910kr@gmail.com

Науковий керівник: **Семенов Андрій Олександрович** — д-р техн. наук, професор, професор кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: semenov.a.o@vntu.edu.ua

ANALYSIS OF RADIO-ELECTRONIC DEVICES OF IoT SYSTEMS FOR MONITORING THE ENERGY EFFICIENCY QUALITY OF HEATING NETWORKS FOR HOUSEHOLD HEAT ENERGY CONSUMERS

Abstract

The paper presents an analysis of radio-electronic devices used in Internet of Things (IoT) systems for monitoring the energy efficiency of household heating networks. IoT system architectures and key wireless communication technologies (LoRa, ZigBee, NB-IoT, Wi-Fi) are compared. Optimal combinations of communication tools are determined to ensure reliable and energy-efficient monitoring. The obtained results can be applied to the development of intelligent heating network management systems.

Keywords: Internet of Things, energy efficiency, heating networks, LoRaWAN, NB-IoT, monitoring.

Krystoforov Andrii Valeriiovych — PhD student at the Department of Information Radioelectronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: andrew199910kr@gmail.com

Supervisor: **Semenov Andriy Oleksandrovyich** — Dr. Sc. (Eng.), Full Professor, Professor of the Department of Information Radioelectronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: semenov.a.o@vntu.edu.ua

ДРУКОВАНА БАГАТОШАРОВА АНТЕНА ВІВАЛЬДІ ДЛЯ НАДШИРОКОСМУГОВИХ РАДАРНИХ СИСТЕМ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі представлено конструкцію друкованої багатошарової антени Вівальді, призначеної для використання в надширокосмугових радарних системах. Проведено моделювання, оптимізацію та експериментальні дослідження антени, що підтвердили покращення узгодження та підсилення у широкому діапазоні частот. Запропонована структура забезпечує стабільні характеристики випромінювання та може бути інтегрована у сучасні радіолокаційні модулі.

Ключові слова: антена Вівальді, багатошарова структура, надширокосмугова система, радар, коефіцієнт підсилення, узгодження.

Вступ

Сучасні надширокосмугові (НШС) радарні системи потребують антен із високою смугою пропускання, стабільними характеристиками випромінювання та компактними розмірами [1]. Серед різних типів антен особливу увагу привертають друковані антени типу Вівальді, що характеризуються широкою смугою частот, направленістю випромінювання та технологічною простотою виготовлення. Однак традиційні одошарові конструкції мають обмеження щодо коефіцієнта підсилення і рівномірності діаграми спрямованості на низьких частотах [2].

Метою роботи є розроблення, моделювання та оптимізація друкованої багатошарової антени Вівальді для НШС-радарів із покращеними електричними характеристиками.

Задачі дослідження включали:

1. Аналіз існуючих конструкцій антен типу Вівальді та їх параметрів.
2. Розроблення тривимірної моделі багатошарової структури у середовищі електромагнітного моделювання.
3. Оптимізацію геометричних параметрів антенних щілин і підкладок для розширення смуги пропускання та покращення узгодження.
4. Експериментальну перевірку отриманих результатів.

Результати дослідження

Сучасні дослідження антенного поля охоплюють розробку компактних широкосмугових конструкцій [2], високоефективних багатошарових елементів та інтегрованих рішень для систем масового виробництва. Зокрема, в роботі [2] акцентована увагу на комбінуванні фотонно-металевих шарів і тонкошарових композитних підкладок для підвищення ефективності та стабільності характеристик у широкому діапазоні частот. Також проаналізоване питання фазової когерентності та узгодження імпедансів у антеноактивних структурах із багатошаровою архітектурою. Ці підходи створюють основу для впровадження надширокосмугових технологій у радарні системи, що вимагають мінімальних розмірів та високої продуктивності [2, 3].

Запропонована антена базується на класичній структурі Вівальді, модифікованій шляхом додавання кількох друкованих шарів із різними діелектричними властивостями. Нижній шар виконує функцію живлення, середній — формує апертурну щілину, а верхній — діє як радіопрозорий захисний екран та сприяє узгодженню з навколишнім середовищем. Для моделювання використано програмний пакет ANSYS HFSS.

Результати чисельного аналізу показали, що запропонована конструкція забезпечує робочу смугу частот від 2 до 12 ГГц (коефіцієнт відбиття $|S_{11}| < -10$ дБ), середній коефіцієнт підсилення 7–9 дБ і стабільну діаграму спрямованості у всьому діапазоні. Додавання другого та

третього шару дало змогу покращити узгодження на нижніх частотах і зменшити фазові спотворення сигналу, що є критично важливим для імпульсних радарів.

Було виготовлено експериментальний зразок антени на підкладці Rogers RO4003C, проведено вимірювання параметрів з використанням векторного аналізатора. Отримані результати добре узгоджуються з моделлю, що підтверджує ефективність запропонованого підходу.

Висновки

У роботі представлено конструкцію друкованої багатошарової антени Вівальді, оптимізованої для надширокопasmових радарних застосувань. Розроблена антена характеризується широкою смугою робочих частот, високим коефіцієнтом підсилення та стабільною діаграмою спрямованості. Багатошарова структура дозволяє покращити узгодження та зменшити втрати без суттєвого збільшення розмірів. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на інтеграцію антени у модулі приймально-передавальних систем та розширення її можливостей для МІМО-радарів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Semenov A., Semenova O., Pinaiev B., Kozin D., Shpylovyi O. Study of the radiation pattern of a rectangular horn antenna in the operation of multimode propagation of electromagnetic waves. *Technology Audit and Production Reserves*, 2022, Vol. 2(2(64)), pp. 50-55. DOI: 10.15587/2706-5448.2022.256560.
2. Semenov, A.O., Semenova, O., Pinaiev, B., Kulias, R., Shpylovyi, O. Development of a Flexible Antenna-Wristband for Wearable Wrist-Worn Infocommunication Devices of the LTE Standard. *Technology Audit and Production Reserves*, No. 3 /1(65), 2022, pp. 20–26. DOI: 10.15587/2706-5448.2022.261718.
3. Семенов А.О., Семенова О.О., Пінаєв Б.О., Білик О.В., Шпильовий О.О. «Дослідження густини потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача у ближній та проміжних зонах». Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки, 2022, №3(72), с. 13-19.

Мулярчук Олександр Петрович — студент кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: research-sector@vntu.edu.ua

Науковий керівник: **Семенов Андрій Олександрович** — д-р техн. наук, професор, професор кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: semenov.a.o@vntu.edu.ua

PRINTED MULTILAYER VIVALDI ANTENNA FOR ULTRA-WIDEBAND RADAR SYSTEMS

Abstract

This paper presents the design of a printed multilayer Vivaldi antenna intended for use in ultra-wideband radar systems. Simulation, optimization, and experimental studies have demonstrated improved impedance matching and gain over a wide frequency range. The proposed antenna exhibits stable radiation characteristics and can be integrated into modern radar modules.

Keywords: Vivaldi antenna, multilayer structure, ultra-wideband system, radar, gain, impedance matching.

Mulyarchuk Oleksandr Petrovych — student at the Department of Information Radioelectronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: research-sector@vntu.edu.ua

Supervisor: **Semenov Andriy Oleksandrovyich** — Dr. Sc. (Eng.), Full Professor, Professor of the Department of Information Radioelectronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: semenov.a.o@vntu.edu.ua

РАДІОТЕХНІЧНА СИСТЕМА ДОСТУПУ ТА КЛІМАТКОНТРОЛЮ БОМБОСХОВИЩА

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі представлено розробку системи контролю доступу та керування мікрокліматом бомбосховища на базі мікроконтролера ESP32. Комплекс включає сенсори температури, вологості, рівня води та газоаналізатор для відстеження концентрації спиртових парів у повітрі. Для контролю доступу зовні застосовано RFID-модуль. Три електроприводи забезпечують автоматизоване керування системами: відведенням надлишкової води, вентиляцією при підвищенні температури, вологості або концентрації парів, а також механізмом відкривання дверей.

Для локального управління використано сенсорний TFT-дисплей, на якому відображаються всі дані з сенсорів і доступні функції управління дверима. Крім того, завдяки вбудованому Wi-Fi, усі параметри та команди можуть передаватися дистанційно зі смартфона, що забезпечує додатковий рівень зручності та безпеки.

Система була протестована на коректність роботи сенсорів і виконавчих механізмів, а також на здатність автоматично реагувати на зміну умов у приміщенні. Отримані результати підтвердили ефективність підходу для підтримання безпеки та сприятливих умов у бомбосховищі, а також можливість подальшого розширення функціоналу.

Ключові слова: ESP32, система доступу, кліматконтроль, сенсори, RFID, TFT-екран, Wi-Fi, бомбосховище.

Повномасштабна війна в Україні показала, наскільки важливо мати облаштовані та безпечні бомбосховища, де люди можуть перебувати тривалий час. Окрім надійності конструкції, сучасне укриття має забезпечувати комфортні умови для життя: нормальний мікроклімат, вентиляцію, відведення води, а також контроль доступу, щоб уникнути стороннього проникнення. Саме тому з'являється потреба у простих, надійних і недорогих системах автоматизації, які здатні слідувати за умовами всередині приміщення та допомагати підтримувати їх у безпечному стані.

У цій роботі представлено проєкт мікроелектронної системи для бомбосховища, створеної на базі ESP32 [1]. Цей мікроконтролер вибрано через його доступність, широкі можливості та підтримку Wi-Fi, що дозволяє керувати системою як на місці, так і дистанційно через смартфон. Система оснащена сенсорами, моторизованими механізмами та сенсорним дисплеєм для зручної взаємодії.

Основна мета — зробити перебування людей у сховищі більш безпечним і комфортним, максимально автоматизувавши контроль умов та доступ.

У процесі роботи була зібрана та протестована система, яка поєднує в собі сенсори навколишнього середовища [2,3], RFID-модуль, сенсорний дисплей та три сервоприводи, що відповідають за механічні процеси в бомбосховищі. Після налаштування та калібрування сенсорів система стабільно розпізнавала зміни параметрів у приміщенні: температуру, вологість, рівень води та наявність спиртових парів у повітрі.



Рисунок 1. – Структурна схема радіотехнічної системи

Тестування показало, що серводвигуни працюють чітко відповідно до заданих умов. Один сервопривід коректно активував механізм зливу води при перевищенні встановленого рівня. Другий запускав вентиляційний отвір, коли параметри мікроклімату виходили за норму. Третій привід відповідав за відкривання і закривання дверей — як за командою з сенсорного екрана всередині укриття, так і через смартфон при дистанційному доступі.

Окремо перевірялися режими ручного керування через TFT-екран та віддалене керування через Wi-Fi. В обох випадках команди виконувалися без затримок і з високою стабільністю. Сенсори регулярно оновлювали показники, а всі зміни відображалися на дисплеї в реальному часі.

Загалом, система показала себе надійною, швидко реагувала на зміни умов і правильно активувала відповідні виконавчі елементи. Це підтвердило, що запропоноване рішення підходить для автоматизації та підвищення безпеки у приміщеннях типу бомбосховищ.

У результаті виконання роботи була створена та перевірена мікроелектронна система для автоматизації доступу та контролю умов у бомбосховищі на базі ESP32 [1]. Реалізована конструкція довела, що навіть з відносно простих і доступних компонентів можна побудувати надійну та функціональну систему, здатну підвищити безпеку й комфорт перебування людей у захисному приміщенні.

Сенсори коректно відстежують основні показники середовища — температуру, вологість, рівень води та наявність парів спирту. Серводвигуни стабільно виконують свої завдання: відкривають двері, керують зливом води та вентиляцією за потреби. Система однаково добре реагує як на ручні команди через сенсорний TFT-екран, так і на дистанційне керування зі смартфона через Wi-Fi.

Отримані результати підтверджують, що розроблене рішення ефективно виконує функції моніторингу та автоматичного реагування на зміну умов у приміщенні. Проєкт має потенціал для подальшого вдосконалення: можна додати резервне живлення, систему оповіщень, додаткові сенсори безпеки та інтегрувати систему з “розумним укриттям”.

Створена система демонструє практичну цінність і може бути використана як основа для реального впровадження або подальших досліджень у сфері автоматизації захисних споруд.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ESP32 — Technical Reference Manual. URL: https://documentation.espressif.com/esp32_technical_reference_manual_en.pdf (дата звернення: 03.11.2025).
2. DHT22 / DHT11 — Datasheet температурно-вологісних сенсорів. URL: <https://www.mouser.com/datasheet/2/737/dht-932870.pdf?srltid=AfmBOopHFyVuk4skRcXev5sH6dbLhZC2jYc2rGRRgIT2vddPU1UHv&utm> (дата звернення: 03.11.2025).
3. MQ-3 — Алкогольний газовий сенсор. URL: <https://cdn.sparkfun.com/assets/6/a/1/7/b/MQ-3.pdf?utm> (дата звернення: 03.11.2025).

Притула Максим Олександрович – кандидат технічних наук, старший викладач каф. ІПТС Вінницького національного технічного університету м. Вінниця, Україна, e-mail: pritulamo@ukr.net

Карелов Нікіта Анатолійович – студент групи МНТ-22Б, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: nikitakarelov809@gmail.com

RADIO TECHNICAL SYSTEM FOR ACCESS AND CLIMATE CONTROL OF BOMB SHELTER

Abstract

The paper presents the development of an access control and microclimate management system for a bomb shelter based on the ESP32 microcontroller. The complex includes temperature, humidity, and water level sensors, as well as a gas analyzer to monitor the concentration of alcohol vapors in the air. An RFID module is used to control access from the outside. Three electric drives provide automated

control of the systems: drainage of excess water, ventilation when the temperature, humidity, or vapor concentration rises, and a door opening mechanism.

A touchscreen TFT display is used for local control, showing all sensor data and available door control functions. In addition, thanks to built-in Wi-Fi, all settings and commands can be transmitted remotely from a smartphone, providing an extra level of convenience and security.

The system was tested for the correct operation of sensors and actuators, as well as for its ability to automatically respond to changes in room conditions. The results confirmed the effectiveness of the approach to maintaining safety and favorable conditions in the bomb shelter, as well as the possibility of further expanding its functionality.

Keywords: *ESP32, access system, climate control, sensors, RFID, TFT screen, Wi-Fi, bomb shelter.*

Prytula Maksym Oleksandrovych - Ph.D., Senior Lecturer of the Department of Information Radioelectronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: pritulamo@ukr.net

Karelov Nikita Anatolievich – student of group MNT-22B, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: nikitakarelov809@gmail.com

ЗАСОБИ РАДІОКЕРУВАННЯ ДРОНАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглянуто сучасні засоби радіокерування безпілотних літальних апаратів із використанням технологій штучного інтелекту. Проаналізовано принципи інтеграції ШІ в системи зв'язку, адаптивного управління та безпеки дронів. Показано перспективи розвитку інтелектуальних систем керування для підвищення автономності та ефективності польотів.

Ключові слова: дрон, радіокерування, штучний інтелект, машинне навчання, автономність, безпека.

Вступ

Сучасний розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА) вимагає постійного вдосконалення систем керування та зв'язку [1]. Традиційні методи радіокерування мають обмеження, пов'язані із затримками сигналу, завадами та необхідністю постійного контролю з боку оператора [2]. Використання технологій штучного інтелекту (ШІ) у системах радіокерування відкриває нові можливості для підвищення автономності [3], стабільності та ефективності управління дронами. Такі рішення стають ключовими у військовій, промисловій, цивільній та науковій сферах застосування безпілотників.

Мета роботи – дослідити засоби радіокерування дронами з використанням технологій штучного інтелекту та визначити напрями вдосконалення систем зв'язку й управління для підвищення ефективності та безпеки їхньої роботи.

Задачі дослідження включали:

1. Проаналізувати сучасні методи радіокерування безпілотних літальних апаратів.
2. Розглянути принципи інтеграції алгоритмів штучного інтелекту в системи керування дронами.
3. Визначити переваги використання ШІ у забезпеченні стабільного радіозв'язку та захисту від зовнішніх завад.
4. Дослідити можливості застосування інтелектуальних систем у колективному управлінні роями дронів.
5. Окреслити перспективи розвитку технологій штучного інтелекту в галузі безпілотного радіокерування.

Результати дослідження

Засоби радіокерування дронів на основі ШІ інтегрують алгоритми машинного навчання, нейронні мережі та системи обробки сигналів у реальному часі. Вони здатні адаптуватися до змінних умов середовища, оптимізувати маршрути польоту, визначати перешкоди та прогнозувати можливі збої у зв'язку. Однією з ключових технологій є інтелектуальне керування частотним діапазоном – система самостійно вибирає оптимальний канал передачі даних, знижуючи ризик втрати сигналу або перехоплення [1].

Крім того, штучний інтелект дозволяє створювати системи колективного управління — рої дронів, які координують свої дії без безпосереднього втручання людини. Завдяки глибокому навчанню дрони можуть спільно вирішувати завдання моніторингу, картографування, логістики чи пошуково-рятувальних операцій. Для підвищення безпеки застосовуються алгоритми шифрування та аутентифікації на базі ШІ, які аналізують аномалії в радіосигналах і блокують спроби стороннього втручання [2, 3].

Сучасні радіосистеми з елементами ШІ також здатні здійснювати самодіагностику — оцінювати стан апаратури, рівень енергії, якість зв'язку та вчасно повідомляти про критичні

ситуації. Це підвищує надійність експлуатації та зменшує навантаження на операторів.

Додатково важливим напрямом розвитку є використання алгоритмів глибинного навчання для передбачення змін радіоелектромагнітного середовища. Такі алгоритми дозволяють дрону завчасно реагувати на перешкоди, наприклад, змінювати висоту польоту або частоту передачі сигналу, щоб уникнути втрати зв'язку. Використання ШІ у поєднанні з технологіями 5G та майбутнього 6G забезпечує наднизьку затримку сигналу, що дозволяє реалізувати практично миттєве управління в реальному часі [2, 3].

Також активно розвивається напрям використання систем комп'ютерного зору, які працюють у комплексі з радіоканалами. Завдяки цьому дрони можуть визначати об'єкти, орієнтуватися у просторі та приймати рішення автономно, навіть при частковій втраті сигналу. Високий рівень інтеграції ШІ у радіокерування сприяє зменшенню впливу людського фактора та підвищує ефективність виконання складних місій у мінливих умовах.

Висновки

Впровадження штучного інтелекту в засоби радіокерування дронами є перспективним напрямом розвитку безпілотних технологій. Інтелектуальні системи забезпечують стійкий зв'язок, автономність, підвищену безпеку та ефективність керування. Надалі очікується ще глибша інтеграція ШІ з системами зв'язку, що сприятиме створенню повністю автономних дронів, здатних діяти у складних умовах без участі людини.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Семенов А. О. Методи і пристрої генерування та формування сигналів з регулярною й хаотичною динамікою для інфокомунікаційних систем. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, Нац. ун-т «Львівська політехніка», Львів, 2019. 44 с. URL: <https://lpnu.ua/sites/default/files/2020/dissertation/1530/arefsemenovao.pdf>
2. M. Al-Maitah, O. O. Semenova, A. O. Semenov et al. A Hybrid Approach to Call Admission Control in 5G Networks. *Advances in Fuzzy Systems*, vol. 2018, 2018. pp. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/2535127>
3. Semenova O., Semenov A., Voitsekhovska, O. Neuro-Fuzzy Controller for Handover Operation in 5G Heterogeneous Networks. *2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT)*, pp. 382–386, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/aiact.2019.8847898>

Гладкий Мирослав Олександрович — студент кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: miroslavgladkiy@gmail.com

Науковий керівник: **Семенов Андрій Олександрович** — д-р техн. наук, професор, професор кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: semenov.a.o@vntu.edu.ua

RADIO-FREQUENCY CONTROL DEVICES FOR DRONES USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Abstract

The paper discusses modern radio control systems for unmanned aerial vehicles using artificial intelligence technologies. The principles of AI integration into drone communication, adaptive control, and security systems are analyzed. The prospects for developing intelligent control systems to enhance autonomy and flight efficiency are presented.

Keywords: drone, radio control, artificial intelligence, machine learning, autonomy, security.

Gladkiy Myroslav Oleksandrovych — student at the Department of Information Radioelectronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: miroslavgladkiy@gmail.com

Supervisor: **Semenov Andriy Oleksandrovych** — Dr. Sc. (Eng.), Full Professor, Professor of the Department of Information Radioelectronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: semenov.a.o@vntu.edu.ua

ФАЗОВАНА АНТЕННА РЕШІТКА З 3×3 ЕЛЕМЕНТІВ ЯГІ–УДА ДЛЯ РЛС ДЕЦИМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі представлено фазовану антенну решітку з 3×3 елементів Ягі–Уда, оптимізовану для застосування в радіолокаційних системах дециметрового діапазону. Наведено результати моделювання, що демонструють високі значення підсилення, прийнятний рівень взаємного зв'язку та можливість електронного сканування. Розроблена конструкція може бути використана як основа для створення компактних РЛС середньої дальності.

Ключові слова: фазована антена решітка, Ягі–Уда, дециметровий діапазон, діаграма спрямованості, електронне сканування, радіолокація.

Вступ

Фазовані антени решітки (ФАР) є ключовим елементом сучасних радіолокаційних систем дециметрового діапазону, забезпечуючи електронне сканування простору, підвищену завадостійкість та можливість формування вузьких діаграм спрямованості [1]. Антена Ягі–Уда вирізняється простою конструкцією, високим коефіцієнтом підсилення та добрим придушенням бічних пелюсток, що робить її придатною для використання в малогабаритних решітках. У даній роботі розглядається проектування та аналіз фазованої антенної решітки, що складається з 3×3 елементів Ягі–Уда, оптимізованої для роботи в дециметровому діапазоні частот. Метою дослідження є оцінка електромагнітних параметрів, характеру взаємного зв'язку між елементами та можливостей електронного сканування.

Метою роботи є розроблення нової конструкції фазованої антенної решітки з 3×3 елементів Ягі–Уда для РЛС та дослідження її роботи в дециметровому діапазоні.

Основні завдання дослідження:

- розроблення геометрії та моделі окремого елемента Ягі–Уда;
- визначення оптимальних міжелементних відстаней та оцінка взаємного зв'язку;
- аналіз параметрів сформованої діаграми спрямованості;
- дослідження можливостей електронного сканування за фазовим керуванням.

Результати дослідження

Розроблена решітка містить дев'ять ідентичних антен Ягі–Уда з типовою конфігурацією активного відбратора, рефлектора та одного директора. Моделювання проведено методом із застосування HFSS ANSYS. Оптимальна відстань між елементами становила близько $0,6\lambda$, що забезпечило компроміс між рівнем взаємного зв'язку та шириною головної пелюстки (рис. 1) [2]. Коефіцієнт підсилення окремого елемента досягав 6,95 dBi, тоді як сформована решіткою головна пелюстка забезпечувала сумарне підсилення 17,4 dBi на частоті 1 ГГц.

Досліджено вплив фазового керування на електронне сканування. При зміні фази живлення елементів на $\pm 45^\circ$ забезпечувалося відхилення головної пелюстки до $\pm 25^\circ$ від нормалі без суттєвого зростання бічних пелюсток. Взаємний зв'язок між сусідніми елементами не перевищував $-12\dots-14$ dB, що є прийнятним для формування стабільної ДС. Аналіз ширини смуги показав можливість роботи в діапазоні близько 6–8 %, що відповідає вимогам більшості дециметрових РЛС середньої дальності.

Проведена оптимізація геометрії директорів і рефлектора дозволила знизити рівень задньої пелюстки на 3–4 dB, що підвищило відношення сигнал/шум у напрямку прийому. Механічна конструкція решітки передбачає модульність та можливість масштабування до форматів 4×4 або 5×5.

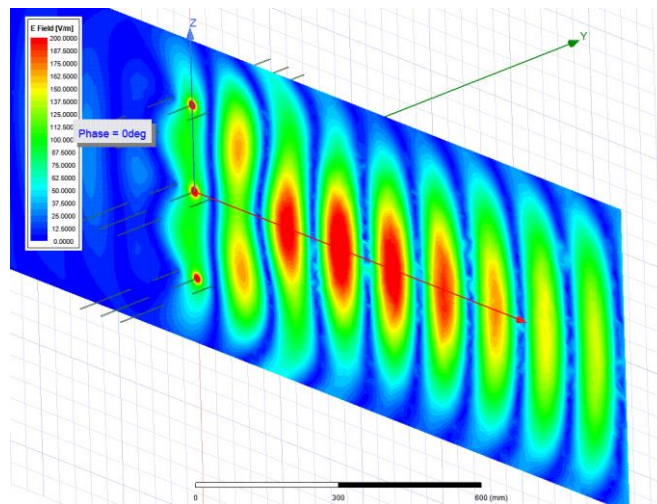


Рисунок 1 – Моделювання фазованої антенної решітки з 3×3 елементів Ягі–Уда

Висновки

Розроблена фазована антена решітка з 3×3 елементів Ягі–Уда демонструє високі показники підсилення та ефективне електронне сканування в межах $\pm 25^\circ$. Дециметровий діапазон забезпечує придатність для застосування в мобільних та стаціонарних РЛС. Отримані результати підтверджують перспективність використання комбінованих Ягі–Уда елементів у компактних ФАР та можуть бути основою для подальшої розробки апаратних прототипів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. A. Semenov, O. Semenova, N. Kryvinska, A. Krystoforov, P. Kurovskyi, O. Kaplychnyi. Development of a microwave resonant waveguide slot antenna with in-phase slot excitation. *Technology Audit and Production Reserves*, vol. 1, no. 2(69), pp. 36–43, Feb. 2023. DOI: 10.15587/2706-5448.2023.274990
2. Семенов А.О., Семенова О.О., Пінаєв Б.О., Білик О.В., Шпильовий О.О. Дослідження густини потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача у ближній та проміжних зонах. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Том 33 (72) № 3 2022. С. 13-19. DOI: 10.32838/2663-5941/2022.3/03

Круглюк Микола Юрійович — студент кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: kruglyuk.kolya4@gmail.com

Науковий керівник: **Семенов Андрій Олександрович** — д-р техн. наук, професор, професор кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: semenov.a.o@vntu.edu.ua

PHASED ANTENNA ARRAY OF 3×3 YAGI–UDA ELEMENTS FOR DECIMETER-BAND RADAR SYSTEMS

Abstract

This paper presents a 3×3 phased antenna array based on Yagi–Uda elements optimized for decimeter-band radar applications. Simulation results show high gain, acceptable mutual coupling, and effective electronic beam steering. The proposed design can serve as a foundation for compact medium-range radar systems.

Keywords: phased array antenna, Yagi–Uda, decimeter band, radiation pattern, electronic scanning, radar.

Kruglyuk Mykola Yuriyovych — student at the Department of Information Radioelectronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: kruglyuk.kolya4@gmail.com

Supervisor: **Semenov Andriy Oleksandrovyich** — Dr. Sc. (Eng.), Full Professor, Professor of the Department of Information Radioelectronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: semenov.a.o@vntu.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ ЦИЛІНДРИЧНОЇ РУПОРНОЇ АНТЕНИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі досліджено електродинамічні процеси поширення радіохвиль у передавальному та приймальному режимах циліндричної рупорної антени. Проаналізовано трансформацію хвильового фронту, вплив геометрії рупора та дифракційних ефектів на формування поля. Виконано порівняння чисельного моделювання з експериментальними даними. Отримані результати можуть бути використані для підвищення ефективності рупорних антен у радіолокаційних і телекомунікаційних системах.

Ключові слова: рупорна антена, електромагнітні хвилі, діаграма спрямованості, хвилеводні моди, моделювання.

Вступ

Дослідження електродинамічних процесів у циліндричних рупорних антенах є важливим етапом підвищення ефективності радіосистем у дециметровому та сантиметровому діапазонах [1]. Рупорні антени широко застосовуються в радіолокації, зв'язку та вимірювальній техніці завдяки поєднанню високого коефіцієнта підсилення, низького рівня бічних пелюсток та відносно простоти конструкції [2]. Особливості поширення електромагнітних хвиль у таких антенах визначають їх спрямованість, узгодження з трактом живлення, КСХ та коефіцієнт корисної дії [3]. Актуальною є розробка методів оцінювання поведінки хвильових мод у рупорі, врахування дифракційних ефектів та неоднорідних полів на вихідному отворі, а також аналіз взаємозв'язку між режимами випромінювання і прийому [1-3].

Мета дослідження полягає у встановленні особливостей електродинамічних процесів поширення радіохвиль у передавальному та приймальному режимах циліндричної рупорної антени, а також у визначенні впливу геометричних параметрів рупора та хвилевідних мод на ефективність формування та приймання електромагнітного випромінювання.

Завдання дослідження

1. Проаналізувати умови збудження та поширення основних мод електромагнітних хвиль у хвилеводному тракті та рупорній частині антени.
2. Дослідити трансформацію хвильового фронту під час переходу від хвилеводу до апертури рупора та оцінити вплив геометричних параметрів на фазовий та амплітудний розподіл поля.
3. Оцінити особливості роботи антени в передавальному режимі, зокрема зміни в коефіцієнті підсилення та ККД при різних параметрах рупора.
4. Проаналізувати поведінку антени в приймальному режимі та підтвердити відповідність результатів принципу взаємності.

Результати дослідження

Проведене моделювання циліндричної рупорної антени охоплювало аналіз поширення хвиль від хвилевідного тракту до вихідного отвору з урахуванням мод ТЕ та ТМ. Визначено, що основну роль у формуванні діаграми спрямованості відіграє TE_{10} -мода, стабільність якої забезпечує рівномірність поля на апертурі. Результати показали, що розширення рупора приводить до поступової трансформації хвильового фронту в майже плоский, що зменшує фазові спотворення та покращує спрямованість [1, 3]. Чисельний аналіз методом скінченних елементів дозволив оцінити розподіл густини потоку енергії в об'ємі рупора та встановити критичні області, де відбувається локальна концентрація поля, що може спричиняти додаткові

втрати. Моделювання дифракційних процесів на краях апертури показало, що їхній внесок у рівень бічних пелюсток залежить від відношення розмірів рупора до довжини хвилі та від точності узгодження на вході [2].

У передавальному режимі досліджено вплив амплітудно-фазового профілю поля на коефіцієнт спрямованості. Оптимізація кута розкриття рупора забезпечила підвищення ефективного коефіцієнта підсилення на 6–10% залежно від частотного діапазону. У приймальному режимі встановлено відповідність отриманої чутливості антени характеристикам, передбаченим принципом взаємності: приймальна ефективна площа збігається з розрахованою на основі коефіцієнта підсилення в передавальному режимі.

Висновки

Дослідження показало, що електродинамічні процеси в циліндричній рупорній антені визначаються комплексною взаємодією мод хвильоводу, геометрії рупора та дифракційних явищ на апертурі. Оптимізація розкриття рупора та узгодження вхідного тракту дозволяє підвищити ефективність випромінювання й прийому без суттєвого ускладнення конструкції. Доведено відповідність поведінки антени принципу взаємності: параметри передавання та прийому взаємопов'язані та можуть бути використані для прецизійної оцінки характеристик у будь-якому з режимів. Отримані результати можуть слугувати основою для вдосконалення рупорних антен у радіолокаційних і телекомунікаційних системах, де потрібні стабільність діаграм спрямованості та високий коефіцієнт підсилення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Semenov A., Semenova O., Pinaiev B., Kozin D., Shpylovyi O. Study of the radiation pattern of a rectangular horn antenna in the operation of multimode propagation of electromagnetic waves. *Technology Audit and Production Reserves*, 2(64), 2022, 50–55. DOI: 10.15587/2706-5448.2022.256560
2. Семенов А., Громик О. Дослідження спрямованих і хвильових параметрів антени поверхневих хвиль. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, (2), 2023, 125–133. DOI: 10.31891/2219-9365-2023-74-16
3. Семенов А. О., Семенова О. О., Пінаєв Б. О., Козін Д. О., Кристофоров А. В. Ширококутова прямокутна рупорна антена з діелектричною лінзою для бездротового зв'язку «точка-точка». *Системи та технології*, 64(2), 2022, 38–47. DOI: 10.32782/2521-6643-2022.2-64.5

Попенко Андрій Андрійович — студент кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: research-sector@vntu.edu.ua

Науковий керівник: **Семенов Андрій Олександрович** — д-р техн. наук, професор, професор кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: semenov.a.o@vntu.edu.ua

RESEARCH ON ELECTRODYNAMIC PROCESSES OF RADIO-FREQUENCY WAVE PROPAGATION BY A CYLINDRICAL HORN ANTENNA

Abstract

The paper investigates the electrodynamic processes of radio wave propagation in the transmitting and receiving modes of a cylindrical horn antenna. The transformation of the wavefront, the influence of horn geometry, and diffraction effects on field formation are analyzed. Numerical simulation results are compared with experimental data. The obtained findings can be applied to improve the efficiency of horn antennas in radar and telecommunication systems.

Keywords: horn antenna, electromagnetic waves, radiation pattern, waveguide modes, simulation.

Popenko Andriy Andriyovych — student at the Department of Information Radioelectronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: research-sector@vntu.edu.ua

Supervisor: **Semenov Andriy Oleksandrovysh** — Dr. Sc. (Eng.), Full Professor, Professor of the Department of Information Radioelectronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: semenov.a.o@vntu.edu.ua

АНАЛІЗ АРХІТЕКТУРНИХ ПІДХОДІВ ДО ОБРОБКИ ДАНИХ У ВУЗЛАХ БЕЗПРОВІДНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ НА БАЗІ ЧАСТОТНИХ ДАВАЧІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

В роботі проведено аналіз двох ключових архітектурних підходів до обробки інформативних сигналів у вузлах безпроводних сенсорних мереж (БСМ), що використовують давачі фізичних величин із частотним вихідним сигналом: архітектури з централізованою та децентралізованою (периферійною) обробкою даних. Проведено порівняльний аналіз цих підходів за ключовими параметрами, такими як енергоефективність, обсяг переданого трафіку, вимоги до обчислювальних ресурсів вузла та затримка в передачі даних. Визначено переваги та недоліки кожного підходу та сформульовано рекомендації щодо їх застосування залежно від специфіки задач моніторингу.

Ключові слова: безпроводна сенсорна мережа, частотний сенсор, вузол сенсорної мережі, Інтернет речей, обробка даних, енергоефективність, периферійні обчислення.

Abstract

The study analyzes two key architectural approaches to processing informative signals in wireless sensor network (WSN) nodes that use physical quantity sensors with frequency output signals: architectures with centralized and decentralized (peripheral) data processing. A comparative analysis of these approaches is carried out according to key parameters such as energy efficiency, traffic volume, node computing resource requirements, and data transmission delay. The advantages and disadvantages of each approach are identified, and recommendations for their application are formulated depending on the specifics of the monitoring tasks.

Keywords: wireless sensor network, frequency sensor, sensor network node, Internet of Things, data processing, energy efficiency, edge computing.

Вступ

Сучасний розвиток Інтернету речей (IoT) та безпроводних сенсорних мереж (БСМ) відкриває широкі можливості для моніторингу різноманітних об'єктів та середовищ. Особливе місце серед сенсорних елементів займають давачі з частотним вихідним сигналом, перевагами яких є висока завадостійкість, простота перетворення сигналу в цифровий код та висока точність. Проте, ефективна інтеграція таких давачів у БСМ, особливо в автономні вузли з живленням від батарей, вимагає ретельного вибору архітектури обробки та передачі даних для досягнення балансу між точністю, швидкістю та енергоспоживанням.

Метою роботи є проведення системного аналізу та порівняння централізованого та децентралізованого (периферійного) архітектурних підходів до обробки даних, отриманих з частотних давачів. Аналіз проводиться за комплексом ключових технічних показників: енергоефективність, обсяг мережевого трафіку, вимоги до обчислювальних ресурсів вузла та загальна затримка в отриманні даних. Це дозволить сформулювати обґрунтовані рекомендації щодо вибору архітектури залежно від специфіки та вимог конкретної задачі моніторингу.

Архітектурні підходи до обробки даних частотних давачів

Залежно від того, де відбувається основна обробка інформації (перетворення частоти у фізичну величину, калібрування, фільтрація), можна виділити два основні підходи: централізований та децентралізований. [1]

У архітектурі з централізованою обробкою (Cloud-Centric) сенсорний вузол виконує мінімальний набір операцій: вимірює частоту або період вхідного сигналу і передає отримане

"сире" значення (raw data) на шлюз або у хмарну платформу. Вся подальша обробка, включаючи перерахунок за калібрувальними коефіцієнтами, аналіз динаміки та прийняття рішень, виконується на боці сервера.

Характеристики централізованої моделі:

- Обробка на рівні мережі (Network-based): Дані давачів надходять у центральну локацію обробки (базову станцію, мережевий сервер або хмару), що дозволяє додатку мати глобальне уявлення про розподіл даних у мережі. [2]
- Енергетичні виклики: У традиційних БСМ з багаторівневою (централізованою) обробкою вузли, розташовані ближче до колектора (шлюзу), часто стають ретрансляційними вузлами. Це призводить до значно швидшої втрати енергії цими вузлами порівняно з тими, що розташовані далі. [3]

Архітектура з децентралізованою (периферійною) обробкою (Edge Computing) передбачає, що сенсорний вузол є "розумним" пристроєм. Він не лише вимірює частоту, але й самостійно виконує всі необхідні обчислення, перетворюючи її в кінцеве значення фізичної величини (наприклад, у °C або %). В мережу відправляються вже повністю оброблені, інформативні дані.

Периферійна обробка (Edge Computing) — це нова обчислювальна модель, яка уніфікує ресурси, що знаходяться близько до користувача (за географічною чи мережевою відстанню), для надання обчислювальних, мережевих послуг та послуг зберігання. [4] Перенесення обробки та зберігання даних з централізованих центрів на периферію мережі дозволяє створювати нові або вдосконалювати існуючі додатки. [5]

Оскільки ресурсів одного вузла може бути недостатньо для складного аналізу, часто використовується розширення моделі, відоме як Туманні Обчислення (Fog Computing). Це розумне розширення хмарних обчислень, яке поєднує IoT-пристрої, периферійні вузли та хмару. Туманні обчислення є тривірневою структурою, яка забезпечує мінімізацію затримок (Latency) та максимізацію пропускної здатності, що сприяє енергозбереженню.

Переваги та недоліки архітектур наведені у таблиці 1. [6]

Таблиця 1 – Переваги і недоліки різних архітектур

Параметр	Централізована обробка	Децентралізована обробка
Енергоспоживання	Низьке (короткі обчислення)	Середнє (тривалі обчислення)
Обсяг трафіку	Високий	Низький
Ресурси вузла	Мінімальні	Підвищені
Затримка даних	Висока	Низька
Автономність вузла	Низька	Висока

Висновки

Проведений аналіз показав, що не існує універсального рішення для всіх задач. Архітектура з централізованою обробкою є оптимальною для систем некритичного моніторингу з великим терміном автономної роботи, де пріоритетом є максимальна економія заряду батареї. Натомість, децентралізований підхід є доцільним у системах, що вимагають мінімальної затримки, обробки даних у реальному часі та здатності до автономної роботи, навіть якщо це призводить до незначного збільшення енергоспоживання вузла. Результати аналізу можуть бути використані при проектуванні енергоефективних та надійних безпроводних сенсорних мереж.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Stankovic J. A. Research Directions for the Internet of Things. IEEE Internet of Things Journal. 2014. Т. 1, № 1. С. 3–9. URL: <https://doi.org/10.1109/jiot.2014.2312291> (дата звернення: 30.10.2025).
2. Data Processing Techniques in Wireless Multimedia Sensor Networks / Y. Liu та ін. International Journal of Distributed Sensor Networks. 2015. Т. 11, № 7. С. 260384. URL: <https://doi.org/10.1155/2015/260384> (дата звернення: 30.10.2025).

3. Третяк А. В. Застосування літальних сенсорних мереж для побудови Інтернету речей : дипломна робота. Київ, 2023. 63 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/927a0e36-092d-486c-8b91-2faf1fdc4415/content> (дата звернення: 30.10.2025).
4. Edge Computing Revolution: A 2021 Guide. viso.ai. URL: <https://viso.ai/edge-ai/edge-computing-a-practical-overview/> (дата звернення: 30.10.2025).
5. Edge computing vs centralized cloud: Impact of communication latency on the energy consumption of LTE terminal nodes / С. Caiazza та ін. Computer Communications. 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2022.07.026> (дата звернення: 30.10.2025).
6. Edge Computing vs Centralized Cloud: Impact of Communication Latency on the Energy Consumption of LTE Terminal Nodes. *arXiv.org*. URL: <https://arxiv.org/abs/2111.10076> (дата звернення: 30.10.2025).

Завальнюк Максим Євгенович — аспірант кафедри Інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: mezgoodle@gmail.com.

Науковий керівник: **Осадчук Олександр Володимирович** — д.т.н., професор, завідувач кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: osadchuk.o.v@vntu.edu.ua

Zavalniuk Maksym Yev. — postgraduate student at the department of information radioelectronic technologies and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: mezgoodle@gmail.com.

Supervisor: **Osadchuk Oleksandr Volodymyrovych** — doctor of technical sciences, professor, head of the department of information radioelectronic technologies and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: osadchuk.o.v@vntu.edu.ua

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ЧАДНОГО ТА ПРИРОДНОГО (МЕТАНУ) ГАЗІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглянуто побудову інформаційно-вимірювальної системи для виявлення чадного газу (CO) та метану (CH₄) із використанням сенсорів MQ-7B та MQ-5. Сенсор MQ-7B базується на напівпровідниковому матеріалі SnO₂ і характеризується високою селективністю до чадного газу, тоді як MQ-5 забезпечує ефективне виявлення метану, зрідженого газу (LPG) та водню. Описано принцип дії сенсорів, їхні технічні характеристики та схеми підключення. Запропонована система реалізована на основі мікроконтролера Arduino або ESP32, який здійснює зчитування аналогових сигналів, аналого-цифрове перетворення, обробку даних і формування попереджувальних сигналів при перевищенні гранично допустимих концентрацій газів. Передбачено відображення результатів на дисплеї та можливість бездротової передачі даних через Wi-Fi або Bluetooth для дистанційного моніторингу. Система може бути використана у побутових і промислових умовах для підвищення рівня безпеки та контролю якості повітря.

Ключові слова: чадний газ, метан, сенсор MQ-7B, сенсор MQ-5, інформаційно-вимірювальна система, SnO₂, Arduino, ESP32, газова сигналізація, контроль повітря, бездротовий моніторинг, безпека.

Вступ

Контроль концентрації метану (CH₄) та чадного (CO) газів є важливою задачею для забезпечення гарантії безпеки житлових, промислових та лабораторних приміщень. Надлишок цих газів становить небезпеку для здоров'я людини та може призвести до аварійних ситуацій. Чадний газ (оксид вуглецю, CO) – це безбарвний, без запаху, отруйний газ. Він утворюється при неповному згорянні газу. Максимально допустима концентрація чадного газу в повітрі приміщень становить 0,005%. При концентрації чадного газу в повітрі 0,01% людина втрачає здатність орієнтуватися в просторі та втрачає свідомість. Отруєння чадним газом може призвести до смерті. Лікування людей, які отруїлися продуктами горіння, дуже важке і тривале. Витік природного газу (метану, CH₄) також є дуже небезпечним. Максимально допустима концентрація метану в повітрі приміщень становить 1,2%. При концентрації метану в повітрі 5% може статися вибух. Наслідки вибуху газу можуть бути дуже важкими, аж до загибелі людей [1]. Створення інформаційно-вимірювальної системи для автоматичного моніторингу рівня CH₄ та CO у повітрі з можливістю візуалізації даних та подачею сигналу тривоги при перевищенні допустимих норм дозволить своєчасно виявляти небезпечні концентрації шкідливих газів і запобігати отруєнню людей.

Результати дослідження

Для виявлення чадного газу використовують сенсор MQ-7B. Він характеризується чутливим елементом виконаним на основі напівпровідникового матеріалу — діоксиду олова (SnO₂), опір якого змінюється під дією концентрації газу. Для підвищення точності вимірювання використовується циклічний режим нагріву: періодичне перемикавання між високою (5 В) і низькою (1.5 В) температурами.

Основні технічні характеристики сенсора складають: діапазон вимірювання: 10–10 000 ppm (CO); напруга живлення: 5 В; споживаний струм: до 150 мА; час відгуку: ≤10 с; час відновлення: ≤30 с; робоча температура: від -10 до +50 °C[2].

Сенсор має аналоговий (АО) та цифровий (DO) виходи, що дозволяє використовувати його у системах контролю безпеки. MQ-7B відзначається високою селективністю саме до чадного газу, що робить його придатним для побутових та промислових сигналізацій, схема підключення вказана на (Рисунку 1).

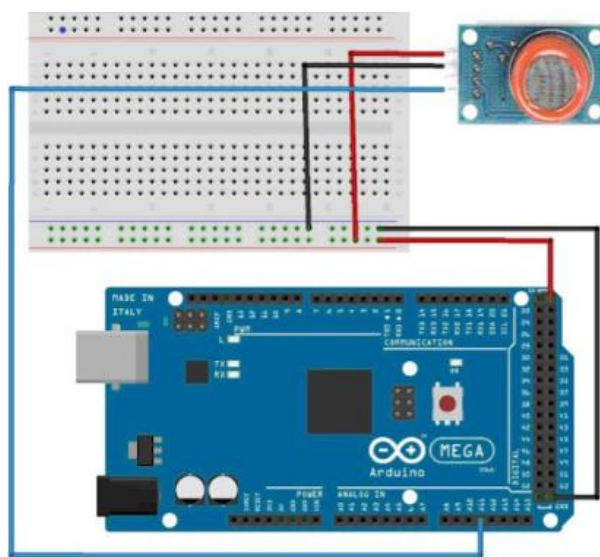


Рисунок 1 – Схема підключення сенсора MQ-7B

Для виявлення метану в повітрі застосовують сенсор MQ-5 (визначення природного газу – метану CH_4 , LPG, водню). Сенсор MQ-5 має чутливий елемент також виготовлений із діоксиду олова (SnO_2), який змінює свій опір у присутності горючих газів. Сенсор характеризується стабільністю показників і хорошою чутливістю до метану (CH_4).

Основні технічні характеристики: діапазон вимірювання: 200–10 000 ppm (CH_4 , LPG, H_2); напруга живлення: 5 В; споживаний струм: ≤ 150 мА; час відгуку: ≤ 10 с; час відновлення: ≤ 30 с; робоча температура: від -10 до $+50$ °C[3].

Сенсор має два виходи: аналоговий (для зчитування концентрації) та цифровий (для подачі сигналу при перевищенні порогового рівня). MQ-5 широко застосовується у побутових системах безпеки, контролерах газу, вентиляційних установках і лабораторних вимірювальних комплексах, схема підключення продемонстрована на (Рисунку 2).

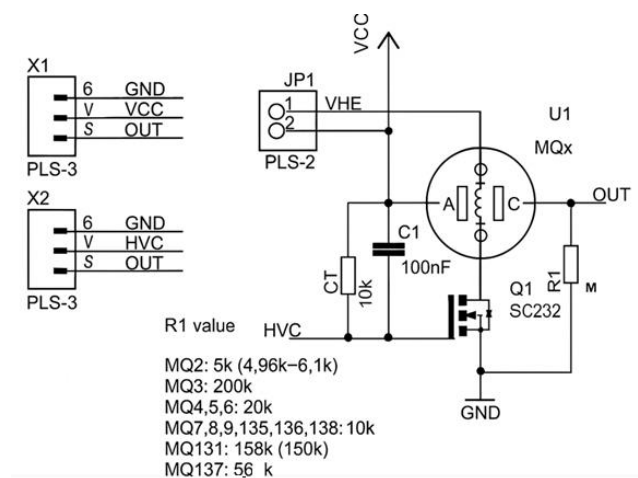


Рисунок 2 – Схема підключення сенсора MQ-5

Інформаційно-вимірювальна система — сукупність функціонально об'єднаних вимірювальних, обчислювальних та інших допоміжних технічних засобів для отримання вимірювальної інформації, її перетворення, обробки з метою представлення споживачу (в тому числі введення в АСУ) в

необхідному вигляді або автоматичного здійснення логічних функцій контролю, діагностування, ідентифікації[4].

Інформаційно-вимірювальна система з сенсорами MQ-5 та MQ-7B базується на мікроконтролері (наприклад, Arduino або ESP32), який зчитує аналогові сигнали із сенсорів MQ-7B та MQ-5. Дані перетворюються в цифрову форму за допомогою вбудованого АЦП. На основі цих даних контролер визначає поточну концентрацію газів у повітрі та порівнює її з гранично допустимими рівнями. Якщо норми перевищено — активується звукова та світлова сигналізація, а також може подаватися повідомлення на дисплей або через бездротовий канал зв'язку.

Результати вимірювань виводяться на рідкокристалічний або сенсорний дисплей у зручній для користувача формі. Система може бути розширена додатковими модулями — Wi-Fi або Bluetooth для дистанційного моніторингу через смартфон або комп'ютер. Завдяки цьому можна відстежувати показники навіть у віддалених приміщеннях.

Висновок

Отже, така система забезпечить постійний контроль повітря, що є особливо важливим у побутових, промислових та начальних приміщеннях. Завдяки автоматичному збору та аналізу даних користувач зможе оперативно реагувати на зміни стану повітря, вмикати вентиляцію або евакуацію при критичних показниках. Крім того, впровадження подібних інформаційно-вимірювальних систем сприятиме підвищенню рівня безпеки, енергоефективності та екологічної свідомості, а також може стати основою для створення “розумних” систем моніторингу довкілля та управління мікрокліматом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Державна інспекція енергетичного нагляду України .Офіційний сайт - [Електронний ресурс], Київ, 2025 р. – Електрон. текст. дані. Режим доступу: <https://sies.gov.ua/zvernennya-gromadyan/najbilsh-zapituvana-informaciya/syhnalizator-kontroliu-kontsentratsii-hazu-vstanovlennia-oboviazkove>
2. Третьяков Д.Г., Шумакова Н.І., Проценко І.Ю. Фізичні принципи функціонування газових датчиків [Електронний ресурс] Суми 2019 р. - Електрон. текст. дані. - 2019. - Режим доступу <https://essuir.sumdu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/53b5700a-58ba-45ac-b741-054b24e7b000/content>
3. MiniTech Сенсор MQ-5 - [Електронний ресурс], Київ, 2025 р - Режим доступу: <https://www.mini-tech.com.ua/ua/datchik-gaza-mq-5>
4. Галь А.Ф., Гайдай Г.Ю., Грешнов А.Ю. Інформаційно-вимірювальна система обробки даних експерименту [Електронний ресурс] Миколаїв 2020 р. - Електрон. текст. дані. - 2020. - Режим доступу: https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2020/1_2020/part_1/13.pdf

Бровченко Вікторія Валентинівна – студентка групи КІВТ-22Б, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: gjfka1240@gmail.com

Дудатьєв Ігор Андрійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри ІРТС, Вінницький національний технічний університет м. Вінниця, Україна, email: dudatiev.igor@gmail.com

Припула Максим Олександрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри ІРТС, Вінницький національний технічний університет м. Вінниця, Україна, email: prytula@vntu.edu.ua

INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM FOR CARBON MONOXIDE AND NATURAL (METHANE) GASES

Abstract

The paper presents the development of an information-measurement system for detecting carbon monoxide (CO) and methane (CH₄) using MQ-7B and MQ-5 sensors. The MQ-7B sensor is based on the semiconductor material SnO₂ and features high selectivity to carbon monoxide, while the MQ-5 sensor effectively detects methane, liquefied petroleum gas (LPG), and hydrogen. The principles of operation, technical characteristics, and connection schemes of the sensors are described. The proposed system is implemented using an Arduino or ESP32 microcontroller, which reads analog signals, performs analog-to-digital conversion, processes data, and generates warning signals when gas concentrations exceed permissible limits. Measurement results are displayed on a screen, and wireless data transmission via Wi-Fi or Bluetooth is provided for remote monitoring. The system can be used in domestic and industrial environments to enhance safety and monitor air quality.

Keywords: carbon monoxide, methane, MQ-7B sensor, MQ-5 sensor, information-measurement system, SnO₂, Arduino, ESP32, gas alarm, air control, wireless monitoring, safety.

Brovchenko Viktoriia Valentynivna – student of the group KIVT-22B, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: gjfka1240@gmail.com

Dudatiev Ihor Andriyovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of IRTS, Vinnitsa National Technical University, Vinnitsa, Ukraine, email: dudatiev.igor@gmail.com

Prytula Maksym Oleksandrovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of IRTS, Vinnitsa National Technical University, Vinnitsa, Ukraine, email: prytula@vntu.edu.ua

Інфрачервоний PIR-сенсор для системи виявлення руху та вимірювання відстані Вінницький національний технічний університет

Анотація. У роботі розглянуто використання інфрачервоного PIR-сенсора та лазерного ToF-датчика у системах виявлення руху та вимірювання відстані. Наведено принципи роботи, технічні характеристики та переваги сенсорів HC-SR501 і VL53L0X, які забезпечують високу точність, енергоефективність та стабільність вимірювань. Запропоновано комбіновану структуру системи, у якій PIR-сенсор виконує функцію попереднього детектування руху, а ToF-датчик здійснює точне вимірювання дистанції. Такий підхід дозволяє підвищити надійність і зменшити кількість хибних спрацювань у системах автоматизації. Приклад реалізації базується на мікроконтролері ESP32 з TFT-дисплеєм для візуалізації результатів.

Ключові слова: інфрачервоний сенсор; PIR; ToF; VL53L0X; HC-SR501; ESP32; система виявлення руху; вимірювання відстані; автоматизація.

Вступ

Розвиток систем автоматизації зумовлює необхідність використання сенсорних модулів, здатних забезпечувати надійне виявлення руху, визначення просторових параметрів і збір інформації про навколишнє середовище. Сучасні тенденції спрямовані на створення малопотужних, енергоефективних і високочутливих сенсорних пристроїв, що легко інтегруються у вбудовані мікроконтролерні системи.

Особливе місце серед таких пристроїв посідають інфрачервоні PIR-сенсори та лазерні ToF-датчики, які поєднують простоту конструкції з високою точністю роботи. Їхнє спільне використання у складі інтелектуальних систем дозволяє реалізувати багаторівневий контроль руху й відстані, що є актуальним для охоронних комплексів, систем «розумного дому», робототехніки та промислової автоматизації.

Метою даної роботи є дослідження можливостей застосування інфрачервоного PIR-сенсора HC-SR501 та лазерного ToF-датчика VL53L0X у комбінованій системі виявлення руху та вимірювання відстані на базі мікроконтролера ESP32.

Результати дослідження

Сучасні системи автоматизації та безпеки активно використовують сенсорні модулі для виявлення руху, контролю просторових параметрів та збору інформації про оточення. Найбільш поширеними рішеннями у сфері малопотужних вбудованих систем є інфрачервоні PIR-датчики (Passive Infrared Sensor) та лазерні датчики відстані, що працюють на принципі вимірювання часу прольоту променя (Time-of-Flight, ToF).

PIR-сенсор HC-SR501 застосовується для виявлення руху шляхом аналізу зміни інфрачервоного випромінювання, яке створюють живі об'єкти. Датчик має високу чутливість, широкий кут огляду (до 120°) та радіус дії до 7 метрів, що робить його ефективним для систем сигналізації, автоматичного освітлення та робототехніки. Схему підключення PIR-сенсора до мікроконтролера наведено на рис. 1. HC-SR501 є енергоефективним, має регулювання чутливості й затримки спрацювання, та працює на напрузі 5 В.

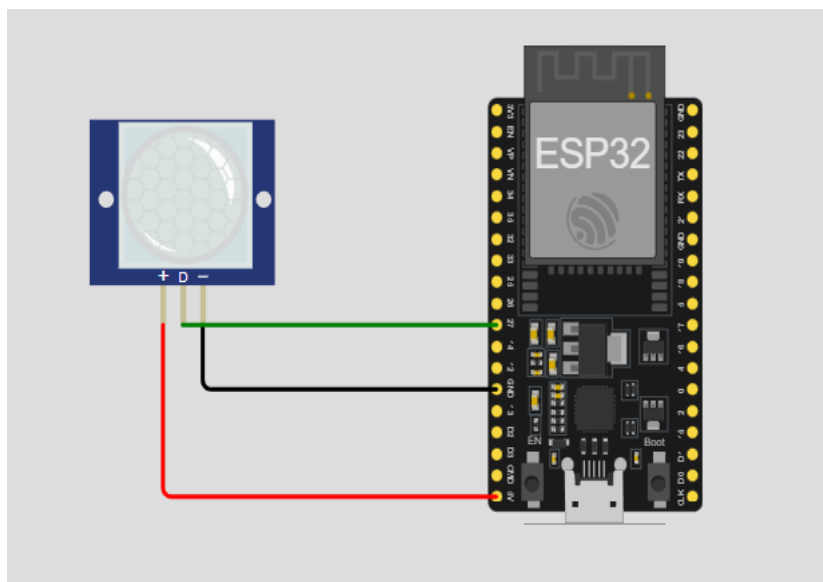


Рисунок 1 – Схема підключення сенсора HC-SR501

ToF-сенсор VL53L0X використовує лазерний промінь та вимірює час його повернення після відбиття від об'єкта. На відміну від ультразвукових або простих оптичних датчиків, VL53L0X забезпечує високу точність і стабільність результатів незалежно від кольору, текстури та кута поверхні. Схему підключення датчика VL53L0X подано на рис. 2. Дальність вимірювання досягає 2 метрів, а точність — у межах міліметрів. Наявність інтерфейсу I²C дозволяє легко інтегрувати сенсор у мікроконтролерні системи.

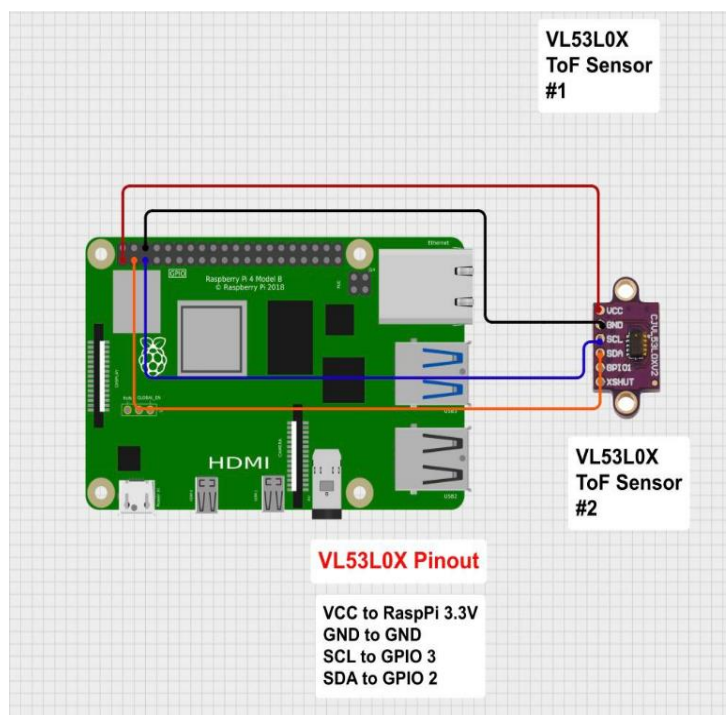


Рисунок 2 – Схема підключення сенсора VL53L0X

Комбінація PIR-та ToF-сенсорів дозволяє створювати інтелектуальні системи з подвійним контролем: спочатку фіксується рух у зоні, після чого запускається точне вимірювання відстані. Подібний підхід підвищує точність та знижує ризик хибних спрацювань. Прикладом реалізації є система на базі мікроконтролера ESP32 з TFT-інтерфейсом для моніторингу руху та дистанції.

Висновки

У результаті проведеного дослідження розглянуто принципи роботи та особливості застосування інфрачервоного PIR-сенсора HC-SR501 і лазерного ToF-датчика VL53L0X у системах автоматизації та безпеки. Показано, що комбіноване використання цих сенсорів забезпечує підвищену точність виявлення руху, достовірність вимірювання відстані та зменшує кількість хибних спрацювань.

Розроблена структура системи на базі мікроконтролера ESP32 з TFT-дисплеєм дозволяє реалізувати інтегроване рішення для моніторингу руху й дистанції у реальному часі. Отримані результати можуть бути використані під час створення інтелектуальних охоронних, освітлювальних та робототехнічних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Rahman, A. "Precision and Accuracy of Ultrasonic and Infrared Laser ToF IoT Sensors." Journal of Informatics and Telecommunication Engineering, Vol 8 No 2, Jan 2025.
2. Lesmana, Y., Pane, R., Rohayani, E., Hakim, L., Agusti, N., Prasetyo P. D. "A Review of Motion Sensors as a Home Security System and Approach to the Internet of Things Project." Internet of Things & Artificial Intelligence Journal, 2024.

Романенко Євгеній Андрійович - студент групи KIBT-22Б, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: krypzes1273@gmail.com

Дудатьєв Ігор Андрійович — канд. техн. наук, доцент кафедри IPTC, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, email : dudatiev.igor@gmail.com

Прутула Максим Олександрович – канд. техн. наук, доцент кафедри IPTC, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, email: prytula@vntu.edu.ua

Infrared PIR Sensor for a Motion Detection and Distance Measurement System

Abstract. The paper presents the use of an infrared PIR sensor and a laser ToF sensor in motion detection and distance measurement systems. The principles of operation, technical characteristics, and advantages of the HC-SR501 and VL53L0X sensors are described, which provide high accuracy, energy efficiency, and measurement stability. A combined system structure is proposed, in which the PIR sensor performs preliminary motion detection, while the ToF sensor carries out precise distance measurement. This approach improves system reliability and reduces the number of false triggers in automation. An example implementation is based on the ESP32 microcontroller with a TFT display for real-time visualization of results.

Keywords: infrared sensor; PIR; ToF; VL53L0X; HC-SR501; ESP32; motion detection system; distance measurement; automation.

Romanenko Yevhenii Andriyovych – student of the group KIVT-22B, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: krypzes1273@gmail.com

Dudatiev Ihor Andriyovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of IRTS, Vinnitsa National Technical University, Vinnitsa, Ukraine, email: dudatiev.igor@gmail.com

Prytula Maksym Oleksandrovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of IRTS, Vinnitsa National Technical University, Vinnitsa, Ukraine, email: prytula@vntu.edu.ua

ДІАГНОСТИКА ДИНАМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ МЕТОДОМ РОЗДІЛЬНОГО ОЦІНЮВАННЯ

Вінницький національний технічний університет.

Анотація

Головна увага у цій роботі зосереджена на проблемі своєчасного виявлення несправностей та їх розпізнавання шляхом застосування локально-оптимальних методів роздільного оцінювання. Метою представленої роботи є розробка методу, що дозволяє відновити нормальну працездатність фільтра Калмана за наявності збурень, структура яких невизначена. Поставлена мета досягається шляхом застосування спеціального взаємодіючого перетворення рівняння виходу досліджуваної системи, внаслідок чого складова збурень поглинається в рівнянні екстраполяції вектору стану динамічної системи.

Ключові слова: оцінювання станів, лінійні динамічні системи, фільтр Калмана, збурення з невизначеною структурою.

Загально світові тенденції розвитку напрямку відмовостійкого керування складними об'єктами констатують, що за наявності протиріч між вартістю, складністю та надійністю більш доцільним є використання методів модельно-орієнтованої концепції з аналітичною надлишковістю, основою на спільних вимірах різнотипних фізичних величин з метою їх перехресного контролю. Ідеєю згаданої концепції є заміна фізичного резервування математичною моделлю (ММ) яка у обов'язковому порядку працює паралельно з діючим об'єктом, а на їхні входи подаються ідентичні вхідні сигнали. Схематично процедура виявлення несправностей на основі використання кількісної ММ зображена на рис. 1.

В ідеальному випадку, при відсутності дестабілізуючих факторів, адекватність математичної моделі у реальному об'єкту гарантує нульовий сигнал похибки. На практиці фактичний різницевий сигнал є лише повільним фізичним коливальним процесом навколо нульового рівня. У ньому віддзеркалюються усі фактори, що залишилися поза ММ (непередбачувані збурення та несправності, ефекти від помилок моделювання, флуктуації параметрів системи, невраховані або лінеаризовані залежності, організовані або природні завади, шуми, та тощо. Інтуїтивно зрозуміло, що різницевий сигнал повинен бути очищений від створюваного фону.

Один з варіантів рішення цієї задачі використовує концепцію розширення вектору стану номінальної системи за рахунок внесення у її математичну модель фіктивного невідомого векторного входу, асоційованого з впливом діючих несправностей та збурень. При цьому оптимальний розв'язок задачі оцінювання гарантується розширеним фільтром Калмана [1]. Однак, за великого числа врахованих несправностей та збурень розмірність розширеного фільтра Калмана буде набагато перевищувати розмірність власне самої системи [3].

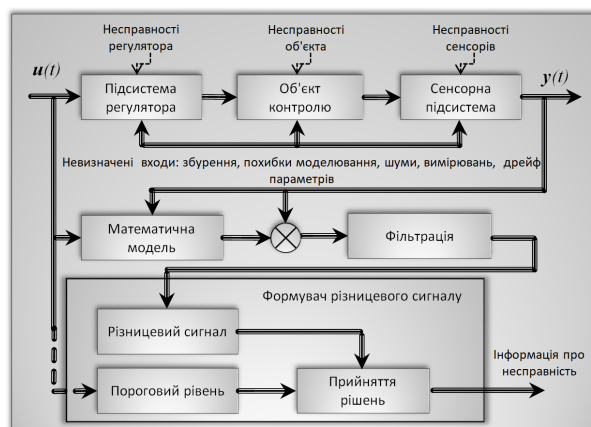


Рис. 1. Модельно-орієнтована система діагностики несправностей

З метою зниження обчислювальних витрат Бернард Фрідланд запропонував апроксимувати розширений фільтр Калмана (ФК) паралельною автономно діючою каскадною структурою меншої розмірності [2]. У представлений роботі виконана модернізація двокаскадної структури Фрідланда, що отримати оптимальні характеристики розщепленого фільтра за наявності стохастичних моделей несправностей. Вказана модернізація базується на відмові від автономності роботи компонентів паралельної структури та охоплені їх системою перехресних зв'язків.

Модель динаміки системи : $\mathbf{s}(k+1) = \Sigma(k+1, k)\mathbf{s}(k) + \Psi(k+1, k)\mathbf{f}(k) + \mathbf{w}_s(k)$

Модель каналу спостережень : $\mathbf{y}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{s}(k) + \mathbf{F}(k)\mathbf{f}(k) + \mathbf{v}(k)$

Модель динаміки несправностей: $\mathbf{f}(k+1) = \mathbf{L}(k+1, k)\mathbf{f}(k) + \mathbf{w}_f(k)$

Розширений вектор стану: $\mathbf{z}^T(k) = [\mathbf{s}(k) \mathbf{f}(k)]^T$

Розширений ФК:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{z}}(k/k-1) &= \Sigma_z(k, k-1)\hat{\mathbf{z}}(k-1/k-1) \\ \hat{\mathbf{z}}(k/k) &= \hat{\mathbf{z}}(k/k-1) + \mathbf{K}_z(k)[\mathbf{y}(k) - \mathbf{H}_z(k)\hat{\mathbf{z}}(k/k-1)] \\ \mathbf{P}_z(k/k-1) &= \Sigma_z(k, k-1)\mathbf{P}_z(k-1/k-1)\Sigma_z^T(k, k-1) + \mathbf{Q}_z(k-1) \\ \mathbf{K}_z(k) &= \mathbf{P}_z(k/k-1)\mathbf{H}_z^T(k)[\mathbf{H}_z(k)\mathbf{P}_z(k/k-1)\mathbf{H}_z^T(k) + \mathbf{R}(k)]^{-1} \\ \mathbf{P}_z(k/k) &= [\mathbf{I} - \mathbf{K}_z(k)\mathbf{H}_z(k)]\mathbf{P}_z(k/k-1) \end{aligned} \quad \left\{ \begin{aligned} \Sigma_z(k, k-1) &= \begin{bmatrix} \Sigma(k, k-1) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{L}(k, k-1) \end{bmatrix} \mathbf{Q}_z(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_s(k) & \mathbf{Q}_{sf}(k) \\ \mathbf{Q}_{sf}^T(k) & \mathbf{Q}_f(k) \end{bmatrix} \\ \mathbf{K}_z(k) &= \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s(k) \\ \mathbf{K}_f(k) \end{bmatrix} \mathbf{H}_z(k) = [\mathbf{H}(k) \quad \mathbf{F}(k)]; \\ \mathbf{P}_z(k/k-1) &= \begin{bmatrix} \mathbf{P}_s(k/k-1) & \mathbf{P}_{sf}(k/k-1) \\ \mathbf{P}_{sf}^T(k/k-1) & \mathbf{P}_f(k/k-1) \end{bmatrix} \mathbf{P}_z(k/k) = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_s(k/k) & \mathbf{P}_{sf}(k/k) \\ \mathbf{P}_{sf}^T(k/k) & \mathbf{P}_f(k/k) \end{bmatrix} \end{aligned} \right.$$

Структура Фрідланда:

Фільтр 1:

$$\begin{aligned} \mathbf{f}^*(k/k-1) &= \mathbf{L}(k, k-1)\mathbf{f}^*(k-1/k-1); \\ \mathbf{f}^*(k/k) &= \mathbf{f}^*(k/k-1) + \mathbf{K}_f(k)[\mathbf{y}(k) - \mathbf{H}(k)\mathbf{s}_1^*(k/k-1) - \Theta(k)\mathbf{f}^*(k/k-1)]; \\ \mathbf{P}_f(k/k-1) &= \mathbf{L}(k, k-1)\mathbf{P}_f(k-1/k-1)\mathbf{L}^T(k, k-1) + \mathbf{Q}_f(k-1); \\ \mathbf{K}_f(k) &= \mathbf{P}_f(k/k-1)\Theta^T(k)[\mathbf{H}(k)\mathbf{P}_{s_1}(k/k-1)\mathbf{H}^T(k) + \Theta(k)\mathbf{P}_f(k/k-1)\Theta^T(k) + \mathbf{R}(k)]^{-1}; \\ \mathbf{P}_f(k/k) &= [\mathbf{I} - \mathbf{K}_f(k)\Theta(k)]\mathbf{P}_f(k/k-1)[\mathbf{I} - \mathbf{K}_f(k)\Theta(k)]^T + \mathbf{K}_f(k)\mathbf{R}(k)\mathbf{K}_f^T(k). \end{aligned}$$

Фільтр 2:

$$\begin{aligned} \mathbf{s}_0^*(k/k-1) &= \Sigma(k, k-1)\mathbf{s}_0^*(k-1/k-1); \\ \mathbf{s}_0^*(k/k) &= \mathbf{s}_0^*(k/k-1) + \mathbf{K}_{s_0}(k)[\mathbf{y}(k) - \mathbf{H}(k)\mathbf{s}_0^*(k/k-1)]; \\ \mathbf{P}_{s_0}(k/k-1) &= \Sigma(k, k-1)\mathbf{P}_{s_0}(k-1/k-1)\Sigma^T(k, k-1) + \mathbf{Q}_{s_0}(k-1); \\ \mathbf{K}_{s_0}(k) &= \mathbf{P}_{s_0}(k/k-1)\mathbf{H}^T(k)[\mathbf{H}(k)\mathbf{P}_{s_0}(k/k-1)\mathbf{H}^T(k) + \mathbf{R}(k)]^{-1}; \\ \mathbf{P}_{s_0}(k/k) &= [\mathbf{I} - \mathbf{K}_{s_0}(k)\mathbf{H}(k)]\mathbf{P}_{s_0}(k/k-1). \end{aligned}$$

Для того, щоб врахувати вплив несправностей на фільтр, основний фільтр представимо їх у змінній формі за допомогою фіктивного додаткового входу $\mathbf{u}(k+1)$, на який діє оновлений шум збурень, обумовлений впливом несправностей [2].

Модифікація рівнянь фільтра Фрідланда:

$$\begin{aligned} \mathbf{s}_1^*(k/k-1) &= \Sigma(k, k-1)\mathbf{s}_0^*(k-1/k-1) + \mathbf{u}(k-1); \\ \mathbf{P}_{s_1}(k/k-1) &= \Sigma(k, k-1)\mathbf{P}_{s_0}(k-1/k-1)\Sigma^T(k, k-1) + \mathbf{Q}_{s_1}(k-1). \end{aligned}$$

Моделювання роздільних властивостей синтезованого фільтра виконувалось з використанням моделі динаміки аеродинамічного об'єкту спостереження, збудженої шумами та збуреннями.

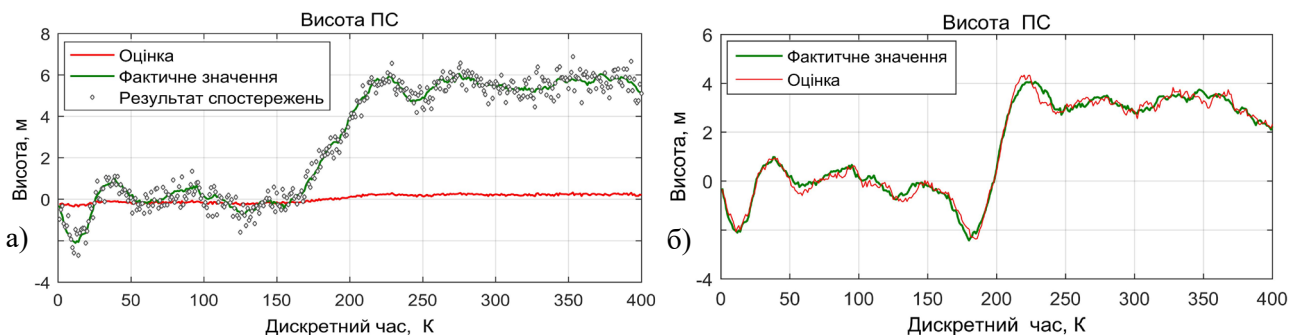


Рис. 2. Результати оцінювання у каналі висоти: а) стандартний розширений ФК; б) розроблений модифікований фільтр

Висновки

1. Результати дослідження показали, що класичний стандартний ФК не є еквівалентом діагностичного фільтра. Наслідком є розбіжність процесу фільтрації, починаючи з моменту дії збурення.

2. Результати моделювання розробленого модифікованого фільтра показують, що оцінка висоти прямує до її фактичного значення, проте це потребується високоякісної моделі системи та додаткової апіорної інформації щодо супутніх збурень і несправностей.

3. Оптимальність модифікованого фільтра підтримується у межах дії уведених обмежень. Суть яких полягає у тому, що корегувальна матриця повинна залишатись невід'ємно означеною та симетричною протягом усього часу роботи фільтра, що гарантує збіжність процесу оцінювання. З практичної точки зору дотримуватись зазначених умов значно простіше ніж тих, що пропонувались у інших роботах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Воловик А.Ю., Кичак В. М.. Теоретичні основи функціональних відновників діагностичного типу. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2018, №3, С. 109-118.

[2] Volovyk A., Kychak V., Havrilov D. Discrete Kalman Filter Invariant to Perturbations. Acta Polytechnica Hungarica, Vol. 18, No. 10, 2021, pp. 21-41, DOI: 10.12700/APH.18.10.2021.10.2.

[3] Воловик А. Оптимальні оцінки вектора стану для дискретних стохастичних систем з невизначеними збуреннями та шумом. Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія. Львів, 2023 Вип. 3, № 2, С. 116–125. DOI: <https://doi.org/10.23939/ictet2023.09.067>.

Воловик Андрій Юрійович – д.т.н, доцент, професор кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: voland@vntu.edu.ua.

Шутило Микола Артемович – провідний інженер кафедри радіотехніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

DYNAMIC OBJECTS DIAGNOSTICS USING SEPARATE EVALUATION METHOD

Abstract

This work focuses on the problem of malfunctions timely detection and recognition using separate evaluation locally optimal method. The aim of this work is to develop a method that allows restoring the Kalman filter normal operation in the presence of disturbances whose structure is uncertain. This goal is achieved by applying a special one-to-one transformation of the system output equation under study, as a result of which the disturbance component is absorbed in the extrapolation equation of the dynamic system state vector.

Keywords: state estimation, linear dynamic systems, Kalman filter, undefined structure disturbances.

Volovyk Andrii U. – Dr. Sc. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Information Radioelectronic Technologies and Systems Department, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: voland@vntu.edu.ua.

Shutilo Mikola. A. – Senior Engineer of Radio engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

ЗАСІБ КОНТРОЛЮ КОНЦЕНТРАЦІЇ ШКІДЛИВИХ ДОМІШОК У ВОДІ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглянуто концепцію створення безпілотного засобу для моніторингу стану. У роботі розглянуто засіб контролю концентрації шкідливих домішок у воді на основі сенсора загальної кількості розчинених твердих речовин (TDS — Total Dissolved Solids). Даний сенсор дає змогу оцінювати якість води шляхом вимірювання її електропровідності, що безпосередньо залежить від кількості розчинених солей, мінералів та металів. У дослідженні розглянуто принцип дії та структурну схему аналогових TDS-модулів типу Gravity Analog TDS Sensor (DFRobot) та Grove – TDS Sensor (Seeed Studio). Обидва сенсори реалізують однаковий фізичний принцип — вимірювання електропровідності води за допомогою змінного сигналу, його підсилення та перетворення у напругу, яку зчитує мікроконтролер Arduino.

До складу TDS-сенсорного модуля входять: TDS-зонд — водонепроникний електрод із двома металевими контактами, який генерує змінний електричний сигнал у водному середовищі; модуль перетворення сигналу, який виконує підсилення, фільтрацію та перетворення електропровідності у аналогову напругу.

Отримане аналогове значення передається на аналоговий вхід мікроконтролера, де за допомогою калібрувальної формули обчислюється значення TDS у мг/л. Це дає змогу створити компактний, енергоефективний та доступний засіб моніторингу якості води, придатний для побутових і промислових систем контролю.

Запропонований підхід дозволяє оперативно виявляти перевищення концентрації шкідливих домішок, що є важливим для забезпечення екологічної безпеки та контролю якості питної води.

Ключові слова: TDS-сенсор, якість води, електропровідність, Arduino, Gravity Analog TDS, Grove TDS, контроль домішок.

Abstract

The paper presents the concept of developing a device for monitoring the concentration of harmful impurities in water based on a Total Dissolved Solids (TDS) sensor. This sensor makes it possible to assess water quality by measuring its electrical conductivity, which directly depends on the amount of dissolved salts, minerals, and metals. The study examines the operating principle and structural diagram of analog TDS modules such as the Gravity Analog TDS Sensor (DFRobot) and Grove – TDS Sensor (Seeed Studio). Both sensors implement the same physical principle — measuring the electrical conductivity of water using an alternating signal, its amplification, and conversion into a voltage that can be read by an Arduino microcontroller.

The TDS sensor module consists of the following main components: TDS probe – a waterproof electrode with two metal contacts that generates an AC signal in the water environment; Signal conversion module – performs signal amplification, filtering, and converts the conductivity into an analog voltage.

The obtained analog value is transmitted to the analog input of the microcontroller, where, using a calibration formula, the TDS value is calculated in mg/L. This enables the creation of a compact, energy-efficient, and affordable water quality monitoring device suitable for both domestic and industrial control systems.

The proposed approach allows for the prompt detection of excessive concentrations of harmful impurities, which is essential for ensuring environmental safety and maintaining drinking water quality.

Keywords: TDS sensor, water quality, electrical conductivity, Arduino, Gravity Analog TDS, Grove TDS, impurity monitoring.

Вступ

Контроль якості води є одним із ключових завдань екологічного моніторингу та систем безпеки життєдіяльності. Надмірна кількість розчинених у воді домішок — солей, важких металів, мінералів — може призвести до негативного впливу на здоров'я людини та на стан навколишнього середовища. Для оперативного виявлення таких забруднень застосовують датчики типу TDS (Total Dissolved

Solids), які дозволяють визначити загальну кількість розчинених твердих речовин шляхом вимірювання електропровідності води.

Використання мікроконтролерів, зокрема Arduino, у поєднанні з TDS-сенсорами забезпечує можливість створення простих, доступних та точних засобів моніторингу.

Результати дослідження

TDS-сенсор вимірює здатність води проводити електричний струм, яка залежить від кількості іонів у розчині. Чим більше розчинених солей і металів, тим вища електропровідність і, відповідно, більший показник TDS [1-3].

Найпоширенішими сенсорними модулями для вимірювання TDS є Gravity Analog TDS Sensor від DFRobot та Grove – TDS Sensor від Seeed Studio. Обидва модулі побудовані за подібним принципом і складаються з таких елементів: TDS-зонд — водонепроникний електрод із двома металевими контактами, який створює змінний електричний сигнал у воді; Схема перетворення сигналу — формує змінну напругу, підсилює сигнал і перетворює його на аналоговий рівень, який може бути зчитаний Arduino.

Виміряне значення аналогової напруги пропорційне електропровідності розчину. За допомогою калібрувальної формули воно перетворюється у значення TDS (мг/л). Таким чином, розроблений пристрій дозволяє оцінити рівень забруднення води у реальному часі.

Система може бути використана для: контролю якості питної води; моніторингу стічних або промислових вод; автоматизованих систем очищення води.

Перевагами такого підходу є простота реалізації, невисока вартість, енергоефективність і можливість інтеграції у системи «розумного дому» або екологічного моніторингу.

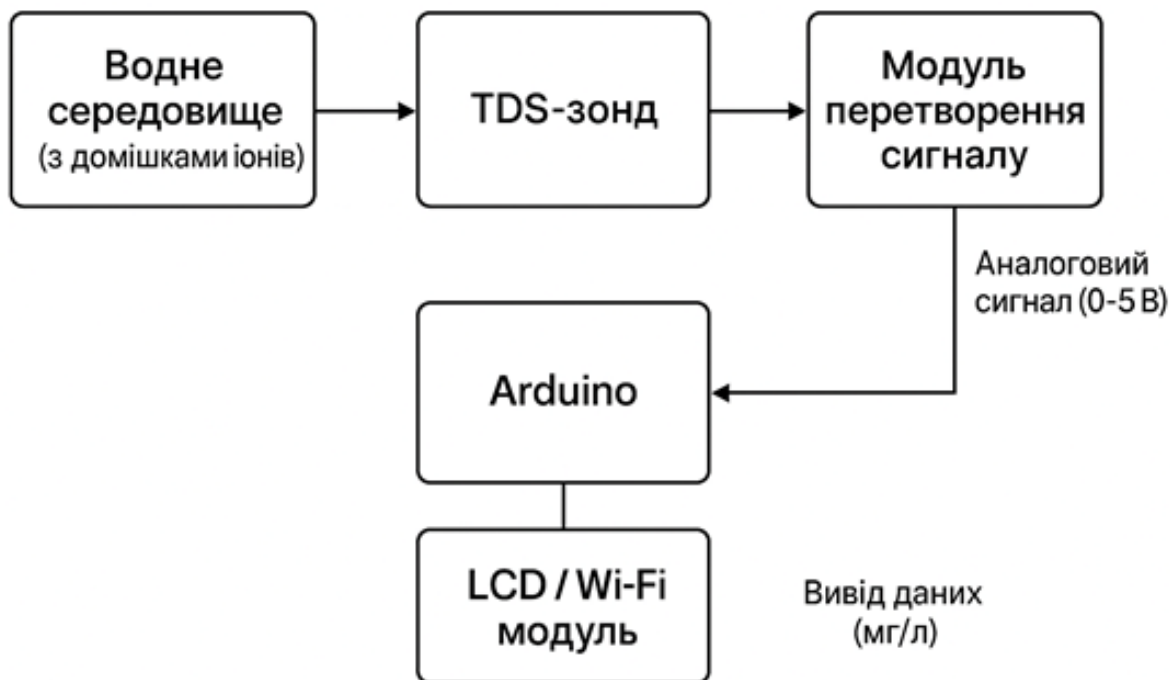


Рис. 1. Структурна схема засобу контролю концентрації шкідливих домішок у воді

Висновки

Запропонований засіб контролю концентрації шкідливих домішок у воді на основі TDS-сенсора та мікроконтролера Arduino забезпечує ефективне, доступне та надійне вимірювання рівня загальної кількості розчинених речовин. Такий пристрій може бути використаний як у побутових умовах, так і для промислових або екологічних досліджень, сприяючи підвищенню якості води та екологічній безпеці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Дяченко О.О., Коваль О.М. Сенсорні системи контролю якості води на основі мікроконтролерів Arduino // *Сучасні проблеми електроніки та інформаційних технологій*. – 2021. – №4. – С. 88–94.
2. Мельник В.В., Шевченко І.М. Методи визначення загальної кількості розчинених речовин у воді // *Екологічна безпека та природокористування*. – 2020. – №2(34). – С. 15–21.
3. Гаврилюк І.М., Поліщук С.О. Використання сенсорних технологій для моніторингу екологічного стану водних ресурсів // *Екологічні науки*. – 2022. – №5(44). – С. 65–72.

Озменчук Ілля Сергійович — аспірант, факультет ІЕС, Вінницький національний технічний університет.

Дудатєв Ігор Андрійович — канд. техн. наук, доцент кафедри ІРТС, Вінницький національний технічний університет, email : dudatiev.igor@gmail.com

Ozmenchuk Illia S. — PhD student, Faculty of ICS, Vinnytsia National Technical University.

Dudatiev Ihor A. — PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of IRTS, Vinnytsia National Technical University, email: dudatiev.igor@gmail.com.

БЕЗПІЛОТНИЙ ЗАСІБ КОНТРОЛЮ КОНЦЕНТРАЦІЇ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН У АТМОСФЕРІ ВЕЛИКИХ МІСТ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглянуто концепцію створення безпілотного засобу для моніторингу стану атмосферного повітря у межах великих міст. Запропоновано використання багатофункціональної платформи на базі квадрокоптера, оснащеного сенсорним модулем для визначення концентрацій шкідливих газів (CO , CO_2 , NO_2 , SO_2 , NH_3) та твердих частинок ($\text{PM}_{2.5}$, PM_{10}). Для обробки даних застосовується мікроконтролер із модулем бездротової передачі (LoRa або Wi-Fi), що забезпечує оперативне надсилання результатів до хмарного сервера для подальшого аналізу.

Запропонований підхід дозволяє проводити просторово-часовий моніторинг якості повітря на різних висотах та у важкодоступних районах. Розроблено методику побудови карти розподілу концентрацій забруднюючих речовин на основі інтерполяції даних із GPS-прив'язкою. Також передбачено використання алгоритмів обробки великих даних (Big Data) для виявлення закономірностей забруднення та прогнозування екологічних ризиків.

Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення систем екологічного моніторингу, підтримки управлінських рішень у сфері охорони довкілля та підвищення екологічної безпеки урбанізованих територій.

Ключові слова: *автоматизована система, двоокис вуглецю, повітря, контроль.*

Abstract

In this work, the concept of developing an unmanned system for monitoring the state of atmospheric air within large cities is considered. A multifunctional platform based on a quadcopter equipped with a sensor module for determining the concentrations of harmful gases (CO , CO_2 , NO_2 , SO_2 , NH_3) and particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$, PM_{10}) is proposed. For data processing, a microcontroller with a wireless communication module (LoRa or Wi-Fi) is used, providing real-time transmission of results to a cloud server for further analysis.

The proposed approach enables spatiotemporal monitoring of air quality at various altitudes and in hard-to-reach urban areas. A methodology for constructing a map of pollutant concentration distribution based on the interpolation of GPS-referenced data has been developed. The use of Big Data processing algorithms is also envisaged for identifying pollution patterns and predicting environmental risks.

The results of this research can be applied to improve environmental monitoring systems, support decision-making in the field of environmental protection, and enhance the ecological safety of urbanized areas.

Keywords: *sensor, automated system, carbon dioxide, air, monitoring.*

Вступ

Інтенсивна урбанізація, розвиток транспортної інфраструктури та промисловості призводять до зростання рівня забруднення атмосферного повітря у великих містах. Традиційні стаціонарні пости моніторингу не забезпечують достатньої просторової деталізації даних, що ускладнює оцінку стану довкілля в реальному часі.

Одним із перспективних напрямів розв'язання цієї проблеми є використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) як мобільних платформ для вимірювання концентрацій шкідливих речовин у повітрі. Завдяки маневреності та можливості роботи на різних висотах, такі системи дають змогу оперативно отримувати екологічну інформацію з високою просторовою роздільною здатністю.

Результати дослідження

Запропоновано конструкцію безпілотного засобу контролю, який базується на квадрокоптері середнього класу з автономним живленням та системою стабілізації [1]. На борту розміщується сенсорний модуль, що включає датчики для визначення концентрацій чадного газу (CO), вуглекислого газу (CO₂), діоксиду азоту (NO₂), сірчистого ангідриду (SO₂), аміаку (NH₃), а також датчик пилу для частинок PM2.5 і PM10.

Зібрані дані обробляються мікроконтролером типу ESP32 [2] або STM32, який забезпечує попередню фільтрацію результатів, температурну компенсацію та передачу даних через бездротові інтерфейси Wi-Fi або LoRa.

Положення БПЛА фіксується за допомогою GPS-модуля, що дозволяє виконувати геоприв'язку вимірювань та будувати карти розподілу забруднюючих речовин. Структурно-апаратне виконання оптичного безпілотного засобу зображено на рис. 1.

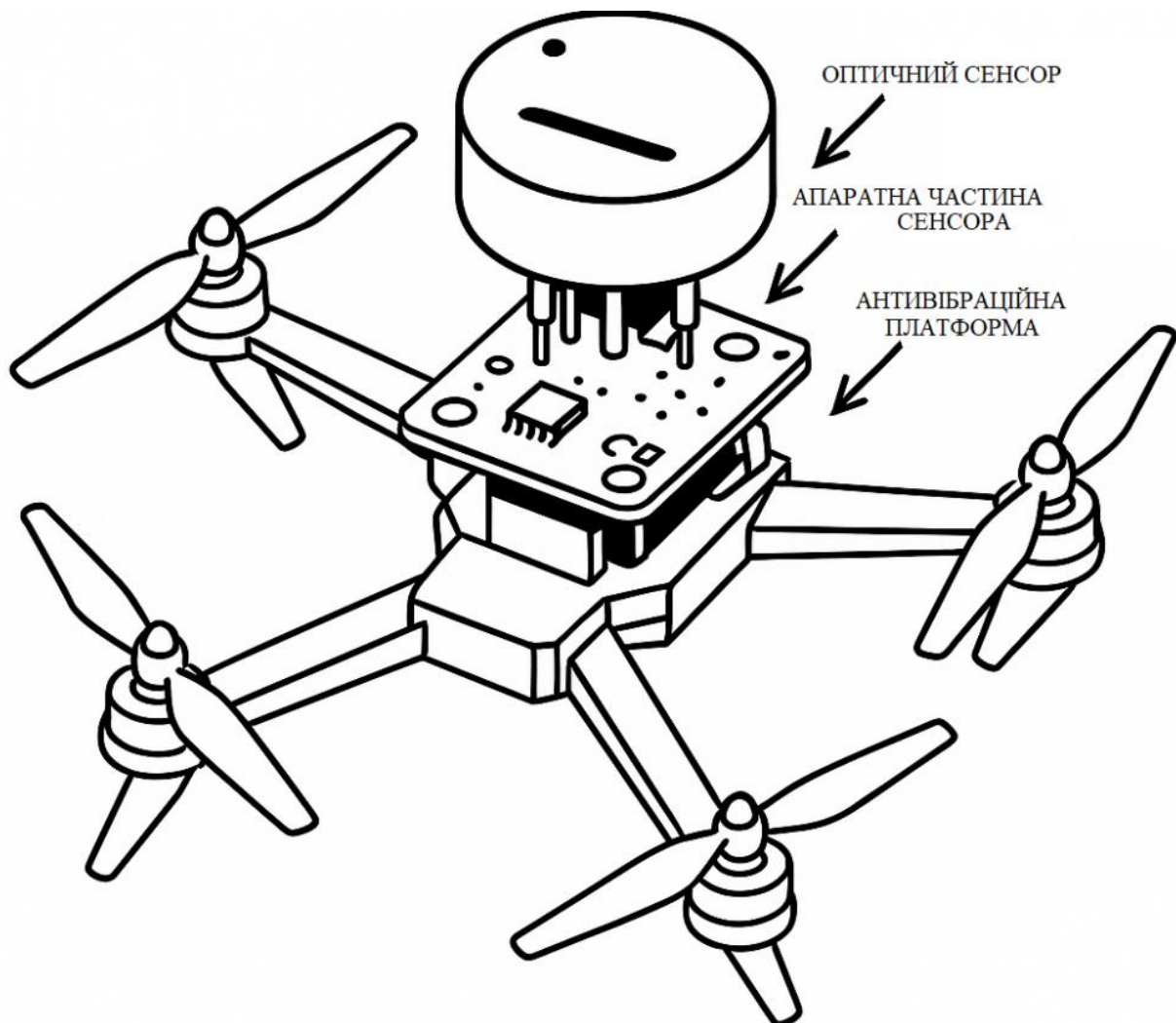


Рис. 1. Структурно-апаратне виконання оптичного безпілотного засобу

Для візуалізації даних застосовується алгоритм інтерполяції (метод зворотних відстаней IDW або крігінг), а для подальшої аналітики — методи обробки великих даних (Big Data) і машинного навчання для виявлення закономірностей забруднення.

Висновки

Розроблений безпілотний засіб дозволяє проводити оперативний і точний контроль стану атмосферного повітря у міських умовах. Використання модульної архітектури дає змогу адаптувати систему під різні типи сенсорів, а інтеграція з хмарними сервісами — забезпечити масштабованість та аналітичну обробку великих масивів даних. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення систем екологічного моніторингу, прогнозування забруднення та прийняття рішень щодо покращення якості повітря у великих містах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Савчук Р.М. Застосування безпілотних літальних апаратів у системах моніторингу довкілля / Р.М. Савчук, М.О. Поліщук // Екологічна безпека та природокористування. – 2021. – №3(35). – С. 112–118. Бужинський В.В. Автоматизація теплоенергетичних та теплотехнологічних процесів і установок / В.В. Бужинський, М.М. Чепурний. – Вінниця: ВНТУ, 2005. – 48 с.
2. Шевченко В.П. Інтелектуальні сенсорні системи моніторингу якості повітря на основі мікроконтролерів ESP32 / В.П. Шевченко, І.Ю. Кравчук // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Автоматизація та приладобудування. – 2022. – №4. – С. 64–70.

Мальцев Сергій Васильович — аспірант, факультет ІЕС, Вінницький національний технічний університет.

Дудатєв Ігор Андрійович — канд. техн. наук, доцент кафедри ІРТС, Вінницький національний технічний університет, email : dudatiev.igor@gmail.com

Maltsev Serhii V. — PhD student, Faculty of ICS, Vinnytsia National Technical University.

Dudatiev Ihor A. — PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of IRTS, Vinnytsia National Technical University, email: dudatiev.igor@gmail.com.

ЗОРОВІ ТРАНСФОРМЕРИ В ЕНДОСКОПІЇ

Вінницький національний технічний університет

Анотація: В даній роботі проведено огляд архітектури зорового трансформера (ЗТ), що є новітньою альтернативою традиційним згортковим нейронним мережам (ЗНМ) у галузі комп'ютерного зору. Проаналізовано фундаментальні відмінності між ЗТ та ЗНМ, зокрема відсутність у трансформерів вбудованих індуктивних упереджень, таких як локальність та трансляційна еквівалентність, що компенсується масштабним попереднім навчанням на великих наборах даних. Досліджено ефективність застосування ЗТ для аналізу медичних зображень, де вони демонструють переваги у задачах з обмеженою кількістю даних та складними, неочевидними патернами. Окремо висвітлено тенденцію до спрощення архітектур та переходу до моделей типу "encoder-only" (ЕоМТ), які, відмовляючись від складних спеціалізованих компонентів (адаптерів, декодерів), досягають високої точності та значно вищої швидкості обробки, що є критично важливим для клінічного застосування в ендоскопії.

Ключові слова: *ШІ, машинне навчання, нейронні мережі, зорові трансформери, згорткові нейронні мережі, ендоскопія, ResNet, капсульна ендоскопія, залишкова нейронна мережа*

Вступ

Згорткові нейронні мережі протягом тривалого часу були домінуючою архітектурою в комп'ютерному зорі, особливо в аналізі медичних зображень [1]. Такі моделі, як ResNet та EfficientNet, довели свою високу ефективність у задачах класифікації та сегментації завдяки вбудованим індуктивним упередженням - локальності обробки та трансляційній еквівалентності, які природно відповідають структурі зображень [2]. Проте успіхи архітектури трансформера в обробці природної мови (NLP) стимулювали її адаптацію для застосування у обробці і аналізі зображень. Результатом цього став зоровий трансформер - модель, що кидає виклик парадигмі згортковим нейронним мережам. ЗТ обробляє зображення, розбиваючи його на послідовність невеликих ділянок (патчів) і аналізуючи їх як послідовність токенів за допомогою механізму самоуваги. Цей підхід дозволяє моделювати глобальні залежності між будь-якими частинами зображення вже на ранніх шарах мережі, що є принциповою відмінністю від локальних операцій згортки в ЗНМ.

Результати дослідження

Критично важливим для ефективного застосування моделей глибокого навчання в медичній діагностиці є глибоке розуміння їхніх фундаментальних архітектурних відмінностей. Вибір між ЗНМ та ЗТ може суттєво вплинути на точність, надійність та обчислювальну ефективність діагностичних систем, що в свою чергу обумовлене підробом мережі під поставлені задачі перед розробниками.

ЗНМ функціонують на основі згорткових шарів, які застосовують фільтри до локальних ділянок зображення. У саму архітектуру ЗНМ вбудовані так звані індуктивні упередження (inductive biases), такі як локальність (припущення, що сусідні пікселі пов'язані між собою) та інваріантність до зсуву (здатність розпізнавати об'єкт незалежно від його положення). Це дозволяє ЗНМ ієрархічно виділяти ознаки — від простих (краї, текстури) на початкових шарах до складних (форми, об'єкти) на глибших [1]. На противагу цьому, ЗТ запозичують підхід з обробки природної мови. Вони розбивають зображення на сітку невеликих ділянок-патчів і обробляють їх як послідовність, аналогічну до слів у реченні [1]. Завдяки механізму самоуваги, що лежить в основі стандартного кодувальника трансформера [3], ЗТ здатні моделювати глобальні взаємозв'язки між усіма патчами одночасно, починаючи з найпершого шару мережі.

Це дозволяє їм "бачити" зображення цілісно, а не по частинах, що є фундаментальною відмінністю від локального підходу CNN[1]. Архітектура зорового трансформера представлена на рисунку 1.

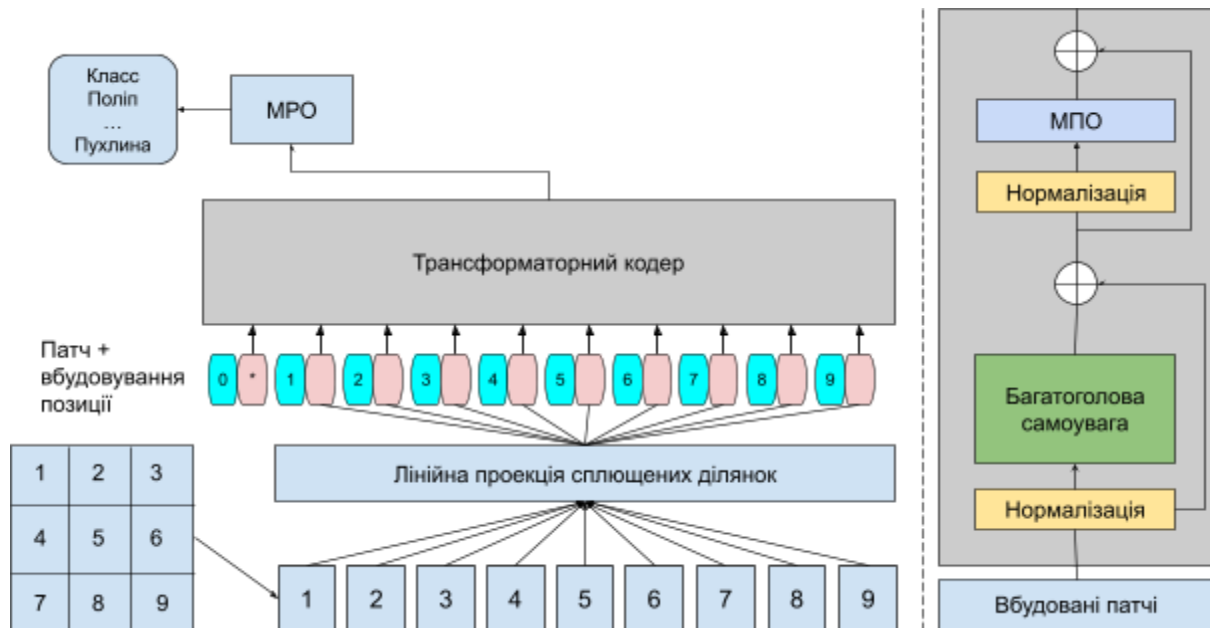


Рисунок 1. Архітектура зорового трансформера

Порівняльний аналіз показує, що вибір оптимальної архітектури значною мірою залежить від специфіки завдання, розміру набору даних та характеристик зображень [4].

Діагностика пневмонії (рентгенівські знімки): Архітектури ЗНМ, зокрема ResNet-50, продемонстрували найвищу точність (98.37%). Це підтверджує їхню стабільну ефективність для великомасштабного аналізу рентгенограм, де вбудовані індуктивні упередження допомагають ефективно виявляти патологічні зміни [4].

Класифікація пухлин мозку (МРТ): Хоча Vision Transformers зазвичай потребують великомасштабного попереднього навчання для досягнення високої продуктивності на невеликих наборах даних [1], модель ViT DeiT-Small продемонструвала виняткові результати (92.16%) на найменшому датасеті в цьому аналізі. Це свідчить про те, що глобальний механізм уваги ViT [1] особливо ефективний для виявлення ледь помітних, просторово розподілених патологічних ознак, характерних для МРТ-зображень пухлин мозку. В цьому сценарії перевага глобального контексту виявляється важливішою за слабші індуктивні упередження [4].

Аналіз на наявність меланоми (дерматоскопія): Найкращий результат (81.84%) показали ефективні CNN, такі як EfficientNet-B0. Це може вказувати на перевагу CNN у задачах, що вимагають аналізу дрібнозернистих текстур та локальних патернів, характерних для дерматоскопічних зображень [4].

Висновки

Дана робота підкреслює, що, зорові трансформери є потужною технологією для аналізу ендоскопічних зображень. Його здатність моделювати глобальні залежності та ефективність на малих наборах даних після масштабного попереднього навчання відкривають нові можливості для виявлення складних патологій, що також впливає і на покращення і дослідження цього підходу у використанні в ендоскопії. Тенденція до спрощених "encoder-only" архітектур обіцяє створення високоточних та швидких діагностичних інструментів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Dosovitskiy, A., Beyer, L., Kolesnikov, A., Weissenborn, D., Zhai, X., Unterthiner, T., Dehghani, M., Minderer, M., Heigold, G., Gelly, S., Uszkoreit, J., & Houlsby, N. (2020). An Image is Worth 16x16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale (Версія 2). arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2010.11929>
2. Пруданєн, Ю., & Кожем'яко, А. (2025). Класифікація зображень із застосуванням оптико-цифрових методів покращення якості зображень та глибокого навчання при проведенні ендоскопічних досліджень. Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології, 49(1), 135–146. <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2025-49-1-135-146>
3. Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., Kaiser, L., & Polosukhin, I. (2017). Attention Is All You Need (Версія 7). arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1706.03762>
4. Kawadkar, K. (2025). Comparative Analysis of Vision Transformers and Convolutional Neural Networks for Medical Image Classification (Версія 1). arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2507.21156>

Пруданєн Юрій Євгенович — аспірант кафедри БМІОЕС, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: mcpcchip@gmail.com;

Кожем'яко Андрій Вікторович — кандидат техн. наук, доцент кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

VISUAL TRANSFORMERS IN ENDOSCOPY

Vinnitsia National Technical University

Abstract: This paper reviews the architecture of visual transformers (VT), which are a novel alternative to traditional convolutional neural networks (CNN) in the field of computer vision. The fundamental differences between VT and CNN are analyzed, in particular, the absence of built-in inductive biases in transformers, such as locality and translation invariance, which are compensated for by large-scale pre-training on large datasets. The effectiveness of using transformers for medical image analysis is investigated, where they demonstrate advantages in tasks with limited data and complex, non-obvious patterns. The trend towards simplifying architectures and transitioning to encoder-only models (EoMT) is highlighted separately. By abandoning complex specialized components (adapters, decoders), these models achieve high accuracy and significantly higher processing speeds, which is critical for clinical applications in endoscopy.

Keywords: AI, machine learning, neural networks, visual transformers, convolutional neural networks, endoscopy, ResNet, capsule endoscopy, residual neural network

Yurii Yevhenovych Poudanien – Post-Graduate student of the Biomedical Engineering, e-mail: mcpcchip@gmail.com.

Kozhemiako Andrii Viktorovich — Candidate of Engineering Sciences, docent of Biomedical Engineering and Optical-Electronic Systems, Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia.

ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ МАКЕТУ ТРИХВИЛЬОВОГО ПОЛЯРИМЕТРА ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ БІОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У статті представлено аналіз компонентної бази та архітектурних особливостей реалізації вимірювального каналу лабораторного макету системи автоматизованої трихвильової поляриметрії для Мюллер-матричних та Джонс-матричної діагностики біологічних шарів. Детально розглянуто ключові вузли системи. Описано взаємодію компонентів та їх роль у реалізації методів вимірювання орієнтаційних та фазових мап біологічних тканин.

Ключові слова: анізотропія біологічного шару, трихвильова поляриметрія, вимірювальний канал, лазерний модуль, CMOS-камера.

Вступ

Розробка систем лазерної поляриметрії для медичної діагностики є перспективним напрямком, що дозволяє проводити оцінювання змін мікроструктурної анізотропії біологічних тканин (БТ). Підвищення достовірності такої діагностики вимагає розширення інформаційної повноти вимірювань, що досягається, зокрема, шляхом проведення досліджень на кількох довжинах хвиль.

Лабораторний макет, що аналізується, являє собою систему трихвильової лазерної поляриметрії, призначену для оцінювання анізотропної структури оптично тонких шарів гістологічних зрізів. Архітектура системи включає автоматизований оптико-електронний вимірювальний канал та комп'ютерну підсистему для аналізу і прийняття рішень.

Метою роботи є модернізація вимірювального каналу лабораторного макету трихвильового поляриметра для розширення його функціональних можливостей.

Компоненти вимірювального каналу

Вимірювальний канал лабораторної установки побудований за модульним принципом і включає блок джерел випромінювання, блок поляризаційного опромінення, об'єктний та проєкційний блоки, блок поляризаційної фільтрації та блок реєстрації зображень [1, 2]. Архітектура установки представлена на рисунку 1.

Ключовою особливістю системи є наявність трьох джерел когерентного випромінювання. Це дозволяє проводити вимірювання на трьох довжинах хвиль оптичного діапазону. У лабораторному макеті використано напівпровідникові лазерні модулі TVS з довжинами хвилі 405 нм, 450 нм та 660 нм, потужність лазерів становить 50 мВт. Випромінювання, що генерується кожним з трьох лазерів, послідовно спрямовується через коліматор на вхід блоку поляризаційного опромінення.

Блоки поляризаційного опромінення та фільтрації формують необхідний стан поляризації вхідного пучка та аналізують стан поляризації випромінювання, що пройшло крізь зразок. Вони реалізовані з використанням керованих поляризаційних та фазозсувних елементів, що працюють у всьому робочому діапазоні (405–660 нм). В якості поляризатора в блоці опромінення та аналізатора в блоці фільтрації використано поляризаційні фільтри, які забезпечують лінійність поляризації у робочому спектральному діапазоні. Також використано ахроматичні чвертьхвильові пластинки нульового порядку для формування циркулярної поляризації.

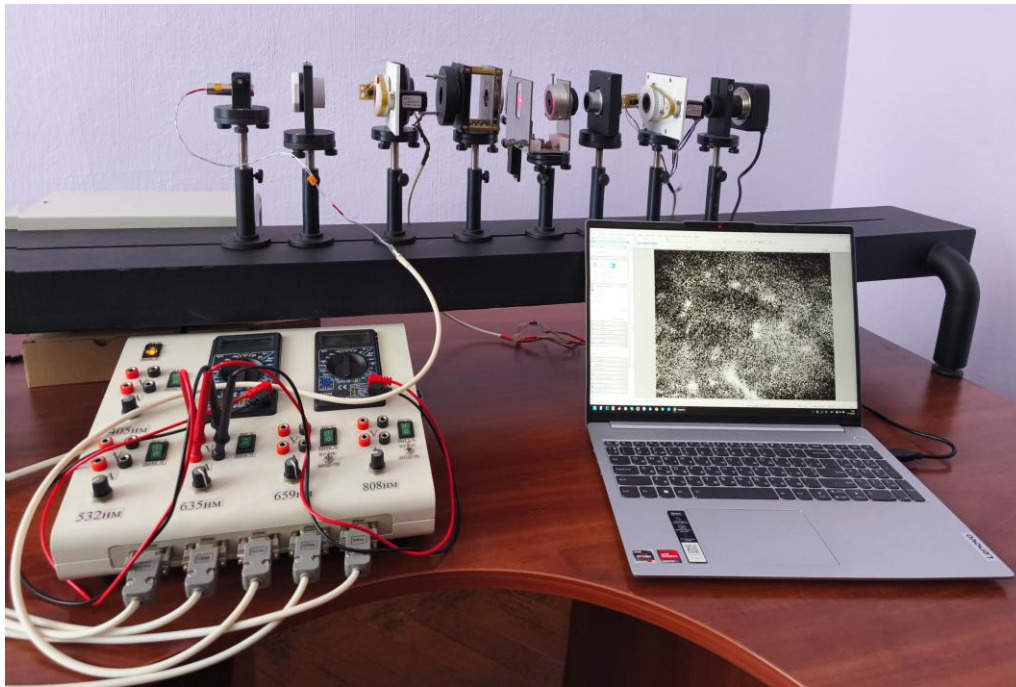


Рис. 1 – Лабораторна установка системи трихвильової лазерної поляриметрії БТ

Залежно від методу вимірювання, ці елементи комбінуються для створення необхідних конфігурацій. В режимі прямого вимірювання орієнтаційних мап, фазові пластинки усуваються зі шляху розповсюдження пучка, використовуються лише поляризатор та аналізатор, що синхронно обертаються у взаємно схрещеному положенні ($\alpha = \Theta + 90^\circ$). У режимі вимірювання фазових мап використовуються всі чотири елементи. В цьому режимі блок опромінення формує правоциркулярно поляризований пучок, а блок фільтрації виступає як лівоциркулярний поляризаційний фільтр [3].

В об'єктному блоці розміщується оптично тонкий гістологічний зріз на предметному склі. Проекційний блок реалізовано за допомогою мікрооб'єктива Nikon, який забезпечує 4-кратне збільшення та має числову апертуру 0.1 і робочу відстань 30 мм. Він проектує зображення зразка на блок фільтрації та світлочутливу матрицю камери. Оптика системи є ахроматичною, що дозволяє їй однаково ефективно працювати на усіх довжинах хвиль.

Іншою особливістю вимірювального каналу є блок реєстрації зображень, який дозволяє фіксувати поляризаційно відфільтровані зображення. Для цього використовується цифрова камера, виготовлена за технологією CMOS – UCMOS05100KPA. Камера має наступні характеристики: роздільна здатність – 2592x1944 (5,1 Мрх), розмір пікселя - 2,2x2,2 мкм, розмір матриці – 5,7x4,28 мм, динамічний діапазон – 73 дБ, чутливість - 18,8 кеВ/лк. Дана камера з програмним забезпеченням дозволяє отримувати якісні зображення у форматі даних без втрат DNG, у форматі растрової графіки BMP та інших форматах.

Керування всією системою є автоматизованим, блок керування керує драйверами, які, в свою чергу, приводять у рух чотири крокові двигуни та два серводвигуни. Крокові двигуни забезпечують точне обертання поляризаторів та фазових пластинок, тоді як серводвигуни відповідають за фізичне введення та виведення фазових пластинок з оптичного шляху при зміні режимів вимірювання. Конструкції, призначені для надійної фіксації модулів вимірювального каналу, було модернізовано з метою підвищення їхньої функціональної, ефективності та забезпечення стабільності кріплення модулів.

Програмна обробка реалізується у комп'ютерній підсистемі, яка отримує зображення та виконує послідовність алгоритмів обробки по відтворенню параметрів анізотропії досліджуваного біологічного шару (модуль обробки) і аналізу (модуль аналізу). На цьому етапі здійснюється аналітичне визначення орієнтаційних ($\rho^{\lambda 1}(X,Y)$, $\rho^{\lambda 2}(X,Y)$, $\rho^{\lambda 3}(X,Y)$) та фазових ($\delta^{\lambda 1}(X,Y)$, $\delta^{\lambda 2}(X,Y)$, $\delta^{\lambda 3}(X,Y)$) мап, що відображають просторово-структурні особливості поляриметричних зображень. На основі отриманих мап обчислюються інформативні ознаки, зокрема статистичні

моменти та моменти автокореляційних функцій, які формують узагальнений опис поляриметричних характеристик БТ. Зазначені ознаки подаються на вхід підсистеми підтримки прийняття рішень, що функціонує на основі моделей нечіткої логіки, забезпечуючи інтелектуальний аналіз даних і формування діагностичних або класифікаційних висновків.

Висновки

Реалізація вимірювального каналу на основі трьох напівпровідникових лазерів (405 нм, 450 нм та 660 нм), ахроматичної поляризаційної оптики та CMOS-камери високої роздільної здатності дозволяє реалізувати гнучку автоматизовану систему. Така архітектура забезпечує можливість прямого вимірювання як орієнтаційних, так і фазових параметрів анізотропії на трьох довжинах хвиль, що є ключовим фактором для підвищення достовірності діагностування патологічних станів біологічних тканин.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Заболотна Н.І. Похибки вимірювань референтних матриць Мюллера в системі мюллер-матричного картографування біологічних шарів *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2015. №1 (29) С. 109 - 117.
2. Zabolotna, N.I., Sholota, V.V., Okarskyi H.H. Methods and systems of polarization reproduction and analysis of the biological layers structure in the diagnosis of pathologies. 2020. *Proceedings of SPIE*. 11369, 113691S, P. 501-513.
3. Заболотна, Н. І., Окарьський, Г. Г. Система автоматизованої двохвильової мюллер-поляриметрії для оцінювання анізотропної структури гістологічних зрізів. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, 39 (1), 27-37.

Швидюк Олег Сергійович – аспірант, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: olehshvydiuk@gmail.com

Шолота Владислава Владиславівна — асистент кафедри комп'ютерних наук, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: lada.sholota@vntu.edu.ua

FEATURES OF THE IMPLEMENTATION OF THE MEASURING CHANNEL OF THE THREE-WAVE POLARIMETER MODEL FOR DIAGNOSTICS OF BIOLOGICAL OBJECTS

Abstract

The article presents an analysis of the component base and architectural features of the implementation of the measuring channel of the laboratory model of the automated three-wave polarimetry system for Muller matrix and Jones matrix diagnostics of biological layers. The key nodes of the system are considered in detail. The interaction of the components and their role in the implementation of methods for measuring orientation and phase maps of biological tissues is described.

Keywords: anisotropy of the biological layer, three-wave polarimetry, measurement channel, laser module, CMOS camera.

Oleh Shvydiuk S. – postgraduate, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: olegshvydiuk@gmail.com

Sholota Vladyslava V. — assistant of the Department of Computer Science, Faculty of Intelligent Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: lada.sholota@vntu.edu.ua

АЛГОРИТМИ ПЕРСОНАЛІЗОВАНОГО ПІДБОРУ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ІМПЛАНТА

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Традиційне 2D-планування тотального ендопротезування колінного суглоба страждає від низької надійності та високої між-спостерегацької варіабельності. Навіть існуючі 3D-плани виробників потребують корекції у 91.1% випадків, оскільки вони базуються на «фіксованих алгоритмах» та ігнорують хірург-специфічні філософії вирівнювання (механічне, кінематичне, функціональне). Дана дослідження представляє ядро автоматизованої системи, що вирішує цю проблему. Система включає 2D-3D конвеєр машинного навчання, здатний прогнозувати розмір імпланту зі стандартних рентгенівських знімків з точністю ~99% (в межах ± 1 розміру). Ядром системи є багато-критеріальний алгоритм оптимізації, який персоналізує 3D-позиціонування імпланту шляхом мінімізації середньоквадратичного відхилення від «до-хворобного» стану, одночасно враховуючи кінематику та напруження у зв'язках.

Ключові слова: тотальне ендопротезування колінного суглоба, передопераційне планування, машинне навчання, 2D-3D реконструкція, оптимізація імпланту, кінематичне вирівнювання, механічне вирівнювання, штучний інтелект.

Annotation

Traditional 2D templating for total knee arthroplasty suffers from low reliability and high inter-observer variability. Even existing 3D manufacturer's preoperative plans require correction in 91.1% of cases because they are based on "fixed algorithms" and ignore surgeon-specific alignment philosophies (mechanical, kinematic, functional). This work presents the core of an automated system that addresses this problem. The system includes a 2D-to-3D machine learning pipeline capable of predicting implant size from standard X-rays with ~99% accuracy (within ± 1 size). The system's core is a multi-criteria optimization algorithm that personalizes the 3D implant positioning by minimizing the root-mean-square deviation from the "pre-diseased" state, concurrently targeting both kinematics and ligament strains.

Keywords: total knee arthroplasty, preoperative planning, machine learning, 2D-to-3D reconstruction, implant optimization, kinematic alignment, mechanical alignment, artificial intelligence.

Вступ

Тотальне ендопротезування колінного суглоба залишається однією з найуспішніших хірургічних процедур, що значно покращує якість життя пацієнтів з термінальною стадією остеоартриту [1]. Однак, незважаючи на технологічний прогрес, рівень незадоволеності пацієнтів після ендопротезування колінного суглоба сягає 20% [2]. Критичною причиною цього є неточності у передопераційному плануванні та позиціонуванні компонентів [3].

Традиційний підхід, що базується на 2D-рентгенографічному шаблонуванні, демонструє низьку надійність та точність [4]. Цей метод страждає від високої між-спостерегацької варіабельності, особливо при вимірюванні ключових кутових параметрів, де надійність може бути низькою ($ICC < 0,50$) [5]. Навіть при використанні 3D-зображень (МРТ/КТ) ручна ідентифікація анатомічних орієнтирів для визначення ротаційного вирівнювання демонструє «високу» варіабельність, що сягає діапазону $3,47^\circ$ для заднього виросткового кута та $12,36^\circ$ для орієнтирів великогомілкової кістки [6].

Ця неточність призводить до мальпозиції компонентів, що є однією з головних причин нестабільності, болю та механічної відмови, що потребує ревізійної хірургії [7-8]. Для вирішення цієї проблеми виробники імплантів запропонували 3D-плани [9-10]. Однак ці плани генеруються за «фіксованими алгоритмами» і не враховують індивідуальні хірургічні преференції. Як наслідок, дослідження показують, що 91,1% таких планів потребують суттєвих корекцій з боку хірурга.

Таким чином, виникає гостра потреба у створенні автоматизованої системи, яка вирішує два завдання:

1. Усуває варіабельність та неточність ручного планування.
2. Переходить від «фіксованих алгоритмів» до адаптивних моделей, що враховують не лише пацієнт-специфічну анатомію, але й хірург-специфічну філософію планування (напр., механічне, кінематичне чи функціональне вирівнювання).

2D-3D конвеєр машинного навчання для прогнозування розміру імпланта

Для вирішення проблеми доступності, коли дорогі КТ/МРТ недоступні, система включає під-модуль, що використовує ML для генерації 3D-прогнозів кісток на основі стандартних бі-планарних 2D-рентгенівських знімків. Цей підхід є критично важливим для широкого впровадження автоматизації у клінічну практику.

Методологія цього 2D-3D конвеєра є багатоетапною та базується на глибокому навчанні:

- Сегментація CNN: Чотири модифіковані згорткові нейронні мережі архітектури U-Net (по одній для кожної проекції AP/Lateral та кожної кістки) ізолюють дистальний відділ стегна та проксимальний відділ великогомілкової кістки на 2D-знімках.
- Вилучення контурів: Детектор країв (наприклад, Canny) застосовується для вилучення 2D-контурів кісток з масок сегментації.
- Оцінка глибини: Спеціалізовані Моделі глибини точок (Point Depth Models, PDM) оцінюють Z-координату (глибину) для точок 2D-контурів, перетворюючи їх на розріджену 3D-хмару точок.
- 3D-реконструкція: Створена розріджена 3D-хмара точок «припасовується» (з використанням ітеративного методу найближчої точки) до статистичної моделі форми (Statistical Shape Model, SSM). SSM "морфує" базову модель, щоб вона відповідала референсним точкам пацієнта, генеруючи повний 3D-прогноз кістки.

На згенерованій 3D-моделі проводиться автоматизоване віртуальне припасування імплантів з цифрової бібліотеки. Система оцінює кожен варіант розміру за двома ключовими метриками, що визначають якість припасування:

- RMSE (Root-Mean-Squared Error): Оцінює глобальну відповідність. Це середньоквадратична похибка, що розраховується як евклідова відстань між поверхнею компонента імпланта та 3D-моделлю кістки пацієнта.

$$RMS\ error = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - x_i^A)^2}{N}}$$

- Max Over/Underhang (OIH): Оцінює локальну відповідність. Ця метрика обчислює максимальне випинання (overhang) або не-покриття (underhang) країв імпланта відносно країв кістки, використовуючи відстань

$$(h(C, B) = \max_{c \in C} \{ \min_{b \in B} \{ d(c, b) \} \})$$

Валідація цього методу на 78 пацієнтах [10] показує, що для стегнового компонента точність прогнозування точного розміру становить 78% (за метрикою RMSE) та 72% (за метрикою OIH). Для великогомілкової кістки ці показники становлять 80,5% та 73% відповідно. Найголовніше, що точність прогнозування в межах 1 розміру (що є клінічно прийнятним діапазоном) сягає 99% для обох компонентів. Це значно перевершує точність та надійність традиційного 2D-шаблонування, яке страждає від високої варіабельності між спостерігачами та часто не може досягти хорошої точності точного розміру.

Алгоритми оптимізації для позиціонування компонентів

Після вибору 3D-моделі (з КТ/МРТ або 2D-3D) та оптимального розміру імпланта, наступним і найбільш критичним кроком є його позиціонування (6 ступенів свободи). Саме на цьому етапі система повинна врахувати хірургічну специфіку. Незважаючи на прогрес у навігації та роботизованих системах, визначення ідеального позиціонування, адаптованого до індивідуальних вимог пацієнта, залишається складним завданням.

Система використовує алгоритм оптимізації для пошуку оптимального положення компонентів (у межах 6 ступенів свободи), що мінімізує багато-критеріальну цільову функцію. Цільова функція визначається як мінімізація середньоквадратичного відхилення (Root-Mean-Square Deviation, RMSD) між моделюванням постопераційного стану та бажаним "до-хворобним" (pre-diseased) станом пацієнта. Оптимізація проводиться у визначеному діапазоні 5 мм та 5 градусів) від початкового механічного вирівнювання (MA), щоб забезпечити клінічну застосовність.

Ключові цілі для оптимізації :

- Ціль 1 (Кінематика): Мінімізація RMSD між «до-хворобою» та постопераційною кінематикою суглоба (рухами).
- Ціль 2 (Навантаження на зв'язки): Мінімізація RMSD між «до-хворобними» та постопераційними напруженнями у зв'язках (ligament strains).
- Ціль 3 (Змішана): Одночасна оптимізація обох цілей, потенційно з різними ваговими коефіцієнтами для колатеральних зв'язок.

Дослідження показують, що такий підхід здатний одночасно оптимізувати обидва параметри. Наприклад, при одночасній оптимізації вдалося зменшити середнє відхилення кінематики (з 2,4 мм до 1,1 мм) та відхилення напружень у зв'язках (з 6,5% до < 3,2%) порівняно зі стандартним механічним вирівнюванням. Процес оптимізації є обчислювально інтенсивним (може вимагати до 32 годин) і включає автоматизоване зіставлення пацієнт-специфічної 3D-моделі кістки з 3D-моделями імплантів з цифрової бібліотеки.

Це «інтелектуальне ядро» системи вирішує проблему в 91,1% фіксованих планів виробників (MPP), які генеруються за «фіксованими алгоритмами». Такі MPP потребують значних корекцій з боку хірурга (перетворюючись на Surgeon Corrected Preoperative Plan, SCP) [10]. Пропонована система, навпаки, є адаптивною. Шляхом налаштування ваг цільової функції (тобто, пріоритету кінематики чи напружень зв'язок), хірург обирає свою філософію. Хірург, що дотримується «механічного вирівнювання» (MA), надасть пріоритет кінематичним цілям. Хірург, що дотримується «кінематичного» (KA) або «функціонального» (FA) вирівнювання, надасть високу вагу мінімізації напружень у зв'язках. Доведено, що моделі ШІ, навчені на попередніх корекціях хірургів, значно точніше передбачають фінальний план: точність AI-плану сягає 82 – 85% проти 68 – 73% у MPP. Це зменшує обсяг ручних корекцій на 39,7%. Таким чином, план є динамічно персоналізованим не лише для пацієнта, але й для хірурга.

Висновок

Запропонована архітектура автоматизованої системи планування ендопротезування колінного суглоба демонструє фундаментальний зсув від геометричного шаблонування до предиктивного біомеханічного моделювання. Наукова новизна полягає в інтеграції високоточної DL-сегментації (з точністю 0,99) та надійної детекції орієнтирів ($MAE < 1.4$ мм, $ICC > 0.9$) з багато-критеріальними алгоритмами оптимізації (що мінімізують відхилення кінематики та напружень зв'язок та біомеханічною верифікацією).

Перспективи розвитку полягають у створенні системи із замкненим циклом. Згенерований передопераційний план буде виконуватися роботизованими системами, такими як MAKO, ROSA або VELYS, які збиратимуть інтраопераційні дані. Ці дані, разом із післяопераційними функціональними результатами, отриманими через платформи віддаленого моніторингу пацієнтів, будуть повертатися у моделі машинного навчання. Це дозволить ШІ не просто імітувати хірургів, а й відкривати нові, неочевидні стратегії планування, що корелюють з найкращими довгостроковими клінічними результатами, перетворюючи ендопротезування колінного суглоба на по-справжньому стандартизований та керований даними процес.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Guo EW, Sayeed Z, Padela MT, Qazi M, Zekaj M, Schaefer P, Darwiche HF. Improving Total Joint Replacement with Continuous Quality Improvement Methods and Tools. *Orthop Clin North Am.* 2018 Oct;49(4):397-403. [[PubMed](#)]
2. Guo B, Qin S, Huang Y. [Research progress of knee-salvage treatment for knee osteoarthritis]. *Zhongguo Xiu Fu Chong Jian Wai Ke Za Zhi.* 2018 Oct 15;32(10):1292-1296. [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)]
3. Ghosh A, Chatterji U. An evidence-based review of enhanced recovery after surgery in total knee replacement surgery. *J Perioper Pract.* 2019 Sep;29(9):281-290. [[PubMed](#)]
4. Cox CF, Sinkler MA, Black AC, Launico MV, Hubbard JB. StatPearls [Internet]. StatPearls Publishing; Treasure Island (FL): Oct 27, 2023. Anatomy, Bony Pelvis and Lower Limb, Knee Patella. [[PubMed](#)]

5. Gupton M, Munjal A, Terreberry RR. StatPearls [Internet]. StatPearls Publishing; Treasure Island (FL): Jul 24, 2023. Anatomy, Hinge Joints. [\[PubMed\]](#)
6. Bordoni B, Varacallo MA. StatPearls [Internet]. StatPearls Publishing; Treasure Island (FL): May 8, 2023. Anatomy, Bony Pelvis and Lower Limb: Thigh Quadriceps Muscle. [\[PubMed\]](#)
7. Vasso M, Antoniadis A, Helmy N. Update on unicompartmental knee arthroplasty: Current indications and failure modes. EFORT Open Rev. 2018 Aug;3(8):442-448. [\[PMC free article\]](#) [\[PubMed\]](#)
8. Lützner J, Lange T, Schmitt J, Kopkow C, Aringer M, DGRh. Böhle E, ZVK. Bork H, DGOU. Dreinhöfer K, DNVF. Friederich N, Deutsche Arthrose-Hilfe e. V. Gravius S, DGOOC. Heller KD, BVOU. Hube R, DKG. Gromnica-Ihle E, Deutsche Rheuma-Liga Bundesverband e. V. Kirschner S, AE. Kladny B, DGOU. Kremer M, DGU. Linke M, Deutsche Gesellschaft für Medizinische Psychologie. Malzahn J, AOK Bundesverband. Sabatowski R, Deutsche Schmerzgesellschaft e. V. Scharf HP, Stöve J, Wagner R, DGORh. Günther KP. [The S2k guideline: Indications for knee endoprosthesis : Evidence and consent-based indications for total knee arthroplasty]. Orthopade. 2018 Sep;47(9):777-781. [\[PubMed\]](#)
9. Walker LC, Clement ND, Deehan DJ. Predicting the Outcome of Total Knee Arthroplasty Using the WOMAC Score: A Review of the Literature. J Knee Surg. 2019 Aug;32(8):736-741. [\[PubMed\]](#)
10. Jones GG, Logishetty K, Clarke S, Collins R, Jaere M, Harris S, Cobb JP. Do patient-specific instruments (PSI) for UKA allow non-expert surgeons to achieve the same saw cut accuracy as expert surgeons? Arch Orthop Trauma Surg. 2018 Nov;138(11):1601-1608. [\[PMC free article\]](#) [\[PubMed\]](#)
11. Тимчик С.В., Штофель Д.Х. Регенеративна медицина та 3D друк для біомедичної інженерії: Конспект лекцій. – Вінниця: ВНТУ, 2020.

Сидорук Олег Олександрович - аспірант гр 163-23а, кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

Науковий керівник: **Коваль Леонід Григорович** - к.т.н., доцент, завідувач кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Oleh Oleksandrovych Sydoruk - graduate student gr 163-23a, department of biomedical engineering and optical-electronic systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Supervisor: **Koval Leonid Hryhorovych** - Ph.D., Associate Professor, Head of the Department of Biomedical Engineering and Optical-Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ОСВІТЛЕННЯ ТА КУТА СПОСТЕРЕЖЕННЯ НА ЯКІСТЬ ОТОСКОПІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

¹ Вінницький національний технічний університет;

Анотація

У роботі представлено результати аналізу впливу оптичних параметрів системи цифрової отоскопії на якість отримуваних зображень слухового проходу та барабанної перетинки. Дослідження базується на узагальнених експериментальних даних з відкритих наукових джерел.

Ключові слова: отоскоп, освітлення, кут введення, зображення.

Abstract

The paper presents the results of an analytical study on the influence of the optical parameters of a digital otoscopy system on the quality of ear canal and eardrum images.

Keywords: otoscope, lighting, angle of insertion, image.

Вступ

Отоскопія є базовим методом в отоларингології, який дозволяє оглянути зовнішній слуховий прохід та барабанну перетинку з метою діагностики таких станів, як середній отит, сірчані пробки, перфорації перетинки тощо. Якість отриманих зображень суттєво впливає на точність діагностики та подальший автоматизований аналіз. Так, систематичний огляд показав, що алгоритми штучного інтелекту досягають середньої точності понад 90 % при класифікації нормального чи патологічного стану барабанної перетинки.[1] Одна з ключових перешкод — це варіабельність якості зображень, що включає такі фактори, як освітлення, фокус, кут огляду, наявність артефактів та інші. Наприклад, дослідження показало, що лише ~12,75 % відображень отоскопії, оприлюднених в інтернеті, відповідали стандартам доброї практики.[2]

Отже, забезпечення стабільної та високої якості зображень отоскопії є передумовою як для клінічної оцінки, так і для ефективної роботи алгоритмів глибинного навчання.

Результати дослідження

Метою проведеного дослідження було визначення впливу параметрів освітлення (інтенсивність, напрямок) та кута спостереження на якість отоскопічних зображень. Робота спрямована на встановлення оптимальних умов отримання зображень для подальшого використання їх у нейромережових моделях автоматизованого аналізу патологій вуха. дослідження базувалося на узагальненні та статистичному аналізі відкритих експериментальних даних, представлених у наукових публікаціях [2–4]. Для відтворення впливу змін параметрів освітлення та кута спостереження використовувалися узагальнені числові показники, отримані з реальних експериментів, проведених з використанням цифрових USB-отоскопів з роздільною здатністю 1080P HD. Оцінювання якості зображення здійснювалося за трьома ключовими параметрами: інтенсивність освітлення, відносна контрастність та рівень переекспозиції. Інтенсивність освітлення можна виразити як співвідношення фактичної освітленості до максимальної освітленості, даний параметр визначався за допомогою середнього значення яскравості зображення у діапазоні 0–255:

$$I\% = \frac{E}{E_{\max}} * 100 \quad (1)$$

Різниця між найяскравішими та найтемнішими ділянками, нормована на середню яскравість або максимальне значення виражає відносну контрастність зображення[4], $I_{\max}$ та $I_{\min}$ представляють собою середні значення інтенсивності в найсвітліших та найтемніших ділянках області зацікавленості:

$$Cn = \frac{Imax - Imin}{Imax + Imin} * 100 \quad (2)$$

Переекспозиція визначається як співвідношення кількості пікселів інтенсивність яких перевищує порогове значення ($N_{(I>T)}$), зазвичай як порогове значення T встановлюється на рівні 240 для байтового формату до загальної кількості пікселів у зображенні ($N_{\text{заг}}$).[5]

$$O\% = \frac{N(i>T)}{N_{\text{заг}}} * 100 \quad (3)$$

Отриманий результат менше 2% вважається як відсутність переекспозиції, 2-10% - помірний рівень, більше 10% інтерпретується як надмірне пересвічення зображення. На основі узагальнених даних сформовано таблиці залежностей якості зображення від інтенсивності освітлення та кута спостереження.

Таблиця 1. Залежність параметрів якості зображення від інтенсивності освітлення ($\alpha=0^\circ$, $T=4500K$)

Інтенсивність, %	Відносна контрастність	Переекспозиція
20	0.35	0.3%
40	0.62	0.5%
60	0.78	1.5%
80	0.75	6%
100	0.65	35%

Таблиця 2. Залежність параметрів якості зображення від кута спостереження (Інт.=60%, $T=4500K$)

Кут α , °	Відносна контрастність	Переекспозиція
0	0.78	25%
5	0.81	5%
10	0.85	<1%
15	0.80	<1%
20	0.72	<1%
25	0.60	<1%
30	0.45	<1%

Таким чином, отримані залежності є результатом аналітичного узагальнення опублікованих експериментальних даних і відтворюють типові закономірності впливу параметрів освітлення та кута спостереження на якість отоскопічних зображень.

Висновки

На основі аналізу та узагальнення експериментальних даних, опублікованих у відкритих джерелах, встановлено, що параметри освітлення та кут спостереження мають вирішальний вплив на якість отоскопічних зображень. Зокрема, пряме спостереження ($\alpha = 0^\circ$) часто призводить до появи інтенсивних відблисків від поверхні барабанної перетинки, що ускладнює візуалізацію дрібних структур. Збільшення кута огляду до $5-15^\circ$ суттєво знижує кількість відблисків і покращує контрастність ділянок інтересу. При перевищенні кута $15-20^\circ$ зростають геометричні спотворення (асферичні аберації, проєкційні викривлення), що знижує діагностичну цінність зображення. Узагальнення даних показує, що оптимальним є поєднання середньої інтенсивності освітлення (приблизно 50–70 % від максимуму) та невеликого зміщення осі спостереження ($5-15^\circ$). Таке налаштування забезпечує високу контрастність без переекспозиції і дозволяє отримати найбільш інформативне зображення барабанної перетинки. Результати узгоджуються з клінічними спостереженнями щодо необхідності адаптації положення отоскопа або голови пацієнта під час дослідження.

Таким чином, оптимізація параметрів освітлення і кута спостереження є ключовим чинником підвищення якості отоскопічних зображень і може бути використана як основа для автоматизованого аналізу за допомогою моделей глибинного навчання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Dahye Song, Taewan Kim, Yeonjoon Lee, Jaeyoung Kim. Image-Based Artificial Intelligence Technology for Diagnosing Middle Ear Diseases [Електронний ресурс] - <https://www.mdpi.com/2077-0383/12/18/5831>
2. Alenezi E. M. A., Jajko K., Reid A., Locatelli-Smith A., Tao K. F. M., Bright T., Richmond P. C., Eikelboom R. H., Brennan-Jones C. G. «The reliability of video otoscopy recordings and still images in the asynchronous diagnosis of middle-ear disease»: Int. J. Audiol. — 2022. — Vol. 61, Suppl. 1. — 40-47с.
3. Cai Y., Zeng J., Lan L., Chen S., Ou Y., Zeng L., Yang Q., Li P., Chen Y., Li Q., Zhang H., Shu F., Chen G., Chen W., Yang Y., Li R., Yan A., Lin H., Zheng Y. Expert recommendations on collection and annotation of otoscopy images for intelligent medicine: Intelligent Medicine. – 2022. – Vol. 4. – 230-234с.
4. Kashani R. G., Młyńczak M. C., Zarabanda D., Solis-Pazmino P., Huland D. M., Ahmad I. N., Singh S. P., Valdez T. A. Shortwave infrared otoscopy for diagnosis of middle ear effusions: a machine-learning-based approach // Scientific Reports. – 2021. – Vol. 11, Art. 12509.
5. Kashani R.G., Młyńczak M.C., Zarabanda D., Solis-Pazmino P., Huland D.M., Ahmad I.N., Singh S.P., Valdez T.A. Shortwave infrared otoscopy for diagnosis of middle ear effusions: a machine-learning-based approach // Scientific Reports. – 2021. – Vol. 11.

Марчук Андрій Юрійович - аспірант кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, andriu4934@gmail.com.

Науковий керівник: **Заболотна Наталія Іванівна** — доктор технічних наук, професор кафедри біомедичної інженерії та оптоелектронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, E-mail: natalia.zabolotna@gmail.com.

Marchuk Andrii Yuriyovych - Postgraduate student, Department of Biomedical Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, andriu4934@gmail.com.

Supervisor: **Natalia Ivanivna Zabolotna** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Biomedical Engineering and Optoelectronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, E-mail: natalia.zabolotna@gmail.com.

МОДЕЛЬ ВПЛИВУ МІКРОКЛІМАТУ ПРИМІЩЕННЯ НА ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ЛЮДИНИ-ОПЕРАТОРА

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглянуто актуальну проблему впливу фізичних параметрів робочого середовища на ефективність операторської діяльності. Проаналізовано ключові компоненти мікроклімату (температура, вологість, швидкість руху повітря) та їхній комплексний вплив на психофізіологічний стан людини. Запропоновано структурно-функціональну модель, що описує механізми впливу мікрокліматичних умов на когнітивні функції, рівень втоми та загальну працездатність оператора.

Ключові слова: мікроклімат, людина-оператор, працездатність, тепловий комфорт, когнітивні функції, модель, система «людина-машина», втома.

Abstract

The paper considers the current problem of the influence of physical parameters of the working environment on the efficiency of operator activity. The key components of the microclimate (temperature, humidity, air velocity) and their complex impact on the psychophysiological state of a person are analyzed. A structural-functional model is proposed that describes the mechanisms of the influence of microclimatic conditions on cognitive functions, the level of fatigue and the general performance of the operator.

Keywords: microclimate, human-operator, performance, thermal comfort, cognitive functions, model, «human-machine» system, fatigue.

Вступ

Ефективність функціонування сучасних систем управління, виробничих ліній та диспетчерських пунктів значною мірою залежить від надійності «людської ланки» – людини-оператора. Операторська діяльність характеризується високим рівнем когнітивного навантаження, необхідністю тривалої концентрації уваги та швидкого прийняття рішень [1]. При цьому, працездатність оператора чутлива до умов робочого середовища, серед яких ключова роль належить параметрам мікроклімату.

Неоптимальні мікрокліматичні умови (надто висока або низька температура, підвищена вологість, протяги) виступають як потужний стресовий фактор. Вони призводять до фізіологічного напруження, психологічного дискомфорту, прискореного розвитку втоми та, як наслідок, до зниження продуктивності та збільшення ймовірності помилок [2]. Адекватне моделювання цього впливу є критично важливим для проектування ергономічних робочих місць, нормування умов праці та забезпечення промислової безпеки.

Метою даної роботи є розробка концептуальної моделі, що системно описує вплив комплексу мікрокліматичних факторів на психофізіологічний стан та працездатність людини-оператора.

Основна частина

1. Фактори мікроклімату та їх вплив

Мікроклімат приміщення – це стан внутрішнього середовища, що характеризується сукупністю фізичних параметрів, які впливають на тепловий обмін людини з оточенням. До основних параметрів належать:

- температура повітря (t_p) - основний фактор, що визначає інтенсивність тепловіддачі;
- відносна вологість (ϕ) - впливає на інтенсивність випаровування поту з поверхні шкіри;
- швидкість руху повітря (V) - інтенсифікує тепловіддачу конвекцією та випаровуванням;
- температура оточуючих поверхонь (t_c) - визначає інтенсивність радіаційного теплообміну.

Вплив цих факторів на людину є комплексним. Організм оператора постійно прагне до теплового гомеостазу (підтримання сталої температури тіла близько 36.6°). Відхилення параметрів мікроклімату від зони комфорту змушує організм вмикати механізми терморегуляції (потовиділення, зміна

периферичного кровотоку, тремтіння).

2. Концептуальна модель впливу

Запропонована модель базується на уявленні про людину-оператора як про складну систему, що має два основні «канали» реакції на зовнішні стимули (в даному випадку – на мікроклімат).

На рис. 1 представлена загальна концептуальна схема впливу мікроклімату.

Дана схема ілюструє базовий підхід «чорної скриньки». На вхід системи «Людина-оператор» подаються об'єктивні фізичні параметри мікроклімату. На виході ми фіксуємо зміни у трьох ключових областях:

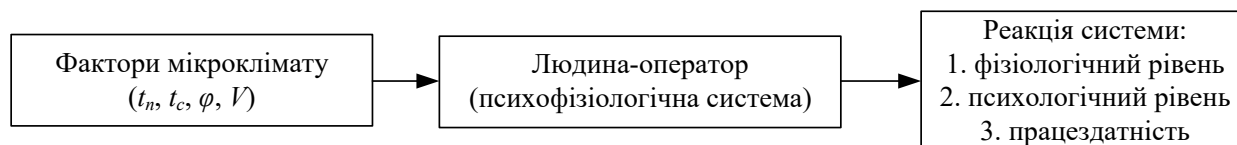


Рисунок 1. Загальна концептуальна схема впливу «Середовище – Оператор»

Аналіз фізіологічного стану включає оцінювання зміни частоти серцевих скорочень (ЧСС), температури тіла, інтенсивності потовиділення. Аналіз психологічного стану - суб'єктивне відчуття теплового комфорту/дискомфорту, рівень бадьорості, настроїв. Оцінювання працездатності передбачає аналіз об'єктивних показників виконання завдання (часу реакції, кількості помилок, стабільності виконання завдань).

3. Структурно-функціональна модель

Для глибшого розуміння процесів необхідно деталізувати «чорну скриньку». Рис. 2 представляє розгорнуту структурно-функціональну модель, що показує внутрішні механізми реакції оператора.

Дана модель розкриває двоконтурний механізм впливу мікроклімату. Контур 1 – фізіологічний (терморегуляційний). Відхилення мікроклімату від комфортних значень сприймається терморецепторами. ЦНС (зокрема, гіпоталамус) запускає фізіологічні реакції для компенсації теплового дисбалансу. Цей процес енергозатратний. Організм витрачає ресурси не на основну діяльність (роботу оператора), а на підтримання гомеостазу. Це призводить до об'єктивного накопичення втоми. Контур 2 – психологічний (когнітивний). Сигнали від рецепторів також обробляються вищими відділами ЦНС, формуючи суб'єктивне відчуття дискомфорту (занадто спекотно, холодно, душно). Це відчуття діє як відволікаючий фактор, який займає частину когнітивного ресурсу (робочої пам'яті, уваги), який мав би бути спрямований на виконання операторського завдання [3].

Обидва контури (фізіологічна втома та когнітивне відволікання) сумуються у загальній зміні функціонального стану. Цей стан безпосередньо визначає кінцеві показники працездатності:

При тепловому дискомфорті (спека): Знижується концентрація уваги, сповільнюються сенсомоторні реакції, зростає кількість помилок пропуску сигналу.

При холодному дискомфорті знижується рухливість (важливо для маніпуляцій), увага може надмірно концентруватися на внутрішніх відчуттях, зростає ризик помилок через м'язову скутість.

Важливим аспектом моделі є те, що навіть незначні, але тривалі відхилення від зони комфорту (субоптимальні умови) призводять до кумулятивного ефекту – поступового накопичення втоми та зниження надійності оператора протягом робочої зміни.

Висновки

Вплив мікроклімату на людину-оператора є комплексним психофізіологічним процесом, який не можна зводити лише до питань комфорту. Це прямий фактор, що визначає надійність та ефективність системи «людина-машина».

Запропонована структурно-функціональна модель (рис. 2) описує механізм впливу через два взаємопов'язані канали: фізіологічний (витрата ресурсів на терморегуляцію) та психологічний (відволікання когнітивних ресурсів через відчуття дискомфорту) та ілюструє взаємозв'язок між фізіологічною реакцією організму (терморегуляція) та психологічним сприйняттям (тепловий комфорт/дискомфорт), які сукупно визначають надійність та продуктивність роботи оператора.



Рисунок 2. Структурно-функціональна модель впливу мікроклімату на працездатність

Дана модель може бути використана як теоретична основа для розробки систем автоматичного контролю мікроклімату на робочих місцях операторів, для обґрунтування санітарно-гігієнічних норм (зокрема, для когнітивно-напруженої праці) та для прогнозування ризику помилок оператора в несприятливих умовах середовища.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Зінченко В. П., Муніпов В. М. Основи ергономіки. – К.: Вища школа, 2003. – 345 с.
2. Parsons, K. C. (2014). Human Thermal Environments: The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance. CRC Press.
3. Lan, L., Lian, Z., & Pan, L. (2010). The effects of thermal environment on office worker's productivity: a review. Building and Environment, 45(1), p. 11-19.
4. ДСанПіН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. – К.: МОЗ України, 1999.

Костішин Сергій Володимирович – канд. техн. наук, доцент кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: seruykost@gmail.com.

Пантелейчук Дмитро Олександрович – аспірант кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, vindims@gmail.com.

Serhii V. Kostishyn – Ph.D., Assistant professor of department of biomedical engineering and optical-electronic systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: seruykost@gmail.com.

Dmytro Panteleichuk – postgraduate student, department of biomedical engineering and optical-electronic system, Vinnytsia national technical university, Vinnytsia, vindims@gmail.com.

АРХІТЕКТУРНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ РЕЄСТРАЦІЇ БІОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ЛЮДИНИ З ВИКОРИСТАННЯМ МОБІЛЬНИХ ПЛАТФОРМ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі проаналізовано стрімкий розвиток технологій мобільного здоров'я (mHealth) та їхню роль у сучасній системі охорони здоров'я. Розглянуто проблему необхідності створення уніфікованих моделей для збору, обробки та передачі фізіологічних даних пацієнта. Запропоновано багаторівневу архітектурну модель системи реєстрації біологічних показників людини, що базується на використанні мобільних платформ як ключових вузлів-агрегаторів. Окреслено ключові виклики, пов'язані з безпекою даних, інтероперабельністю та енергоефективністю.

Ключові слова: mHealth, мобільні платформи, біологічні показники, архітектурна модель, моніторинг здоров'я, носимі пристрої, Інтернет медичних речей (IoMT), телемедицина.

Abstract

The paper analyzes the rapid development of mobile health technologies (mHealth) and their role in the modern healthcare system. The problem of the need to create unified models for collecting, processing and transmitting physiological data of the patient is considered. A multi-level architectural model of the system for registering human biological indicators is proposed, based on the use of mobile platforms as key aggregator nodes. Key challenges related to data security, interoperability and energy efficiency are outlined.

Keywords: mobile platforms, biological indicators, architectural model, health monitoring, wearable devices, Internet of Medical Things, telemedicine.

Вступ

Сучасна система охорони здоров'я переживає трансформацію, зумовлену демографічними змінами, зокрема старінням населення, та зростанням поширеності хронічних захворювань. Це створює значне навантаження на медичні установи та вимагає переходу від реактивної моделі лікування до проактивної та превентивної [1]. У цьому контексті технології мобільного здоров'я (mHealth) та Інтернету медичних речей (IoMT) відкривають безпрецедентні можливості для безперервного та віддаленого моніторингу стану здоров'я людини [2].

Мобільні платформи, зокрема смартфони, стали поширеними обчислювальними хабами. Завдяки вбудованим сенсорам (акселерометр, гіроскоп, пульсометр) та можливостям бездротового зв'язку (Bluetooth Low Energy, Wi-Fi), вони ідеально підходять на роль центрального елемента в системах персонального моніторингу [3] – володіють здатністю агрегувати дані з різних зовнішніх носимих пристроїв: фітнес-трекерів, смарт-годинників, медичних пластирів, глюкометрів тощо.

Однак, для ефективної реалізації таких систем необхідна чітка та уніфікована архітектурна модель. Вона має вирішувати задачі збору різномірних даних, їхньої попередньої обробки, безпечної передачі та інтелектуального аналізу. Відсутність стандартизованої моделі призводить до фрагментації ринку mHealth-рішень, проблем із сумісністю пристроїв та складнощів в інтеграції з іншими медичними інформаційними системами (MIC) [4].

Метою даної роботи є розробка узагальненої архітектурної моделі для реєстрації біологічних показників людини з використанням мобільних платформ, що враховує вимоги до масштабованості, безпеки та інтероперабельності.

Архітектурна модель системи

Запропонована модель є багаторівневою архітектурою, що описує повний життєвий цикл даних – від їх генерації сенсором до візуалізації перед лікарем. Модель складається з трьох логічних рівнів, взаємодія яких забезпечує функціонування всієї системи (рис. 1).

1. Рівень персональних сенсорів (Sensor layer)

Цей рівень є джерелом даних. Він включає сукупність носимих та стаціонарних медичних пристроїв, що безпосередньо реєструють біологічні показники: фізіологічні сенсори (ЕКГ, ФПГ (фотоплетизмографія для вимірювання ЧСС та SpO₂), датчики температури тіла, артеріального тиску); біохімічні сенсори (глюкометри (інвазивні та неінвазивні), аналізатори поту); сенсори активності (акселерометри, гіроскопи (для моніторингу рухової активності, виявлення падінь тощо)).

Основне завдання цього рівня – точна реєстрація сигналу та його передача на наступний рівень. Ключовим протоколом зв'язку тут виступає Bluetooth Low Energy (BLE) завдяки своїй енергоефективності [4].

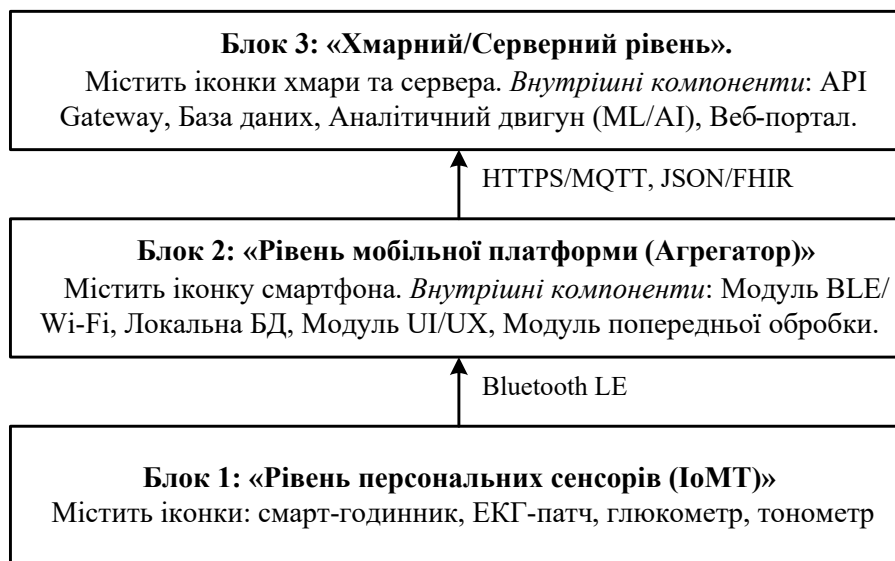


Рисунок 1. Загальна трирівнева архітектурна модель mHealth-системи

2. Рівень мобільної платформи (Gateway/Mobile layer)

Це ядро запропонованої моделі. Мобільна платформа (смартфон) виконує роль шлюзу-агрегатора. Її функції є критично важливими (рис. 1): агрегація даних (мобільний додаток одночасно збирає дані з декількох сенсорів через BLE); попередня обробка та фільтрація (для зменшення навантаження на мережу та хмарне сховище, частина обробки відбувається локально. Це включає фільтрацію шумів (наприклад, артефактів руху в сигналі ФПГ), базове виділення ознак (feature extraction) та валідацію даних); локальне зберігання (дані тимчасово зберігаються у локальній базі даних (наприклад, SQLite), що забезпечує стійкість до збоїв мережі (offline-режим); інтерфейс користувача (UI/UX) (надання пацієнту зворотного зв'язку, візуалізація його поточних показників, нагадування про прийом ліків чи вимірювання); безпечна передача (синхронізація оброблених та агрегованих даних з хмарним сервером).

3. Хмарний/Серверний рівень (Cloud/Server layer)

Цей рівень відповідає за довготривале зберігання, глибокий аналіз даних та надання доступу авторизованим медичним працівникам. Використання масштабованих баз даних (часто NoSQL, як-от MongoDB або time-series DB, як InfluxDB) для зберігання великих обсягів часових рядів біометричних даних.

На даному рівні відбувається застосування алгоритмів машинного навчання (ML) та штучного інтелекту (AI) для виявлення патернів, аномалій, прогнозування погіршення стану (наприклад, аритмії, гіпоглікемії) [2]. Підтримка прийняття рішень (CDSS) – формування автоматичних сповіщень (алертів) для лікарів у разі виявлення критичних відхилень у показниках пацієнта.

Також тут реалізується інтероперабельність - надання API (Application Programming Interface) для

інтеграції з госпітальними МІС, використовуючи стандарти обміну медичними даними, такі як FHIR (Fast Healthcare Interoperability Resources) та візуалізація даних - надання лікарям доступу до даних пацієнтів через захищений веб-портал.

Запропонована модель, попри свою гнучкість, стикається з низкою проблем, а саме:

- безпека та конфіденційність – медичні дані є вкрай чутливими. Необхідно забезпечити наскрізне шифрування: від сенсора до мобільного пристрою (використовуючи захищені режими BLE) та від мобільного пристрою до хмари (використовуючи SSL/TLS). Зберігання даних на сервері має відповідати міжнародним (GDPR) та національним стандартам захисту медичної інформації [4].

- енергоефективність - оскільки мобільний пристрій виступає постійно активним шлюзом, його енергоспоживання є критичним фактором. Постійне сканування BLE та передача даних через 4G/5G/Wi-Fi швидко розряджає батарею. Оптимізація (пакетна передача даних) є ключовою задачею.

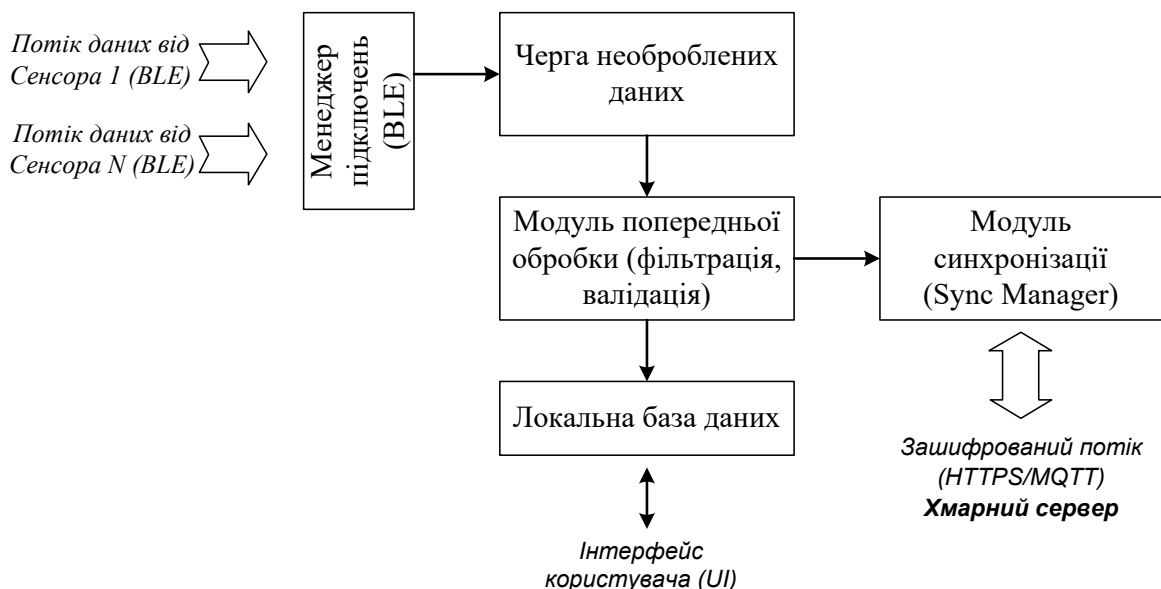


Рисунок 2. Схема потоків даних на рівні мобільної платформи

Також на ринку існує величезна кількість сенсорів від різних виробників, які часто використовують пропріетарні протоколи. Мобільний додаток-агрегатор повинен підтримувати широкий спектр пристроїв, що вимагає стандартизації або використання універсальних API.

Висновки

У статті запропоновано узагальнену трирівневу архітектурну модель для систем реєстрації біологічних показників людини на базі мобільних платформ. Модель структурує процес збору, обробки та аналізу даних, де мобільний пристрій виконує центральну роль агрегатора та шлюзу.

Модель описує взаємодію трьох основних рівнів: рівня персональних сенсорів, рівня мобільної платформи (агрегація та попередня обробка) та хмарного/серверного рівня (зберігання, аналітика, підтримка прийняття рішень). Дана модель слугує основою для розробки гнучких та масштабованих mHealth-рішень для віддаленого моніторингу пацієнтів та превентивної діагностики.

Перевагами даної моделі є її масштабованість (легке додавання нових сенсорів) та гнучкість (можливість локальної обробки даних). Використання смартфона як проміжної ланки дозволяє знизити вартість кінцевого рішення, оскільки більшість пацієнтів вже володіє цим пристроєм.

Подальші дослідження мають бути зосереджені на розробці адаптивних алгоритмів попередньої обробки даних на мобільному пристрої для оптимізації енергоспоживання та на впровадженні навчання, що дозволить тренувати моделі ШІ без необхідності передачі чутливих даних.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. World Health Organization (WHO). (2018). Global diffusion of eHealth: making universal health coverage achievable. Report.
2. Мобільні інформаційні системи для задач охорони здоров'я / М. Є. Білов, О. Г. Дудко, К.І. Голунга та ін. // Інформаційні системи та технології в медицині ISM-2019: матеріали II Міжнародна науково-практична конференція –

Харків. – 2019. – С. 181-182. – ISBN 978-966-6612-711-0

3. Majumder, S., Aghayi, E., Noferesti, M., Memarzadeh-Tehran, H., Mondal, T., Pang, Z., & Deen, M. J. (2017). Smart-Homes and Quality of Life for the Elderly: A Systematic Review. *IEEE Sensors Journal*, 17(15), 4767-4777.

4. Koumaditis, K., & Themistocleous, M. (2016). mHealth: A Look at the Issues and a Call for a Detailed Investigation of the Field. *Proceedings of the 22nd Americas Conference on Information Systems (AMCIS 2016)*.

Костішин Сергій Володимирович – канд. техн. наук, доцент кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: seruykost@gmail.com.

Поліщук Олександр Володимирович – аспірант кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

Serhii Kostishyn – Ph.D., Assistant professor of department of biomedical engineering and optical-electronic systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: seruykost@gmail.com.

Oleksandr Polishchuk – postgraduate student, department of biomedical engineering and optical-electronic system, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО РОЗПІЗНАВАННЯ НАМІРУ РУХУ ТА УПРАВЛІННЯ МІОЕЛЕКТРИЧНИМИ ПРОТЕЗАМИ РУК

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглянуто сучасні підходи до керування роботизованими протезами верхніх кінцівок на основі сигналів електроміографії). Розглянуто дві основні парадигми розпізнавання наміру руху — дискретну та безперервну — та їхні переваги і обмеження. Проаналізовано методи класифікації та оцінки рухів, включаючи традиційні алгоритми розпізнавання шаблонів та сучасні методи глибокого навчання. Особливу увагу приділено стратегіям керування протезами: односпрямованому, зі зворотним сенсорним зв'язком і спільному контролю. Представлено останні досягнення у використанні електротактильного та пропріоцептивного зворотного зв'язку для підвищення точності та природності управління протезами.

Ключові слова: ЕМГ, протез, рух, зворотний зв'язок, контроль.

Abstract

The paper reviews modern approaches to controlling robotic upper limb prostheses based on electromyography signals. Two main paradigms of movement intention recognition — discrete and continuous — and their advantages and limitations are considered. Methods for classifying and evaluating movements are analyzed, including traditional pattern recognition algorithms and modern deep learning methods. Special attention is paid to prosthetic control strategies: unidirectional, with sensory feedback, and joint control. Recent advances in the use of electrotactile and proprioceptive feedback to improve the accuracy and naturalness of prosthetic control are presented.

Keywords: EMG, prosthesis, movement, feedback, control.

Вступ

Розвиток технологій роботизованих протезів верхніх кінцівок дозволяє значно підвищити якість життя людей з ампутацією. Основою сучасних систем керування є сигнали ЕМГ, що відображають активність м'язів користувача та його намір руху. Дослідження останніх років демонструють два підходи до розпізнавання наміру: дискретний, який передбачає виконання окремих рухів з поверненням руки у початкову позицію, та безперервний, що дозволяє об'єднувати кілька рухів у природний потік дій. Методи класифікації дискретних рухів забезпечують високу точність при відтворенні заздалегідь визначених жестів, проте обмежені у відображенні нових або складних комбінацій рухів. Безперервні алгоритми, зокрема на основі глибокого навчання, дозволяють оцінювати рухи у реальному часі та декодувати одночасні багатосуглобові дії. Сучасні протези інтегрують сенсорний зворотний зв'язок, що покращує точність захоплення та знижує втому користувача, а також системи спільного контролю, які комбінують автономні алгоритми і наміри користувача.

Результати дослідження

Тип руху та намір

Дослідження керування протезами рук на основі ЕМГ виділяють два основні підходи: дискретний і безперервний. Дискретні дії передбачають виконання окремого руху з поверненням руки у початкове положення між повтореннями, що дозволяє легко сегментувати сигнали та навчати моделі розпізнавання наміру. Результати дослідження [1] показали, що пропорційне та одночасне прогнозування багатосуглобових рухів із ЕМГ дозволяє більш точно відтворювати рухи руки для керування протезом. Автори роботи [2] застосували синергію м'язів для одночасного та стабільного керування протезом кисті з чотирма ступенями свободи, забезпечуючи природні рухи користувача.

Безперервне виконання рухів дозволяє об'єднувати декілька дій без повернення до початкового положення, що створює більш природні умови для повсякденних завдань. Дослідження [3] та [4]

підкреслюють, що безперервне моделювання рухів за допомогою алгоритмів машинного навчання та глибинних нейронних мереж покращує розпізнавання наміру у складних та динамічних умовах, включаючи шум та варіативність сигналу ЕМГ.

Класифікація та оцінка руху

Класифікація дискретних дій часто реалізується за допомогою методів розпізнавання шаблонів або моделей регресії, що дозволяють відображати сигнали ЕМГ на рухи протеза. Автори роботи [1] використали регресійні моделі для прогнозування кутів суглобів, що дозволяє декодувати одночасні рухи декількох суглобів. Результати [2] показали, що лінійна інтерполяція між м'язовими синергіями забезпечує стабільне керування кількома ступенями свободи.

Оцінка безперервного руху включає аналіз всього процесу руху в реальному часі, враховуючи переходи між діями. Такі підходи дозволяють передбачати рухи кисті і пальців без попередньо визначених шаблонів. Методи глибинного навчання, як зазначено в роботі [4], забезпечують більш точне прогнозування та можливість одночасного контролю кількох ступенів свободи, але потребують великих обсягів даних та адаптації до індивідуальних особливостей користувача.

Стратегії керування протезами

Односпрямоване керування відображає амплітуду або характеристики ЕМГ без додаткового зворотного зв'язку. Воно просте та широко застосовується в комерційних протезах, проте обмежене відсутністю пропріоцептивної інформації [1, 2].

Керування зі зворотним зв'язком додає сенсорну інформацію про стан протеза. Результати [5] показали, що тактильний і вібротактильний зворотний зв'язок значно підвищує точність захоплення та знижує когнітивне навантаження. Дослідження [6] та [7] продемонстрували ефективність електротактильної стимуляції для відновлення чутливості пальців і поліпшення контролю захоплення. Дослідження [8] додатково показало, що електротактильний зворотний зв'язок може зменшувати м'язову втому під час маніпуляцій. Автори дослідження [9] поєднали класифікацію ЕМГ з пропріоцептивним зворотним зв'язком для інтуїтивного керування роботизованою рукою.

Спільний контроль об'єднує автономне керування та інтелект користувача, дозволяючи протезу реагувати на команди в реальному часі. Результати [10] та [11] демонструють, що інтеграція оцінки руху через ЕМГ та адаптивного алгоритму керування дозволяє протезам виконувати складні завдання захоплення. Автори [12] підкреслюють важливість гібридних сенсорних систем для безінвазивного керування протезами з високою точністю та адаптивністю.

Висновки

Сучасні системи керування протезами рук на основі ЕМГ демонструють значний прогрес у забезпеченні природності та точності рухів. Дискретні та безперервні підходи мають свої переваги та обмеження: дискретні рухи забезпечують високу точність у лабораторних умовах, а безперервні — кращу адаптацію до реальних сценаріїв. Використання зворотного сенсорного зв'язку та спільного контролю підвищує інтуїтивність та ефективність управління протезами. Подальші дослідження мають зосередитися на адаптації алгоритмів до індивідуальних особливостей користувача, оптимізації сенсорних систем та інтеграції методів глибинного навчання для підвищення автономності і природності керування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Zhang Q., Pi T., Liu R., Xiong C. Simultaneous and proportional estimation of multijoint kinematics from EMG signals for myocontrol of robotic hands. *IEEE/ASME Trans. Mech.* 2020;25:1953–1960.
2. Lukyanenko P., Dewald H.A., Lambrecht J., Kirsch R.F., Tyler D.J., Williams M.R. Stable, simultaneous and proportional 4 DoF prosthetic hand control via synergy inspired linear interpolation: A case series. *J. Neuroeng. Rehabil.* 2021;18:50.
3. Zi You L., Xin Gang Z., Bi Z., Qi Chuan D., Dao Hui Z., Jian Da H. Review of sEMG based motion intent recognition methods in non ideal conditions. *Acta Autom. Sin.* 2021;47:955–969.

4. Xiong D., Zhang D., Zhao X., Zhao Y. Deep learning for EMG based human machine interaction: A review. IEEE/CAA J. Autom. Sin. 2021;8:512–533.
5. Sensinger J.W., Dosen S. A review of sensory feedback in upper limb prostheses from the perspective of human motor control. Front. Neurosci. 2020;14:345.
6. Kim K. A review of haptic feedback through peripheral nerve stimulation for upper extremity prosthetics. Curr. Opin. Biomed. Eng. 2022;21:100368.
7. Xu H., Chai G., Zhang N., Gu G. Restoring finger specific tactile sensations with a sensory soft neuroprosthetic hand through electrotactile stimulation. Soft Sci. 2022;2:19.
8. Li K., Zhou Y., Zhou D., Zeng J., Fang Y., Yang J., Liu H. Electrotactile Feedback Based Muscle Fatigue Alleviation for Hand Manipulation. Int. J. Humanoid Robot. 2021;18:2050024.
9. Cha H., An S., Choi S., Yang S., Park S., Park S. Study on Intention Recognition and Sensory Feedback: Control of Robotic Prosthetic Hand Through EMG Classification and Proprioceptive Feedback Using Rule based Haptic Device. IEEE Trans. Haptics. 2022;15:560–571.
10. Dwivedi A., Shieff D., Turner A., Gorjup G., Kwon Y., Liarokapis M. A shared control framework for robotic tele manipulation combining electromyography based motion estimation and compliance control. Proc. 2021 IEEE ICRA; 2021; pp. 9467–9473.
11. Wang Y., Tian Y., She H., Jiang Y., Yokoi H., Liu Y. Design of an effective prosthetic hand system for adaptive grasping with the control of myoelectric pattern recognition approach. Micromachines. 2022;13:219.
12. Zhou H., Alici G. Non invasive human machine interface (HMI) systems with hybrid on body sensors for controlling upper limb prosthesis: A review. IEEE Sens. J. 2022;22:10292–10307.

Пастушенко Антон Олександрович — аспірант кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

Науковий керівник: **Коваль Леонід Григорович** — к. т. н., доцент, завідувач кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: koval.l@vntu.edu.ua.

Anton Oleksandrovykh Pastushenko — postgraduate student of the Department of Biomedical Engineering and Optoelectronic Systems, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Supervisor: **Leonid Grigorovich Koval** — Ph.D., Associate Professor, Head of the Department of Biomedical Engineering and Optoelectronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: koval.l@vntu.edu.ua.

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО КОМПЛЕКСНОГО ОЦІНЮВАННЯ ЗОРОВОЇ СИСТЕМИ ЗА ДОПОМОГОЮ ОПТИЧНИХ СЕНСОРІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі проведено огляд сучасних методів та оптико-електронних систем для моніторингу функціонального стану зорової системи. Розглянуто два основні підходи: непрямий моніторинг через біомедичні показники та прямий моніторинг за допомогою відстеження рухів очей та аналізу сітківки. Проаналізовано використання фотоплетизмографії, оптичних сенсорів, МР- та ОСТ-зображень, а також алгоритмів машинного навчання та глибокого аналізу сигналів для оцінки стану зорової системи. Наведено приклади реалізації багатопараметричних систем, що дозволяють інтегрувати структурні та функціональні дані для точного моніторингу в реальному часі.

Ключові слова: зорова система, моніторинг, біомедичні показники.

Abstract

The paper reviews modern methods and optoelectronic systems for monitoring the functional state of the visual system. Two main approaches are considered: indirect monitoring through biomedical indicators and direct monitoring using eye movement tracking and retinal analysis. The use of photoplethysmography, optical sensors, MR and OCT images, as well as machine learning algorithms and deep signal analysis for assessing the state of the visual system is analyzed. Examples of the implementation of multiparameter systems that allow integrating structural and functional data for accurate real-time monitoring are given.

Keywords: visual system, monitoring, biomedical indicators.

Вступ

Функціональний стан зорової системи є важливим показником загального стану організму та ефективності сенсорного сприйняття. У сучасних дослідженнях велика увага приділяється розробці методів, що дозволяють оцінювати цей стан у реальному часі з високою точністю та мінімальним втручанням у діяльність користувача. Оптико-електронні системи забезпечують можливість непрямого моніторингу через біомедичні показники, такі як кровоток, оклюзія судин та метаболічні параметри, а також прямого моніторингу за допомогою камер і сенсорів для відстеження руху очей та аналізу сітківки. Сучасні дослідження демонструють ефективність інтеграції кількох методів та алгоритмів обробки сигналів для комплексної оцінки функціонального стану зорової системи, що відкриває нові перспективи для медичних, реабілітаційних та професійних застосувань.

Результати дослідження

Дослідження функціонального стану зорової системи з використанням оптико-електронних систем поділяють на два основні напрямки: непрямий моніторинг через біомедичні показники та прямий моніторинг за допомогою оцінки руху очей і сітківки. Непрямий моніторинг включає аналіз таких параметрів, як кровоток сітківки, оклюзія судин, зміни метаболічних показників та оптичну когерентну томографію [1, 2]. Ці методи дозволяють отримувати дані про стан зорової системи у спокої або під навантаженням та забезпечують сегментацію сигналів для подальшої обробки. Наприклад, автори [1] розробили оптико-електронну систему з комбінованими сенсорами, яка дозволяє оцінювати кілька біомедичних параметрів одночасно та формувати аналітичні показники функціонального стану.

Прямий моніторинг включає використання камер, сенсорів та алгоритмів для відстеження руху очей, аналізу фіксацій, саккад, пульсацій зорового поля або змін зображень сітківки [2, 4]. Автори

дослідження [2] застосували методи структурного та функціонального МР-зображення для оцінки порушень зорової системи, що дозволяє визначати локалізацію патологічних змін та аналізувати відновлення функцій після терапії. Аналогічно, автори роботи [4] систематизували методики eye-tracking у 3D середовищах, де поєднання оптичних сенсорів з алгоритмами аналізу дозволяє класифікувати типи погляду, оцінювати взаємодію користувача із середовищем і визначати когнітивні реакції на стимуляцію.

У носимих пристроях результати [3] показали, що оптичні сенсори, інтегровані з алгоритмами обробки сигналів у реальному часі, здатні здійснювати безперервний моніторинг стану зорової системи під час тривалого використання. Вони описують поєднання фотоплетизмографії, оптичних сенсорів для оцінки рухів очей та мікроконтролерів для обробки даних, що дозволяє формувати показники когнітивного навантаження та реакції на зміну освітлення.

У дослідженні [5] проаналізували зміни аккомодативної та суб'єктивні прояви порушень зорової системи у користувачів персональних комп'ютерів, застосовували комплексне поєднання оптичних методів та комп'ютерного аналізу зображень. Це включає вимірювання відстані фокусування, аналіз фіксацій та трекінг рухів очей при виконанні завдань на екрані.

Методи обробки сигналів включають використання шаблонного розпізнавання, регресії та алгоритмів машинного навчання для класифікації станів зорової системи. Наприклад, у системах відстеження погляду [4] застосовують алгоритми кластеризації та аналізу фіксацій для визначення напрямку уваги та типу реакції користувача. Методи регресії та глибокого навчання дозволяють прогнозувати стан зорової системи на основі динаміки рухів очей, змін зображень сітківки та біомедичних показників [2, 3].

У різних дослідженнях [1–5] описані системи, що інтегрують кілька методів: фотоплетизмографію, оптичні сенсори для трекінгу очей, аналіз МР- та ОСТ-зображень, алгоритми глибокого навчання для класифікації сигналів та оцінки функціонального стану. Такий підхід дозволяє отримувати багатопараметричну оцінку зорової системи, враховуючи як структурні, так і функціональні показники.

Прямий моніторинг охоплює відстеження рухів очей, аналіз фіксацій та саккад, а також оцінку структурних змін сітківки за допомогою оптичної когерентної томографії. Автори [6] систематизували застосування eye-tracking для оцінки функціональних наслідків порушень зору, підкреслюючи можливість оцінювати когнітивне навантаження та реакції на візуальні стимули. Автори роботи [7] представили системний огляд технологій eye-tracking в оптометрії, що дозволяє порівнювати різні методи фіксацій та оцінки точності руху очей у лабораторних та польових умовах.

Оптичні сенсори та носимі пристрої активно застосовуються для безперервного моніторингу стану зорової системи. Автори дослідження [8] описують інтеграцію оптичних сенсорів, фотоплетизмографії та волоконно-оптичних датчиків у медичні носимі пристрої, що дозволяє оцінювати зміни кровотоку, стан судинної мережі та рух очей у реальному часі. Такі системи використовують алгоритми машинного навчання та глибокого аналізу сигналів для класифікації та прогнозування стану зорової системи.

Дослідження [9] показало, що веб-базовані eye-tracking системи здатні ефективно працювати у різних умовах освітлення, що важливо для реалістичного оцінювання функцій зору в реальних умовах. Автори [10] здійснили систематичний огляд безконтактних оптичних методів моніторингу життєвих показників, включаючи сенсорні системи для оцінки стану зорової системи, що демонструє потенціал інтеграції таких технологій у медичні та професійні застосування.

Методи обробки даних включають кластеризацію, регресію, алгоритми машинного та глибокого навчання для аналізу рухів очей, змін зображень сітківки та біомедичних показників [6–10]. Такі підходи дозволяють формувати багатопараметричну оцінку функціонального стану зорової системи, комбінуючи структурні та функціональні дані, що підвищує точність моніторингу та забезпечує можливість аналізу в реальному часі.

Інтегровані системи включають поєднання фотоплетизмографії, оптичних сенсорів, алгоритмів машинного навчання та носимих пристроїв [8, 9]. Це дозволяє оцінювати як статичні, так і динамічні параметри функціонального стану зорової системи, формуючи комплексні показники для медичного та професійного застосування.

Висновки

Аналіз літератури показав, що сучасні оптико-електронні системи для моніторингу функціонального стану зорової системи успішно поєднують різні підходи та методи: непрямий моніторинг біомедичних показників, прямий моніторинг рухів очей та аналіз зображень сітківки. Застосування алгоритмів машинного навчання та глибинного аналізу сигналів дозволяє інтегрувати багатопараметричні дані та забезпечувати оцінку стану зорової системи у реальному часі. Розвиток таких систем відкриває перспективи для комплексного контролю функціонального стану зорової системи в медичних та професійних умовах, забезпечуючи точну та надійну оцінку параметрів зорового сприйняття.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Barylo G.I., Ivakh M.S., Mykytiuk Z.M., Kremer I.P. Optical-electronic monitoring system of biomedical indicators, 2020.
2. Sims J.R., Chen A.M., Sun Z. Role of Structural, Metabolic, and Functional MRI in Monitoring Visual System Impairment and Recovery, 2020.
3. Vavrinsky E. et al. The Current State of Optical Sensors in Medical Wearables, 2022.
4. Sundstedt V., Garro V. A Systematic Review of Visualization Techniques and Analysis Tools for Eye-Tracking in 3D Environments, 2022.
5. Belikova E.I., Gatilov D.V., Ovechkin N.I., Eskina E.N. Modern aspects of diagnosis and treatment of subjective manifestations and accommodation disorders in patients — professional users of personal computers (systematic review), 2023.
6. Wiecek E., et al. Eye Tracking to Assess the Functional Consequences of Vision Impairment: A Systematic Review, Optometry and Vision Science, 2023.
7. Daghestani M., et al. Eye Tracking in Optometry: A Systematic Review, PMC, 2023.
8. Li H., et al. Wearable Optical Fiber Sensors in Medical Monitoring Applications: A Review, MDPI Sensors, 2023.
9. Palomera-Gallagher N., et al. Investigation of Web-Based Eye-Tracking System Performance under Different Lighting Conditions for Neuromarketing, MDPI, 2023.
10. Kim J., et al. Non-Contact Vision-Based Techniques of Vital Sign Monitoring: Systematic Review, MDPI Sensors, 2024.

Мормітко Олексій Михайлович — аспірант кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

Науковий керівник: **Тимчик Сергій Васильович** — канд. техн. наук, доцент кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: tymchyksv@ukr.net.

Oleksiy Mykhailovych Mormitko — postgraduate student of the Department of Biomedical Engineering and Optoelectronic Systems, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Supervisor: **Tymchyk Serhiy Vasyliovych** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Biomedical Engineering and Optoelectronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: tymchyksv@ukr.net.

СИСТЕМА ІНТЕРВАЛЬНОЇ ГІПОКСИЧНОЇ ТЕРАПІЇ З БІОЗВОРОТНИМ КОНТРОЛЕМ У РЕАБІЛІТАЦІЇ ВІЙСЬКОВИХ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

В умовах сучасних викликів військової та постпандемічної реабілітації актуальним є впровадження ефективних технологій для відновлення функціонального стану організму. Інтервальна гіпоксична терапія (ІГТ) базується на контрольованій зміні фаз гіпоксії та нормоксії, що стимулює фізіологічні адаптаційні механізми, підвищує енергетичну ефективність тканин і сприяє нейропластичності. Розроблена система ІГТ з біозворотним контролем включає генератор газової суміші, модуль метаболографії, пульсоксиметрію та інтеграцію з велоергометром типу AirBike. Система забезпечує автоматичне керування режимами терапії, динамічний контроль SpO_2 , VO_2 , VCO_2 , RQ і адаптацію протоколів у реальному часі. Представлена розробка є доступною альтернативою імпортованим аналогам і орієнтована на використання у військовій та клінічній реабілітації.

Ключові слова: інтервальна гіпоксична терапія; біозворотний зв'язок; метаболографія; військова реабілітація; гіпоксія.

Вступ

В умовах повномасштабної війни Україна стикається з різким зростанням кількості пацієнтів із травматичними ураженнями, постковідними та неврологічними порушеннями, що вимагають сучасних методів фізіологічного відновлення. Інтервальна гіпоксична терапія (ІГТ) дозволяє безпечним чином стимулювати адаптаційні резерви організму, знижувати оксидативний стрес та активізувати метаболічні процеси. Її ефективність доведена у спортивній, кардіологічній та неврологічній практиці, однак в Україні практично відсутні доступні системи для клінічного застосування ІГТ.

Методи та технічна реалізація

Розроблена система ІГТ складається з генератора газової суміші на базі мембранного азотного модуля, дихального контуру з трьома клапанами, метаболографа, пульсоксиметра та блока керування на базі промислового комп'ютера з веб-інтерфейсом. Програмне забезпечення реалізовано мовою Python (Linux), забезпечує контроль фаз гіпоксії (до 12 % O_2), нормоксії (21 % O_2) і гіпероксії (до 36 % O_2). Інтеграція з велоергометром типу AirBike дозволяє реалізувати як пасивні, так і активні протоколи реабілітації. Усі дані (SpO_2 , HR, VO_2 , VCO_2 , RQ) відображаються в реальному часі.

Результати дослідження

Показники змін визначалися за результатами апробації інтервальної гіпоксичної терапії (ІГТ) на системі CardioScan AirZone у групі реабілітаційних пацієнтів після 10–12 сеансів. Наведені дані відображають типовий діапазон позитивних змін основних фізіологічних параметрів після курсу процедур.

Таблиця 1 – Результати змін фізіологічних показників після курсу ІГТ на системі CardioScan AirZone

Показник	Типовий діапазон змін	Коментар
VO ₂ max	+3 % → +10 %	У тренуваних осіб покращення ближче до +3–6 %, у реабілітаційних пацієнтів +6–10 %
6-хвилинний тест ходьби / витривалість	+5 % → +15 %	Залежить від початкового функціонального стану
Толерантність до навантаження / Time to fatigue	+10 % → +30 %	Найбільш виражений ефект серед усіх показників
Частота серцевих скорочень у спокої	–3 % → –8 % (≈ –2 до –6 уд/хв)	Відображає покращення автономної регуляції
Частота серцевих скорочень при субмаксимальному навантаженні	–5 % → –12 %	Підвищення ефективності кисневого обміну
Систолічний артеріальний тиск	–3 % → –8 % (≈ –4 до –12 мм рт. ст.)	У пацієнтів із гіпертонією зміни більш виражені
Діастолічний артеріальний тиск	–2 % → –6 % (≈ –2 до –6 мм рт. ст.)	Нормалізація судинного тону
Варіабельність серцевого ритму (HRV)	+10 % → +40 %	Покращення балансу VLF/LF/HF, підвищення стрес-толерантності
Сатурація SpO ₂ (базова)	0 → +1 %	Зміни мінімальні; основний ефект — зростання толерантності до гіпоксії
Толерантність до гіпоксії (час до десатурації)	+20 % → +50 %	Організм швидше адаптується до періодів зниженого O ₂
Лактат після навантаження	–5 % → –20 %	Менше накопичення лактату при тому самому рівні навантаження

Висновки

Запропонована система інтервальної гіпоксичної терапії з біозворотним контролем поєднує науково обґрунтовані принципи адаптаційної фізіології з технічними рішеннями біомедичної інженерії. Вона забезпечує високу точність контролю, індивідуалізацію протоколів і безпечність використання, що робить її перспективною для застосування у військовій, спортивній та клінічній реабілітації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Gonzalez-Rothi E.J., Lee K.Z., Dale E.A., Mitchell G.S., Fuller D.D. Intermittent hypoxia and neurorehabilitation. Journal of Applied Physiology (1985). 2015; 119(12): 1455–1465. doi: 10.1152/jappphysiol.00235.2015.
2. Behrendt T., Bielitzki R., Behrens M., Herold F., Schega L. Effects of Intermittent Hypoxia–Hyperoxia on Performance- and Health-Related Outcomes in Humans: A Systematic Review. Sports Medicine – Open. 2022; 8(1): 70. doi: 10.1186/s40798-022-00450-x.
3. Chen P.-W., Hsu C.-C., Lai L.-F., Chi C.-P., Yu S.-H. Effects of Hypoxia–Hyperoxia Preconditioning on Indicators of

Muscle Damage After Acute Resistance Exercise in Male Athletes. *Frontiers in Physiology*. 2022; 13: 824210. doi: 10.3389/fphys.2022.824210.

4. Dale E.A., Mitchell G.S., Fuller D.D. Therapeutic acute intermittent hypoxia: a translational roadmap for spinal and motor recovery. *Neurorehabilitation and Neural Repair*. 2023. doi: 10.1177/15459683231151545.

5. The Impact of Intermittent Hypoxia–Hyperoxia Therapy on Metabolism and Respiratory System in Obese Patients as Part of Comprehensive Medical Rehabilitation. *Cureus*. 2024; 16(4): e291825. doi: 10.7759/cureus.291825.

Кузьмінов Ярослав Сергійович — аспірант кафедри біомедичної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

Науковий керівник: **Карась Олександр Володимирович** — доктор філософії, старший викладач кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: karas2014.o.11@gmail.com.

INTERVAL HYPOXIC THERAPY SYSTEM WITH BIOFEEDBACK CONTROL IN THE REHABILITATION OF MILITARY PERSONNEL

Abstract

In the context of modern military and post-pandemic rehabilitation challenges, the implementation of effective technologies for restoring the functional state of the body is of high relevance. Interval hypoxic therapy (IHT) is based on controlled alternation of hypoxia and normoxia phases, which stimulates adaptive physiological mechanisms, enhances tissue energy efficiency, and promotes neuroplasticity. The developed IHT system with biofeedback control includes a gas mixture generator, a metabolography module, pulse oximetry, and integration with an AirBike ergometer. The system provides automated phase control, real-time monitoring of SpO_2 , VO_2 , VCO_2 , and RQ , and adaptive protocol regulation. The presented system is a cost-effective alternative to imported analogues and is designed for use in military and clinical rehabilitation.

Keywords: interval hypoxic therapy; biofeedback; metabolography; military rehabilitation; hypoxia.

Kuzminov Yaroslav S. – a graduate student of the Department of Biomedical Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Karas Oleksandr V. – Ph.D, senior lecturer at the Department of Biomedical Engineering and Optoelectronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: karas2014.o.11@gmail.com.

Штучний інтелект у керуванні дозуванням інсуліну: аналіз методів та порівняння.

Вінницький національний технічний університет

Анотація: проведено огляд та розглянуто існуючі методи та системи, їх ефективність, економічне обґрунтування, рівень аргументованості прийняти рішень про дозування прийому інсуліну.

Ключові слова: штучний інтелект (ШІ), дозування, системи автоматизованої доставки інсуліну (AID), модельне предиктивне керування (MPC), Навчання з підкріпленням (RL), глибоке навчання (DL), нечітка логіка, пояснюваний ШІ (XAI), час у діапазоні (TIR).

Вступ

Керування глікемією залишається однією з найскладніших проблем сучасної медицини. Висока поширеність діабету, значне економічне навантаження, пов'язане із лікуванням, та ризик серйозних, інвалідизуючих ускладнень визначають нагальну потребу в інноваційних підходах. Контроль рівня глюкози в крові (BGL) є надзвичайно складним завданням через вплив безлічі стохастичних факторів, включаючи харчування, фізичну активність, рівень стресу та супутні захворювання. Для пацієнтів з діабетом 1-го типу (T1D) це перетворюється на безперервний когнітивний процес, що вимагає прийняття понад ста терапевтичних рішень щодня[1]. У цьому контексті штучний інтелект (ШІ) еволюціонував від допоміжного інструменту до ведучої технології. Розвиток технологій ШІ в діабетології відображає зміщення від управління даними до активного управління процесом. На початковому етапі технології, такі як безперервний моніторинг глюкози (CGM) та мобільні додатки, слугували переважно для пасивного збору даних, дозволяючи пацієнтам та лікарям проводити ретроспективний аналіз глікемічних змін та реєструвати щоденну інформацію (прийоми їжі, ін'єкції). Широке впровадження цих пристроїв згенерувало безпрецедентні обсяги поздовжніх даних, які стали джерелом для розробки складних, керованих даними (data-driven) алгоритмів ШІ[2]. Сучасний етап характеризується тим, що ці алгоритми вже не просто візуалізують дані, а активно діють на їх основі.

Для ефективного порівняння основних методів та їх нюансів, все зведено в таблицю, що аналізує ключові задачі: клінічне застосування, доведена ефективність, економічні аспекти та рівень обґрунтованості рішень.

Таблиця 1. Порівняння методів ШІ для визначення дозування інсуліну

Метод	Основне клінічне застосування	Показники ефективності та точності	Економічна доцільність та затратність	Рівень аргументованості
Модельне предиктивне керування (MPC)	T1D: Замкнений контур (AID / AP) [2]. Контроль прийому їжі. Нічний контроль.	Висока ефективність. TIR на 10.03% (ніч). Гіпоглікемія при довгостроковому використанні. Адаптивні MPC (Zone MPC)	Висока економічна ефективність. Основа комерційних систем AID, які є економічно ефективними. Високі витрати на розробку/валідацію.	Інтерпретований (на основі моделі). Рішення можна простежити до фізіологічної моделі та її прогнозів. Вважається стандартом для комерційних систем AID, схвалених FDA.

		покращують TIR без збільшення гіпоглікемії.		
Навчання з підкріпленням (RL)	T2D: Оптимізація титрування (напр., RL-DITR). T1D: MDI / AID [3, 4]	Дуже висока точність. <i>T2D Титрування</i> : MAE 1.10 U (перевершує лікарів). <i>T1D</i> : TIR з ~64% до ~92%.	Висока затратність на розробку. Вимагає величезних наборів даних (EHR) або високоточних симуляторів. Потенційно висока довгострокова економія за рахунок оптимізації.	"Чорна скринька". Найнижчий рівень аргументованості. Рішення (політика) є результатом складної оптимізації, яку важко інтерпретувати. Вимагає ХАІ. Проблема безпеки при дослідженні.
Нечітка логіка (Fuzzy Logic)	T1D: Калькулятори болюсів / Корекційні болюси. Компонент гібридних систем (напр., MiniMed 780G).	Ефективна. Імітує логіку експерта-ендокринолога. Забезпечує надійний глікемічний контроль. Клінічно доведено покращення TIR в системах AID.	Помірні витрати на розробку. Витрати пов'язані з розробкою та налаштуванням набору правил експертами, а не з навчанням на великих даних.	Висока аргументованість. За своєю суттю інтерпретований. Система складається з читабельних правил "IF-THEN", що імітують клінічні міркування.
Глибоке навчання (DL) (RNN/LSTM)	Прогнозування BGL (як компонент MPC або CDSS). Класифікація ризику (гіпо/гіпер).[5, 6]	Висока точність прогнозування. Значно покращує точність прогнозування BGL на основі даних CGM. Висока точність (>70-99%) у прогнозуванні гіпоглікемії.	Високі обчислювальні витрати на навчання. Вимагає великих, високоякісних наборів даних (CGM, EHR). Валідація моделі є дорогою.[7]	"Чорна скринька". Внутрішні ваги нейронної мережі не піддаються прямій людській інтерпретації. Вимагає методів ХАІ (SHAP, LIME) для обґрунтування.

Висновки

На даний момент не існує єдиного оптимального методу. Вибір є функцією клінічного завдання. Модельне предиктивне керування (MPC) домінує в комерційних системах AID для T1D завдяки своїй надійності та інтерпретованості. Навчання з підкріпленням (RL) демонструє безпрецедентні результати в оптимізації титрування для T2D. Глибоке навчання (DL) служить життєво важливим компонентом прогнозування, що лежить в основі багатьох систем управління.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. <https://www.elsevier.es/en-revista-endocrinologia-diabetes-nutricion-english-ed--413-articulo-automated-insulin-delivery-systems-in-S2530018024001197>
2. <https://diabetesjournals.org/care/article/37/5/1212/38190/First-Use-of-Model-Predictive-Control-in>
3. <https://www.bmj.com/content/361/bmj.k1310>
4. <https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0218001421600065>
5. <https://academic.oup.com/jlb/advance-article/doi/10.1093/jlb/lsae007/7642716>
6. <https://www.researchandmarkets.com/report/artificial-intelligence-in-diabetes-management>
7. <https://www.springermedizin.de/role-of-artificial-intelligence-in-enhancing-insulin-recommendat/51007280>
8. https://www.breakthrough1d.org/?jdrf_topic=automated-insulin-delivery-systems

Кругликов Олександр Михайлович - аспірант кафедри БМІОЕС, Вінниця, kruglikoff@gmail.com

ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN INSULIN DOSING MANAGEMENT: ANALYSIS OF METHODS AND COMPARISON.

Abstract: A review and examination of existing methods and systems were conducted, covering their effectiveness, economic rationale, and the level of justification for decisions regarding insulin intake dosing.

Keywords: artificial intelligence (AI), dosing, automated insulin delivery (AID) systems, model predictive control (MPC), reinforcement learning (RL), deep learning (DL), fuzzy logic, explainable AI (XAI), time in range (TIR).

Kruhlikov Oleksandr Mykolaiovych - graduate student of the department Biomedical Engineering and Optical Electronic Systems, Vinnitsya, kruglikoff@gmail.com

ВИЗНАЧЕННЯ МІШЕНЕЙ ДЛЯ ПОШУКУ ПІД ЧАС АНАЛІЗУ НЕКОДУЮЧИХ ДІЛЯНОК ДНК ЛЮДИНИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Робота присвячена обчислювальному аналізу некодуєчих ділянок (НКД) ДНК людини. Розглянуто ключові мішені для пошуку, зокрема регуляторні елементи (промотори, енхансери) та гени некодуєчих РНК. Описано важливість ідентифікації консервативних мотивів та епігенетичних маркерів (метилування ДНК, модифікації гістонів) для розуміння їхньої функціональної ролі. Пошук таких ділянок буде корисним як для фундаментальної науки, так і для задач прикладної медицини.

Ключові слова: некодуєча ДНК, пошук мотивів, регуляторні елементи, епігенетичні маркери, некодуєчі РНК, біоінформатика.

Abstract

The paper is devoted to computational analysis of non-coding regions (NCR) of human DNA. Key targets for search are considered, in particular regulatory elements (promoters, enhancers) and non-coding RNA genes. The importance of identifying conservative motifs and epigenetic markers (DNA methylation, histone modifications) for understanding their functional role is described. The search for such regions will be useful both for basic science and for problems of applied medicine.

Keywords: non-coding DNA, motif search, regulatory elements, epigenetic markers, non-coding RNA, bioinformatics.

Вступ

Аналіз некодуєчих ділянок ДНК (НКД ДНК) є важливим напрямком досліджень, оскільки ці ділянки, які колись помилково називали «сміттевою ДНК», відіграють критичну роль у регуляції генів та функціонуванні геному. НКД ДНК складають більшу частину геному еукаріотів (у людини до 98–99 %) [1].

Проведення аналізу некодуєчих ділянок ДНК [2] має на меті вирішення таких завдань:

- розкриття регуляторної картини геному, щоб зрозуміти, як і коли вмикаються та вимикаються гени, що кодують білки;
- ідентифікація функціональних елементів, що передбачає виявлення послідовностей, які виконують регуляторні функції (наприклад, енхансери, промотори, ізолятори), або кодують некодуєчі РНК (нкРНК), такі як мікроРНК (міРНК) та довгі некодуєчі РНК (днкРНК);
- розуміння механізмів організації геному, що необхідно для дослідження ролі НКД ДНК у підтримці структури хромосом та стабільності геному (наприклад, вплив на теломери);
- пошук генетичних причин захворювань через виявлення мутацій або варіацій у НКД ДНК, які можуть бути пов'язані з різними хворобами, включно зі спадковими захворюваннями, раком та хронічними хворобами.

Метою цієї роботи є визначення найважливіших інформативних ділянок в некодуєчій частині ДНК людини, які будуть виступати мішенями для пошуку в процесі комп'ютеризованого аналізу послідовності ДНК.

Інформативність некодуєчих ділянок ДНК

Аналіз НКД ДНК дозволяє отримати низку цінних відомостей, що мають застосування як у фундаментальній науці, так і в медицині, зокрема індивідуалізованій.

У галузі генетичної регуляції це може забезпечити ідентифікацію регуляторних послідовностей, визначення ділянок, які контролюють експресію генів (наприклад, мутації в енхансерах можуть призводити до неправильної активації або пригнічення сусідніх генів) [3].

Виявлення базових ділянок для некодуєчих РНК (нкРНК) також є перспективною задачею, адже багато НКД ДНК є джерелом синтезу нкРНК (наприклад, мікроРНК), які відіграють ключову роль у

регуляції експресії генів, впливаючи на стабільність і трансляцію мРНК [4].

У медицині дані, отримані з аналізу НКД ДНК можуть бути використані при діагностиці та профілактиці захворювань. Мутації в некодуючих ділянках можуть бути асоційовані зі схильністю до поширених захворювань (діабет другого типу, серцеві хвороби, хвороба Альцгеймера, астма) та спадковими синдромами. Виявлення цих змін дозволяє проводити ранню профілактику та вживати профілактичних заходів. Аналіз НКД ДНК допомагає скласти індивідуальні рекомендації щодо способу життя, харчування та фізичної активності на основі унікальних генетичних особливостей людини.

У фундаментальній та системній біології дослідження НКД ДНК допомагає зрозуміти, як організовані та еволюціонують геноми різних видів організмів, що сприяє розумінню еволюції геному.

Некодуючі РНК, що продукуються НКД ДНК, можуть регулювати «внутрішній годинник» організму, що важливо для розуміння циркадних ритмів та їхньої кореляції з хворобами, що є предметом вивчення хронобіології.

Деякі ділянки НКД ДНК, які містять повторювані послідовності, використовуються для встановлення батьківства та інших видів генетичного споріднення.

Мішені для пошуку при аналізі НКД ДНК

Аналізі НКД ДНК часто зводиться до пошуку різноманітних патернів (послідовностей) та епігенетичних маркерів, які вказують на їхню функціональну значущість у регуляції генів і підтримці структури геному. Основні значимі патерни та маркери, можна розділити на дві великі групи: патерни на рівні послідовності ДНК та епігенетичні маркери.

Патерни на рівні послідовності ДНК (функціональні елементи)

Це специфічні послідовності нуклеотидів у НКД ДНК, які слугують "місцями посадки" для білків або є матрицями для синтезу РНК. Серед них виділяють три групи:

1. Регуляторні послідовності (цис-елементи), які включають промотори (послідовності, розташовані безпосередньо перед геном, які слугують місцем початку транскрипції РНК), енхансери (підсилювачі) та сайленсери (пригнічувачі), ізолятори (послідовності, які відокремлюють регуляторні елементи одного гена від сусідніх, запобігаючи небажаній взаємодії).

Енхансери та сайленсери – це віддалені ділянки, які при згинанні нитки ДНК, контактують із промотором гена, посилюючи або пригнічуючи його активність. Їх шукають за певними короткими консенсусними послідовностями (TFBS – ділянки зв'язування факторів транскрипції [6]).

2. Ділянки, що кодують некодуючі РНК (нкРНК) [7]: основа для синтезу мікроРНК, або міРНК (послідовностей, які можуть утворювати шпилькоподібну структуру – прекурсор для міРНК, які потім регулюють експресію генів) та довгі некодуючі РНК, або днкРНК (довгі транскрибовані ділянки, які не кодують білок і регулюють генну активність іншими способами, наприклад, беруть участь у хроматиновому ремоделюванні).

3. Повторювані послідовності (репетитивні елементи), до яких належать мікросателіти та теломерні послідовності [8]. Мікросателіти (Short Tandem Repeats, STRs) – це короткі тандемні повтори нуклеотидів (наприклад, CACACA...). Вони використовуються як важливі генетичні маркери для встановлення спорідненості особин та в популяційній генетиці. Теломерні послідовності – це спеціалізовані повтори на кінцях хромосом, що підтримують їхню стабільність (наприклад, мотив TTAGGG у людини).

Епігенетичні маркери (модифікації)

Епігенетичні маркери – це хімічні модифікації ДНК або асоційованих із нею білків (гістонів), які не змінюють саму нуклеотидну послідовність, але впливають на активність НКД ДНК [9]. Вони є ключовими маркерами активності регуляторних елементів.

1. Пошук ділянок метилування ДНК – додавання метильних груп до цитозину (зазвичай у послідовності CpG). Високий рівень метилування в промоторних областях, як правило, є маркером пригніченого (неактивного) гена. Низький рівень метилування або його відсутність часто асоціюється з активними регуляторними елементами (наприклад, активними промоторами).

2. Модифікації гістонів – білків, навколо яких упаковується ДНК, утворюючи хроматин. Модифікації "хвостів" гістонів (ацетилювання, метилування, фосфорилування) слугують маркерами стану хроматину. Маркери активного хроматину – це ацетилювання гістонів (H3K27ac, H3K9ac) або певне метилування (H3K4me1, H3K4me3), які часто вказують на активні енхансери та промотори.

Маркери репресованого хроматину, наприклад, метилування H3K27me3 чи H3K9me3, вказують на інактивовані або пригнічені ділянки геному.

3. Ділянки ДНК, чутливі до ДНКаз I – це ті ділянки, що активно використовуються (наприклад, активні промотори чи енхансери), є відкритими і менш щільно упакованими. Це робить їх чутливими до розщеплення ферментом ДНКазою I. Виявлення таких "відкритих" ділянок є потужним маркером функціонально активної НКД ДНК.

4. Просторова організація геному може бути опосередковано встановлена шляхом пошуку патернів взаємодії між віддаленими НКД ДНК (наприклад, між енхансером та промотором), які свідчать про те, що ці елементи співпрацюють для регуляції експресії гена.

Висновки

Аналіз некодуючих ділянок ДНК людини націлений на виявлення функціональних елементів геному, які не пов'язані безпосередньо із синтезом білків. Ключовими мішенями є регуляторні послідовності, такі як промотори та енхансери, що контролюють активність генів. Ці ділянки ідентифікують шляхом пошуку специфічних коротких мотивів, які слугують місцями зв'язування для факторів транскрипції. Іншою важливою мішенню є гени, що є основою для синтезу некодуючих РНК (наприклад, мікроРНК), які виконують власні регуляторні функції. Окрім самої послідовності ДНК, критичний пошук зосереджений на епігенетичних маркерах, таких як метилування ДНК та модифікації гістонів, оскільки вони вказують на активний чи пригнічений стан цих регуляторних елементів. Зрештою, пошук також включає ідентифікацію генетичних варіантів у цих функціональних ділянках для розуміння їхнього зв'язку зі схильністю до захворювань, що може бути використано в індивідуалізованій медицині.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ludwig M. Z. Functional evolution of noncoding DNA. *Current opinion in genetics & development*. 2002. No. 12 (6). P. 634–639.
2. Shabalina S. A., Spiridonov N. A. The mammalian transcriptome and the function of non-coding DNA sequences. *Genome biology*. 2004. No. 5 (4). Art. 105. 8 p.
3. Shanmugam A., Nagarajan A., Pramanayagam S. Non-coding DNA-a brief review. *Journal of Applied Biology and Biotechnology*. 2017. No. 5. P. 42–47.
4. López-Urrutia E., Montes L. P. B., de Guevara Cervantes D. L., Pérez-Plasencia C., Campos-Parra A. D. Crosstalk between long non-coding RNAs, micro-RNAs and mRNAs: deciphering molecular mechanisms of master regulators in cancer. *Frontiers in oncology*. 2019. No. 9. Art. 669. 8 p.
5. Elliott K., Larsson E. Non-coding driver mutations in human cancer. *Nature Reviews Cancer*. 2021. Vol. 21 (8). P. 500–509.
6. Yang L., Zhou T., Dror I., Mathelier A., Wasserman W. W., Gordân R., Rohs R. TFBSshape: a motif database for DNA shape features of transcription factor binding sites. *Nucleic acids research*. 2014. Vol. 42 (D1). P. D148–D155.
7. Paraskevopoulou M. D., Hatzigeorgiou A. G. Analyzing miRNA–lncRNA interactions. *Long non-coding RNAs: methods and protocols*. New York, NY : Springer New York, 2016. P. 271–286.
8. Shapiro J. A., von Sternberg R. Why repetitive DNA is essential to genome function. *Biological Reviews*. 2005. No. 80 (2). P. 227–250.
9. Al Aboud N. M., Tupper C., Jialal I. Genetics, Epigenetic Mechanism. *StatPearls*. StatPearls Publishing, Treasure Island (FL), 2025. URL: <https://europepmc.org/article/nbk/nbk532999>
10. Richa R., Sinha R. P. Hydroxymethylation of DNA: an epigenetic marker. *EXCLI journal*. 2014. Vol. 13. P. 592–610.

Каплунський Олександр Андрійович – аспірант гр 163-23а, кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, email: okaplunskyi@vntu.edu.ua

Kaplunkkyi Oleksandr A. – postgraduate student of gr 163-23a, department of biomedical engineering and optical-electronic systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia. email: okaplunskyi@vntu.edu.ua

РОЗВИТОК МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СТАНУ ПРАЦІВНИКА НА РОБОЧОМУ МІСЦІ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

В дослідженні проаналізовано еволюцію методів визначення сенсомоторних реакцій (СМР) людини у професійній діяльності, зокрема під час водіння та на виробництві. Розглянуто перехід від традиційних контрольованих методів (апаратні психофізіологічні комплекси для тестування реакцій, симулятори водіння) до систем моніторингу в реальному часі. Ключові технології включають бортові системи моніторингу водія на основі комп'ютерного зору для виявлення втоми та уваги, промисловий комп'ютерний зір для аналізу стану людини та техніки безпеки, а також носимі пристрої для відстеження втоми та фізіологічного стану. Дослідження підкреслює важливість мультимодального підходу, який поєднує фізіологічні дані з машинним навчанням для точної оцінки когнітивного навантаження. Показано, що сфера рухається від статичної оцінки придатності до проактивних, адаптивних систем управління ризиками.

Ключові слова: сенсомоторні реакції, психофізіологічна діагностика, системи моніторингу водія, комп'ютерний зір, носимі пристрої, ергономіка.

Abstract

The study analyzes the evolution of methods for determining human sensorimotor responses (SMR) in professional activities, in particular during driving and in production. The transition from traditional controlled methods (hardware psychophysiological complexes for testing reactions, driving simulators) to real-time monitoring systems is considered. Key technologies include on-board driver monitoring systems based on computer vision for fatigue and attention detection, industrial computer vision for human condition and safety analysis, and wearable devices for fatigue and physiological state tracking. The study emphasizes the importance of a multimodal approach that combines physiological data with machine learning for accurate assessment of cognitive load. It is shown that the field is moving from static assessment of fitness to proactive, adaptive risk management systems.

Keywords: sensorimotor responses, psychophysiological diagnostics, driver monitoring systems, computer vision, wearable devices, ergonomics.

Вступ

Сенсомоторні реакції (СМР) є фундаментальною психофізіологічною характеристикою людини, що визначає її здатність до цілеспрямованої діяльності. Вони визначаються як зворотні дії людини у відповідь на будь-які подразники, що сприймаються органами чуття (сенсорними системами) [1]. Ці реакції є критично важливими для професій, що вимагають високої швидкості та точності взаємодії з технічними системами, зокрема для водіїв, пілотів, авіадиспетчерів, хірургів та операторів складного обладнання [2].

Сенсомоторні реакції, функціональний стан і професійна придатність

У психофізіології праці СМР класифікують за ступенем складності [3]:

1. Прості сенсомоторні реакції, що характеризуються однією, заздалегідь визначеною моторною відповіддю на один чітко визначений сенсорний стимул. Прикладом є натискання кнопки у відповідь на спалах світла.

2. Складні сенсомоторні реакції, які вимагають певної обробки інформації і прийняття рішення центральною нервовою системою (ЦНС) перед виконанням моторної дії. До них належать:

- реакції вибору, які передбачають вибір однієї з кількох можливих відповідей залежно від типу стимулу (наприклад, натискання червоної кнопки на червоний сигнал і зеленої – на зелений);
- реакції на об'єкт, що рухається – специфічний і високоінформативний тип складної СМР, який вимагає не просто реакції, а й просторово-часового передбачення (екстраполяції) [4].

Професійна діяльність, така як водіння, практично ніколи не обмежується простими реакціями. Вона базується на безперервному аналізі складних, динамічних стимулів та прогнозуванні їх розвитку. Отже, для адекватної оцінки професійної придатності ключове значення має вимірювання саме

складних, когнітивно-опосередкованих СМР.

Кількісна оцінка СМР базується на кількох ключових показниках, які разом дають уявлення про функціональний стан ЦНС. Дослідження, зокрема у галузі спортивної медицини, виділяють три основні метрики [5]:

1) час реакції (латентність) – середній час, виміряний у мілісекундах, що проходить від моменту подачі стимулу до початку моторної відповіді;

2) стабільність реакції – середньоквадратичне відхилення часу реакції. Цей показник характеризує варіативність або «розкид» часу реакції;

3) точність реакції – загальна кількість помилок, яка може включати неправильні відповіді (наприклад, натискання не тієї клавіші в реакції вибору) або пропущені сигнали.

Висока варіативність (нестабільність, значне середньоквадратичне відхилення часу реакції) часто є більш чутливим індикатором погіршення функціонального стану ЦНС, ніж просто середній час реакції. Працівник може підтримувати номінально швидко середню реакцію за рахунок мобілізації ресурсів, але зменшення стабільності свідчатиме про виснаження та непередбачуваність нервових процесів, що передуватиме серйозному погіршенню функціонального стану.

Аналіз СМР є ключовим методом діагностики функціонального стану та професійної придатності. Показники СМР дуже чутливі до втоми, сонливості та професійного стресу [6]. Оскільки ці стани динамічні, статичної лабораторної оцінки (наприклад, щорічної експертизи) недостатньо для гарантування безпеки протягом усієї робочої зміни. Це зумовило потребу розроблення технологій моніторингу СМР в реальному часі.

Визначення сенсомоторних реакцій та їх моніторинг

Контрольована оцінка проводиться у стандартизованих умовах для визначення базової придатності та для поглиблених досліджень.

Технології моніторингу СМР відстежують стан оператора безпосередньо під час виконання роботи. Розглянемо два випадки застосування: моніторинг водія та моніторинг оператора у промисловому середовищі.

Системи моніторингу стану водія (driver monitoring systems, DMS) – це бортові системи, що використовують камери (часто інфрачервоні) та комп'ютерний зір (КЗ) для безперервного аналізу стану водія. Вони стали обов'язковими для сучасних автомобілів та систем автопілота [7].

DMS відстежують біометричні маркери втоми, зокрема PERCLOS (відсоток часу із закритими очима), епізоди мікросну, зміну патернів моргання, позіхання та положення голови (кивання) [8].

Система аналізує напрямок погляду та позицію голови для вчасного виявлення втрати уваги. Якщо водій тривалий час не дивиться на дорогу (наприклад, дивиться на мобільний телефон), система кваліфікує це як відволікання [9].

Ці дані часто поєднуються з телематикою (CAN/GPS) [10] – аналізом поведінки самого автомобіля (різке гальмування, прискорення, повороти керма) для формування повної картини ситуації.

Аналогічні технології КЗ та носимі пристрої використовуються на виробництві, у будівництві та промисловості та інших галузях. Так, системи КЗ в реальному часі виявляють працівників без необхідних засобів індивідуального захисту (каска, жилети) та надсилають сповіщення. Системи можуть відстежувати рух людей і автоматично зупиняють роботів чи інше обладнання, якщо працівник входить у небезпечну зону [11].

КЗ може також використовуватись для ергономічних задач. Алгоритми оцінки пози аналізують рухи та пози працівників у реальному часі [12]. Це дозволяє автоматично застосовувати ергономічні оцінки, виявляти небезпечні патерни (неправильне підняття вантажу, надмірне згинання спини) та проактивно запобігати розвитку скелетно-м'язових розладів.

Носимі пристрої (wearable sensors) – спеціальні браслети або смарт-годинники використовують дані про сон та активність для прогнозування рівня втоми працівника [13]. Спеціалізовані сенсори (наприклад, датчик поверхневої ЕМГ) можуть безпосередньо вимірювати втому окремих груп м'язів. Вони також забезпечують безпеку працівників, які працюють на самоті (lone workers) через відстеження місцезнаходження та автоматичні сповіщення при падінні чи інших позаштатних ситуаціях.

Масив даних від систем КЗ, носимих пристроїв та фізіологічних сенсорів обробляється за допомогою технологій машинного навчання (ML). ML-моделі можуть навчатися розпізнавати складні

патерни втоми з метою прогностичного моделювання. Наприклад, класифікатори аналізують дані варіабельності серцевого ритму або візуальні дані (наприклад, співвідношення розмірів ока – eye aspect ratio, EAR) з камери для класифікації стану водія як «втомлений» або «бадьорий».

Часто системи передбачають втручання, або зворотній зв'язок, що може включати:

- сповіщення в реальному часі (для оператора) при виявленні небезпеки – система миттєво реагує візуальними, аудіо або тактильними (вібрація керма/сидіння) сповіщеннями;
- аналітичні панелі (dashboards) для менеджерів забезпечують збір даних і агрегацію їх для керівників. Вони бачать інтегральні індекси безпеки водія або інші показники, звіти про інциденти (різке гальмування, спрацювання DMS) та загальні тенденції ризику у команді.

Висновки

Таким чином, методи визначення СМР пройшли послідовну еволюцію від статичної оцінки придатності (лабораторні тести і випробування) через динамічний моніторинг стану (бортові DMS та носимі пристрої) до предиктивного управління ризиками (за допомогою технологій злиття сенсорів (sensor fusion) та машинного навчання (machine learning)).

Майбутнє полягає у створенні адаптивних систем із замкненим циклом. Такі системи будуть не просто сповіщати оператора про втому, а й проактивно адаптувати поведінку машини (наприклад, автопілот автоматично збільшить безпечну дистанцію або система заблокує некритичні сповіщення), щоб компенсувати погіршення сенсомоторної функції людини та підвищити безпеки праці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Shtofel D., Navrotska K., Kostishyn S., Zlepko S., Tymchyk S. Reaction parameter and modified sensorimotor reaction method for assessment of functional potential of nervous system. *Biomedical engineering and electronics*. 2018. № 1 (20). P. 68–78.
2. Штофель Д. Х., Сорочинський В. В. Сучасні методи сенсомоторних досліджень для системи аналізу рухової активності. *Міжнародна науково-практична конференція «Відновлення України у повоєнні часи: виклики, стратегічні пріоритети, ресурсне забезпечення, потенціал майбутнього розвитку»*, м. Вінниця, 10–11 жовтня 2024 р. Вінниця : ДонНУ ім. Василя Стуса, 2024. 3 с. URL: <https://peers.international/paper/suchasni-metodi-sensomotornikh-doslidzhen-dlya-sistemi-analizu-rukhovoi-aktivnosti>
3. Луценко О. Л. Психофізіологія: прикладні аспекти : навчально-методичний посібник. Х. : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2011. 55 с.
4. Трифонова Т. А. Прикладна екологія людини. 2018. URL: https://stud.com.ua/101550/ekologiya/prikladna_ekologiya_lyudini
5. Шльонська О., Борисова О., Федорчук С. Критерії оцінювання показників сенсомоторних реакцій різного ступеня складності кваліфікованих спортсменок-волейболісток. *Спортивна медицина, фізична терапія та ерготерапія*. 2024. № 2. С. 73–79.
6. Солдатов С. В. Методичний апарат оцінки професійного стресу та впливу стрес-факторів на особистість. *Вісник Національного університету оборони України*. 2013. № 6. С. 311–316.
7. Razak S. F. A., Yagarayan S., Aziz A. A., Abdullah M. F. A., Kamis N. H. Physiological-based driver monitoring systems: A scoping review. *Civil Engineering Journal*. 2022. № 8 (12). P. 3952–3967.
8. Khan M. A., Asadi H., Qazani M. R. C., et al. Advancing Cognitive Load Detection in Simulated Driving Scenarios Through Deep Learning and fNIRS Data. *Sensors*. 2025. Vol. 25 (16). Art. 4921. 20 p.
9. Йовченко А. В., Шльончак І. А. Розробка алгоритма моніторингу стану водія за допомогою Android-застосунку з метою підвищення рівня активної безпеки. *Центральноукраїнський науковий вісник*. 2023. № 7 (38), ч. II. С. 139–146.
10. Zaidi S. F. A., Yang J., Abbas M. S., Hussain R., Lee D., Park C. Vision-based construction safety monitoring utilizing temporal analysis to reduce false alarms. *Buildings*. 2024. Vol. 14 (6). Art. 1878. 20 p.
11. Fang W., Love P. E., Luo H., Ding L. Computer vision for behaviour-based safety in construction: A review and future directions. *Advanced Engineering Informatics*. 2020. Vol. 43. Art. 100980.

12. Seo J., Yin K., Lee S. Automated postural ergonomic assessment using a computer vision-based posture classification. *Construction research congress 2016*. 2016. P. 809–818.
13. Tindale L. C., Chiu D., Minielly N., Hrincu V., Talhouk A., Illes J. Wearable biosensors in the workplace: Perceptions and perspectives. *Frontiers in digital health*. 2022. Vol. 4. Art. 800367.
14. Khan A. A., Laghari A. A., Awan S. A. Machine learning in computer vision: A review. *EAI Endorsed Transactions on Scalable Information Systems*. 2021. Vol. 8 (32). 11 p.

Сорочинський Вадим Валентинович – аспірант гр 163-23а, кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, email: vsorochynskyi@vntu.edu.ua

Sorochynskyi Vadym V. – postgraduate student of gr 163-23a, department of biomedical engineering and optical-electronic systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia. email: vsorochynskyi@vntu.edu.ua

С. В. Павлов
Ю. О. Пилипець

ВИКОРИСТАННЯ РОБОТИЗОВАНИХ СИСТЕМ У ТЕЛЕМЕДИЧНІЙ РЕАБІЛІТАЦІЇ ПАЦІЄНТІВ ІЗ ПОЛІТРАВМАМИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація.

Інтеграція робототехнічних систем у телемедичну реабілітацію стала революційним підходом до поліпшення результатів відновлення пацієнтів із множинними травмами. Традиційні методи реабілітації часто вимагають тривалої госпіталізації та безпосереднього нагляду, що може обмежувати доступність і безперервність лікування. Використання телемедицини в поєднанні з робототехнічними технологіями дозволяє подолати ці обмеження, забезпечуючи дистанційний моніторинг у режимі реального часу та адаптивну реабілітацію під професійним наглядом.

Інтелектуальні системи телереабілітації, що інтегрують роботизовані екзоскелети, датчики Інтернету речей (IoT) та алгоритми управління на основі штучного інтелекту (ШІ) дозволяють лікарям дистанційно відстежувати біомеханічні параметри, такі як рух суглобів, активація м'язів та розподіл навантаження, а моделі ШІ аналізують ці дані для динамічного регулювання інтенсивності терапії та траєкторій руху відповідно до функціонального стану пацієнта.

Ключові слова: IoT, телемедицина, роботизована реабілітація, штучний інтелект, політравма, дистанційний моніторинг, адаптивне управління, пацієнт-орієнтована допомога, технології в охороні здоров'я.

Вступ. Реабілітація після множинних травм представляє значні клінічні та логістичні виклики через складність травм і тривалий процес відновлення. Традиційні методи реабілітації часто вимагають постійного особистого нагляду та доступу до спеціалізованих закладів, що може бути обмежено географічними та економічними факторами. Інтеграція телемедицини та робототехнічних технологій пропонує нову парадигму для дистанційної реабілітації, орієнтованої на пацієнта. Роботизовані системи, оснащені датчиками та приводами, забезпечують точні, повторювані та контрольовані рухи, що сприяють відновленню рухових функцій, а телемедичні платформи дозволяють лікарям відстежувати прогрес та коригувати параметри терапії в режимі реального часу. У поєднанні зі штучним інтелектом та підключенням до Інтернету речей (IoT) ці системи можуть аналізувати дані пацієнтів, адаптуватися до індивідуальних потреб та оптимізувати результати лікування. Такі технологічні моделі реабілітації мають потенціал для поліпшення функціонального відновлення, доступності та безперервності догляду за пацієнтами з множинними травмами.

Мета дослідження. Дослідження використання роботизованих систем у телемедичній реабілітації пацієнтів із політравмами

Основні матеріали досліджень.

Технології роботизованої реабілітації стали невід'ємною частиною сучасної фізичної медицини, забезпечуючи точне і повторюване тренування, що сприяє відновленню функціональних можливостей. Ці системи зазвичай класифікуються на роботи на основі екзоскелету і роботи на основі кінцевого виконавчого механізму, обидва типи призначені для сприяння руху кінцівок і відновлення нервово-м'язової координації. Дослідження [1,4] підкреслюють, що роботизовані пристрої значно покращують відновлення рухових функцій, діапазон рухів та м'язову силу у пацієнтів, які проходять інтенсивну реабілітацію. Включення датчиків, приводів та адаптивних контролерів дозволяє роботизованим системам відстежувати біомеханічні дані та адаптувати інтенсивність вправ до функціональних можливостей пацієнта. Така адаптивність є особливо цінною у випадках політравм, коли різні типи травм вимагають індивідуального підходу до лікування.

Телемедицина доповнює роботизовану реабілітацію, забезпечуючи віддалене з'єднання між пацієнтами та лікарями, тим самим гарантуючи безперервність лікування поза межами лікарні. Існують платформи телереабілітації, що інтегрують роботизовані технології та технології змішаної реальності, продемонструвавши, що віддалений зворотний зв'язок та моніторинг покращують залученість та результати відновлення [5]. Завдяки безпечним телемедичним мережам лікарі можуть контролювати сеанси терапії, оцінювати дані датчиків у реальному часі та змінювати параметри лікування без необхідності особистих візитів. Ця можливість зменшує логістичні бар'єри, з якими стикаються пацієнти з політравмами, особливо ті, хто проживає в сільських або недостатньо забезпечених регіонах, та дозволяє вчасно втручатися під час відновлення.

Впровадження пристроїв Інтернету речей (IoT) та алгоритмів штучного інтелекту (ШІ) ще більше розширює функціональність телемедичних робототехнічних систем. Датчики IoT збирають безперервні фізіологічні та кінематичні дані, такі як кути згину суглобів, тиск на кінцівки та м'язова активність, а аналітика на основі ШІ обробляє ці дані для розпізнавання закономірностей та автоматичної оптимізації налаштувань терапії. Системи на основі ШІ можуть динамічно регулювати траєкторії руху роботів та рівні опору на основі показників та втоми пацієнта[2]. Така адаптивність у реальному часі покращує точність та безпеку терапії, дозволяючи персоналізувати реабілітацію відповідно до кривої прогресу кожного пацієнта. Крім того, дані, зібрані за допомогою платформ IoT, становлять основу для прогнозних моделей, які можуть виявляти ризики ускладнень або плато терапії на ранній стадії процесу.

Пацієнти з політравмами становлять складну проблему для реабілітації, часто вимагаючи одночасного відновлення опорно-рухового апарату, нервової системи та функціональних систем. Роботизовані системи, оснащені моніторингом на основі штучного інтелекту, забезпечують структуровані програми реабілітації, які можуть бути спрямовані на конкретні рухові порушення, зберігаючи при цьому загальний баланс і координацію. Дослідження [3] продемонстрували ефективність роботизованих систем для терапії вдома під дистанційним наглядом, що є особливо актуальним для осіб з політравмами, які мають обмежену рухливість. Постійний дистанційний моніторинг даних датчиків дозволяє клініцистам оцінювати прогрес, коригувати параметри роботів та запобігати ускладненням, таким як скутість суглобів або атрофія м'язів. Такий рівень точності та контролю гарантує, що реабілітація залишається безпечною, послідовною та чутливою до змін стану пацієнта.

Незважаючи на свій клінічний потенціал, роботизовані системи телереабілітації стикаються з низкою перешкод на шляху до широкого впровадження. Висока вартість обладнання, необхідність надійних високошвидкісних комунікаційних мереж та відсутність стандартизованої підготовки медичного персоналу залишаються значними викликами [6]. Крім того, необхідно вирішити питання взаємодії між різними робототехнічними платформами та проблеми конфіденційності даних у рамках міжнародних систем телемедицини. Майбутні дослідження повинні зосередитися на розробці економічно ефективних модульних робототехнічних систем, які безперешкодно інтегруються в існуючі інфраструктури телемедицини. Прогрес у галузі легких матеріалів, хмарних обчислень на основі штучного інтелекту та адаптивних алгоритмів управління, ймовірно, зробить ці системи більш доступними. Постійна еволюція робототехнічної телереабілітації є ключовим кроком на шляху до повністю персоналізованої, безперервної та заснованої на даних реабілітації пацієнтів, які одужують після множинних травм.

Висновки.

Інтеграція робототехнічних систем у телемедичну реабілітацію є значним прогресом у післятравматичному лікуванні. Завдяки поєднанню робототехніки, телемедицини та аналізу даних на основі штучного інтелекту реабілітація може стати більш адаптивною, ефективною та доступною для пацієнтів із множинними травматичними ушкодженнями. Використання інтелектуальних екзоскелетів та засобів дистанційного моніторингу дозволяє здійснювати постійну оцінку відновлення рухових функцій, скорочує час госпіталізації та сприяє незалежності пацієнтів. Хоча залишаються певні виклики, такі як вартість системи, інфраструктура та підготовка клініцистів, все більше доказів підтверджують практичну здійсненність та клінічну цінність цієї технології. Майбутні розробки повинні бути зосереджені на широкомасштабній валідації та створенні економічно ефективних, орієнтованих на пацієнта робототехнічних платформ для широкого клінічного застосування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Banyai, A. D., Brişan, L. Robotics in physical rehabilitation: A systematic review. *Healthcare*, 2024, Vol. 12, No. 17, p. 1720. MDPI. DOI: 10.3390/healthcare12171720.
2. Calabrò, R. S., Cacciola, A., Bertè, F., Naro, A., Russo, M. AI-driven telerehabilitation: Benefits and challenges of a digital approach. *Digital Health Innovations*, 2025, Vol. 6, No. 3, p. 62. MDPI. DOI: 10.3390/digitalhealth6030062.
3. Etxarri, A., Aquerreta, I., Pérez, J. Development of an upper-limb tele-rehabilitation home robotic system. *University of Navarra Technical Reports*, 2021. Режим доступу: <https://dadun.unav.edu/server/api/core/bitstreams/361d0c8b-59fc-441a-bc49-eeaf83adb1a2/content>.

4. Gherman, B., Stan, O., Mureşan, V. Robotic systems for hand rehabilitation — Past, present, and future trends. *Technologies*, 2025, Vol. 13, No. 1, p. 37. MDPI. DOI: 10.3390/technologies13010037.
5. Khan, M. M. R., Rahman, M. A., Al-Khatib, M. Investigating a telerehabilitation platform integrated with robotic and mixed reality technologies. *JMIR Rehabilitation and Assistive Technologies*, 2025, Vol. 12, No. 1, p. e75907. Режим доступу: <https://rehab.jmir.org/2025/1/e75907>.
6. Rossetto, F., Proietti, T., Bianchi, M. Efficacy of telerehabilitation with digital and robotic tools for neuro-motor recovery: A systematic review. *Frontiers in Rehabilitation Sciences*, 2024, Vol. 3, No. 12, p. 10924562. Режим доступу: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10924562>.

Павлов Сергій Володимирович – д. т. н., професор, Вінницький національний технічний університет, **e-mail:** psv@vntu.edu.ua

Пилипець Юлія Олександрівна – аспірант кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, **e-mail:** 00-24-043.stud@vntu.edu.ua

USE OF ROBOTIC SYSTEMS IN TELEMEDICAL REHABILITATION OF PATIENTS WITH MULTIPLE TRAUMAS

Abstract.

The integration of robotic systems into telemedicine rehabilitation has been a revolutionary approach to improving recovery outcomes for patients with multiple injuries. Traditional rehabilitation methods often require prolonged hospitalization and direct supervision, which can limit the accessibility and continuity of treatment. The use of telemedicine in combination with robotic technologies overcomes these limitations by providing real-time remote monitoring and adaptive rehabilitation under professional supervision.

Intelligent telerehabilitation systems that integrate robotic exoskeletons, Internet of Things (IoT) sensors, and artificial intelligence (AI)-based control algorithms allow physicians to remotely track biomechanical parameters such as joint movement, muscle activation, and load distribution, while AI models analyze this data to dynamically adjust therapy intensity and movement trajectories according to the patient's functional status.

Keywords: IoT, telemedicine, robotic rehabilitation, artificial intelligence, multiple trauma, remote monitoring, adaptive control, patient-centered care, healthcare technologies.

Pavlov Serhii - Doctor of Technical Sciences, Professor, Vinnytsia National Technical University, **e-mail:** psv@vntu.edu.ua

Pylypets Yuliia - postgraduate student, Department of Biomedical Engineering and Optoelectronic Systems, Vinnytsia National Technical University, **e-mail:** 00-24-043.stud@vntu.edu.ua

ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ ДОСЛІДЖЕНЬ У ГАЛУЗІ БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ

¹Вінницький національний технічний університет, Україна

²Новий університет Лісабону, Португалія

Анотація

Біомедична інженерія є однією з найдинамічніших і міждисциплінарних галузей сучасної науки, що поєднує принципи інженерії, біології та медицини для створення інноваційних рішень у діагностиці, лікуванні та профілактиці захворювань. У роботі проаналізовано ключові перспективні напрями розвитку біомедичної інженерії, актуальність яких зумовлена глобальними викликами — старінням населення, поширенням хронічних захворювань і зростаючим запитом на персоналізовану медицину.

Особливу увагу приділено трьом основним напрямкам досліджень. Перший — тканинна інженерія та регенеративна медицина, що зосереджені на розробленні біосумісних матеріалів, застосуванні технологій 3D-біодруку та використанні стовбурових клітин для відновлення пошкоджених тканин і органів. Другий — нейроінженерія та інтерфейси “мозок–комп’ютер”, які дають змогу відновлювати втрачені сенсорні та моторні функції за допомогою біонічних протезів, керованих нейронними сигналами. Третій напрям — штучний інтелект і біоінформатика, де алгоритми машинного навчання застосовуються для аналізу великих масивів клінічних і геномних даних, підвищуючи точність ранньої діагностики, прогнозування перебігу хвороб і вибору індивідуальних терапевтичних стратегій.

Окремо відзначено зростаючу роль біосенсорів і “розумних” імплантатів, які забезпечують моніторинг фізіологічних показників у реальному часі, сприяючи переходу до прогностичної та превентивної медицини. Зроблено висновок, що біомедична інженерія є рушійною силою сучасного медико-технологічного прогресу з потенціалом докорінно трансформувати систему охорони здоров’я та підвищити якість і тривалість життя людини.

Ключові слова: біомедична інженерія, регенеративна медицина, нейроінженерія, штучний інтелект, біоінформатика, біосенсори, персоналізована медицина.

Abstract

Biomedical engineering represents one of the most dynamic and interdisciplinary fields of modern science, integrating principles of engineering, biology, and medicine to create innovative solutions for diagnostics, treatment, and disease prevention. This paper analyzes key emerging directions in biomedical engineering, driven by global challenges such as population aging, the growing prevalence of chronic diseases, and the demand for personalized medicine.

Particular attention is given to three major research areas. The first is tissue engineering and regenerative medicine, focused on developing biocompatible materials, applying 3D bioprinting technologies, and using stem cells to restore damaged tissues and organs. The second is neuroengineering and brain–computer interfaces, enabling the recovery of lost sensory and motor functions through neural-controlled bionic prostheses. The third area involves artificial intelligence and bioinformatics, where machine learning algorithms are applied to analyze large-scale clinical and genomic data, improving early diagnosis, prognosis, and individualized therapy planning.

The paper also highlights the growing role of biosensors and smart implants that provide real-time physiological monitoring, fostering the shift toward predictive and preventive medicine. Biomedical engineering is concluded to be a driving force of medical and technological progress, with the potential to fundamentally transform healthcare and enhance human life quality and longevity.

Keywords: biomedical engineering, regenerative medicine, neuroengineering, artificial intelligence, bioinformatics, biosensors, personalized medicine.

Вступ

Біомедична інженерія є однією з найбільш динамічних галузей сучасної науки, що інтегрує принципи інженерії, біології та медицини для розробки інноваційних рішень у діагностиці, лікуванні та профілактиці захворювань.

Актуальність досліджень у цій сфері зумовлена глобальними викликами, такими як старіння населення, поширення хронічних захворювань та потреба у персоналізованій медицині. Метою даної роботи є аналіз ключових перспективних напрямів досліджень у біомедичній інженерії.

Перспективні дослідження

Одним із провідних напрямів на сучасному етапі розвитку біомедичної інженерії є тканинна інженерія та регенеративна медицина. Дослідження зосереджені на створенні біосумісних матеріалів та 3D-біодруку для вирощування функціональних тканин та органів [1].

Використання стовбурових клітин у поєднанні з інженерними каркасами (скафолдами) відкриває можливості для відновлення пошкоджених тканин серця, печінки, а також нервової тканини. Це може кардинально змінити підходи до лікування дегенеративних захворювань та травматичних ушкоджень.

Іншим важливим вектором розвитку є нейроінженерія та розробка інтерфейсів "мозок-комп'ютер". Ці технології спрямовані на відновлення втрачених рухових або сенсорних функцій у пацієнтів з ураженнями спинного чи головного мозку [2]. Перспективними є дослідження у сфері нейропротезування, де біонічні протези кінцівки, керовані безпосередньо сигналами мозку, дозволяють повернути пацієнтам значну частину функціональності.

Не можна оминати вплив штучного інтелекту (ШІ) та біоінформатики.

Методи машинного навчання використовуються для аналізу великих масивів медичних даних (медичні зображення, геномні дані, показники з сенсорних полів). ШІ допомагає у ранній діагностиці онкологічних захворювань, прогнозуванні перебігу хвороби та розробці персоналізованих планів лікування [3]. Біосенсори та "розумні" імплантати, що забезпечують моніторинг стану пацієнта в режимі реального часу, стають невід'ємною частиною превентивної медицини.

Висновки

Таким чином, біомедична інженерія знаходиться на передньому краї науково-технічного прогресу. Подальші дослідження у галузях регенеративної медицини, нейроінженерії та медичного ШІ обіцяють революційні зміни у системі охорони здоров'я, спрямовані на підвищення якості та тривалості життя людини.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Atsavapranee P., Chi J. C. H., Chiu S. C. Wearable Devices for Remote Cardiac Monitoring. *Innovations in Cardiac Rhythm Management*. 2021. Vol. 12 (4). P. 4450–4456.
2. Mao D., Wang H., Liu Y. Application of artificial intelligence in spine surgery. *Journal of Orthopaedic Translation*. 2023. Vol. 43. P. 53–62.
3. Jamialahmadi H., Khalili-Tanha G., Nazari E., Rezaei-Tavirani M. Artificial intelligence and bioinformatics: a journey from traditional techniques to smart approaches. *Gastroenterology and hepatology from bed to bench*. 2024. Vol. 17 (3). P. 241-252.

Коваль Леонід Григорович – к.т.н., доцент, завідувач кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, email: koval.l@vntu.edu.ua

Василенко Валентина – доктор наук, професор департаменту фізики, факультету науки і технологій, Лісабонський Новий університет, м. Лісабон, Португалія.

Koval Leonid H. – Ph.D., Associate Professor, Head of the department of biomedical engineering and optical-electronic systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia. email: koval.l@vntu.edu.ua

Vassilenko Valentina – Ph. D., Professor, Department of Physics, Faculty of Sciences and Technology, Nova University of Lisbon, Portugal.

Л. Г. Коваль
А. О. Пастушенко
О. О. Сидорук
Д. Л. Коваль

МЕТОДИ 3D ДРУКУ В РЕАБІЛІТАЦІЙНІЙ МЕДИЦИНІ: ПЕРСОНАЛІЗАЦІЯ, БІОІНТЕГРАЦІЯ ТА ОРТОРЕГЕНЕРАЦІЯ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Технології адитивного виробництва (3D-друк) революціонізують реабілітаційну медицину, забезпечуючи високоточне та індивідуалізоване виготовлення протезів, ортезів та хірургічних шаблонів. Тези аналізують ключові методи (FDM, SLA, 3DBP) та матеріали (TPU, PEEK, біочорнила), їхні переваги у скороченні циклу виробництва та підвищенні комфорту пацієнтів, а також визначають перспективи біодруку для орторегенерації складних кістково-хрящових дефектів. Особлива увага приділяється викликам масштабування біоконструкцій та інтеграції сенсорних систем у біонічні протези.

Ключові слова: 3D-друк, реабілітаційна медицина, протезування, ортезування, FDM, біодрук, орторегенерація, біосумісні полімери.

Abstract

Additive manufacturing technologies (3D printing) are revolutionizing rehabilitation medicine, enabling highly accurate and customized fabrication of prostheses, orthoses, and surgical templates. The abstracts analyze key methods (FDM, SLA, 3DBP) and materials (TPU, PEEK, bioink), their advantages in reducing production cycles and increasing patient comfort, and identify the prospects for bioprinting for orthoregeneration of complex osteochondral defects. Special attention is paid to the challenges of scaling bioconstructs and integrating sensor systems into bionic prostheses.

Keywords: 3D printing, rehabilitation medicine, prosthetics, orthotics, FDM, bioprinting, orthoregeneration, biocompatible polymers.

Вступ

Сучасна реабілітаційна медицина вимагає створення виробів, що максимально відповідають унікальній анатомії пацієнта. Традиційні методи часто не можуть забезпечити необхідної точності та швидкості. Адитивне виробництво (3D-друк) пропонує вирішення цих проблем, використовуючи цифрові дані (КТ, МРТ) для створення високоперсоналізованих функціональних пристроїв.

Методи 3D друку

Вибір методу друку визначається кінцевою функціональністю. Для гнучких ортезів (AFO) та зовнішніх оболонок протезів широко використовується екструзійне моделювання (FDM) з матеріалами типу TPU або Nylon, які демонструють високу міцність та гнучкість [1]. Для високоточних хірургічних шаблонів та стоматологічних виробів перевага надається фотополімеризаційним методам (SLA/DLP), що забезпечують високу роздільну здатність. Для критично важливих імплантатів, таких як ендопротези, використовуються біосумісні полімери, як-от поліефіркетон (PEEK), механічні властивості якого близькі до кісткової тканини [2].

Орторегенерація та біодрук (3DBP)

Найбільш перспективним напрямом є 3D-біодрук, спрямований на відновлення великих або складних кістково-хрящових дефектів. Технологія 3DBP дозволяє поєднувати клітинно-навантажені гідрогелі (біочорнила) з механічно міцними синтетичними матеріалами для створення функціональних каркасів [3]. Хоча доклінічні дослідження підтверджують ефективність інтеграції таких конструкцій у навколишні тканини, основні виклики полягають у масштабуванні складних структур та забезпеченні їхньої довготривалої життєздатності та функціональності в умовах навантаження [4].

Клінічна ефективність та перспективи

Доведено, що 3D-друковані ортези забезпечують більшу комфортність та мобільність, підвищуючи мотивацію пацієнтів до реабілітації. Впровадження індивідуалізованих рішень, що включають інтеграцію сенсорів у біонічні протези, значно покращує функціональність та інтеграцію пристрою з нервовою системою пацієнта. Подальші дослідження мають бути зосереджені на стандартизації процесів біодруку та довготривалому клінічному моніторингу новітніх біосумісних імплантатів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Atallah, H., Qufabz, T., Bakhsh, H. R., Ferriero, G. The current state of 3D-printed orthoses clinical outcomes: a systematic review. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 2025. 26 (1). 822.
2. Alqutaibi, A. Y., Alghauli, M. A., Algabri, R. S., et al. Applications, modifications, and manufacturing of polyetheretherketone (PEEK) in dental implantology: A comprehensive critical review. *International Materials Reviews*, 2025. 70 (2). P. 103-136.
3. Kumar, M., Varshney, A., Taufik, M. Hand prosthetics fabrication using additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, 2024. 115. P. 36-45.
4. Yoon, G., Kim, S. J., Jang, J. Multidisciplinary Approaches to Address Resolution, Scalability, and Geometric Constraints in Bioprinting. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2025. P. 1-28. <https://doi.org/10.1007/s12541-025-01362-y>

Коваль Леонід Григорович – к.т.н., доцент, завідувач кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, email: koval.l@vntu.edu.ua

Пастушенко Антон Олександрович – аспірант гр. 163-22а, кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

Сидорук Олег Олександрович – аспірант гр 163-23а, кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Коваль Дмитро Леонідович – ст. гр. БМІ-25б, кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

Koval Leonid H. – Ph.D., Associate Professor, Head of the department of biomedical engineering and optical-electronic systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia. email: koval.l@vntu.edu.ua

Pastushenko Anton O. – graduate student gr 163-22a, department of biomedical engineering and optical-electronic systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Sydoruk Oleh O. – graduate student gr 163-23a, department of biomedical engineering and optical-electronic systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Koval Dmytro L. – student gr. BMI-25b, department of biomedical engineering and optical-electronic systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

СИСТЕМА ІНТЕРВАЛЬНОЇ ГІПОКСИЧНОЇ ТЕРАПІЇ З БІОЗВОРОТНИМ КОНТРОЛЕМ У РЕАБІЛІТАЦІЇ ВІЙСЬКОВИХ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

В умовах сучасних викликів військової та постпандемічної реабілітації актуальним є впровадження ефективних технологій для відновлення функціонального стану організму. Інтервальна гіпоксична терапія (ІГТ) базується на контрольованій зміні фаз гіпоксії та нормоксії, що стимулює фізіологічні адаптаційні механізми, підвищує енергетичну ефективність тканин і сприяє нейропластичності. Розроблена система ІГТ з біозворотним контролем включає генератор газової суміші, модуль метаболографії, пульсоксиметрію та інтеграцію з велоергометром типу AirBike. Система забезпечує автоматичне керування режимами терапії, динамічний контроль SpO_2 , VO_2 , VCO_2 , RQ і адаптацію протоколів у реальному часі. Представлена розробка є доступною альтернативою імпортованим аналогам і орієнтована на використання у військовій та клінічній реабілітації.

Ключові слова: інтервальна гіпоксична терапія; біозворотний зв'язок; метаболографія; військова реабілітація; гіпоксія.

Вступ

В умовах повномасштабної війни Україна стикається з різким зростанням кількості пацієнтів із травматичними ураженнями, постковідними та неврологічними порушеннями, що вимагають сучасних методів фізіологічного відновлення. Інтервальна гіпоксична терапія (ІГТ) дозволяє безпечним чином стимулювати адаптаційні резерви організму, знижувати оксидативний стрес та активізувати метаболічні процеси. Її ефективність доведена у спортивній, кардіологічній та неврологічній практиці, однак в Україні практично відсутні доступні системи для клінічного застосування ІГТ.

Методи та технічна реалізація

Розроблена система ІГТ складається з генератора газової суміші на базі мембранного азотного модуля, дихального контуру з трьома клапанами, метаболографа, пульсоксиметра та блока керування на базі промислового комп'ютера з веб-інтерфейсом. Програмне забезпечення реалізовано мовою Python (Linux), забезпечує контроль фаз гіпоксії (до 12 % O_2), нормоксії (21 % O_2) і гіпероксії (до 36 % O_2). Інтеграція з велоергометром типу AirBike дозволяє реалізувати як пасивні, так і активні протоколи реабілітації. Усі дані (SpO_2 , HR, VO_2 , VCO_2 , RQ) відображаються в реальному часі.

Результати дослідження

Показники змін визначалися за результатами апробації інтервальної гіпоксичної терапії (ІГТ) на системі CardioScan AirZone у групі реабілітаційних пацієнтів після 10–12 сеансів. Наведені дані відображають типовий діапазон позитивних змін основних фізіологічних параметрів після курсу процедур.

Таблиця 1 – Результати змін фізіологічних показників після курсу ІГТ на системі CardioScan AirZone

Показник	Типовий діапазон змін	Коментар
VO ₂ max	+3 % → +10 %	У тренуваних осіб покращення ближче до +3–6 %, у реабілітаційних пацієнтів +6–10 %
6-хвилинний тест ходьби / витривалість	+5 % → +15 %	Залежить від початкового функціонального стану
Толерантність до навантаження / Time to fatigue	+10 % → +30 %	Найбільш виражений ефект серед усіх показників
Частота серцевих скорочень у спокої	–3 % → –8 % (≈ –2 до –6 уд/хв)	Відображає покращення автономної регуляції
Частота серцевих скорочень при субмаксимальному навантаженні	–5 % → –12 %	Підвищення ефективності кисневого обміну
Систолічний артеріальний тиск	–3 % → –8 % (≈ –4 до –12 мм рт. ст.)	У пацієнтів із гіпертонією зміни більш виражені
Діастолічний артеріальний тиск	–2 % → –6 % (≈ –2 до –6 мм рт. ст.)	Нормалізація судинного тону
Варіабельність серцевого ритму (HRV)	+10 % → +40 %	Покращення балансу VLF/LF/HF, підвищення стрес-толерантності
Сатурація SpO ₂ (базова)	0 → +1 %	Зміни мінімальні; основний ефект — зростання толерантності до гіпоксії
Толерантність до гіпоксії (час до десатурації)	+20 % → +50 %	Організм швидше адаптується до періодів зниженого O ₂
Лактат після навантаження	–5 % → –20 %	Менше накопичення лактату при тому самому рівні навантаження

Висновки

Запропонована система інтервальної гіпоксичної терапії з біозворотним контролем поєднує науково обґрунтовані принципи адаптаційної фізіології з технічними рішеннями біомедичної інженерії. Вона забезпечує високу точність контролю, індивідуалізацію протоколів і безпечність використання, що робить її перспективною для застосування у військовій, спортивній та клінічній реабілітації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Gonzalez-Rothi E.J., Lee K.Z., Dale E.A., Mitchell G.S., Fuller D.D. Intermittent hypoxia and neurorehabilitation. Journal of Applied Physiology (1985). 2015; 119(12): 1455–1465. doi: 10.1152/jappphysiol.00235.2015.
2. Behrendt T., Bielitzki R., Behrens M., Herold F., Schega L. Effects of Intermittent Hypoxia–Hyperoxia on Performance- and Health-Related Outcomes in Humans: A Systematic Review. Sports Medicine – Open. 2022; 8(1): 70. doi: 10.1186/s40798-022-00450-x.
3. Chen P.-W., Hsu C.-C., Lai L.-F., Chi C.-P., Yu S.-H. Effects of Hypoxia–Hyperoxia Preconditioning on Indicators of

Muscle Damage After Acute Resistance Exercise in Male Athletes. *Frontiers in Physiology*. 2022; 13: 824210. doi: 10.3389/fphys.2022.824210.

4. Dale E.A., Mitchell G.S., Fuller D.D. Therapeutic acute intermittent hypoxia: a translational roadmap for spinal and motor recovery. *Neurorehabilitation and Neural Repair*. 2023. doi: 10.1177/15459683231151545.

5. The Impact of Intermittent Hypoxia–Hyperoxia Therapy on Metabolism and Respiratory System in Obese Patients as Part of Comprehensive Medical Rehabilitation. *Cureus*. 2024; 16(4): e291825. doi: 10.7759/cureus.291825.

Кузьмінов Ярослав Сергійович — аспірант кафедри біомедичної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

Науковий керівник: **Карась Олександр Володимирович** — доктор філософії, старший викладач кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: karas2014.o.11@gmail.com.

INTERVAL HYPOXIC THERAPY SYSTEM WITH BIOFEEDBACK CONTROL IN THE REHABILITATION OF MILITARY PERSONNEL

Abstract

In the context of modern military and post-pandemic rehabilitation challenges, the implementation of effective technologies for restoring the functional state of the body is of high relevance. Interval hypoxic therapy (IHT) is based on controlled alternation of hypoxia and normoxia phases, which stimulates adaptive physiological mechanisms, enhances tissue energy efficiency, and promotes neuroplasticity. The developed IHT system with biofeedback control includes a gas mixture generator, a metabolography module, pulse oximetry, and integration with an AirBike ergometer. The system provides automated phase control, real-time monitoring of SpO_2 , VO_2 , VCO_2 , and RQ , and adaptive protocol regulation. The presented system is a cost-effective alternative to imported analogues and is designed for use in military and clinical rehabilitation.

Keywords: interval hypoxic therapy; biofeedback; metabolography; military rehabilitation; hypoxia.

Kuzminov Yaroslav S. – a graduate student of the Department of Biomedical Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Karas Oleksandr V. – Ph.D, senior lecturer at the Department of Biomedical Engineering and Optoelectronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: karas2014.o.11@gmail.com.

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПЕРЕШКОДИ ВПРОВАДЖЕННЯ 3D-ДРУКУ В ОРТОПЕДИЧНОМУ ПРОТЕЗУВАННІ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглядаються сучасні проблеми впровадження технологій 3D-друку в протезуванні. Проаналізовано матеріалознавчі, технологічні, біомедичні та економічно-регуляторні обмеження, що стримують масове застосування адитивних технологій у клінічній практиці. Наведено формули, що дозволяють оцінити механічні параметри друкованих протезів, подано порівняльні таблиці матеріалів та технологічних ризиків.

Ключові слова:

3D-друк, протезування, адитивні технології, біосумісність, механічна міцність, медичні матеріали.

Abstract

The paper examines current problems of implementing 3D printing technologies in prosthetics. The material science, technological, biomedical and economic and regulatory restrictions that hinder the mass application of additive technologies in clinical practice are analyzed. Formulas are given that allow estimating the mechanical parameters of printed prostheses, and comparative tables of materials and technological risks are presented.

Keywords:

3D printing, prosthetics, additive technologies, biocompatibility, mechanical strength, medical materials.

Вступ

3D-друк відкриває значні можливості у сфері медичного протезування, зокрема у створенні індивідуалізованих конструкцій, зниженні вартості і часу виготовлення. Однак для повномасштабного впровадження технології необхідне подолання низки суттєвих бар'єрів, пов'язаних з властивостями матеріалів, точністю виготовлення, біологічною сумісністю та сертифікацією.

Матеріали дослідження

Розвиток 3D-друку відкрив нові можливості в персоналізованому протезуванні, проте разом з перевагами він приніс і комплекс технічних, біомедичних та організаційних викликів. Для повного розуміння бар'єрів впровадження цієї технології необхідно послідовно розглянути проблеми на рівні матеріалів, процесів виготовлення, взаємодії протезів з людським організмом та нормативно-економічних аспектів.

Матеріалознавчі обмеження.

Першим і найважливішим аспектом є вибір матеріалів, адже саме вони визначають механічні властивості, комфорт користувача та довговічність протезу. На сьогодні застосовуються полімери PLA, ABS, TPU, нейлон, а також металеві порошки (титан). Проте жоден матеріал не є універсальним. Важливо: більшість популярних полімерів не забезпечують необхідну структурну стабільність для протезів великих навантажень.

Ефективна міцність деталі з пористою внутрішньою структурою:

$$\sigma_{ef} = \sigma_{mat} (1 - P) = \sigma_{mat} k_{zap}$$

де P - пористість,

Міні-приклад: якщо $\sigma_{mat} = 70 \text{ МПа}$ (нейлон) і $k_{zap} = 0,6$, отримаємо $\sigma_{ef} \approx 42 \text{ МПа}$. Для вузлів із піковим напруженням 50–60 МПа потрібно або підвищити $k_{zap} \geq 0,8$, або локально посилити переріз.

Модель втрати несної здатності:

$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{-kt}$$

де σ_0 - початкова міцність, k - коефіцієнт старіння матеріалу, залежить від матеріалу та температури. Для PLA k високий - деталі «пливуть» під навантаженням через деякий час, для прикладу у протезі нижньої кінцівки статичні навантаження + циклічні піки (хідба) прискорюють повзучість і втому, тому PLA - лише для тимчасових виробів.

Таблиця 1 - Коефіцієнти старіння

Матеріал	k	Стійкість
PLA	0.20	Низька
ABS	0.12	Середня
TPU	0.09	Вища
Nylon	0.05	Висока
Titanium	~0	Дуже висока

Технологічні проблеми

Матеріали — лише основа. Проте навіть за умов правильного вибору полімеру чи металу фактична якість протезу сильно залежить від технологічних параметрів виробництва. Тепер розглянемо, як процес друку впливає на функціональні властивості протеза.

Процес створення протезу включає послідовні етапи: сканування, моделювання, налаштування друку, виготовлення, постобробку й примірku. На кожному з них виникають ризики, які можуть погіршити точність або безпеку конструкції.

Оцифрування (3D-сканер/КТ/МРТ) → *похибка поверхні $\pm 0.5-1.0 \mu\text{m}$ $0.5-1.0 \pm 0.5-1.0 \text{ мм}$*

Сегментація та CAD → *топологічні «дірки», стінки $< 2-3 \text{ мм}$*

Слайсинг → *товщина шару h_{hh} , температура T_{TT} , заповнення k_{kk}*

Друк → *деламінація, деформації, струни*

Постобробка → *термо-/хім.-обробка, полірування, стерилізація*

Примірка → *точність посадки, гарячі точки тиску*

Типові дефекти друку: деламінація - недостатня температура, протяги; деформація - перепади температур; пористість – вологий філамент, не якісний філамент.

Технологічні недоліки можуть бути компенсовані налаштуванням обладнання, проте наступна група викликів пов'язана з тим, що надрукований протез має працювати в контактi з живими тканинами. Це робить медико-біологічні аспекти критичними.

Медико-біологічні аспекти

Тривале використання протеза означає постійний контакт зі шкірою, навантаження, мікрорухи та вплив вологості. Це висуває вимоги до біосумісності та гігієни матеріалу.

Біосумісність:

$$C = w_1 B + w_2 S - w_3 T - w_4 I$$

де B - біосумісність матеріалу, S - стерильність процесу, T - токсичність залишків, I - подразнення/інфекційні ризики; ваги w_i підбирають клінічно.

Ергономіка і навантаження на м'які тканини. Допустимі локальні тиски для довгого носіння: $< 30 \text{ кПа}$; пікові до $60-80 \text{ кПа}$ лише короткочасно.

Розрахунок площі опори:

$$A_{\min} \geq (F / p_{\text{dop}})$$

для маси $m=70 \text{ кг}$ (статичне $F \approx 700 \text{ Н}$) та $p_{\text{dop}} = 30 \text{ кПа} \rightarrow A_{\min} \approx 23 \text{ см}^2$ на опорну платформу.

Регуляторні та економічні бар'єри

Протези - медичні вироби, тому вони повинні бути сертифіковані та відповідати міжнародним стандартам ISO/ASTM. Проте стандартизація 3D-друку — ще в розвитку.

Нормативка та валідація процесу: QMS: ISO 13485 (система якості медвиробів); Матеріали/процеси: серія ASTM F42 (адитивні технології), ISO/ASTM 529xx (терміни, випробування, механіка); Класифікація медвиробів: як правило Class I-III для пасивних протезів; потребує клінічної оцінки й керування ризиками за ISO 14971; Трасованість (traceability): протоколи партії порошку/філаменту, параметри друку, операції постобробки, серійне маркування (UDI).

Таблиця 2 - Економіка впровадження

Компонент	Разова вартість	Операційні витрати/рік	Примітка
Сканер анатомії	\$5–30k	\$0.5–1k	Калібрування
FDM/SLS/SLA принтери	\$5–300k	\$2–20k	Обслуговування
Металевий SLM	\$200k–1M	\$20–80k	Порошок + фільтри
Матеріали	-	\$20–200/виріб	Залежить від маси
Контроль якості	-	\$1–5k	Зразки, випробування
Сертифікація/клініка	-	\$5–50k	За проєкт

Малі та середні серії з високою індивідуалізацією; час виготовлення стає критерієм - від заміру до протеза 3-7 днів (проти 2-6 тижнів традиційно).

Висновок

3D-друк є перспективною технологією у протезуванні, здатною забезпечити індивідуалізацію, доступність і швидкість виготовлення протезів. Однак подальший розвиток потребує: створення нових біосумісних матеріалів, стандартизації процесів в медичній сфері, здешевлення обладнання та підготовки фахівців.

Комплексне вирішення цих питань дозволить забезпечити широке застосування адитивних технологій у клінічній практиці та підвищити якість життя пацієнтів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ventola, C. L. Medical Applications for 3D Printing: Current and Projected Uses. *P&T*, 39(10), 704–711.
2. Скляр В. В., Лозовий О. В. Адитивні технології та їх застосування в медицині: огляд. *Вісник НТУ «ХПІ»*.
3. Czado, T., & Brzostowski, B. *Additive Manufacturing in Orthopedics*. Springer.

Криворучко Іван Олександрович – старшого викладача кафедри кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет.

Коваль Леонід Григорович – доцент, завідувач кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет.

KkrivoruchkoIvanOl. – Senior Lecturer at the Department of Biomedical Engineering and Optoelectronic Systems, Vinnytsia National Technical University

Koval Leonid Grigorovich – Associate Professor, Head of the Department of Biomedical Engineering and Optoelectronic Systems, Vinnitsa National Technical University.

ПІДХІД НА ОСНОВІ ТРАНСФОРМЕРІВ ДЛЯ АНАЛІЗУ ЗОБРАЖЕНЬ ОЧНОГО ДНА ПРИ ДІАГНОСТУВАННІ ДІАБЕТИЧНОЇ РЕТИНОПАТІЇ

¹Вінницький національний технічний університет

²Інститут інформаційних та комп'ютерних технологій МОН РК, Алмати, Казахстан

Анотація. Діабетична ретинопатія є серйозним ускладненням цукрового діабету та однією з провідних причин сліпоти у світі, що вимагає ефективних методів раннього скринінгу. Сучасні підходи до автоматизованого аналізу медичних зображень все частіше використовують моделі глибокого навчання. Останнім часом архітектури Трансформерів, зокрема Vision Transformer, продемонстрували видатні результати в задачах комп'ютерного зору, кидаючи виклик домінуючим згортковим нейронним мережам.

Ключові слова: діабетична ретинопатія, Трансформери, зображення очного дна, аналіз медичних зображень, глибоке навчання, комп'ютерний зір.

Abstract. Diabetic retinopathy is a serious complication of diabetes mellitus and one of the leading causes of blindness worldwide, requiring effective methods of early screening. Modern approaches to automated medical image analysis increasingly use deep learning models. Recently, Transformer architectures, in particular Vision Transformer, have demonstrated outstanding results in computer vision tasks, challenging the dominant convolutional neural networks.

Keywords: diabetic retinopathy, Transformers, fundus images, medical image analysis, deep learning, computer vision

Вступ

Діабетична ретинопатія (ДР) є одним з найважчих мікросудинних ускладнень цукрового діабету. За даними ВООЗ, понад 460 мільйонів людей у світі хворіють на діабет, і значна частина з них ризикує втратити зір через ДР. Раннє виявлення та лікування можуть запобігти до 90% випадків сліпоти [1].

Традиційні методи скринінгу є часо- та ресурсозатратними. В останні роки системи на основі згорткових нейронних мереж (CNN) показали високу точність, проте вони здебільшого фокусуються на локальних ознаках. Поява архітектур Трансформерів, зокрема Vision Transformer (ViT), відкриває нові можливості. Завдяки механізмам глобальної уваги, ViT здатні фіксувати довготривалі залежності та контекстуальні зв'язки між різними ділянками зображення, що є критичним для виявлення дрібних, але діагностично значущих патологій на сітківці [2].

Метою цієї роботи є розробка та тестування підходу на основі архітектури ViT для багатокласової класифікації стадій діабетичної ретинопатії.

Для дослідження було обрано модель Vision Transformer (ViT-B/16), попередньо навчену на наборі даних ImageNet [3]. В якості основного набору даних для донавчання та тестування було використано публічний датасет APTOS 2019 Retinopathy (або EyePACS), який містить тисячі високоякісних фундус-зображень, розмічених офтальмологами на 5 класів (0 – Немає ДР, 1 – Легка, 2 – Помірна, 3 – Важка, 4 – Проліферативна ДР) [4].

Етапи обробки даних включали:

Передобробка: Зміна розміру зображень, видалення артефактів та нормалізація.

Аугментація: Застосування випадкових поворотів, дзеркальних відображень та зміни яскравості для підвищення стійкості моделі.

Навчання: Модель донавчалася з використанням оптимізатора Adam та функції втрат Cross-Entropy.

Розробка та тестування моделі проводились мовою Python з використанням бібліотек PyTorch та Timm.

Модель тестувалася на відкладеній валідаційній вибірці. Для оцінки якості багатокласової класифікації використовувався показник Quadratic Weighted Kappa (QWK), який є стандартом у

подібних задачах, оскільки враховує "вартість" помилки (помилка між 0 та 4 класом є серйознішою, ніж між 0 та 1).

Запропонований підхід на основі ViT досяг високих показників ефективності, які представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати тестування багатокласової класифікації

Метрика	Значення
Quadratic Weighted Kappa (QWK)	0.915
Загальна Точність (Accuracy)	92.1%
Зважена Точність (Weighted Precision)	0.923
Зважена Повнота (Weighted Recall)	0.921
Зважена F1-Міра (Weighted F1-Score)	0.920

Висновок

Діабетична ретинопатія залишається однією з головних причин втрати зору, що можна попередити, і тому розробка точних та автоматизованих систем скринінгу є критично важливою.

Запропонована модель ViT-B/16, донавчена на специфічних даних ДР, продемонструвала високі результати. Модель досягла показника Quadratic Weighted Kappa (QWK) 0.915 та загальної точності 92.1%. Ці результати підтверджують, що механізми глобальної уваги, притаманні архітектурі Трансформерів, здатні ефективно фіксувати довготривалі залежності та виявляти дрібні патологічні зміни на сітківці, які є ключовими для точного визначення стадії захворювання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. World Health Organization. (2023). Diabetes. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/diabetes> (дата звернення: 31.10.2025).
2. Gulshan, V., Peng, L., Coram, M., Stumpe, M. C., Wu, D., Narayanaswamy, A., ... & Webster, D. R. (2016). Development and validation of a deep learning algorithm for detection of diabetic retinopathy in retinal fundus photographs. *JAMA*, 316(22), 2402-2410.
3. Kaggle. (2019). *APTOS 2019 Blindness Detection*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.kaggle.com/c/aptos2019-blindness-detection> (дата звернення: 31.10.2025).
4. Deng, J., Dong, W., Socher, R., Li, L.-J., Li, K., & Fei-Fei, L. (2009). ImageNet: A large-scale hierarchical image database. *In 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (pp. 248–255).

Карась Олександр Володимирович – доктор філософії, старший викладач кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: karas@vntu.edu.ua

Мамирбаєв Оркен – заступник генерального директора РДП «Інституту інформаційних та обчислювальних технологій» КН МОН РК, завідувач лабораторії, PhD, асоційований професор

Karas Oleksandr V. – Ph.D, senior lecturer at the Department of Biomedical Engineering and Optoelectronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: karas@vntu.edu.ua

Mamyrbayev Orken – Ph.D., Deputy General Director in science and Head of the Laboratory of Computer Engineering of Intelligent Systems at the Institute of Information and Computational Technologies of the Kazakh National Technical University named after K.I. Satbayev and associate professor in 2019 at the Institute of Information and Computational Technologies

СИСТЕМА АНАЛІЗУ ЖУВАЛЬНО-ПОСТУРАЛЬНИХ М'ЯЗІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У статті розглянуто питання інтегрованого підходу до аналізу стану жувально-постуральних м'язів як взаємопов'язаної системи, що об'єднує стоматологічну, кінезіологічну та постурологічну складові. Обґрунтовано необхідність створення комплексної системи діагностики на основі багатоканальної електроміографії та програмного забезпечення для візуалізації м'язової активності та постуральних змін.

Ключові слова: жувально-постуральні м'язи, електроміографія, постанова, стоматогностична система, діагностика.

Вступ

Функціонування жувально-щелепної системи (ЖЩС) тісно пов'язане з постуральними м'язами голови та шиї. Порушення їх узгодженої роботи призводить до дисфункцій скронево-нижньощелепного суглоба (СНЩС), головного болю, зміни постави [1]. Незважаючи на розвиток електроміографії, комплексні методи аналізу жувально-постуральної системи залишаються недостатньо розробленими.

Мета та задачі дослідження

Мета роботи – створити систему аналізу стану жувально-постуральних м'язів для діагностики та реабілітації порушень стоматогностичної системи. Для досягнення мети передбачено: розробку методики багатоканального вимірювання електричної активності м'язів; створення програмного забезпечення для інтеграції даних ЕМГ, постуральних та оклюзійних параметрів; клінічне випробування системи та оцінку її діагностичної цінності [2, 3].

Наукова новизна та практичне значення

Уперше пропонується створення єдиної апаратно-програмної системи, що забезпечує комплексний аналіз активності жувальних і постуральних м'язів у реальному постуральному контексті. Передбачається отримання референсних даних для здорових осіб і пацієнтів із дисфункціями, розробка алгоритмів візуалізації м'язової активності.

Розроблена система може бути застосована у стоматологічній практиці для підвищення точності діагностики СНЩС, оцінки ефективності терапії, а також у реабілітаційних програмах для пацієнтів із мігрєнями, постуральними порушеннями, наслідками шийних травм. Інтегрований підхід дозволить покращити якість лікування та прогнозування результатів.

Висновки

Розробка системи аналізу жувально-постуральних м'язів має значний потенціал для інтеграції стоматологічної та реабілітаційної медицини. Її впровадження сприятиме

переходу від фрагментарної діагностики до системного аналізу функціональних зв'язків між жувальною активністю та постоурою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Gadotti I. C., Hicks K., Koscs E. Electromyography of the masticatory muscles during chewing in different head and neck postures – A pilot study. *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*. 2020. Vol. 10, Iss. 2. P. 23–27. DOI: 10.1016/j.jobcr.2020.02.002.
2. Dorosz T., Mańko A., Ginszt M. Use of Surface Electromyography to Evaluate Effects of Therapeutic Methods on Masticatory Muscle Activity in Patients with Temporomandibular Disorders: A Narrative Review. *Journal of Clinical Medicine*. 2024. Vol. 13, Iss. 3. Art. 920. DOI: 10.3390/jcm13030920.
3. Smaglyuk L. V., Liakhovska A. V. Electromyographic characteristics of muscles in children with malocclusion and disorders of the musculoskeletal system in the period of mixed bite. *Медичні перспективи*. 2025. Vol. 30, Iss. 3. P. 4–13. DOI: 10.26641/2307-0404.2025.3.340532.

Карась Олександр Володимирович – доктор філософії, старший викладач кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: karas2014.o.11@gmail.com

Радлінський Дмитро Іванович – аспірант кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет аспірант, Вінниця, d.radlinskiy@gmail.com

MASCULATE-POSTURAL MUSCLE ANALYSIS SYSTEM

Abstract. *The article considers the issue of an integrated approach to the analysis of the state of masticatory-postural muscles as an interconnected system that combines dental, kinesiological and posturological components. The need to create a comprehensive diagnostic system based on multichannel electromyography and software for visualizing muscle activity and postural changes is substantiated.*

.Keywords: masticatory-postural muscles, electromyography, posture, stomatognostic system, diagnostics.

Karas Oleksandr V. – Ph.D, senior lecturer at the Department of Biomedical Engineering and Optoelectronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: karas2014.o.11@gmail.com.

Radlinsky Dmytro I. – post-graduate student of Department of Biomedical Engineering and Optoelectronic Systems Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, d.radlinskiy@gmail.com

ВИЗНАЧЕННЯ ТВЕРДОСТІ КУКСОПРИЙМАЛЬНИХ ГІЛЬЗ ПРОТЕЗІВ ЗА МЕТОДОМ ШОРА

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі проведено експериментальне дослідження твердості куксоприймальних гільз протезів нижніх кінцівок, виготовлених з акрилової смоли з різними значеннями міцності на вигин стінки. Результати показують незначні відмінності у величині твердості зразків.

Ключові слова: твердість, протези, термопласти, акрилові смоли, вимірювання, метод Шора.

Abstract

The paper presents an experimental study of the hardness of the stump-receiving sleeves of lower limb prostheses made of acrylic resin with different values of wall bending strength. The results show insignificant differences in the hardness of the samples.

Keywords: hardness, prostheses, thermoplastics, acrylic resins, measurements, Shore method.

Вступ

Твердість матеріалу – це його стійкість до проникнення всередину нього іншого, більш міцного матеріалу [1]. Для визначення твердості матеріалу використовують різні методи – вдавнення, втискування, ударного навантаження, склерометрії, ультразвукової твердометрії.

Визначення твердості матеріалу та можливість порівняння матеріалів за показником твердості є запорукою коректного синтезу механічних конструкцій з урахуванням явищ тертя, тиску та зношення.

У першій половині XX ст. Альберт Шор розробив метод вимірювання твердості матеріалу, який базується на спеціальній шкалі та реалізується за допомогою спеціального засобу – дюрометра [2].

Метою роботи є визначення твердості куксоприймальних гільз протезів нижніх кінцівок на основі акрилових смол за методом Шора (втискування).

Результати дослідження

Дюрометри бувають двох типів: типу А для м'яких полімерів та еластомерів (навантаження 822 г) та типу D для твердих полімерів та еластомерів (навантаження 4536 г).

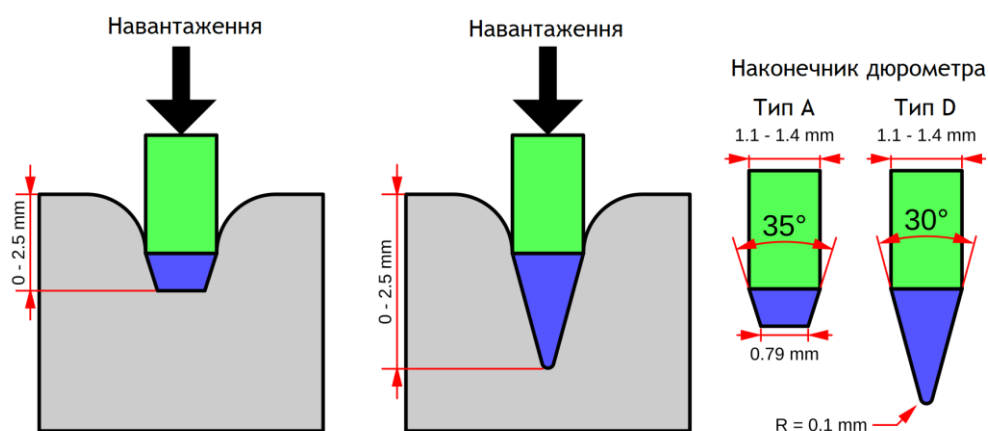


Рис. 1 – Візуалізація принципів вимірювання твердості за Шором (методом втискування) [3]

Вимірювання за Шором здійснюється наступним чином: наконечник дюрометра вдавлюють у матеріал під дією певної визначеної сили, після чого вимірюють глибину його проникнення. Цей спосіб є основним для вимірювання твердості каучуків, термопластів та термореактивних пластиків.

До основних шкал вимірювання твердості матеріалу за Шором відносять наступні: А, В, С, D, О та ОО [4]. Кожну з них поділено на 100 поділок, які чисельно відображають твердість матеріалу: чим більшим є експериментально одержане значення, тим твердішим є матеріал [4].

Принцип визначення твердості матеріалу за Шором ґрунтується на тому, що експериментальний результат залежить від в'язко-еластичних властивостей матеріалу та його модуля пружності. Також він є обернено пропорційним до глибини втиснення: максимальне (2,5 мм) втиснення дюрометра у матеріал відповідає значенню 0 за Шором, а мінімальне (0 мм) – 100.

Найбільш поширені шкали вимірювання – шкали А та D [3]. Вони найкраще підходять для точного визначення твердості м'яких та твердих матеріалів відповідно.

Часте використання цих шкал дозволило вивести певні закономірності їхнього застосування. У випадку, коли випробовуваний за шкалою А матеріал дає результат, більший за 90 одиниць, рекомендується визначати його дійсну твердість за шкалою D. У випадку, коли випробовуваний за шкалою D матеріал дає результат, менший за 20 одиниць, рекомендовано використовувати шкалу А. Також застосовують таблицю перетворень значень між шкалами А та D (табл. 1) [3]:

Таблиця 1 – Співвідношення шкал А та D при визначення твердості матеріалу за Шором

Шкала	Значення														
A	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
D	6	7	8	10	12	14	16	19	22	25	29	33	39	46	58

Результати вимірювання твердості матеріалу за Шором мають особливе позначення: буквена частина (Shore A, Shore D) вказує на використану під час вимірювання шкалу та метод вимірювання, а число – на одержаний результат. До прикладу, гумка на олівці має твердість 55 Shore A, м'яч для гольфу – 50 Shore D.

Біопротезування – це створення штучних механічних конструкцій, призначених функціонально доповнити або замінити ушкоджену або відсутню частину тіла людини (орган або систему органів).

Для створення біопротезів кінцівок використовують термопласти. З-поміж них часто обирають акрилові смоли, виконані на основі поліметилметакрилату [5]. Існують два види акрилових смол: термопластичні (здатні до зміни форми, оскільки вони розм'якшуються під час нагрівання) та термореактивні (нездатні до зміни форми під впливом високих температур). До основних властивостей акрилових смол відносять високу твердість, стійкість до зношування, значну біосумісність та легкість виготовлення [6].

У рамках нашого експериментального дослідження чотири гільзи протезів з подібних за властивостями акрилових смол буде піддано тесту Шора на твердість.

Метод формування зразків – литтєве пресування, полімеризаційна усадка – 22 %, модуль пружності – не менше 2000 МПа, без модифікації еластомерами, тип ініціації полімеризації – термічний, товщина стінки гільзи – 3,5...4 мм.

Відрізнялась міцність на вигин стінки S, що становила для зразків від 60 до 72 МПа.

Результати застосування дюрометра до досліджуваних акрилових смол за вище описаною методикою визначення твердості за Шором відображено у табл. 2..

З огляду на порівняння результатів вимірювання твердості акрилових смол, можна переконатися, що використання шкали А за Шором у вимірюваннях із такими матеріалами є некоректним, адже в такому разі одержані результати не відобразатимуть дійсного значення твердості матеріалу, адже показники перебувають на краю шкали А.

Таблиця 2 – Усереднені експериментальні показники твердості за Шором для чотирьох дослідних зразків акрилових смол

Номер зразка	Значення S	Шкала A	Шкала D
I	60 МПа	95	70
II	60 МПа	93	71,5
III	67 МПа	87	74
IV	72 МПа	97	75

Як видно з отриманих даних, при зростанні значення міцності на вигин стінки S на 12 МПа (20 %) зростання значення міцності склало лише 5 одиниць (близько 7 %).

Висновок

В роботі було розглянуто засади використання методу Шора (втискання) для визначення твердості матеріалів, що використовуються у протезуванні нижніх кінцівок за допомогою дюрометра, описано експериментально одержані дані за шкалами Shore A та Shore D для чотирьох зразків акрилових смол. Встановлено, що для визначення твердості акрилових смол доцільно використовувати дюрометр типу D. Відмінності у значенні твердості виявились незначними, навіть зважаючи на різницю у значенні міцності куксоприймальних гільз на вигин стінки, що свідчить про стабільні значення твердості для різних зразків матеріалу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Долгов О. М., Колосов Д. Л. Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів : навч. посіб. / . Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2022. 70 с.
2. Blobner U. 100 Years of Shore A Hardness Testing. URL: https://o-ring-prueflabor.de/wp-content/uploads/2024/10/expert_knowledge_-_100_years_of_shore_a_.pdf
3. Shore A vs D: How Can You Use Durometer Scales to Determine Material Hardness? URL: <https://blog.darwin-microfluidics.com/hardness-shore-a-vs-shore-d/>
4. Standard Test Method for Rubber Property – Durometer Hardness. URL: https://yiqi-oss.oss-cn-hangzhou.aliyuncs.com/aliyun/900100940/technical_file/file_202386.pdf
5. Zainuddin, N. A. M. N., Razak, N. A. A., Karim, M. S. A., Osman, N. A. A. Surface profile analysis of laminated transfemoral prosthetic socket fabricated with different ratios of epoxy resin and acrylic resin. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13 (1). P. 2664.
6. Campbell, A. I., Sexton, S., Schaschke, C. J., Kinsman, H., McLaughlin, B., Boyle, M. Prosthetic limb sockets from plant-based composite materials. *Prosthetics and orthotics international*. 2012. Vol. 36 (2). P. 181–189.

Гончар Богдан Віталійович – студент групи БМІ-226, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, e-mail: bogdgonchar@gmail.com

Штофель Дмитро Хуанович – канд. тех. наук, доцент, доцент кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, e-mail: shtofel@vntu.edu.ua

Bogdan Honchar – student of Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: bogdgonchar@gmail.com

Dmytro Shtofel, PhD (Biomedical Engineering), Associate Professor of the Department of Biomedical Engineering and Optoelectronics, Vinnytsia National Technical University, e-mail: shtofel@vntu.edu.ua

АЛГОРИТМІЗАЦІЯ АДАПТИВНОЇ СТИМУЛЯЦІЇ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ФАНТОМНОГО БОЛЮ В АМПУТОВАНИХ КІНЦІВКАХ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі проаналізовані сучасні підходи до побудови алгоритмів адаптивної електростимуляції з метою усунення фантомного болю у пацієнтів з ампутованими кінцівками. Сформульовано основні вимоги до таких алгоритмів.

Ключові слова: алгоритм, стимуляція, фантомний біль, ампутації, адаптивність.

Abstract

The paper analyzes modern approaches to building adaptive electrical stimulation algorithms to eliminate phantom pain in patients with amputated limbs. The main requirements for such algorithms are formulated.

Keywords: algorithm, stimulation, phantom pain, amputations, adaptability.

Вступ

Фантомний біль (ФБ) залишається одним із найбільш складних та резистентних до лікування станів у сучасній алгології та реабілітаційній медицині. Феномен, вперше детально описаний французьким хірургом Амбруазом Паре ще у 1551 році, який спостерігав, що пацієнти скаржаться на біль у відсутній кінцівці довгостроково після ампутації, досі залишається викликом для клініцистів. Паре прозорливо припустив, що механізм болю може мати як периферичну природу (скорочення нервів), так і центральну, що випередило наукову думку на кілька століть. Сьогодні відомо, що ФБ вражає від 50 % до 80 % пацієнтів з ампутаціями, суттєво знижуючи якість життя та функціональну незалежність [1].

Традиційні підходи, що включають фармакотерапію (анальгетики, антиконвульсанти, опіоїди) та хірургічні втручання (ревізія кукси, симпатектомія), часто демонструють обмежену ефективність або значні побічні ефекти. Це зумовило зміщення фокусу наукових досліджень у бік нейромодуляції. Проте ранні спроби застосування електростимуляції, такі як трансшкірна електрична нервова стимуляція (TENS) або стимуляція спинного мозку (SCS), переважно базувалися на відкритих (open-loop) системах. У таких системах параметри стимуляції встановлювалися лікарем і залишалися незмінними незалежно від динамічного стану пацієнта або його активності. Це призводило до швидкого розвитку толерантності нервової тканини та зниження терапевтичного ефекту з часом [2].

Сучасний етап розвитку нейроінженерії характеризується переходом до адаптивних алгоритмів, здатних модулювати параметри стимуляції в реальному часі. На сьогодні ефективне лікування ФБ передбачає не просто пригнічення передачі больового сигналу, а активної реінтеграції сенсомоторних контурів [3]. Використання периферичної нервової стимуляції та глибокої стимуляції мозку у замкненому контурі дозволяє створювати «штучні» сенсорні відчуття, які заміщують втрачений аферентний вхід, тим самим впливаючи на фундаментальні механізми нейропластичності.

Результати дослідження

Розуміння нейробіологічних механізмів виникнення фантомного болю є критичним для розробки архітектури стимуляційних алгоритмів. Аналіз літератури дозволяє виділити ключові теорії, які безпосередньо впливають на логіку кодування сигналів:

- 1) маладаптивна кортикальна реорганізація та сенсорний дефіцит [4];
- 2) гіпотеза стохастичного заплутовування [5].

Перспективним напрямком у лікуванні ФБ є створення біоміметичних систем периферичної та спінальної стимуляції, які намагаються відтворити поведінку нервової системи.

Дослідження показали, що хоча лінійна частотна модуляція при стимуляції є більш природною з фізіологічної точки зору, вона викликає швидку адаптацію, коли пацієнт перестає відчувати стимул під час тривалих впливів. Лінійна амплітудна модуляція, навпаки, забезпечує більш надійний канал зворотного зв'язку для протезування, дозволяючи пацієнтам точніше дозувати м'язові скорочення [6]. Це вказує на те, що «чиста» біоміметичність не завжди є оптимальною для інженерних рішень, тоді як гібридні підходи можуть бути більш ефективними.

Додаткові дослідження на кішках, де реєстрували активність у гангліях задніх корінців при різних патернах стимуляції, підтвердили, що модуляція частоти на основі згладжених значень пост-стимульних гістограм може покращити природність відчуттів, але вимагає ретельного налаштування для уникнення адаптації [7].

Розробка алгоритмів адаптивної електростимуляції для лікування фантомного болю пройшла шлях від простих генераторів імпульсів до складних кіберфізичних систем. Накопичені наукові дані переконливо свідчать, що ключем до ефективності є не сама електрична енергія, а інформаційний зміст сигналу. Відновлення сенсорного зворотного зв'язку через біоміметичні патерни в замкненій системі (closed-loop) дозволяє реверсувати маладаптивну пластичність та протидіяти стохастичному заплутуванню нейронних мереж. Використання центральних біомаркерів дозволяє точно дозувати терапію в часі, запобігаючи толерантності [8].

Таким чином, узагальнений протокол для сучасного алгоритму протибольової стимуляції можна звести до таких вимог.

1. Мультимодальний вхід. Передбачає комплексне використання даних про механічну взаємодію (сенсори протеза), моторні наміри та м'язові скорочення (електроміографія) та внутрішній стан мозку (електроенцефалографія) та ін.

2. Адаптивне кодування. Використання лінійної амплітудної модуляції для стабільності контролю, доповненої стохастичним шумом для підвищення порогу чутливості.

3. Динамічне управління. Стимуляція повинна бути подієво-залежною (стимул-спровокованою), активуючись лише при наявності специфічних тригерів (рух, спалах болю), з обов'язковими періодами відсутності стимуляції для запобігання резистентності.

4. Необхідно встановити жорсткі межі безпечності. Обов'язковий автоматичний контроль густини електричного заряду відповідно до типу електрода.

Висновок

Запропонований підхід до проектування алгоритмів адаптивної стимуляції для зменшення фантомного болю у пацієнтів з ампутованими кінцівками на основі поєднання комплексного аналізу вхідних даних, адаптивного кодування сигналів, динамічного керування стимуляцією та безпечності процедури створює можливості для перетворення пасивного ситуативного усунення симптомів на активну нейрореабілітацію, при якій апаратно-програмна організація системи стимуляції виступає містком для відновлення цілісності сприйняття власного тіла пацієнтом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Boomgaardt, J., Dastan, K., Chan, T., Shilling, A., Abd-Elsayed, A., Kohan, L. An algorithm approach to phantom limb pain. *Journal of pain research*. 2022. Oct. P. 3349–3367.
2. Johnson, M. I., Mulvey, M. R., Bagnall, A. M. Transcutaneous electrical nerve stimulation (TENS) for phantom pain and stump pain following amputation in adults. *Cochrane Database of Systematic Reviews*. 2015. No. 8. CD007264. P. 1–22.
3. Pagan-Rosado, R., Smith, B. J., Smither, F. C., Pingree, M. J., D'Souza, R. S. Peripheral nerve stimulation for the treatment of phantom limb pain: A case series. *Case Reports in Anesthesiology*. 2023. No. 2023 (1). Art. 1558183.
4. Makin, T. R. Phantom limb pain: thinking outside the (mirror) box. *Brain*. 2021. Vol. 144 (7). P. 1929–1932.

5. Ortiz-Catalan, M. The stochastic entanglement and phantom motor execution hypotheses: a theoretical framework for the origin and treatment of phantom limb pain. *Frontiers in neurology*. 2018. No. 9. Art. 748.
6. Valle, G., Petrini, F. M., Strauss, I., et al. Comparison of linear frequency and amplitude modulation for intraneural sensory feedback in bidirectional hand prostheses. *Scientific reports*. 2018. No. 8 (1). Art. 16666.
7. Valle, G., Katic Secerovic, N., Eggemann, D., et al. Biomimetic computer-to-brain communication enhancing naturalistic touch sensations via peripheral nerve stimulation. *Nature Communications*. 2024. Vol. 15 (1). P. 1151.
8. Shirvalkar, P., Leriche, R., Saal, J., et al. Personalized, closed-loop deep brain stimulation for chronic pain. *medRxiv*. 2025. 2025-08. URL: <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2025.08.11.25333010v1>

Штофель Дмитро Хуанович – к. т. н., доцент, кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, email:

Гомолінський Віктор Олексійович – аспірант гр 163-23а, кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, email: vog9645@vntu.edu.ua

Shtofel Dmytro Kh. – Cand. Tech. Sci., Associate Professor, department of biomedical engineering and optical-electronic systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia. email: shtofel@vntu.edu.ua

Homolinskyi Viktor O. – postgraduate student of gr 163-23a, department of biomedical engineering and optical-electronic systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia. email: vog9645@vntu.edu.ua

БІОНІЧНІ ПРОТЕЗИ З НЕЙРОІНТЕРФЕЙСОМ: СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі узагальнено сучасний стан розробок біонічних протезів із нейроінтерфейсами, систем їх керування та зворотного сенсорного зв'язку. Розглянуті основні технологічні підходи (біоелектричне керування, TMR, RPNI, інвазивні нервові й мозкові інтерфейси, остеointegraція) та їхні сильні й слабкі сторони. Наведено перспективи розвитку (замкнені контури зворотного зв'язку, застосування штучного інтелекту для декодування намірів, бездротові імпланти).

Ключові слова: біонічний протез, нейроінтерфейс, TMR, RPNI, сенсорний зворотний зв'язок, остеointegraція

Вступ

Розвиток біонічних протезів із нейроінтерфейсами відкриває принципово нові можливості для людей, які втратили кінцівки. Такі системи допомагають відновлювати не лише рухові, а й сенсорні функції. Сьогодні для цього використовують міоелектричні сигнали, сучасні хірургічні методи (Targeted Muscle Reinnervation – TMR, Regenerative Peripheral Nerve Interface – RPNI), а також інвазивні нейроінтерфейси. Завдяки цим підходам управління протезами стає значно більш природним і зрозумілим для користувача [1-3].

Наразі дослідження зосереджені на тому, щоб додати до протезів системи зворотного зв'язку. Це дозволяє людині відчувати дотик або силу стискання предметів. Ще один перспективний напрямок – застосування остеointegraції, прямого структурно-функціонального поєднання живої кісткової тканини з поверхнею імплантату, найчастіше металевого. Вона забезпечує надійне кріплення протеза безпосередньо до кістки та створює можливості для прокладання каналів під нейроінтерфейси.

Сучасний стан технології

Нейроімпланти – це мініатюрні пристрої (електроди, зонди), які забезпечують зв'язок з комп'ютерними системами. Вони використовуються для створення нейрокомп'ютерних інтерфейсів, що дозволяє контролювати зовнішні пристрої, а також для відновлення втрачених функцій, наприклад таких як рух. Це технологія, яка допомагає людям з травмами і також використовується при реабілітації.

Міоелектричне керування – найпоширеніший варіант у сучасних протезах. Система зчитує електричні сигнали з м'язів і перетворює їх у рухи штучної кінцівки.

Targeted Muscle Reinnervation (TMR) – хірургічна методика, що дає змогу отримувати чіткіші сигнали від м'язів та водночас зменшує прояви фантомного болю.

Regenerative Peripheral Nerve Interface (RPNI) – технологія, яка створює надійний зв'язок між нервами та м'язами, що забезпечує більш точне управління рухами.

Інвазивні інтерфейси – системи, які підключаються безпосередньо до нервових стовбурів або навіть кори головного мозку, відкриваючи шлях до максимально точного контролю протеза.

Остеointegraція – метод кріплення протеза до кістки, що не лише робить його комфортнішим, а також дозволяє інтегрувати електроди та інші елементи управління прямо у конструкцію.

Перспективи

Подальший розвиток біонічних протезів пов'язаний із впровадженням систем штучного інтелекту для декодування рухових намірів, створенням бездротових імплантів, а також розробкою повністю замкнених систем зі зворотним сенсорним зв'язком. Важливим викликом залишаються біосумісність імплантів, довгострокова стабільність сигналів та етичні аспекти застосування таких технологій.

Механонейральні інтерфейси (Mechanoneural interfaces) досить часто застосовуються як комбінована стратегія.

Механонейральні інтерфейси – це перспективна стратегія, яка поєднує фізичні конструкції (м'язи, тканини, нерви) з електронікою та біоматеріалами для оптимального передавання як моторних, так і

сенсорних сигналів. Ідея полягає в тому, щоб створити з'єднання між нервовими тканинами та протезом, у яких тканини-містки служать середовищем для передавання сигналів без прямих металевих електродів або ж з мінімальними травматичними втручанням.

Висновки

Біонічні протези з нейроінтерфейсами є одним із найперспективніших напрямків сучасної медичної інженерії. Завдяючи розвитку технологій TMR, RPNI, остеointegraції та інвазивних нейроінтерфейсів стає можливим керування рухами й відновлення сенсорних відчуттів. Поєднання цих підходів із систем штучного інтелекту відкриває шлях до створення повністю інтегрованих «розумних» протезів, які майже не відрізнятимуться від природних кінцівок за функціональністю. Подальші дослідження спрямовані на підвищення біосумісності імплантів, стабільності нейронних сигналів і вирішення етичних питань застосування таких технологій у медицині дозволять вирішувати ці складні завдання на більш якісному рівні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ava G Chappell, Matthew D Ramsey, Seong Park, Gregory A Dumanian, Jason H Ko. Targeted Muscle Reinnervation-an Up-to-Date Review: Evidence, Indications, and Technique. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC12081100/>.
2. Pedro Garcia Batista, André Costa Vieira, Pedro Dinis Gaspar. Robotic Prostheses and Neuromuscular Interfaces: A Review of Design and Technological Trends. URL: <https://www.mdpi.com/2075-1702/13/9/804>.
3. Melanie J. Wang, Theodore A. Kung, Alison K. Snyder-Warwick, Paul S. Cederna. Merging Neuroscience and Engineering Through Regenerative Peripheral Nerve Interfaces. URL: <https://www.mdpi.com/2673-1592/7/4/97>.

Корчевська Вікторія Андріївна - студентка групи БМІ-236, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: korchevskaviktoria388@gmail.com

Тимчик Сергій Васильович - к-т техн. наук, доцент кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Korchevska Viktoria A. - student of group BMI-23b, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, korchevskaviktoria388@gmail.com

Tymchyk Serhiy V. - PhD (Biomedical Engineering), Associate Professor of the Department of Biomedical Engineering and Optoelectronics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

BIONIC PROSTHESES WITH NEUROINTERFACE: CURRENT STATUS AND PROSPECTS

Abstract

The paper summarizes the current state of development of bionic prostheses with neural interfaces, control systems and sensory feedback. The main technological approaches (myoelectric control, TMR, RPNI, invasive neural and brain interfaces, AL-based intention decoding, wireless implants).

Keywords: bionic prosthesis, neural interface, TMR, RPNI, sensory feedback, osseointegration.

В. В. Шолота
Д. Л. Рачинський

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА СИСТЕМ ПОЛЯРИЗАЦІЙНОГО ОЦІНЮВАННЯ ОПТИЧНОЇ АНІЗОТРОПІЇ ДВОШАРОВИХ БІОЛОГІЧНИХ ТКАНИН ПРИ ЇХ ДІАГНОСТИЦІ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

В роботі наведено порівняльний аналіз сучасних поляризаційних методів реконструкції параметрів оптичної анізотропії двошарових біологічних тканин в технологіях медичної діагностики. Визначено переваги та обмеження відомих систем поляриметричної реконструкції оптичних характеристик шарів двошарових біологічних структур, зокрема за оцінками достовірності діагностики на їх основі.

Ключові слова: мюллер-матрична поляриметрія, анізотропія біологічного шару, достовірність діагностики двошарових біологічної тканини.

Abstract

The paper presents a comparative analysis of modern polarization methods for reconstructing the optical anisotropy parameters of bilayer biological tissues in medical diagnostic technologies. The advantages and limitations of known systems for polarimetric reconstruction of optical characteristics of layers of bilayer biological structures are determined, in particular, in terms of assessing the reliability of diagnostics based on them.

Keywords: mueller matrix polarimetry, anisotropy of biological layers, reliability of diagnosis of two-layer biological tissues.

Вступ

Поляризаційні методи дослідження біологічних тканин є ефективним інструментом для отримання кількісних характеристик їх мікроструктури. Зокрема, вони дають змогу оцінювати орієнтацію волокон колагену, фазові зсуви та ступінь деполаризації випромінювання, що відбуваються при його проходженні через анізотропне середовище [1]. Мюллер-матрична поляриметрія забезпечує повний опис перетворення поляризаційного стану світла за допомогою матриці Мюллера, що робить її універсальним методом реконструкції оптичних параметрів двошарових структур біотканин [2], що застосовується в медичній діагностиці.

Однак більшість існуючих систем поляриметричної реконструкції мають обмеження, пов'язані з точністю визначення параметрів та відсутністю автоматизованого аналізу отриманих даних, зокрема при застосуванні в медичній діагностиці [3-4]. Тому важливим завданням є проведення порівняльного аналізу методів та оптико-інформаційних діагностичних систем, спрямованих на підвищення достовірності визначення параметрів оптичної анізотропії біологічних шарів складних біологічних структур.

Метою даної роботи є аналіз сучасних поляризаційних методів та систем реконструкції параметрів оптичної анізотропії шарів двошарових біологічних тканин із визначенням їх переваг і недоліків та напрямку подальшого розвитку.

Результати дослідження

Проведено аналітичний огляд методів лазерної поляриметрії, що застосовуються для дослідження реконструкції параметрів шарів двошарових біологічних тканин (БТ). На основі узагальнення експериментальних і теоретичних даних встановлено, що найбільш інформативним підходом до аналізу оптичної анізотропії є мюллер-матрична поляриметрія.

У результаті порівняння відомих прямих методів відтворення орієнтаційних та фазових параметрів окремих шарів біологічних тканин та орієнтаційно-фазових параметрів підповерхневих шарів двошарових біологічних тканин (таблиця 1), які реалізовано відповідними системами, встановлено, що багатопараметричні системи на основі комплексного статистичного, кореляційного та фрактального аналізів забезпечують вищу достовірність діагностики (~95 %). Недоліком таких систем є її обмежені функціональні можливості, обумовлені відсутністю класифікаційного автоматизованого аналізу вектора інформативних характеристик реконструйованих параметрів шарів двошарової БТ, що також призводить до обмежень рівня достовірності при медичній діагностиці БТ.

Таблиця 1- Порівняння систем реконструктивної Мюллер-поляриметрії та аналізу анізотропних біологічних шарів

Назва системи	Метод реконструкції анізотропії шарів БТ	Методи аналізу реконструйованих параметрів шарів БТ	Методи класифікації реконструйованих параметрів	Достовірність діагностики двошарових БТ
Система прямої поляриметричної реконструкції орієнтаційних мап біологічного шару	Метод прямої реконструкції орієнтаційних мап БШ	Статистичний, кореляційний	Відсутні	83,5%
Система прямої поляриметричної реконструкції фазових мап біологічного шару	Метод прямої реконструкції фазових мап БШ	Статистичний, кореляційний	Відсутні	89,5%
Багатопараметрична система для поляризаційної реконструкції анізотропії двошарових БТ	Метод мюллер-матричної реконструкції підповерхневих шарів двошарової БТ	Статистичний, кореляційний, фрактальний	Відсутні	95,3%

Аналіз даних таблиці 1 показав, що переваги багатопараметричної системи для поляризаційної реконструкції анізотропії шарів двошарових БТ отримано, в тому числі, й за рахунок визначення вектора ознак діагностики на основі комплексного застосування статистичного, кореляційного та фрактального аналізу виміряних мап розподілів.

Актуальним для покращення достовірності діагностики є подальший автоматизований класифікаційний аналіз [5, 6] отриманих ознак діагностики. Детальний аналіз сучасних систем Мюллер-Джонс-матричної візуалізації БТ з інтелектуалізованими рішеннями та застосованими технологіями штучного інтелекту наведено в статті співавтора тез [7].

Висновки

Проведений аналіз показав, що багатопараметричні мюллер-матричні системи забезпечують найвищу точність реконструкції параметрів анізотропії двошарових біотканин. Подальше вдосконалення методики пов'язане з врахуванням умов азимутальної незалежності окремих елементів матриці Мюллера двошарової БТ та їх суперпозицій для підвищення достовірності діагностики при проведенні автоматизованого класифікаційного аналізу виміряних розподілів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Digital Information Methods of Polarization, Mueller-Matrix and Fluorescent Microscopy / V.L. Vasyuk, A.V. Kalashnikov, A.G. Ushenko et al. Springer Nature Singapore, 2023. 102 p.
2. Zabolotna, N.I., Sholota, V.V., Okarskyi H.H. Methods and systems of polarization reproduction and analysis of the biological layers structure in the diagnosis of pathologies. 2020. *Proceedings of SPIE*. 11369, 113691S, P. 501-513.
3. Ma H., He H., Ramella-Roman J.C. Mueller matrix microscopy. *Polarized Light in Biomedical Imaging and Sensing*. 2024. Vol. 11. P. 281–320.
4. Characterization of cervical tissue using Mueller matrix polarimetry / S. Khan S., M. Qadir, A. Khalid et al. *Lasers in Med Scienc*. 2023. Vol. 38 (1).

5. System of polarization mapping and intellectual analysis of Mueller matrix invariants of biological layers in the assessment of pathologies / N. Zabolotna, V. Sholota, S. Zhumagulova et al. *Proceedings of SPIE*. 2023. 12985, 129850Q.
6. Заболотна, Н.І., Шолота, В.В. Метод та підсистема підтримки прийняття рішення для мюллер-матричної лазерної поляризаційної діагностики біологічних тканин. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2022. 1(43) С. 43–52 <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2022-43-1-43-52>.
7. Шолота В.В. Аналіз методів підтримки прийняття рішень в системах поляризаційної інтроскопії біологічних тканин та рідин. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2025. № 1. С. 185-192.

Шолота Владислава Владиславівна — асистент кафедри комп'ютерних наук, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: lada.sholota@vntu.edu.ua

Рачинський Дмитро Леонідович – студент групи ЛТО-24м, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, місто Вінниця, e-mail: rachinskiydimas2016@gmail.com

Sholota Vladyslava V. — assistant of the Department of Computer Science, Faculty of Intelligent Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: lada.sholota@vntu.edu.ua

Rachynskyi Dmytro L. - student of group LTO-24b, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia city, email: rachinskiydimas2016@gmail.com

МАТРИЧНІ МЕТОДИ ПОЛЯРИЗАЦІЙНОГО АНАЛІЗУ ОПТИЧНО АКТИВНИХ ЗРАЗКІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація. Проаналізовано застосування матриць Джонса та Мюллера для дослідження оптичних характеристик зразків. Показано, що використання матриць Джонса та Мюллера дозволяє отримати повну інформацію про поляризаційні властивості матеріалів та їх зміни під впливом зовнішніх факторів.

Ключові слова: поляризаційний аналіз, матриці Джонса, матриці Мюллера, анізотропні структури, відеополяриметрія

Вступ

Дослідження поляризаційних властивостей світла є одним з важливих напрямів сучасної оптичної інженерії, зокрема в галузях біомедичної діагностики та матеріалознавства. Зміна стану поляризації світла при взаємодії з оптично активними зразками або матеріалами може бути описана за допомогою математичних формалізмів. Найбільш поширеними є метод Джонса, який базується на описі когерентного поляризованого випромінювання комплексними векторами і матрицями, та метод Мюллера, який використовують для некогерентного або частково поляризованого світла і який спирається на вектори Стокса та матриці Мюллера [1–4]. У системах лазерної відеополяриметрії, що застосовуються у медичній оптиці, зокрема для аналізу біотканин, обидва методи мають широке практичне застосування, проте відрізняються за своїми фізичними передумовами, математичним апаратом та експериментальними вимогами.

Метод Джонса

Розглянемо взаємодію поляризованого пучка випромінювання з елементами оптичної системи. Для спрощення аналізу приймаються припущення: пучок апроксимується однорідною, нескінченною, повністю поляризованою плоскою хвилею; оптична система не містить елементів, що деполаризують світло; у середовищі відсутні нелінійні ефекти [1].

У цьому випадку електричне поле монохроматичної хвилі можна подати у вигляді вектора Джонса:

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_x & e^{i\delta_x} \\ A_y & e^{i\delta_y} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де A_x , A_y — амплітуди компонент електричного поля, а δ_x , δ_y — відповідні фази.

Якщо така хвиля проходить через послідовність оптичних елементів (поляризатор, фазова пластинка, зразок) то її стан поляризації змінюється. Цю зміну описує матриця Джонса, що має вигляд:

$$\mathbf{M}_J = \begin{pmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де елементи J_{ij} є комплексними величинами, які визначають амплітудно-фазові перетворення світла при його проходженні через систему. Зв'язок між вхідним і вихідним векторами поля має вигляд:

$$\mathbf{E}_{\text{вих}} = \mathbf{M}_J \mathbf{E}_{\text{вх}}. \quad (3)$$

Для прикладу, ідеальний лінійний поляризатор, орієнтований уздовж осі x , має матрицю:

$$\mathbf{M}_J = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Цей метод дозволяє проводити розрахунок фазових зсувів, еліптичності поляризації, кутів орієнтації осей анізотропії в біологічних структурах (наприклад, у колагенових волокнах або м'язових тканинах). У лазерній відеополяриметрії матриця Джонса застосовується для реконструкції фазово-амплітудних карт, що відображають локальні оптичні властивості зразка. Зазвичай така система включає лазерне джерело з довжиною хвилі 0,63–0,67 мкм, модуль формування поляризації (поляризатор–аналізатор–чвертьхвильова пластинка), об'єкт дослідження, та цифрову відеокамеру з матрицею CCD або CMOS [1, 2]. Отримані кадри обробляються програмно, шляхом розрахунку елементів матриці Джонса у кожному пікселі. Однак формалізм Джонса має важливі обмеження. Він може бути застосований лише до повністю поляризованого когерентного світла. У разі, коли випромінювання частково поляризоване або середовище має деполаризаційні властивості, метод Джонса стає непридатним. Для таких випадків використовується метод Мюллера, який є узагальненням попереднього підходу.

Метод Мюллера

Метод Мюллера описує зміну стану частково поляризованого або некогерентного світла. Замість комплексного вектора Джонса використовується вектор Стокса:

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix}, \quad (4)$$

де I — повна інтенсивність випромінювання; Q характеризує різницю між горизонтальною та вертикальною поляризацією; U — між поляризацією під кутами $\pm 45^\circ$, а V — між правою та лівою круговою поляризацією [2, 3].

Для повністю горизонтальної поляризації маємо:

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Зміна стану поляризації у методі Мюллера описується дійсною 4×4 матрицею Мюллера:

$$\mathbf{M}_M = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

яка зв'язує вектори Стокса вхідного та вихідного пучків:

$$\mathbf{S}_{\text{вих}} = \mathbf{M}_M \mathbf{S}_{\text{вх}}. \quad (6)$$

Для ідеального лінійного поляризатора вона має вигляд:

$$M_M = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Метод Мюллера дозволяє досліджувати не лише фазові, а й деполаризаційні властивості середовища, що є особливо важливим при аналізі біологічних об'єктів. На відміну від методу Джонса, елементи матриці Мюллера є дійсними числами і пов'язані не з амплітудою, а з інтенсивністю світла. У відеополяриметричних системах реалізація методу Мюллера включає оптичний модуль генерації різних станів поляризації, систему аналізаторів, цифрову відеокамеру та блок чисельної реконструкції 16 елементів матриці [1, 4]. Отримані дані дозволяють створювати поляризаційні карти деполаризації, дихроїзму та оптичної активності, що дає змогу ідентифікувати патологічні зміни у тканинах.

Порівняльна характеристика матричних методів аналізу поляризації

Порівняння матричних методів опису поляризаційних властивостей зразків Джонса та Мюллера наведено у таблиці 1.

Таблиця 1. Порівняння матричних методів Джонса та Мюллера

Метод Джонса	Метод Мюллера
Придатний для аналізу об'єктів, при взаємодії світла з якими воно залишається повністю поляризованим	Придатний для опису об'єктів із частковою деполаризацією
Матриця Джонса враховує абсолютну фазу випромінювання	Окремі елементи матриці Мюллера 4×4 є взаємозалежними (лише сім елементів для однорідних недеполаризувальних об'єктів є незалежними)
Будь-яка комплексна матриця 2×2 може бути матрицею Джонса об'єкта із фізично допустимими властивостями	Не кожна 4×4 матриця описує об'єкт із фізично допустимими параметрами, тобто є матрицею Мюллера
Будь-яка матриця Джонса може бути перерахованою в матрицю Мюллера	Довільна матриця Мюллера перераховується у матрицю Джонса лише для однорідних об'єктів

Таким чином, метод Мюллера є найбільш універсальним, хоча повна матриця Мюллера може містити надлишкову інформацію, яка не використовується при аналізі поляризаційних властивостей зразків. Для застосування більш зручних методів, заснованих на аналізі неповних матриць Мюллера об'єкта, важливим є попередній аналіз структури зразка із визначенням кількості незалежних елементів.

Розрахунки за методами Джонса та Мюллера мають спільну основу — використання матричної алгебри для опису дії оптичних елементів. Проте метод Джонса походить із електромагнітної теорії світла і зберігає інформацію про фазу, тоді як метод Мюллера має феноменологічний характер і описує лише характеристики інтенсивності. Метод Джонса зручний для аналітичного аналізу систем, що складаються з послідовності когерентних елементів (поляризаторів, ретардерів, фазових пластинок), і дозволяє точно визначати фазові зсуви. Метод Мюллера, натомість, охоплює більш широкий клас задач — він враховує деполаризаційні ефекти, зумовлені розсіюванням та неоднорідністю середовищ.

Застосування методу Мюллера для відеополяриметрії

Для аналізу поляризаційних властивостей неоднорідних анізотропних зразків пропонується така модель. Кожну локальну ділянку оптично тонкого зразка зіставляємо з елементарною матрицею Мюллера M_{mn} , що вимірюється відповідною коміркою фотодетектора, а поляризаційні характеристики зразка у площині характеризуємо растровою матрицею Мюллера (РММ), кількість елементів якої відповідає роздільній здатності фотодетектора ($M \times N$)

$$[M^3] = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & \dots & M_{1N} \\ M_{21} & M_{22} & \dots & M_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{M1} & M_{M2} & \dots & M_{MN} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Параметри вектора Стокса вхідного випромінювання у випадку колімованого лазерного випромінювання із плоским хвильовим фронтом на вході системи можна вважати однаковими для всіх елементів в межах світлової апертури матричного фотоприймача випромінювання.

Таким чином, вихідний вектор Стокса оптичного поля зразка

$$[S_{\text{вих}}^3] = \begin{bmatrix} S_{\text{вих}11} & S_{\text{вих}12} & \dots & S_{\text{вих}1N} \\ S_{\text{вих}21} & S_{\text{вих}22} & \dots & S_{\text{вих}2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{\text{вих}M1} & S_{\text{вих}M2} & \dots & S_{\text{вих}MN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & \dots & M_{1N} \\ M_{21} & M_{22} & \dots & M_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{M1} & M_{M2} & \dots & M_{MN} \end{bmatrix} \cdot [S_{\text{вх}}], \quad (8)$$

де $m = 1 - M$, $n = 1 - N$ – порядкові номери комірки матриці фотодетектора.

У лазерній відеополяриметрії метод Мюллера забезпечує комплексний аналіз: за отриманими матрицями будують поляризаційні карти відповідних параметрів (ступеня поляризації, азимутів, еліптичностей, анізотропії), а також просторові розподіли коефіцієнтів деполіризації зразка. Метод Джонса, хоча й обмежений у застосуванні, дозволяє з високою точністю оцінювати фазові характеристики та орієнтації, зокрема волоконних структур у біологічних тканинах [3].

Висновки

Методи Джонса і Мюллера є фундаментальними інструментами сучасної поляриметрії. Метод Джонса доцільно застосовувати для когерентного, повністю поляризованого світла у задачах фазового аналізу — наприклад, при вивченні анізотропних кристалічних шарів або оптично прозорих біозразків. Метод Мюллера є більш універсальним та інформативним при роботі з неоднорідними анізотропними зразками (наприклад, біологічними тканинами), де відбувається розсіювання і часткова деполіризація випромінювання. У сучасних системах лазерної відеополяриметрії обидва методи можуть застосовуватись комплексно: підхід Джонса – для локального фазового аналізу, а Мюллера – для статистичного картографування поляризаційних властивостей зразка. Поєднання цих методів дає змогу створювати високоточні системи неруйнівного контролю та неінвазивної діагностики, здатні відтворювати детальну структуру зразків, зокрема біотканин у реальному часу [1, 4].

Запропонований підхід відеополяриметрії може бути впровадженим в практику матеріалознавчих досліджень оптичних матеріалів та аналізу біологічних зразків.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Модуляційна поляриметрія [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня доктора філософії за освітньо-науковою програмою «Фізика» спеціальності 104 «Фізика та

астрономія» / І. В. Лінчевський, Л. П. Пономаренко, М. В. Чурсанова; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електрон. текст. дані. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 116 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/55605>

2. Ушенко О. Г., Олар О. В., Мотрич А. В., та ін. Мюллер-матрична поляриметрія оптично-анізотропних біологічних тканин : монографія / О. Г. Ушенко [та ін.]. Чернівці : БДМУ, 2021. 268 с.

3. Системи лазерної відеополяриметрії для автоматизованого контролю параметрів неоднорідних біотканин : монографія / С. Є. Тужанський, Г. Л. Лисенко. Вінниця : ВНТУ, 2011. 156 с.

4. Заболотна Н. І., Шолота В. В., Колівошко А. І. Аналіз методів та систем лазерної поляриметрії для відтворення анізотропних параметрів біологічних шарів // Біомедичні оптико-електронні системи та прилади. 2018. Т. 36, № 2. С. 60–71.

Пруданен Владислав Євгенович - студент групи ЛТО-24м кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

Тужанський Станіслав Євгенович - к.т.н, доцент кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, slavat@vntu.edu.ua.

Abstract. The application of Jones and Mueller matrices for studying the optical characteristics of samples has been analyzed. It is shown that the use of Jones and Mueller matrices makes it possible to obtain complete information about the polarization properties of materials and their changes under the influence of external factors.

Keywords: polarization analysis, Jones matrices, Mueller matrices, anisotropic structures, videopolarimetry.

Poudanen Vladyslav Yevhenovych -- Student of the group LTO-24m, Department of Biomedical Engineering and Optoelectronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Tuzhanskyi Stanislav Yevhenovych - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Biomedical Engineering and Optoelectronic Systems, Vinnytsia National Technical University slavat@vntu.edu.ua.

Н. І. Заболотна
С. О. Смоляренко

КОНЦЕПЦІЯ ПОБУДОВИ ЗОБРАЖАЛЬНОГО ФУР'Є-ПОЛЯРИМЕТРА З АВТОМАТИЗОВАНИМ АНАЛІЗОМ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ БІОЛОГІЧНИХ ШАРІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

В роботі наведено опис концепції побудови зображального поляриметра на основі статистичного аналізу виміряних високочастотних та низькочастотних розподілів карт азимутів та еліптичностей Фур'є-зображень біологічних шарів. Фур'є-поляриметр доповнено програмним бінарним класифікатором для застосування в біомедичній діагностиці.

Ключові слова: зображальний поляриметр, біологічний шар, фур'є-аналіз, бінарний класифікатор, достовірність діагностики.

Abstract

The article describes the concept of constructing an imaging polarimeter based on statistical analysis of measured high-frequency and low-frequency distributions of azimuth maps and ellipticities of Fourier images of biological layers. The Fourier polarimeter is supplemented with a software binary classifier for use in biomedical diagnostics.

Keywords: imaging polarimeter, biological layer, Fourier analysis, binary classifier, diagnostic reliability.

Вступ

Пошук нових діагностичних ознак у межах лазерної поляриметрії, здатних відображати оптико-анізотропну структуру біологічних тканин (БТ) і біологічних рідин (БР), стимулює подальше дослідження методів аналізу виміряних поляризаційних параметрів. Так, використання Фур'є-аналізу для просторово-частотної обробки мікроскопічних поляризаційних зображень біологічних шарів, реалізоване в оптичному режимі далекої зони дифракції, дало змогу виявити нові діагностичні показники — високочастотні та низькочастотні компоненти азимутів і еліптичностей оптичного поля або мюллер-матричних зображень (ММЗ) [1, 2].

Крім того, у роботах [1, 2] показано, що за допомогою лазерного Фур'є-поляриметра можна визначати такі азимути, еліптичності вихідного поля та елементи ММЗ, які залишаються азимутально інваріантними під час обертання зразків БТ відносно лазерного променя. Цей ефект, разом із застосуванням методів статистичного аналізу до поляризаційних даних, підвищує точність і надійність медичної діагностики в подібних системах.

Водночас у сучасній медицині активно впроваджуються методи машинного навчання та інтелектуального аналізу даних [3–5], що істотно покращують якість діагностичних рішень.

Основним недоліком лазерного поляриметра з Фур'є-аналізом, який використовується для дослідження БТ і БР, є обмеженість його функцій через відсутність можливості автоматичного формування діагностичного рішення на основі виміряних різночастотних компонент карт азимутів, еліптичностей і матриць Мюллера. Крім того, для підвищення достовірності діагностики важливо враховувати незалежність обраних параметрів від орієнтації об'єкта щодо джерела випромінювання.

Метою дослідження є розширення функціональних можливостей лазерного поляриметра з Фур'є-аналізом для медичної діагностики біологічних тканин шляхом інтеграції методів інтелектуального прийняття рішень.

Результати дослідження

Розроблено схему структурну автоматизованого Фур'є-поляриметра, яка містить вимірювальний канал, блок керування та програмно-апаратний блок на основі методів аналізу зображень та їх класифікації в залежності від досліджуваної патології біологічних тканин.

Основна функція вимірювального каналу полягає в забезпеченні вимірювання різночастотних складових (низькочастотних та високочастотних) азимутально незалежних розподілів азимутів та еліптичностей поляризаційних зображень досліджуваного біологічного шару при діагностиці норми та патології. Основними блоками вимірювального каналу є такі: блок лазерного джерела опромінення, генератор поляризаційних станів (при умові формування циркулярно поляризованого стану опромінюючого лазерного пучка для забезпечення азимутальної інваріантності результатів його розсіювання), предметний столик з досліджуваним біологічним шаром, проекційний оптичний блок для реалізації прямого перетворення Фур'є, блок-просторово-частотної фільтрації, проекційний оптичний блок зворотного перетворення Фур'є, блок поляризаційного аналізу, відео-камера для реєстрації зображення.

В процесі вимірювань реалізовано метод просторово-частотної фільтрації поляризаційних зображень азимутів та еліптичностей поляризації досліджуваних біологічних шарів, які мають азимутальну незалежність від положення опромінюючого пучка [3].

Концепція діагностики базується на проведенні комп'ютерного аналізу отриманих низькочастотних і високочастотних складових азимутально інваріантних мап, за допомогою якого формується вектор ознак для подальшої бінарної класифікації отриманих зображень.

Розглянуто варіанти побудови бінарного класифікатора на основі нейромережевого підходу та KNN алгоритму, що дасть змогу підвищити достовірність прийнятого рішення в процесі діагностики патології за допомогою даного Фур'є-поляриметра.

Висновки

Продемонстровано перспективи концепції побудови лазерного зображувального поляриметра з апаратно реалізованим Фур'є аналізом, який забезпечує отримання нових інформативних високочастотних та низькочастотних складових азимутально інваріантних мап азимутів та еліптичностей поляризаційних зображень біологічних шарів. Їх статистичне оброблення дозволяє отримати вектор інформативних ознак для подальшої бінарної класифікації досліджуваних зразків при діагностиці патології.

Застосування технологій штучного інтелекту для класифікації є одним із можливих чинників подальшого підвищення достовірності поляризаційної діагностики біологічних тканин та рідин.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Karachevtsev A.O. Fourier Stokes-polarimetry of biological layers polycrystalline networks . *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. 2012. Vol. 15, № 3. P. 252-268.
2. Карачевцев А. О. Фур'є-стоксполариметрія полів лінійно та циркулярно двопроменезаломлюючих протеїнових мереж : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. фіз.-мат. наук : спец. 01.04.05 "Оптика, лазерна фізика", Чернівці, 2012. 20 с.
3. System of polarization mapping and intellectual analysis of Mueller matrix invariants of biological layers in the assessment of pathologies / N. Zabolotna, V. Sholota, S. Zhumagulova et al. *Proceedings of SPIE*. 2023. 12985, 129850Q.
4. Заболотна, Н.І., Шолота, В.В. Метод та підсистема підтримки прийняття рішення для мюллер-матричної лазерної поляризаційної діагностики біологічних тканин. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2022. 1(43) С. 43–52 <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2022-43-1-43-52>.
5. Шолота В.В. Аналіз методів підтримки прийняття рішень в системах поляризаційної інтроскопії біологічних тканин та рідин. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2025. № 1. С. 185-192.

Заболотна Наталія Іванівна - д.т.н., доцент, професор кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна, E-mail: Natalia.zabolotna@gmail.com

Смоляренко Сергій — студент групи ЛТО-24м, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, місто Вінниця, serhiy.19.09.qwerty@gmail.com

Nataliia I. Zabolotna, D.Sc., Professor of the Department of Biomedical Engineering and Optical-Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, 95 Khmelnytske Shose, Vinnytsia, Ukraine, e-mail: Natalia.zabolotna@gmail.com

Smolyarenko Serhiy - student of group LTO-24b, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia city, serhiy.19.09.qwerty@gmail.com

Електронне наукове видання

**Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем
(СПІРН - 2025)**

**Матеріали X Міжнародної науково-технічної
конференції**

05-07 листопада 2025 року

Збірник наукових праць

Матеріали подаються в авторській редакції

Підписано до видання 26. 11. 2025 р.

Гарнітура Times New Roman.

Зам. № **P2025-153**

Видавець та виготовлювач
Вінницький національний технічний університет,
Редакційно-видавничий відділ.

ВНТУ, ГНК, к. 114.
Хмельницьке шосе, 95,
м. Вінниця, 21021.
press.vntu.edu.ua,
Е-mail: irvc.vntu@gmail.com.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Електронне наукове видання

**Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем
(СПРН-2025)**

**Матеріали X Міжнародної науково-технічної
конференції**

05 – 07 листопада 2025 року

Збірник наукових праць

Матеріали подаються в авторській редакції

Підписано до видання 05. 12. 2025 р.
Гарнітура Times New Roman.
Зам. № P2025-179

Видавець та виготовлювач
Вінницький національний технічний університет,
Редакційно-видавничий відділ.

ВНТУ, ГНК, к. 114.
Хмельницьке шосе, 95,
м. Вінниця, 21021.
press.vntu.edu.ua,
E-mail: irvc.vntu@gmail.com.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.