

International Conference
on Advanced Trends in Radioelectronics
and Infocommunications (ATRIC-2025)

May 21-22, 2025

Міжнародна науково-технічна конференція
Сучасні проблеми в радіоелектроніці
та інфокомунікаціях (СПРІК-2025)



21-22 травня 2025 року



International Conference
on Advanced Trends In Radioelectronics
and Infocommunications (ATRIC-2025)



Lviv Polytechnic National University
Institute of Telecommunications, Radioelectronics
and Electronic Engineering

International Conference

on Advanced Trends In Radioelectronics
and Infocommunications (ATRIC-2025)

Proceedings

May 21–22

Lviv, Ukraine

Lviv
Lviv Polytechnic Publishing House
2025

Національний університет «Львівська політехніка»

Інститут телекомунікацій, радіоелектроніки
та електронної техніки

Міжнародна науково-технічна конференція

Сучасні проблеми в радіоелектроніці
та інфокомунікаціях (СПРІК-2025)

Матеріали

21–22 травня

Львів, Україна

Львів
Видавництво Львівської політехніки
2025

УДК 621.3, 004

С 89

Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми в радіоелектроніці та інфокомунікаціях» (СПРІК-2025): матеріали, Львів, Україна, 21–22 травня 2025. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2025. – Режим доступу: <https://science.lpnu.ua/atric-2025/conference-proceedings>, вільний. – Заголовок з екрана. – Мова укр. і англ.

ISBN 978-966-994-062-9

У матеріалах конференції СПРІК-2025 відображено сучасні тенденції розвитку науки й інженерії в галузях радіоелектроніки, комп'ютерних наук та інфокомунікацій.

Для науковців й інженерів у галузі радіоелектроніки та інфокомунікацій.

УДК 621.3, 004

The proceedings of the ATRIC-2025 conference depict modern trends in the development of science and engineering in the fields of radio electronics, computer science and infocommunications. These proceedings are recommended for scientists and engineers in the field of radio electronics and infocommunications.

Матеріали подано в авторській редакції

ISBN 978-966-994-062-9

© Національний університет
«Львівська політехніка», 2025

PROGRAM COMMITTEE

Chairman:

Yu. Bobalo – Acting Rector of Lviv
Polytechnic National University

Deputy Chairman:

V. Oborzhyskyi (LPNU, Lviv)

Committee members:

Z. Bluvband (ALD, Tel Aviv, Israel)

A. Bondariev (LPNU, Lviv)

S. Voloshynovskiy (University of
Geneva, Switzerland)

R. Goliaka (LPNU, Lviv)

N. Hots (LPNU, Lviv)

O. Hoholyuk (LPNU, Lviv)

I. Demydov (LPNU, Lviv)

M. Dyvak (WUNU, Ternopil)

D. Dosyn (LPNU, Lviv)

A. Druzhinin (LPNU, Lviv)

F. Dubrovka (NTU KPI, Kyiv)

S. Zhuk (NTU KPI, Kyiv)

M. Ilchenko (NTU KPI, Kyiv)

V. Kychak (VNTU, Vinnytsia)

M. Klymash (LPNU, Lviv)

O. Kokhanov (OPNU, Odesa)

O. Lemeshko (KhNURE, Kharkiv)

I. Lisovuy (SUITT, Odesa)

J. Matuszewski (MUT, Warsaw,
Poland)

V. Mosorov (LUT, Lodz, Poland)

V. Oborzhyskyi (LPNU, Lviv)

O. Osadchuk (VNTU, Vinnytsia)

Yu. Romanyshyn (LPNU, Lviv)

B. Rusyn (PMI, Lviv)

ПРОГРАМНИЙ КОМІТЕТ

Голова:

Бобало Ю.Я. – проф., в.о. ректора
Національного університету
«Львівська політехніка»

Заступник:

Озірковський Л.Д. (НУЛП, м. Львів))

Члени комітету:

Блувбанд З.М. (компанія «ALD»,
Тель-Авів, Ізраїль)

Бондарєв А.П. (НУЛП, м. Львів)

Волошиновський С.В. (Університет
Женеви, Швейцарія)

Голяка Р.Л. (НУЛП, м. Львів)

Гоц Н.Є. (НУЛП, м. Львів)

Гоголюк О.П. (НУЛП, м. Львів)

Демидов І.В. (НУЛП, м. Львів)

Дивак М.П. (ЗУНУ, м. Тернопіль)

Досин Д.Г. (НУЛП, м. Львів)

Дружинін А.О. (НУЛП, м. Львів)

Дубровка Ф.Ф. (НТУ «КПІ», м. Київ)

Жук С.Я. (НТУ «КПІ», м. Київ)

Ільченко М.Ю. (НТУ «КПІ», м. Київ)

Кичак В.М. (ВНТУ, м. Вінниця)

Климаш М.М. (НУЛП, м. Львів)

Коханов О.Б. (НУ «Одеська
політехніка», м. Одеса)

Лемешко О.В. (ХНУРЕ, м. Харків)

Лісовий І.П. (ДУІТЗ, м. Одеса)

Матушевський Я. (ВТА, м. Варшава,
Польща)

Мосоров В.Я. (ЛІТУ, м. Лодзь,
Польща)

Оборжицький В.І. (НУЛП, м. Львів)

Осадчук О.В. (ВНТУ, м. Вінниця)

Романишин Ю.М. (НУЛП, м. Львів)

Русин Б.П. (ФМІ, м. Львів)

V. Teslyuk (LPNU, Lviv)
L. Uryvsky (NTU KPI, Kyiv)

G. Shilo (ZNU, Zaporizhzhia)
I. Yaremchuk (LPNU, Lviv)
Y. Yashchyshyn (WUT, Warsaw,
Poland)

ORGANIZING COMMITTEE

Chairman:

I. Horbatiy, prof., head Department
of Software and Hardware Systems
of Infocommunications, Lviv
Polytechnic National University

Deputy Chairman:

B. Volochiy (LPNU, Lviv)

Secretary:

I. Maksymiv (LPNU, Lviv)

Committee members:

S. Altunin (LPNU, Lviv)
M. Zmysnyi (LPNU, Lviv)
A. Kuzyk (LPNU, Lviv)
N. Kuzyk (LPNU, Lviv)
S. Nichkalo (LPNU, Lviv)
Y. Pyrih (LPNU, Lviv)
V. Fast (LPNU, Lviv)
O. Shkiliuk (LPNU, Lviv)

Теслюк В.М. (НУЛП, м. Львів)
Уривський Л.О. (НТУ «КПІ», м.
Київ)

Шило Г.М. (ЗНУ, м. Запоріжжя)
Яремчук І.Я. (НУЛП, м. Львів)
Ящишин Є.М. (Варшавська
політехніка, Польща)

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ

Голова:

Горбатий І.В., проф., зав. кафедри
програмно-апаратних систем
інфокомунікацій Національного
університету «Львівська
політехніка»

Заступник:

Волочій Б.Ю. (НУЛП, м. Львів)

Секретар:

Максимів І.П. (НУЛП, м. Львів)

Члени комітету:

Алтунін С.І. (НУЛП, м. Львів)
Змисний М.М. (НУЛП, м. Львів)
Кузик А.О. (НУЛП, м. Львів)
Кузик Н.І. (НУЛП, м. Львів)
Нічкало С.І. (НУЛП, м. Львів)
Пиріг Ю.В. (НУЛП, м. Львів)
Фаст В.М. (НУЛП, м. Львів)
Шкілюк О.П. (НУЛП, м. Львів)

CONTENTS / ЗМІСТ

Plenary Reports / Пленарні доповіді

Бобало Ю., Горбатий І. Від кафедри радіотехніки до кафедри програмно-апаратних систем інфокомунікацій: еволюція наукового напрямку	17
Волочій Б., Озірковський Л., Харченко В., Сальник Ю., Яковенко В. Інформаційна технологія стохастичного моделювання експлуатаційної поведінки радіоелектронних систем та комплексів	34
Семенов А., Пінаєв Б. Широкопasmові пристрої генерування і випромінювання хаотичних сигналів для радіоелектронних систем	55
Дружинін А., Островський І., Ховерко Ю., Лях-Кагуй Н. Фізико-технологічні основи синтезу та контрольованої модифікації властивостей матеріалів функціональної електроніки	59
Шаповалов Ю., Романюк Р., Сусяк А. Частотний символний метод аналізу LPTV кіл високої складності	63
M. Klymash, M. Beshley, D. Chornyi Transforming sustainability with AI, big data, and ICT	68

Section 1. Theory of Signals and Electronic Circuits.

Radio Measurements. Metrology

Секція 1. Теорія сигналів та електронних кіл.

Радіовимірювання. Метрологія.

Семенов А., Хльоба А. Обертання проекції відображення на екрані осцилографа складного атрактора генератора динамічного хаоса у фазовій площині.....	73
L. Ozirkovskyi, P. Bratiuk A new example to illustrate the problem of calculating the average pulsed power.....	78
Берко Я., Бігдай В., Лучечко А. Зменшення впливу заземлення на вимірювання в безконтактній електричній імпедансній спектроскопії.....	83
Кульмичов І., Войтович О., Лукаш О. Резонансна система для вимірювання параметрів діелектриків з великими втратами в міліметровому діапазоні.....	87
Голуб С., Могила А. Об'єднання моделей сигналів, відбитих об'єктами складної форми, до комбінованої моделі	92
Мочурад О., Гоц Н. Метрологічне забезпечення інфрачервоного вимірювання температури у радіоелектроніці та телекомунікаційних мережах	95
Бондарєв А., Максимів І., Алтунін С., Андрухів Т. Перспективи застосування модифікованого фазового детектора у приймачах для Massive MIMO.....	100

Section 2. Electronics, photonics, and semiconductor electronics.

Секція 2. . Електроніка, фотоніка та напівпровідникова електроніка

R. Holyaka, M. Khilchuk, R. Kukhta, Ye. Halushka

Optimizing supply mode in energy-efficient sensors 104

Ye. Odarenko, Ye. Demydenko, V. Novytskyi Dispersion

characteristics of gyroelectric photonic crystals 110

Алтунін С., Цимбалюк І., Шкілюк О. Перспективи

застосування технології SDR у системах завадостійкого зв'язку..... 114

Фечан А., Баштик Ю. Застосування методу овердрайв

для електрооптичних систем з товстим шаром рідкого кристалу..... 119

Section 3. Software and hardware of electronic and infocommunication devices and systems.

Секція 3. Програмно-апаратні засоби радіоелектронних та інфокомунікаційних пристроїв і систем.

Бугайов М. Адаптація довжини вибірки сигналу

енергетичного детектора до відношення сигнал-шум

в частотному каналі 124

A. Uzlenkov Some features of a radar dual polarized signal

with a large base 129

Горбатий І., Усатий О., Цайтлер Б., Фурса Т. Сучасні

методи оцінки напрямку приходу широкосмугових

радіосигналів 134

L. Tarasenko, R. Holyaka Switching ripple data transfer technology	139
Сиса В., Яковенко Є. Аналіз можливостей використання методу машинного навчання «випадковий ліс» для перевірки експериментальних даних якості води	144
Машковський Р., Козлов В. Аналіз схемотехнічних компонентів та програмного забезпечення електронних контролерів швидкості (ESC) безколекторних двигунів постійного струму (BLDC).....	149
Піроженко О., Малий О., Онищенко В. Розробка структури та алгоритмів роботи FMCW-радарної системи для виявлення малогабаритних БПЛА на базі SDR.....	155
Щукін О., Фурманова Н., Залужний М. Методика реалізації трансивера LORA у середовищі GNU RADIO за допомогою SDR-пристрою HACKRF.....	160
Вичужаніна С., Мороз Г., Онищенко В. Методика реалізації детектора сигналів LORA на базі SDR.....	164
O. Belej, Yu. Fedirko Algorithm for information interaction of sensors in internet of things networks.....	167
Дзюба А., Бударецький Ю., Якубенко І., Левчик В. Програмно-апаратний комплекс дослідження ударних і вібаційних навантажень в місцях встановлення радіоелектроної апаратури.....	173

**Section 4. Radio Electronic Systems. Antennas,
Microwave Technology and Electromagnetic Compatibility**

**Секція 4. Радіоелектронні системи. Антени,
мікрохвильова техніка та електромагнітна сумісність.**

O. Forostyna, S. Mankovsky Research of the method for object passive position and direction.....	178
O. Liske, R. Mykhailyshyn GPS antenna for use on unmanned vehicles in electronic warfare conditions	183
Авдєєнко Г. Застосування SDR-трансиверів для практичного дослідження технологій цифрового телевізійного мовлення стандартів DVB	188
A. Yushchenko Waveguide-dielectric filters for electronic communications applications in 60 GHz	193
Волочій Б., Шкілюк М., Змисний М., Онищенко В. Структурно-автоматна модель експлуатаційної функційної поведінки радіоелектронного комплексу з двох акустичних та однієї оптико-електронної систем.....	198

**Section 5. Information and communication systems and networks.
Information technologies. Network services, management, operation.**

**Секція 5. Інфокомунікаційні системи та мережі. Інформаційні
технології. Мережеві послуги, керування, експлуатація.**

M. Alhihi Review and performance evaluation of FIFO, PQ, CQ, FQ, and WFQ algorithms in multimedia wireless sensor networks....	203
--	-----

Дмитрук К., Касілов О., Охрименко М., Клавдієв В. Модель продуктивності багатопарових бездротових мереж з динамічним розподілом ресурсів	205
A. Pukach, V. Teslyuk Information model of software support's impact factors analysis using r-system and python	209
Yu. Zanchkovskyy, V. Fast Graph-enhanced LLM text-to-SQL for large-scale infocommunication system analytics	214
A. Lozhkovskyy Mathematical concepts of cluster analysis, vector machine algorithm and neural networks in mass service systems	219
S. Sotnik, M. Rudenko Evaluating relational database scaling strategies in web engineering.....	224
Тягунова М., Бобирь Д., Особливості створення сучасної автоматизованої системи підбору моторної оливи.....	229
M. Seniv, D. Stepanov Methods for evaluating the reliability of web portals at different stages of development using the integration of immutable infrastructure and containerization.....	232
I. Kravets, O. Shuparsky, A. Luchehko Three stage weighted least squares algorithm for TDOA-based localization.....	237
Яковенко В., Фурманова Н., Романенко Ю. Системотехнічний підхід до побудови інфокомунікаційної моделі оцінювання оптимальності укриття цивільного населення.....	242

Павлиш В., Зайвий Р. Використання методів інтелектуальної маршрутизації в безпілотних мережах з оцінкою втрат сигналу.....	247
S. Vasylenko, V. Yerokhin Suboptimal algorithm for separation and demodulation of three mutually non-orthogonal unequal-power bpsk signals.....	252
Хомутник Д., Пукач А. Автоматизована генерація хмарної інфраструктури на основі високорівневого опису природною мовою та великих мовних моделей.....	257
Головко О., Яковенко Є. Параметри технології LORA та їх вплив на завадозахищеність радіоканалу.....	262
Чернова І. Управління знаннями у виробництві ентомоз логічної продукції.....	266
N. Kotliar, T. Maksymiuk, I. Kravets Path reconstruction algorithms to enhance context-oriented services in wireless networks.....	269
О. Chaplia, Н. Klym Performance and usability assessment of CHROMADB for offline semantic search.....	274
Озірковський Л., Волочій Б., Жук Ю., Приймак Н., Онищенко В. Оцінювання структурної живучості бездротової мережі зв'язку для групи безпілотних літальних апаратів.....	279
Карнаух Д., Тягунова М., Киричек Г. Ресурси і перспективи підвищення стійкості до перешкод бездротових мереж систем ІОТ.....	284

Костецький Д., Тягунова М., Киричек Г. Особливості комп'ютерної системи для дистанційного навчання на базі штучного інтелекту.....	289
Лісовий І., Макаров І. Вплив нестабільності параметрів каналу на рівень завад у регенераторах цифрових систем передачі.....	292
Сологуб В., Корнієв В., Яремко О. Дослідження технологій безпроводного зв'язку для мереж інтернету речей (IOT), зокрема модуляцій LORA і LR-FHSS.....	298
M. Kaidan, Beshley P. Concept of smart energy management based on AI, blockchain, and ICT integration.....	303

Section 6. Avionics. Automotive electronics. Biomedical engineering. Robotics. Automated control systems.

Секція 6. Авіоніка. Автомобільна електроніка. Біомедична інженерія. Робототехніка. Автоматизовані системи керування.	
D. Khorunzhyi, M. Stankevych Advanced approaches to the development of mobile robotic systems	308
Барановський Д. Оптимізація системи підтримки прийняття рішень сімейного лікаря за допомогою прикладних та градієнтних методів	312
I. Rabiichuk, A. Fechan Overview of the possibility of using cellular automata for swarms of automated devices in dynamic environments	317

М. Korkmaz Evaluation of different bayes filters for soc estimation.....	322
Берневек І., Яремко О. Дослідження інтегрованого керування групою безпілотних літальних апаратів.....	330
Скачков В., Братченко Г., Гончарук А., Жарков Я. Комплексування адаптивної обробки просторово-часових сигналів та технології DS-CDMA для керування групою безпілотних засобів в умовах радіопротидії.....	3368
Канцедал В., Могила А. Особливості між етапного ситуаційного управління наземним комплексом радіоелектронного придушення малих БПЛА.....	341
О. Liske, V. Lozynskyi Evaluation of the reliability of biometric fingerprint identification.....	345
Севостьянов Ю., Могила А. Пристрій для перевірки азимутального каналу радіотехнічної системи ближньої навігації повітряних суден цивільної авіації.....	350
О. Liske Simulation of an automatic control system with a pid controller: a case study of an inverted pendulum.....	355
Таращик Є., Малий О. Розробка навігаційних систем для безпілотних літальних апаратів на основі технологій технічного зору.....	360
Гарачук С., Малий О., Костяной П. Оптимізація схемотехніки та конструкції бездротових приймачів аналогового відеосигналу при їх застосуванні для детектування БПЛА.....	364

O. Liske, R. Velychko Access control system using facial and hand gesture recognition on Arduino.	369
Роса Т., Яремко О. Дослідження методів інерційного керування безпілотними літальними апаратами.....	374

Section 7. Security of information and communication systems.

Секція 7. Безпека інфокомунікаційних систем.

Бальковський Н., Климаш М. Модель виявлення мережевих атак на основі random forest та SHAP-аналізу	379
P. Vlasenko, S. Samoylyk Simulation-based test of source-side authentication in analog video transmission systems	385
V. Chakrian, M. Ievdokymenko META-analysis of time-to-exploit and severity of exploited vulnerabilities by threat actors, and how it affects the prioritization of vulnerability remediation efforts in enterprise infocommunication networks.....	389
Озірковський Л., Волочій Б., Гусяк Б., Змисний М. Методика визначення показників безпечності відмовостійкої системи.....	394
R. Tors'ka, D. Dosyn Performance enhancement of covert uav communication systems via cdma techniques.....	401

PLENARY REPORTS / ПЛЕНАРНІ ДОПОВІДІ

Бобало Ю.Я., д.т.н., проф.

Горбатий І.В., д.т.н., проф.

giv@polynet.lviv.ua

Національний університет «Львівська політехніка»

ВІД КАФЕДРИ РАДІОТЕХНІКИ ДО КАФЕДРИ ПРОГРАМНО-АПАРАТНИХ СИСТЕМ ІНФОКОМУНІКАЦІЙ: ЕВОЛЮЦІЯ НАУКОВОГО НАПРЯМКУ

Кафедра програмно-апаратних систем інфокомунікацій Національного університету «Львівська політехніка» як правонаступниця кафедри теоретичної радіотехніки та радіовимірювань заснована у жовтні 1939 р. як кафедра радіотехніки під керівництвом професора Грошковського Януша Теодоровича в складі електротехнічного факультету Львівського політехнічного інституту на основі радіотехнічної групи, що існувала на кафедрі фізики №1 (згідно із витягом з протоколу №11 від 9 травня 2024 р. засідання Вченої ради Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки Національного університету «Львівська політехніка»). Наукові праці професора Грошковського Я. Т. присвячені методам генерування й стабілізації електричних коливань, розробленню методів їх аналізу, а також проблемам вакуумної техніки.

Після відновлення роботи Львівського політехнічного інституту в 1944 р. на базі кафедри радіотехніки наказом № 57 від 1 жовтня 1944 р. на електротехнічному факультеті організована кафедра радіотехніки та телемеханіки в такому складі: Загаєвський Т. К. – завідувач кафедри, Величко Ю. Т. – в. о. доцента, Любельський К. К. – асистент, Корняга Ч. Д. – старший лаборант, Ганявець Г. Г. – лаборант.

З 7 жовтня 1944 р. завідувачем кафедри радіотехніки та телемеханіки призначено доктора технічних наук, професора Харкевича Олександра Олександровича, відомого вченого в галузі теорії автоколивань, теорії інформації та електроакустичних апаратів. Професор О. О. Харкевич заклав у Львівському політехнічному інституті підвалини науково-дослідної лабораторії радіотехнічного профілю, яка відтак виросла в Науково-дослідний конструкторський інститут електронної вимірювальної та обчислювальної техніки (НДКІ «ЕЛВІТ»). Згодом у 1964 р. він був обраний дійсним членом Академії Наук СРСР.

У березні 1945 р. кафедру радіотехніки і телемеханіки було розділено на дві кафедри – «Радіотехніка» та «Автоматика та телемеханіка». Завідувачем кафедри «Радіотехніка» призначено доцента Гітшова Георгія Вільгельмовича.

Із червня 1946 р. завідувачем кафедри «Радіотехніка» призначено старшого викладача Величка Юрія Теофановича. У 1947 р. Ю. Т. Величко успішно захистив кандидатську дисертацію, присвячену проблемі спряження контурів супергетеродинного приймача, і став першим викладачем із науковим ступенем. У 1949 р. на посаду асистента зараховано випускника першого випуску спеціальності «Радіотехніка» Й. А. Захарію, який у 1950 р., успішно захистив під керівництвом професора К. Б. Карандеєва кандидатську дисертацію, присвячену теорії похибок детекторних приладів, і став другим викладачем кафедри з науковим ступенем.

У 1952 р. на базі кафедри «Радіотехніки» утворено дві кафедри – «Теоретичної радіотехніки» (завідувач кафедри, доцент, к. т. н. Величко Ю. Т.) та «Радіоприймальних пристроїв» (завідувач кафедри, д. т. н., професор Карандеєв К. Б.), які забезпечували підготовку та випуск інженерів спеціальності «Радіотехніка». У штат кафедри «Теоретична радіотехніка», крім Ю. Т. Величка, були зараховані на

посади асистентів к. т. н. Захарія Й. А. та Вакуленко О. Л. На плечі Ю. Т. Величка знову лягла велика робота з формування викладацького складу кафедри, організації нових лабораторій, розширення наукових досліджень, підготовки наукових кадрів. На кафедрі функціонували лабораторії теоретичної та загальної радіотехніки, радіовимірювань, антенно-фідерного обладнання, електронних і йонних приладів.

Протягом 1953 – 1959 рр. Ю. Т. Величко поєднував обов'язки декана радіотехнічного факультету та завідувача кафедри «Теоретична радіотехніка», не покинув наукової роботи й завершив розроблення теорії прохідного чотириполюсника, яка лягла в основу його докторської дисертації. Під його науковим керівництвом Є. Ф. Замора захистив кандидатську дисертацію. У 1958 р. опублікована монографія Ю. Т. Величка «Прохідні чотириполюсники», яка в той час була однією з перших у країні україномовних наукових праць, де подавалась повна теорія лінійного прохідного чотириполюсника з використанням матрицевого та графічного числення. Одночасно Ю. Т. Величко разом із колективом авторів працював над російсько-українським електро-радіотехнічним словником, який вийшов у світ теж у 1958 р.

У 1966 – 1967 рр. вийшов у світ навчальний посібник «Теоретичні основи радіотехнічних мереж», який є результатом плідної праці Ю. Т. Величка над розвитком теорії лінійних електричних кіл. Наукові роботи Ю. Т. Величка знайшли визнання широкої наукової громадськості. Він став членом редколегій журналів «Известия вузов СССР. Радиотехника» та «Теоретическая электротехника». Школу наукової роботи під керівництвом Ю. Т. Величка пройшли в 50-ті роки Нагорний Л. Я. та Ільницький Л. Я., які згодом захистили докторські дисертації, Мушкарден Е. М. та Гліненко К. С., які захистили кандидатські дисертації та поповнили викладацький склад радіотехнічного факультету.

У 1960 р. після створення факультету радіотехніки та автоматики (ФРА) на базі радіотехнічного факультету кафедра «Теоретична радіотехніка» дістала нову назву: «Теоретична радіотехніка та радіовимірювання» (ТРР).

Розвиваючи теорію лінійних кіл із постійними параметрами, Ю. Т. Величко разом із тим скеровував своїх аспірантів на дослідження та розвиток теорії параметричних і нелінійних кіл. У 60-і роки питанням синтезу лінійних кіл займався аспірант Є. О. Польовий, над аналізом періодичних режимів у параметричних колах працював аспірант М. Д. Бірюк, а в автоколивальних пристроях – аспірант Б. А. Мандзій. Із приходом на кафедру к. т. н. Т. І. Бардили посилювався науковий напрям, пов'язаний з аналізом частотних перетворень у нелінійних колах. У цей же період доцент Й. А. Захарія розробляв методи розрахунку імпульсних схем, а з середини 60-их років почав роботу над проблемами вимірювальної техніки надвисоких частот, результати якої знайшли відображення в навчальному посібнику «Основи надвисокочастотних вимірювань», опублікованому в 1972 р. Під науковим керівництвом Й. А. Захарії працювали аспіранти Х. Піщарас (Кіпр) та І. Н. Прудіус, які відтак успішно захистили кандидатські дисертації, присвячені проблемам аналізу та розроблення пристроїв НВЧ. Дослідженням шумових властивостей лінійних кіл на кафедрі під керівництвом Ю. Т. Величка займався І. Г. Ковтун, який у 1973 р. захистив кандидатську дисертацію. У 1974 р. вийшов у світ посібник Р. Д. Грицьківа «Основи теорії довгих ліній», який базувався на методиці аналізу ліній, запропонованій Ю. Т. Величком. Над розробкою моделей транзисторів як компонентів інтегральних схем розпочав роботу під керівництвом Ю. Т. Величка асистент Кіселичник М. Д., результати якої лягли в основу його кандидатської дисертації, захищеної в 1982 р. Із приходом на кафедру доцента

М. М. Сумика започатковано новий науковий напрям, пов'язаний із цифровою обробкою сигналів.

У 1977 – 1980 рр. на кафедрі ТРР працював доктор технічних наук професор А. Ф. Чаплін. Він активізував госпдоговірну науково-дослідну роботу (НДР) з розроблення нових антенних пристроїв, організував на факультеті науково-дослідну лабораторію. Під його науковим керівництвом захистили кандидатські дисертації Євген Михайлович Ящишин, Михайло Юрійович Михайлов, Олег Васильович Самсонюк, Віктор Васильович Гоблик, Андрій Єфанов.

У лютому 1976 р. Ю. Т. Величко перейшов на посаду професора кафедри, а завідувачем кафедри був обраний доцент Мандзій Богдан Андрійович. У 1976 р. із НДЛ-2 на кафедру перейшов на посаду асистента Б. Ю. Волочій. У той час домінуючим напрямом наукової роботи на кафедрі стала теорія кіл, яка інтенсивно розвивалась завдяки широкому використанню електронно-обчислювальної техніки. Перед науковим колективом кафедри постало завдання активно включитись у роботу з розроблення методів автоматизованого аналізу пристроїв та впровадження їх в інженерну практику та в навчальний процес. Серед ентузіастів розроблення методів автоматизованого аналізу лінійних кіл на кафедрі був к. т. н. Р. В. Дмитришин, який організував групу автоматизованого проектування в Студентському проектно-конструкторському бюро (СПКБ). У 1980 р. він опублікував монографію «Оптимізація електронних схем на ЕОМ».

Починаючи з 1982 р. усі роботи з автоматизації проектування РЕА, які проводились в СПКБ, були зосереджені в одному відділі під керівництвом Мирослава Романовича Подольського, а наукове керівництво було закріплене за завідувачем кафедри «Теоретична радіотехніка та радіовимірювання» доцентом Б. А. Мандзієм. У цей період відділ автоматизації проектування виконав ряд госпдоговірних

робіт із розроблення програм аналізу нелінійних електронних схем, контролю правильності застосування електрорадіокомпонентів у радіоелектронній апаратурі (РЕА) та оцінювання показників надійності, математичного та програмного забезпечення систем автоматизованого проектування РЕА, а також САПР схмотехнічного проектування «ПАРУС».

На кафедрі в цей період виконували НДР «Розробка орієнтованих на застосування електронно-обчислювальних машин (ЕОМ) моделей компонентів та процесів функціонування радіоелектронних пристроїв та систем», у рамках якої ряд аспірантів та здобувачів наукового ступеня виконали й захистили під керівництвом доцента Б. А. Мандзії кандидатські дисертації: І. І. Гарасимів (1984 р.), В. О. Пелішок (1987 р.), А. П. Бондарєв (1987 р.), Р. І. Желяк (1989 р.). За результатами досліджень у 1991 р. опублікована монографія «Машинне моделювання радіоелектронних і електротехнічних пристроїв» (автори І. І. Гарасимів, Б. А. Мандзій, О. Й. Фелиштин). Під керівництвом доцента Т. І. Бардили виконували дисертаційні дослідження аспірант Г. Герхард (захист у 1973 р.), аспірант А. Г. Останін, здобувач наукового ступеня Д. І. Грицак (захист у 1981 р.) та аспірант О. Г. Крук (захист у 1990 р.). Їх дисертації присвячені відповідно питанням перетворення частоти гармонічних сигналів, підвищення інформативності осцилографів та підвищення точності чисельних методів інтегрування диференціальних рівнянь.

У 1981 р. повернувся на кафедру після закінчення аспірантури к. т. н. Б. Ю. Волочій і започаткував новий для кафедри ТРР науковий напрямок «Теорія і практика системного аналізу експлуатаційної поведінки радіоелектронних комплексів та систем на етапі їх системотехнічного проектування». Розвиток цього наукового напрямку давав можливість виконувати НДР на замовлення й відповідно поновити роботу науково-дослідної лабораторії кафедри НДЛ-51. Лабораторія

працювала над проблемою забезпечення відмовостійкості бортових інформаційно-вимірювальних систем. з розроблення методів та засобів системотехнічного надійнісного проектування радіоелектронних систем, надійнісних моделей та методів функціонального контролю великих інтегральних схем, радіаційної стійкості РЕА. У науковий колектив лабораторії НДЛ-51 у цей період прийшли Ярослав Башта, Віктор Беляєв, Валерій Жаглін, Ігор Пшеничний, Володимир Осінчук, Едуард Шихович, Ігор Чічкевич, к. т. н. Юрій Бобало, к. т. н. Михайло Мелень.

У 80-х роках групою в складі Б. Ю. Волочія, Б. А. Мандзія, Ю. С. Обуха, І. С. Пшеничного в співпраці з Ігорем Дмитровичем Калашніковим і Романом Богдановичем Мазепою велось розроблення математичного забезпечення для універсальної програмної стохастичної моделі експлуатаційної надійнісної поведінки відмовостійких систем. Математичне забезпечення дало змогу здійснити розроблення програмного засобу АСНА-1 (автоматизована система надійнісного аналізу), який призначений для розв'язання задач надійнісного проектування бортових інформаційних систем космічних апаратів. Розробниками програмного засобу АСНА-1 були Юрій Степанович Обух та Ігор Стахович Пшеничний. Результати досліджень за цією тематикою представлені в монографії «Проектування відмовостійких мікропроцесорних інформаційно-вимірювальних систем», опублікованій в 1987 р. (автори Б. Ю. Волочій, І. Д. Калашніков, Р. Б. Мазепа, Б. А. Мандзій).

У другій половині 80-их років за потребами Замовника започатковано науковий напрямок розроблення моделей та методів для оцінювання структурної живучості мереж зв'язку з комутацією пакетів. Для визначення показників структурної живучості мережі зв'язку із сітковою структурою Б. Ю. Волочій та Е. Т. Шихович запропонували метод перетворення фрагмента її моделі у вигляді ймовірного

графа зі структурою «багатопроменева зірка» в «багатокутник». У подальшому Б. Ю. Волочій та В. П. Беляєв запропонували метод формування моделей для оцінювання структурної живучості мереж зв'язку з комутацією пакетів із сітковими та складними ієрархічними структурами. Цей метод отримав назву «метод комутації ймовірнісних пакетів».

Із приходом на кафедру доцента Б. Є. Рицаря та Л. Шевченка було розпочато роботи з розроблення вузлів апаратури ЯМР-спектроскопії, які згодом продовжив доцент І. Г. Ковтун.

Новий для кафедри напрямок наукової тематики, пов'язаний із моделюванням та оптимізацією технологічних процесів виробництва РЕА за критеріями якості та надійності, з'явився з приходом на кафедру доцента Л. А. Недоступа.

Отже, до кінця 80-х років основними напрямками наукової роботи кафедри та лабораторії НДЛ-51 при цій кафедрі стали: автоматизація схемотехнічного проектування радіоелектронних пристроїв, надійнісне проектування відмовостійких радіоелектронних комплексів і систем та розроблення методів і засобів забезпечення надійності та якості РЕА в процесі виробництва. Узагальненням багаторічної наукової роботи стали докторські дисертації Б. А. Мандзія та Л. А. Недоступа.

У лютому 1986 р. завідувачем кафедри був обраний доцент Б. Ю. Волочій. У той період з появою на кафедрі електронно-обчислювальних машин з'явилися нові можливості в розробленні засобів автоматизації схемотехнічного й схемотехнічного проектування радіоелектронних комплексів, систем та пристроїв.

Слід зазначити, що перехід колективу лабораторії НДЛ-51 від використання в науковій роботі великих ЕОМ до персональних комп'ютерів дав змогу зробити великий крок у розвитку теорії й

практики системотехнічного проектування радіоелектронних систем та комплексів. Так на початку 90-их років Віктор Беляєв запропонував новий підхід до автоматизованого створення стохастичних моделей експлуатаційної надійнісної поведінки відмовостійких систем. В основу підходу покладено формалізоване представлення у вигляді структурно-автоматної моделі. Ним створено програмний засіб АСНА-2, який у поєднанні зі структурно-автоматними моделями експлуатаційної надійнісної поведінки відмовостійких систем різних конфігурацій (типів) утворював їх програмні стохастичні моделі. Використання програмних стохастичних моделей забезпечило суттєву автоматизацію процесу розв'язання задач надійнісного проектування радіоелектронних систем із властивістю відмовостійкості.

У подальшому цей підхід дав змогу сформувати інформаційну технологію створення стохастичних моделей експлуатаційної функціональної поведінки систем. Починаючи із другої половини 90-х років, наявність інформаційної технології створення стохастичних моделей експлуатаційної функціональної й надійнісної поведінки систем відкрило нові можливості для розв'язання науково-прикладних завдань на етапі системотехнічного проектування радіоелектронних систем та комплексів. Не повний перелік розв'язаних колективом наукового напрямку завдань є таким:

- 1) розроблена стохастична модель експлуатаційної функціональної поведінки прицільного радіоелектронного комплексу;
- 2) створена методика системного аналізу для розроблення системи цифрового оброблення зображень, з використанням якої показано, що ефективність запропонованих методів сегментації зображень є близькою до потенційно можливих значень;
- 3) розроблено ряд стохастичних моделей експлуатаційної поведінки відмовостійких систем мажоритарного типу з підвищеним ступенем

адекватності, на основі яких створено методики їх надійнісного параметричного синтезу;

4) розроблена стохастична модель стратегії технічного обслуговування та ремонту систем регіонального радіоелектронного комплексу, в якій враховано розміщення систем, багатоетапність процесу технічного обслуговування та ремонту, виконання однією ремонтною бригадою двох видів відновлюваних робіт (планового технічного обслуговування та аварійного відновлення), відключення систем підчас технічного обслуговування;

5) розроблено методику проектування алгоритмів функціонування радіоелектронних систем короткотривалого використання, в основу якої покладено стохастичну модель їх експлуатаційної функціональної поведінки; для цієї методики запропоновано новий метод побудови моделі експлуатаційної функціональної поведінки системи короткотривалого використання у вигляді «схеми шляхів»;

6) розроблено математичне забезпечення для автоматизованого створення структурно-автоматних моделей експлуатаційної поведінки відмовостійких систем, на основі яких у програмних стохастичних моделях формуються графи станів і переходів;

7) отримали розвиток теоретичні засади, а на їх основі методи, моделі та методики, які дають змогу визначати слабкі місця в радіоелектронних інформаційних системах відповідального призначення з точки зору функційної безпечності.

За результатами наукової роботи опубліковано монографії:

– «Системний аналіз якості виробництва прецизійної радіоелектронної апаратури» (1996 р.) – автори Ю. Я. Бобало, М. Д. Кіселичник, Л. А. Недоступ.

– «Системи розпізнавання образів з малими базами даних» (1996 р.) – автори Б. О. Капустій, Б. П. Русин, В. А. Таянов.

Протягом 1997 – 2004 рр. кафедру вдруге очолював д. т. н., професор Б. А. Мандзій. У той період захистили кандидатські дисертації старший викладач Л. Д. Озірковський (2002 р.), О. В. Лазько (2003 р.), А. Я. Бенч (2004 р.).

За результатами наукової роботи опубліковано монографії:

– «Функціональна надійність цифрових пристроїв» (1997 р.) – автори Бобало Ю. Я., Капустій Б. О., Мандзій Б. А.;

– «Імпульсна та частотна діагностика коаксимальних ліній зв'язку» (2000 р.) – автори Недоступ Л. А., Лазько О. В., Кіселичник М. Д., Бобало Ю. Я.;

– «Математичне макромодельовання динамічних систем: теорія та практика» (2000 р.) – автор Матвійчук Я. М.;

– «Модельовання та оптимізація процесів формування і контролю якості радіоелектронної апаратури» (2001 р.) – автор Кіселичник М. Д.;

– «Технологія модельовання алгоритмів поведінки інформаційних систем» (2004 р.) – автор Волочій Б. Ю.

Протягом 2005 – 2014 рр. кафедру очолював д. т. н., професор Недоступ Л. А. У цей період докторські дисертації захистили А. П. Бондарев (2008 р.), Б. Ю. Волочій (2008 р.), Ю. Я. Бобало (2010 р.), З. О. Колодій (2011 р.), кандидатські дисертації захистили М. М. Змисний (2013 р.), І. В. Кулик (2013 р.), О. В. Муляк (2014 р.), І. П. Максимів (2014 р.).

Протягом 2004 – 2006 рр. під керівництвом професора Б. А. Мандзія виконані НДР «Вербаль» із назвою «Розробка комп'ютерних моделей відмовостійких радіоелектронних засобів». Протягом 2007 – 2009 рр. та НДР «Крокіт» із назвою „Розробка комп'ютерних макромоделей радіоелектронних систем та їх функціональних вузлів, адаптованих до задач надійнісного проектування”.

За результатами наукової співпраці Я. М. Матвійчука і Є. В. Сторчуна опублікована монографія «Біофізичні та математичні основи інструментальних методів медичної діагностики» (2009 р.).

Протягом 2009 – 2011 рр. виконана НДР ДБ/ВіРН із назвою «Моделювання і мультикритеріальна оптимізація процесів забезпечення якості та безвідмовності радіоелектронних пристроїв». Керівником роботи був професор Л. А. Недоступ.

Протягом 2010 – 2012 рр. виконана НДР ДБ/ПНРЛ із назвою «Розроблення моделей, методів та алгоритмів для автоматизованої оцінки показників надійності радіоелектронних та електромеханічних пристроїв і систем». Основними результатами виконання НДР “ПНРЛ” були: дві колективні монографії: «Математичні моделі та методи аналізу надійності радіоелектронних, електротехнічних та програмних систем» (2013 р.) – автори Ю. Я. Бобало, Б. Ю. Волочій, О. Ю. Лозинський, Б. А. Мандзій, Л. Д. Озірковський, Д. В. Федасюк, С. В. Щербовських, В. С. Яковина та «Проектування ефективних стратегій технічного обслуговування. Математичні моделі, алгоритми і методики» (2014 р.) – автори Б. Волочій, Л. Озірковський, І. Кулик.

Протягом 2013 – 2015 рр. виконана НДР ДБ/ТРИКАФ із назвою «Розроблення моделей надійності, ризику та безпечності програмно-апаратних технічних систем». Основними результатами виконання НДР «ТРИКАФ» були дві колективні монографії: «Математичні моделі та методи аналізу надійності радіоелектронних, електротехнічних та програмних систем» (2013 р.) – автори Ю. Я. Бобало, Б. Ю. Волочій, О. Ю. Лозинський, Б. А. Мандзій, Л. Д. Озірковський, Д. В. Федасюк, С. В. Щербовських, В. С. Яковина та «Проектування ефективних стратегій технічного обслуговування. Математичні моделі, алгоритми і методики» (2014 р.) – автори Б. Волочій, Л. Озірковський, І. Кулик.

З лютого 2015 р. до лютого 2016 р. кафедру очолював д. т. н., професор Бондарєв А. П. Під керівництвом Бондарєва А. П. розвивався науковий напрямок підвищення завадостійкості пристроїв синхронізації. У 2015 р. на кафедру ТРР перейшов д. т. н., доцент І. В. Горбатий, з приходом якого з'явився новий для кафедри науковий напрямок, пов'язаний з підвищенням завадостійкості, відмовостійкості, криптозахищеності телекомунікаційних систем при високошвидкісному передаванні даних в умовах завад. Нові наукові результати в цьому напрямку отримано, зокрема, завдяки використанню запропонованого і запатентованого Горбатим І. В. нового високоефективного різновиду амплітудно-фазової модуляції – амплітудної модуляції багатьох складових (АМБС), застосування якої дає змогу підвищити ефективність і завадозахищеність телекомунікаційних систем в умовах завад.

Протягом 2016 – 2022 рр. кафедру очолював к. т. н., доцент Кіселичник М. Д. Протягом 2016 – 2017 рр. під керівництвом професора А. П. Бондарєва виконана НДР ДБ/Флюєнс із назвою «Інформаційно-вимірювальна система моніторингу магнітного поля на основі радіаційно-стійких нанорозмірних металевих перетворювачів». Захистили кандидатські дисертації А. В. Машак (2016 р.), О. П. Шкілюк (2017 р.) і С. І. Алтунін (2019 р.). У 2020 р. докторську дисертацію захистив Л. Д. Озірковський.

Протягом 2017 – 2018 рр. під керівництвом професора Волочія Б. Ю. виконана НДР ДБ/Ризик із назвою «Розроблення математичного забезпечення для програмного засобу аналізу функціональної безпечності та надійності програмно-апаратних систем відповідального призначення».

Протягом 2018 – 2019 рр. виконана НДР ДБ/Зв'язок із назвою «Підвищення ефективності засобів бездротового зв'язку відпо-

відального призначення та процедур моделювання і прогнозування їх характеристик», керівник професор Ю. Я. Бобало, відповідальний виконавець доцент І. В. Горбатий. За результатами цієї роботи в 2019 р. була опублікована наукова монографія авторів Горбатого І. В., Желяка Р. І., Кіселичника М. Д. «Методи формування й оброблення сигналів у телекомунікаційних системах» (за заг. ред. д-ра техн. наук, доц. І. В. Горбатого).

У 2019 р. в межах міжнародної наукової співпраці кафедри ТРР та Варшавської політехніки (Польща) проведено формування, оброблення та експериментальне дослідження характеристик сигналів на основі нової запропонованої професором Горбатим І. В. амплітудної модуляції багатьох складових (АМБС).

З вересня 2022 р. кафедру ТРР очолює д. т. н., професор І. В. Горбатий. Протягом 2022 – 2023 рр. на кафедрі виконана НДР ДБ/Демодуляція за держбюджетним фінансуванням із назвою «Розроблення криптозахищеної системи високошвидкісного передавання даних у діапазонах УВЧ і НВЧ з підвищеними завадостійкістю та відмовостійкістю», керівник професор Ю. Я. Бобало, відповідальний виконавець професор І. В. Горбатий.

З приходом на кафедру к.т.н. Бударецького Ю.І. з'явився новий науковий напрямок розроблення уніфікованих радіолокаційних вимірювачів параметрів руху наземних і повітряних об'єктів із підвищеними завадостійкістю та точністю визначення поточних координат.

У 2023 р. замість НДЛ-51, яка припинила свою роботу, створено науково-дослідну лабораторію телекомунікаційних, інформаційно-керуючих та контрольно-випробувальних радіотехнічних систем (НДЛ-132) Національного університету «Львівська політехніка». Науковим керівником лабораторії призначено професора Горбатого І. В., завідувачем лабораторії – к.т.н., с. н. с. Бударецького Ю. І.

Науковими напрямами НДЛ є: удосконалення телекомунікаційних та інфокомунікаційних систем, радіотехнічних систем отримання даних про параметри руху наземних, надводних та повітряних об'єктів, інформаційно-керуючих радіотехнічних систем, контрольно-випробувальних радіотехнічних систем для шляхових випробувань дорожньо-транспортних засобів спеціального і загального призначення, підвищення якості, надійності, достовірності, безпеки, безпечності, завадостійкості, криптостійкості, ефективності, точності та оперативності телекомунікаційних і радіотехнічних систем.

У 2024 р. на кафедрі розпочалось виконання НДР ДБ/Ретранслятор із назвою «Система криптозахищеного завадозахищеного прихованого зв'язку з безпілотними літальними апаратами великого радіусу дії з використанням ретранслятора», керівник професор Ю. Я. Бобало, відповідальний виконавець професор І. В. Горбатий, а також молодіжна НДР ДБ/Радіозв'язок за держбюджетним фінансуванням із назвою «Методи та алгоритми роботи завадозахищеного радіоканалу зв'язку з використанням технології програмно-визначеного радіо», керівник к. т. н. С. І. Алтунін, відповідальний виконавець к. т. н. О. П. Шкілюк.

У 2024 р. під керівництвом професора Горбатого І. В. захистив дисертацію доктора філософії Цимбалюк І. Р.

Разом з розвитком традиційних наукових напрямків протягом останніх років за сприяння професора Бондарєва А. П., доцента Шкілюка О. П., старших викладачів Алтуніна С. І. та Змисного М. М., асистента Цимбалюка І. Р. на кафедрі активно розвивається новий науковий напрямок проектування вбудованих процесорних систем із використанням штучного інтелекту й нейронних мереж.

У 2024 р. виникла потреба у приведенні назви кафедри у відповідність до нових наукових та навчальних напрямків у галузі

програмно-апаратних вбудованих процесорних систем, телекомунікаційних та інфокомунікаційних систем. Згідно з наказом №759-1-10 від 19 грудня 2024 року кафедру теоретичної радіотехніки та радіовимірювань перейменовано на кафедру програмно-апаратних систем інфокомунікацій (ПАСІ), а Інститут телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки на Інститут інформаційно-комунікаційних технологій та електронної інженерії (ІКТЕ).

За роки існування кафедри виконано або продовжує виконуватись 39 НДР, захищено 45 дисертацій на здобуття наукових ступенів.

Станом на 2025 рік наукова діяльність кафедри програмно-апаратних систем інфокомунікацій здійснюється в таких наукових напрямках:

1. Телекомунікаційні, інфокомунікаційні та радіотехнічні системи передавання даних, сигналів керування та телеметричної інформації.
2. Теорія і практика системного аналізу експлуатаційної поведінки радіоелектронних комплексів та систем на етапі їх системотехнічного проектування.
3. Підвищення завадостійкості пристроїв синхронізації.
4. Проектування вбудованих процесорних систем із використанням штучного інтелекту й нейронних мереж.
5. Підвищення якості і надійності РЕА.

Таким чином, від часу заснування і до сьогодні спостерігаємо еволюцію наукового напрямку кафедри програмно-апаратних систем інфокомунікацій Національного університету «Львівська політехніка» з метою забезпечення розвитку радіотехнічної освіти і науки в Україні. Підтвердженням цьому є тисячі випускників-радіотехніків, десятки захищених кандидатів та докторів наук, десятки виконаних науково-дослідних робіт, тисячі опублікованих наукових та науково-методичних праць. Сьогодні колектив кафедри не зупиняється на

досягнутому, а рухається до нових наукових здобутків і пропонує абітурієнтам освіту за новими освітньо-професійними програмами.

[1] Прудіус І. Н., Шишка О. В. Історія радіотехнічної освіти і науки у Львівській політехніці (1952-2012). Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2015. – 324 с.

[2] Буцко М. І., Кипаренко В. Г. Державний університет «Львівська політехніка» (1844-1994). Видавництво Державного університету «Львівська політехніка», 1994. – 146 с.

^{1,5}Богдан Волочій, д.т.н., професор

²Вячеслав Харченко, чл.-кор. НАН України, д.т.н., професор

¹Леонід Озірковський, д.т.н., доцент

³Юрій Сальник, д.т.н., с.н.с.

⁴Вадим Яковенко, д.т.н., с.н.с.

bohdan.y.volochii@lpnu.ua, v.kharchenko@csn.khai.edu

leonid.d.ozirkovskyi@lpnu.ua, jurasalnik@ukr.net, yakob@ukr.net

¹Національний університет «Львівська політехніка»

²Національний аерокосмічний університет

«Харківський авіаційний інститут»

³Міністерство оборони України

⁴Запорізький Національний технічний університет

«Запорізька політехніка»

⁵Національна академія сухопутних військ

ім. гетьмана Петра Сагайдачного

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ СТОХАСТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ПОВЕДІНКИ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ ТА КОМПЛЕКСІВ

Вступ. В доповіді мова йде про створення дискретно-неперервних стохастичних моделей експлуатаційної функційної і надійнісної поведінки радіоелектронних систем та комплексів.

Мета доповіді: показати можливості розширення практичного застосування технології стохастичного моделювання експлуатаційної поведінки підчас розроблення нових або удосконалення існуючих радіоелектронних систем (РЕС) і комплексів (РЕК).

Традиційна технологія передбачає виконання таких етапів:

1) створення вербальної моделі експлуатаційної поведінки радіоелектронної системи або комплексу;

2) встановлення відповідності експлуатаційної поведінки РЕС або РЕК дискретно-неперервній стохастичній моделі;

3) розроблення моделі експлуатаційної поведінки РЕС або РЕК у вигляді ймовірнісного графа;

4) формування стохастичної моделі експлуатаційної поведінки РЕС або РЕК у вигляді системи диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена та її розв'язання;

5) компонування формул для визначення показників ефективності і надійності РЕС або РЕК, що проектується;

6) розв'язання задач аналізу та синтезу РЕС та РЕК.

Кожен етап технології стохастичного моделювання має свою методику. Зазначимо, що в традиційній технології стохастичного моделювання виявлена на етапі «Розв'язання задач аналізу та синтезу» необхідність змінювати значення показників та параметрів вимагає розроблення нової версії ймовірнісного графа.

Яке призначення стохастичних моделей експлуатаційної поведінки систем?

1. Отримувати статистичні показники якості РЕС або РЕК без (до) проведення натурних випробувань або пробної експлуатації. До показників якості відносимо показники ефективності і показники надійності РЕС та РЕК.

В доповіді мова йде про радіоелектронні системи з властивістю відмовостійкості і радіоелектронні комплекси з властивістю живучості. З використанням отриманих результатів стохастичного моделювання віртуальної експлуатаційної поведінки РЕС або РЕК розробник буде обґрунтовувати вибір технічних рішень на етапі їх системотехнічного проектування.

2. Зменшити об'єм натурних випробувань розроблених РЕС та РЕК.

3. Перевіряти доцільність впровадження вдосконалень (технічних рішень) в процесі експлуатації РЕС та РЕК.

4. Оцінювати (прогнозувати) ефективність введення для РЕС або РЕК засобів підвищення функційної безпечності, надійності та живучості.

5. Досліджувати вплив ненадійності складових РЕС або РЕК на значення показника її ефективності.

Які види експлуатаційної поведінки радіоелектронних систем і комплексів ми розрізняємо для розроблення її стохастичної моделі?

Для розроблення стохастичних моделей експлуатаційної поведінки радіоелектронних систем і комплексів розрізняємо функційну поведінку і надійнісну поведінку. Стохастична модель функційної поведінки РЕС призначена для визначення показників її ефективності. Стохастична модель надійнісної поведінки РЕС призначена для визначення показників її надійності та функційної безпечності. **ЗАУВАЖИМО**, що «спостереження» за роботою радіоелектронних систем відбувається в нашій уяві. Для того щоб на цьому наголосити ми використовуємо поняття **«віртуальна експлуатаційна поведінка систем»**.

Що ми називаємо експлуатаційною функційною поведінкою радіоелектронної системи?

Зазначимо, що мова йде про віртуальну експлуатаційну поведінку РЕС або РЕК. Експлуатаційна функційна поведінка системи служить представленням успішних і неуспішних варіантів виконання системою свого алгоритму функціонування з урахуванням всіх факторів, які заважають його виконанню. У використаному понятті «всі фактори» мова йде про фактори, які може «побачити» в своїй уяві розробник стохастичної моделі експлуатаційної функційної поведінки системи.

Інформацію про несприятливі фактори розробник стохастичної моделі також може отримати від спеціалістів предметної області, для якої призначена система, що проектується.

Що ми називаємо експлуатаційною надійнісною поведінкою відмовостійких систем?

Поняття «експлуатаційна надійнісна поведінка» представляє результати уявного тривалого «спостереження» за неперервною роботою великої кількості РЕС з властивістю відмовостійкості, в яких подія критична відмова настає з різних причин.

З якими труднощами зустрічається користувач (розробник) підчас використання традиційної технології стохастичного моделювання експлуатаційної поведінки систем?

1. Використання традиційної технології вимагає багато часу на виконання завдань її етапів.
2. Висока ймовірність внесення помилок в ймовірнісний граф експлуатаційної поведінки на етапі його розроблення.
3. Складність у забезпеченні глибокої деталізації експлуатаційної поведінки систем у вербальній моделі. Мова йде про досягнення високого ступеня адекватності стохастичних моделей віртуальної експлуатаційної поведінки, реалізованої в моделі, реальній експлуатаційній поведінці в майбутньому.
4. Висока ймовірність внесення помилок в результати (значення показників надійності) на етапі «розв'язання системи диференціальних рівнянь».

Застосування інформаційної технології стохастичного моделювання до розроблення стохастичних моделей віртуальної експлуатаційної надійнісної поведінки відмовостійких систем. Труднощі використання традиційної технології стохастичного моде-

лювання експлуатаційної надійнісної поведінки систем покажемо на прикладі визначення показників надійності радіопередавача базової станції коміркового зв'язку, яку забезпечить відмовостійка система. Відмовостійка система забезпечує необхідну надійність радіопередавача однократним резервуванням та багатократним відновленням несправного радіопередавача. На рисунку 1 зображена структурна схема відмово стійкої системи з однократним резервуванням, на якій використані такі позначення: РП – радіопередавач; ЗК – засіб контролю; П – перемикач; СТОіР – служба технічного обслуговування і ремонту.

Вербальна модель експлуатаційної надійнісної поведінки відмовостійких систем з однократним резервуванням має представити причини критичних відмов та всі передбачені варіанти реакції відмовостійких систем на втрату працездатності основного або резервного радіопередавачів. Причинами критичних відмов відмовостійких систем може бути: втрата працездатності основного РП, яке не зафіксував засіб контролю; пристрій перемикавання не підключив резервний РП замість несправного основного РП; пристрій перемикавання підключив несправний резервний РП, який втратив працездатність перебуваючи в резерві; служба ремонту ще не завершила відновлення несправного РП, а підключений резервний РП втратив працездатність. Зазначимо, що повнота цього переліку подій визначає ступінь адекватності стохастичної моделі експлуатаційної надійнісної поведінки, а відповідно і достовірність значень показників надійності.

У експлуатаційній надійнісній поведінці розглянутих відмовостійких систем передбачені 3 варіанти їх реакції на втрату працездатності. Два варіанти показують реакції відмовостійких систем на втрату працездатності основного радіопередавача РП-1. Третій варіант показує реакцію відмовостійких систем на втрату працездатності резервного радіопередавача РП-2 в той час, коли він перебуває в резерві.

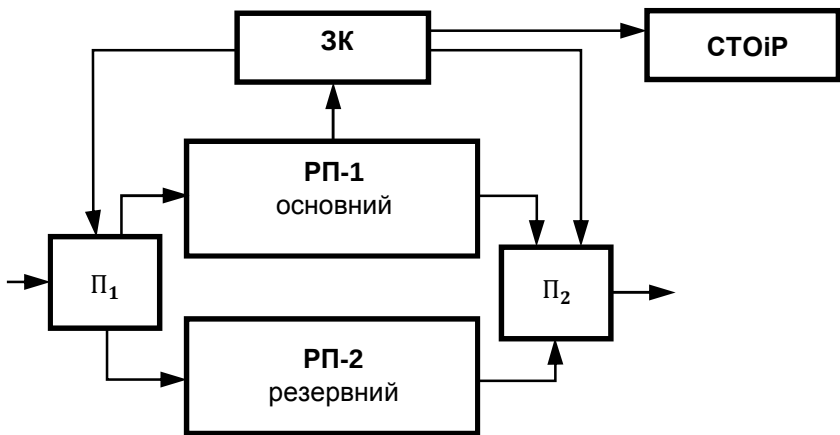


Рисунок 1. Структурна схема відмовостійкої системи з однократним резервуванням радіопередавача базової станції мобільного зв'язку та з багатократним відновленням працездатності несправного радіопередавача

Представлену у вербальній моделі надійнісну поведінку відмовостійких систем з двома радіопередавачами ми побачимо в майбутньому в процесі їх реальної експлуатації. І чим ближчою до реальної буде **«віртуальна експлуатаційна надійнісна поведінка відмовостійких систем»**, тим вищим є ступінь адекватності розробленої стохастичної моделі і відповідно вищою є достовірність значень показників надійності, одержуваних за допомогою моделі. Крім цього присутність в понятті **«віртуальна експлуатаційна надійнісна поведінка відмовостійких систем»** слова **«експлуатаційна»** дає змогу виключити тлумачення цього поняття як **«алгоритм реакції відмовостійкої системи на появу відмови»**.

На рисунку 2а зображений, показаний в багатьох книжках про надійність систем, ймовірнісний граф, сформований згідно вербальної моделі експлуатаційної надійнісної поведінки відмовостійких систем з однократним резервуванням. Цей граф має такі параметри: λ_o , λ_p , μ – інтенсивності переходів між станами графа. Значення цих інтенсивностей визначають: λ_o – через середнє значення тривалостей безвідмовної неперервної роботи основних радіопередавачів; λ_p – через середнє значення тривалостей перебування в працездатному стані резервних радіопередавачів, коли вони перебувають в резерві; μ – через середнє значення тривалостей відновлення несправних радіопередавачів. До цього слід додати, що в стохастичну модель (систему диференціальних рівнянь), сформовану за цим графом, внесено такі умови (обмеження):

а) ймовірність успішного виконання процедури контролю $P_{y.k}$, ймовірність успішного виконання процедури перемикання $P_{y.п}$, ймовірність успішного завершення процедур відновлення несправних радіопередавачів $P_{y.в}$ дорівнюють одиниці;

б) середнє значення тривалостей виконання процедури контролю t_k та середнє значення тривалостей виконання процедури перемикання $t_{п}$ дорівнюють нулю;

в) кількість відновлень непрацюючого радіопередавача на базовій станції мобільного зв'язку не обмежена.

*Як зміняться значення показників надійності
відмовостійкої системи з двома радіопередавачами, якщо
перелічені умови не виконуються?*

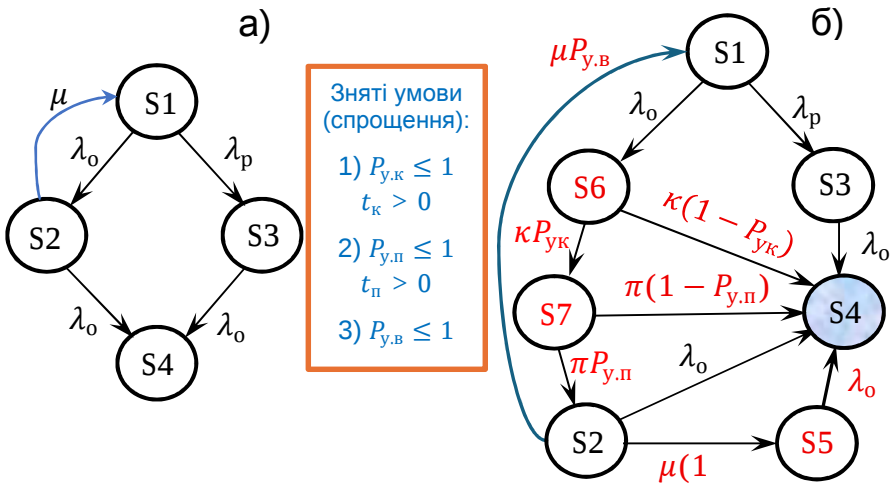


Рисунок 2. Представлення підвищення ступеня адекватності стохастичної моделі експлуатаційної поведінки відмовостійких систем в її ймовірнісному графі

На рисунку 2б зображений ймовірнісний граф, в якому знята частина перелічених вище умов (обмежень). А саме показникам функціональності складових відмовостійкої системи $P_{у,к}$, $P_{у,п}$, $P_{у,в}$ можна задавати будь-які значення. Також знята умова, що середні значення тривалостей процедур контролю і перемикання дорівнюють нулю.

Але для отримання швидкої відповіді на поставлене питання доцільно використати запропоновані удосконалення технології стохастичного моделювання експлуатаційної поведінки систем.

В яких напрямках необхідне подальше підвищення ступеня адекватності стохастичної моделі?

1. Треба мати можливість задавати для розрахунку показників надійності відмовостійкої системи будь-яке але конкретне значення кількості відновлень. Зазначимо, що в ймовірнісних графах,

зображених на рисунку 2 прийнята умова про відсутність обмеження на кількість відновлень.

2. Для того щоб дослідити (отримати) залежність тривалості відновлення від кількості резервних радіопередавачів і навпаки, необхідно мати стохастичну модель експлуатаційної надійнісної поведінки відмовостійких систем, в якій буде можливість змінювати кількість резервних РП.

3. В розробленій стохастичній моделі процесу довготривалої експлуатації великої кількості відмовостійких систем з однократним резервуванням не враховано «хибну тривогу» від засобу контролю.

4. Треба враховувати ефект (вплив) старіння складових відмовостійкої системи на значення показників надійності.

5. Зазначимо, що експоненційний закон щільного розподілу ймовірностей для тривалостей процедур контролю і перемикання, тривалостей відновлення та тривалостей безвідмовної роботи системи не відповідає дійсності. Тобто треба мати можливість враховувати інші закони щільного розподілу для названих тривалостей.

В чому полягає удосконалення технології стохастичного моделювання експлуатаційної поведінки систем?

В традиційній технології стохастичного моделювання відомою є можливість формалізовано представляти вербальну модель експлуатаційної поведінки великої кількості одночасно функціонуючих радіоелектронних систем та комплексів одного типу у вигляді ймовірнісного графа. Удосконаленням технології є введення в неї структурно-автоматної моделі, розроблення якої здійснюється на основі опорного ймовірнісного графа. Фактично структурно-автоматна модель експлуатаційної поведінки систем – це оригінальна стиснута (компактна) форма представлення ймовірнісного графа, яка надає технології ряд зручностей для її практичного використання.

Використання удосконаленої технології стохастичного моделювання передбачає:

а) розроблення структурно-автоматної моделі експлуатаційної поведінки систем на основі її вербальної моделі;

б) формування системи диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена на основі структурно-автоматної моделі;

в) визначення показника ефективності або надійності PEC або PEK за скомпонованими формулами з отриманого після розв’язання системи диференціальних рівнянь розподілу ймовірностей в перебування в станах ймовірнісного графа.

Рівень формалізації методик виконання пунктів б) і в) дозволив автоматизувати їх виконання в програмному забезпеченні ASNA-2. Зауважимо, що після завантаження структурно-автоматної моделі в програмне забезпечення ASNA-2 отримуємо програмну стохастичну модель. Програмна стохастична модель забезпечує розв’язання задачі синтезу показників функціональності складових PEC або PEK через багатоваріантний аналіз із значно меншими витратами часу, ніж традиційна технологія стохастичного моделювання експлуатаційної поведінки систем.

Зазначимо, що в традиційній технології стохастичного моделювання необхідність змінювати значення показників та параметрів вимагає розроблення нової версії ймовірнісного графа. В удосконаленій технології змінювання значень показників та параметрів здійснюється в структурно-автоматній моделі і відповідно внесення змін в систему диференціальних рівнянь є автоматизованим.

Для розроблення структурно-автоматної моделі експлуатаційної надійнісної поведінки відмовостійких систем на основі її вербальної моделі запропоновані: методика розроблення ймовірнісного опорного графа на основі базових подій експлуатаційної поведінки систем та методика перетворення (трансформації) ймовірнісного опорного

графа поведінки систем у структурно-автоматну модель. Фрагмент розроблення опорного ймовірнісного графа показаний в таблиці 1. А розроблена структурно-автоматна модель показана в таблиці 2.

Для формування системи диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена на основі структурно-автоматної моделі запропоновано метод і відповідний алгоритм формування системи диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена.

Програмне забезпечення ASNA-2, виконує такі функції: на основі структурно-автоматної моделі формує систему диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена; розв’язує її чисельним методом Рунге – Кутта – Мерсона; на основі отриманого розв’язку розраховує значення показників надійності, а саме «ймовірність безвідмовної роботи для заданої тривалості спостереження» та «середнє значення тривалостей безвідмовної роботи».

Методика розроблення моделі віртуальної експлуатаційної надійнісної поведінки відмовостійких систем у вигляді ймовірнісного графа на основі її базових подій та вектора станів.

«Інструментом» для розроблення ймовірнісного графа експлуатаційної поведінки є таблиця 1, в якій є такі колонки:

K1: Номер кроку визначення наступного стану ймовірнісного графа.

K2: Черговий (поточний) стан ймовірнісного графа, що розглядається, і актуальна для цього стану базова подія експлуатаційної поведінки. За наявності до базової події приєднуються зведені з нею базові події.

K3: Ймовірності існування альтернативних ситуацій (ІАС) для базової події експлуатаційної поведінки. Альтернативні ситуації можуть бути обумовлені як базовою подією так і зведеною (зведеними) базовими подіями.

K4, K5, K6, K7: Компоненти вектора станів ймовірнісного графа.

K8: Призначення номера для нового стану ймовірнісного графа, що розробляється.

K9: Перехід із поточного стану, що розглядається, в новий (наступний сформований) стан ймовірнісного графа.

K10: Формула розрахунку інтенсивності переходу (ФРП) із поточного стану в наступний стан ймовірнісного графа.

Таблиця 1. Фрагмент процесу розроблення ймовірнісного графа експлуатаційної надійнісної поведінки відмовостійких систем з однократним резервуванням на основі її вербальної моделі

№	Поточний стан і актуальна БП	Ймовірності ІАС для БП	Вектори станів ймовірнісного графа				№ стану ймовірнісного графа	Перехід	ФРП
			V1	V2	V3	V4			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Базова подія «Відмова основного радіопередавача у відмовостійких системах» (БП1) в експлуатаційній надійнісній поведінці відмовостійких систем									
1	Початковий стан графа	-	1	1	0	2	1	-	-
2	1БП1 (ЗвБП2, ЗвБП3)	$P_{uk}P_{up}$	1	0	1	2	2	$1 \rightarrow 2$	$\lambda_o P_{uk} P_{up}$
		$(1 - P_{uk})$	0	1	0	1	KB	$1 \rightarrow KB$	$\lambda_o (1 - P_{uk})$
		$P_{uk}(1 - P_{up})$	0	1	1	2	KB	$1 \rightarrow KB$	$\lambda_o P_{uk}(1 - P_{up})$

Методика розроблення структурно-автоматної моделі експлуатаційної надійнісної поведінки відмовостійких систем на основі ймовірнісного графа. Розроблення структурно-автоматної моделі експлуатаційної надійнісної поведінки відмовостійких систем здійснюється в такій послідовності:

1) для кожної базової події експлуатаційної надійнісної поведінки визначаємо ситуації, яких вона буде (може) відбуватися;

2) для формалізованого представлення кожної ситуації, на основі відповідного вектора стану, записуємо логічний вираз;

3) для кожного логічного виразу:

а) komponуємо формулу для розрахунку значень інтенсивності переходу (формулу РЗП) із поточного стану графа в наступний

його стан; якщо для базової події існують альтернативні ситуації, то для кожної альтернативи треба скомпонувати свою формулу;

б) встановлюємо правило модифікації компонент поточного вектора стану (правило МКПВС); якщо для базової події існують альтернативні ситуації, то для кожної альтернативи треба скомпонувати своє правило МКПВС;

4) для кожної базової події експлуатаційної надійнісної поведінки перевіряємо наявність однотипних ситуацій; якщо однотипні ситуації виявлені, то необхідно здійснити об'єднання їх логічних виразів та правил МКПВС; якщо в логічних виразах є числові значення параметрів, використаних для розроблення опорного ймовірнісного графа, то необхідно виконати їх заміну буквенними позначеннями;

5) виконуємо верифікацію розробленої структурно-автоматної моделі експлуатаційної надійнісної поведінки відмовостійких систем.

*Яка користь від об'єднання однотипних ситуацій і заміни
числового значення параметра моделі (наприклад,
кількості відновлень) на символічне позначення (для
кількості відновлень позначення K_v)?*

В таблиці 2 показана структурно-автоматна модель після об'єднання однотипних ситуацій і заміни числового значення параметра кількість відновлень моделі на символічне позначення K_v , яка є універсальною. Універсальність структурно-автоматної моделі в тому, що після завантаження її в програмне забезпечення ASNA-2 РОЗРОБНИК отримує програмну стохастичну модель експлуатаційної надійнісної поведінки відмовостійких систем для розв'язання завдань системотехнічного проектування. Зазначимо, що програмна стохастична модель експлуатаційної поведінки автоматизує розв'язання завдань системотехнічного проектування.

Таблиця 2. Структурно-автоматна модель експлуатаційної надійнісної поведінки відмовостійких систем з однократним резервуванням

Базові події	Логічні вирази представлення ситуацій, в яких відбуваються «базові події експлуатаційної надійнісної поведінки»	Формула РЗП	Правило МКПВС
БП1 ЗвБП2 ЗвБП3	(V1=1) AND (V2=1) AND (V3<K _v) AND (V4=2)	$\lambda_o P_{uk} P_{up}$	V2:=0; V3:=V3+1
		$\lambda_o (1-P_{uk})$	V1:=0; V4:=1
		$\lambda_o P_{uk} (1-P_{up})$	V1:=0; V3:=V3+1
	(V1=1) AND (V2=0) AND (0<V3<K _v) AND (V4=2)	$\lambda_o P_{uk}$	V1:=0; V3:=V3+1
		$\lambda_o (1-P_{uk})$	V1:=0; V4:=1
	(V1=1) AND (V2=0) AND (V3<K _v) AND (V4=1)	$\lambda_o P_{uk}$	V1:=0; V3:=V3+1
		$\lambda_o (1-P_{uk})$	V1:=0; V4:=0
	(V1=1) AND (V2=0) AND (V3=K _v) AND (V4=2)	λ_o	V1:=0; V4:=1
	(V1=1) AND (V2=1) AND (V3=K _v) AND (V4=2)	$\lambda_o P_{uk} P_{up}$	V2:=0; V4:=1
		$\lambda_o (1-P_{uk} P_{up})$	V1:=0; V4:=1
БП4	(V1=1) AND (V2=0) AND (0<V3<=K _v) AND (V4=2)	πP_{uv}	V2:=1
		$\pi (1-P_{uv})$	V4:=1
БП5	(V1=1) AND (V2=1) AND (V4=2)	λ_r	V2:=0; V4:=1

Розглянемо приклад використання розробленої програмної стохастичної моделі експлуатаційної надійнісної поведінки відмовостійких систем для порівняння значень показників надійності відмовостійкої системи з однократним резервуванням та з багатократним відновленням працездатності несправного радіопередавача, отриманих з використанням 3-х варіантів моделі з різним ступенем адекватності. Порівняння виконано за такими показниками надійності: «ймовірність безвідмовної роботи відмовостійких систем з двома радіопередавачами за час експлуатації 20000 годин» $P_{б,р}(20000)$ та «середнє значення тривалостей неперервної безвідмовної роботи» $T_{б,р}$.

Для всіх моделей прийняті такі умови:

- 1) радіопередавач, який перебуває в резерві, включений разом з основним радіопередавачем (резерв гарячий);
- 2) показник надійності основного і резервного радіопередавачів «інтенсивність відмов» має однакове значення;

$$I_o = I_r = 5e-4 \text{ 1/год}$$

- 3) середнє значення тривалостей відновлення радіопередавача після втрати працездатності 1 година.

Модель 1 і Модель 2 забезпечують отримання значень показників надійності за виконання таких умов:

- 4) показники функціональності засобу контролю і засобу перемикавання, а саме «ймовірності успішного виконання процедур» дорівнюють одиниці;
- 5) показник ефективності служби технічного обслуговування і ремонту, а саме «ймовірність успішного ремонту несправних радіопередавачів» дорівнює одиниці;
- 6) кількість відновлень (ремонтів) радіопередавача після втрати працездатності в Моделі 1 необмежена. В Моделі 2 і в Моделі 3 обмежена: заплановано 20 ремонтів радіопередавача після втрати працездатності на кожній базовій станції коміркового зв'язку.

Модель 3 забезпечує отримання значень показників надійності за виконання таких умов:

- 4) показники функціональності засобу контролю і засобу перемикавання, а саме «ймовірності успішного виконання процедур» можуть приймати будь-яке значення від 0 до 1;
- 5) показник ефективності служби технічного обслуговування і ремонту, а саме «ймовірність успішного ремонту несправних радіопередавачів» може приймати будь-яке значення від 0 до 1.

Залежності ймовірності безвідмовної роботи великої кількості відмовостійких систем з однократним резервуванням і з відновленням від тривалості їх експлуатації, отриманих за допомогою трьох моделей з різним ступенем адекватності від програмної стохастичної моделі на основі програмного забезпечення ASNA-2 показані на рисунку 3 [6].

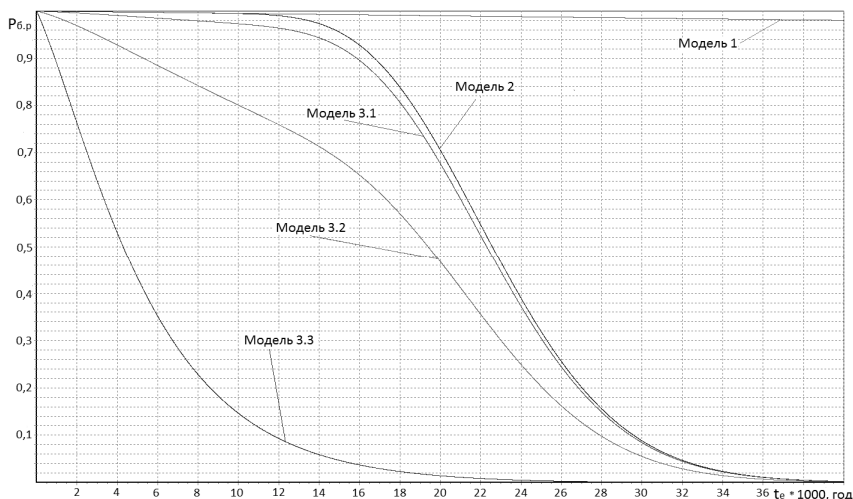


Рисунок 3. Залежності показника надійності «ймовірність неперервної безвідмовної роботи» відмовостійких систем від тривалості їх експлуатації, отримані від моделей з різним ступенем адекватності

Показники надійності відмовостійкої системи з однократним резервуванням і з відновленням, отримані на основі залежностей показаних на рисунку 3, представлені в таблиці 3 [6].

Про що «говорять» результати, показані в таблиці 3?

- 1) піднятий ступінь адекватності моделі забезпечує підвищення достовірності показників надійності відмовостійкої системи з однократним резервуванням та з обмеженою кількістю відновлень;

- 2) визначати вимоги до служби технічного обслуговування та ремонту;
- 3) через багатоваріантний аналіз можна розв'язувати задачу синтезу показників функціональності складових відмовостійкої системи;
- 4) отримані значення показників надійності при встановленні значень P_{uk} , P_{up} , P_{uv} рівних одиниці дають змогу застосувати для валідації розробленої моделі їх порівняння з показниками надійності, отриманими з використанням відомих моделей.

Таблиця 3. Показники надійності відмовостійкої системи з однократним резервуванням і з відновленням, отримані на стохастичних моделях різного ступеня адекватності

Показники та параметри відмовостійкої системи	Модель 1	Модель 2	Модель 3		
			результат 3.1	результат 3.2	результат 3.3
$l_o, 1/\text{год}$	5e-4	5e-4	5e-4		
$l_r, 1/\text{год}$	5e-4	5e-4	5e-4		
$t_v, \text{год}$	1	1	1		
K_v	без обмеження	20	20		
P_{uk}	1	1	0,999	0,99	0,9
P_{up}	1	1	0,999	0,99	0,9
P_{uv}	1	1	0,999	0,99	0,9
$P_{6.p}(20000)$	0,9905	0,7055	0,677	0,4675	0,0143
$T_{6.p}, \text{год}$	197424	22895	22340	18122	5494

*Які можливості додає для практичного використання технології стохастичного моделювання експлуатаційної поведінки систем **структурно-автоматна модель**?*

1. Структурно-автоматна модель забезпечує автоматизовану модифікацію ймовірнісного графа функційної або надійнісної поведінки PEC та PEK при зміні значень показників функціональності, надійності та параметрів їх складових [3], [5].

Зазначимо, що:

- а) автоматизована модифікація ймовірнісного графа функційної або надійнісної поведінки PEC або PEK, що виконує програмне забезпечення ASNA-2, здійснюється завдяки структурно-автоматній моделі експлуатаційної поведінки систем;
 - б) після автоматизованої модифікації ймовірнісного графа, програмне забезпечення ASNA-2 формує і розв'язує нову систему диференціальних рівнянь;
 - в) автоматизована модифікація ймовірнісного графа дає суттєве зменшення витрат часу на розв'язання задач параметричного та структурного синтезу, що важливо на етапі системотехнічного проектування PEC або PEK.
2. Структурно-автоматна модель підтримує перенесення задачі визначення показника функційної безпечності з моделі поведінки типу «дерево відмов» на стохастичну модель експлуатаційної надійнісної поведінки складних систем [2], [4].

Перенесення задачі визначення показника функційної безпечності з моделі поведінки «дерево відмов» на стохастичну модель дає можливість:

- а) перевіряти достовірність отримуваних значень показника функційної безпечності шляхом порівняння результатів, отриманих від моделі поведінки «дерево відмов» і від стохастичної моделі поведінки;
- б) суттєво зменшити витрати часу на розв'язання задачі визначення показника функційної безпечності PEC або PEK.

3. Структурно-автоматна модель забезпечує високий ступінь адекватності для стохастичних моделей експлуатаційної надійнісної поведінки відмовостійких систем [6].

Зазначимо, що підвищення ступеня адекватності стохастичної моделі піднімає достовірність отримуваних значень показників надійності РЕС з властивістю відмовостійкості.

Мова йде про відмовостійкі системи з різними видами введення структурної надлишковості (наприклад, мажоритарне резервування).

4. Структурно-автоматна модель забезпечує можливість автоматизувати дослідження структурної живучості мереж зв'язку РЕК з сітковою структурою.

Зазначимо, що дослідження структурної живучості РЕК з мережею зв'язку, яка має сіткову структуру здійснюємо за показниками:

- а) ймовірність парної зв'язності між полюсами сіткової структури;
 - б) середнє значення ймовірностей парних зв'язностей між усіма парами полюсів сіткової структури;
 - в) середнє значення ймовірностей парних зв'язностей між усіма полюсами і головним полюсом сіткової структури.
5. Структурно-автоматна модель надає можливість замінити експоненційний закон щільного розподілу ймовірностей для тривалостей виконання процедур, як це закладено використанням системи диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена, законом розподілу Ерланга [1].

Зазначимо, що закон розподілу Ерланга, в залежності від значення його параметра «порядок закону», дає змогу використовувати вибір форми цієї характеристики. Тобто він надає можливість апроксимувати характеристики інших законів розподілу законом розподілу Ерланга відповідного порядку.

6. Структурно-автоматна модель забезпечує потенційну можливість враховувати при дослідженні надійнісної поведінки та оцінюванні

відповідних показників систем, зокрема функції готовності, з урахуванням по-перше, безвідмовності програмних засобів для різних законів розподілу часу до проявлення дефектів за певних вхідних даних, і, по-друге, за певних умов, успішності атак на вразливості та особливостей їх патчеризації.

Така перспектива суттєво розширює сферу використання структурно-автоматних моделей та існуючої технології для задач оцінювання гарантоздатності складних систем, яка поєднує властивості надійності, функційної та кібербезпеки.

ВИСНОВОК

Запропоноване удосконалення технології стохастичного моделювання експлуатаційної поведінки радіоелектронних систем і комплексів відкриває розробнику можливість суттєво підвищити адекватність стохастичних моделей, а відповідно і достовірність значень показників ефективності, надійності та функційної безпечності.

Для розв'язання задач синтезу показників функціональності складових РЕС або РЕК через багатоваріантний аналіз, завдяки автоматизації виконання частини етапів технології стохастичного моделювання, розробник витрачає (потребує) значно менше часу ніж за традиційною технологією.

[1] Strielkina A. Model of Functional Behavior of Healthcare Internet of Things Device Using Erlang Phase Method / A. Strielkina, B. Volochiy, V. Kharchenko, S. Volochiy // Communications in Computer and Information Science / Germany, Springer, Volume 1175. 2020. P. 277-301.

[2] Ozirkovskyy L. Synthesis of safe behavior algorithms of radioelectronic systems for critical applications // Leonid Ozirkovskyy, Bohdan Volochiy, Mykhailo Zmysnyi, Oleksandr Shkiliuk/ Informatyka, Automatyka, Pomiar W Gospodarce I Ochronie Środowiska. Poland / Volume 10, №1, 2020, pp. 28-31.

[3] Yakovenko V., Volochii B., Sydorenko Y., Furmanova N., Malyi O., Tkachenko A., Olshevskiy Y. Building a model of the process of shooting a mobile armored target with directed fragmentation-beam shells in the form of a discrete-continuous stochastic system // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2021. – № 6/4 (114). – С. 51-63.

[4] Ozirkovskyy L. Functional safety analysis of safety-critical system using state transition diagram / Leonid Ozirkovskyy, Bohdan Volochiy, Oleksandr Shkiliuk, Mykhailo Zmysnyi, Pavlo Kazan // Radioelectronic and computer systems, № 2, 2022. – P. 145-158.

[5] Сальник Ю. П., Волочій Б. Ю. Стохастична модель функціональної поведінки охоронної системи об'єкта критичної інфраструктури / Сучасні інформаційні системи. – Т. 5, № 1. – Харків: Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2021. – С. 18-33.

[6] Федасюк Д. В. Методика розроблення структурно-автоматних моделей відмовостійких систем з альтернативними продовженнями випадкових процесів після процедур контролю, перемикання і відновлення / Д. В. Федасюк, С. Б. Волочій // Вісник Національного університету «Львівська політехніка»: «Комп'ютерні науки та інформаційні технології». – Львів: вид-во Львівської політехніки. – 2017. – № 864. – С. 49-62.

Андрій Семенов, д.т.н., проф.
Богдан Пінаєв, PhD.
semenov.a.o@vntu.edu.ua
pinaev.bogdam@gmail.com
Вінницький Національний Технічний Університет

ШИРОКОСМУГОВІ ПРИСТРОЇ ГЕНЕРУВАННЯ І ВИПРОМІНЮВАННЯ ХАОТИЧНИХ СИГНАЛІВ ДЛЯ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ

Розширення діапазону робочих частот і підвищення енергоефективності пристроїв генерування та випромінювання радіосигналів є одним з найбільш актуальних завдань сучасних технологій створення радіоелектронних систем. На сучасному етапі розвитку радіочастотної інженерії широкого поширення на практиці отримали використання останніх досягнень теорії динамічного хаосу, спільно з елементами теорії біфуркацій і фракталів [1].

У зв'язку з цим, актуальним науково-практичним напрямом сучасного розвитку технологій електронних комунікацій є розроблення нових і удосконалення відомих методів генерування, формування та випромінювання сигналів із застосуванням сигналів динамічного хаосу. Генератори хаотичних сигналів використовуються як джерела широкосмугових сигналів із непередбачуваною динамікою [2]. Такі сигнали важко виявити та підробити, що робить їх привабливими для радіоелектронної боротьби, маскування сигналів та засобів зв'язку [2].

Хаотичні сигнали мають широкий спектр, що робить їх придатними для UWB-комунікацій, де важливе низьке енергоспоживання, висока швидкість та низька помітність [3,4]. Відомі численні приклади застосування хаотичних сигналів у системах бездротових комунікацій.

Так, наприклад, в 2012 році у проєктах DARPA (США) досліджувались хаотичні сигнали як альтернатива традиційним імпульсним сигналам у UWB. Також у Wi-Fi/LoRa-подібних мережах активно розробляються методи хаотичного CDMA (chaotic code division multiple access) [5].

Іншим перспективним напрямом застосування хаотичних сигналів є використання властивості хаотичних систем для створення пристроїв і систем радіоелектронної протидії. Відомі приклади використання хаотичних генераторів для формування широкосмужових, неперіодичних завад, які важко відфільтрувати або придушити традиційними методами (наприклад, смужовими фільтрами чи фазовими автопідлаштувачами) [6, 7].

Пристрої, що випромінюють сигнали динамічного хаосу є антенно-фідерні пристрої. До антен, які випромінюють хаотичні сигнали, висувають низку специфічних вимог, оскільки їх характеристики значно відрізняються від традиційних антен для гармонічних або вузькоспектральних сигналів: 1) такі антени мають підтримувати широкий діапазон частот, щоб забезпечити ефективне випромінювання хаотичного сигналу; 2) форма діаграми спрямованості не повинна значно змінюватися в усьому частотному діапазоні; 3) антени повинні забезпечувати мінімальні фазові спотворення, тобто лінійну фазову характеристику в частотному діапазоні, щоб не викривляти часову структуру хаотичного сигналу. Також є специфічні вимоги до частотної характеристики групового часу запізнювання таких антен. Тому як пристрої випромінювання хаотичних сигналів потрібно використовувати антени з низькою добротністю, оскільки високодобротні антени є антенами резонансного типу, які призводить до фільтрації сигналу. Також, антени для випромінювання хаотичних сигналів повинні мати низький КСХ у широкій смузі частот при підключенні до фідеру зі стандартним хвильовим опором [8].

Вирішення кола окреслених задач уможливить створення комунікаційних систем з високою стійкістю до перешкод, низькою ймовірністю виявлення та перехоплення. Наступними напрямками досліджень є створення адаптивних та інтелектуальних систем радіоелектронної протидії на основі хаосу, що уможливить інтегрувати хаотичні генератори з нейромережами або еволюційними алгоритмами, які адаптують характеристики завад у реальному часі. Це забезпечить високу адаптивність до змін середовища та протидії супротивника.

[1] C. S. Pappu and T. L. Carroll, “Chaotic waveform for optimal joint radar communication systems,” *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 169, p. 113261, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.chaos.2023.113261.

[2] R. Fellah, M. S. Azzaz, C. Tanougast, and R. Kaibou, “Design of a simple and low cost chaotic signal generation circuit for UWB applications,” *Eur. Phys. J. Spec. Top.*, vol. 230, no. 18–20, pp. 3439–3447, Aug. 2021, doi: 10.1140/epjs/s11734-021-00251-5.

[3] P. Li, B. Zhao, and Z. Wang, “Research on Performance of Chaotic Direct Sequence Spread Spectrum UWB System Based on Chaotic Matrix,” *Lecture Notes in Electrical Engineering*. Springer Singapore, pp. 837–841, Aug. 14, 2019. doi: 10.1007/978-981-13-6504-1_100.

[4] C. S. Pappu, A. N. Beal, and B. C. Flores, “Chaos Based Frequency Modulation for Joint Monostatic and Bistatic Radar-Communication Systems,” *Remote Sensing*, vol. 13, no. 20, p. 4113, Oct. 2021, doi: 10.3390/rs13204113.

[5] C. Bai, J.-L. Yao, Y.-Z. Sun, and H.-P. Ren, “Chaos Division Multi-Access Communication System,” *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, vol. 71, no. 12, pp. 5814–5827, Dec. 2024, doi: 10.1109/tcsi.2024.3408211.

[6] G. A. Al-Suhail, F. R. Tahir, M. H. Abd, V.-T. Pham, and L. Fortuna, “Modelling of long-wave chaotic radar system for anti-stealth applications,” *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 57, pp. 80–96, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.cnsns.2017.09.008.

[7] R. Fellah, M. S. Azzaz, C. Tanougast, and R. Kaibou, “Design of a simple and low cost chaotic signal generation circuit for UWB applications,” *Eur. Phys. J. Spec. Top.*, vol. 230, no. 18–20, pp. 3439–3447, Aug. 2021, doi: 10.1140/epjs/s11734-021-00251-5.

[8] L. Mescia et al., “Sinuous Antenna for UWB Radar Applications,” *Sensors*, vol. 22, no. 1, p. 248, Dec. 2021, doi: 10.3390/s22010248.

Анатолій Дружинін, д-р. техн. наук., проф.

Ігор Островський, д-р. техн. наук., проф.

Юрій Ховерко, д-р. техн. наук., проф.

Наталя Лях-Кагуй, д-р. техн. наук., проф.

anatolii.o.druzhynin@lpnu.ua

ihor.p.ostrovskyi@lpnu.ua

yurii.m.khoverko@lpnu.ua

nataliia.s.liakh-kahui@lpnu.ua

Національний університет «Львівська політехніка»

ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ СИНТЕЗУ ТА КОНТРОЛЬОВАНОЇ МОДИФІКАЦІЇ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

Сучасна електроніка проникає практично в усі галузі народного господарства і стала активним каталізатором їх інтенсивного розвитку. Електроніка в значній мірі визначає вдосконалення технічних засобів автоматики, систем управління, обробки і передачі інформації. Важливою ланкою електроніки є сенсорна електроніка, без якої неможливо уявити будь-який технологічний процес. Потреба в сенсорах стрімко зростає, що пов'язано з бурхливим розвитком автоматизованих систем контролю та керування, застосуванням нових технологічних процесів, переходом до гнучких автоматизованих виробництв. Окрім високих метрологічних характеристик, сенсори повинні володіти високою надійністю, довговічністю, стабільністю, малими габаритами, масою та енергоспоживанням, сумісністю з мікроелектронними пристроями обробки інформації, при низькій трудомісткості виготовлення та невеликій вартості. Ці проблеми можна вирішити лише шляхом складних фундаментальних досліджень матеріалів функціональної електроніки та

модифікацією параметрів елементної бази пристроїв, що можуть працювати в.т.ч. в складних умовах експлуатації. В лабораторії сенсорної електроніки кафедри напівпровідникової електроніки Національного університету «Львівська політехніка» проводиться комплекс досліджень, пов'язаний з технологічними аспектами росту широкого спектру напівпровідникових матеріалів у вигляді ниткоподібних кристалів, що є ідеальними модельними об'єктами як для вивчення характеристик матеріалів, так і застосування їх в якості чутливих елементів первинних перетворювачів фізичних величин. Це, насамперед, ниткоподібні кристали класичних напівпровідників кремнію, германію та їх твердих розчинів [1]. Окрім того глибокому вивченню піддають напівпровідники антимоніду індію та галію, арсеніду галію та сполук на основі вісмуту [2,3]. Більше того вивчаються структури на основі кремнію на ізоляторі, в яких активний шар сформований на основі полікристалічного кремнію [4]. Генеральним напрямком досліджень перелічених матеріалів є вивчення магніто-транспортних характеристик напівпровідникових мікро- і наноструктур, легованих домішками в широкому діапазоні концентрацій в області переходу метал-діелектрик під впливом сильних магнітних полів (до 14 Тл) та деформацій (до 0,3%) в інтервалі температур 1,5 – 300 К, що дозволить розширити існуючі уявлення про природу кінетичних ефектів у низькорозмірних твердих тілах для отримання функціональних наноструктур з прогнозованими характеристиками, які визначають шляхи застосування в пристроях сенсорної електроніки.

У зв'язку з цим в лабораторії реалізуються низка дослідницьких напрямів, які охоплюють:

- оптимізація технології виготовлення мікро- та наноструктур на основі полікристалічних та ниткоподібних напівпровідників для створення чутливих елементів сенсорів;

- дослідження електропровідності та магнетоопору ниткоподібних мікро- і нанокристалів у широкому інтервалі температур (4,2–300 K) та магнетних полів (до 14 Тл) в т.ч. методом імпедасної спектроскопії для створення напівпровідникових перетворювальних елементів електронної техніки;
- вивчення впливу зовнішніх чинників (деформації, магнітного поля, опромінення, температури) на властивості структур кремній- на-ізоляторі та ниткоподібних мікро- і нанокристалів як чутливих елементів сенсорів фізичних величин;
- дослідження намагніченості, магнітної сприйнятливості з метою вивчення поляризаційних процесів, що характерні для магнето-транспортного перенесення носіїв заряду в рамках квантового тунелювання за низьких температур;
- встановлення умов, індукованих деформацією (стиску, розтягу), надпровідності в ниткоподібних напівпровідниках, що проявляється у виникненні фази Беррі в магнітоопорі мікроструктур, зумовленою сильною спін-орбітальною взаємодією носіїв заряду в області переходу метал–діелектрик;
- оцінка параметрів приповерхневої провідності, яка є визначальною щодо застосування ниткоподібних напівпровідників у пристроях мікро- та наносистемної техніки, визначивши довжину фазової та спін-орбітальної когерентності, які експоненціально зменшуються зі зростанням температури;
- створення дискретних приладів мікро- та наносистемної техніки на основі мікро- та наноструктур легованих напівпровідників, використовуючи результати експериментальних та теоретичних досліджень;
- розроблення нових підходів до створення пристроїв, виготовлені за суміщеними технологіями на основі методів вирощування з

газової фази за механізмом (VLS) пара-рідина кристал та (LPCVD) осадження за понижених тисків;

- розроблення вимірювальних систем на основі запропонованих сенсорів та розвиток практичних рекомендацій щодо їх застосування, зокрема в інформаційних системах.

Таким чином, проведення системних досліджень кінетичних ефектів (спін-поляризаційні ефекти магнетотранспорту носіїв заряду, високотемпературна надпровідність, деформаційно-стимульоване виникнення Беррі фази, гігантський лінійний магнетоопір) у легованих напівпровідникових мікро- і наноструктурах у широкому інтервалі температур і магнітних полів можуть лягти в основу розроблення сучасних підходів до створення новітніх елементів сенсорної техніки і дозволять прогнозувати необхідні параметри мікро- та наноструктур, а відтак і пристроїв на їх основі, в процесі їх виготовлення.

[1] A.Druzhinin A., I.Ostrovskii, Yu. Khoverko et al., “Spin-related phenomena in nanoscale Si <B, Ni> whiskers” in Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 473, pp.331–334, 2019, doi:10.1016/j.jmmm.2018.10.073.

[2] I.Khytruk, A.Druzhinin, I.Ostrovskii, Yu. Khoverko, N. Liakh-Kaguy, “Properties of moped GaSb whiskers At low temperatures” in Nanoscale Research Letters, vol.12, no.156, pp.1-8, 2017, doi:10.1186/s11671-017-1923-1.

[3] A. Druzhinin, I. Ostrovskii, Y. Khoverko, N. Liakh-Kaguy, I. Khytruk, K. Rogacki, “Peculiarities of magnetoresistance in InSb whiskers at cryogenic temperatures” in Materials Research Bulletin, vol.72, pp. 324–330, 2015, doi: 10.1016/j.materresbull.2015.08.016.

[4] A. Druzhinin, I.Ostrovskii, Yu. Khoverko, K.Rogacki, “Rashba interaction in polysilicon layers SemOI-structures” in Journal of Electronic Materials, vol.48, no.8, pp.4934–4938, 2019, doi:10.1007/s11664-019-07290-8.

Юрій Шаповалов, д-р. техн. наук., проф.

Роман Романюк, асп.

Андрій Сусяк, асп.

yurii.i.shapovalov@lpnu.ua@lpnu.ua

roman.o.romaniuk@lpnu.ua

andrii.v.susiak@lpnu.ua@lpnu.ua

Національний університет «Львівська політехніка»

ЧАСТОТНИЙ СИМВОЛЬНИЙ МЕТОД АНАЛІЗУ LPTV КІЛ ВИСОКОЇ СКЛАДНОСТІ

У доповіді йтиметься про частотний і у той же час символний метод аналізу лінійних параметричних кіл, параметр елементів яких (один чи декілька) змінюються у часі періодично, а саме коло знаходиться у усталеному режимі. Метод частотний, тому що передбачає дослідження кола у частотній області, зазвичай, з формуванням передавальних функцій, а символний – тому що ці передавальні функції містять параметри деяких елементів кола і частоту не у вигляді чисел, а у вигляді символів. Такий вигляд передавальних функцій дозволяє підставляти у них числові значення замість символів на завершальних етапах проектування кіл, що дозволяє суттєво покращити розв’язування так званих багатоваріантних задач, зокрема оптимізації чи статистичного аналізу параметричних кіл тощо. Символьні вирази, крім того, уможливають формування їх похідних, інтегралів чи їх спрощення за відомими математичними формулами тощо. Коло називатимемо колом високої складності, якщо ще не існує або нам невідомі програмні засоби їх аналізу (у нашому випадку символного аналізу).

Відомо, що символний аналіз електричних кіл у частотній області має суттєвий недолік, який полягає у різкому зростанні необхідного

комп'ютерного часу моделювання при зростанні складності кола. У випадку LPTV кіл ця проблема стає ще більш критичною, тому вимагає кардинального її розв'язання і розширення, у нашому випадку, частотного символьного методу аналізу LPTV кіл на кола, що містять десятки чи сотні (у окремих випадках тисячі) вузлів і елементів з постійними чи змінними у часі параметрами. Такий частотний символьний метод називатимемо розширеним частотним символьним методом.

Нами взято за основу частотний символьний метод, який, своєю чергою, оснований на методі (рівнянні) Л.А.Заде [1, 2]. Метод Л.А.Заде нами розширено з одного рівняння на систему лінійних диференціальних рівнянь (СЛДР), складену за методом вузлових напруг [3, 4, 5, 6, 7]. Це дозволило сформувані визначені нами так звані матричні частотні символьні моделі елементів кола, з яких система лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) формується, практично, за той же комп'ютерний час, що й рівняння кола з постійними параметрами [8, 9]. Для розв'язування таких СЛАР, вважаючи, що вони десятого, сотого чи навіть тисячного порядку, використано один з найбільш ефективних методів підсхем (метод d-дерев) [10, 11, 12, 13], який нами розширено на LPTV кола високої складності [11, 12, 13].

Метод d-дерев передбачає оперування параметрами елементів кола у вигляді провідностей, тому логічним було, як зазначено вище, взяти за основу опис кола за методом вузлових напруг.

Метод вузлових напруг, за яким у загальному випадку формується система інтегро-диференціальних рівнянь (СЛІДР), та метод Л.А.Заде, який вимагає опису кола тільки диференціальними рівняннями, поставили перед нами задачу виключення у СЛІДР інтегралів, яка розв'язана шляхом заміни змінних і переходу від вузлових напруг у

СЛДР до нових змінних у СЛДР та, витікаючих з них, СЛАР у прямому напрямку і, після її розв'язування, у зворотному напрямку.

У роботі наведено приклади моделювання LPTV кіл високої складності у середовищі розробленої нами системи функцій UDF MAOPCs [10, 14].

[1] Zadeh L. A. Frequency Analysis of Variable Networks / L. A. Zadeh // Proc. of the IRE, 1950. – Vol.38, Issue 3. – P. 291-299.

[2] Zadeh L. A. Time-Varying Networks // Proceedings of the IRE. – 1961. – Vol. 49, Is. 10. – P. 1488-1503.

[3] Шаповалов Ю. І. Аналіз параметричних підсилювачів частотним символьним методом / Ю.І. Шаповалов, І. Шмотолоха // Вісн. ДУ «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації, 2000. – № 399. – С. 40-48.

[4] Шаповалов Ю. І. Визначення коефіцієнтів передачі параметричних кіл частотним символьним методом / Ю. І. Шаповалов // Вісник ДУ «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації, 1998. – №352. – С.52-55.

[5] Шаповалов Ю. І. Дослідження частотних символьних моделей одноконтурного параметричного підсилювача / Ю. І. Шаповалов, Д. Р. Смаль // Вісник НУ «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації – 2011. – №705. – С.52-58.

[6] Шаповалов Ю. І. Застосування частотного символьного методу до багатоваріантного аналізу лінійних параметричних кіл / Ю. І. Шаповалов, Б. А. Мандзій, Д. Р. Смаль // Вісн. НУ «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації – 2012. – №738. – С.10-16

[7] Шаповалов Ю.І. Методи виключення змінних у символьних часових моделях лінійних параметричних кіл та їх вдосконалення /

Ю.І. Шаповалов, Д.Р. Бачик // 36. наук. пр. ІПМЕ НАН України. Моделювання та інформаційні технології. – Вип.66. – К. : 2012. – С. 149-160

[8] Ю. Шаповалов, Д. Бачик, and Р. Романюк, «Метод блочних матриць та матричні моделі лінійних параметричних елементів у частотній області», in *Сучасні проблеми в радіоелектроніці, телекомунікаціях*, Львів: Lviv Polytechnic National University, 2024, pp. 133–137. Accessed: May 04, 2025.

[9] Y. Shapovalov, D. Bachyk, R. Romaniuk, and I. Shapovalov, “Parametric Matrix Models of Parametric Circuits and Their Elements in Frequency Domain”, *Radioelectronics and Communications Systems*, vol. 64, no. 8, pp. 413–425, 2021.

[10] R. Romaniuk, “The implementation of the method of reduced matrix D-trees in the Udf MAOPCs environment,” *Computational Problems of Electrical Engineering*, vol. 13, no. 2, pp. 33–36, Dec. 2023, doi: 10.23939/jcpee2023.02.033.

[11] Y. Shapovalov, D. Bachyk, K. Detsyk, and R. Romaniuk, “On the Adequacy of Analysis of Linear Periodically Time-Variable Circuits by the Frequency Symbolic Method Using Matrix D-Trees,” in 2023 24th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), IEEE, Sep. 2023, pp. 1–5. doi: 10.1109/cpee59623.2023.10285146.

[12] Ю. І. Шаповалов, Д. Р. Бачик, К. О. Децик, Р. О. Романюк, and І. Шаповалов, «Аналіз складних лінійних параметричних кіл методом приведених матричних D-дерев», *Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника*, vol. 66, no. 4, pp. 223–235, Apr. 2023, doi: 10.20535/s0021347023060018.

[13] Y. Shapovalov, D. Bachyk, K. Detsyk, R. Romaniuk, and I. Shapovalov, “Analysis of Complex Linear Periodically Time-Varying

Circuits by Method of Reduced Matrix D-Trees,” Radioelectronics and Communications Systems, vol. 66, no. 4, pp. 190–203, Apr. 2023, doi: 10.3103/S0735272723060018.

[14] Шаповалов Ю.І. Система МАОРСs для багатоваріантного аналізу та оптимізації лінійних параметричних кіл у середовищі MATLAB / Ю.І.Шаповалов, Д.Р.Бачик, С.В.Маньковський // Вісн. НУ «Львівська політехніка». Радіoeлектроніка та телекомунікації – 2013. – №766. – С.28-34.

Mykola Beshley, Dr. of Tech. Sc., Prof.
Mykhailo Klymash, Dr. of Tech. Sc., Prof.
Denys Chornyi, PhD student
mykola.i.beshlei@lpnu.ua
mykhailo.m.klymash@lpnu.ua
denys.o.chornyi@lpnu.ua
Lviv Polytechnic National University

TRANSFORMING SUSTAINABILITY WITH AI, BIG DATA, AND ICT

In today's digitized era, information has become a critical asset driving efficiency in economic, social, and administrative domains. Digital transformation, as a dynamic and ongoing process, involves the integration of innovative digital technologies into all facets of organizational and governmental operations to better meet evolving demands and improve service delivery [1]. As societies face growing environmental and socio-economic challenges, Artificial Intelligence (AI), Big Data, and Information and Communication Technologies (ICT) are emerging as powerful enablers of sustainable development (Fig.1).



Figure 1. Conceptual representation
of AI and ICT integration for sustainable development

At its core, digital transformation aims to automate routine processes, streamline decision-making, and enhance flexibility, safety, and operational efficiency across systems. However, the path to digital transformation is complex [2]. It requires more than the adoption of new toolsit demands the restructuring of traditional infrastructures, the adoption of intelligent, data-driven approaches, and the alignment of technology with sustainability goals.

Amid this transformation, emerging networking technologies such as 5G/6G, Internet of Things (IoT), Software-Defined Networking (SDN), and Intent-Based Networking (IBN) are playing a pivotal role in reshaping how digital ecosystems operate [3]. These technologies enable cost-effective deployment, advanced traffic management, and higher Quality of Service (QoS) by leveraging the power of Artificial Intelligence (AI), Big Data analytics, and cloud computing. This paper explores how the convergence of these advanced technologies supports the evolution of sustainable systems in the digital age. It provides a comprehensive analysis of innovative network infrastructures and their role in enabling smart, resilient, and sustainable digital transformation. An illustrative overview of these emerging technologies is presented in Fig. 2.

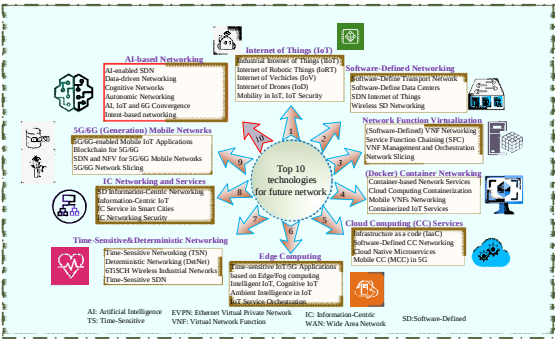


Figure 2. Top 10 trending technologies for sustainable development transformation [4]

The Fig.2 presents a concise overview of the most impactful technological domains driving the evolution of next-generation network infrastructures. These technologies are interconnected and contribute collectively to building intelligent, scalable, and resilient communication systems.

At the center of the diagram is the core concept of future networks supported by ten key technological pillars:

IoT – Encompasses diverse domains such as industrial IoT, wearable devices, smart homes, and vehicular communication, enabling massive machine-type communication and real-time data exchange.

SDN – Facilitates dynamic network programmability, central control, and resource optimization through virtualization and separation of control and data planes.

NFV – Enables flexible deployment of network functions over standard hardware, supporting cost-effective service chaining and scalable architecture.

Cloud Computing (CC) Services – Provides on-demand infrastructure (IaaS), platforms (PaaS), and applications (SaaS), and supports the distributed nature of modern service delivery, especially in mobile and edge computing.

Edge Computing – Shifts processing closer to data sources, reducing latency and enabling localized intelligence, particularly for time-sensitive and bandwidth-heavy applications.

Time-Sensitive and Deterministic Networking (TSN/DN) – Ensures guaranteed latency and jitter, vital for industrial automation, real-time control systems, and tactile Internet use cases.

Information-Centric Networking (ICN) – Focuses on content-based routing and in-network caching, improving data availability, network resilience, and efficiency.

5G/6G Mobile Networks – Represent the ongoing evolution of wireless communications, offering high-speed, low-latency connectivity and enabling new applications such as holographic communications, immersive media, and AI-native services.

AI-Based Networking – Integrates artificial intelligence to automate network management, intent translation, anomaly detection, and QoS/QoE optimization through cognitive and self-healing mechanisms.

Container-Based Networking – Supports microservice architectures using technologies like Docker and Kubernetes, enabling agile service deployment and cross-platform scalability.

In conclusion, the integration of AI, Big Data, and ICT is a key enabler of sustainable digital transformation. These technologies enhance automation, improve decision-making, and support efficient resource management across various domains. The combined impact of IoT, SDN, NFV, cloud and edge computing, ICN, TSN, 5G/6G, AI-based and container networking creates a solid foundation for building intelligent and resilient infrastructures. Together they contribute to addressing global sustainability challenges and accelerating progress toward smarter and more inclusive digital ecosystems.

[1] H. Tran-Dang and D. -S. Kim, "The Physical Internet in the Era of Digital Transformation: Perspectives and Open Issues," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 164613-164631, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3131562.

[2] M. Baslyman, "Digital Transformation From the Industry Perspective: Definitions, Goals, Conceptual Model, and Processes," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 42961-42970, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3166937.

[3] H. Tran-Dang and D. -S. Kim, "The Physical Internet in the Era of Digital Transformation: Perspectives and Open Issues," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 164613-164631, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3131562.

[4] M. Beshley, M. Klymash, I. Scherm, H. Beshley, and Y. Shkoropad, "Emerging network technologies for digital transformation: 5G/6G, IoT, SDN/IBN, cloud computing, and blockchain," in *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Cham: Springer Nature Switzerland, 2023, pp. 1–20.

SECTION 1. Theory of Signals and Electronic Circuits. Radio Measurements. Metrology

СЕКЦІЯ 1. Теорія сигналів та електронних кіл. Радіовимірювання. Метрологія

Семенов А.О., д-р. техн. наук., проф.

Хлюба А.А., аспірант.

semenov.a.o@vntu.edu.ua

hlobaanton@gmail.com

ВНТУ

ОБЕРТАННЯ ПРОЕКЦІЇ ВІДОБРАЖЕННЯ НА ЕКРАНІ ОСЦИЛОГРАФА СКЛАДНОГО АТРАКТОРА ГЕНЕРАТОРА ДИНАМІЧНОГО ХАОСА У ФАЗОВІЙ ПЛОЩИНІ

Широка доступність і дешевизна напівпровідників дає змогу перевіряти досліджувані математичні моделі на наявність динамічного хаосу, представляючи їх у формі електричної схеми. Часто для цих цілей використовують операційні підсилювачі, аналогові помножувачі та логічні елементи. Створивши таким чином аналог математичної моделі, іноді їх називають «аналоговими комп'ютерами» [1], можна перевірити динаміку системи під час зміни параметрів елементів, відслідковувати переходи від граничного циклу, подвоєння періоду до дивного атрактора. Останній можна спостерігати за допомогою осцилографа, переведеного в режим X-Y. Комбінуючи сигнали, що

подаються, можна спостерігати три проекції атрактора (X-Y, Y-Z, X-Z). Такий підхід дає змогу отримати загальні уявлення про його форму і порівняти з результатами чисельного моделювання. Однак при складних і заплутаних траєкторіях буває складно спостерігати всю структуру тільки з трьох сторін [2]. Іншим способом реалізації математичної моделі є використання програмованих вентильних матриць (FPGA), програмованих аналогових масивів (FPAА) або спеціальних приставок, наприклад, серії «Analog Discovery» або «National Instruments NI USB». Такий спосіб дає змогу збирати всі необхідні дані, використовуючи персональний комп'ютер, а також будувати 3D моделі атракторів у спеціальному програмному забезпеченні. При цьому частина даних втрачається через обмеження аналогового-цифрового-перетворювача (АЦП), як і в разі використання цифрового осцилографа з низькою кількістю дискретизації.

Однак існує спосіб використання доволі простої в реалізації приставки до осцилографа, що дає змогу послідовно обертати відображення атрактора відносно обраної осі. Таким чином можна домогтися ефекту псевдо 3D, використовуючи осцилограф. У комп'ютерній графіці для цього використовують матриці повороту, у результаті перетворення отримують нові координати об'єкта. Одним з способів електричної реалізації частини такої математичної операції є використання $\sin/\cos$ потенціометра або резольвера [3], на які подається сигнал-координата, але такі елементи або не випускаються, або занадто великі і дорогі. Заміною може слугувати таблиця значень кутів $\sin/\cos$, що зберігаються в постійній пам'яті (ROM) мікроконтролера, а використовуючи «аналоговий комп'ютер» виконуються решта всіх необхідних математичних операцій. Приклад такого пристрою, з докладним описом, наведено в [4], структурну схему наведено на рисунку 1.

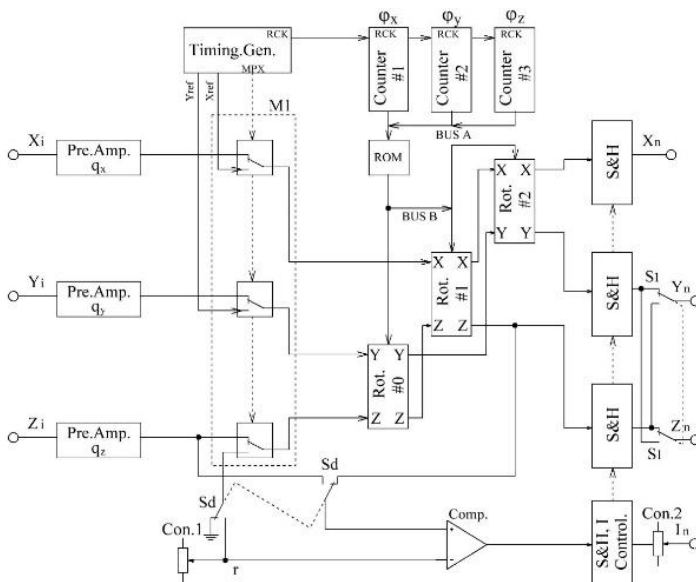


Рисунок 1. Структурна схема пристрою для обертання проекціями атракторів і створення перетину Пуанкаре [4]

Прилад дає змогу обертати атрактори за трьома осями на 360 градусів із кроком 0.7, відображати перетин Пуанкаре і керувати площиною перерізу. Управління кутом повороту реалізовано на 8 кнопках для кожної осі, які задають двійковий код – значення з таблиці.

Інший варіант з меншою кількістю функцій, але на сучасній елементній базі, пропонується в [5]. Поворот можливий тільки по двох осях, на 360 градусів з кроком в 1, управління реалізовано на двох потенціометрах грубо/точно. Використання мікроконтролера дає змогу відображати значення кута повороту на світлодіодному дисплеї. Реалізація такого пристрою і фото повернутого атрактора зображено на рисунку 2 (а-є). Обидва пристрої працюють із сигналами частотою до 20 кГц.

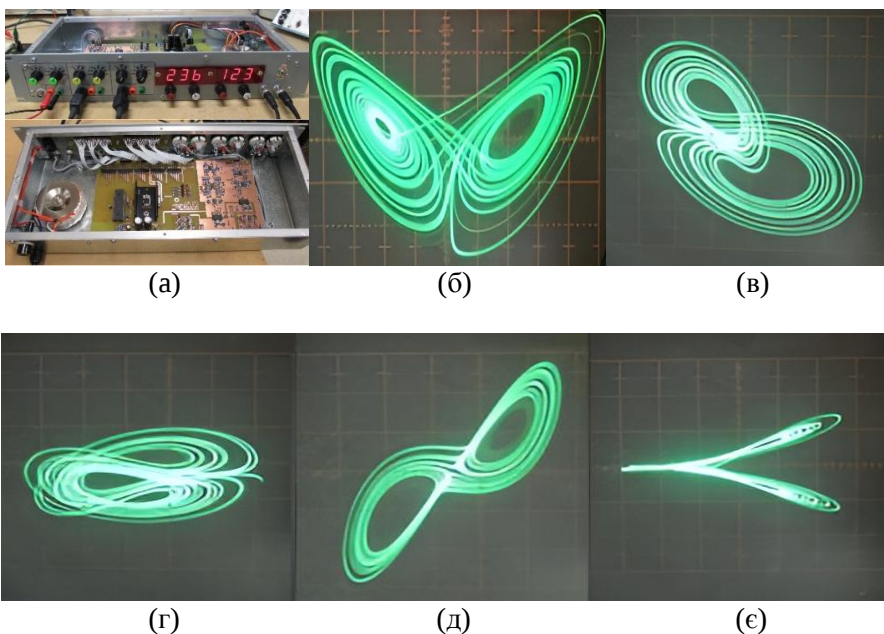


Рисунок 2. Прототип пристрою для обертання атракторів за двома осями (а), повернутий на деякий кут атрактор Лоренца (б, в) [5, 6]

Було наведено два варіанти реалізації приладів для обертання атракторів у фазовому просторі та відображення проекції на одну з площин. Основним елементом таких пристроїв є $\sin/\cos$ потенціометр або його аналог. З його допомогою реалізується частина ортогонального перетворення, яке дає змогу обертати атрактори в псевдо 3D. Цей елемент може бути реалізований за допомогою зв'язки: АЦП, постійний запам'ятовувальний пристрій (ROM) з занесеною в нього таблицею коефіцієнтів, цифро-аналоговий помножувач (формує сигнали $\sin(x)$, $\cos(x)$). Тим самим зменшується розмір пристрою. Заміна ROM на мікроконтролер дає змогу ввести додаткові функції,

наприклад, індикацію та розширення кута повороту [5]. Перспективною є об'єднання та модифікація напрацювань робіт [4, 5]. Переведення пристрою на сучасну елементну базу, розширення частотного діапазону, керування поворотом атракторів генераторів динамічного хаосу більшої розмірності, більший контроль над кутом повороту (шляхом введення двійкового числа кнопками або енкодером) та окремими функціями приладу. Наприклад, положенням перетину Пуанкаре, відображенням верхньої та нижньої частини атрактора (розділеного площиною перерізу), керуванням відстанню до площини перерізу, перемиканням між проекціями та розмірністю, безперервним/ручним поворотом.

[1] B. Ulmann Analog Computing. De Gruyter. 2022. doi: <https://doi.org/10.1515/9783110787740>

[2] А. Семенов, Б. Пінаєв, А. Хльоба, М. Шурхал та В. Ольхович, “Мікроелектронний генератор детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури з від’ємним диференційним опором”, *Measuring Comput. Devices Technolog. Processes*, № 3, с. 206–217, верес. 2023. doi: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-75-24>

[3] D. M. MacKay, *Analogue computing at ultra-high speed: An experimental and theoretical study*. New York: Wiley, 1962.

[4] L. O. Chua та T. Sugawara, “Panoramic views of strange attractors”, *Proc. IEEE*, т. 75, № 8, с. 1107–1120, 1987. doi: <https://doi.org/10.1109/proc.1987.13853>

[5] “A 3-Dimensional Projective Unit”. Glen's Stuff. URL: <https://glensstuff.com/3dpu/3dpu.htm> (дата звернення: 02.05.2025)

[6] “A Lorenz Attractor Circuit”. Glen's Stuff. URL: <https://glensstuff.com/3dpu/3dpu.htm> (дата звернення: 02.05.2025)

L. Ozirkovskyi, Dr. of Tech. Sc., Associate Prof.
P. Bratiuk, Master of Radio Engineering.
leonid.d.ozirkovskyi@lpnu.ua
pavlo.bratiuk.mtrpa.2023@lpnu.ua
Lviv Polytechnic National University

A NEW EXAMPLE TO ILLUSTRATE THE PROBLEM OF CALCULATING THE AVERAGE PULSED POWER

Introduction: Pulsed currents are at the core of modern technologies and devices, from household appliances to military and aerospace systems and to renewable energy sources. Billions of different pulse devices have been produced worldwide, and their range and number continue to grow.

A practical example of the inclusiveness of different types of electrical currents – in terms of the quantity of functions and devices they support, thereby emphasizing their importance – is drones for diverse environments:

- direct current – up to 30% – power supply of all on-board systems;
- harmonic currents of radio frequencies – up to 20% – wireless data transmission, satellite communication channels, RADARS, GPS, GNSS;
- pulsed currents of various shapes and frequencies – more than 50% – Embedded microprocessor control systems and real-time systems, digital signal processing units, digital modulation wireless and fiber optic communication systems, GPS, GNSS, RADAR, LIDAR, SONAR, thermal imagers, infrared sensors, gyroscopes, accelerometers, magnetometers, step-up and step-down pulse width modulated switching voltage converters (SVCs), stepper motor drive systems and speed controllers, environmental monitoring sensors (humidity, temperature, pressure, direction and strength of wind or water waves), anti-jamming modules, etc.

Pulsed power has a significant impact on system efficiency, especially under conditions of fast load changes. This requires accurate modeling and calculation methods that take into account the evaluation of the dynamic characteristics of the pulsed processes. In this context and scale, the improvement of traditional calculation methods and modelling tools, focusing on the use of pulsed currents, becomes relevant, especially in view of the identified shortcomings.

As one of the results of the study of the effectiveness of the SVCs [1], it was revealed that the formula for the average value of the function to calculate the power of conduction current pulses is used incorrectly.

In particular, in the example of the Multisim simulator from National Instruments Corp. show the discrepancy in the results of calculating the average power of unipolar rectangular pulses using different formulas.

Further analysis of this discrepancy showed that it goes beyond the issue of unipolar rectangular pulses and reflects a broader problem that includes bipolar rectangular pulses, and requires the study of pulses of various shapes approximated by both linear and nonlinear functions, which have been widely used.

The problem is not just the inability to accurately evaluate efficiency when testing and certifying pulsed devices. Taking into account the critical role of mathematical modeling and analysis tools, the power measurement error illustrated by the example of the widely used Multisim simulator highlights the risk of making wrong decisions at the design stage.

A new example of an error in the average power calculating in the Multisim simulator: Let's compare the result of calculating the average power of symmetrical bipolar rectangular pulses with amplitude $U_0 = 10$ V and duty cycle $D = 0.5$ on a resistor $R = 10$ Ohm by Ohm's law with the readings of the wattmeter XWM1 in the Multisim environment in Figure 1.

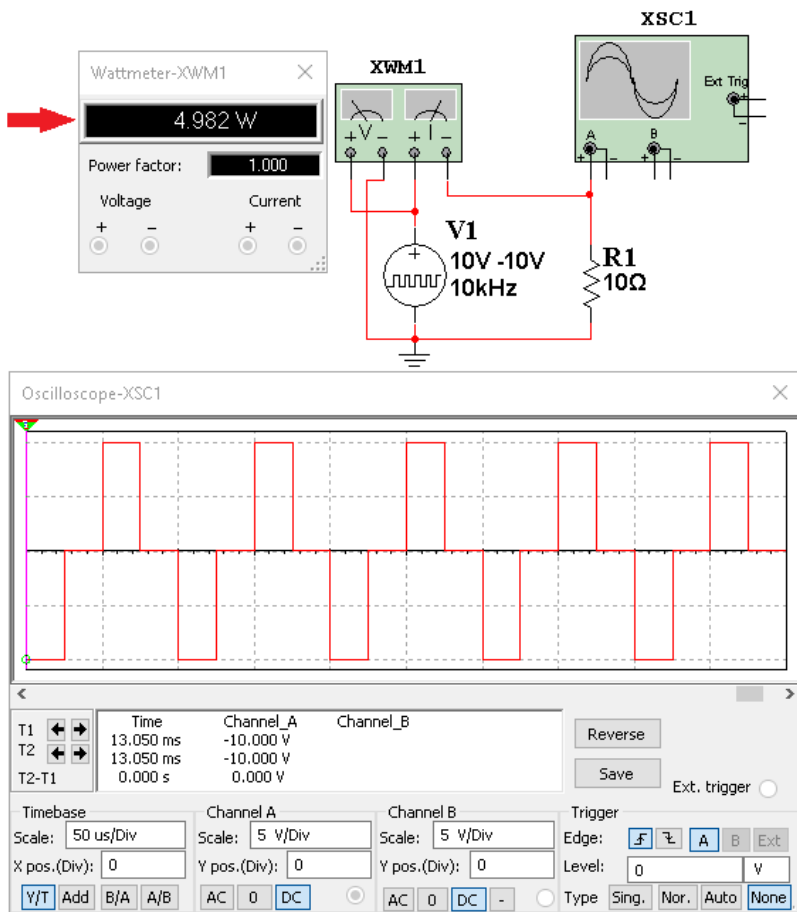


Figure 1: Screenshot of measurements of average power symmetric rectangular bipolar pulses in the Multisim simulator environment

For this purpose, we hereby take note of the fact that in the ‘Wattmeter’ section of the ‘Multisim Help Professional Edition Help File’ is set: ‘The field at the top of the instrument face displays the **average power**’.

The duty cycle $D = 0.5$ for symmetrical bipolar pulses can be divided into $D_{(+)} = 0.25$ for positive and $D_{(-)} = 0.25$ for negative pulse waves. And according to Ohm's law, for positive and negative pulse waves, the average values of voltage $U_{\text{avg}(+)}$, $U_{\text{avg}(-)}$ and current $I_{\text{avg}(+)}$, $I_{\text{avg}(-)}$ are calculated as follows:

$$U_{\text{avg}(+)} = U_0 \cdot D_{(+)} = U_{\text{avg}(-)} = |-U_0| \cdot D_{(-)} = 10 \cdot 0.25 = 2.5 \text{ V},$$

$$I_{\text{avg}(+)} = U_{\text{avg}(+)} : R = I_{\text{avg}(-)} = U_{\text{avg}(-)} : R = 2.5 : 10 = 0.25 \text{ A}.$$

Then, from the values of $U_{\text{avg}(+)}$, $U_{\text{avg}(-)}$, $I_{\text{avg}(+)}$, $I_{\text{avg}(-)}$, the average power P_{avg} of symmetrical bipolar rectangular pulses is obtained:

$$\begin{aligned} P_{\text{avg}} &= P_{\text{avg}(+)} + P_{\text{avg}(-)} = \\ &= U_{\text{avg}(+)} \cdot I_{\text{avg}(+)} + U_{\text{avg}(-)} \cdot I_{\text{avg}(-)} = 2.5 \cdot 0.25 + 2.5 \cdot 0.25 = 1.25 \text{ W}. \end{aligned}$$

In compare, the XWM1 wattmeter reading in Figure 1 is $4.982 \approx 5 \text{ W}$, which is four times higher than the average power calculated by Ohm's law.

The reason for this is the methodologically incorrect use in the Multisim simulator software of equivalent transformations in accordance with Ohm's law to calculate power using the formula for the average value of a function. This leads to the interpretation of power in the formal expression $p(t)$ as an elementary function similar to current $i(t)$ and voltage $u(t)$. In doing so, the meaning of electrical power is lost, which by definition is a composite function formed by the product $i(t) \cdot u(t)$.

And the peculiarity of bipolar pulses is that the error is twice as large as that of unipolar pulses with the same duty cycle D .

Conclusions and proposals: To this day, to calculate and measure the average power of rectangular pulses of conduction current with one type of charge carrier in the active resistance, which is described by a composite function in the form of the product of voltage and current, the formula is used, which in its original form was derived in mathematics for elementary functions. This leads to an overestimation of the calculation results.

In some cases, such as ensuring the reliability of the pulse device, this overestimation does not lead to significant negative consequences because it implies more cautious solutions than are possible. But in most cases, the consequences can be undesirable. In particular, it concerns energy losses in the active resistance of power supplies and other components of the SVCs, which reduces the accuracy of their efficiency evaluation. As a result, it can slow down the process of finding ways to improve them.

In order to solve the problem outlined above, a formula adapted to calculate the average power of unipolar and bipolar rectangular conduction current pulses in an active resistance has been proposed.

Further research is planned to cover all pulse waveforms approximated by linear and non-linear functions, specifically the exponential ones that occur in circuits with reactive components of step-up and step-down SVCs.

[1] Bratiuk P., Ozirkovskyi L. A controversial aspect of the theory of assessment and practice of measuring the efficiency of energy accumulation in reactive components of switching voltage converters, II International scientific and practical conference information and measuring technologies IVT-2024, November 13-14, 2024, Lviv, Ukraine, p. 85 – 86. URL: <https://science.lpnu.ua/ivt-2024/proceedings>

Ярослав Берко, аспірант
Володимир Бігдай, канд. фіз.-мат. наук, доц.
Андрій Лучечко, д-р. фіз.-мат. наук, проф.
yaroslav.berko@lnu.edu.ua
ЛНУ імені Івана Франка

ЗМЕНШЕННЯ ВПЛИВУ ЗАЗЕМЛЕННЯ НА ВИМІРЮВАННЯ В БЕЗКОНТАКТНІЙ ЕЛЕКТРИЧНІЙ ІМПЕДАНСНІЙ СПЕКТРОСКОПІЇ

Імпедансна спектроскопія (ІС) є високочутливим методом аналізу електричних властивостей систем, що дозволяє не лише будувати еквівалентні схеми заміщення (ЕСЗ), а й виявляти зміни в характеристиках досліджуваного середовища. Висока чутливість методики ІС зумовлює необхідність врахування та контролю низки зовнішніх та внутрішніх факторів під час вимірювань, які можуть спричинити появу небажаних артефактів в отриманих даних. Як зазначено в [1], спотворення даних можуть виникати внаслідок змін навколишніх умов, внутрішнього опору аналізатора, зміни паразитної ємності тощо. Деякі з цих чинників можна ефективно контролювати, наприклад температуру або геометрію досліджуваної системи. Однак, вплив паразитної ємності значно складніше передбачити і контролювати, навіть за умов ретельної підготовки експерименту. Це питання стає особливо актуальним у випадках, коли вимірювання проводяться в середині спеціалізованих камер з підтримкою вологості та температури.

У літературі описано щонайменше два методи мінімізації впливу паразитної ємності. Перший метод полягає в екрануванні досліджуваної системи за допомогою клітки Фарадея. Це зменшує вплив зовнішніх полів, проте суттєво підвищує паразитну ємність. Через це,

дослідники рекомендують використовувати його лише для частот нижче 20 Гц, що є суттєвим обмеженням для ІС [2]. Інший підхід базується на оцінці паразитної ємності використовуючи зовнішні конденсатори підключені до досліджуваної системи. Робочий діапазон цього методу становить від 50 кГц до 1 МГц, що також може бути обмежуючим фактором для ІС. Однак основним недоліком є необхідність підбору конденсаторів з оптимальними номіналами, які мають бути меншими або рівними значенню паразитної ємності системи [3].

У цій роботі представлено новий метод корекції впливу паразитної ємності, зумовленої заземленими поблизу об'єктами. Метод не потребує екранування системи або під'єднання зовнішніх елементів до досліджуваної системи. Він розроблений для мінімізації впливу заземлення металевої камери під час вимірювань всередині температурної камери, однак його можна використати для будь-яких вимірювань, які проводяться поблизу заземлених об'єктів та мають домінуючу ємнісну складову. Вимірюваннями з домінуючою ємнісною складовою називають безконтактною електричною імпедансною спектроскопією – методом, при якому між електродом та зразком наявний діелектричний бар'єр, що унеможливорює наявність резистивного зв'язку між електродами незалежно від характеристик досліджуваного зразка. Це дозволяє уникнути корозії електродів та забруднення зразків.

Суть запропонованого методу полягає у розміщенні досліджуваної системи на металевій пластині, яка відіграє роль основного джерела паразитної ємності. Вимірювання ІС проводиться за допомогою аналізатора імпедансу у двох різних конфігураціях підключення. Перша конфігурація – стандартне підключення досліджуваної системи до аналізатора імпедансу з заземленням металевої пластини. Для другої конфігурації металеву пластину підключено до віртуального нуля аналізатора імпедансу (порти L_{CUR} та L_{POT}). На основі отриманих

даних обчислюються скореговані значення імпедансу зі зменшеним впливом паразитної ємності за формулою:

$$Z_x = \frac{2Z_g \cdot Z_l}{Z_g + Z_l},$$

де Z_g – імпеданс для першої конфігурації; Z_l – імпеданс для другої конфігурації; Z_x – скорегований імпеданс зі зменшеним впливом паразитної ємності.

Запропонований підхід має низку переваг порівняно з існуючими методами, зокрема не потребує додаткових зовнішніх елементів у вимірювальній схемі та може бути застосований до всього діапазону частот. Результати вимірювань показали, що хоча цей метод не дозволяє повністю усунути вплив паразитної ємності, він дає змогу зменшити вплив заземлених об'єктів втричі порівняно з класичним вимірюванням – з 15% до 5% (див. рис. 1).

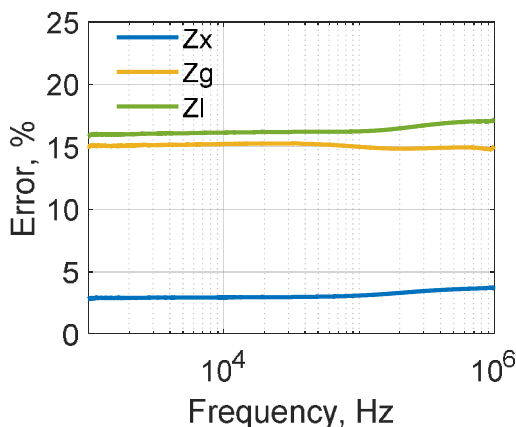


Рисунок 1. Рівень похибок для БЕІС-вимірювань води у різних конфігураціях підключення.

Вимірювання проводилися в діапазоні частот від 1 кГц до 1 МГц. Отриманий рівень точності є більш прийнятним для аналізу ЕСЗ і дозволяє підвищити достовірність отриманих параметрів при аналізі даних.

[1] B. W. Veal, P. M. Baldo, A. P. Paulikas, J. A. Eastman, Understanding Artifacts in Impedance Spectroscopy, *Journal of The Electrochemical Society*. 162 (2014) H47, doi: 10.1149/2.0791501jes.

[2] J. Fleig, J. Jamnik, J. Maier, Inductive Loops in Impedance Spectroscopy Caused by Electrical Shielding, *Journal of The Electrochemical Society*. 143 (1996) 3636, doi: 10.1149/1.1837263.

[3] C. Aliau-Bonet, R. Pallas-Areny, A fast method to estimate body capacitance to ground at mid frequencies, *Journal of Electrical Bioimpedance*. 6 (2015) 33-36, doi: 10.5617/jeb.2569.

Кузьмичов І.К., д-р фіз-мат. наук, проф.,
Войтович О.А., канд. техн. наук, доц.,
Лукаш О.С., аспірант,
kuzmichev.igr@gmail.com
cr-bsu@i.ua
aleksey.s.lukash@gmail.com
ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України

РЕЗОНАНСНА СИСТЕМА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ДІЕЛЕКТРИКІВ З ВЕЛИКИМИ ВТРАТАМИ В МІЛІМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ

В роботі [1] показано, що в порожньому напівсферичному відкритому резонаторі (НВР) при периферійному збудженні можуть існувати аксіально-симетричні коливання. Їх особливість у тому, що в центрі дзеркала існує зона, де напруженість електричного поля дорівнює нулю. Розташування в цій області зразка діелектрика у вигляді шайби або кювети з рідиною дозволяє визначити електрофізичні параметри речовин, які мають великі втрати. Це дуже актуальне завдання [2].

Метою роботи (в доповіді наведені результати) є дослідження спектру коливань в НВР, який збуджується щільним елементом зв'язку. Він розташований на периферії криволінійного відбивача.

До складу НВР входять сферичний 1 та плоский 2 відбивачі з апертурами $2a=60$ мм. Радіус кривизни сферичного дзеркала $R=85$ мм.

Блок-схема експериментальної установки наведена на рис. 1. Резонатор збуджується щільним елементом зв'язку 3 розмірами $3,6 \times 0,17$ мм. Він розташований на периферії дзеркала 1 на відстані 13,13 мм від осі. В резонаторі з високою ефективністю повинні збуджуватися вищі аксіально-несиметричні коливання TEM_{1024} та

ТЕМ₂₀₂₄ ($L/R \approx 0.6$). В якості джерела 6 використовується генератор сигналів Г4-142. Частота f генератора – 70,622 ГГц ($l=4,248$ мм). Сигнал з резонатора фіксується за допомогою другого щілинного елемента зв'язку з такими ж розмірами. Він розташований симетрично елементу 3.

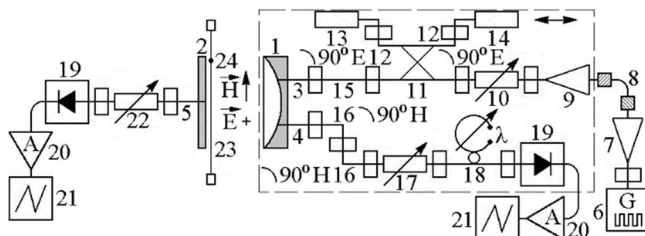


Рисунок 1. Блок-схема експериментального стенда

Сигнал в хвильвідний тракт надходить по діелектричному хвильоводу з поперечними розмірами 3.6×2 мм. Для узгодження цього хвильоводу з генератором в схемі установки передбачені два пірамідальних рупори (7, 9). Розміри розкриттів рупорів $14,5 \times 11,5$ мм, висота 19,5 мм. В схему також входить атенуатор 10 з фіксованим послабленням – 8 дБ, а також 11. Це необхідно для того, щоб можна було виміряти коефіцієнт відбиття від входу резонатора. Потужності, які виділяються від падаючої та відбитої хвиль, через хвильоводі згини 12 надходять в узгоджені навантаження 13, 14. Через відрізок хвильоводу 15 та елемент зв'язку 4 сигнал надходить в приймальний тракт. Приймальний тракт складається з двох хвильвідних згинів 16, вимірювального атенуатора 17, хвилеміра 18, детектора 19, резонансного підсилювача 20 та осцилографа 21. В центрі плоского дзеркала 2 є щілинний елемент зв'язку 5 розміром $3,6 \times 1,8$ мм. За його допомогою ідентифікуються коливання з максимальною напруженістю електричного поля по осі

резонатора (TEM_{00q} , TEM_{20q}). В цей тракт входять: відрізок хвильоводу 15, вимірювальний атенуатор 22 та елементи, які описані вище.

Методика проведення вимірювань така. Пересувається дзеркало 1 та по максимальному сигналу на екрані осцилографа 21, який увімкнений в тракт щілинного елемента зв'язку 4, фіксується резонанс. За допомогою пробного тіла 24, яке закріплене на капроновій нитці 23 товщиною 0,1 мм (рис. 1), ідентифікується тип коливання, яке збуджується в НВР. Пробне тіло являє собою розсіювачу металічну кульку діаметром 0,9 мм. Дільниця спектру коливань НВР наведена на на рис. 2.

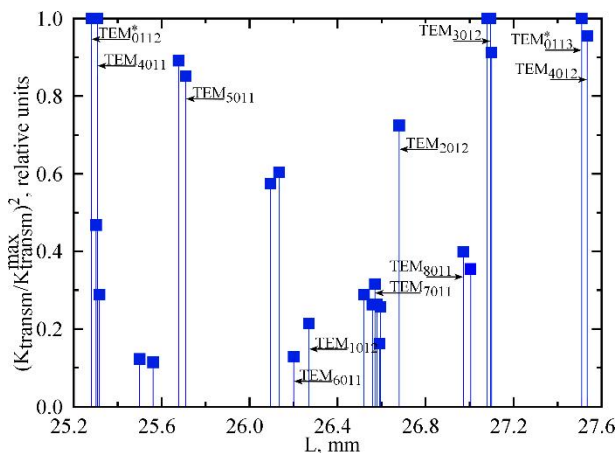


Рисунок 2. Дільниця спектру коливань НВР

З рисунка видно, що спектр коливань НВР, який збуджується щілинним елементом зв'язку 3 густий. Тут позначені коливання, які ідентифікуються за допомогою пробного тіла. Аксіально симетричне коливання TEM_{0112}^* (TEM_{0113}^*) має розподіл напруженості поля у вигляді кільця. Також очевидно, що максимальний коефіцієнт передачі мають

коливання типу TEM_{0112}^* и TEM_{3012} . Це пов'язано з розташування елемента зв'язку 3 на дзеркалі 1.

Якщо помістити в центрі плоского дзеркала шайбу з латуні діаметром 6 мм та висотою 1 мм ($\sim l/4$), то отримаємо висновок, що шайба з такими розмірами практично не впливає на коефіцієнт передачі коливання TEM_{0112}^* . На периферії плоского дзеркала 2 на відстані 5 мм від його краю розташовуються чотири смужки поглинаючого матеріалу довжиною 10 мм та шириною 4 мм. Відстань від краю дзеркала вибрана такою, щоб поглинаючий матеріал не впливав на коливання TEM_{0112}^* . Дільниця спектру такого резонатора показана на рис. 3.

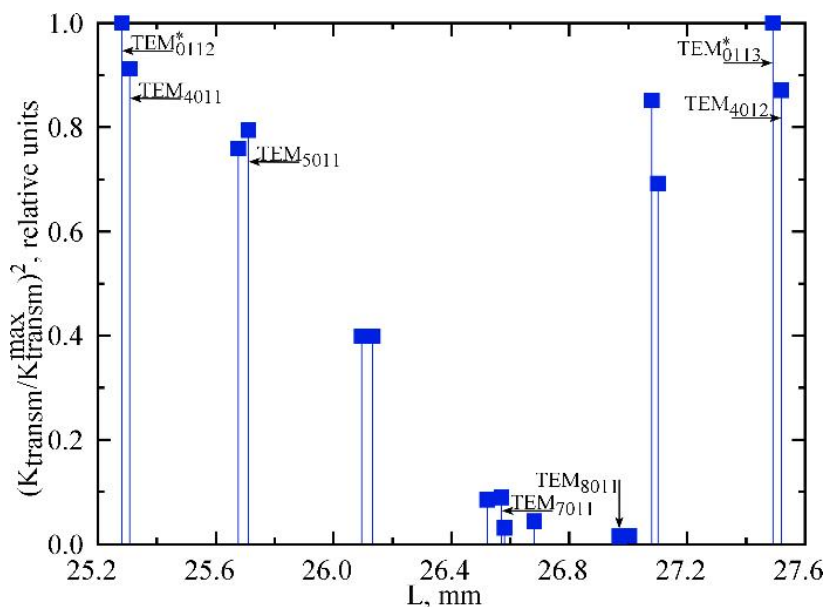


Рисунок 3. Дільниця спектру коливань НВР з шайбою

За результатами проведених експериментальних досліджень можна зробити декілька важливих висновків.

1. При використанні елементів зв'язку, які зміщені до периферії дзеркал, в НВР збуджується аксіально несиметричне коливання TEM_{011q}^* . Резонатор з таким типом коливань може бути використаний для вимірювання параметрів діелектриків в міліметровому діапазоні.

2. При розташуванні зразка діелектрика у вигляді шайби або кювети з рідиною в центрі плоского дзеркала можливо розрізати спектр коливань та вимірювати параметри діелектриків з великими втратами.

[1] B.I. Muzychishin, I.K. Kuzmichev, O.B. Senkevych, and S.A. Pogarsky, "Spectrum of OR Oscillations with a Segment of a Circular Waveguide," 2022 IEEE 9th International Conference "Problems of Info communications Science and Technology" (PIC S&T '2022), October 10-12, 2022: conf. proc., Kyiv, Ukraine, pp. 524-528, October 2022. DOI: 10.1109/PICST57299.2022.10238663

[2] J. Arumugam, N. R. Edhayaraj, S. Shanmugavadivelu, and V. Sathyanarayanan, "Design of Microwave Electromagnetic Sensor for Liquid Characterization," in Journal of High-Frequency Communication Technologies, vol. 1, no. 3, pp.73-83, July 2023. <https://doi.org/10.58399/TLCX9900>

Голуб С.П., провід. інж.
Могила А.А., канд. фіз.-мат. наук, с.н.с.
golub.s.ire@gmail.com
moganat1196@gmail.com
ІРЕ НАН України

ОБ'ЄДНАННЯ МОДЕЛЕЙ СИГНАЛІВ, ВІДБИТИХ ОБ'ЄКТАМИ СКЛАДНОЇ ФОРМИ, ДО КОМБІНОВАНОЇ МОДЕЛІ

Сучасні теоретичні дослідження сигналів і практичні розробки із застосуванням цих досягнень в галузі їх обробки спонукають і дозволяють використовувати весь цей арсенал для вирішення таких складних завдань як розпізнавання сигналів різноманітного фізичного типу, відмінних за принципами генерації, середі розповсюдження, методів приймання, виділення, фільтрації, інших первинних, вторинних та всіх додаткових перетворень. Широко відома велика кількість моделей взаємодії різноманітних сигналів (радіолокаційних, акустичних, лазерних) з об'єктами складної форми та подальша обробка з метою їх виявлення, аналізу, класифікації. Кожний, хто стикається із завданням розпізнавання, постає перед проблемами обрання підходів, техніки, безпечного використання. Звісно, підхід має бути – найрезультативнішим, – тобто найдостовірнішим за висновком, швидкісним, а також сучасним, мінімально помітним для об'єкта або інших засобів радіотехнічної протидії, економічним щодо ресурсів, отже, ефективним.

У доповіді, присвяченій певному піднапрямку досліджень, розглядаємо радіолокаційні сигнали, що отримані когерентними

радіолокаторами в різноманітних режимах щодо активної/пасивної локації, несучих частот і завадової ситуації. Фізико-математична модель комбінована – багатоозначкова (багатопараметрична) з використанням непараметричних (в загальному випадку також і параметричних) характеристик, з організацією, на етапі досліджень («навчання» системи), всіх доступних даних та програмно-мовного інструментарію – в «ансамблі» («кортежі», «гурти») ознак, з аналізом їх інформативності для будування відповідних швидкісних вирішуючих алгоритмів і програм. Побудова системи відбувається у два етапи — 1) навчання (з формуванням ознакового простору) і 2) побудова вирішувальних правил (для аналізу ситуації потрібно з'ясувати — до якого з n класів $\{ C_1, C_2, \dots, C_n \}$ належить “тестова” вибірка і в решті — реальний об'єкт. На етапі навчання застосовуються попередньо отримані або змодельовані реалізації кожного класу сигналів з узагальненими ознаками, в якості яких використовуються ЕПР, швидкість (за Допплером та зміною координат), спектральні характеристики (енергетичні спектри, їх змінність/швидкість змінності максимумів, ширини, відношення ширин, мода/бокові складові, «псевдо» спектри). Аналізується їх інформативність для побудування відповідних швидкісних вирішувальних алгоритмів і програм. Оцінка інформативності базується, у випадку погодження критеріїв застосування, - на використанні перетворень Карунена-Лоева, в інших – на побудові межових еталонів. Для побудови відповідних швидкісних вирішувальних алгоритмів і програм за наявності статистичних параметрів – Баєсові вирішувальні правила, для непараметричних – критерії «найближчого сусіда» та/або визначення потрапляння в межі відповідного еталона.

Використання підходу штучного інтелекту з імітацією /формуванням нейромережі з ваговими коефіцієнтами на тих же засадах використання

перетворень Карунена-Лоева потребує дослідження на еквівалентність та швидкість отримання результату.

Кінцева мета – побудова працюючого макета системи розпізнавання.

Висновки: перспективним для забезпечення ефективного розпізнавання типу сигналів, що відбиті від об'єктів складної форми, є застосування комбінованих моделей.

Пропозиції: провадити дослідження та побудову засобів розпізнавання сигналів, в тому числі із застосуванням систем штучного інтелекту.

Мочурад О.П., аспірант
Гоц. Н.Є., д-р техн. наук., проф.
oleksii.p.mochurad@lpnu.ua
cie@lpnu.ua

ДП Львівстандартметрологія
Національний університет «Львівська політехніка»

МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ У РАДІОЕЛЕКТРОНІЦІ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ

З стрімким розвитком радіоелектроніки, інфокомунікацій, інженерії і широкого застосування мікросхем, актуальною залишається проблема перегріву, зміни робочого температурного режиму, що в свою чергу може означати про несправність системи або окремих її компонентів, і провокувати несправності. Також актуальним є технічне обслуговування, виявлення пошкоджених елементів, для своєчасної заміни чи планування технічного обслуговування.

Перегрів є основним обмежувальним фактором для продуктивності, надійності та терміну служби сучасних радіоелектронних та телекомунікаційних компонентів (наприклад, потужні підсилювачі, процесори в базових станціях, мікрохвильові схеми). Тому пропонується метод безконтактного інфрачервоного вимірювання температури який дозволить проводити моніторинг робочих температурних режимів радіоелектроніки, та запобігти критичним наслідкам.

Даний метод ідеально підходить для моніторингу теплових точок, виявлення аномалій та оптимізації рішень охолодження під час проектування, виробництва та експлуатації. Це має вирішальне значення для запобігання збоїв, підвищення ефективності роботи та

продовження терміну служби пристроїв. На даний момент використання пірометрів та тепловізорів у сфері радіоелектроніки та телекомунікацій стрімко зростає і стає все більш актуальним.

Таблиця 1 Сфера застосування

Моніторинг якості мікросхем	Виявлення локальних зон перегріву, для оцінки справності та виявлення потенційних дефектів на ранніх стадіях
Діагностика друкованих плат	Візуалізація розподілу температур для ідентифікації несправних або перевантажених компонентів
Сервісне обслуговування телеком-обладнання	Моніторинг стану блоків живлення, процесорів і підсилювачів у режимі реального часу без зупинки систем
Налагодження електронних пристроїв	Оперативна перевірка теплового режиму в ході налагодження або після ремонту без впливу на схеми
Розробка нових пристроїв	Оптимізація розташування компонентів з урахуванням їх теплового впливу під час моделювання та тестування

Точкові вимірювання можна виконувати за допомогою пірометра для інфрачервоних вимірювань. Даний засіб вимірювальної техніки є



Рисунок 1 Пірометр Testo 830 T1

доступним і простим у експлуатації. Основними його метрологічними характеристиками є діапазон вимірювань $-30...+400\text{ }^{\circ}\text{C}$, та похибка: $\pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ або $\pm 1,5\%$ від вим. зн. ($+0,1...+400\text{ }^{\circ}\text{C}$). Основними перевагами пірометрів є:

дешевші і простіші у використанні, швидкий вимір однієї точки (наприклад, перевірка окремого з'єднання на перегрів), можна використовувати в обмежених умовах (тісні простори, електроніка). Але попри це вони не покажуть загальної температурної картини і можна пропустити «гарячу точку», яка може вказувати на несправність.

Загальну температурну картину вимірювального об'єкта можуть відобразити тільки тепловізори, які є дорожчими у використанні, але мають ширший функціонал і більші можливості з тією ж точністю.

Метрологічними характеристиками тепловізора є діапазон вимірювань $-20...+280\text{ }^{\circ}\text{C}$, похибка вимірювань $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ або $\pm 2\%$ від вим. зн. та термочутливість (NETD) яка у даній моделі складає $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, що є ключовою характеристикою для точності вимірювань[1].

Важливим у вимірюваннях температури за випроміненням для обох засобів вимірювальної техніки буде визначення коефіцієнту випромінення поверхні, який характеризує ступінь здатності матеріалу випромінювати інфрачервоне випромінювання. Максимальна випромінювальна здатність приймається як одиниця. Тіл із максимальною випромінювальною здатністю в природі не існує, але решта об'єктів порівнюється за цією якістю. Загалом, прозорі об'єкти можуть мати низький коефіцієнт випромінення поверхні, оскільки вони пропускають випромінення крізь себе[2]. Формула для прозорих об'єктів враховує коефіцієнт поглинання, і коефіцієнт відбиття випромінення поверхні:

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1 \quad (1)$$

де ρ - коефіцієнт відбиття поверхні, τ - коефіцієнт пропускання об'єкта, ε – коефіцієнт випромінення поверхні. Дана формула показує, що



Рисунок 2 Тепловізор
Testo 865

коефіцієнт випромінення прозорого об'єкта залежить від її здатності відбивати, поглинати та пропускати випромінення. Для непрозорих об'єктів коефіцієнт випромінення зазвичай вищий ніж у прозорих об'єктів, оскільки відсутнє пропускання випромінення в середині об'єкту:

$$\varepsilon + \rho = 1. \quad (2)$$

Метрологічне забезпечення інфрачервоних вимірювань температури є ключовим для забезпечення якості проведення аналізу та включатиме у себе періодичне проведення калібрування, повірки та технічного обслуговування вимірювального обладнання.

Вимірювальні прилади мають проходити калібрування чи повірку у відповідно атестованих лабораторіях з використанням еталонів температури (наприклад – чорного тіла) Це дозволяє встановити невизначеність чи похибку приладу та забезпечити його відтворюваність у межах заданих допусків.

У промисловому середовищі або при польових вимірюваннях прилади можуть втрачати точність. Контроль дає змогу виявити відхилення та запобігти поширенню недостовірних даних. Ведення технічної документації. Всі дії з метрологічного обслуговування мають бути документовані: сертифікати калібрування, свідоцтвом про повірок, плани обслуговування тощо. У тепловізійному обстеженні радіоелектронних деталей відхилення у 0,5 °С на поверхні з'єднання може вказувати на наявність "гарячих точок", які ведуть до зниження ККД установки або небезпеки займання. Неправильно відкалібрований тепловізор чи пірометр може пропустити такі ділянки або видати помилкові сигнали, що призведе до хибних технічних рішень[3].

Отже, провівши дане дослідження можна дійти висновку що вимірює середню інтенсивність інфрачервоного випромінювання від

конкретної точки перетворює її в значення температури на основі закону Планка, враховуючи емісійність поверхні. Кожен піксель ІЧ-матриці виконує ту ж саму дію, що й пірометр, але масово і паралельно створюється теплова карта об'єкта, з можливістю подальшої цифрової обробки (виявлення максимумів/мінімумів тощо), що в свою чергу дає додаткову інформацію для аналізу стану окремих радіоелектронних систем чи блоків. Метрологічне забезпечення ІЧ-вимірювань температури — це не просто формальна процедура, а невід'ємна частина системи управління якістю в радіоелектроніці та телекомунікаціях.

[1]«Вимірювання температури: теорія та практика», Бескид Бід, Львів 2006 р.

[2]«Інфрачервона термографія» О. Госсорг. Мир 1988 р.

[3]«Вимірювання температури малих тіл пірометрами частковго випромінення», Чернин. С. М., Коган А. В. М. Енергія, 1980.

Андрій Бондарев, д.т.н., проф.¹

Іван Максимів, к.т.н., доц.¹

Сергій Алтунін, к.т.н.¹

Тарас Андрухів, к.т.н.²

andrii.p.bondarev@lpnu.ua

¹Національний університет «Львівська політехніка»

²АТ «Укртелеком»,

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ МОДИФІКОВАНОГО ФАЗОВОГО ДЕТЕКТОРА У ПРИЙМАЧАХ ДЛЯ MASSIVE MIMO

Розвиток безпроводних систем шостого покоління (6G) відкриває нові перспективи у сфері мобільного зв'язку, орієнтуючись на надвисокі частоти (до 300 ГГц), надщільне розгортання пристроїв, сценарії з високою мобільністю та інтелектуальну реконфігурацію середовища поширення сигналу. Водночас цей процес супроводжуються появою нових, нетривіальних типів завад, зокрема фазового шуму, імпульсних сплесків, нестабільності каналу, а також сильних доплерівських спотворень. Особливо вразливими до цих впливів є сигнали зі складною фазовою та амплітудно-фазовою модуляцією, які є основою майбутніх стандартів систем 6G. До таких сигналів відносяться QPSK, APSK, OTFS, DQPSK та інші [1]. Класичні методи компенсації фазових спотворень і фільтрації завад, розроблені для систем 4G–5G, не здатні ефективно функціонувати в умовах стрімких змін фази або низького співвідношення сигнал/шум, характерного для надвисоких частотних діапазонів.

Частково деякі з цих проблем вирішують застосуванням специфічних технологій, таких як Massive MIMO [2], яка є ключовою для 6G і за допомогою якої реалізовано просторовий розподіл каналів зв'язку, цілеспрямоване формування променів і зменшення негативного ефекту від багатопроменевого поширення.

Одним із рішень, здатним у реальному часі реагувати й усувати аномальні скачки фази, що виникають унаслідок впливу завади, може стати модифікований фазовий детектор [3]. У цій роботі розглянуто структуру модифікованого фазового детектора, специфіку його застосування в умовах впливу завад у 6G-середовищах та наведено результати його імітаційного моделювання.

Суть модифікації (рис. 1) полягає у тому що у синфазному та квадратурному каналі приймача перед фазовим детектором встановлюються вузькосмугові пропорційно-інтегруючі фільтри (ПІФ), кожен з яких суттєво обмежує амплітуду стрибків фази і таким чином усуває аномальні стрибки, які можуть спричинити виникнення помилок. Після фазового детектора встановлено корегуючий фільтр верхніх частот, КЧХ якого є оберненою до КЧХ ПІФ, що забезпечує відновлення динамічних властивостей сигналу.

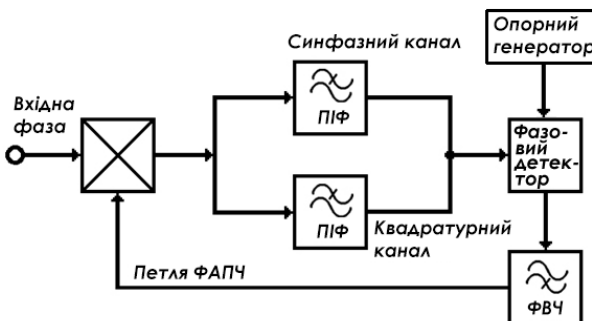


Рисунок 1. Схема модифікованого фазового детектора

Такий детектор є повноцінним схемотехнічним рішенням, а отже, має переваги над потенційними програмними рішеннями (наприклад, нейромережі), особливо в умовах високих частот, де затримки під час програмної обробки є критичним фактором. Варто також зазначити, що програмні рішення у високочастотних системах зв'язку також можуть мати обмеження по швидкодії апаратної частини, адже обробка сигналів надвисокої частоти вимагає високої обчислювальної потужності.

Для проведення імітаційного моделювання було обрано сигнал з QPSK (quadrature phase shift keying) модуляцією, оскільки він, завдяки простоті реалізації та підвищеній завадостійкості, є хорошим претендентом для забезпечення сталого зв'язку, зокрема в субтерагерцових діапазонах частот.

У програмному середовищі Matlab засобами Simulink було реалізовано схему модифікованого фазового детектора (рис. 1), джерело сигналу QPSK з носійною частотою 100 ГГц і канал зв'язку, здатний накладати на цей сигнал адитивну заваду заданої потужності.

Імітаційне моделювання відбувалося в декілька етапів. Спершу було виконано перевірку адекватності моделі, критерієм якої була відповідність діаграми залежності ймовірності появи помилки (BER) від відношення сигнал/шум (SNR) у каналі зв'язку до аналогічної діаграми для QPSK сигналу, наявної у відкритих джерелах [4]. Після цього було знято осцилограми вихідного сигналу без впливу завади (рис. 2 а), його детектування класичним фазовим детектором (рис. 2 б) і модифікованим фазовим детектором (рис. 2 в). В обох випадках моменти зміни фази сигналу, її напрям та величину було відображено коректно, хоча осцилограма для модифікованого детектора є менш наочною в силу особливостей роботи його модифікації. Наступним етапом було проведення моделювання в умовах дії завади у каналі зв'язку. За порівняно високого відношення сигнал/шум (10 дБ) обидва детектори коректно відобразили моменти зміни фази сигналу, її напрям та величину.

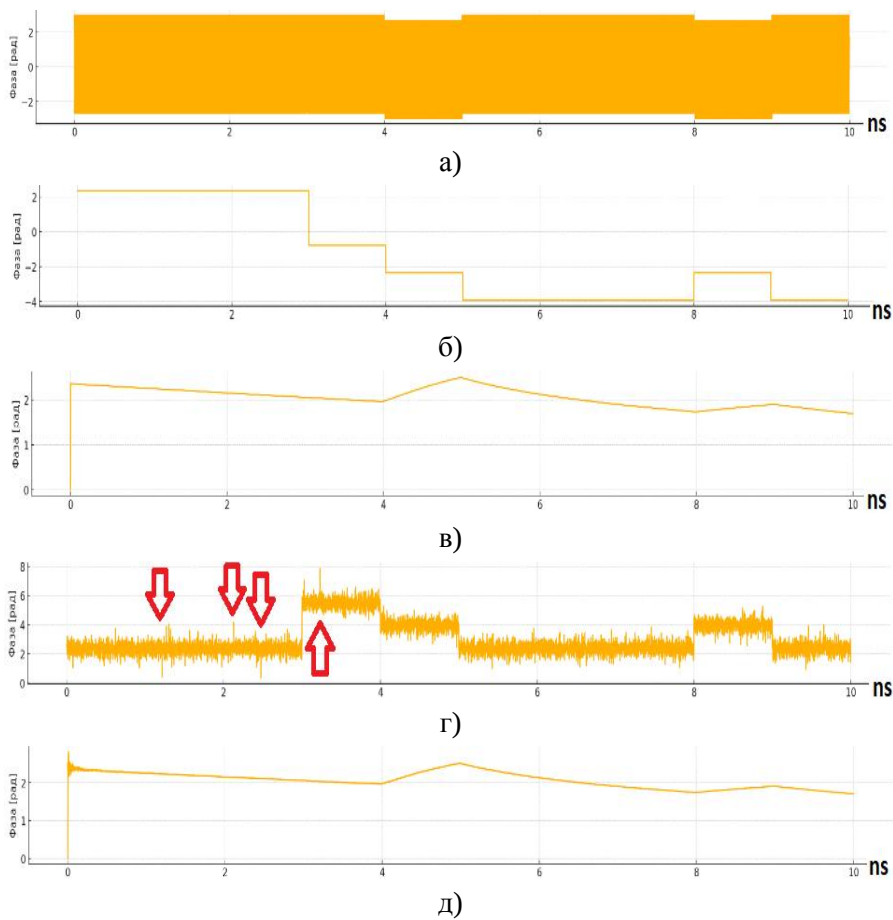


Рисунок 2. Результати імітаційного моделювання у Matlab Simulink

Однак, в умовах подальшого зростання потужності заводи у каналі зв'язку, класичний детектор почав проявляти себе дедалі гірше – з'явилися аномальні стрибки значення фази сигналу (рис. 2 г), які

можуть призвести до неправильного її трактування фазовим детектором, і, як наслідок – до появи помилки детектування. Водночас, модифікований фазовий детектор проявив стійкість до завад і за умови низького SNR (7 дБ) коректно відобразив моменти зміни фази сигналу, її напрям та величину (рис. 2 д).

Отже, за результатами імітаційного моделювання можна зробити висновок, що модифікований детектор продемонстрував вищу завадостійкість у порівнянні з класичним детектором за умови високої частоти носійної сигналу та низького відношення сигнал/шум.

[1] Xingqin Lin, Jun Zhang, Yuanwei Liu, Joongheon Kim, “Fundamentals of 6G Communications and Networking”, Springer International Publishing AG, 2023. – 766 p.

[2] Y. Huo et al., “Technology trends for massive MIMO towards 6G”, arXiv preprint arXiv:2301.01703, 2023.

[3] A. Bondariev, S. Altunin, I. Horbatyi, I. Maksymiv “Firmware implementation and experimental research of the phase-locked loop with improved noise immunity”, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – № 5/9 (95). – P. 17–25.

[4] Goldsmith A. “Wireless Communications” – Cambridge: Cambridge University Press, 2005. – 644 p.

SECTION 2. Electronics, photonics, and semiconductor electronics

СЕКЦІЯ 2. Електроніка, фотоніка та напівпровідникова електроніка

Roman Holyaka, Dr. of Tech. Sc., Prof.

Mykola Khilchuk, PhD.

Roman Kukhta, PhD student

Yevhen Halushka, PhD student

roman.l.holiaka@lpnu.ua, mykola.o.khilchuk@lpnu.ua

roman.a.kukhta@lpnu.ua, yevhen.o.halushka@lpnu.ua

Lviv Polytechnic National University

OPTIMIZING SUPPLY MODE IN ENERGY-EFFICIENT SENSORS

With the development of information technology, in particular sensor devices in the IoT (Internet of Things) concept [1], the requirements for their embedded systems are increasing significantly. The critical parameters of embedded signal conversion systems in modern sensor devices are the ability to be programmatically reconfigured, miniaturization, stable operation with low-voltage power supplies, and micro-power consumption. In sensor electronics, the concept of Mixed Signal Front-end has been formed [2, 3] with the implementation in the basis of System on Chip (SoC) [4], in particular, Programmable System on a Chip PSoC 5 (Cypress Semiconductor, Infineon Technologies) [5]. Such PSoCs contain a wide

range of mixed signal conversion nodes with the possibility of their reconfiguration and programmatic control.

This paper solves the problem of minimizing the power consumption of embedded mixed signal conversion systems for IoT sensor devices. Most of these sensor devices operate in pulse modes. Therefore, the problem of minimizing power consumption is solved by optimizing the switching power supply modes of sensor device components and generating informative signals, taking into account the dynamic parameters of the SoC signal paths.

Pulse modes of operation of electronic devices are well known and widely used, in particular, in computer equipment, communication systems, navigation aids, medical diagnostics, etc. In recent years, the direction of minimizing the power consumption of microprocessor-controlled devices using a cyclic Wake-up transition between active mode and sleep mode has been intensively developing.

In a generalized form, the structural diagram of the Mixed Signal SoC of sensor devices is shown in Fig. 1. The formation of informative signals is realized by primary transducers (sensors of physical, chemical or biochemical quantities). It should be borne in mind that the functionality and parameters of the primary transformation are determined not only by sensors (Sensor, S) but also by actuators (Actuator, A) that activate the first process of the measurement transformation.

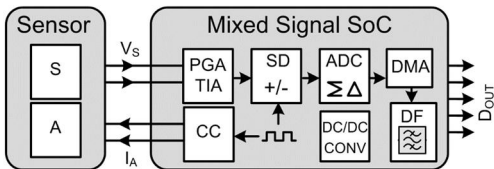


Fig.1. Generalized structural diagram of the sensor device

In addition to the primary conversion unit, the new generation of sensor devices based on the Mixed Signal SoC concept contain a programmable gain amplifier PGA, pulse power supply controller for the actuator CC (Current Controller), synchronous detector SD, analog-to-digital converter ADC, digital filter DF, Direct Memory Access DMA controller, photovoltaic energy converter and power stabilizer (DC-DC CONV) and other nodes. In particular, these are communication units (wired, optical or radio frequency), indication units, etc. For simplicity, these nodes are not shown in the generalized diagram.

Most energy-efficient sensor devices operate in pulse modes with a certain repetition period T_P (Fig. 2). In each T_P period, there is a time interval t_P of active measurement (Active Mode) and a time interval t_Z of the passive state (Sleep Mode). The power supply during the active measurement interval is determined by two main components – the activation current I_A of the sensor (primary transducer) and the supply current I_S of the signal (secondary) conversion circuit. The power supply current in the passive state interval I_Z is significantly less than the current $I_A + I_S$ of the active measurement.

The analysis of the functioning of sensor devices with a pulse mode of operation shows that the same informational capacity can be provided both by increasing the activation current I_A and the supply current I_S of the signal converter while shortening the interval t_P of active time measurement (Case A, upper diagram of Fig. 2) and by reducing the activation current I_A and the supply current I_S of the signal converter while extending the interval t_P of active time measurement (Case B, lower diagram of Fig. 2).

Analyzing the speed of signal converters, we note that the signal settling time, in particular at the amplifier output, is determined by a number of parameters. The performance parameters of such amplifiers are the product of the gain coefficient by the bandwidth GBP (Gain Bandwidth Product) in frequency units (Hz), the slew rate (SR) in Volts/seconds (V/s), and the output voltage setting time (ST) in time units (s).

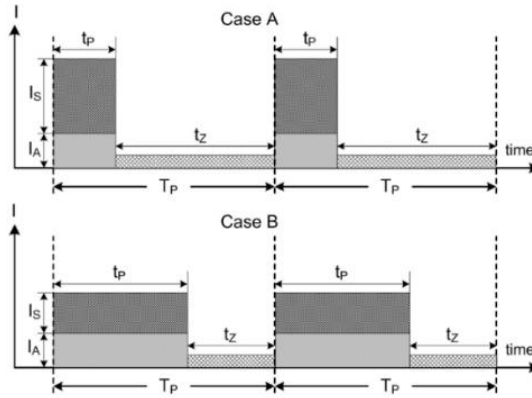
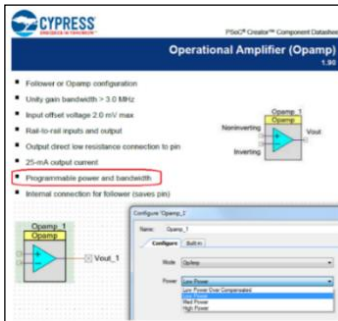
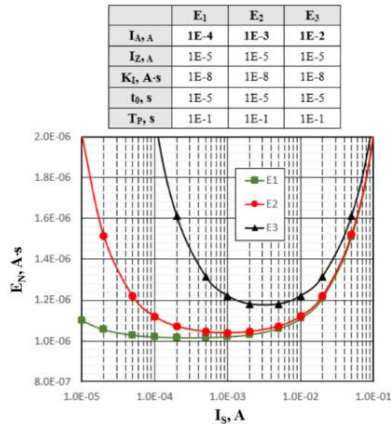


Fig. 2. Illustration of pulse operating modes



a)



b)

Fig.3. Opamp PSoC configuration window (a) and examples of calculating the normalized power consumption E_N (b)

The performance parameters are determined by the supply current of the IS circuit – the higher the value of the IS current, the faster the output voltage is established. In modern components of mixed signal conversion

with programmable functioning parameters, in particular, as shown in the Operational Amplifier (Opamp, Fig. 3, a) specification of the PSoC 5 programmable system on a chip, a choice of Programmable Power and Bandwidth power modes is provided – Low, Med, and High Power [6]. Examples of calculating the normalized power consumption E_N from the current I_S for certain sets of values I_A , I_Z , K_I , t_0 , T_P are shown in Fig.3, b.

[1] Neshenko N., Bou-Harb E., Crichigno J., G. Kaddoum, Ghani N., Demystifying IoT Security: An Exhaustive Survey on IoT Vulnerabilities and a First Empirical Look on Internet-Scale IoT Exploitations, IEEE Commun. Surv. Tutor., 21 (2019), No. 3, 2702-2733.

[2] Pérez-Prieto N., Delgado-Restituto M., Rodríguez-Vázquez Á., Artifact-Aware Analogue/Mixed-Signal Front-Ends for Neural Recording Applications, IEEE Int. Symp. Circuits Syst. (ISCAS), 2019, 1-5.

[3] Holyaka R., Barylo G., Marusenkova T., Khilchuk M., Boyko O., Programmable Mixed Signal Front-End for Sensor Applications, IEEE 16th Int. Conf. on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 2022, 482-485.

[4] Xie H. et al., GaN-on-Si HEMTs Fabricated With Si CMOS-Compatible Metallization for Power Amplifiers in Low-Power Mobile SoCs, IEEE Microw Wirel Co, 31(2021), No. 2, 141-144.

[5] Castellanos-Ramos J. et al., Adding Proximity Sensing Capability to Tactile Array Based on Off-the-Shelf FSR and PSoC," IEEE Trans. Instrum. and Meas., 69(2020), No. 7, 4238-4250.

[6] PSOC™ Creator. <https://www.infineon.com/cms/en/design-support/tools/sdk/psoc-software/psoc-creator/>.

Yevhen Demydenko, postgraduate
Vladyslav Novytskyi, postgraduate
Yevhen Odarenko, Dr. of Phys. Math. Sc., Prof.
yevhen.demydenko@nure.ua
vladyslav.novytskyi@nure.ua
yevhen.odarenko@nure.ua
Kharkiv National University of Radio Electronics

DISPERSION CHARACTERISTICS OF GYROELECTRIC PHOTONIC CRYSTALS

This paper considers gyroelectric photonic crystals, which are a special class of materials whose electrical properties change under the influence of an external magnetic field. This phenomenon occurs due to the anisotropy of the crystal structure and specific mechanisms of interaction with electromagnetic waves. Such materials belong to a broader class of magneto-optical media, which enable the dynamic tuning of optical properties for advanced photonic applications, such as isolators and circulators.

Gyroelectric crystals exhibit a dependence of dielectric properties coming from the direction of propagation of an electromagnetic wave. Dispersion properties can change under the influence of external electric and magnetic fields, this is especially important in precision optical systems and sensors operating over a wide temperature range. Magnetic field increase leads to significant changes in the width and location of the band gap. The increase in the width of the band gap occurs mainly on the high-frequency side. Since the operating frequency range of photonic crystal devices (waveguides, resonators, etc.) is within the frequency band gap of cladding, it can be assumed that the influence of the change in the external magnetic field on the spectral characteristics of the photonic crystal waveguide will be carried out according to the same laws [1].

Indium antimonide (InSb) is one of the promising materials in the study of gyroelectric effects. It's a semiconductor crystal with a narrow band gap, characterized by high carrier mobility and sensitivity to a magnetic field. The properties of InSb can change under the influence of a magnetic field, which affects the laws of wave propagation and allows this material to be used in devices with adjustable optical parameters [2]. As the magnetic field strength increases, the elements of the permittivity tensor in indium antimonide are altered, leading to modified electromagnetic wave propagation conditions. This induces a range of magneto-optical phenomena, including nonreciprocal wave behavior and tunable dispersion characteristics [3].

A model of photonic crystal was built using a finite element analyzer, solver, and simulation software package COMSOL Multiphysics. A diagram of a two-dimensional photonic crystal consisting of cylindrical elements with a radius of $0.4a$ (where a is a lattice constant) made of indium antimonide and arranged at the nodes of a square lattice is presented at a Fig. 1.

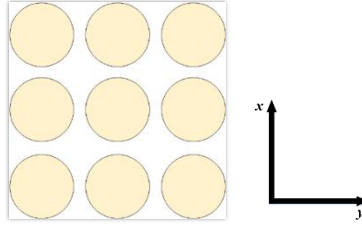


Figure 1. Schematic of a photonic crystal with gyroelectric elements

The dielectric tensor for such a medium under a static magnetic field $\vec{B}_0$ in the z-direction takes the form:

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & i\varepsilon_{xy} & 0 \\ -i\varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix},$$

where $\varepsilon_{xy} \propto B_0$, and the off-diagonal elements represent the magneto-optical activity responsible for the gyrotropic behavior [4]. Gyroelectric crystals exhibit a dependence of dielectric properties on the direction of wave propagation and polarization state. This anisotropy affects the band structure of the photonic crystal, leading to magnetically tunable band gaps. An external magnetic field alters the refractive index contrast and hence changes the position and width of photonic bandgaps.

After making numerical calculations, using different programs, both figures show graphs build from two sets of results (Fig. 2). Solid curves represent results that were achieved using MIT Photonic Bands package, and dotted curves are the results from COMSOL Multiphysics package. After closer inspection, both program results show the same dispersion characteristics proving the calculations were correct. Numerical modeling shows that the bandgap opens under external magnetic field effect (Fig. 2b). In contrast, dispersion diagram is shown at the Fig. 2a with no magnetic field affecting the medium.

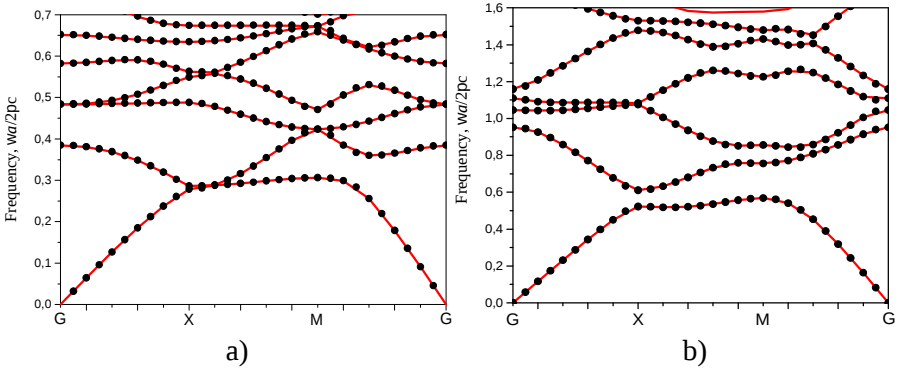


Figure 2. a) Dispersion characteristic of a photonic crystal with no external magnetic field, b) Dispersion characteristic of a photonic crystal with an external magnetic field

The results of the simulations for the dispersion relations of gyroelectric photonic crystals reveal clear trends: increasing the magnetic field not only shifts the bandgap but also modifies its width. This allows engineering of photonic devices with programmable spectral properties. The main factor determining these changes is the increase in the mobility of charge carriers under the action of a magnetic field. In addition, in the InSb medium, the emergence of unidirectional edge modes is possible, which are insensitive to scattering and backpropagation. Controlling these features with external fields provides a pathway to active photonic systems for telecommunications, sensing, and on-chip signal routing, with potential for integration in silicon photonics through hybrid material approaches.

[1] Q. Gong and X. Hu, “Photonic crystals principles and applications.” New York: Jenny Stanford Publishing, 2013, 366 p., doi: 10.1201/b15654.

[2] L. He, Q. Shen, J. Xu, et al., “One-way edge modes in a photonic crystal of semiconductor at terahertz frequencies” in Scientific Reports, vol. 8, 8165, 2018, doi: 10.1038/s41598-018-26395-4.

[3] Y. Demydenko, V. Novytskyi, E. Odarenko and A. Shmat'ko, “Tunable photonic crystal waveguides with gyrotropic elements” in 2024 IEEE 17th Int. Conf. on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv, Ukraine, 2024, pp. 325-328, doi: 10.1109/tcset64720.2024.10755609.

[4] F. Fan, Sh.-J. Chang, W.-H. Gu, X.-H. Wang and A.-Q. Chen, “Magnetically tunable terahertz isolator based on structured semiconductor magneto plasmonics” in IEEE Photonics Technology Letters, vol. 24, no. 22, pp. 2080-2083, Nov. 2012, doi: 10.1109/LPT.2012.2219858.

Алтунін С.І., канд. техн. наук
Шкілюк О.П., канд. техн. наук
Цимбалюк І.Р., д-р філософії
serhii.i.altunin@lpnu.ua
oleksandr.p.shkiliuk@lpnu.ua
ivan.r.tsymbaliuk@lpnu.ua

Національний університет «Львівська політехніка»

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ SDR У СИСТЕМАХ ЗАВАДОСТІЙКОГО ЗВ'ЯЗКУ

Вступ. Поява та стрімкий розвиток технології Software-Defined Radio (SDR) відкриває нові можливості для реалізації комплексних захищених систем зв'язку різного рівня і це особливо стосується сфери військового зв'язку. Використання технології SDR дає змогу об'єднати функціонал радіостанції з можливостями комп'ютерних засобів. SDR-пристрій використовує кілька рівнів програмного забезпечення для виконання різних завдань. Таким чином, система радіозв'язку стає гнучкою та адаптивною, адже її можна налаштувати на прийом та передавання практично будь-яких сигналів, змінюючи лише програмне забезпечення, а використання алгоритмів цифрової обробки сигналів дає змогу отримати якіснішу фільтрацію, ніж з допомогою аналогових методів. Ключовою перевагою використання пристроїв на платформі SDR є можливість забезпечення сумісності застарілих засобів радіозв'язку та сучасних систем. Використання технології SDR спроможне забезпечити адаптацію до низки протоколів, щоб різні моделі радіостанцій і мереж могли взаємодіяти.

Перспективи застосування SDR. Науково-практичні підходи щодо зменшення дії завад в SDR постійно розвивається, і є кілька

перспективних напрямків для майбутніх удосконалень. Використання штучного інтелекту і машинного навчання відкриває нові можливості для підвищення завадостійкості. Штучний інтелект і машинне навчання також може застосовуватися для інтелектуального вибору оптимальних методів придушення завад на основі конкретних характеристик виявлених завад. Крім того, це може значно покращити класифікацію та ідентифікацію сигналів, дозволяючи системам SDR розрізняти бажані сигнали і різні типи завад, а також виявляти аномальні патерни завад, які можуть свідчити про зловмисну діяльність [1].

Адаптивні алгоритми управління можуть динамічно регулювати діаграму спрямованості антенної решітки для відстеження бажаних сигналів, одночасно розміщуючи нулі в напрямку джерел завад. Реалізація просторового рознесення в SDR вимагає наявності декількох антенних елементів і синхронізованих приймачів, а алгоритми обробки сигналів виконуються програмно. Впровадження найсучасніших методів модуляції, які характеризуються високою стійкістю до завад, а також методів розширення спектра і мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів (OFDM), значно підвищує стійкість до дії завад. Методи короткочасного перетворення Фур'є (STFT) і вейвлет-перетворення, можуть бути цінними для характеристизації та усунення завад, які мають нестационарний характер.

Принципи когнітивного радіо, які невід'ємно пов'язані з технологією SDR, пропонують потужну основу для покращеного управління завадами. Когнітивні радіостанції можуть динамічно відчувати радіочастотний спектр, визначати недовикористані смуги частот і отримувати доступ до цих смуг, не створюючи перешкод для первинних користувачів. Механізми об'єднання і спільного використання спектра можуть ще більше підвищити ефективність використання спектра і зменшити дію завад. Системи когнітивного радіо також можуть активно уникати

перешкод, динамічно змінюючи свою робочу частоту або параметри передавання в режимі реального часу. Когнітивне радіо, побудоване на основі SDR, дозволяє змінити парадигму в бік інтелектуального і автономного управління боротьби з перешкодами, дозволяючи радіостанціям адаптуватися до спектрального середовища. Цей підхід обіцяє ефективніше використання спектра і зменшення завад завдяки динамічному і гнучкому використанню наявних радіоресурсів [2].

Таблиця 1. Методи підвищення завадостійкості в системах радіозв'язку на базі SDR

Метод	Переваги	Недоліки	Застосування
Штучний інтелект та машинне навчання	Висока адаптивність до складних і динамічних завад, можливість автономної роботи	Висока обчислювальна складність, значна кількість даних для навчання моделі, можлива велика затримка	Системи радіозв'язку, що працюють в складному завадовому середовищі
Когнітивне радіо	Динамічний доступ до спектру, уникнення завад через можливість динамічне налаштування частотних параметрів каналу зв'язку	Складні алгоритми моніторингу спектру та прийняття рішень, складність та дороговизна в реалізації	Військові системи зв'язку, тактичні радіостанції, мережі IoT

Розширення спектру	Опірність до вузькосмугових завад, можливість прихованого радіозв'язку	Потенційна вразливість до широкосмугових завад	Військовий зв'язок, мережі IoT, зв'язок з БПЛА
Адаптивні антенні решітки	Адаптивне регулювання діаграмою спрямованості антенних решіток для кращої фільтрації завад	Складність апаратної частини та алгоритмів обробки сигналу, необхідність калібрування	Станції стільникового зв'язку, радіолокаційні та радіонавігаційні системи
Гібридні методи	Поєднання переваг інших методів для придушення завад різних типів	Складність реалізації та інтеграції різних методів	Системи радіозв'язку з підвищеною надійністю

Інтеграція штучного інтелекту і машинного навчання має величезні перспективи для значного посилення завадостійкості в SDR. Ці інтелектуальні методи пропонують потенціал для адаптивних, автономних і високоефективних стратегій зменшення завад, які можуть навчатися і розвиватися у відповідь на постійно мінливе радіочастотне середовище. Передові методи DSP, принципи когнітивного радіо та гібридні підходи, що поєднують сильні сторони різних методів, також готові відігравати вирішальну роль у досягненні вищих рівнів завадостійкості. Хоча ці передові методи пропонують значні переваги, вони також створюють проблеми, пов'язані з обчислювальною складністю, енергоспоживанням, складністю системи і потребою в спеціалізованому обладнанні. Тому при виборі та впровадженні

конкретних методів зменшення завад у системі SDR необхідно ретельно враховувати вимоги до застосування, характеристики очікуваного завадового середовища та наявні ресурси. Зрештою, постійні дослідження і розробки в галузі технології SDR, особливо в області інтелектуальних алгоритмів і гібридних архітектур, прокладуть шлях до все більш стійких і надійних систем бездротового зв'язку, здатних ефективно працювати навіть в умовах високого рівня завад.

Висновки. Гнучкість технології SDR дає змогу реалізувати широку низку методів для боротьби з різними типами та рівнями завад. Передові методи цифрової обробки сигналів, принципи когнітивного радіо та гібридні підходи, що поєднують сильні сторони різних методів, відіграватимуть вирішальну роль у підвищенні завадостійкості існуючих систем зв'язку. А інтеграція штучного інтелекту і машинного навчання має величезні перспективи для побудови адаптивних та автономних, що реагують на мінливе радіочастотне середовище.

1. H. N. Nguyen, G. Noubir. Towards an AI-Driven Universal Anti-Jamming Solution with Convolutional Interference Cancellation Network
2. M. M. Olama, S. M. Killough, T. Kuruganti, T. E. Carroll. Design, Implementation, and Evaluation of a Hybrid DS/FFH Spread-Spectrum Radio Transceiver

Андрій Фечан, д.т.н., проф.

Юрій Баштик, аспірант.

andrii.v.fechan@lpnu.ua

yurii.v.bashtyk@lpnu.ua

Національний університет «Львівська політехніка»

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ОВЕРДРАЙВ ДЛЯ ЕЛЕКТРООПТИЧНИХ СИСТЕМ З ТОВСТИМ ШАРОМ РІДКОГО КРИСТАЛУ

Оптоелектронні пристрої з товстим (більше 40 мкм) рідкокристалічним (РК) шаром знаходять своє застосування як елементи оптичних систем такі як керовані розгалужувачі, світловодні структури, фокусуючі елементи тощо. Принцип дії таких елементів полягає у створенні в шарі РК під дією електричного поля певного розподілу показника заломлення.

Слабким місцем таких систем є досить великі часи включень. Одним з шляхів вирішення цієї проблеми є застосування методу Response Time Compensation (RTC). Адаптації цього методу для пристроїв з великою товщиною шару РК присвячена ця робота.

RTC, також відомий як овердрайв, є методом, що використовується для покращення часу електрооптичного відгуку рідкокристалічних дисплеїв, який часто є недостатньо швидким для відтворення відео контенту. Цей метод передбачає застосування протягом чітко визначеного часу збільшеного значення керуючої напруги з подальшим її зменшенням до необхідного значення для компенсації повільного часу відгуку [1,2]. RTC перехоплює цифровий відеопотік. Він порівнює попередню команду рівня сірого (певного значення напруги) для кожного пікселя з поточною командою рівня сірого. На основі цього порівняння з попередньо

визначеної таблиці пошуку (LUT) вибирається альтернативний рівень сірого. Цей альтернативний рівень сірого характеризується завищеним значенням напруги так званою «перенапругою» (over-boost) або заниженим значенням «недонапругою» (under-boost), що застосовується протягом одного кадру для прискорення переходу до бажаного поточного рівня сірого. LUT містить записи для кожної можливої комбінації попереднього та поточного рівнів сірого, що забезпечує компенсацію в обох напрямках (збільшення або зменшення яскравості). Цей метод є добре відпрацьованим для пристроїв в яких шар РК не перевищує 10 мкм [3]. Однак при товщинах шару рідкого кристалу більше 40 мкм суттєво змінюється характер переорієнтації шару РК. У випадку малих товщин переорієнтація шару відбувається без суттєвої втрати впорядкованості, що приводить до монотонного зменшення часів переключення з ростом керуючої напруги. У випадку великих товщин ситуація кардинально змінюється [4]. На рис.1. наведено залежність часу встановлення стабільної текстури нематичного РК від прикладеної напруги для нематичних рідких кристалів МББА та SP92 при товщині шару РК 50 мкм.

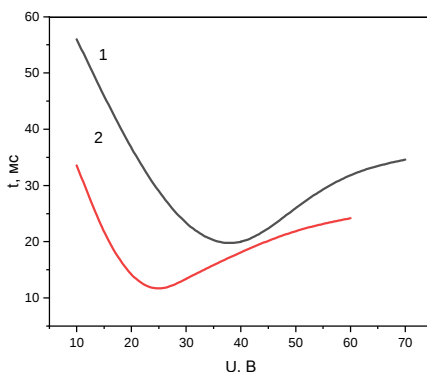


Рисунок 1. Залежність часу утворення стабільної структури від величини прикладеної напруги: 1-МББА; 2- SP92.

Дослідження динамічних характеристик проводились методом реєстрації зміни коноскопічних картин [5]. Отримані експериментальні залежності мають яскраво виражені мінімуми, які не спостерігаються в зразках з малою товщиною шару РК. Таку поведінку можна пояснити зменшенням досконалості рідкокристалічної текстури під дією зовнішнього електричного поля, відновлення якої вимагає додаткового часу.

Така особливість часових характеристик РК при великих товщинах вимагає суттєвого вдосконалення методу RTC. На рис.2 наведено часові діаграми керуючих напруг для комірки з РК МББА. Стрілками вказано часи встановлення стабільної текстури РК шару.

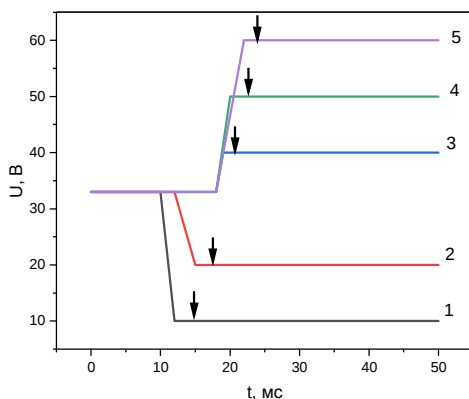


Рисунок 2. Часові діаграми керуючих напруг для комірки ($d=50\text{мкм}$) з РК МББА для текстур при $U=10\text{В}$ (1); $U=20\text{В}$ (2); $U=40\text{В}$ (3); $U=50\text{В}$ (4); $U=60\text{В}$ (5).

Значення напруги over-boost обмежено величиною, яка не приводить до суттєвого падіння досконалості РК текстури. Дослідження коноскопічних картин показали, що максимально допустиме значення напруги

over-boost (U_{OV}) при збереженні необхідної досконалості текстури становить 90% від величини при якій досягається мінімальні часи включення. Однак, для роботи описаних вище пристроїв необхідними є також такі розподіли показника заломлення, які можливо досягнути лише при напругах значно вищих ніж допустима величина over-boost. Так, для забезпечення стабільної планарної текстури для РК МББА значення керуючої напруги ($U_{кер}$) становить 60 В, що практично вдвічі більше ніж величина over-boost. Отже, для пристроїв з товстим шаром РК застосування RTC можна виокремити дві зони. При включенні текстури, для якої виконується умова $U_{кер} < U_{OV}$ фактично застосовується класичний підхід при якому кінцева текстура РК 90% часу формується при напрузі величиною U_{OV} з переходом до $U_{кер}$ на фінальному етапі. Для випадку $U_{кер} > U_{OV}$ тривалість дії U_{OV} (в даному випадку понижене значення напруги) визначається як 90% від мінімального часу встановлення текстури в якій $U_{кер} > U_{OV}$.

Аналіз отриманих результатів дає змогу стверджувати що застосування модифікованого RTS методу для пристроїв з товстим шаром РК дає змогу суттєво зменшити часи включення від 2.5 до 1.5.

На основі модифікованого RTS методу розроблено схему керування прикладеною напругою з системою прогнозування оптимальних часових інтервалів.

[1] McCartney, R. I. "A Liquid Crystal Display Response Time Compensation Feature Integrated into an LCD Panel Timing Controller", Texas Instruments Incorporated, pp. 1350-1353, 2011, ISSN/0003-0966X/03/3402-1350-\$1.00 © 2003, SID<https://www.ti.com/lit/pdf/snla185>

[2] S. Kumar, M. Biswas and T. Q. Nguyen, "Analysis of the response time compensation systems for Liquid Crystal Displays," 2005 13th European Signal Processing Conference, Antalya, Turkey, 2005, pp. 1-4.

[3] Song, Jia., "Organic light emitting diode and liquid crystal display: structure, mechanism, preparation, and comparison". Highlights in Science, Engineering and Technology.v. 21. 2022, p.7-13. DOI:10.54097/hset.v21i.3132.

[4] Чабан О., Баштик Ю., Вісьтак М. "Комп'ютерне моделювання процесу утворення електрокерованих планарних світловодних структур", Технічні вісті, Т1(39), с.91-94, 2014.

[5] Ya. Nastishin, O. B. Dovgyj, O. G. Vlokh, "Optical conoscopy of distorted uniaxial liquid crystals: computer simulation and experiment", Ukrainian journal of physical optics. №3, V.3. pp. 98–106, 2002.

SECTION 3. Software and hardware of electronic and infocommunication devices and systems

СЕКЦІЯ 3. Програмно-апаратні засоби радіоелектронних та інфокомунікаційних пристроїв і систем

Бугайов М. В., канд. техн. наук., ст. досл.

karunen@ukr.net

ЖВІ ім. С. П. Корольова

АДАПТАЦІЯ ДОВЖИНИ ВИБІРКИ СИГНАЛУ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ДЕТЕКТОРА ДО ВІДНОШЕННЯ СИГНАЛ-ШУМ В ЧАСТОТНОМУ КАНАЛІ

Вступна частина

Розміщення на безпілотному літальному апараті (БпЛА) засобів для ведення радіомоніторингу (РМ) накладає деякі обмеження на них, а саме вони повинні мати малі габарити та вагу, а також низьке енергоспоживання. З іншого боку, панорамний аналіз радіочастотного спектра (РЧС) необхідно проводити практично в реальному масштабі часу, що потребує значних енергетичних та обчислювальних ресурсів. Зокрема для контролю зайнятості частотних каналів в заданій смузі частот (наприклад, пошук вільних каналів для систем когнітивного радіо) необхідно постійно аналізувати рівень сигналу в них. Для вирішення даного завдання в умовах невідомої форми сигналу найчастіше використовують енергетичний детектор, показники якості якого безпосередньо залежать від значення відношення сигнал-шум

(ВСШ) в каналі та тривалості часу аналізу (довжини вибірки сигналу, що аналізується). При високих значеннях ВСШ для прийняття рішення про зайнятість каналу тривалість інтервалу аналізу можна зменшувати, а виділений ресурс часу перерозподіляти між іншими каналами. Для цього необхідно встановити аналітичні залежності тривалості інтервалу аналізу від ВСШ в каналі для заданих показників якості виявлення сигналу.

Змістовна частина

Для вузькосмугового фільтра і ширини спектра сигналу, що перевищує ширину його смуги пропускання, значення ВСШ можна розрахувати як відношення потужності сигналу до потужності шуму в смузі пропускання.

Для енергетичного детектора тестову статистику будемо розраховувати у такому вигляді:

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (s_i + \xi_i)^2, \quad (1)$$

де x_i – i -й відлік прийнятої сигнальної суміші; s_i – i -й відлік сигналу; ξ_i – i -й відлік шуму; N – довжина вибірки сигналу.

Ймовірність хибної тривоги відповідно до критерія Неймана-Пірсона можна розрахувати відповідно до такого виразу:

$$P_F = \int_{\gamma}^{\infty} p(E_{\xi}) dE_{\xi}, \quad (2)$$

де $p(E_{\xi})$ – розподіл щільності ймовірностей (РЩЙ) тестової статистики для шуму; γ – порогове значення тестової статистики.

Ймовірність правильного виявлення визначатимемо за таким виразом:

$$P_D = \int_{\gamma} p(E_x) dE_x, \quad (3)$$

де $p(E_x)$ – РЩЙ тестової статистики для суміші сигналу і шуму.

Вирази (2) та (3), а також довжина вибірки N і значення ВСШ q пов'язані між собою таким співвідношенням [1]:

$$P_D = Q_{\sqrt{2N}} \left(\frac{Q_{\sqrt{2N}}^{-1}(P_F)}{q+1} \right) \quad (4)$$

де $Q_{\sqrt{2N}}(x)$ – значення інтегралу від РЩЙ хі-квадрат від x до ∞ .

Проте аналітично отримати залежність значення довжини вибірки від ВСШ із виразу (4) неможливо, оскільки значення N власне і визначає форму РЩЙ хі-квадрат.

При великих значеннях N (більше 30) РЩЙ тестової статистики для шуму можна наближено вважати нормальним і використовувати досить прості апроксимації [2-3]. Більш точні асимптотичні вирази для розрахунку квантилів хі-квадрат розподілу не дають змоги аналітично виразити значення об'єму вибірки.

Проте для малих значень N , що є важливим для скорочення часу аналізу частотного каналу, РЩЙ тестової статистики суттєво відрізняється від нормального, що не дозволяє аналітично отримати залежність між кількістю відліків та ВСШ для заданих показників якості виявлення. Тому дані залежності для деяких значень параметрів було отримано чисельно із використанням кривих виявлення.

Експериментальні залежності об'єму вибірки від значення ВСШ для різних показників якості виявлення і їх логарифмічному представленні є практично лінійними. Використовуючи поліноміальну апроксимацію третього порядку залежності логарифма довжини вибірки від ВСШ в дБ можна навести у такому вигляді:

$$10 \lg(N(q)) \approx \sum_{i=0}^3 A_i q^i, \quad (5)$$

де значення коефіцієнтів A_i розраховуються шляхом апроксимації для конкретних значень P_D і P_F .

Щоб не перераховувати для кожного виміряного значення ВСШ значення N можна для робочих значень P_D і P_F з деяким кроком (наприклад 1 дБ) ВСШ розрахувати значення $N(q)$, записати їх в таблицю і зберігати в пам'яті.

Оцінку значення ВСШ в частотному каналі можна отримати лише тоді, коли буде прийнято рішення про виявлення джерела сигналу. Оскільки виявлення сигналу є випадковою подією, то джерело сигналу може бути виявлене як при низьких значеннях ВСШ так і не виявлене при високих. Проте, оскільки ймовірність виявлення джерела сигналу при низьких ВСШ є нижчою, ніж при високих, то таких випадків буде відносно небагато, в порівнянні з випадками, коли ВСШ в каналі набагато перевищує необхідне. Даний факт є передумовою до скорочення часу на аналіз частотних каналів із високими значеннями ВСШ.

Висновки та пропозиції

У ході проведених досліджень для оптимізації процесу сканування РЧС запропоновано здійснювати адаптацію довжини вибірки енергетичного детектора відповідно до інформації про значення ВСШ

в частотному каналі. Запропонований підхід дозволяє скоротити час аналізу смуги частот в залежності від діапазону зміни ВСШ до 90 % і перерозподіляти його між іншими каналами, що дозволить максимізувати кількість виявлених радіоелектронних засобів із використанням малогабаритних панорамних засобів РМ, розміщених на БпЛА в умовах обмежень на тривалість його польоту.

Скорочення часу на огляд смуги частот аналізу забезпечить збільшення швидкості її сканування, що приведе до зростання ймовірності виявлення короткотривалих сигналів, зокрема з псевдовипадковою перебудовою робочої частоти. Також в межах заданого бюджету часу на одне сканування смуги частот можливо здійснювати його перерозподіл без загального скорочення, що дасть змогу виявляти джерела сигналів при нижчих значеннях ВСШ, тобто більше часу виділяти на ті частотні канали, де сигнал не було виявлено.

1. Kay S. M. Fundamentals of statistical signal processing: Practical algorithm development, Vol. 3. Prentice Hall, New Jersey, 2013. 403 p.
2. Kay S. M. Fundamentals of statistical signal processing: Detection theory, Vol. 2. Prentice Hall, New Jersey, 1998. 576 p.
3. Zhang W. Handbook of Cognitive Radio. Springer, 2019. 2034 p. doi: 10.1007/978-981-10-1394-2.

Alexandr Uzlenkov, Lead. Eng. Res.
alexandr uzlenkov@gmail.com
A.Usikov Institute Radio Physics and Electronics
NAS of Ukraine

SOME FEATURES OF A RADAR DUAL POLARIZED SIGNAL WITH A LARGE BASE

Assessment of elements (three amplitudes and two relative phases) of full Polarization Matrix of Scattering (PMS) requires a complete polarization technique in a certain polarization basis (PB).

Let's consider formation and processing of a Radar signal in a circular PB. Orts of this PB (on a double complex plane) look like:

$$(\vec{e}_R, \vec{e}_L) = (e^{-ij\pi/4}, e^{ij\pi/4}).$$

In this PB a Radar signal $\vec{E}_S$ with intensity $E_0=1$, intra-impulse modulation of orientation angle θ according to the law:

$$\theta(t) = \Theta \times t^2,$$

where $\Theta, [Rad/s^2]$ – some constant, can be represented like:

$$\vec{E}_S = \begin{cases} \dot{E}_R = \vec{e}_R \{E_0 \sin(\varphi + \pi/4) \times e^{j(\omega_0 + \Theta t)t}\}, \\ \dot{E}_L = \vec{e}_L \{E_0 \cos(\varphi + \pi/4) \times e^{j(\omega_0 - \Theta t)t}\}, \end{cases} \text{ when } n \cdot T < t < nT + \tau_p; \text{ else } \vec{E}_S = 0,$$

where $n = 0 \dots N$ – impulse sequence; T – period of sequence; τ_p – pulse duration, φ – angle of ellipticity; ω_0 – HF circular frequency of Electromagnetic Field (EMF). Components of $\vec{E}$ correspond to the signals with the Linear Frequency Modulation (LFM-signals) which have equal deviations of frequency $|\Delta f| = \Theta \tau_p / \pi$ with opposite signs and obey the condition [1]:

$$\int_0^\infty \dot{E}_R(t) \times \dot{E}_L^*(t) dt = 0.$$

So, the signal $\vec{E}_S$ is the DPS with double orthogonality – spatial and in sense of Fourier. Generalized Uncertainty Functions (GUF) of LFM-signals (for $\dot{E}_R, \dot{E}_L$) are well known. Let's recall that the response of correlator (or matched filter) represents the time-reversed GUF. Then, $\dot{E}_R, \dot{E}_L$ -responses and the result of their multiplying can be described by expressions [2]:

$$\chi_R(-\tau, f) = \left| \frac{\sin[(\pi f - \Theta \tau)(\tau_p + \tau)]}{(\pi f - \Theta \tau)\tau_p} \right|, \chi_L(-\tau, f) = \left| \frac{\sin[(\pi f + \Theta \tau)(\tau_p + \tau)]}{(\pi f + \Theta \tau)\tau_p} \right|,$$

$$U_{\times}(-\tau, f) = \chi_R(-\tau, f)\chi_L(-\tau, f),$$

where f, τ – frequency and temporary displacement of OPC relative a reference signal correlator.

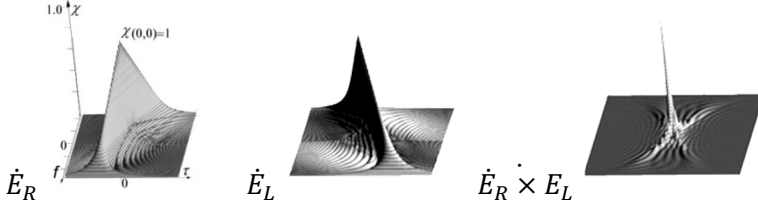


Figure 1. Surfaces of the normalized GUFs of signals $\dot{E}_R, \dot{E}_L$ and result of their multiplying $[\dot{E}_R \times \dot{E}_L]$

In a simplified form, the received radar signal $\vec{E}' = |S|\vec{E}_S$ can be represented as:

$$\vec{E}'_R = \dot{S}_{RR}\dot{E}_R + \dot{S}_{RL}\dot{E}_L;$$

$$\vec{E}'_L = \dot{S}_{LR}\dot{E}_R + \dot{S}_{LL}\dot{E}_L$$

Double orthogonality of $\vec{E}_S$ allows you to divide $\vec{E}'$ into four channels corresponding to the elements of the PMS $|S| - \dot{U}1 \sim \dot{S}_{RR}, \dot{U}2 \sim \dot{S}_{RL}, \dot{U}3 \sim \dot{S}_{LR}, \dot{U}4 \sim \dot{S}_{LL}$. Taking into account the attenuation coefficient ν in space these responses look like: $\dot{U}1 = \nu^2 |\dot{S}_{RR} \times \chi_R(-\tau, f)|$, $\dot{U}2 = \nu^2 |\dot{S}_{RL} \times \chi_L(-\tau, f)|$, etc. To eliminate the influence of the attenuation

coefficient v , signals $\dot{U}1, \dot{U}2, U3, U4$ can be normalized to $\dot{U}2$. Based on the principle of reciprocity ($\dot{S}_{RL} = \dot{S}_{LR}$) equality of modules $|\dot{U}2| = |\dot{U}3|$ and their relative phases $(\vartheta_{RR} - \vartheta_{RL}) = ((\vartheta_{RR} - \vartheta_{LR}))$ mean that $\tau, f \approx 0$ and $\chi_R, \chi_L \approx 1$. This is a criterion for matching OPC signals with the correlators of the corresponding receiving channels, which allows to achieve potential accuracy for the LFM-signals of the PMS-elements estimation [3]. This processing does not implements the potential accuracy of evaluating elements of PMS for LFM-signals and their processing. The dispersion of the PMS estimates $\sigma_{PMS} = \sigma_\tau \sigma_f$ are determined by the width of the main peak GU. LFM-signals do not have high resolution and have a serious drawback in the form of velocity error [4]. To remove this error and achieve a more stringent execution of equality $\tau, f = 0$ and, accordingly, $\chi_R, \chi_L = 1$, it is possible to apply the strobing of the PMS channels by the signal from the multiplicative channel $U_\times(-\tau, f)$. It has GUF main peak sufficiently less than for LFM-signals in both τ, f -planes. This action reduces dispersion

$$\sigma_{PMS}|_\times \approx \sigma_\tau \times \sigma_f \Big|_\times \approx \left(\frac{\sigma_\tau}{\sim 1.8} \times \frac{\sigma_f}{\sim 1.8} \right) \Big|_{LFM} \approx 0.3 \sigma_{PMS}|_{LFM}.$$

The functional diagram of the DPS receiver that provides the complete polarization detection, correlated processing and combined unification of signals of orthogonally polarized components.

This diagram includes the high-frequency channel (I) that contains a circular polarization divider 1, mixers 2, local heterodyne oscillator 3 (ω_G); intermediate frequency channel (IF) (II) that contains the selective intermediate frequency amplifier (IFA 4) for the intermediate frequency of $\omega_1 = \omega_G - (\omega_0 - \Theta)$ and the selective intermediate frequency amplifier (IFA 5) for the intermediate frequency of $\omega_1 = \omega_G - (\omega_0 + \Theta)$ (filtration of four components that are proportional to the elements of polarization

scattering matrix of an object), phase detectors 6; consistent processing channel (III), that includes correlators 7, integrators (low-frequency filter) 8, detectors 9 and reference signal sources 10; primary data processing channel (IV), that includes summers 11 and 12, threshold device 13, signal multiplication device 14, object parameters metering device 15 and normalization units (dividers) 16. This scheme is approximate, but shows the basic processing procedures

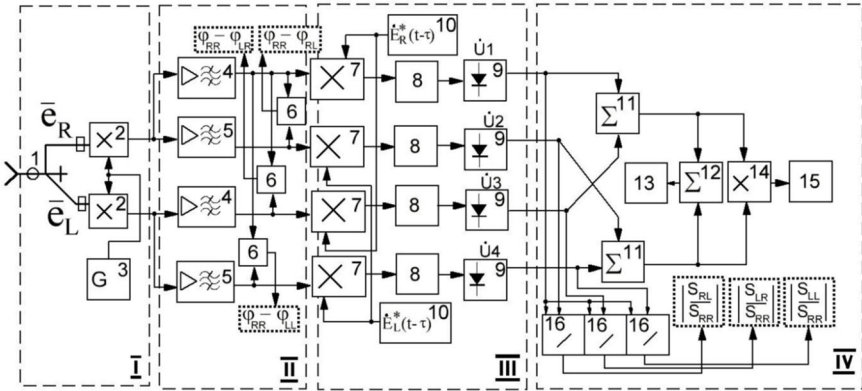


Figure 2. The functional diagram of the DPS receiver with full polarization processing

The degradation of the signal-to-noise ratio at the additive unification of OPC of polarization-diverse signals with the bases equal to 1 will be in the range of -1.5 dB to -3 dB and in case of additive-multiplicative unification it will be equal to -2.5 dB. But the degradation of signal-to-noise ratio is compensated at the signal bases of $B = 2TF \geq \pi$ in case of similar processing.

The multiplicative unification slightly reduces the probability of correct detection P (which is near 0.95...0.9) and, very importantly, significantly

reduces the probabilities of false alarms F , because they are quite low in all channels ($F \ll 1$). In addition, due to low side peaks of multiplying GUF, such signals are very useful when detecting group targets.

Further increase in accuracy of assessments of polarization parameters, distance and radial velocity of the object can be achieved by optimizing the deviation of the frequency and duration of the radar pulse that determine the mutual position of $\chi_R(-\tau, f)$ and $\chi_L(-\tau, f)$. In this case, the volume under $U_{\times}(-\tau, f)$ is minimized, which reduces σ_{PMS} .

[1] A.G. Fox, "An adjustable waveguide phase changer", *PIRE*, vol. 35, n. 12, pp.1489-1498, 1947.

[2] R. Benjamin, "Modulation, Resolution and Signal Processing" in *Radar, Sonar and Related Systems*, London: Admiralty Underwater Weapons Establishment, 1968, pp. 145-176.

[3] N. Li, "Formulas for measuring radar ECCM capability", *IEE Proceeding*, vol. 131, no.4, p.p :417-423, 1984.

[4] A.V. Oppenheim, *Applications of Digital Signal Processing*, Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Mass. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, pp 552, 1978.

Горбатий І.В., д-р. техн. наук., проф.

Усатий О.А., аспірант

Цайтлер Б.М., аспірант

Фурса Тетяна, к.т.н., доц.,

ivan.v.horbatyi@lpnu.ua

oleksandr.a.usatyi@lpnu.ua

bohdan.m.tsaitler@lpnu.ua

Національний університет «Львівська політехніка»

t.fursa@wunu.edu.ua

Західноукраїнський національний університет

СУЧАСНІ МЕТОДИ ОЦІНКИ НАПРЯМКУ ПРИХОДУ ШИРОКОСМУГОВИХ РАДІОСИГНАЛІВ

У роботі розглянуто задачу оцінки напрямку приходу сигналів (DOA — Direction of Arrival) для складних широкосмугових сигналів, таких як CSS (chirp spread spectrum — спектр, розширений чірпом) та FHSS (frequency hopping spread spectrum — спектр із перестрибуванням частот)[1],[2]. Подібні сигнали широко використовуються в безпроводних комунікаційних системах із низькою ймовірністю перехоплення та ускладнюють застосування класичних алгоритмів DOA, зокрема MUSIC (Multiple Signal Classification) та ESPRIT (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques)[3],[4], які передбачають вузькосмугову модель сигналу.

Запропоновано підхід, який полягає у попередній обробці сигналів за допомогою комплексного вейвлет-перетворення Morlet з метою виділення локальних вузькосмугових компонент. Для кожного часово-частотного вікна, де частота сигналу є квазісталою, формується матриця спостережень по антенах. На основі цих матриць виконується

оцінка коваріаційної матриці і подальше застосування алгоритму MUSIC для визначення напрямку приходу сигналу.

Для верифікації запропонованого підходу змодельовано CSS-сигнал тривалістю 1 с із лінійним розгортанням частоти від 50 до 300 Гц. Прийом здійснювався чотирма антенами з міжелементним кроком $d=\lambda/2$, де λ — довжина хвилі носія. Істинний напрямок приходу сигналу встановлено під кутом 30° . Додано адитивний білий гаусовий шум, що відповідає відношенню сигнал/шум (SNR — Signal-to-Noise Ratio) = 10 дБ. Для кожного випробування обчислювалася оцінка MUSIC у вузькому часовому фреймі тривалістю 10 мс, з подальшим обчисленням середньої абсолютної помилки оцінки кута (RMSE — Root Mean Square Error).

На рисунку 1 наведено порівняння MUSIC-спектрів для трьох підходів: без попередньої обробки, з комплексним вейвлет-перетворенням Морле та з формуванням аналітичного сигналу за допомогою Гільбертового перетворення.

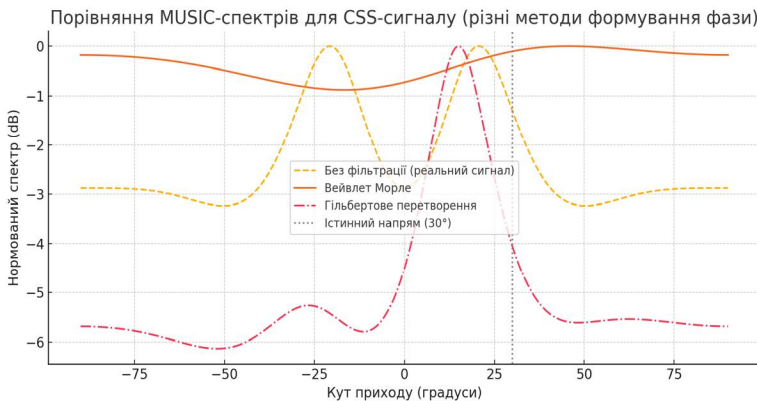


Рисунок 1. Порівняння MUSIC-спектрів для CSS-сигналу (без фільтрації, з вейвлетом Морле, з Hilbert-перетворенням). Істинний кут — 30° .

Метод	Середня помилка DOA (градуси)	Умови моделювання
MUSIC	55.5	CSS, SNR=10 дБ, без фільтрації
Wavelet + MUSIC	30.6	CSS, SNR=10 дБ, Morlet, масштаб 30
Hilbert + MUSIC	15.1	CSS, SNR=10 дБ, аналітичний сигнал (Hilbert Transform)

Запропонований підхід може бути застосований у системах радіомоніторингу та електронної розвідки для покращення локалізації джерел сигналів із розширеним спектром.

Хоча алгоритми MUSIC та ESPRIT передбачають вузькосмугову модель сигналу, застосування комплексного вейвлет-перетворення надає можливість локалізувати широкосмуговий сигнал у часово-частотних вікнах із майже сталою частотою. Це створює умови, за яких класичні методи DOA можуть бути коректно застосовані до кожного фрагменту, а результати об'єднані.

Новизна полягає у використанні комплексного вейвлет-перетворення як етапу попередньої обробки перед побудовою коваріаційної матриці для DOA-оцінювання широкосмугових сигналів. Такий підхід дає змогу використовувати MUSIC для CSS/FHSS-сигналів без переходу до широкосмугових моделей чи спеціалізованих антен.

Метод залежить від вибору масштабу вейвлету, стабільності синхронізації та якості локального SNR. У подальших дослідженнях планується реалізувати автоматичний вибір масштабу за критерієм спектральної концентрації.

Альтернативним підходом до отримання фазової інформації є використання Гільбертового перетворення для формування аналітичного сигналу. На відміну від вейвлетів, які локалізують сигнал у часово-частотній області, Гільбертове перетворення забезпечує повне комплексне представлення сигналу в часі без втрати енергетичної компоненти. Проведене моделювання показало, що метод MUSIC у поєднанні з Гільбертовим-аналітичним сигналом дає середню помилку визначення DOA близько 15.1° , що є кращим за вейвлет-фільтрацію в умовах стабільної частотної структури, як у CSS. Водночас для сигналів із розривною або стрибкоподібною структурою спектра (наприклад, FHSS), вейвлет-перетворення залишається ефективнішим, оскільки ізолює вузькосмугові ділянки сигналу в часі.

Окрім цього, метод є перспективним для пасивних систем локації, SDR-комплексів (Software Defined Radio — програмно-визначуваного радіо), безпілотних платформ і IoT-систем (Internet of Things — інтернету речей), що використовують LPI/LPD-технології (Low Probability of Intercept / Low Probability of Detection — технології з низькою ймовірністю виявлення/перехоплення). Подальші дослідження зосереджено на порівнянні із wideband MUSIC (широкосмуговою модифікацією MUSIC), алгоритмами на основі розрідженого представлення та інтеграції методів глибокого навчання.

1. Azim, A.W., Shubair, R., & Chafii, M. (2024). Chirp spread spectrum-based waveform design and detection mechanisms for LPWAN-based IoT: a survey. *IEEE Access*, vol. 12, pp. 24949–24968. doi: 10.1109/ACCESS.2024.3352591

2. Ristić, V.B., Todorović, B.M., & Stojanović, N.M. (2022). Frequency Hopping spread spectrum: history, principles and applications. *Military Technical Courier*, vol. 70(4), pp. 856–876. doi: 10.5937/vojtehg70-383425.

3. Huang M., Li R., Zou Y. et al. A comprehensive review of metasurface-assisted direction-of-arrival estimation. *Nanophotonics*, (2024), vol. 13, iss. 24, pp. 4381–4396. Doi: 10.1515/nanoph-2024-0423

4. Shmuel D. H., Merkofer J. P., Revach G., van Sloun R. J. G., Shlezinger N. Deep Root-MUSIC: Towards Data-Driven Root-MUSIC DoA Estimation. In: *Proc. IEEE ICASSP* (2023), pp. 1–5. doi: 10.1109/ICASSP49357.2023.10096504

Lev Tarasenko, PhD Student
Roman Holyaka, Dr. Tech. Sc., Professor
lev.o.tarasenko@lpnu.ua
Lviv Polytechnic National University

SWITCHING RIPPLE DATA TRANSFER TECHNOLOGY

Introduction. The ripple parameter in a DC-DC converter refers to the amount of voltage fluctuation present in the output voltage. It represents the deviation or variation of the output voltage from its average or nominal value. Almost impossible to avoid this parameter in today's DC-DC and AC-DC converters due to the cost and efficiency requirements. Other way it is possible to use ripple for data transfer between source and load devices. This method can be applied to any industry, where currently each block has both – power and data transfer wires. Switching ripple communications can be used to deal with challenges for various industry as: healthcare, automotive, military, automation, battery management[1], and IoT. Wiring complexity of modern devices, it's not uncommon for there to be thousands of individual wires running throughout modern devices, connecting various components and systems. However, the exact number of wires can vary greatly depending on the specific device and its configuration. SRC technology is proposed to reduce wiring complexity and reduce the product cost.

Model and theory of operation. SRC system[2] can be described in several sequential blocks that take part in overall signal operations. The signal chain starts from the ASK signal source.

DC-DC regulator margining involves fine-tuning the output voltage of a DC-DC voltage regulator to meet specific requirements across different operating conditions. By adjusting the regulator's output voltage within a

defined margin, engineers can simulate various scenarios and assess the system's ability to handle changes in supply voltage, load conditions, and environmental factors. Figure 2 demonstrates an SRC host model, where “V6” is ASK signal source, connected to the feedback loop through “R4”.

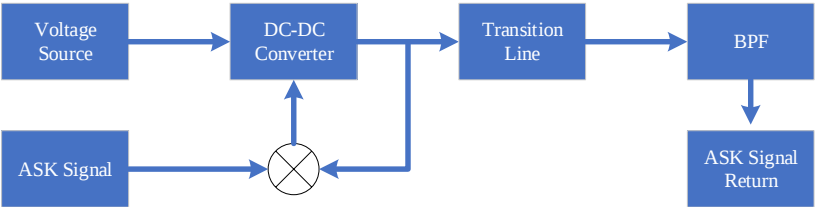


Figure 1. General system block diagram

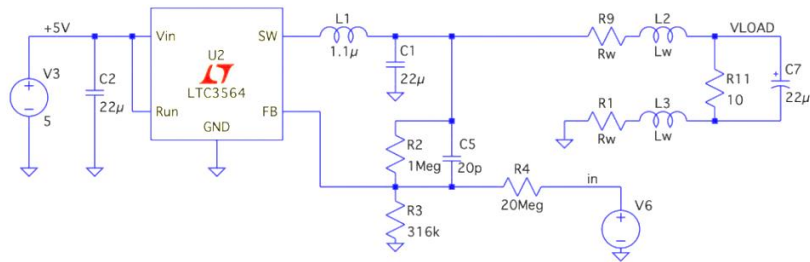


Figure 2. SRC schematic approach

SRC transmitter is based on LTC3564, a monolithic synchronous buck regulator with a constant 2.25Mhz switching frequency. Buck regulator is designed in the current mode architecture. Current rating of LTC3564 is up to 1.25A with efficiency up to 96%. LTC3564 has a high switching frequency and fast transient load response, what makes it a perfect DC-DC converter for feedback modulation applications.

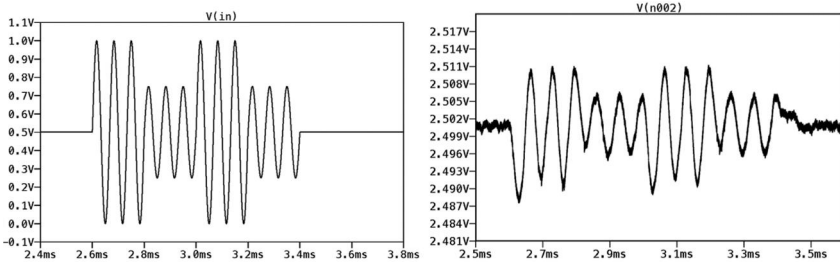


Figure 3. Simulated ASK waveform and DCDC output waveform

A wire transmission line, also known as a transmission line, is a specialized cable or other structure designed to carry alternating current (AC) of radio frequency (RF) or, in some cases, direct current (DC) from one point to another. Figure 4 demonstrates a transition line model with parasitic elements. R11 represents a DCDC load and C7 is a value of line device input capacitance.

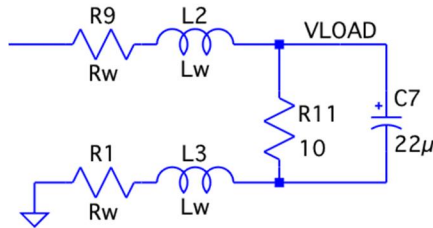


Figure 4. Transition line approach

Inductance is the property of a conductor by which a change in current through it induces an electromotive force (EMF). It arises from the magnetic field generated by the alternating current flowing through the conductors. Inductance can cause signal distortion and phase shift, particularly at higher frequencies.

A band-pass filter is an electronic circuit that allows signals within a specific frequency range to pass through while attenuating signals outside that range. This type of filter is essential in various applications, such as audio processing, radio communications, and signal processing, to isolate a particular band of frequencies.

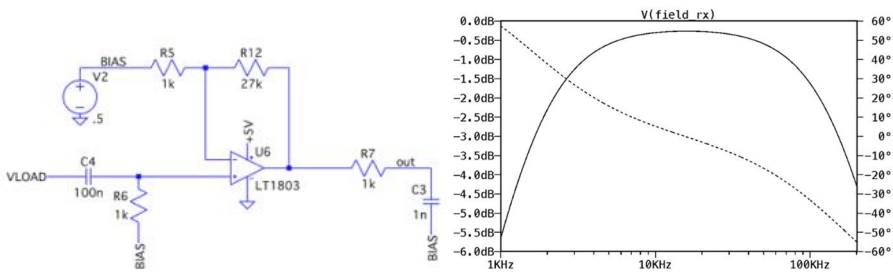


Figure 5. BPF model, phase and frequency response

Conclusion. This research proposed DC power line communication system approach using a high frequency buck converter with modulated feedback loop. Each signal transfer stage has a visible simulation result.

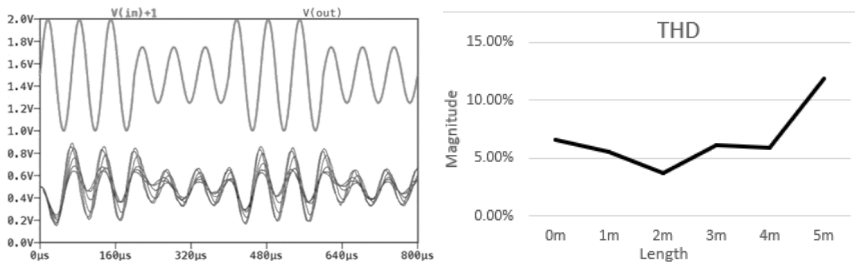


Figure 6. Simulation results, relation between SRC line length and THD

Simulation results shows that THD increases with a wire length. Optimal length for $THD < 6\%$ is above 4 meter for AWG 16 cable. Low THD swing on even 5-meter distance makes this system considerable for industries listed in introduction block. The probability and relatability of signal transmission remains stable.

[1]V. Voloskyi, Y. Leshchyshyn, N. Romanyshyn, A. Palamar, and L. Tarasenko, "Method and algorithm for efficient cell balancing in the lithium-ion battery control system," presented at the The 1st International Workshop on Bioinformatics and Applied Information Technologies 2024, Zboriv, Ukraine, 2024. [Online]. Available: <https://ceur-ws.org/Vol-3842/>.

[2] L. Tarasenko and V. Voloskyi, "SWITCHING RIPPLE DATA TRANSFER TECHNIQUE USING STEP-DOWN DC-DC CONVERTER," *Information and communication technologies, electronic engineering*, vol. 4, pp. 121-129, 2024, doi: 10.23939/ict2024.02.

Сиса В.О., аспірант
Яковенко Є.І., канд. техн. наук, доц.
vladyslav.o.sysa@lpnu.ua
yevheniia.i.yakovenko@lpnu.ua
Національний університет «Львівська політехніка»

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ МАШИННОГО НАВЧАННЯ «ВИПАДКОВИЙ ЛІС» ДЛЯ ПЕРЕВІРКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ ЯКОСТІ ВОДИ

Анотація. Вода є важливим ресурсом для людської життєдіяльності. З кожним роком ми спостерігаємо поступове зменшення її кількості та погіршення її якості. В умовах розвитку штучного інтелекту та широкого застосування пристроїв Інтернету речей, доцільними є дослідження можливості застосування нейронних мереж для аналізу якості води. Станом на 2025 рік існує багато наукових праць, в яких досліджують використання штучного інтелекту у сфері водних ресурсів. Одним з найперспективніших методів машинного навчання називають метод випадкових лісів, що підтверджено реальними експериментами. В даній роботі перевірено, як навчається модель на безкоштовній базі даних з параметрами якості води та як вона аналізує реальні аналізи води, зроблені у Львові та Львівській області.

Результати. Дослідження проводилося на платформі GoogleColab. Використовуючи мову програмування Python було написано програму для навчання нейронної моделі методом випадкових лісів. Головним елементом цього дослідження є база даних. Дослідивши ресурси, на яких розміщені бази даних та напрацювання у використанні нейронних мереж для оцінки якості води, було знайдено базу з

набором даних на понад 3000 зразків води [2]. В цій базі описані такі параметри води: рН, жорсткість, мінералізація, хлориди, сульфати, провідність, вміст органічного вуглецю, тригалометани, каламутність та інформація про придатність для пиття.

Відповідно, реалізована модель навчалася на цій базі. Для оцінки її якості використано функцію Classification Report з бібліотеки scikit-learn, результати оцінки показані на рисунку 1.

Classification Report:

	Точність	Повнота	F1-метрики	Кількість
Непридатна	0.71	0.86	0.78	261
Придатна	0.66	0.45	0.53	163
Точність			0.70	424
Середнє (макро)	0.69	0.65	0.66	424
Середнє (зважене)	0.69	0.70	0.69	424

Рисунок 1. Зображення результатів перевірки якості оцінки параметрів навченою моделлю

Як видно з рис.1 загальна точність моделі становить 70%. Цей показник не є задовільним, оскільки багато передбачень нейронної мережі є хибними. Для підтвердження цього було виведено матрицю неточності, на якій видно, що модель визнала 90 зразків придатної води як непридатну, та 73 зразків непридатної як придатну.

Для перевірки цієї моделі було зроблено оцінку бази даних реальних аналізів води, зроблених у Львові та Львівській області. Для цього було сформовано файл real_water_data в якому описані параметри рН, жорсткість, мінералізація, сульфати та хлориди з 11 джерел забору води. В результаті модель визначила їх як придатні, що є правильним.

Для того, щоб перевірити, чи нейронна мережа визначає непридатні зразки, було значно завищено показник мінералізації, який згідно ДСанПіН "Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною" (ДСанПіН 2.2.4-171-10) має бути не більше 1000 мг/дм³. Відповідно в трьох різних зразках було встановлено цей параметр на рівні від 1500 до 3000 мг/дм³ та збережено у файл real_water_data1.

Отримані дані було перевірено нейронною мережею, яка видала інформацію, що всі зразки придатні. Результати оцінки обох випадків показані на рис. 2. Отримання такого результату може бути обумовлене недостатньою точністю навченої мережі, нетиповим збільшенням параметру (значно перевищує значення що вказані в базі даних для навчання), використанням малої кількості параметрів для оцінки та недосконалістю реалізованої моделі.

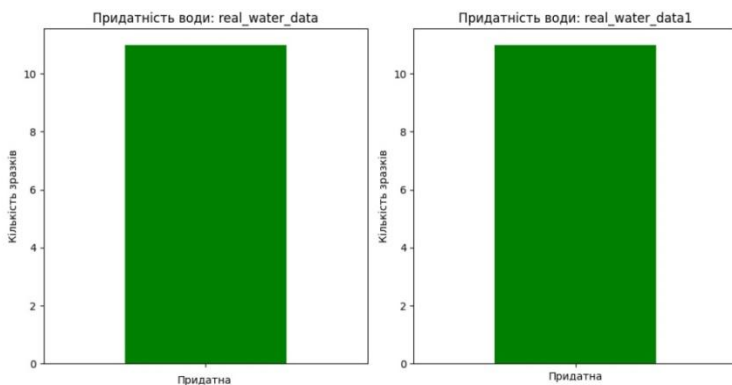


Рисунок 2. Результати оцінки реальних аналізів води на придатність

Висновки. Проведений експеримент продемонстрував, наскільки важливо правильно обирати бази даних для навчання моделі, оскільки це безпосередньо впливає на якість її результатів.

Отримані результати свідчать про низьку якість моделі, особливо для використання оцінки реальних аналізів води. Причиною цього може бути нерівномірний розподіл придатних та непридатних зразків у тренувальному наборі даних. В обраній базі було більше непридатних зразків, в результаті помітний ухил в точності до визначення непридатної води. Отже, нерівномірність вибірки даних є одним з ключових факторів похибок моделей.

Другий фактор, що вплинув на результати – обрані параметри для оцінки якості води реальних аналізів мають значно меншу кількість, ніж в навчальній базі. Крім того, модель базується лише на наявних ознаках без жорсткої перевірки правил (граничних норм). Через це випадки з критично високою мінералізацією були віднесені до придатних через відсутність відповідного навчального прикладу.

Отже, отримані результати дозволяють зрозуміти підходи до вибору навчальних баз даних та параметрів для цих навчань. Оскільки, в сучасних наукових працях є підтвердження ефективності та точності машинного навчання методом випадкових лісів, варто удосконалити програму навчання цієї моделі та прописати чіткі правила, які відповідають нормам з ДСанПіН 2.2.4-171-10.

[1] Aparna Ponnuru, J. V. Madhuri, Dr. S. Saravanan, T. Vijayakumar, Dr. V. Manimegalai and Dr. Abhijeet Das, Data-Driven Approaches to Water Quality Monitoring: Leveraging AI, Machine Learning, and Management Strategies for Environmental Protection. Journal of Neonatal Surgery, 14 (5s), 664-675, 2025

[2] Elias Salloun, Water_potability. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/eliassalloun/water-potability>

[3] Leonard Püttmann, "Water quality dataset – what makes clean water?" URL: <https://deepnote.com/app/leonard-puttmann-a8ef/Water-quality-dataset-14a5f99f-9b81-49c9-9327-973b1c9f0b1f>

[4] Norashikin Nasaruddin, Nurulkamal Masseran, Wan Mohd Razi Idris and Ahmad Zia Ul-Saufie, A SMOTE PCA HDBSCAN approach for enhancing water quality classification in imbalanced datasets, April 2025, doi:10.1038/s41598-025-97248-0

[5] Xiaohui Yan, Tianqi Zhang, Wenying Du, Qingjia Meng, Xinghan Xu and Xiang Zhao, A Comprehensive Review of Machine Learning for Water Quality Prediction over the Past Five Years, 13 January 2024, doi:10.3390/jmse12010159

Машковський Р.А., аспірант
Козлов В.В., канд. техн. наук, доц.
ra.mashkovskyi@gmail.com
vvkozlov@zp.edu.ua
НУ «Запорізька політехніка»

АНАЛІЗ СХЕМОТЕХНІЧНИХ КОМПОНЕНТІВ ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕЛЕКТРОННИХ КОНТРОЛЕРІВ ШВИДКОСТІ (ESC) БЕЗКОЛЕКТОРНИХ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ (BLDC)

У сучасних технологіях безколекторні двигуни постійного струму (BLDC) набули широкого застосування завдяки їх високій ефективності, надійності та низьким вимогам до обслуговування. Вони використовуються у дронах, електромобілях, робототехніці та промисловій автоматизації. Однак, для реалізації функцій BLDC потрібне використання спеціалізованих електронних контролерів швидкості (ESC), які виконують управління швидкістю, напрямком обертання та крутним моментом двигуна.

Метою є аналіз технічних рішень для створення ESC, визначення основних компонентів, які впливають на їх ефективність, та акцент на стандартизації підходів до їх проектування для найрізноманітніших сфер застосування.

Основна увага приділена компонентам ESC, їх взаємозв'язку та практичному застосуванню в реальних умовах. Для полегшення аналізу представлено таблиці порівняння компонентів і наведено структурну схему ESC.

ESC складається із наступних ключових компонентів:

- Секція живлення (фільтруючі конденсатори, стабілізатори напруги).
- Блок мікроконтролера (MCU)
- Драйвери ключів
- Пільові транзистори (пільові транзистори, такі як MOSFET, IGBT, GaN та SiC).
- Вихідна секція
- Інтерфейси зв'язку для взаємодії з зовнішніми системами (PWM, UART, CAN).

Рисунок 1 представляє типову структурну схему ESC, що демонструє взаємодію між компонентами.

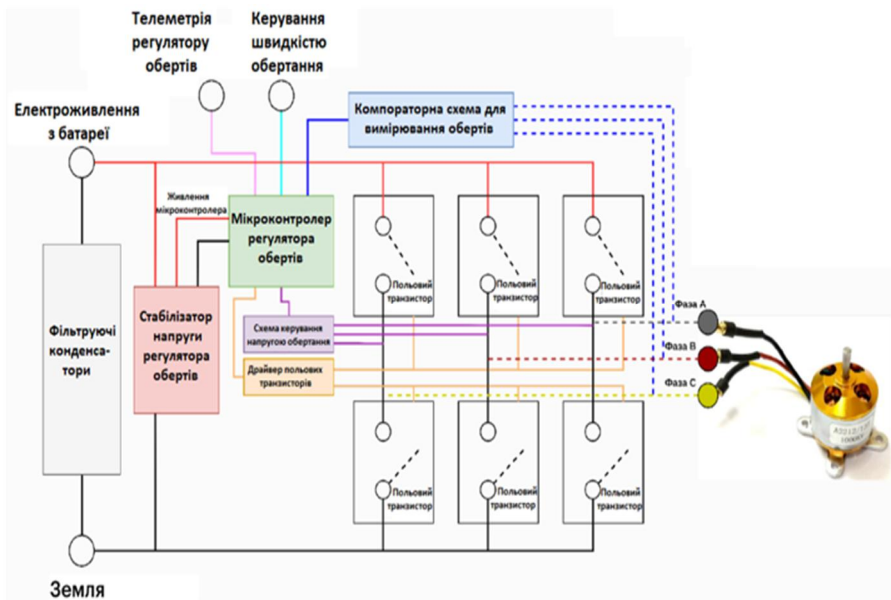


Рисунок 1. Типова структурна схема ESC.

Проведено аналіз ключових компонентів ESC, враховуючи їх важливість для забезпечення ефективності та надійності систем керування BLDC двигунами.

На прикладі силових транзисторів їхні характеристики, переваги, недоліки та області застосування викладено у табл. 1. Такий підхід дозволяє швидко оцінити, який тип транзистора найкраще підходить для конкретного завдання, враховуючи вимоги до ефективності, напруги, струму та умов експлуатації.

Таблиця 1. Порівняння основних типів транзисторів

Тип	Переваги	Недоліки	Застосування
MOSFET	Висока ефективність, простий контроль	Обмежена стійкість до перенапруги	Дрони, системи середньої напруги
IGBT	Робота при високих напругах	Більш повільне перемикання	Електромобілі, промислові установки
GaN	Висока швидкість перемикання	Висока вартість	Системи з високою продуктивністю
SiC	Висока температурна стійкість	Складність конструкції	Промислові системи та екстремальні умови

Особливу увагу було приділено блоку мікроконтролера (MCU), який виконує функції "мозку" ESC, обробляючи вхідні сигнали, оптимізуючи алгоритми керування двигуном (FOC або PWM), і забезпечуючи підтримку різних протоколів зв'язку (PWM, UART, CAN).

У сучасних ESC важливу роль відіграє вибір прошивки як ключового фактору в проектуванні та сумісності. Саме тип прошивки (BLHeli, SimonK, AM32 та інші), а також його можливості керування двигунами визначають, який саме MCU буде інтегровано всередині ESC. В табл. 2 наведено відповідність прошивок та типів MCU.

Таблиця 2. Зв'язок між прошивками та MCU в ESC

Прошивка	Типові MCU
BLHeli	ATMEL
SimonK	ATMEL
BLHeli_S	SILABS BusyBee BB1 & BB2
BLHeli_32	ARM STM32 F0, F3, L4
AM32	ARM STM32 F0, F3, L4
BlueJay	SILABS BusyBee
KISS	ARM STM32 F0

Тип MCU у ESC зазвичай залежить від призначення пристрою. Наприклад, гоночні дрони потребують високопродуктивних STM32 MCU серій F3 або F4, які забезпечують швидкість протоколів і низьку затримку, необхідну для точного управління. У той час як недорогі ESC можуть використовувати 8-бітні ATmega MCU, промислові або відкриті системи, такі як AM32, часто вимагають потужних ARM Cortex-M MCU. В табл. 3 наведено типи MCU в ESC в залежності від призначення.

Таблиця 3. Типові MCU в ESC в залежності від призначення

Тип ESC	Типовий MCU	Причини вибору MCU	Призначення ESC
ESC для гоночних дронів	STM32F3/F4	Висока швидкість протоколів DShot1200, низька затримка	FPV дрони для перегонів або фристайлу
ESC початкового рівня	ATmega 8-біт	Економічність, просте керування двигунами	Недорогі споживчі дрони

ESC для промислових дронів	Infineon XMC1000 серії	Інтегроване керування моторами, стійкість до високих напруг	Великі промислові BLDC двигуни
ESC на базі AM32	STM32F0/F3 ARM Cortex-M	Висока точність обчислень, відкрите програмне забезпечення	Високопродуктивні ESC із відкритим кодом

ESC є невід'ємною частиною сучасних систем управління BLDC. Незважаючи на різноманітність застосувань – від компактних дронів і радіокерованих моделей до промислових установок та електро-транспорту – основна структурна схема ESC зберігається незмінною незалежно від виробника чи сфери використання. Така уніфікація тісно пов'язана з використанням однакових компонентів, функцій, і принципів роботи, які становлять фундамент для керування BLDC двигунами.

[1] The MathWorks, Inc. Introduction to Brushless DC Motor Control [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.mathworks.com/campaigns/offers/next/introduction-to-brushless-dc-motor-control.html> (дата звернення: 08.05.2025)

[2] Машковський Р.А. Порівняльний аналіз прошивок ESC регуляторів для безколекторних двигунів постійного струму у мультикоптерах [Електронний ресурс] / Р.А. Машковський, В.В. Козлов // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: XII Міжнародна науково-практична конференція, 10-12 грудня 2024 р.: тези доп. /

Редкол.: Д.М. Піза, О.Ю. Малий Електрон. дані. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2024. – С. 123 – 127. – 1 електрон. опт. диск (DVD-ROM). – назва з тит. екрана.

[3] Малий О.Ю. Методика передпроектного вибору компонентів FPV квадрокоптерного типу за заданими значеннями тяги, швидкості та часу польоту / Малий О.Ю., Поспєєва, Фурманова Н.І., Онищенко В.Ф., Залужний М.Ю., Іванов В.В. // Електротехніка та електроенергетика. – 2024. – №1. – С. 35–49. DOI:doi.org/10.15588/1607-6761-2024-1-4.

Піроженко О.О.
Малий О.Ю., канд. техн. наук., доц.
Онищенко В.Ф., канд. фіз.-мат. наук
pirozhenko.aa11@gmail.com
docsasha2@gmail.com
vfonish@zp.edu.ua
НУ «Запорізька політехніка»

РОЗРОБКА СТРУКТУРИ ТА АЛГОРИТМІВ РОБОТИ FMCW- РАДАРНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ МАЛОГАБАРИТНИХ БПЛА НА БАЗІ SDR

Стрімкий розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА) цивільного та військового призначення стимулює пошук нових рішень для їхнього виявлення та контролю. У зв'язку з цим зростає актуальність створення недорогих, портативних радарних систем, здатних точно визначати положення та швидкість малорозмірних повітряних об'єктів. Сучасні технології дозволяють поєднувати програмно-визначені радіо пристрої (SDR) з потужними методами та алгоритмами обробки сигналів, що відкриває нові можливості для створення та налаштування адаптивних радарів під конкретні задачі.

Мета роботи полягає у конструюванні та аналізі функціонування прототипу радарної системи типу FMCW (Frequency-Modulated Continuous Wave) для виявлення малих повітряних цілей, зокрема дронів. Особливостями системи є використання недорогих компонентів, мобільність та можливість самостійного відтворення.

Основу радарної технології становить здатність визначати просторові параметри об'єктів шляхом аналізу електромагнітних хвиль, відбитих від цілі. Радари можна класифікувати на імпульсні або

безперервні (CW). Імпульсні радары забезпечують точне визначення дальності завдяки високій часовій роздільності, однак вимагають складної електроніки для генерації високопотужних, коротких імпульсів та мають обмеження в енергетичній ефективності. CW-радары постійно випромінюють сигнал і вловлюють зміни частоти в результаті ефекту Доплера. Це дає змогу з високою точністю визначати швидкість об'єкта, однак не дозволяє безпосередньо виміряти відстань. Для подолання цього обмеження застосовують частотно-модульовану безперервну хвилю (FMCW), у якій частота переданого сигналу лінійно змінюється з часом. Унаслідок порівняння переданого й прийнятого сигналу формується так звана частота биття, що прямо пропорційна затримці та відстані до об'єкта.

Головною перевагою FMCW-радарів є баланс між роздільною здатністю, енергетичною ефективністю та апаратною простотою, що робить їх ідеальними для задач малої дальності, таких як виявлення дронів у складних середовищах.

Запропонована структурна схема радарної системи на базі SDR (рис 1.) передбачає вибір відповідної апаратної бази, налаштування генерації та прийому сигналів, а також організацію цифрової обробки даних. Основу проєкту становить використання SDR-платформи HackRF у поєднанні з генератором ADF4159, що дозволяє формувати частотно-модульовані сигнали або чирпи (CHIRP – Compressed High-Intensity Radiated Pulse) із заданими характеристиками.

Для передавання сигналу використовується окрема антена, передавальний тракт побудований з використанням підсилювача ADL8107 та мікшери LTC5548, а прийом здійснюється іншим каналом. Обидва сигнали – переданий та відбитий – подаються на мікшери, які використовують спільне локальне опорне джерело, що дає змогу отримати частоту биття з мінімальним фазовим дрейфом. Цей підхід

дає змогу проводити обробку сигналу на низькій проміжній частоті та зменшити вимоги до швидкодії АЦП. Частоту биття можна розрахувати за формулою:

$$f_r = f_t \frac{2v_{target}}{c},$$

де f_r – частота отримана при відбиванні, f_t – частота передачі, v_{target} – швидкість об'єкту, c – постійна швидкості світла.

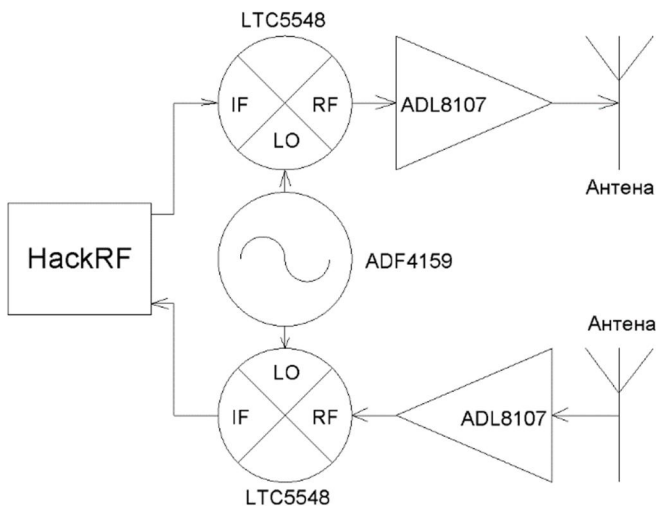


Рисунок 1. Схема радарної системи

Ключовими параметрами FMCW-системи є:

- частота повторення чирпу, від якої залежить оновлення інформації про об'єкти;
- ширина смуги модуляції, що визначає роздільну здатність за дальністю;
- тривалість чирпу, яка впливає на здатність відстежувати швидкість.

Важливою складовою є синхронізація початку чирпу з моментом захоплення буфера прийому. Для цього використовується керований імпульс на піні TxData генератора ADF4159, який сигналізує початок модуляції. Сигнал синхронізації зчитується HackRF, що дозволяє точно виділити лінійну частину чирпу та уникнути спотворень, спричинених нелінійністю фазового автопідлаштування.

Обробка сигналів виконується програмно на мові Python. На етапі аналізу радіолокаційних сигналів ключовою метою є виділення інформативних характеристик, зокрема дальності та швидкості об'єктів. Для цього використовується спектральна обробка сигналу, отриманого з приймального каналу після міксування. Використання перетворення Фур'є (FFT) для одного чирпу дозволяє отримати розподіл енергії сигналу за дальністю, але не надає інформації про динаміку цілей. Для визначення швидкості об'єктів використовується послідовність спектрів чирпів у вигляді матриці. До цієї матриці застосовується двовимірне перетворення Фур'є (2D FFT), яке дає змогу побудувати карту «дальність-швидкість» — класичну доплерівську діаграму.

З метою усунення сигналів від нерухомих об'єктів застосовується обробка MTI (Moving Target Indication), яка ґрунтується на відніманні послідовних чирпів. Якщо об'єкт нерухомий, його сигнали будуть майже однаковими, і їх різниця прямує до нуля. Для рухомих цілей, які мають доплерівський зсув, віднімання залишає значущий залишковий сигнал. За допомогою MTI можна виділяти значущі рухомі об'єкти та підвищувати контрастність відображень.

Для виявлення реальних об'єктів серед шуму використовується алгоритм CFAR (Constant False Alarm Rate). Він оцінює локальний шумовий фон у межах околу навколо кожної клітинки спектру та визначає адаптивний поріг для фіксації цілей. Це дозволяє уникати

хибних спрацювань при змінних рівнях шуму, особливо актуальних у динамічному середовищі.

Запропонована система FMCW-радару на базі HackRF дозволяє виявляти малогабаритні БПЛА, має низьку вартість виробництва та високу портативність через зменшення кількості фізичних елементів за рахунок програмної реалізації обробки сигналів.

[1] Малий О.Ю. Відносна оцінка позиції і маршруту пересування роботів за допомогою одометрії. / Малий О.Ю., О.О. Піроженко // Тиждень науки-2020. Факультет радіоелектроніки та телекомунікацій. Тези доповідей науково-практичної конференції, Запоріжжя, 13–17 квітня 2020 р. [Електронний ресурс] / Редкол.: В.В. Наумик (відпов. ред.) Електрон. дані. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. – с. 68–71.

Щукін О.В., аспірант
Фурманова Н.І., канд. техн. наук, доц.
Залужний М.Ю., ст. викладач
oleksandrshchukin97@gmail.com
nfurmanova@gmail.com
myz.nuzp@gmail.com
НУ «Запорізька політехніка»

МЕТОДИКА РЕАЛІЗАЦІЇ ТРАНСИВЕРА LORA У СЕРЕДОВИЩІ GNU RADIO ЗА ДОПОМОГОЮ SDR- ПРИСТРОЮ HASKRF

Для передавання інформації за допомогою електромагнітних коливань у системах з великою дальністю дії та низькою швидкістю передачі застосовується модуляція з розширенням спектра, зокрема LoRa (Long Range). На вхід модулятора надходить цифровий сигнал, текстове повідомлення — яке кодується у форму, придатну для передачі радіоканалом у вигляді послідовності LoRa-символів.

Передавач є структурним елементом передавального пристрою на базі технології SDR (Software Defined Radio). Як приклад такого пристрою розглянемо LoRa-передавач, реалізований у середовищі GNU Radio за допомогою бібліотеки Librelora. Передавач, побудований у вигляді ієрархічного блоку, дозволяє здійснювати передачу текстових повідомлень у радіоефір за допомогою CSS-модуляції з параметрами LoRa. Представлення такої схеми передавання наведено на рисунку 1.

У даній схемі реалізовано передавання повідомлення з довжиною 10 байтів. Повідомлення формується у вхідному блоці, де воно подається до ланцюга обробки. Спочатку дані проходять через блоки Bytes to Nibbles і Randomize, що формують байтову структуру повідомлення, додаючи до неї рандомізовану послідовність та контрольну суму CRC (16 біт).

Після цього застосовується модуляція: блоки Encode, Interleave та Symbol Mod здійснюють перетворення даних у символи, що відповідають конкретним параметрам LoRa (наприклад, Spreading Factor = 8, Bandwidth = 125 кГц, Code Rate = 1). Ці символи перетворюються у чірп-сигнали блоком Frequency Mod. Для забезпечення синхронізації повідомлення доповнюється преамбулою та двома синхрословами, які додаються блоком Append Prefix.

Наступним кроком є формування остаточного пакета з фіксованою тривалістю, до якого додається затримка через блок Append Silence. Після цього сигнал передається до вихідного блоку Pad Sink, а далі — на SDR-пристрій HackRF.

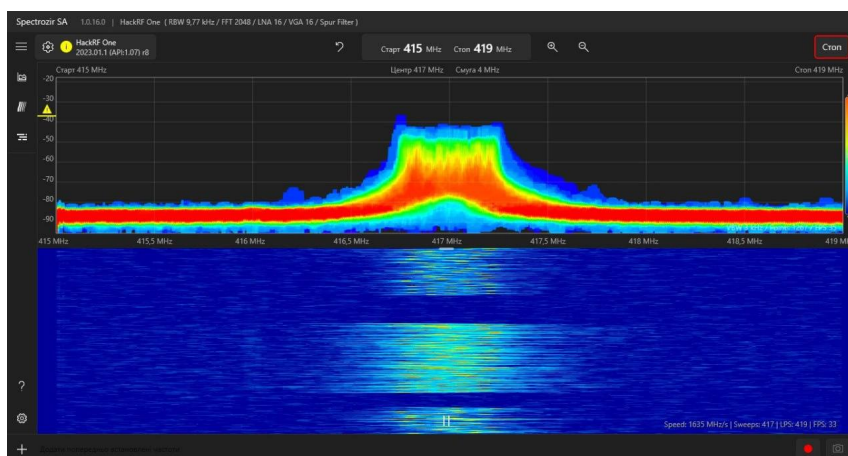


Рисунок 2. Спектр сигналу у діапазоні 415–419 МГц

Для перевірки працездатності створеної схеми передавача було проведено тестування за допомогою програми Spectroizr SA у поєднанні з SDR-пристроєм HackRF One. У ході експерименту вдалося зафіксувати переданий сигнал у частотному діапазоні 415–419

МГц, що наведено на рисунку 2. У спектрограмі видно характерний спектр сигналу, що відповідає модуляції з розширенням спектра (CSS), яка використовується у технології LoRa

Завдяки використанню GNU Radio, схема передавача є повністю програмованою, що дозволяє швидко змінювати тип модуляції, структуру кадру, або сам формат переданих даних — без необхідності втручання у апаратну частину. Це надає широкі можливості для тестування систем зв'язку.

Таким чином, реалізація LoRa-передавача в середовищі GNU Radio із застосуванням HackRF та бібліотеки Librelora демонструє надзвичайно ефективний і сучасний підхід до створення бездротових комунікаційних систем на базі технології SDR. Використання цієї технології відкриває нові можливості для розробки систем зв'язку, оскільки вона дозволяє значно спростити процес налаштування і оптимізації бездротових мереж.

Вичужаніна С.А., аспірант
Мороз Г.В., старший викладач
Онищенко В.Ф., канд. фіз.-мат. наук, доц.
snezhnavych@gmail.com
garrymrz206@gmail.com
vfonish@zntu.edu.ua
НУ «Запорізька політехніка»

МЕТОДИКА РЕАЛІЗАЦІЇ ДЕТЕКТОРА СИГНАЛІВ LORA НА БАЗІ SDR

Для виявлення електромагнітних коливань з метою виділення закладеної в них інформації використовують детектори. На вхід детектора надходить високочастотний сигнал, на виході детектора отримуємо низькочастотний модулюючий сигнал, який і несе в собі інформацію.

Детектор є структурним елементом приймального пристрою. В роботі було реалізовано детектор сигналів LoRa на базі програмно-керованого радіо (SDR) HackRF One та використано програмний інструментарій GNU Radio. Представлення приймача із детектором у програмі GNU Radio можна побачити на рисунку 1.

Це чіп-детектор, здатний оброблювати інформацію, що передається, визначати коефіцієнт розповсюдження та канал, що був використаний для передавання, а також аналізувати трафік у мережі на основі отриманої статистики.

Визначення миттєвої частоти отриманого сигналу математично можна описати формулою:

$$J(\omega_k) = E[\sum_{i \in -N}^N |x_{i+k} - \cos(\pi \beta i^2) e^{j\omega_k i}|^2], \quad (1)$$

де x_i – отриманий сигнал.

Такий детектор демодулює сигнал, що переданий із розширення спектру методом лінійної частотної модуляції – chirp spread spectrum. Цей метод використовується у технології LoRa (Long Range) для підвищення ефективності передавання інформації у бездротових мережах на великі відстані із низьким енергоспоживанням через канал із суттєвими лінійними спотвореннями.

LoRa-сигнали застосовують зокрема у системах керування безпілотними літальними апаратами (або БПЛА). Наприклад таких як ELRS (ExpressLRS або Express Long Range System) та різних варіаціях TBS – Crossfire, Tracer, Mambo тощо.

Як відомо БПЛА можуть використовуватися для розвідки, незаконного проникнення в контрольовані зони, транспортування заборонених предметів та навіть для атак на критично важливі об'єкти, створюючи нові виклики у сфері безпеки. Тому виникає потреба у розробці ефективних технологій автоматичного виявлення, супроводження та ідентифікації таких об'єктів у реальному часі.

SDR-приймач із чірп-детектором може стати основою для створення комплексної системи розпізнавання, супроводження та керування наведенням на БПЛА. Завдяки обраній технології LoRa така система забезпечуватиме надійне виявлення та відстеження безпілотників у визначеному просторі навіть за умов часткового перекриття спостереження або складних умов навколишнього середовища. До того ж SDR-пристрої дозволяють встановлювати або динамічно змінювати робочі параметри – діапазон частот, тип модуляції тощо – за допомогою програмного забезпечення, що значно розширює можливості щодо розпізнавання та аналізу сигналів навіть за умови стрімких змін та розвитку технологій, що застосовуються у БПЛА.

Отже, реалізація детектора сигналів LoRa на базі SDR є перспективним напрямком для забезпечення безпеки під час використання БПЛА.

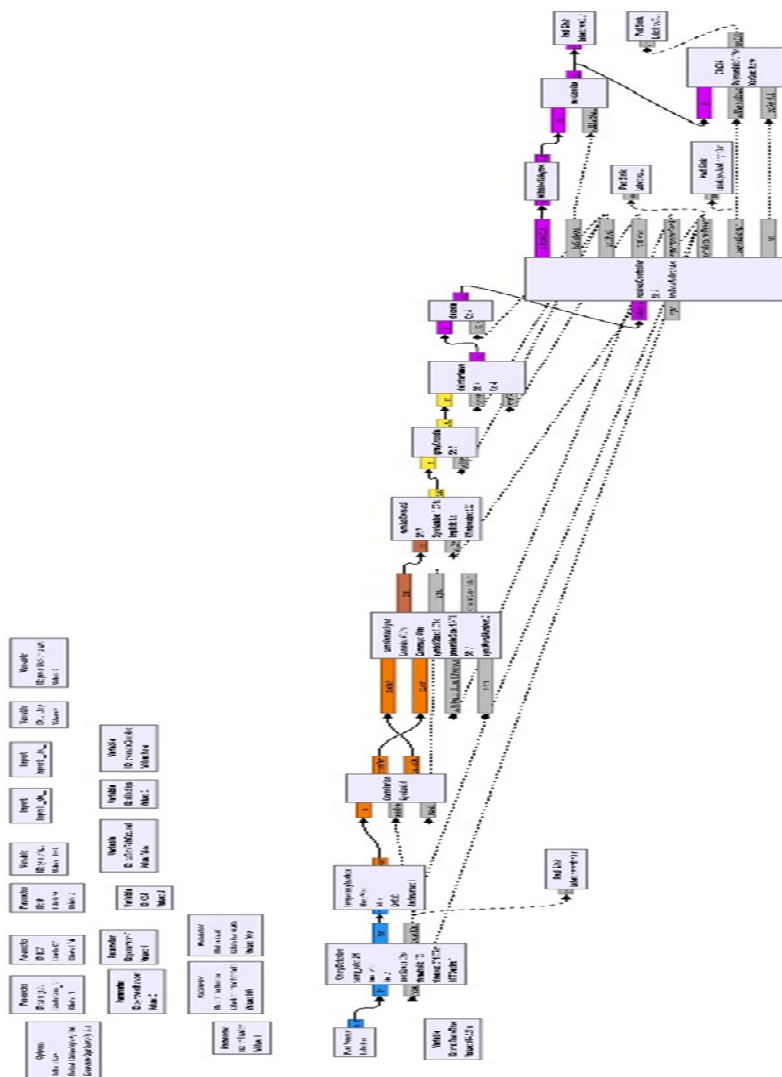


Рисунок 1. Представлення приймача із детектором із використанням програмного інструментарію GNU Radio

Olexander Belej, PhD., Assoc. Prof.

Yulian Fedirko, graduate student.

Oleksandr.I.Belei@lpnu.ua

Yulian.A.Fedirko@lpnu.ua

Lviv Polytechnic National University

ALGORITHM FOR INFORMATION INTERACTION OF SENSORS IN INTERNET OF THINGS NETWORKS

Today, most IoT systems use edge computing and fog computing to bring computing and storage closer to the device layer, reducing bandwidth consumption and latency. Although the use of these multi-layer architectures can improve performance, they are difficult to design because the dynamic and changing IoT environment can affect the quality of service (QoS) and system performance [1]. IoT systems are often exposed to changing environments that cause unexpected events during execution, such as signal strength instability, increased latency, and software crashes [2].

The purpose of the study is to evaluate the possibility of integrating Node-RED and AWS IoT Core, applying these technologies in the field of Internet of Things. To develop a simulation model using these technologies and verify its ability to test several approaches to ensuring energy efficiency in the field of home automation.

To conduct an experiment on a system under test, the system must be connected in such a way that it can receive the necessary output data. However, at each stage of the simulation, a separate node is assigned to transmit temperature data, since it is assumed that the system should regularly receive new temperature data in the rooms it monitors. Figure 1 shows a set of nodes designed to receive sensor readings and control synchronization.

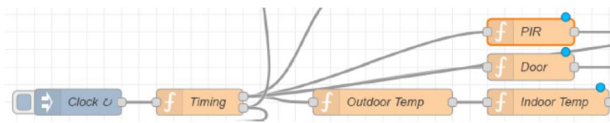


Figure 1. Main components that provide sensor readings

The main sensor of HVAC equipment performance in the context of energy management is the temperature sensor of the controlled room. A typical use of this sensor is to turn on and off the heater depending on the current room temperature and external requirements. Figure 2 shows possible nodes for processing temperature readings.

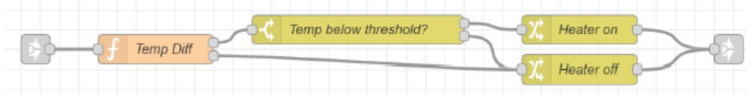


Figure 2. Temperature sensor processing unit

The need to clarify energy use makes sense. Presence sensors should be used. For example, the system can maintain multiple states as a state machine and transition between these states based on information from sensors. In this case, the control of the device will depend on the status of the installation. The system node designed to respond to messages from such sensors is shown in Figure 3.

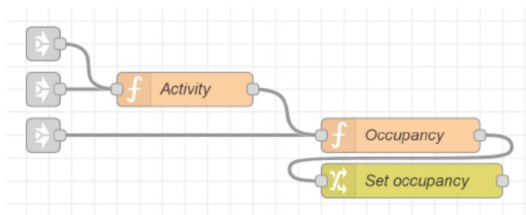


Figure 3. Motion sensor data processing unit

They are used in two directions: one is system quality analysis; the other is system quality analysis. Secondly, it is the production of sensory indicators. An intuitive representation is shown in Figure 4.

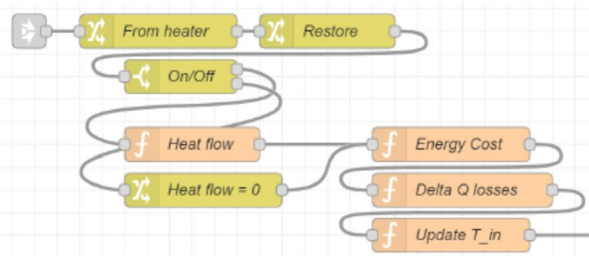


Figure 4. Units of calculation of internal temperature

For data visualization, Node-RED provides special graphical nodes that allow you to create interface elements such as text fields and graphics on so-called “dashboards”. The nodes responsible for collecting and transmitting data and displaying data on the graph are shown in Figure 5.

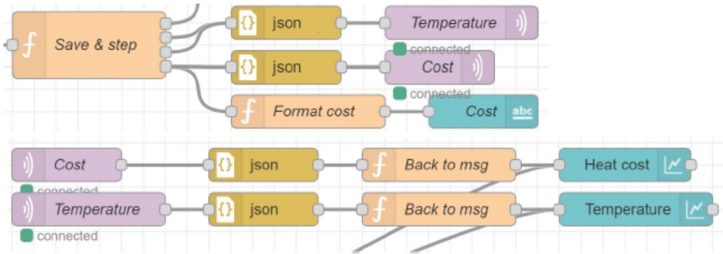


Figure 5. Data collection, transmission, and visualization nodes

We can immediately load the system settings so that they can be considered in further analysis. The nodes for creating, updating, and loading files are shown in Figure 6.

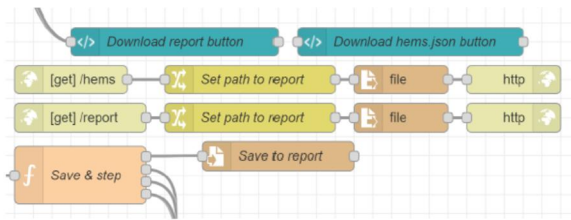


Figure 6. File Processing Node

The “Start Simulation” button is located on the same sticker in the console. Thus, users can see dynamic changes in temperature, power consumption, and the number of steps during experiments and download the obtained data after completion, which can then be analyzed separately. This is done in order to avoid loading resource-intensive parts of the diagram. The tab with the above graphical interface elements is shown in Figure 7.

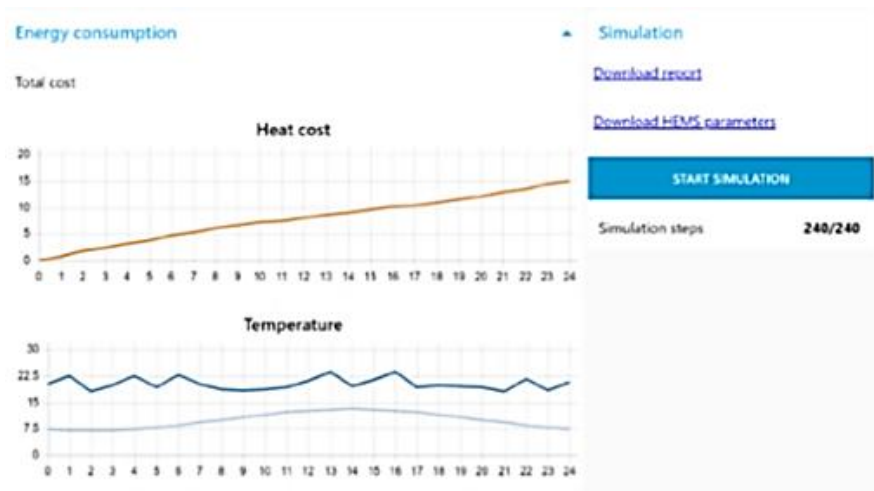


Figure 7. Simulation Tab

From this perspective, the baseline system is expected to be the least efficient, while the system using both strategies is expected to be the most efficient. The results of the simulation experiment yielded the following results. The total energy cost is 14.87 for the baseline system, 12.64 for the active strategy, 11.52 for the busy strategy, and 9.88 for the comprehensive strategy. The dynamic accumulation of the total cost can also be seen in the diagram shown in Figure 8. In particular, we observed that the strategies that include monitoring the presence of people in the room benefited from the fact that energy was not consumed for a long time. The hypothesis put forward is now confirmed.

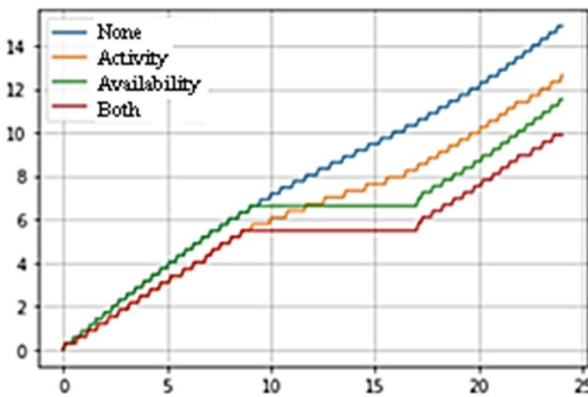


Figure 8. Accumulation of energy consumption

We present the process of developing a system for testing and modeling Internet of Things systems using Node-RED and AWS IoT Core, including a mathematical model of the processes taking place and methods for its implementation. As a result, a program for modeling Internet of Things systems using Node-RED and AWS IoT Core was developed. Based on the

experiments, recommendations were formulated for the application of several approaches to ensuring energy efficiency.

[1] Belej O., Lohutova T., Halkiv L. (2021) Development of Evaluation Templates for the Protection System of Wireless Sensor Network. In: Ageyev D., Radivilova T., Kryvinska N. (eds) Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 69. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-71892-3_10.

[2] O. Belej, N. Spas and I. Artyshchuk, "Development of an Algorithm for Detecting Cyberattacks in Distributed Information Systems," *2021 IEEE 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, 2021, pp. 325-328, doi: 10.1109/CSIT52700.2021.9648805. —
<https://ieeexplore.ieee.org/document/9648805>

Артем Дзюба, заступник начальника управління
Командування ракетних військ і артилерії
Командування сухопутних військ Збройних Сил України
petro1975@gmail.com
Юрій Бударецький, доцент кафедри ПАСІ, к.т.н., с.н.с.
yurii.i.budaretskyi@lpnu.ua
Іванна Якубенко
ivanna.i.yakubenko@lpnu.ua
Віталій Левчик, студент
vitalii.levchyk.ap.2023@lpnu.ua
Національний університет «Львівська політехніка»

ПРОГРАМНО-АПАРАТНИЙ КОМПЛЕКС ДОСЛІДЖЕННЯ УДАРНИХ І ВІБРАЦІЙНИХ НАВАНТАЖЕНЬ В МІСЦЯХ ВСТАНОВЛЕННЯ РАДІОЕЛЕКТРОНОЇ АПАРАТУРИ

Всі види радіоелектронної апаратури (РЕА) зазнають зовнішніх або внутрішніх механічних дій. При встановленні РЕА на засобах озброєння і військової техніки (ОВТ) виникають ударні та вібраційні навантаження, які передаються кожному елементу і викликають їх вібрації. Викликані вібрації можуть мати резонансний характер. При резонансі виникають особливо великі деформації, які супроводжуються великими механічними напруженнями і можуть призвести навіть до руйнування елемента РЕА.

Забезпечення ударної і вібраційної стійкості та міцності є задачею, яка визначає ударну та вібраційну стійкість як властивість об'єкта при заданих ударах і вібраціях виконувати задані функції та зберігати

значення своїх параметрів у межах норми, а ударну і вібраційну міцність – як властивість об'єкта витримувати без руйнувань багатократні удари і тривалі вібраційні навантаження.

Ударну і вібраційну стійкість та міцність можна підвищити за рахунок створення та застосування спеціальних засобів ізолювання елементів РЕА від зовнішніх механічних дій. Найбільш універсальним і ефективним способом боротьби з виникненням ударів і вібрацій в засобах ОВТ є ізоляція об'єкту РЕА від зовнішніх дій за допомогою амортизаторів. Амортизатори є пружними елементами, на яких встановлюється об'єкт РЕА. Такий спосіб захисту має загальні правила та рекомендації, однак потребує індивідуального рішення [1].

Об'єкт РЕА, що встановлюється на амортизаційних платформах, в загальному випадку як тверде тіло має шість ступенів вільності. Тому корпус об'єкта може одночасно здійснювати шість простих коливань: три поступальні та три обертальні коливання. Як правило ці коливання зв'язані між собою, збудження одного з них приводить до виникнення інших. Таке явище розширює можливість виникнення резонансу. При проектуванні амортизаційних платформ існують певні прийоми зробити ці коливання незалежними. Якщо це вдається, то загальна задача віброзахисту зводиться до більш простих задач віброізоляції одномасової моделі. Тоді, в першу чергу, намагаються захиститись від найбільш небезпечного збудження.

Особливу небезпеку становлять ударні збудження. Ударний імпульс збуджує коливання широкого спектру, включаючи і низькі частоти.

При ударних збудженнях застосовують амортизатори з високими демпфуючими властивостями.

Треба пам'ятати, що неправильний вибір амортизаторів та схеми їх розміщення може принести більше шкоди, ніж удари і вібрація, що діють на незахищену техніку. Тому для правильного розрахунку системи амортизаторів потрібні певні початкові дані:

- параметри механічних дій (характеристики вібрацій, ударних імпульсів тощо);
- умови експлуатації;
- конструктивні параметри апаратури РЕА (маса, положення центру мас, моменти інерції відносно головних осей, габаритні розміри тощо);
- допустимі деформації та динамічні навантаження;
- статичні та динамічні характеристики амортизаторів.

Найбільш ефективним способом визначення параметрів механічних дій, а саме характеристик вібрацій і ударних імпульсів, є експериментальні дослідження цих параметрів в місцях встановлення на засобі ОВТ об'єкта РЕА за допомогою його масо-габаритного зразка. Тому розробка, створення і метрологічна атестація програмно-апаратного комплексу (ПАК) для дослідження ударних і вібраційних навантажень, що діють на об'єкт РЕА в місцях його встановлення на засобах ОВТ є актуальною науково-технічною задачею.

Запропоновано структурну схему ПАК для дослідження дії зовнішніх механічних впливів на об'єкт РЕА в місцях його встановлення на засобах ОВТ (рис. 1).



Рисунок 1. Структурна схема ПАК.

Розміщення складових частин ПАК на амортизаційній платформі (АП) при встановленні на гарматі Д20 наведено на рис. 2.

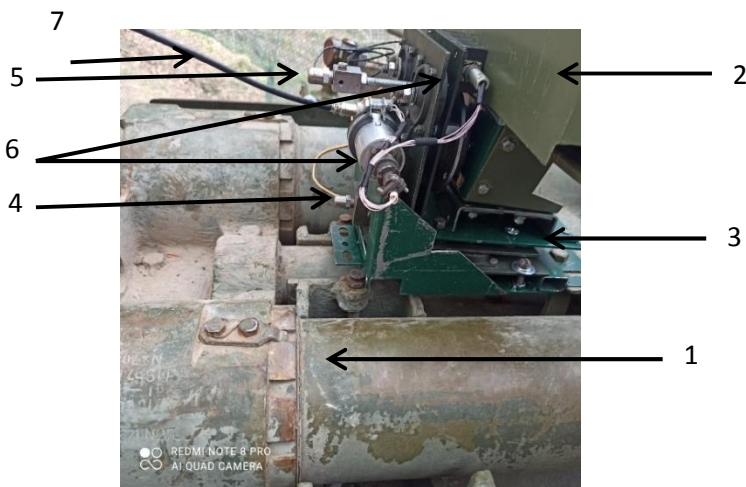


Рисунок 2. Розміщення складових частин ПАК на АП: 1-засіб ОВТ; 2-об'єкт РЕА; 3-елементи АП; 4-датчик навантажень до АП; 5-датчик навантажень після АП; 6-підсилювачі вібраційних сигналів; 7-кабель з'єднання з блоком живлення і комутації.

За результатами досліджень отримані осцилограми вібраційних навантажень, що діють на РЕА при її встановленні на ОВТ (рис. 3).

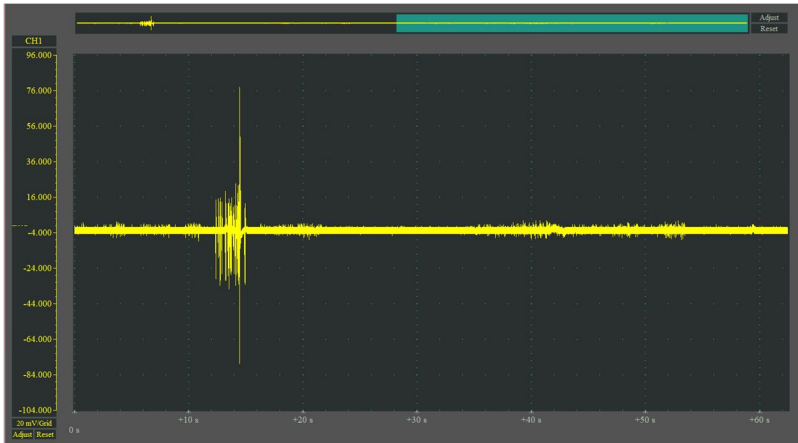


Рисунок 3. Осцилограма вібраційних навантажень.

Розроблений ПАК дозволяє визначити практичні значення ударних і вібраційних навантажень в місцях встановлення РЕА на засобах ОВТ і, відповідно до отриманих даних, оптимізувати амортизаційну платформу для забезпечення заданих показників надійності об'єкту РЕА.

1. Конструювання та технологія виробництва техніки реєстрації інформації: У 3-х кн. Кн. 2. Основи конструювання: Навчальний посібник / Є. М. Травніков, В. С. Лазебний, Г. Г. Власюк, В. В. Пілінський, В. М. Співак, В. Б. Швайченко. За загальною редакцією В. С. Лазебного–К.:«КАФЕДРА», 2015. – с.: іл.ISBN 966-8934-05-9 (кн. 2).

SECTION 4. Radio Electronic Systems. Antennas, Microwave Technology and Electromagnetic Compatibility

СЕКЦІЯ 4. Радіоелектронні системи. Антени, мікрохвильова техніка та електромагнітна сумісність

Spartak Mankovsky, PhD. of Tech. Sc, Assoc. Prof.

Oleh Forostyna, postgraduate stud.

spartak.v.mankovskyi@lpnu.ua

oleh.m.forostyna@lpnu.ua

Lviv Polytechnic National University

RESEARCH OF THE PASSIVE METHOD FOR OBJECT POSITION AND DIRECTION DETERMINATION BY THE DOPPLER SHIFT CHANGE

I. Introduction

The paper presents a method (hereinafter referred to as the OwlEars-1 method) for determining the location and direction of an object by the Doppler shift change of the signal emitted by this object. In general, Doppler location methods are based on the analysis of the change in frequency of a signal reflected or emitted by an object moving relative to a receiver. This principle is used, in one form or another, in radar, in satellite navigation systems, etc. The essence of the OwlEars-1 method is to determine the location of an object based on three short (minimum for 1

signal period) signal measurements in order to determine the relative change in the Doppler shift between these three measurements. Currently, a simulation of the method's operation under ideal conditions has been conducted, however, to assess the reliability and accuracy of the method's operation under real conditions, a number of studies of the influence of various factors need to be conducted.

II. OwlEars-1 method description

OwlEars-1 method demonstrates potential for advanced research that aims to utilize and develop sophisticated location estimation techniques based on the Doppler effect. Also it could serve as a foundation for future innovations in both theoretical modeling and practical applications.

When developing the OwlEars-1 method, two key tasks were identified: to determine the location and direction of movement of the object by the Doppler shift change of the signal emitted by the object.

The nature of a Doppler shift imposes certain limitations on a condition that allows its successful application for object detection. Following conditions are required:

- The object moves along a linear trajectory at least during the interval of its location;
- Moves at a fixed speed, which is known with a certain error;
- Constantly emits a periodic signal (harmonic or complex signal) that is unchanged in spectral components. In this case, the spectrum (frequency) of the signal without the influence of the Doppler effect is unknown;
- There are two (more if necessary) receiving devices that can capture signals from the object with rough synchronization (the synchronization accuracy is not high, on the order of units of ms

for acoustic signals). The coordinates of the receiving devices are known.

Moving object relative to the receiver M is shown in Figure 1.

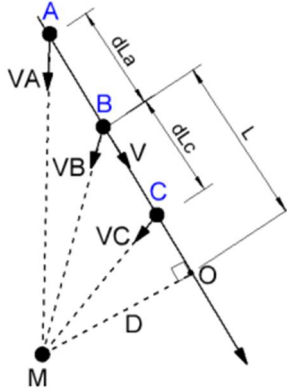


Figure 1. Simplified diagram of the object's motion relative to the receiver M

Considering the prerequisites defined above, the following is necessary and sufficient for determining the location of a moving object using the OwlEars-1 method:

- 1) Make three short (one or more periods) measurements of the signal from a moving object at points A, B, C (see Fig. 1) with a time interval T_s ;
- 2) Determine the relative time compression coefficients of the signals obtained at points A, B, C due to the Doppler shift;
- 3) Perform calculations using the method described below.

Points A, B and C show the position of the object at the moments when the signal from the object is recorded. M is one of the receivers. The value L is the distance from point O to point B. The value D is the shortest distance to the trajectory of the object, the so-called traverse, or in other

words, the radius of the circle to which the trajectory of the object is tangent. The point of contact between the mentioned circle and the trajectory of the object is denoted by the letter O. The basis of the OwlEars method is the determination of the values D and L for each of the signal receivers (only one receiver is shown in the figure for simplicity). As a result of the successful determination of these values from several receivers, the relative position of the object at point B can be easily determined by the multilateration method.

Finding the unknowns D and L, according to the OwlEars-1 method, comes down to solving a system of transcendental equations of the form:

$$\begin{aligned} \text{Ratio1}(D,L)\text{-MeasuredRatio1} &= 0 \\ \text{Ratio2}(D,L)\text{-MeasuredRatio2} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Where $\text{Ratio1}(D,L)$ and $\text{Ratio2}(D,L)$ are the frequency ratios at different positions of the object obtained using the OwlEars-1 method; MeasuredRatio1 and MeasuredRatio2 are the frequency ratios of the received signal measured by the receiving device M, which are calculated using the following formulas:

$$\begin{aligned} \text{MeasuredRatio1} &= \frac{f_c}{f_a} \\ \text{MeasuredRatio2} &= \frac{f_c - f_b}{f_b - f_a} \end{aligned} \quad (2)$$

Where the values of the frequencies f_a , f_b , f_c are obtained by measuring the signal from the object.

III. Conclusions and proposals

Key advantages of the OwlEars-1 method is that signal spectrum from the object is irrelevant since the method uses only the relative Doppler shift obtained at adjacent measurement times, which corresponds to the relative compression of the signal in time. Also, the proposed method does not require high synchronization accuracy between receiving devices, as in the

case of the time-difference method (TDoA), which simplifies implementation and also allows the receiving devices to be separated by a large distance.

Taking into account method prerequisites and limitations listed before, the key proposal is to assess their impact on location accuracy. Most important deviations should be considered:

- 1) Distance to the object and direction of its movement relative to the location of the receivers;
- 2) Distance between the receiving devices (bases);
- 3) Object speed and acceleration;
- 4) Variation in object altitude;
- 5) Sudden change in movement direction between measurement intervals T_s ;

To be able to perform OwlEars-1 accuracy analysis the so called testbench planned to be developed which allows to simulate Doppler shifted signals produced by flying objects at different distances, angles and velocities. Such a testbench allows to vary mentioned parameters and calculate accuracy of the method. In addition, testbench allows to model inaccuracies that occur in the real implementation. Examples of such inaccuracies are:

- 1) Microphones synchronization mismatches;
- 2) Analog to digital converter sampling rate limitation;
- 3) Object velocity non-uniformity e.t.c.

In general, this testbench should simulate the physical environment of the experiment, by taking into account as many relevant factors as possible which will allow for a quick assessment of their impact.

Oleksii M. Liske, PhD (Technical Sciences)

Roman V. Mykhailyshyn, student

oleksii.m.liske@lpnu.ua

roman.mykhailyshyn.an.2021@lpnu.ua

Lviv Polytechnic National University

GPS ANTENNA FOR USE ON UNMANNED VEHICLES IN ELECTRONIC WARFARE CONDITIONS

Introduction. Global Positioning Systems (GPS) determine user coordinates based on triangulation. However, the accuracy of this process can be significantly reduced due to the influence of unwanted signals such as deliberate jamming or multipath propagation, in which signals reflect off the Earth's surface, terrain irregularities, buildings, or other objects. To address these challenges, this study proposes the use of an antenna with a limited beamwidth. This antenna effectively filters signals arriving from undesirable directions, particularly those originating from below the horizon or caused by reflection.

The right-hand circularly polarized antenna was modeled and experimentally validated, demonstrating a substantial reduction in interference and improvement in the reception quality of useful signals. The results of this research have practical significance for enhancing the accuracy and reliability of positioning in unmanned vehicles operating under real-world conditions, which is crucial for their safe and effective deployment.

This research aims to develop a 3D model and experimental prototype of a passive GNSS antenna for GPS signal reception.

To fulfill this objective, the study investigated the theoretical foundations of GPS systems, calculated the antenna dimensions, created a

3D antenna model, and constructed a prototype whose performance was evaluated through measurements of its electrodynamic characteristics and satellite signal strength.

Research Methodology. During the operation of GPS systems, certain problems may arise that affect the accuracy of coordinate determination, particularly due to signals from jamming devices or reflections from buildings, which can degrade the signal-to-noise ratio or alter the signal path. This study addresses these issues by using an antenna with a 90-degree beamwidth, right-hand circular polarization, and an operating frequency of 1.57 GHz. These characteristics allow the antenna to mitigate the effects of interference and multipath signals.

Main Results. This section presents the modeling results of a square microstrip antenna in ANSYS Electromagnetics (Figure 1a). The antenna is fed through a power divider with a 90-degree phase shift between input ports. The dielectric substrate is based on RO4003 hydrocarbon ceramic material with a relative permittivity of $\epsilon_r = 5.4$ and a thickness of 1.5 mm.

With these parameters, the patch width was calculated to be 2.38 mm.

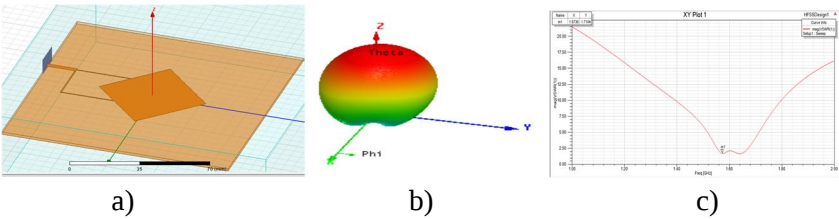


Figure 1. 3D model of the antenna (a) and its 3D radiation pattern(b)

The first segment has a width of 2.4 mm with a characteristic impedance of 50 ohms. The two segments connecting to the square radiator have a width of 1 mm and an impedance of 100 ohms, as they are connected in parallel with the first segment of the feed line. Numerical calculations of the antenna’s electrodynamic characteristics were conducted using Finite

Element Method (FEM) based on the developed 3D model. The antenna exhibits upward directivity, because of the metallic ground plane (Figure 1b). As seen in the 3D radiation pattern (Figure 1c), the antenna’s operating bandwidth ranges from 1.57 to 1.66 GHz with a Voltage Standing Wave Ratio (VSWR) of less than 2.

A prototype antenna was fabricated and experimentally tested. Measurements of its electrodynamic properties were performed using a LiteVNA device, as illustrated in Figure 2. The measurements include the VSWR across the 1-2 GHz frequency range and the frequency dependence of the antenna’s input impedance.

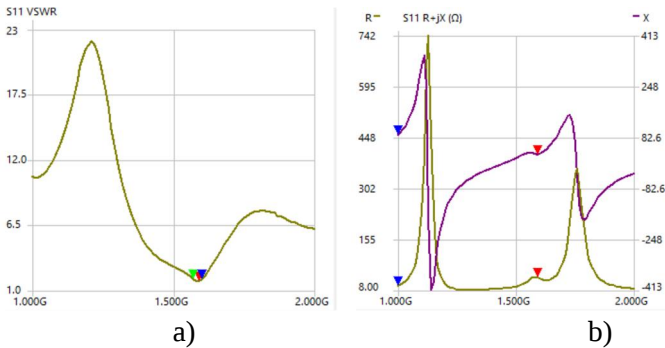


Figure 2. Experimental results of antenna measurements: VSWR in the 1-2 GHz frequency band (a) and input impedance (b)

To transmit the coordinates obtained by the Neo-6M module via Bluetooth, a mock-up based on Arduino Nano was constructed (Figure 3a). The results of the Neo-6M module's operation with the custom antenna are shown in Figure 3b, depicting satellite positions in the celestial sphere from which the module received signals. A comparative study using a complete reference antenna supplied together with the Neo-6Mv2 module was also conducted. The developed directional antenna successfully received signals from nine

satellites, which is three more than the number received using the reference antenna.

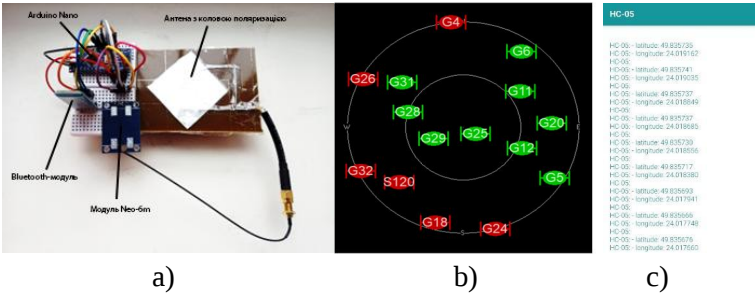


Figure 3. Prototype-based on Arduino Nano (a) and the positions of satellites on the celestial sphere (b), from which signals were received by the module (c)

The transmission range for coordinate and velocity data was up to 10 meters. The coordinates were transmitted to a mobile device and displayed in a terminal application (Figure 3c).

Conclusions. This study has examined the fundamental aspects of the GPS system, including its technical specifications, applications, and the advantages and disadvantages of GPS technology. Various antenna polarization types and methods for achieving circular polarization were also explored. The ANSYS Electromagnetics software was employed to perform 3D modeling of a microstrip transmission line and a microstrip antenna with circular polarization. The results of the experimental investigation confirmed the efficiency of the developed antenna.

[1] Psiaki, M. L., Ertan, T., O'Hanlon, B. W., & Powell, S. P. (2015). GNSS multipath mitigation using antenna motion. NAVIGATION, 62(1), 1–22. <https://doi.org/10.1002/navi.79>.

[2] Vagle, N., Broumandan, A., Jafarnia-Jahromi, A., & Lachapelle, G. (2016). Performance analysis of GNSS multipath mitigation using antenna arrays. *The Journal of Global Positioning Systems*, 14(4). <https://doi.org/10.1186/s41445-016-0004-6>.

[3] Park, K., & Seo, J. (2020). Single-antenna-based GPS antijamming method exploiting polarization diversity. arXiv preprint arXiv:2010.06130. <https://arxiv.org/abs/2010.06130>.

[4] Konin, V., Averyanova, Y., & Ishchenko, O. (2023). Antenna array application to support operation of GNSS receivers under interfering signals. *Radioelectronics and Communications Systems*. <https://doi.org/10.3103/S0735272723100023>.

Авдєєнко Г. Л., канд. техн. наук

django2006@ukr.net

КПІ ім. Ігоря Сікорського

ЗАСТОСУВАННЯ SDR-ТРАНСИВЕРІВ ДЛЯ ПРАКТИЧНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕВІЗІЙНОГО МОВЛЕННЯ СТАНДАРТІВ DVB

Сучасний світ характеризується всебічним розвитком та впровадженням інформаційно-комунікаційних технологій в усі сфери людської діяльності. Стосується це і систем цифрового телевізійного мовлення (ЦТБМ) різних стандартів. На сьогоднішній день на території України розгорнуті та діють мережі ЦТБМ європейських стандартів ЦТБМ (DVB) 1го та 2го поколінь: 1) супутникове мовлення стандартів DVB-S та DVB-S2; 2) наземне ефірне мовлення стандартів DVB-T та DVB-T2; 3) кабельне мовлення стандарту DVB-C. Перелічені стандарти ЦТБМ характеризуються трансляцією в межах виділеної смуги частот пакету програм у вигляді багатопрограмного транспортного потоку MPEG TS, що іноді зветься мультиплексом [1]. Для формування радіочастотного сигналу сучасних технологій ЦТБМ, який передаватиметься до кінцевого користувача (абонента), зазвичай використовується набір типового обладнання на передавальній станції: енкодери, мультиплексори, модулятори, конвертори, передавачі, підсилювачі, антенно-фідерні пристрої тощо. У якості абонентського пристрою зазвичай використовуються типові ресивери (сет-топ-бокси), які підтримують прийом сигналів ЦТБМ усіх 3х європейських стандартів та стандартні телевізійні антени метрового та дециметрового діапазону, здебільшого «хвильовий канал» (Уда-Ягі) та логоперіодичні. Оскільки обладнання передавальної сторони сучасних систем ЦТБМ є дуже дорогим, основні практичні аспекти вивчення таких систем

зазвичай зводяться до вибору, встановлення та налаштування типового абоненського обладнання для прийому сигналів ЦТБМ: антенно-фідерних систем, дільників та відгалужувачів потужності, ресиверів тощо. При цьому практичні питання особливості формування сигналів ЦТБМ на передавальній стороні здебільшого вивчаються теоретично. Таким чином актуальною є задача подальшого удосконалення практичного вивчення аспектів побудови систем ЦТБМ у закладах вищої освіти України, які готують фахівців для сфери інфокомунікацій, яка враховує практичне вивчення питань формування сигналів на передавальній стороні системи ЦТБМ. Альтернативою дорогому професійному обладнанню для формування сигналів ЦТБМ можуть бути компактні пристрої на базі технології програмно-визначувального радіо (SDR), трансивери якої на даний момент часу налічують достатньо широку номенклатуру доступних на ринку моделей: BladeRF, HackRF One, USRP, LimeSDR, PlutoSDR та багато інших. Такі SDR-трансивери дозволяють формувати в діапазонах СВ, КВ, УКВ та НВЧ(до 6 ГГц включно) радіосигнали будь-якої бездротової технології шляхом програмування їх ПЛІС відповідним програмним кодом без необхідності змін в апаратній частині трансивера з вихідною потужністю радіосигнала (без застосування зовнішнього підсилювача потужності) не більше 10...20 дБм. Більшість вказаних SDR-трансиверів підтримує роботу з програмним пакетом GNURadio, у якому присутній широкий функціонал створення програмного коду за допомогою візуальних блоків для реалізації будь-якої сучасної технології бездротових інфокомунікацій, включаючи й системи ЦТБМ [2].

У даних тезах представлено розроблений для навчального процесу науковцями кафедри телекомунікацій НН ІТС КПІ ім. Ігоря Сікорського робочий варіант макету системи передавання та прийому сигналу телевізійного мовлення стандартів DVB-T/T2 та DVB-S/S2, в якому радіопередавальний пристрій реалізований на базі SDR-

трансивера HackRF One [3], а приймальний на базі мультистандартного побутового ресивера EuroSky ES-19 Combo (рис.1). Формування радіосигналу ЦТБМ на передавальній стороні макету здійснювалось SDR-трансивером HackRF One за допомогою програмного застосунку GNURadio з одно- та багатопрограмного транспортного потоку ЦТБМ зі стандартом стиснення H.264, який був попередньо записаний на SSD-диск персонального комп'ютера у вигляді файлу з розширенням *.ts. Файл транспортного потоку для GNU Radio формувалася з відеоконтенту, попередньо завантаженого з Youtube за допомогою функціоналу програмного застосунку FFmpeg з оброблення відео- та аудіофайлів [4] відповідно до рис.2.

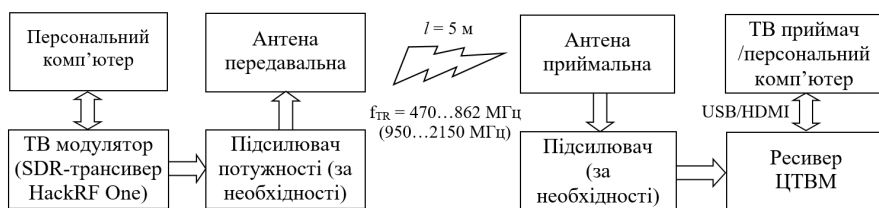


Рисунок 1. Структурна схема макету системи передавання та прийому сигналу ЦТБМ стандартів DVB-T/T2 та DVB-S/S2

Сформований в лабораторних умовах на передавальній стороні макету радіосигнал ЦТБМ з вихідною потужністю не більше 20 дБм та несучою частотою в діапазоні 470...862 МГц (для стандарту DVB-T/ T2, ширина спектру випромінювання 8 МГц) або 950...2150 МГц (для стандарту DVB-S/S2, ширина спектру випромінювання не більше 15 МГц) випромінювався за допомогою несиметричної вібраторної антени у вигляді електромагнітної хвилі з вертикальною поляризацією в напрямку приймальної частини макету, яка була розташована на відстані біля 5...7 м від передавальної (рис.1). Прийом радіосигналу

ЦТБМ діапазону здійснювався такою самою як і для передавальної сторони несиметричною вібраторною антеною, яка за допомогою коаксіального кабелю підключалась до ефірного або супутникового входу ресивера EuroSky ES-19 Combo. Ресивер у свою чергу через інтерфейс HDMI підключався до телевізора або за допомогою конвертора HDMI/USB до персонального комп'ютера (ноутбука), в якому відеозображення та звуковий супровід переданої ТВ програми відтворювалися за допомогою медіаплеєра VLC або PotPlayer і далі налаштовувався на пошук радіосигналу відповідного стандарту ЦТБМ через власне програмне меню. Крім того, для об'єктивного контролю параметрів переданого та прийнятого ТВ сигналу на виході SDR-трансивера та приймальної антени можуть бути встановлені відгалужувачі сигналів, до одного з виходів якого можуть бути підключені стандартні аналізатори сигналів ЦТБМ.

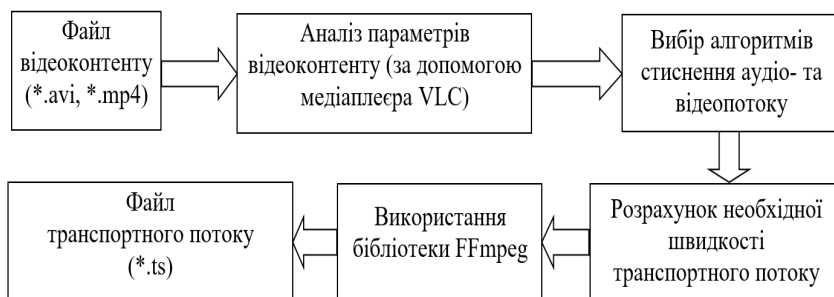


Рисунок 2. Формування транспортного потоку для програмного пакету GNU Radio за допомогою програмного застосунку FFmpeg

Результати проведених випробувань запропонованого на рис.1 макету системи ЦТБМ підтвердили його повну працездатність, тобто

надійну трансляцію та прийом радіосигналів стандартів DVB-T/T2 та DVB-S/S2 в лабораторних умовах.

Дана робота була підтримана Національним фондом досліджень України в рамках виконання грантового проєкту «Мікрохвильові пристрої на основі резонансних структур з метаматеріальним властивостями для захисту життєдіяльності та інформаційної безпеки України» (Реєстраційний номер проєкту 2021.01/0030) та НАТО в рамках виконання грантового проєкту NATO SPS G6002 “3D Metamaterials for Energy Harvesting and Electromagnetic Sensing”.

[1] Fischer W. Digital Video And Audio Broadcasting Technology: A Practical Engineering Guide, 4th Edition. – Springer, 2020. – 1051 p.

[2] Friedt J.-M., Boeglen H. Communication Systems Engineering with GNU Radio: A Hands-on Approach, Wiley, 2025. – 336 p.

[3] Great Scott Gadgets HackRF One. URL:<https://greatscottgadgets.com/hackrf/one/> (дата звернення: 09.05.2025)

[4] FFmpeg. URL: <https://www.ffmpeg.org/> (дата звернення 09.05.2025р)

Alexander G. Yushchenko PhD., Prof. NTU “KhPI”
A.G.Yushchenko@ntu.kharkiv.edu
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

WAVEGUIDE-DIELECTRIC FILTERS FOR ELECTRONIC COMMUNICATIONS APPLICATIONS IN 60 GHZ

The 60 GHz frequency range is significant in telecommunications, particularly within the millimeter wave spectrum. It is commonly used for high-speed wireless communication and low-latency applications. This frequency band, which spans from 57 to 66 GHz, is globally recognized as an unlicensed band, meaning it can be utilized without a license from regulatory bodies like the FCC [1]-[2].

Technologies that employ this range include WiGig (WiFi 802.11ad), WirelessHD, and various wireless personal area networks (PANs). Additionally, it plays a crucial role in 5G networks and advanced radar systems.

The 60 GHz frequency offers ultra-high data rates and secure short-range transmission due to its high bandwidth of approximately 9 GHz. It also enables high EIRP. However, one disadvantage of the 60 GHz band is its limited range and susceptibility to environmental factors, making it ideal for low-power, short-distance communication.

Bandpass filters are indeed crucial in telecommunications and various RF applications. They allow specific frequency ranges to pass while blocking others, which is essential for reducing interference and improving signal quality.

Waveguide-dielectric resonator filters are particularly promising due to several advantages [3]-[4]:

These filters exhibit a high-quality Q-factor, indicating low energy loss and the ability to maintain a narrow bandwidth. They can be designed to be more compact than traditional waveguide filters, making them suitable for modern applications where space is constrained. The dielectric materials used in these filters often showcase excellent thermal stability, ensuring consistent performance across varying temperatures. There is also the potential to utilize a mechanical thermos-stabilization system for resonators made from leukosapphire and quartz. These filters typically have low insertion loss, which helps maintain signal strength. Waveguide-dielectric resonator filters can be integrated into a variety of systems, including satellite communications, radar systems, and 5G networks. 6. Possibility to design both ultra-narrow and ultra-wideband filters.

Furthermore, advanced manufacturing techniques, such as additive manufacturing, allow for precise integration of dielectric and metallic components, enhancing the practicality of these filters in real-world applications.

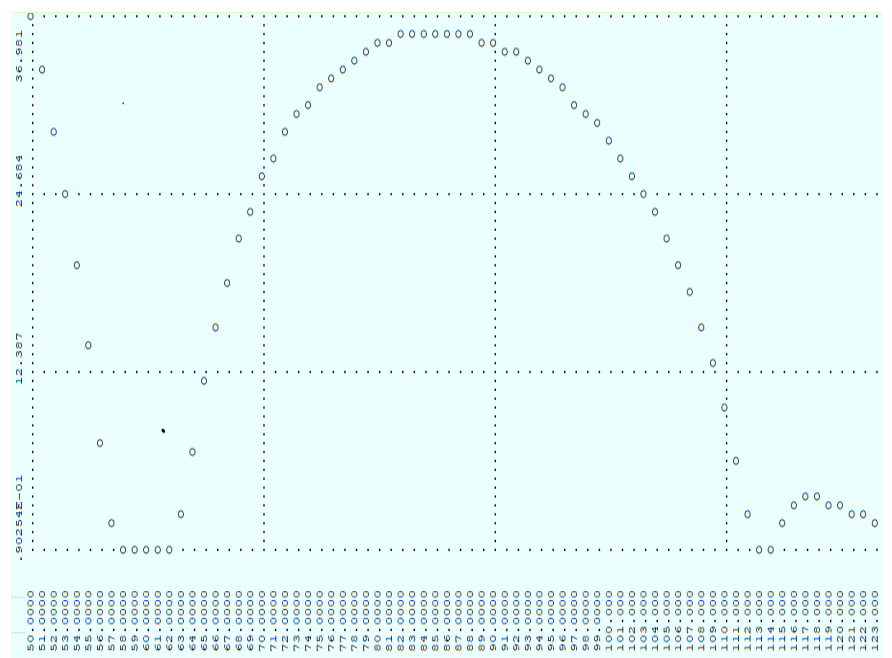
Modern technologies for manufacturing filters using waveguide-dielectric resonators are advancing rapidly and offering several effective methods. One prominent approach is Additive Manufacturing (3D Printing), which enables precise fabrication of complex geometries that are challenging to achieve with traditional methods [5].

In mathematical terms, filter design synthesis is connected to the scattering problem in periodic dielectric structures at the cut-off waveguide, which links to the junction of regular structures. This process involves both approximate calculations and comprehensive full-wave rigorous calculations that utilize the scattering matrix approach [6].

These mathematical models have enabled us to develop an innovative method for evolutionary filter design and to create an AI system for synthesizing optimal designs [7].

This paper presents the results of optimizing a three-link filter based on the rectangularity coefficient of the amplitude-frequency characteristic. The optimized filter features a cut-off waveguide size of 1.39 mm, with outer resonator lengths of 0.64 mm and a central resonator length of 0.69 mm. The total length of the filter is 4.05 mm, and the squareness coefficient at the 20 dB level is 1.661. The figure below illustrates the filter characteristics.

Insertion loses



Frequency, GHz

As demonstrated, the filter displays low losses within the passband and a high level of suppression outside the band.

[1] RFWirelessWorld, “60 GHz RF Channels and Frequency Allocations”, <https://www.rfwireless-world.com/terminology/rf-basics/60-ghz-rf-channels-frequency-allocations>

[2] RFWirelessWorld, “Understanding the 60 GHz Frequency Band: Applications and Challenges{”, <https://www.rfwireless-world.com/terminology/rf-basics/understanding-60-ghz-frequency-band>

[3] A.G. Yushchenko, “High Unloaded Qs MM Wave WDR Filters Designing”, International Journal of Infrared and Millimeter Waves 22, 1831–1836 (2001). <https://doi.org/10.1023/A:1015031802727>

[4] A.G. Yushchenko, D.B. Mamedov, “Comparative Characteristics of Band pass Filters Based on WDR and Microstrip Resonators|” . Electrical and Electronic Engineering,- USA, 2012, – vol.2, -№.2, pp. 7–10. doi: 10.5923/j.eee.20120202.02

[5] Pons-Abenza, A., García-Barceló, J., Romera-Pérez, A., Alvarez-Melcon, A., Quesada-Pereira, F. D., Hinojosa-Jiménez, J., Guglielmi, M., Boria Esbert, V. E., & Arche-Andradas, L. (2020). Design and implementation of evanescent mode waveguide filters using dielectrics and additive manufacturing techniques. AEU – International Journal of Electronics and Communications, 116, 153065. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2020.153065>

[6] D.B. Mamedov A.G. Yushchenko,, “Development of a mathematical model of microwave filter based on the partially filled cross-shaped waveguide-dielectric resonators”,

Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2016, Vol 3, No 5(81) , pp. 11-17, 2016, DOI: 10.15587/1729-4061.2016.70340

[7] A.G. Yushchenko, D.B. Mamedov, Evolutionary design of severtier LM-mode fil-ters optimized with orig-in al knowledge-based CAD system, Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. № 21 (1064), pp. 159-170. https://www.researchgate.net/publication/262399308_EVOLUTIONARY_DESIGN_OF_SEVEN-TIER_LM-MODE_FILTERS_OPTIMIZED_WITH_ORIGINAL_KNOWLEDGE-BASED_CAD_SYSTEM_-Bulletin_of_NTU_KhPI_Series_Technique_and_electrophysics_of_high_voltage_-_Kharkiv_NTU_KhPI_2014_

Волочій Б.Ю.^{1,2}, д-р. техн. наук., проф.
Онищенко В.А.², канд. техн. наук
Шкілюк О.П.¹, канд. техн. наук, доц.
Змисний М.М.¹, канд. техн. наук, ст. викл.
bohdan.y.volochii@lpnu.ua
onishchenkovolodymyr@gmail.com
oleksandr.p.shkiliuk@lpnu.ua
mykhailo.m.zmysnyi@lpnu.ua

¹Національний університет «Львівська політехніка»

²Національна академія сухопутних військ імені гетьмана
Петра Сагайдачного

СТРУКТУРНО-АВТОМАТНА МОДЕЛЬ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ФУНКЦІЙНОЇ ПОВЕДІНКИ РАДІОЕЛЕКТРОННОГО КОМПЛЕКСУ З ДВОХ АКУСТИЧНИХ ТА ОДНІЄЇ ОПТИКО- ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМ

Вступ. Одним із способів підвищення ефективності систем виявлення безпілотних ЛА є поєднання кількох систем виявлення різних типів в один радіоелектронний комплекс (РЕК) [1]. В склад удосконаленого РЕК входять не одна, а вже дві акустичні системи (АС), давачі яких розміщені на передніх рубежах дальньої та ближньої контрольованих зон; ретранслятор, який встановлений в дальній зоні; інформаційно-керуюча система (ІКС); оптико-електронна система (ОЕС). Згідно алгоритму функціонування в дальній зоні працює перша акустична система АС1; в середній працює ОЕС з денним і нічним баченням; в ближній зоні працює друга акустична система АС2 і ОЕС. Отже об'єктом розгляду даної роботи є експлуатаційна функційна поведінка РЕК.

Етапи розроблення моделі. Вирішення задачі розроблення дискретно-неперервної стохастичної моделі експлуатаційної функційної поведінки РЕК із заданим алгоритмом функціонування здійснюється в такій послідовності:

1) побудова вербальної модель експлуатаційної функційної поведінки РЕК в складі АС1, АС2, ОЕС та ІКС. Вербальна модель сформована для заданого варіанту алгоритму його функціонування та показує події і ситуації, які мають місце при прольотах БпЛА через контрольовані системами РЕК зони.

2) визначено припущення та умови, які враховано в стохастичній моделі експлуатаційної поведінки РЕК: для інтервалів часу від моменту появи безпілотних ЛА в контрольованих зонах до моменту їх виявлення відповідною системою РЕК використано експоненційний закон розподілу ймовірностей; під час кожного прольоту БпЛА перетинає дальню, середню та ближню контрольовані зони, давачі акустичних систем АС1 і АС2 в контрольованих зонах, працюють незалежно один від одного, ретранслятор радіосигналів завжди перебуває у справному стані і виконує свою функцію з ймовірністю 1, ІКС всі функції виконує успішно з ймовірністю 1.

3) визначено базові події експлуатаційної поведінки РЕК для розроблення опорного ймовірнісного графа.

4) визначено компоненти вектора станів для представлення вербальної моделі експлуатаційної функційної поведінки РЕК.

5) визначено показники ефективності систем, які будуть представлені в стохастичній моделі поведінки РЕК.

Розроблення структурно автоматної моделі (САМ). В якості базових подій (БП) для стохастичної моделі використовуємо події, що представляють закінчення процедур алгоритму функціонування РЕК.

Наприклад, БП1 – подія реагування АС1 на появу БпЛА в дальній контрольованій зоні. Для множини інтервалів часу від моменту появи БпЛА в дальній зоні до моменту його виявлення АС1 використано їх середнє значення T_{AC1} . В разі не виявлення БпЛА АС1 в цю множину входять інтервали часу від моменту появи БпЛА в дальній зоні до моменту завершення розрахункового часу перебування БпЛА в дальній зоні. Схожим чином описуються інші базові події.

Для розроблення ймовірнісного графа необхідно обґрунтувати і призначити компоненти для вектора станів: V1 – показує стан АС1 в дальній контрольованій зоні; V2 – показує стан ОЕС в середній контрольованій зоні; V3 – показує стан АС2 в ближній контрольованій зоні; V4 – показує стан ОЕС, яка працює по команді від ІКС в ближній контрольованій зоні; V5 – «показує» відповідність фінальних станів графа виконанню чи невиконанню завдання складовими РЕК.

Прийнято ймовірності виявлення БпЛА АС1, АС2 та ОЕС в зонах контролю та середні значення інтервалів часу від моменту входу БпЛА в контрольовані зони до моменту їх виявлення відповідною системою: P_{AC1} – ймовірність виявлення БпЛА АС1 в дальній контрольованій зоні; T_{AC1} – середнє значення інтервалів часу від моменту входу БпЛА в дальню зону до моменту його виявлення АС1, або до закінчення часу прольоту БпЛА через дальню зону; P_{OE1} – ймовірність виконання завдання РЕК з використанням ОЕС в середній контрольованій зоні; T_{OE1} – середнє значення тривалостей роботи ОЕС в середній зоні; P_{AC2} – ймовірність виявлення БпЛА АС2 в ближній контрольованій зоні; T_{AC2} – середнє значення інтервалів часу від моменту входу БпЛА в ближню зону до моменту його виявлення АС2, або до закінчення часу прольоту БпЛА через ближню зону; P_{OE2} – ймовірність виконання завдання РЕК

з використанням ОЕС в ближній контрольованій зоні; T_{OE1} – середнє значення тривалостей роботи ОЕС в ближній зоні.

В технології стохастичного моделювання застосовується методика розроблення ймовірнісного графа, який називаємо опорним. Модель експлуатаційної функційної поведінки РЕК у вигляді ймовірнісного графа розроблена згідно сформованої вербальної моделі його віртуальної експлуатаційної поведінки. Фрагмент розробленого ймовірнісного графа зображений в таблиці 1. З цього графа в САМ переходять базові події і формули розрахунку інтенсивностей переходів та правила модифікації компонент вектора станів. Розроблена САМ показана в таблиці 2 На основі графа сформовано систему диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена, в результаті розв'язання якої, отримується розподіл ймовірностей перебування в станах графа, а відтак і залежності ймовірності виконання завдання РЕК від показників ефективності його складових.

Таблиця 1. Фрагмент опорного графа експлуатаційної поведінки РЕК

№	Стан і актуальна БП	ІАПП	Вектор стану					№ стану	Перехід	ФРП
			V1	V2	V3	V4	V5			
1	Початковий стан		0	0	0	0	0	1	-	-
2	1БП1	P_{AS1}	1	0	0	0	0	2а.у	$1 \rightarrow 2а.у$	$P_{AS1} \frac{1}{T_{AS1}}$
3		$1 - P_{AS1}$	2	0	0	0	0	3а.н	$1 \rightarrow 3а.н$	$(1 - P_{AS1}) \frac{1}{T_{AS1}}$
4	2БП2	P_{OE1}	2	2	0	2	0	4о.у.ф	$2а.у \rightarrow 4о.у$	$P_{OE1} \frac{1}{T_{OE1}}$
5		$1 - P_{OE1}$	2	3	0	1	0	5о.н	$2а.у \rightarrow 5о.н$	$(1 - P_{OE1}) \frac{1}{T_{OE1}}$

Таблиця 2. Фрагмент САМ моделі експлуатаційної поведінки РЕК

Базові події експлуатаційної поведінки РЕК	Формалізований опис ситуацій, в яких відбуваються базові події реакції РЕК на перетин БпЛА контрольованих зон	Формули розрахунку інтенсивностей переходів в графі	Правила модифікації компонент вектора станів
БП1: Реагування на БпЛА відповідної АС в дальній контрольованій зоні	Ситуація 1: (V1=0) AND (V2=0) AND (V3=0) AND (V4=0) AND (V5=0)	$P_{AS1} \frac{1}{T_{AS1}}$	V1:=1
		$(1 - P_{AS1}) \frac{1}{T_{AS1}}$	V1:=2
БП2: Завершення роботи ОЕС в середній контрольованій зоні	Ситуація 1: (V1=2) AND (V2=0) AND (V3=0) AND (V4=0) AND (V5=0)	$P_{OE1} \frac{1}{T_{OE1}}$	V2:=1; V5:=1
		$(1 - P_{OE1}) \frac{1}{T_{OE1}}$	V2:=2; V5:=2
БП3: Реагування на БпЛА відповідної АС в ближній контрольованій зоні (відбулося або не відбулося)	Ситуація 1: (V1=2) AND (V2=0) AND (V3=0) AND (V4=0) AND (V5=0)	$P_{AS2} \frac{1}{T_{AS2}}$	V3:=1; V5:=5
		$(1 - P_{AS2}) \frac{1}{T_{AS2}}$	V3:=2; V5:=6
	Ситуація 2: (V1=1) AND (V2=2) AND (V3=0) AND (V4=0) AND (V5=2)	$P_{AS2} \frac{1}{T_{AS2}}$	V3:=1; V5:=5
		$(1 - P_{AS2}) \frac{1}{T_{AS2}}$	V3:=2; V5:=6

Висновки. В результаті поєднання розробленої структурно-автоматної моделі і програмного забезпечення ASNA-2 отримуємо програмну стохастичну модель. Програмна стохастична модель дає змогу автоматизовано розв'язувати задачу синтезу значень показників функціональності систем радіоелектронного комплексу для забезпечення заданого значення показника його ефективності, а саме ймовірності виявлення безпілотних ЛА.

[1] Волочій Б., Онищенко В., Озірковський Л.. Програмна аналітична стохастична модель експлуатаційної функційної поведінки радіоелектронного комплексу виявлення безпілотних літальних апаратів. Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія. Національний університет «Львівська політехніка». Львів: НУ «ЛП», 2023. Вип. 3, №2, С. 126-149.

SECTION 5. Information and communication systems and networks. Information technologies. Network services, management, operation

СЕКЦІЯ 5. Інфокомунікаційні системи та мережі. Інформаційні технології. Мережеві послуги, керування, експлуатація

Mohammad Alhihi, Assoc. Prof.
alhihimohammad25@gmail.com

Philadelphia University / Independent Researcher

REVIEW AND PERFORMANCE EVALUATION OF FIFO, PQ, CQ, FQ, AND WFQ ALGORITHMS IN MULTIMEDIA WIRELESS SENSOR NETWORKS

Multimedia Wireless Sensor Networks (MWSNs) are designed to support the transmission of time-sensitive data such as video and audio streams, in addition to traditional sensor readings. In these networks, queue management at the node level plays a crucial role in ensuring quality of service (QoS), especially in terms of delay, packet loss, and fairness. This paper presents a comparative review and performance evaluation of five common scheduling algorithms: First-In First-Out (FIFO), Priority Queuing (PQ), Custom Queuing (CQ), Fair Queuing (FQ), and Weighted Fair Queuing (WFQ).

A small-scale simulation experiment was conducted using NS-3 to assess the performance of each algorithm under identical network conditions. The scenario included ten sensor nodes transmitting a mixture of real-time video

and temperature data to a central base station. The performance was evaluated based on average packet delay and packet loss rate.

The FIFO algorithm, while simple to implement, demonstrated high delay and packet loss, particularly under increased traffic load. Priority Queuing improved the delivery of high-priority video packets, but lower-priority data such as temperature readings were often delayed or dropped. Custom Queuing offered better control by allowing bandwidth allocation for different traffic classes, yet required careful configuration to achieve optimal results. Fair Queuing provided more balanced resource distribution, reducing the starvation of lower-priority flows. However, the best performance was observed with Weighted Fair Queuing, which introduced traffic weights and dynamically prioritized packets based on their importance and traffic class. WFQ maintained low delay and packet loss across both real-time and non-real-time data.

In conclusion, the study highlights that while no single algorithm fits all scenarios, WFQ offers a practical balance between complexity, fairness, and QoS performance. For multimedia applications in WSNs where timely and reliable data transmission is critical, WFQ stands out as a robust and efficient choice.

Keywords: MWSNs, QoS, Scheduling Algorithms, FIFO, PQ, CQ, FQ, WFQ, Wireless Sensor Networks

[1] S. Keshav, *An Engineering Approach to Computer Networking*, Addison-Wesley, 1997.

[2] N. Kaur and R. Sharma, "Performance analysis of queuing algorithms in NS2," *International Journal of Computer Applications*, vol. 45, no. 12, pp. 10–14, 2012.

Дмитрук К.С., аспірант
Клавдієв В.П., аспірант
Касілов О.В., канд. техн. наук, доц.
Охрименко М.Ю., старш. викл.
kostiantyn.dmytruk@infiz.khpi.edu.ua
viacheslav.klavdiiev@mit.khpi.edu.ua
oleg.kasilov@khpi.edu.ua
maksym.okhrymenko@khpi.edu.ua
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

МОДЕЛЬ ПРОДУКТИВНОСТІ БАГАТОШАРОВИХ БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖ З ДИНАМІЧНИМ РОЗПОДІЛОМ РЕСУРСІВ

Розвиток багат шарових бездротових мереж є важливим напрямом підвищення ефективності телекомунікацій. Вони об'єднують макро-, піко- та фемтосоти з різнорівневими користувачами, що ускладнює оптимальний розподіл ресурсів через змінні умови трафіку, інтерференцію та енергоспоживання [1]. Ключовими аспектами є динамічне управління спектром, потужністю та доступом [2].

Традиційні статичні методи поступаються адаптивним підходам [3]. Одним із перспективних підходів є застосування методів нелінійного оптимізаційного моделювання, які дозволяють знаходити компроміс між пропускнуою здатністю, затримками та енергоспоживанням. Для моделювання ефективності розподілу ресурсів можна використовувати оптимізаційні функції, що враховують баланс між максимізацією пропускнуої здатності та мінімізацією затримок:

$$\max \sum_{i=1}^N R_i(x) - \lambda \sum_{i=1}^N D_i(x),$$

де $R_i(x)$ – пропускна здатність i -го користувача, $D_i(x)$ – затримка, λ – ваговий коефіцієнт, що визначає пріоритетність параметрів.

Для динамічного розподілу спектральних ресурсів можна використовувати алгоритми оптимізації на основі еволюційних методів, наприклад, генетичні алгоритми або диференціальну еволюцію. Ці методи дозволяють знайти квазіоптимальні рішення в умовах великої кількості змінних параметрів. Наприклад, у випадку гетерогенних мереж, що поєднують ліцензійний і неліцензійний спектр, ефективний розподіл ресурсів може бути реалізований через рішення наступної оптимізаційної задачі:

$$\min \sum_{j=1}^M (P_j(x) + I_j(x)),$$

де $P_j(x)$ – потужність передавання, $I_j(x)$ – рівень інтерференції в j -ій підмережі.

Важливим напрямком є використання машинного навчання для прогнозування стану мережі та адаптивного управління параметрами бездротового доступу. Використання нейромережевих моделей дозволяє покращити ефективність адаптивного розподілу ресурсів шляхом аналізу історичних даних трафіку та передбачення майбутніх змін у мережі. Наприклад, застосування згорткових нейромереж (CNN) дозволяє аналізувати просторові характеристики трафіку та прогнозувати інтенсивність навантаження на різні рівні мережі, що сприяє проактивному розподілу частотного спектра та потужності передавання.

На рис. 1 показано порівняння ефективності традиційного та оптимізованого підходів до розподілу ресурсів у багатошаровій мережі. Оптимізований метод дозволяє суттєво знизити рівень інтерференції та покращити продуктивність мережі навіть за умов високої завантаженості.

Результати дослідження показують, що використання адаптивних методів оптимізації дозволяє значно підвищити продуктивність багатопарових бездротових мереж.

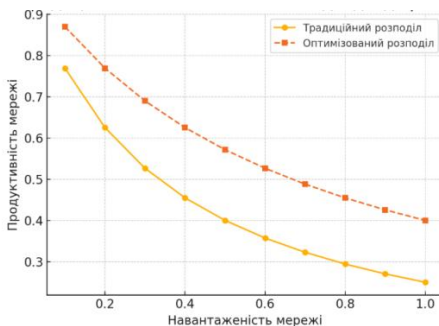


Рисунок 1. Порівняння традиційного та оптимізованого підходів до розподілу ресурсів у багатопаровій бездротовій мережі

Таблиця 1. Порівняння між традиційним і оптимізованим підходами

Параметр	Традиційний підхід	Оптимізований підхід
Середній рівень інтерференції (дБ)	Високий (~15-20 дБ)	Низький (~5-10 дБ)
Пропускна здатність (Мбіт/с)	Середня (50-100 Мбіт/с)	Висока (100-300 Мбіт/с)
Середня затримка (мс)	Висока (~50-100 мс)	Низька (~10-30 мс)
Стабільність продуктивності	Низька (нестабільна швидкість)	Висока (стабільна швидкість)
Енергоспоживання на користувача (мВт)	~500 мВт	~300 мВт
Кількість перепідключень при високому навантаженні	Часті (>10 за хвилину)	Рідкісні (<3 за хвилину)

Подальші дослідження можуть бути зосереджені на розробці гібридних алгоритмів, що поєднують машинне навчання, стохастичну оптимізацію та когнітивні підходи до управління ресурсами.

[1] Pustovoitov, P., Okhrimenko, M., Voronets, V., & Udalov, D. (2021). The speed calculating increasing method of the markov model network node. *Advanced Information Systems*, 5(3), 13–17. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.02>

[2] Пустовойтов, П. Є., & Компанієць, В. О. (2024). Метод формування самоподібного потоку із заданим параметром Херста для моделювання трафіку в мережі. *Технічна інженерія*, (2(94)), 185–190. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-2\(94\)-185-190](https://doi.org/10.26642/ten-2024-2(94)-185-190)

[3] Пустовойтов П. Є. Метод аналізу якості логічних каналів та вибір маршрутів у одноранговій сенсорній мережі / П. Є. Пустовойтов, М. Ю. Охрименко // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава : ПНТУ, 2024. – Вип. 4 (78). – С. 204-208.

Andrii Pukach, Cand. of Tech. Sc., Assistant
Vasyl Teslyuk, Dr. of Tech. Sc., Prof.
andriy.i.pukach@lpnu.ua
vasyl.m.teslyuk@lpnu.ua
Lviv Polytechnic National University

INFORMATION MODEL OF SOFTWARE SUPPORT'S IMPACT FACTORS ANALYSIS USING R-SYSTEM AND PYTHON

Introduction. One of actual scientific and applied problems nowadays lies in the need of development an effective and efficient information model (IM) for the analysis of different impact factors affecting the process of software complexes' support automation. The purpose of this research is to find optimal solutions for the development of the necessary IM with the possibility of its further implementation, application, testing, analysis, as well as processing obtained results, while solving the aforementioned practical applied problem. Among the main research methods are computer modeling methods using the R-system and Python environments. Having analyzed the main directions of automation, in the context of software complexes support area, based on works [1]-[7], the most common of them are, in particular: testing automation, DevOps automation, and decision making automation. But those are only particular examples, while whole field of software complexes' support automation includes a lot of other directions and areas. While, in this work, we consider all these automation cases (from testing, to decision-making, and other possible ones) from the point of view of subjective perception of each of these cases, as well as the supported software complexes or their support processes as a whole. In particular, the main goal at this stage of the conducted research is, precisely, the analysis of various pre-defined impact factors affecting the results of the subjective perception of the supported software complexes by

the relevant subjects interacting with them (from testers, to project managers, and real client users). So appropriate IM (for automation of software complexes support's impact factors analysis) has been developed in scope of this research, as well as its realization in aforementioned R-system and Python environments, using the relevant sources [8]-[13].

Developed information model. The declared information model has been developed specifically for software modeling of the processes of impact factor analysis. A key features of the developed model are:

- the realized symbiosis of two powerful specialized programming environments: R-system and Python;
- as well as a specially developed mechanism for data preparation and processing, which provides the possibility of appropriate identification and analysis of the investigated subjective factors of influence (impact). The developed IM has a three-component structure, where each component is a separate semi-autonomous software module that can interact with other modules directly or indirectly by processing a common data flow. *Dataset preparation module* for training & testing the encapsulated multilayer perceptron (MP) model, as well as corresponding datasets for testing the isolated effects of influence of each individual impact factor. Responsible for the preparation of input data in the specified format, as well as for the preliminary depersonalization and normalization of these data, which is mandatory in accordance with the general practice of working with similar datasets. This module is implemented in Python. *Module for building and training the corresponding multilayer perceptron model:* is responsible for building and training the designed and encapsulated MP-model(s) with usage of the dataset(s) prepared by the previous module. This module is implemented in the R-system environment. *Module of testing trained multilayer perceptron model*, as well as finding and forming reverse chains of maximum weights for further identification and analysis of impact factors. This module is implemented in Python. Fig. 1 below represents

example results obtained by functioning of appropriate module of testing trained MP model and forming reverse chains of maximum weights. Also, Fig. 2 below presents a visualization of interpreted modeling results example, obtained by functioning of developed information model for automation of software complexes support's impact factors analysis with usage of the R-system and Python environments.

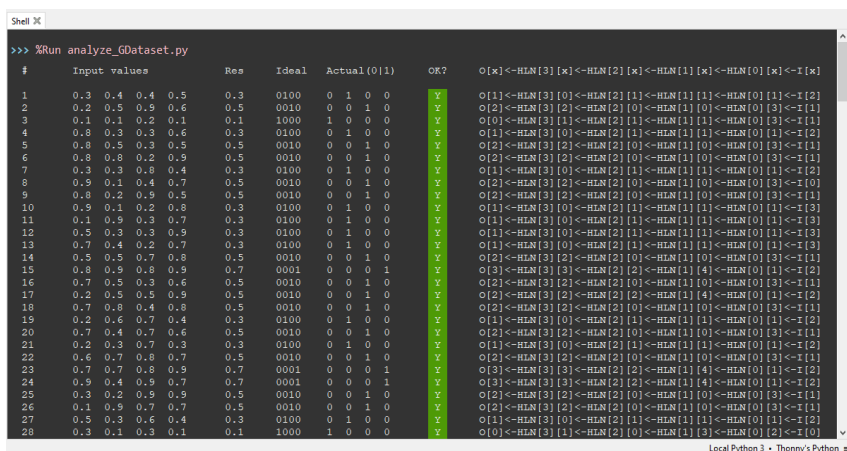


Figure 1. Example of results obtained by functioning of the developed IM

Neuron	Probability (%) of belonging separate Neuron of MP – to impact factory <№ of factor>						
	<1>	<2>	<3>	<4>	HLN{1}{4}	-	-
HLN{3}{1}	27	73	-	0	HLN{0}{3}	1	29
HLN{3}{3}	-	-	70	30	HLN{0}{1}	1	72
HLN{2}{0}	17	-	83	-	HLN{3}{0}	0	1
HLN{2}{1}	1	99	-	-	HLN{3}{2}	0	0
HLN{2}{4}	1	98	-	1	HLN{1}{0}	0	0
HLN{2}{2}	-	-	67	33	HLN{1}{3}	1	0
HLN{1}{1}	1	99	-	-	HLN{0}{2}	1	0

Figure 2. Visualization of interpreted modeling results example

Conclusions. This paper is devoted to the development of IM for automation of software complexes support's impact factors analysis with usage of the R-system and Python environments. In particular, results, obtained by functioning of the developed IM, provide the possibility of further quantitative calculation (in the numerical equivalent) of assessing the degree of influence of the specified impact factors on the subjective perception of the supported object by relevant investigated subjects of interaction with this object, and to form appropriate “portraits” of these subjects. In general, the developed IM provide all needed possibilities for appropriate analysis of different impact factors affecting the process of software complexes' support automation.

[1]. Jambunathan, B., Kalpana Y. (2018). Design of DevOps solution for managing multi cloud distributed environment. *International Journal of Engineering & Technology*, Vol. 7, pp. 637-641, DOI: 10.14419/ijet.v7i2.33.14854

[2]. Pérez-Sánchez, J., et al. (2024). A Taxonomy on Human Factors that Affect DevOps Adoption. *Lecture Notes in Networks and Systems*, pp. 314–324. DOI: 10.1007/978-3-031-60221-4_31

[3]. Neupane K. (2023). Continuous Automation with DevOps practices for Threat Detection. 99 pages. DOI: 10.13140/RG.2.2.33472.92169

[4]. Montvelisky J., Bhamare L. (2024). 11th edition of the State of Testing Report. PractiTest & Tea-time with Testers, 35 pages. URL: <https://www.practitest.com/assets/pdf/stot-2024.pdf> (A/D 04 May 2025)

[5]. Onnasch L. (2015). Benefits and Costs of Automation Support: The Role of Function Allocation and Automation Reliability. 183 pages. URL: <https://d-nb.info/1069899747/34>

[6]. Srivastava S. (2023). Optimizing Automation and Specialized Testing Techniques in DevOps. International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET), Volume 11 Issue VII Jul, pp. 1449-1454. DOI: 10.22214/ijraset.2023.54882

[7]. Srivastava S. (2023). Utilizing AI systems to automate DevOps processes within the field of Software Engineering. International Journal of Scientific Research and Engineering Development, Vol.6 Iss.6, pp. 906-910, URL: <https://ijsred.com/volume6/issue6/IJSRED-V6I6P114.pdf>

[8]. The Comprehensive R Archive Network. Available at: <https://cran.r-project.org/> (A/D 04 May 2025)

[9]. Fritsch, S. et al. (2022), Package ‘neuralnet’, 15 pages, <https://cran.r-project.org/web/packages/neuralnet/neuralnet.pdf> (A/D 04 May 2025)

[10]. Sign in, RPubS. Available at: <https://rpubs.com/> (A/D 4 May 2025)

[11]. Where developers learn, share, & build careers Stack Overflow. Available at: <https://stackoverflow.com/> (A/D 04 May 2025)

[12]. Thonny, Python IDE for beginners. Available at: <https://thonny.org/> (A/D 04 May 2025)

[13]. Welcome to Python.org. Available at: <https://www.python.org/> (A/D 04 May 2025)

Yuriy Zanichkovskyy, PhD Student
Volodymyr Fast, PhD, Assoc. Prof.
yurii.v.zanichkovskyi@lpnu.ua
Lviv Polytechnic National University

GRAPH-ENHANCED LLM TEXT-TO-SQL FOR LARGE-SCALE INFOCOMMUNICATION SYSTEM ANALYTICS

Modern Infocommunication Systems (ICS) are characterized by an exponential growth in data volume and heterogeneity, with data distributed across various repositories with distinct structures and formats (relational DBs, NoSQL, data lakes, APIs, etc.). In live ICS environments, data assets live across graph connected silos: real time NWDAF tables, KPI marts time-series databases, billing aggregates in relational databases, and streaming logs in streaming databases. Effective use of this data for decision-making requires tools that allow users, including those without deep technical knowledge, to formulate complex queries. Traditional data access methods, such as writing SQL queries directly or using complex BI tools, often become bottlenecks. Text-to-SQL technologies offer a promising solution, but their scalability and adaptation to heterogeneous environments remain relevant scientific and technical challenges. LLMs have recently surpassed 90 % accuracy on academic text to SQL benchmarks, but those benchmarks assume a single, well scoped schema [1]. The aim of this work is to develop conceptual foundations and architectural solutions for building scalable Text-to-SQL frameworks capable of providing intelligent querying in complex, distributed ICS.

The proposed architecture integrates Natural Language Understanding (NLU), knowledge graph augmentation, and federated query execution to enable scalable, intelligent translation of natural language queries into

structured SQL or hybrid query forms, suitable for heterogeneous information environments. The system consists of five major components: User Interface, Query Processing and SQL Generation, Metadata and Knowledge Management, Query Execution, and Scalability & Intelligence Layer.

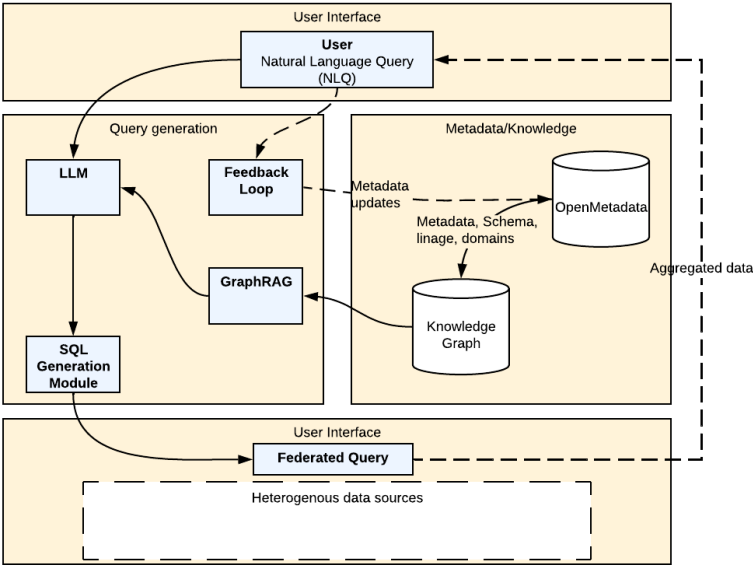


Figure 1. Proposed architecture for Graph-Enhanced Text-To-SQL

At the entry point, the system receives user input in the form of a natural language query. This layer facilitates interaction between non-technical users and the underlying data infrastructure, enabling intuitive access to complex data ecosystems.

The input query is first processed by the LLM based Natural Language Understanding (NLU) module, which employs modern NLP techniques

such as Named Entity Recognition (NER), reasoning and intent recognition. The output includes the semantic structure of the query—identified entities, attributes, and user intent.

This structured representation is then passed to a Graph Retrieval-Augmented Generation (GraphRAG) module [3]. This module retrieves contextual knowledge from a semantically enriched Knowledge Graph (KG) to enhance understanding of domain-specific terminology, inter-entity relationships, and schema constraints [2]. The KG itself is derived and continuously enriched from the OpenMetadata catalog.

Next, the SQL Generation, Validation, and Optimization module utilizes a Large Language Model (LLM), guided by both the semantic parse from the NLU and contextual signals from the GraphRAG, to generate an executable SQL (or cross-system query). This step includes schema alignment, type validation, and optimization strategies to improve execution performance and correctness.

Central to this architecture is the OpenMetadata platform (or alternative data catalogue), serving as the source of truth for metadata about all datasets, including schemas, data lineage, and semantic tags [6]. It provides the foundational layer for constructing the Knowledge Graph, which is enriched with semantic relationships and operational dependencies to support intelligent reasoning during query generation. This graph structure plays a dual role: it aids query disambiguation and acts as a dynamic context provider for the LLM used in generation.

The system supports federated query execution through a dedicated orchestration module. This module receives the generated SQL or hybrid query and dispatches it across multiple backend systems, including:

- Relational Databases (e.g., PostgreSQL, MySQL)
- NoSQL Systems (e.g., MongoDB)
- API-accessible Services
- Data Lakes

The system includes built-in mechanisms for adaptive learning and performance optimization. This approach supports heterogeneous, multi-source querying, crucial in modern info-communication systems where data resides across disparate formats and storage paradigms. Aggregated results are collected, normalized, and returned to the user.

This work presents a graph-enhanced Text-to-SQL framework tailored for heterogeneous, large-scale info-communication systems. The proposed architecture integrates advanced natural language understanding with contextual augmentation from a knowledge graph built on top of OpenMetadata, enabling robust and semantically accurate SQL generation.

Preliminary results obtained from synthetic datasets indicate that Graph-based context enrichment significantly improves SQL generation accuracy in multi-domain schemas.

To rigorously evaluate the system's generalizability and performance, we propose the following future research directions:

- Benchmarking on Public Text-to-SQL Datasets (BIRD, Spider [4][5])
- Benchmarking on Open Datasets in Telecommunications to simulate real-world info-communication queries
- Refine the process of extracting domain-specific relationships from OpenMetadata to improve performance in telecom-specific ontologies

[1] Hong, Z., Yuan, Z., Zhang, Q., Chen, H., Dong, J., Huang, F. & Huang, X., Next Generation Database Interfaces: A Survey of LLM based Text to SQL., February 2025

[2] Sequeda, J.F., Allemang, D. & Jacob, B., A Benchmark to Understand the Role of Knowledge Graphs on Large Language Model's Accuracy for Question Answering on Enterprise SQL Databases., 2023, doi: arXiv:2311.07509

- [3] Edge, D., Trinh, H., Cheng, N., Bradley, J., Chao, A., Mody, A. et al. (2025) From Local to Global: A Graph RAG Approach to Query Focused Summarization., April 2024, doi: arXiv:2404.16130
- [4] Yu, T., Zhang, R., Yang, K., Yasunaga, M., Wang, D., Li, Z. et al. (2019) Spider: A Large-Scale Human-Labeled Dataset for Complex and Cross-Domain Semantic Parsing and Text-to-SQL Task. EMNLP 2018, doi: arXiv:1809.08887
- [5] Fokoue, A., Jayaraman, S., Khabiri, E., Kephart, J.O., Li, Y., Shah, D. et al. (2024) A System and Benchmark for LLM-based Q&A on Heterogeneous Data, September 2024, doi: arXiv:2409.05735
- [6] Ehrlinger, L., Schrott, J., Melichar, M., Kirchmayr, N., and Wöß, W. (2021) Data Catalogs: A Systematic Literature Review and Guidelines to Implementation. September 2021, doi: 10.1007/978-3-030-87101-7_15

Anatolii Lozhkovskyi, Dr. of Tech. Sc., Prof.

loshke80@ukr.net

State university of intelligent technologies and telecommunications

MATHEMATICAL CONCEPTS OF CLUSTER ANALYSIS, VECTOR MACHINE ALGORITHM AND NEURAL NETWORKS IN MASS SERVICE SYSTEMS

Nowadays, mass service networks are researched by using a variety of methods. However, the results that have been achieved this far are intermediate ones, especially, in case of multi-service telecommunication networks. The present abstracts provide an overview of cluster analysis, support vector machine (SVM) and neural networks algorithms. The comparative analysis of mentioned models' prediction results was conducted, and it was practically showed that neural networks can provide a powerful tool for the telecommunications industry because Neural Networks are nonlinear dynamic systems able to offer a solution almost anywhere where classic methods have failed. Neural Networks have certainly become one of the key technologies nowadays, though critical analysis reveals some drawbacks.

There is many scheduling methods presented in literature, most of them based on Data science algorithms, multilayer supervised networks and other competitive algorithms. All these models are capable to deal with bursty traffic in any conditions.

1. Cluster Analysis – is the task of grouping a set of objects in such a way that objects in the same group (called a cluster) are more similar (in some sense or another) to each other than to those in other groups (clusters).

Let us consider *k*-mean method, whereas an example, we generated data for the three different segments in the form of records with traffic parameters (traffic intensity, traffic irregularity, parameter-1, parameter-2, parameter-3) shown below (Python programming language code, uses the NumPy library):

```
c1 = np.array([19., 100., 0.6, 44., 5.])
c2 = np.array([26., 110., 0.8, 55., 200.])
c3 = np.array([45., 90., 0.77., 70., 20.])
v1 = np.array([5., 20., 0.15, 10., 6.])
v2 = np.array([7., 30., 0.1, 23., 20.])
v3 = np.array([12., 32., 0.1, 27., 12.])
d1 = np.random.normal(c1, v1, size=(200,5))
d2 = np.random.normal(loc=c2, scale=v2, size=(120,5))
d3 = np.random.normal(loc=c3, scale=v3, size=(150,5))
data = np.vstack((d1,d2,d3))
```

Let us do some clean-up after data generation for *i* in `range(data.shape[0])`: `a,g,s1,s2,s3 = data[i]` if `a < 10`: `a = 10`.

Now the data is normalized, which means all vectors are distributed inside the unit cube. An example of data normalization:

```
plt.scatter(data[:,1:2], data[:,2:3])
plt.axis('equal')
plt.plot([0,0,1,1,0], [0,1,1,0,0], 'r')
```

For this normalized data calculated Customer traffic intensity distribution:

```
In [219]:
plt.hist(data[:,0:1]*(d_max-d_min)[0] + d_min[0],
bins=20)
plt.show()
```

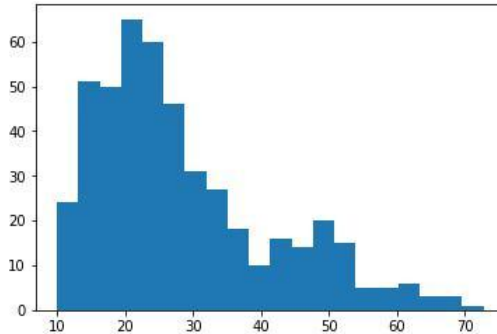


Figure 1. Customer traffic intensity distribution

It is then easy to see how each traffic parameter is distributed compared to other traffic parameters.

2. Support Vector Machine – supervised ML algorithm for data classification

Training dataset:

Let us consider 5 labeled samples for each class:

(Python uses the scikit-learn library for machine learning, from sklearn import svm)

```
X1 = d1[:20]
```

```
Y1 = np.ones(20).astype('int')
```

```
X2 = d2[:20]
```

```
Y2 = 2 * np.ones(20).astype('int')
```

```
X3 = d3[:20]
```

```
Y3 = 3 * np.ones(20).astype('int')
```

```
X = np.vstack((X1,X2,X3))
```

```
Y = np.hstack((Y1,Y2,Y3))
```

```
#clf = svm.SVC(kernel='linear')
```

```
clf = svm.SVC()
```

```
clf.fit(X, Y)
```

```
print "Correctly predicted 1: %i%%" % (100*clf.score(d1, np.ones(d1.shape[0]).astype('int')))
```

```
print "Correctly predicted 2: %i%%" % (100*clf.score(d2, 2*np.ones(d2.shape[0]).astype('int')))
```

```
print "Correctly predicted 3: %i%%" % (100*clf.score(d3, 3*np.ones(d3.shape[0]).astype('int')))
```

We have got predicted results:

Correctly predicted parameter-1: 15%

Correctly predicted parameter-2: 100%

Correctly predicted parameter-3: 14%

3. Neural Networks

The fundamental idea of artificial neural is to assemble several single simple processors that interact through a dense web of interconnections, which result in a network architecture that is unlike the sequential linear processing and architecture of conventional computer systems. A neural network consists of many simple processing elements called neurons or nodes. Each neuron is connected to other neurons by means of directed communication links, each one with an associated weight. The weights represent information being used by the network to solve a problem.

One of the most popular neural network architectures is the multi-layer feed forward neural network, also called multi-layer perceptron (MLP):

1. Each processing element receives input from other elements.
2. The inputs are weighted and added.
3. The result is then transformed (by a transfer function) into the output.

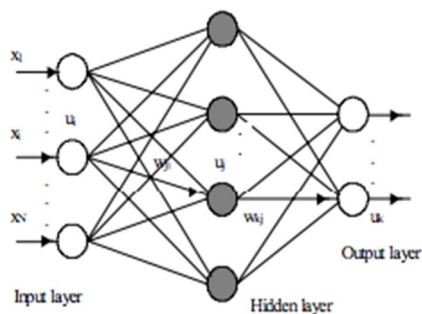


Figure 2. An example of a multilayer neural network

After entering the training data, we got the predicted results:

Correctly predicted for parameter-1: 84%

Correctly predicted for parameter-2: 90%

Correctly predicted for parameter-3: 32%

The results of the research show that the differences in prediction between neural networks and SVM are statistically significant.

Conclusion: K-means cluster analysis effectively solves classification problems, and neural networks provide higher prediction accuracy than SVM, which helps analyze the characteristics of queueing networks. Neural networks are applicable in telecommunications for encoding, decoding, error correction, image processing, fraud detection, software analysis, and predictive modeling. They are also used in design, management, routing, and control of networks with thousands of nodes and diverse traffic.

[1] Edwards T, Tansley D.S.W, Frank R.J. & Davey N. Traffic Trends Analysis Using Neural Networks. // Proceedings International Workshop on Applications of Neural Networks to Telecommunications 3 (IWANNT'3), 2003.-P.157– 164.

[2] Field, S.D.H., Davey, N., Frank, R. J./Using Neural Networks to Analyze Software Complexity// Australian Journal of Intelligent Information Processing Systems. – 1999. – Vol 3, No. 3. – P.14–32.

Maksym Rudenko, student
Svitlana Sotnik, Dr. of Tech. Sc., Assoc. prof.
maksym.rudenko@nure.ua
svetlana.sotnik@nure.ua
Kharkiv National University of Radio Electronics

EVALUATING RELATIONAL DATABASE SCALING STRATEGIES IN WEB ENGINEERING

In web engineering, relational databases remain the basis for storing structured information, which enables the operation of numerous online services [1, 2]. With the growth of data volumes and the number of users, there is a need to ensure stable operation of databases under high loads, which makes scaling a critical aspect of their architecture [3-5]. Choosing the right scaling strategy affects the efficiency of web applications, but implementation comes with some challenges. Namely, maintaining consistency, distributing the load and adapting the architecture. This necessitates an assessment of existing approaches and the definition of practical recommendations for their application.

Database scaling is the adaptation of the system to the growth of data volumes or an increase in the number of queries. There are two basic approaches to scaling: scale-up and scale-out. Vertical scaling involves increasing the capacity of a single server, such as adding RAM, a more powerful processor, or a faster SSD storage. The implementation of this approach is simple, but it has physical and economic limitations, which makes it less effective when working with large systems. Horizontal scaling, in turn, distributes the load across multiple servers. This allows for

high availability and performance, however, requires a more complex architecture and careful management of data consistency.

Another aspect to consider when choosing a scaling strategy is the type of database load. For transactional systems, write speed and data integrity are key, while for analytical systems, read and aggregation efficiency is important. However, web applications typically work with hybrid workloads, which also requires an integrated approach to scaling.

Relational databases, unlike many NoSQL solutions, follow a strict data schema and provide support for transactions, making them difficult to scale horizontally. However, traditional scaling approaches, such as replication, sharding, or clustering, require a deep understanding of the database architecture and application program logic.

Next, we will consider the key strategies for horizontal scaling of relational databases that are used in practice in web engineering.

One of the most common approaches is replication, where copies of a database are synchronized between multiple nodes. The classic version uses the master-slave model, where one server (master) accepts all records and updates, and the rest (slaves) serve read requests. This allows you to reduce the load on the main server and improve performance with a large number of reads. But this approach requires synchronization mechanisms and accounting for replication delays, which can lead to data inconsistency.

More complex, but also more flexible, is multi-master replication, where all nodes can both read and modify data. This scheme provides high availability and resilience to failures, but creates risks of change conflicts, which requires additional algorithms to resolve them, for example, using node priority.

The next method of horizontal scaling is sharding – distributing data between independent databases, where each stores only a part of all information. For example, users can be categorized by geographic region.

The advantage of sharding is the ability to process a large number of requests in parallel and avoid overloading a single server. But the implementation of sharding requires changes in the logic of the application, since requests must be routed to the appropriate shard, and combining data from different shards becomes more difficult.

Another option is clustering, including the use of solutions such as Galera Cluster for MySQL, which enables synchronous replication between nodes with simultaneous write support. This approach provides a high level of consistency, but requires low network latency between servers and more complex administration.

An auxiliary but extremely important practice is the use of caching (such as Redis or Memcached), which allows you to reduce the number of database accesses, especially for repetitive, infrequently changed queries. Caching is not scalable in the literal sense, but it provides quick access to the information you need and improves system performance.

Thus, horizontal scaling is based on a combination of approaches that allow you to distribute the load, increase fault tolerance, and ensure the efficient operation of relational databases in scalable web applications.

Now that the most effective methods for scaling relational databases have been identified, let's evaluate them. A comparative analysis of these strategies will allow you to assess their feasibility depending on the requirements of a particular web application. The main evaluation criteria are: performance, reliability, complexity of implementation, data consistency and scalability.

Replication is effective when read operations predominate, as in content platforms or analytics systems. On the other hand, in systems with a large number of concurrent entries or transactions (such as financial services), master-slave replication quickly becomes a bottleneck. Multi-master configurations reduce this limitation, but make it more difficult to maintain

consistency. This method provides good readability, medium reliability, and low implementation complexity, but requires compromises in consistency.

Sharding allows data to be distributed across nodes and provides the highest scalability. It is optimal for systems with a large amount of data and millions of users (marketplaces, social networks), but it is too complex and inefficient for small applications or projects with closely related tables. Provides the best performance and scalability, but requires complex routing logic and consistency control.

Clustering (for example, based on Galera Cluster or MySQL Group Replication) will be appropriate in financial or medical systems where data loss is unacceptable, but will be excessive for less critical projects. It provides high data consistency and reliability, but requires a stable infrastructure and complex administration.

No strategy is universal. A combination of multiple approaches, such as replication with caching or sharding with clustering, is often effective. This allows for a balance between scalability, performance, and data consistency. Preliminary architecture analysis and modeling of scaling scenarios contribute to the creation of adaptive and stable systems.

After all, scaling relational databases is not only a technical task, but a strategic decision that determines the durability and competitiveness of a web project.

[1] M. Rudenko, S. Sotnik, "Overview of approaches to scaling relational databases in development and adaptation of web applications" in Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: Тези доповідей XII Міжнародної науково-практичної конференції (10-12 грудня 2024 р., м. Запоріжжя), pp. 398-402

[2] S. Sotnik, V. Manakov, V. Lyashenko, "Overview: PHP and MySQL features for creating modern web projects" in International Journal of Academic Information Systems Research (IJAIRS), vol. 7, no. 1, pp. 11-17, Jan. 2023

[3] S. V. Sotnik, A. D. Yechevskyi, "Analysis of collecting data process on products at different stages of production " in Стан, досягнення та перспективи інформаційних систем і технологій / Матеріали XXIV Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених, аспірантів та студентів. Одеса, 18-19 квітня 2024 р., pp. 84-86

[4] A. S. Andreiev, et al., "Computer games and Web design" in Proceedings of the XVII International scientific and practical conference «Information technologies and automation– 2024», pp. 712-714

[5] V. G. Kaponkin, et al., "The role of big data in improving functionality of search engines" in The 8th International scientific and practical conference “European congress of scientific achievements” (August 12-14, 2024) Barca Academy Publishing, Barcelona, Spain. 2024, pp. 69-76

Тягунова М.Ю., канд.техн.наук., доц.
Бобирь Д.С., асп. гр. А-172-13
mary.tyagunova@gmail.com
dmitriyboby@gmail.com
НУ «Запорізька політехніка»

ОСОБЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ СУЧАСНОЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ПІДБОРУ МОТОРНОЇ ОЛИВИ

У сучасних умовах розвитку транспортної інфраструктури та промислових технологій зростає потреба в інноваційних підходах для забезпечення надійної роботи техніки. Важливим чинником у цьому є правильний вибір мастильних матеріалів, зокрема моторної оливи. Її якість і відповідність умовам експлуатації безпосередньо впливають на термін служби, енергоефективність та безпечну роботу двигунів. Незважаючи на наявність різних цифрових рішень на ринку, жодне з них не може забезпечити повну незалежність від виробника, масштабованість і адаптивність до реальних умов експлуатації техніки.

На сьогоднішній день більшість існуючих інструментів для підбору оливи орієнтовані на конкретних виробників і не враховують індивідуальних технічних характеристик та умов експлуатації [1, 2]. Це створює потребу у створенні універсальної автоматизованої системи підтримки прийняття рішень щодо вибору моторної оливи.

Метою роботи є визначення вимог до створення автоматизованої системи підбору моторної оливи, що враховуватиме широкий спектр технічних і експлуатаційних параметрів, буде незалежною від бренду та здатною до гнучкої інтеграції з іншими цифровими платформами.

На сучасному ринку існують онлайн-платформи брендів (Castrol, Motul), мобільні застосунки (Oil Finder, AutoMate), ERP-модулі на автосервісах [3, 4]. Але вони мають ряд певних недоліків: орієнтуються на продукцію одного бренду, не враховують специфічні умови експлуатації, слабка інтеграція з іншими інформаційними системами, ручне введення параметрів. З урахуванням низки існуючих проблем сучасних автоматизованих систем підбору моторної оливи [5], у роботі пропонується створення нової системи. Вона повинна враховувати незалежність від бренду, де система працює з базами даних різних виробників, і мати модульну архітектуру з можливістю масштабування. Система повинна мати свою інтеграцію через API, коли дані оновлюються у режимі реального часу. До того ж важливою складовою є наявність універсального інтерфейсу взаємодії з клієнтом (вебплатформа та мобільний додаток).

Також треба врахувати функціональні та нефункціональні вимоги. До функціональних вимог відносимо: збір даних про транспортний засіб (модель, рік, двигун), аналіз умов експлуатації (температура, навантаження, зношеність), генерація рекомендацій щодо типу та марки оливи, альтернативні варіанти у разі відсутності продукту, рекомендації щодо інтервалу заміни та мати можливість формування звітів у форматі PDF або HTML. До нефункціональних вимоги відносимо: високу швидкість обробки запитів, надійність та стійкість до навантажень, захист персональних даних користувачів, можливість автономного (локального) та хмарного використання, інтуїтивний інтерфейс, адаптований для користувачів з різним рівнем підготовки.

Реалізація запропонованої концепції дозволить значно підвищити якість обслуговування техніки, знизити ризики пов'язані з використанням невідповідних мастильних матеріалів, а також забезпечити ефективну роботу сервісних центрів. Застосування

інтелектуальних технологій сприятиме постійному вдосконаленню системи на основі накопичених даних.

Таким чином, дотримання висунутих вимог при реалізації розвитку цифрової підтримки технічного обслуговування транспортних засобів.

[1] Pavlenko, I., Pitel', J., Ivanov, V., Berladir, K., Mižáková, J., Kolos, V., & Trojanowska, J. (2022). Using regression analysis for automated material selection in smart manufacturing. *Mathematics*, 10(11), 1888.

[2] Aziza, O. R., Uzougbo, N. S., & Ugwu, M. C. (2023). AI and the future of contract management in the oil and gas sector. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 19(3), 1571-1581.

[3] Вебсистема підбору оливи Motul. URL: <https://www.motul.com/uk-UA/lubricants>

[4] Вебсистема підбору оливи Castrol. URL: https://www.castrol.com/uk_ua/ukraine/home/product-finder.html

[5] Aljuboury, M. I. A. (2021). Designing an ERP System by Adopting the Decision Tree Algorithm: A Case Study in the General Company of Oil Products Distribution. *TANMIYAT AL-RAFIDAIN*, 40 (130), 102-134.

Dmytro Stepanov
Maksym Seniv, PhD., Assoc. Prof.
dmytro.s.stepanov@lpnu.ua
maksym.m.seniv@lpnu.ua
Lviv Polytechnic National University

METHODS FOR EVALUATING THE RELIABILITY OF WEB PORTALS AT DIFFERENT STAGES OF DEVELOPMENT USING THE INTEGRATION OF IMMUTABLE INFRASTRUCTURE AND CONTAINERIZATION

Web portals are critical for modern business. This study evaluates reliability assessment methods for web portals during development, focusing on immutable infrastructure and containerization to enhance stability and scalability, as traditional methods may be insufficient for increasingly complex systems[1]. The research will analyze current methods, explore the impact of immutable infrastructure and containerization on reliability, investigate their integration across development stages, and develop practical recommendations. This study benefits developers and project managers aiming for high reliability in dynamic environments by improving development, testing, and the adoption of advanced technologies.

Reliability metrics in software development

Reliability in software development is crucial and measured by metrics like MTBF, MTTR, downtime, and error rate. While traditional evaluation methods involve test coverage and performance monitoring, they may not suffice for complex systems. Modern approaches like immutable infrastructure, ensuring unchanged post-deployment components, and containerization, isolating software for consistent performance and scalability, significantly

improve reliability, especially for high-traffic web portals. Assessing reliability across development stages requires a clear plan using evolving key indicators, from code quality in development to defect detection in testing, and metrics such as cyclomatic complexity and test coverage. Integrating immutable infrastructure and containerization enhances the accuracy of these evaluations, leading to more reliable web portals and optimized development processes[2].

Methods of data collection and analysis

Data collection, crucial for metric accuracy, occurs via code analysis in design, version control and CI/CD pipelines in development for automation and continuous monitoring, and continuous testing tools in testing for early defect detection [3]. Analysis must consider each stage's specifics [4] and leverage CI/CD integrated tools for continuous reliability verification, enabling timely issue detection.

Data analysis, the final assessment stage, identifies architectural risks in design, component stability and code quality in development, and defects and testing effectiveness in testing. Machine learning and big data can enhance prediction accuracy based on historical data, ensuring higher web portal reliability and reducing operational risks.

Development stage

Reliable web portal development hinges on software code quality, emphasizing adherence to standards, readability, maintainability, and error minimization. Metrics like cyclomatic complexity and test coverage assess code complexity, efficiency, and reliability. Cyclomatic complexity quantifies program complexity by the number of independent test paths required.

Formula for calculating cyclomatic complexity:

$$M=E-N+2P$$

Where: M — cyclomatic complexity, E — the number of edges in the program control flow graph (represents transitions between operations),

NN – the number of nodes in the graph (represents operations, conditions, etc.), PP is the number of components associated with the flow of control (usually 1 for an application).

Cyclomatic complexity reflects code logic complexity. High values indicate many conditionals/loops, complicating testing and maintenance; functions above 10 may need refactoring for simplicity[5].

The importance and relationship of metrics

Cyclomatic complexity and test coverage are key for code quality assessment, identifying testing needs and code coverage. They help locate and test risky code areas. Effective configuration management, crucial for complex portals, maintains system consistency using automation tools.

Build time and frequency indicate development efficiency. Optimizing build time enhances team efficiency, while high frequency reflects effective CI/CD.

Various tools automate processes and ensure quality throughout web portal development, including static/dynamic analysis, automated testing, and configuration management.

Integrating CI/CD with immutable infrastructure, where instances are replaced for updates, significantly improves deployment reliability by reducing configuration drift.

Combining configuration management, drift monitoring, build optimization, and CI/CD with immutable infrastructure greatly enhances web portal reliability and stability, ensuring high-quality development and rapid change implementation crucial for large systems.

Research results

Maintaining web portal reliability throughout development is crucial. Integrating immutable infrastructure and containerization improves stability

and predictability [6], mitigating configuration drift. This study highlights how these technologies provide a more reliable and scalable structure for intricate web systems. Automated code coverage testing with immutable infrastructure ensures consistent software testing, minimizing environment-related errors through Docker and CI/CD, utilizing tools like Jest and Jacoco. Empirical findings indicate a 20% decrease in error rates and a 15% improvement in MTTR. Furthermore, containerization enables rapid scaling, enhancing both reliability and performance. Static code analysis using tools such as SonarQube within a containerized setup increases the precision of identifying potentially problematic code, thereby enhancing reliability and stability. Automated configuration control and drift monitoring, employing tools like Terraform and integrated with immutable infrastructure, guarantee early detection and correction of inconsistencies, ultimately boosting reliability, predictability, and stability across all phases of web portal development.

1. Hub M., and M. Zatloukal. 2010. "Model of Usability Evaluation of Web Portals Based on the Fuzzy Logic." WSEAS Transactions on Information Science and Applications 7, no. 1: 29-39. Accessed August 22, 2024.

2. Sambir A., Yakovyna V., Seniv M. Recruiting software architecture using user generated data // Perspective technologies and methods in MEMS design (MEMSTECH) : proceedings of XIIIth International conference, Polyana, April 20–23, 2017 – Львів : ПП "Вежа і Ко". – С. 161 – 163.

3. Yuriy Bobalo, Vitaliy Yakovyna, Maksym Seniv, Ivan Symets Technique of automated construction of states and transitions graph for the analysis of technical systems reliability // Proceedings of the 13th

International scientific and technical conference CSIT-2018, 11-14 September 2018. – Lviv, Ukraine 2018. – P. 314-317.

4. Ivan Symets, Maksym Seniv, Vitaliy Yakovyna and Yuriy Bobalo. Techniques of Automated Processing of Kolmogorov–Chapman Differential Equation System for Reliability Analysis of Technical Systems // Proceedings of the 15th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics CADSM 2019, February 26 – March 2, 2019 Polyana-Svalyava (Zakarpattia), Ukraine, P. 130-135.

5. Yuriy Bobalo, Maksym Seniv, Ivan Symets Algorithms of automated formulation of the operability condition of complex technical systems // Perspective technologies and methods in MEMS design (MEMSTECH'2018) : pros. of XIV-th Intern. Conf., 18-22 april 2018, Lviv – Polyana, Ukraine: III "Бежа і Ко". – P. 14-17. DOI: 10.1109/MEMSTECH.2018.8365692

6. Dmytro Stepanov (2023). Research on Development Methodology Utilizing Immutable Infrastructure and Its Impact on Software Reliability. 18th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), Lviv, Ukraine. DOI: 10.1109/CSIT61576.2023.10324201

Igor Kravets, PhD., Assoc. Prof
Ostap Shuparsky, Student
Andriy Luchechko, Dr.Sc., Prof.
Igor.Kravets@lnu.edu.ua
Ivan Franko National University of Lviv

THREE STAGE WEIGHTED LEAST SQUARES ALGORITHM FOR TDOA-BASED LOCALIZATION

The time-difference-of-arrival (TDoA) method is popular for indoor tracking systems due to its simplicity, efficiency, performance, and low power consumption. To solve the non-linear optimization problem of tag coordinates calculation from number of measurements on synchronized anchors, often a low complexity linear least square technique or one of its more advanced variants are used: e.g. two-step least squares or constrained least squares methods (2LS). However, these techniques suffer from an ill-conditioned problem for a specific anchors and tags locations lying on vectors of high symmetry, so a new Parametric Three-stage Least Squares algorithm is proposed (P3LS).

New algorithm identifies a family of solutions and works even in rank deficient conditions, ensuring accurate and reliable estimates for core areas of the anchor nodes mesh cells. To achieve the best performance outside the core area, the hybrid algorithms are also introduced utilizing the eigenvalue ratio and independent parameter correlation criteria to switch between algorithms. The performance of the proposed algorithms was analyzed under conditions of Gaussian noise for square mesh

The Time-Difference-of-Arrival equation:

$$c\tau_{i1} = \mathbf{d}_i - \mathbf{d}_1 = \|\mathbf{R}\mathbf{x}_i - \mathbf{T}\mathbf{x}\| - \|\mathbf{T}\mathbf{x}\|,$$

where $\mathbf{d}_i = \|\mathbf{R}\mathbf{x}_i - \mathbf{T}\mathbf{x}\|$ – distance to i^{th} anchor, $\mathbf{d}_1$ - reference anchor

First step:

Multiple data from anchors after linearization form system of equations:

$$\mathbf{G}_1 \mathbf{p}_1 \approx \mathbf{h}_1,$$

where

$$\mathbf{G}_1 = 2 \begin{bmatrix} x_2 & y_2 & c\tau_{21} \\ x_3 & y_3 & c\tau_{31} \\ x_4 & y_4 & c\tau_{41} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_i & y_i & c\tau_{i1} \end{bmatrix} \quad \mathbf{h}_1 = \begin{bmatrix} x_2^2 + y_2^2 - (c\tau_{21})^2 \\ x_3^2 + y_3^2 - (c\tau_{31})^2 \\ x_4^2 + y_4^2 - (c\tau_{41})^2 \\ \vdots \\ x_i^2 + y_i^2 - (c\tau_{i1})^2 \end{bmatrix} \quad \mathbf{p}_1 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ d_1 \end{bmatrix}$$

However, d_1 is treated as an independent variable to simplify second order curve intersection computations.

To estimate position of the tag under conditions of overestimated system of linear equations

$$\hat{\mathbf{p}}_1 = (\mathbf{G}_1^H \mathbf{G}_1)^{-1} \mathbf{G}_1^H \mathbf{h}_1$$

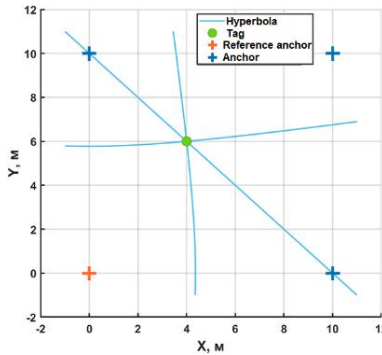


Figure 1. Model of positioning measurement system

Second step:

Equation $\mathbf{x}^2 + \mathbf{y}^2 = \mathbf{d}_1^2$ resolves independency of $\mathbf{d}_1$ and finalizes estimation:

$$\mathbf{G}_2 \mathbf{p}_2 \approx \mathbf{h}_2,$$

where

$$\mathbf{G}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{p}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{x}^2 \\ \mathbf{y}^2 \end{bmatrix} \quad \mathbf{h}_2 = \hat{\mathbf{p}}_1^2$$

However, in case of matrix $\mathbf{G}_1^H \mathbf{G}_1$ is singular, error could reach significant values. This could be solved with proposed new Parametric Three-stage Least Squares algorithm, based on eigenvectors of $\mathbf{G}_1^H \mathbf{G}_1$.

That is proven that in case of the ill-condition problem, the least squares solutions $\hat{\mathbf{p}}_1$ of the TDoA system of linear equations $\mathbf{G}_1 \mathbf{p}_1 \approx \mathbf{h}_1$ forms a line in the direction of the linear span of the $\mathbf{G}_1^H \mathbf{G}_1$ matrix eigenvector with a smallest eigenvalue

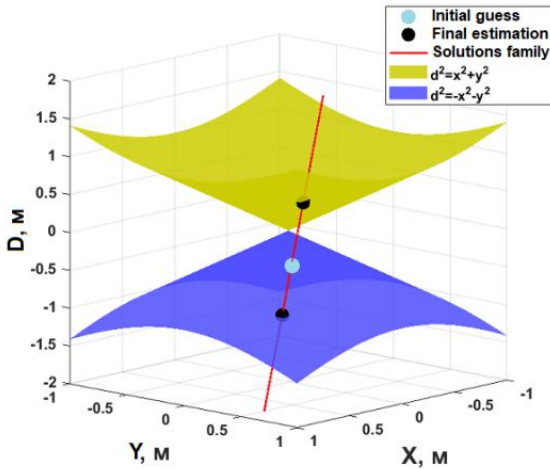


Figure 2. Family of solutions created by matrix singularity

This span is described parametrically as:

$$\hat{\mathbf{p}}_2 = \hat{\mathbf{p}}_1 + \alpha \mathbf{v}_{\min},$$

$$\text{where } \mathbf{v}_{\min} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_d \end{bmatrix} \quad \hat{\mathbf{p}}_1 = \begin{bmatrix} \hat{x}^{(1)} \\ \hat{y}^{(1)} \\ \hat{d}^{(1)} \end{bmatrix} \quad \hat{\mathbf{p}}_2 = \begin{bmatrix} \hat{x}^{(2)} \\ \hat{y}^{(2)} \\ \hat{d}^{(2)} \end{bmatrix}.$$

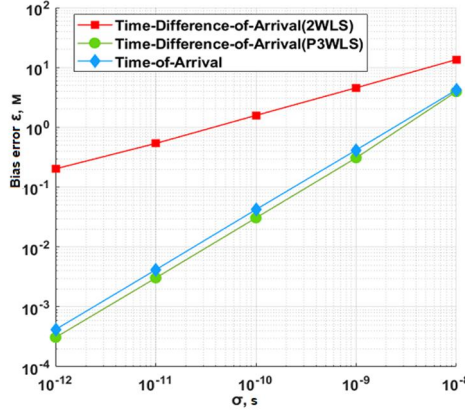


Figure 3. Bias error of different algorithms tested under different variance of Gaussian white noise

Final solution is interpreted the intersection of conic surface and line, and calculated by quadratic equation.

Parametrical Algorithm shows good results related to 2WLS staged under the same conditions.

[1] I. Kravets, O. Kapshii, O. Shuparsky, and A. Luchechko, "A New Parametric Three Stage Weighted Least Squares Algorithm for TDoA-Based Localization," IEEE Access, vol. 12, pp. 119829–119839, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3449444.

[2] J. Ni, D. Arndt, P. Ngo, C. Phan, K. Dekome, and J. Dusl, "Ultra-wideband time-difference-of-arrival high resolution 3D proximity tracking system," in Proc. IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, India, May 2010, pp. 37–43, doi: 10.1109/PLANS.2010.5507198.

[3] M. Luo, X. Chen, S. Cao, and X. Zhang, "Two new shrinking-circle methods for source localization based on TDoA measurements," *Sensors*, vol. 18, no. 4, p. 1274, Apr. 2018, doi: 10.3390/S18041274.

[4] L. Lin, H. C. So, F. K. W. Chan, Y. T. Chan, and K. C. Ho, "A new constrained weighted least squares algorithm for TDOA-based localization," *Signal Processing*, vol. 93, no. 11, pp. 2872–2878, Nov. 2013, doi: 10.1016/J.SIGPRO.2013.04.004.

[5] G. Lindfield and J. Penny, Chapter 5—Solution of Differential Equations, 4th ed., New York, NY, USA: Academic, 2019, ch. 5, pp. 239–299, doi: 10.1016/B978-0-12-812256-3.00014-2.

Яковенко В.В., д.т.н., с.н.с.
Фурманова Н.І., к.т.н., доц.
Романенко Ю.В.
yakob@ukr.net
nfurmanova@gmail.com
30.09.1982u@gmail.com
Військова академія (м. Одеса)
НУ «Запорізька політехніка»

СИСТЕМОТЕХНІЧНИЙ ПІДХІД ДО ПОБУДОВИ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ОЦІНЮВАННЯ ОПТИМАЛЬНОСТІ УКРИТТЯ ЦИВІЛЬНОГО НАСЕЛЕННЯ

Захист цивільного населення у сучасних умовах гібридної війни рф проти України є не лише гуманітарною, а й інфокомунікаційною, системотехнічною та інженерною задачею. Постійні повітряні атаки у великих містах та урбанізованих районах створюють нові виклики щодо безпеки мирного населення [1]. Укриття, що історично розглядалися як пасивний інструмент захисту, повинні бути інтегровані у динамічні інформаційні системи, що адаптуються до змін загроз у режимі реального часу.

На сьогодні цивільна інфраструктура більшості міст України не має достатньої інтеграції з цифровими системами прогнозування атак, що обмежує ефективність евакуаційних процесів та розподілу ресурсів захисту. Критично важливим є створення інтелектуальної платформи, яка здатна моніторити загрози, прогнозувати наслідки атак, визначати оптимальні маршрути евакуації та оперативно оновлювати інформацію про укриття.

Також врахування вторинного ураження від уламків після перехоплення повітряних цілей має ключове значення для реальної оцінки безпеки. Більшість сучасних систем захисту фокусуються лише на безпосередньому ударі, залишаючи поза увагою вплив осколків, ударних хвиль і каскадних руйнувань міської забудови.

Основною метою дослідження є розробка адаптивної інфокомунікаційної моделі, що дозволяє:

- оперативно оцінювати придатність укриттів до різних типів атак із використанням складних аналітичних алгоритмів та сценарного моделювання;
- інтегрувати дані укриттів у платформи типу «Безпечне місто» та забезпечити їх зв'язок із системами сповіщення населення;
- прогнозувати наслідки атак за допомогою математичних моделей вторинного ураження та методів баластного моделювання поширення вибухової хвилі;
- оптимізувати маршрути евакуації відповідно до актуальних даних про місто, враховуючи поведінкові характеристики населення, погодні умови та ступінь забудованості району;
- впровадити мобільний застосунок з рекомендаціями щодо найближчих укриттів та індивідуальних параметрів захисту з урахуванням місця перебування, віку та мобільності користувача.

Інфокомунікаційна система складатиметься з трьох рівнів:

- рівень збору даних;
- рівень обробки даних;
- рівень ухвалення рішень.

Рівень збору даних включає:

- радіолокаційний моніторинг, що фіксує наближення ракет або безпілотних літальних апаратів (БпЛА) [2];

- ІоТ-мережі (ультразвукові, геомагнітні та сейсмічні сенсори), що визначають технічний стан укриттів;
- мобільні платформи та GPS-трекінг, що оцінюють динаміку переміщення цивільного населення;
- системи аналізу польотної траєкторії, включаючи дані від систем протиповітряної оборони та платформ типу Delta.

Рівень обробки даних:

- використовує методи багатофакторного аналізу, лінійної згортки критеріїв, сценарного моделювання та адаптивних регресійних моделей;
- визначає стійкість укриттів відповідно до параметрів загрози;
- виконує баластне моделювання, що прогнозує наслідки ураження уламками;
- коригує вагові коефіцієнти в режимі реального часу відповідно до змінних загроз.

Рівень ухвалення рішень:

- генерує персоналізовані рекомендації на основі віку, мобільності та місця перебування користувача;
- забезпечує інтерактивний дашборд для органів місцевого самоврядування;
- інтегрується з картою укриттів, що оновлюється автоматично.

Формула оцінювання безпечності укриттів [3] має вигляд:

$$F(x) = a_1f_1(x) + \dots + a_if_i(x) + \dots + a_Kf_K(x), \quad (1)$$

де a_i – вагові коефіцієнти при локальних критеріях оптимальності, коригуються залежно від конкретного сценарію загрози; $f_i(x)$ – параметри, що враховують технічний стан, середній час евакуації, доступність та фактор вторинного ураження; i – індекс локального критерію (1, 2, ..., K).

Також модель враховує:

- ймовірність уламкового ураження після перехоплення ракети;
- аналіз розташування укриття щодо відкритої місцевості та забудованих зон;
- вплив типу матеріалу укриття на захист від ударної хвилі.

Тестування проєкту на навчальній вибірці продемонструвало скорочення часу обробки сценарію до 0,8 с; узгодженість DSS із експертним аналізом у 92% випадків; гнучкість моделі при зміні загрози (ракета/БпЛА/каскадна атака); зменшення похибки оцінки доступності укриттів до 6% завдяки GPS-трекінгу.

Перспективи розвитку та подальші дослідження:

- розширення прогнозування загроз за допомогою RNN/LSTM;
- формування ризик-профілів районів, що враховуватимуть ступінь безпеки укриттів;
- оптимізація евакуаційних маршрутів з урахуванням мобільності населення та прогнозованих загроз;
- створення єдиної платформи цивільного захисту, що інтегрується з системами оповіщення (наприклад, «Повітряна тривога»).

Запропонована адаптивна система оцінювання укриттів дозволяє швидко реагувати на зміну загроз, використовуючи сценарне моделювання та AI-аналіз; враховувати вторинне ураження від уламків та ударної хвилі, що раніше не враховувалось у стандартних моделях укриттів; інтегрувати дані укриттів у міські платформи для підвищення ефективності евакуації та захисту населення.

Ця система закладає фундамент для створення нової масштабованої інформаційної платформи цивільного захисту, що враховує всі аспекти безпеки населення.

[1] Yakovenko, V., Furmanova, N., Malyi, O., & Sharafanov, A. (2024, October). Generalized Optimal Criteria for Urban Civilian Shelter

Selection. In *2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)* (pp. 408-411). IEEE. DOI: 10.1109/TCSET64720.2024.10755940

[2] Volochiy, B., Onishchenko, V., Ozirkovskyi, L., Shkiliuk, O., & Zmysnyi, M. (2024, October). Evaluation of Potential Capabilities of Radio Electronic Complex System for Detecting Unmanned Aerial Vehicles. In *2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)* (pp. 2811-284). IEEE. Lviv, Ukraine, 2024, pp. 1-4, doi: 10.1109/TCSET64720.2024.10755511.

[3] Yakovenko, V., Furmanova, N., Flys, I., Malyi, O., Farafonov, O., & Moroz, H. (2024). Determination of the generalized optimality criteria for selecting civilian shelter facilities from attacks by ballistic (cruise) missiles and kamikaze drones in urbanized areas. *System research and information technologies*, (3), 25-43. doi; 10.20535/SRIT.2308-8893.2024.3.02

Павлиш В. А. к.т.н., проф.
Зайвий Р.О., аспірант ІКТЕ
volodymyr.a.pavlysh@lpnu.ua
roman.o.zaivyi@lpnu.ua

Національний університет «Львівська політехніка»

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ В БЕЗПЛОТНИХ МЕРЕЖАХ З ОЦІНКОЮ ВТРАТ СИГНАЛУ

Вступ

У сучасних умовах застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) виходить за межі традиційного відеоспостереження і охоплює сфери надзвичайних ситуацій, доставки, екологічного моніторингу тощо. При цьому формуються повітряні мережі з БПЛА-вузлами — FANET (Flying Ad-Hoc Networks), які потребують стійкої маршрутизації у динамічному середовищі. Через часті зміни топології, обмежену дальність зв'язку та можливі втрати сигналу виникає необхідність в адаптивних, інтелектуальних методах маршрутизації, здатних враховувати якість каналу в режимі реального часу [1].

Оцінка втрат сигналу та інтелектуальна маршрутизація

Особливості FANET та втрати сигналу.

Мережі FANET складаються з мобільних вузлів (БПЛА), які часто рухаються з великою швидкістю. Це створює складнощі для традиційних протоколів маршрутизації (AODV, OLSR), які не враховують зміни якості каналу або реагують на них із запізненням [1].

Якість зв'язку між дронами сильно залежить від втрат сигналу, які зростають з відстанню, наявністю перешкод та зміною висоти. Для оцінки втрат сигналу використовують модель Фріса:

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

Де P_r — потужність на приймачі; P_t — потужність передавача; G_t, G_r — коефіцієнти підсилення антен; λ — довжина хвилі; d — відстань [2].

У реальних умовах використовують логарифмічну модель загасання:

$$L(d) = L(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right)$$

Де $L(d)$ — загальні втрати потужності сигналу (у децибелах, дБ) на відстані d від передавача. Це значення показує, наскільки сильно ослабився сигнал на певній дистанції в реальних умовах. $L(d_0)$ — втрати сигналу на контрольній (референтній) відстані d_0 , зазвичай у вільному просторі (часто приймають $d_0 = 1$ м або інше фіксоване значення). Це наче «базова» втрата сигналу, з якої починається обчислення. d_0 — референтна відстань, на якій відомі або виміряні втрати сигналу. Часто використовується як базовий еталон для обчислення подальших втрат. n — показник середовища (загасання), що враховує тип місцевості (відкритий простір, місто, ліс тощо) [2].

Ці моделі дозволяють не лише оцінювати втрати, а й приймати рішення щодо надійності маршруту: якщо потужність сигналу опускається нижче за поріг, вузол може заздалегідь переключити маршрут.

Інтелектуальні методи маршрутизації

Fuzzy Logic

Одним із підходів є нечітка логіка, яка дозволяє приймати рішення за кількома параметрами: рівень сигналу, залишок батареї, швидкість дрона тощо. Наприклад, модифікований протокол OLSR+ застосовує

нечіткі правила для вибору стабільних маршрутів. При цьому враховується довговічність лінку та енергоефективність [3].

Reinforcement Learning

Ще один підхід — навчання з підкріпленням (RL). Кожен вузол виконує роль агента, який отримує нагороди за доставку даних і штрафи за втрату пакетів. На основі цього він навчається оптимізованим маршрутам. Наприклад, Q-FANET — це RL-протокол, що зменшив середню затримку та кількість втрачених пакетів порівняно з AODV [4].

Прогнозування якості каналу

Іншим перспективним методом є використання прогнозування. У [5] представлено метод маршрутизації з фільтрацією Калмана, який дозволяє передбачати зміну положення дрона та втрати сигналу. Завдяки цьому мережа перебудовує маршрути до розриву лінку.

Порівняльна таблиця

Критерій	Традиційні протоколи	Інтелектуальні методи
Реакція на втрати сигналу	Після розриву	До розриву (прогноз)
Якість маршруту	Найкоротший	Найнадійніший
Адаптація	Низька	Висока (RL, Fuzzy)
Витрати ресурсів	Мінімальні	Вищі, але ефективніші
Сталість передачі	Посередня	Висока (особливо при змінах)

Приклад архітектури

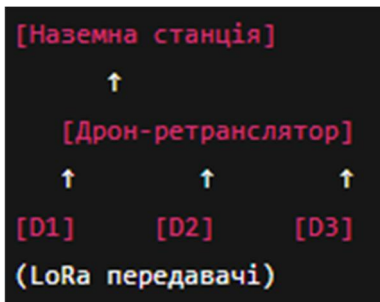


Рисунок 1. Архітектура FANET з дронами-ретрансляторами (LoRa-зв'язок), що забезпечують зв'язок між вузлами в умовах складного рельєфу [2].

Висновки

Завдяки оцінці втрат сигналу та впровадженню інтелектуальних алгоритмів маршрутизації в FANET стає значно більш адаптивною та надійною. Нечітка логіка, навчання з підкріпленням та методи прогнозування дозволяють не лише обирати ефективні маршрути, а й запобігати їх деградації ще до втрати зв'язку. Це особливо важливо в динамічних середовищах з обмеженим енергоресурсом. Подальші дослідження спрямовані на гібридизацію підходів та зменшення обчислювального навантаження.

1. Yau K.-L.A. et al. Routing Schemes in FANETs: A Survey // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20, no. 1. – P. 38. DOI: 10.3390/s20010038.
2. Saraereh O.A. et al. Performance Evaluation of UAV-Enabled LoRa Networks for Disaster Management Applications // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20, no. 8. – P. 2396. DOI: 10.3390/s20082396.

3. Rahmani A.M. et al. OLSR+: A new routing method based on fuzzy logic in flying ad-hoc networks (FANETs) // *Vehicular Communications*. – 2022. – Vol. 36. – 100489. DOI: 10.1016/j.vehcom.2022.100489.
4. da Costa L.A.L.F. et al. Q-FANET: Improved Q-learning based routing protocol for FANETs // *Computer Networks*. – 2021. – Vol. 198. – 108379. DOI: 10.1016/j.comnet.2021.108379.
5. Sun K. et al. Adaptive Extended Kalman Prediction-Based SDN-FANET Segmented Hybrid Routing Scheme // *Sensors*. – 2025. – Vol. 25, no. 5. – P. 1417. DOI: 10.3390/s25051417.

Serhii Vasylenko, PhD (Tech.), Sr. Researcher
Viktor Yerokhin, Dr. Sc. (Tech.), Prof.
vasylenko.phd@gmail.com
stdsssss@gmail.com
ISZZI Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

SUBOPTIMAL ALGORITHM FOR SEPARATION AND DEMODULATION OF THREE MUTUALLY NON-ORTHOGONAL UNEQUAL-POWER BPSK SIGNALS

In the context of the rapidly increasing demand for data transmission services, the efficient utilization of limited spectral resources becomes a critical challenge for modern radio communication systems, particularly for fifth-generation (5G) mobile networks, which face exponentially growing traffic volumes and stringent capacity requirements.

One of the promising techniques to enhance spectral efficiency in such systems is Power Domain Non-Orthogonal Multiple Access (PD-NOMA). PD-NOMA enables simultaneous transmission of multiple signals over the same time-frequency resources by assigning them different power levels at the transmitter, followed by separation and demodulation at the receiver.

However, the reliable separation and demodulation of simultaneously transmitted, mutually non-orthogonal signals with unequal power levels require the development of dedicated signal processing algorithms.

This paper proposes a suboptimal algorithm for separation and demodulation of three concurrently transmitted mutually non-orthogonal BPSK signals with different power levels. The approach is based on compensating the interference from the third (strongest) signal on the two

weaker ones, and subsequently compensating the influence of the second (medium-power) signal on the first (weakest) signal.

To reduce computational complexity and improve noise resilience, Binary Phase Shift Keying (BPSK) is selected as the modulation scheme — a justified and widely adopted solution in PD-NOMA systems due to its low demodulation complexity, high energy efficiency, and robustness in interference-prone environments with limited processing resources.

The proposed method targets radio communication systems where a balance between detection accuracy and computational cost is essential.

To demodulate three mutually non-orthogonal, unequal-power BPSK signals, individual symbol decisions must be made for each signal.

A hybrid demodulation scheme is proposed, combining Successive Interference Cancellation (SIC) and Maximum Likelihood Detection (MLD).

In particular:

The symbol of the third (strongest) signal is detected directly, without interference cancellation.

The second (medium-power) signal is detected after cancelling the strongest signal using SIC, then applying MLD.

The first (weakest) signal is detected after sequential SIC-based cancellation of both stronger signals, followed by MLD.

This suboptimal SIC-MLD approach increases computational complexity compared to traditional SIC but significantly enhances interference immunity — particularly under high power disparities and in scenarios with strong interference — while retaining lower complexity than full MLD.

The algorithm is derived using principles of statistical signal separation and optimized to minimize bit error probability in estimating the discrete parameters of each individual signal. The baseband model assumes:

$$r_1^* = \text{rect}[-K_0 thb_1 - K_{12} thb_2 - K_{13} thb_3 - K_{23} thb_1 thb_2 thb_3]. \quad (1)$$

Herein $\text{rect}(X \geq 0) = 1$; $\text{rect}(X < 0) = 0$;

$$b_{1,2,3} = \frac{2}{N_0} \int_T y_t \xi_{1,2,3}(t) dt; K_0 = 1 - th2R_{12}th2R_{13}th2R_{23} > 0;$$

$$K_{ij} = -th2R_{ij} + th2R_{ik}th2R_{jk};$$

$$R_{ij} = \frac{1}{N_0} \int_T \xi_i(t) \xi_j(t) dt; i, j, k \in \{1, 2, 3\} \overline{1, 2}; i \neq j; k \neq i; k \neq j.$$

$$y_t = \sum_{i=1}^3 (-1)^{r_i} \xi_i(t) + n(t),$$

where $n(t)$ – additive white Gaussian noise (AWGN) with one-sided power spectral density N_0 ;

$r_{1,2,3} = \overline{0, 1}$ – the information discrete signals.

Given typical BER requirements in radio channels (e.g., $\leq 10^{-4}$), the decision metric in expression (1) can be approximated by replacing $thb_{1,2,3} \approx \text{sign}b_{1,2,3} \in \overline{-1, 1}$.

Under these conditions, expression (1) simplifies to:

$$r_1^* = \text{rect} \left[-b_1 + \text{Arth} \frac{\frac{\text{sign}b_2 K_{12}}{K_0} + \frac{\text{sign}b_3 K_{13}}{K_0}}{1 + \text{sign}b_2 \text{sign}b_3 \frac{K_{23}}{K_0}} \right] \sim$$

$$\sim \text{rect} \{ -b_1 - \text{sign}b_2 [\text{Arth}(th2R_{13}th2R_{23}) - 2R_{12}] - \text{sign}b_3 [\text{Arth}(th2R_{12}th2R_{23}) - 2R_{13}] \}.$$

Assuming:

$$h_3^2 \geq 4h_2^2; h_2^2 \geq 4h_1^2, \text{ where } h_{1,2,3}^2 = \frac{1}{N_0} \int_T \xi_{1,2,3}^2(t) dt,$$

We finally obtain the approximation: ($th2R_{23} \approx 1$ and $th2R_{12} \approx 1$):

$$r_1^* = \text{rect}[-b_1 + \text{sign}(b_2 - 2R_{23}\text{sign}b_3)2R_{12} + \text{sign}b_3 2R_{13}]).$$

Conclusions. A key requirement for effective PD-NOMA performance is maintaining a minimum power level difference of 6 dB between simultaneously transmitted signals. This enables the receiver to apply joint SIC and MLD procedures effectively. Greater power separation improves detection accuracy and reduces residual interference from stronger to weaker signals. The proposed simplified separation and demodulation algorithm facilitates the practical implementation of PD-NOMA systems with BPSK signals, making it suitable for integration into 5G mobile communication technologies.

[1] Y. Cai, Z. Qin, F. Cui, G. Y. Li and J. A. McCann, "Modulation and Multiple Access for 5G Networks," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 20, no. 1, pp. 629-646, Firstquarter 2018, doi: 10.1109/COMST.2017.2766698.

[2] O. Maraqa, A. S. Rajasekaran, S. Al-Ahmadi, H. Yanikomeroglu and S. M. Sait, "A Survey of Rate-Optimal Power Domain NOMA with Enabling Technologies of Future Wireless Networks," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 22, no. 4, pp. 2192-2235, Fourthquarter 2020, doi: 10.1109/COMST.2020.3013514.

[3] J. S. Yeom, H. S. Jang, K. S. Ko and B. C. Jung, "BER Performance of Uplink NOMA With Joint Maximum-Likelihood Detector," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 68, no. 10, pp. 10295-10300, Oct. 2019, doi: 10.1109/TVT.2019.2933253.

[4] Y. Chang and K. Fukawa, "Non-Orthogonal Multiple Access with Phase Rotation Employing Joint MUD and SIC," 2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Porto, Portugal, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/VTCSpring.2018.8417842.

[5] V.F. Yerokhin, S.V. Vasylenko "Algorithm for separation of mutually non-orthogonal signals with binary phase shift key in perspective 5G mobile communication systems". XIX International Scientific Conference "Modern Challenges in Telecommunications" MCT-2025. Conference proceedings. Kyiv. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2025, P. 141. ISSN (online) 2664-3057.

Хомутник Д.Ю., аспірант
Пукач А.І., канд. техн. наук, асист.
dmytro.y.khomutnyk@lpnu.ua
andriy.i.pukach@lpnu.ua
Національний університет «Львівська політехніка»

АВТОМАТИЗОВАНА ГЕНЕРАЦІЯ ХМАРНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ НА ОСНОВІ ВИСОКОРІВНЕВОГО ОПИСУ ПРИРОДНОЮ МОВОЮ ТА ВЕЛИКИХ МОВНИХ МОДЕЛЕЙ

Сучасний світ неможливо уявити без всесвітньої мережі Інтернет. Розвиток навчальних інституцій, бізнесів будь-якого напрямку, громадських організацій тісно пов'язаний з наявністю інформації про них в мережі [1]. Звідси випливає необхідність створювати і підтримувати Інтернет-інфраструктуру, здебільшого хмарні сервіси.

Налаштування хмарної інфраструктури вимагає високої кваліфікації, тому цим займаються вузькопрофільні спеціалісти. З розвитком підходу «Інфраструктура як код» (IaC) більшій кількості розробників стало дещо простіше створювати хмарні інфраструктури [2]. Однак процес досі залишається складним і вимогливим до поглиблених знань користувача. І одним з потенційних рішень для спрощення процесу опису хмарних інфраструктур є використання генеративних моделей штучного інтелекту.

Постановка задачі. Метою роботи є зменшення складності опису хмарної інфраструктури за допомогою великих мовних моделей (ВММ). Це дає змогу користувачам без глибоких технічних знань створювати повноцінні конфігурації IaC [3]. Завдяки застосуванню великих мовних моделей як агентів для генерування хмарних інфраструктур, у користувачів є можливість надавати загальний опис

компонентів хмарної інфраструктури та отримувати згенерований код, що детально описує таку інфраструктуру.

Методика дослідження. Розроблений метод генерації описів хмарних інфраструктур полягає у використанні проміжної мови опису, що використовує абстракції вищого рівня, ніж кінцева мова Terraform. Опис проміжної мови представлено в роботі [4]. Модель представлена на рис. 1.

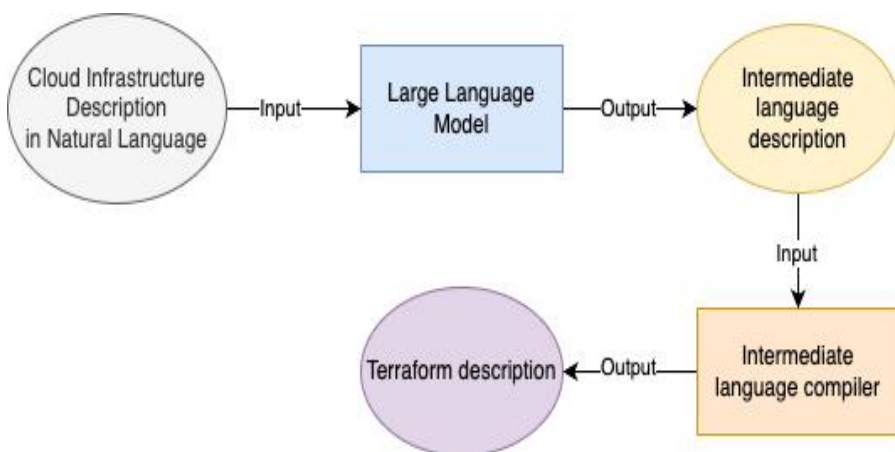


Рисунок 1. Модель генерації опису хмарної інфраструктури.

Реалізація методу виконана з використанням моделі DeepSeek R1 з 7 мільярдами параметрів та підтримкою “chain-of-thought” [5]. Для цієї моделі необхідні окремі інструкції для роботи з Terraform та з проміжною мовою. Інструкції надавались в схожому обсязі для більш об’єктивного порівняння результатів. Також використовується компілятор проміжної мови у мову Terraform.

Дослідження проводиться з наступними трьома прикладами запитів від користувачів:

1. Створення приватного серверу.
2. Створення публічного серверу.
3. Створення публічного серверу з автоматичним розподіленням навантаження серед декількох копій.

Результати дослідження. Вищий рівень абстракцій проміжної мови та їх структурованість спрощують розуміння згенерованого опису хмарних інфраструктур. Це дозволяє уникнути семантичних помилок на ранньому етапі розробки. В таблицях 1 та 2 представлено порівняння результатів генерування різних хмарних інфраструктур з генеруванням коду мовою Terraform та проміжною мовою опису.

Таблиця 1. Порівняння результатів генерування опису мовою Terraform.

	Приклад 1	Приклад 2	Приклад 3
Кількість рядків опису	42	62	75
Кількість помилок	2 (неіснуючі параметри конфігурації)	6 (неіснуючі параметри, невідповідність конфігурацій)	8 (неіснуючі параметри, невідповідність конфігурацій)

Таблиця 2. Порівняння результатів генерування опису проміжною мовою.

	Приклад 1	Приклад 2	Приклад 3
Кількість рядків опису	12	10	22
Кількість помилок	1 (надано більше доступів, ніж необхідно)	1 (некоректна конфігурація ОС сервера)	3 (неіснуючі сутності і конфігурації)

Як видно з результатів, через низькорівневість і комплексність мови Terraform кількість рядків опису та помилок значно більше, ніж при використанні проміжної мови. Деякі згенеровані описи не готові до подальшого використання у процесі розгортання інфраструктури і потребують ручного виправлення.

Висновки. Проведене дослідження та порівняльний аналіз результатів показує доцільність використання ВММ для спрощення генерації описів хмарних інфраструктур, а також використання проміжної мови для покращення результатів роботи ВММ.

Отримані результати показують перевагу використання такого підходу над традиційним написанням описів за допомогою IaC. Стислість опису та відсутність низькорівневих деталей спрощує розуміння кінцевої інфраструктури. Менша кількість згенерованих ресурсів дозволяє зменшити потенційні витрати на розгортання і використання згенерованих інфраструктур.

З недоліків використання можна виокремити необхідність використання окремого транслятора з проміжної мови в Terraform.

Подальші напрямки досліджень. Для кращого вирішення конкретної задачі опису варто дослідити вплив тренування моделей на

відповідних наборах даних з описами хмарних інфраструктур. Крім цього, потребує ретельного дослідження потенційне використання запропонованого методу в автоматичних процесах створення хмарних інфраструктур та запуску сервісів на цих інфраструктурах.

1. Apăvăloaie, E.-I. (2014). The impact of the Internet on the business environment. *Procedia Economics and Finance*, 15, 951–958. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(14\)00654-6](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00654-6)
2. Almishal, A., & Youssef, A. E. (2014). Cloud service providers: A comparative study. *International Journal of Computer Applications & Information Technology*, 5(2), 46–53.
3. Quattrocchi, G., & Tamburri, D. A. (2023). Infrastructure as code. *IEEE Software*, 40(1), 37–40. <https://doi.org/10.1109/MS.2022.3212034>
4. Khomutnyk, D. Y., & Marchenko, O. I. (2022). *High-level technique for description of cloud infrastructure resources*. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production*, (48), 117–123. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2022-48-18>
5. Liang, W., Guo, D., Yang, D., Zhang, H., Song, J., Zhang, R., ... Zhang, Z. (2025). DeepSeek-R1: Incentivizing reasoning capability in LLMs via reinforcement learning. *arXiv preprint arXiv:2501.12948*. <https://arxiv.org/abs/2501.12948>

Олександр Головка, аспірант
Євгенія Яковенко, к.т.н., доц.
oleksandr.m.holovko@lpnu.ua
Національний університет «Львівська політехніка»

ПАРАМЕТРИ ТЕХНОЛОГІЇ LORA ТА ЇХ ВПЛИВ НА ЗАВАДОЗАХИЩЕНІСТЬ РАДІОКАНАЛУ

У зв'язку зі зростаючим попитом на енергоефективні технології бездротового зв'язку з великою дальністю дії, особливо в системах Інтернету речей (IoT), значну увагу дослідників привертає технологія LoRa. Технологія LoRa (Long Range) є однією з найперспективніших для створення енергоефективних бездротових мереж з великою дальністю дії. Вона широко використовується у системах Інтернету речей (IoT), де важливими параметрами є завадозахищеність та низьке енергоспоживання. Її основою є модуляція з розширенням спектра на базі чірп-сигналів (CSS — Chirp Spread Spectrum), яка забезпечує високу завадостійкість навіть в умовах низького співвідношення сигнал/шум (SNR). [1].

Пристрої LoRa зазвичай працюють в промислових, наукових та медичних (ISM) діапазонах частот, зокрема на 433 МГц, 868 МГц та 915 МГц. Через нормативні обмеження на потужність передачі в цих діапазонах LoRa надає пріоритет чутливості приймача для досягнення великого діапазону зв'язку. Примітно, що приймачі LoRa можуть успішно захоплювати та декодувати сигнали до 20 дБ нижче рівня шуму, що призводить до чудової чутливості приймача. Ця підвищена чутливість значною мірою сприяє розширеному діапазону та стійкості LoRa до перешкод [2].

CSS-модуляція використовує чирпи для розподілу сигналу по ширшій смузі пропускання. Чирп характеризується сигналом, частота якого лінійно змінюється з часом, або збільшуючись (upchirp), або зменшуючись (downchirp). У LoRa чирпи служать основою для кодування даних шляхом модуляції початкової частоти кожного чирпа. Коефіцієнт розширення (SF), ключовий параметр у LoRa, визначає кількість чирпів, що використовуються для представлення одного символу. Більший SF відповідає довшому чирпу та нижчій швидкості передачі даних, але він також підвищує чутливість приймача та розширює діапазон зв'язку [3].

LoRa використовує комбінацію upchirp та downchirp для побудови повного пакету. У найпростішому вигляді CSS може бути реалізована за допомогою on-off keying, де дані кодуються шляхом перемикання між upchirp та downchirp. Однак реалізація CSS у LoRa є більш складною, модулюючи дані шляхом зміни початкової частоти кожного чирпа. Миттєва зміна початкової частоти визначає межу символу [3].

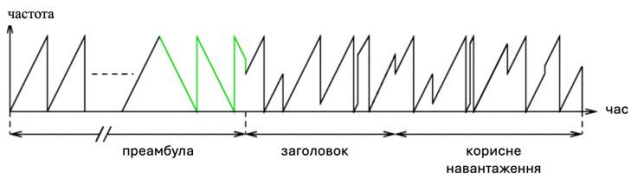


Рисунок 1. Приклад висхідного кадру LoRa

Спосіб формування чирпів у LoRa значно впливає на SNR, метрику, яка кількісно визначає силу сигналу відносно фоновому шуму. Більший SNR означає чистіший сигнал з меншою частотою помилок на біт (BER). SF відіграє домінуючу роль у визначенні SNR. Зі збільшенням SF сигнал розподіляється по ширшій смузі пропускання, що призводить до вищого коефіцієнта обробки та,

отже, вищого SNR. Цей ефект розширення робить сигнал більш стійким до перешкод та шуму [4].

Ширина смуги (BW) також впливає на SNR. Більша BW призводить до меншої тривалості чирпів, що потенційно покращує SNR. Однак це відбувається за рахунок підвищення рівня шуму, що може нівелювати переваги коротших чирпів [3].

На додаток до SF та BW, характеристики енергоспоживання пристроїв LoRa пов'язані з формуванням чирпів та SNR. Пристрої LoRa розроблені для роботи з низьким енергоспоживанням, зі струмами передачі близько 28 мА при 13 дБм та струмами прийому близько 11,5 мА. Ці низькі значення струму сприяють придатності LoRa для пристроїв з живленням від батареї та його здатності працювати протягом тривалого часу без частої заміни батареї [5].

Ще однією важливою концепцією, пов'язаною з формуванням чирпів та SNR, є "ефект захоплення". Цей ефект виникає, коли одночасно приймаються кілька сигналів LoRa з однаковим SF. У таких сценаріях приймач може успішно декодувати найсильніший сигнал, пригнічуючи слабші. Цей ефект захоплення може бути корисним у перевантажених мережах LoRa, де одночасно може передавати кілька пристроїв.

Отже, формування чирпів є ключовим для забезпечення зв'язку LoRa на великі відстані з низьким енергоспоживанням в IoT. Коефіцієнт розширення (SF) та ширина смуги пропускання (BW) визначають характеристики формування чирпів та їх вплив на співвідношення сигнал/шум (SNR). Здатність LoRa працювати при надзвичайно низьких SNR, навіть на 20 дБ нижче рівня шуму, є ключовим фактором його можливостей на великі відстані. Це дозволяє LoRa досягати більшої чутливості приймача та більшого діапазону порівняно з іншими методами модуляції. У міру розвитку технології

LoRa формування чирпів залишатиметься центральним аспектом її здатності забезпечувати надійний та енергоефективний зв'язок на великі відстані.

[1] Shilpa Devalal, A. Karthikeyan (2018) "LoRa Technology – An Overview", Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA), available at <https://ieeexplore.ieee.org/document/8474715> (Accessed 8 May 2025).

[2] YK Huang, "What is the Technology Behind LoRa Frequency", available at <https://www.mokosmart.com/lora-frequency/> (Accessed 8 May 2025).

[3] Jansen C. Liando, Amalinda Gamage, Agustinus W. Tengourtius, Mo Li (2019), "Known and Unknown Facts of LoRa: Experiences from a Large-scale Measurement Study", available at <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3293534> (Accessed 8 May 2025).

[4] Steve Worgu, Wali Samuel, Felix Edet Effiong (2022), "Computation Of Transmitter Power Requirement For LoRaWAN With Specified Chirp Spread Spectrum Modulation Bit Error Probability", available at <https://www.imjst.org/wp-content/uploads/2022/09/IMJSTP29120773.pdf> (Accessed 8 May 2025).

[5] Gwendoline Hochet Derévianckine, Alexandre Guitton, Oana Iova, Baozhu Ning, Fabrice Valois (2023), "Opportunities and Challenges of LoRa 2.4 GHz", available at https://hal.science/hal-04020100v1/file/LoRa_2_4_Opportunities_IEEE_Comm_Mag_2023_HAL.pdf (Accessed 8 May 2025)

УПРАВЛІННЯ ЗНАННЯМИ У ВИРОБНИЦТВІ ЕНТОМОЛОГІЧНОЇ ПРОДУКЦІЇ

Підвищення ефективності виробництва ентомологічної продукції гарантованої якості для біологізації землеробства в Україні потребує комплексного підходу до процесів управління знаннями, що є найважливішим активом сучасного підприємства та суттєвим чинником створення цінності [1, 2]. Реалізацію цього завдання запропоновано на основі когнітивного аналізу, застосування якого відомо у дослідженнях складних технічних систем, інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень, щодо формалізації та автоматизації слабо структурованих завдань [3]. Із використанням аналізу наукових праць [1-7] розроблено когнітивну модель процесів управління знаннями у виробництві ентомологічної продукції, структуру якої показано на рис. 1.

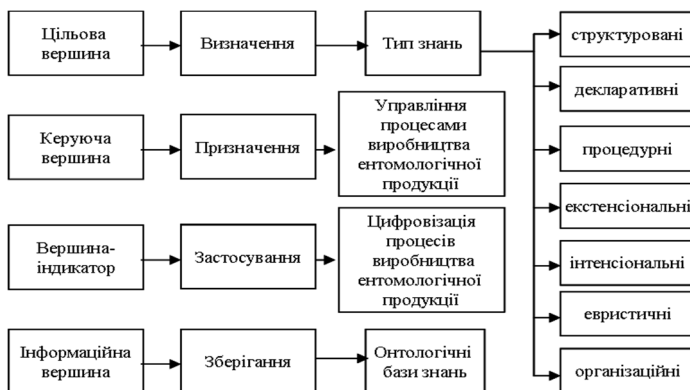


Рисунок 1. Структура когнітивної моделі процесів управління знаннями у виробництві ентомологічної продукції

У таблиці 1 наведено класифікацію визначених типів знань у виробництві ентомологічної продукції.

Таблиця 1. Класифікація знань

Тип знань	Класифікація
структуровані	фрейми, онтології, семантичні мережі, бази даних та знань, орієнтовані графи
декларативні	автоматизація процесів керування виробництвом ентомофагів, автоматизація слабо структурованих завдань, управління якістю ентомологічної продукції, управління якістю процесів виробництва ентомофагів, формування стратегій управління виробництвом в умовах невизначеності
процедурні	контроль параметрів техноценозу (абіотичних і технологічних), біологічних показників якості ентомокультур; розробка експертних систем, нейронних мереж, когнітивних карт та моделей; розробка інтелектуальних алгоритмів обробки інформації
екстенсійональні	факти (параметри техноценозу, біологічні показники якості ентомокультур, енергетичні витрати)
інтенсійональні	правила, які дозволяють отримувати нові факти (продукційні правила типу «якщо-то» експертних систем нечіткого та нейро-нечіткого висновку); поверхні нечіткого висновку; нейронні мережі
евристичні	формалізація слабо структурованих залежностей
організаційні	контроль точності підтримки технологічних вимог виробництва, дій людини у процесах управління виробництвом

Когнітивна модель містить цільову, керуючу, інформаційну вершини та вершину-індикатор. Основними процесами управління знаннями є визначення, призначення, застосування, зберігання.

Перевагами запропонованого підходу до управління знаннями у виробництві ентомологічної продукції є підвищення рівня інтелектуалізації процесів управління виробництвом, цифровізація знань щодо процесів виробництва із використанням сучасних програмних засобів.

[1] H. Ostrovska and O. Ostrovskyy, "Knowledge management in the conditions of industrial enterprises intellectualization and digitalization development," Review of transport economics and management, no. 10(26), pp. 277–289, 2023. doi: 10.15802/rtem2023/300881

[2] O. V. Nesterenko, O. V. Kovtunets and O. O. Falovsky, Intelligent Systems and Technologies. Introductory Course. Kyiv: National Academy of Management, 2017.

[3] V. P. Lysenko and I. S. Chernova, Intelligent management of entomophages production: monograph. Odesa: Phoenix, 2021.

[4] V. M. Antonenko, S. D. Mamchenko and Y. V. Rogushyna, Modern information systems and technologies: knowledge management: training. guide. Irpin: National University of State Tax Service of Ukraine, 2016.

[5] V. M. Kotsovsky, Methods and systems of artificial intelligence. Lecture notes. Uzhgorod, 2016.

[6] I. S. Sytnyk, "Knowledge management as part of the process of intellectualization of systems management enterprises," Economy and society, no. 8, pp. 354-360, 2017.

[7] I. S. Chernova, "Structuring knowledge in the processes of production management of the entomophagous *Habrobracon hebetor*," in Materials of the III All-Ukrainian scientific-practical conference "Agrarian science: state and prospects for development" (Odesa, Nov. 28-29), Odesa State Agrarian University, pp. 163-165, 2023.

Nazarii Kotliar, PhD Student.
Taras Maksymiuk, PhD., Assoc. Prof.
Igor Kravets, PhD.
nazarii.i.kotliar@lpnu.ua
taras.a.maksymiuk@lpnu.ua
dr.kravets@gmail.com
Lviv Polytechnic National University

PATH RECONSTRUCTION ALGORITHMS TO ENHANCE CONTEXT-ORIENTED SERVICES IN WIRELESS NETWORKS

The Internet of Things (IoT) is becoming increasingly popular nowadays. Projections suggest that the number of IoT devices will reach 50 billion within the next decade [1]. This growth is mainly caused by the availability of cheap narrow-band systems such as Bluetooth Low Energy (BLE) and Zigbee, which are widely used in industries including healthcare, fitness, beacons, security, and home entertainment [2]. The basic requirement for these applications is the ability to estimate the distance between two devices, which later can be used for localization purposes.

Phase-Based Ranging (PBR) method involves the measurement of IQ components at several frequencies [3, 4]. Both the initiator and reflector transmit and receive harmonic signals (tones) at each frequency, enabling the measurement of phase and magnitude. The channel is measured between two devices – initiator and reflector – on a uniform frequency sequence over the desired bandwidth [3]. These measurements can be processed using the Inverse Discrete Fourier Transform (IDFT) [5] to obtain the Channel Impulse Response (CIR). However, in a multipath environment where signals may take multiple paths to reach the receiver,

the accuracy of this method is limited due to the resolution of the IDFT [6]. In this case, instead of FFT, super-resolution algorithms such as Multiple Signal Classification (MUSIC) can be used to enhance the accuracy of ranging in multipath environments [7].

Due to the two way tone exchange, it travels twice longer distance that is between the devices (initiator and reflector). It leads to channel transfer function to be squared [8]:

$$A_i(f, d)e^{j\theta_i(f, d)} \cdot A_r(f, d)e^{j\theta_r(f, d)} = A_{ch}^2(f, d)e^{j2\theta_{ch}(f, d)}, \quad (1)$$

where $A_{i/r}(f, d)$ – magnitude of the tone measured by initiator/reflector at frequency f and distance d , $\theta_{i/r}$ – phase delay of the tone of initiator/reflector. The problem begins, when there is multipath – one or several reflections, so there becomes more than one propagation distance – Line of Sight (LoS) and Non Line of Sight (NLoS). From the equation 1, it is obvious that there will be cross modulations between distances (Figure 1).

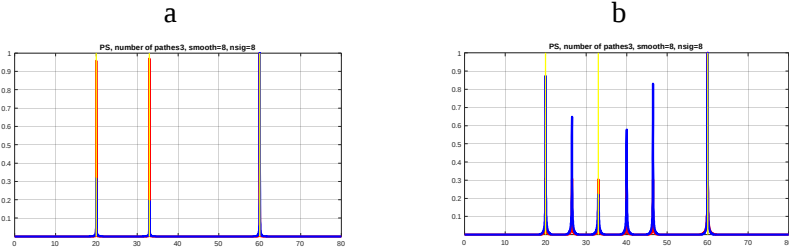


Figure 1. Example of channel impulse response of three propagation distances: a – expected; b – received due to the square of channel transfer function.

In case FFT or IDFT or similar algorithm is used to estimate channel impulse response because computational resources are limited for example, the resolution would be much less than is shown on Figure 1 due to lobes would have some width defined by frequency bandwidth. Thus, the lobes of

true paths and lobes of cross modulations can interfere with each other, which potentially can lead to significant reducing of ranging accuracy, so in such case path reconstruction algorithm is required.

Path reconstruction algorithm is about how properly take the square root of the sequence of complex values. It is known that square root of complex number has two solutions and it is not obvious which is correct in the sequence of such values (Figure 2).

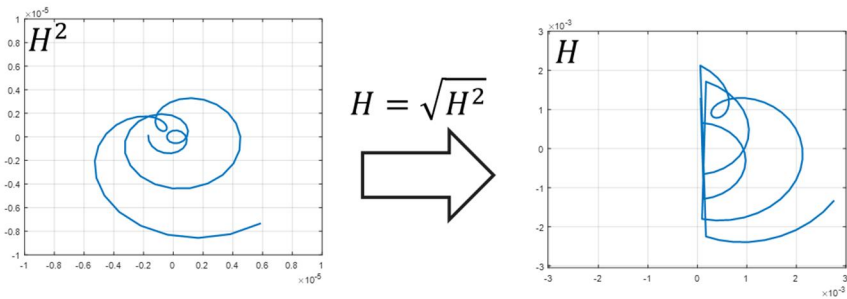


Figure 2. The ambiguity after taking square root of sequence of complex values (IQs)

Also one of the problems is that some of the IQ values can have magnitude close to zero, so the trajectory would cross the origin. In that case the phase is almost undefined due to the internal noise of the devices. So the algorithm should handle that as well. In addition, if the sequence of measured frequencies is not uniform (there are some gaps), or frequency step is instead of 1MHz – 2MHz, 4MHz, etc., it becomes much more complicated to solve the ambiguity.

Several algorithms were proposed and tested its performance according to the statistical multipath model, where IQs were generated with 1MHz frequency step [9]. The simplest one is based on the vector length between two neighbor IQs. The ambiguity is solved for the result if the vector length

between previous value and the result of square root is the shortest. The second one is based on the constant direction of the phase change of the IQ sequence. The third one is based on a race car model (turns only left), where tensor differentials are used to reconstruct the trajectory.

Addressing multipath challenges, Phase-Based Ranging requires effective path reconstruction algorithms, which can solve IQ sequence ambiguities, managing near-zero magnitudes and handling non-uniform frequency sequences.

The “Race Car” algorithm demonstrates superior performance, especially in strong multipath conditions and greater distances, outperforming simpler alternatives. For sure, there still would be cases where the path reconstruction would not work correctly, but it only highlights the necessity of robust algorithms for reliable distance estimation in complex environments.

[1] “Number of Internet of Things (IoT) connected devices worldwide from 2019 to 2030,” <https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide/>; 2023 [accessed 13 may 2024].

[2] P. Barsocchi, M. G. Cimino, E. Ferro, A. Lazzeri, F. Palumbo, and G. Vaglini, “Monitoring elderly behavior via indoor position-based stigmergy,” *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 23, pp. 26–42, 2015.

[3] W. Kluge and E. Sachse, “Distance measurement between two nodes of a radio network,” Mar. 2013, US Patent App. 13/849,166.

[4] P. Zand, J. Romme, J. Govers, F. Pasveer, and G. Dolmans, “A high-accuracy phase-based ranging solution with Bluetooth low energy (BLE),” in *IEEE Wireless Commun. and Network. Conf.*, 2019, pp. 1–8.

- [5] E. Yuan, W. Qi, P. Liu, L. Wei, and L. Chen, "Ranging method for navigation based on high-speed frequency-hopping signal," *IEEE Access*, pp. 4308–4320, 2018.
- [6] P. Boer, J. Romme, J. Govers, and G. Dolmans, "Performance of high-accuracy phase-based ranging in multipath environments," in *Proc. IEEE Int. Conf. Vehicular Tech. Conf.*, 2020, pp. 1–5.
- [7] R. Miesen, F. Kirsch, P. Groeschel, and M. Vossiek, "Phase based multi carrier ranging for UHF RFID," in *IEEE Inter. Conf. on Wireless Inf. Tech. and Sys. (ICWITS)*, 2012, pp. 1–4.
- [8] "Core Specification 6.0 PDF", <https://www.bluetooth.com/specifications/specs/core-specification-6-0/>, 2025 [accessed 2 may 2025]
- [9] A. A. M. Saleh and R. Valenzuela, "A Statistical Model for Indoor Multipath Propagation," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 5, no. 2, pp. 128-137, February 1987, doi: 10.1109/JSAC.1987.1146527

Oleh Chaplia, PhD student
Halyna Klym, D.Tech.Sc., Prof.
oleh.y.chaplia@lpnu.ua
halyna.i.klym@lpnu.ua
Lviv Polytechnic National University

PERFORMANCE AND USABILITY ASSESSMENT OF CHROMADB FOR OFFLINE SEMANTIC SEARCH

Large language models (LLMs) have become essential for a wide range of natural language tasks, including question-answering, summarization, and conversational AI, due to their ability to generalize from large-scale pretraining [1]. However, they often require access to external knowledge sources to remain accurate and current. The retrieval-augmented generation (RAG) approach uses vector databases as a foundation for data [2]. These vector databases store high-dimensional embeddings for fast similarity search [3]. Also, AI agents powered by LLMs and RAG are autonomous systems capable of understanding, generating, and reasoning, enabling various applications from virtual assistance to complex decision-making across multiple domains [4]. Modern LLM and AI Agentic applications increasingly rely on vector search to retrieve relevant documents. ChromaDB is one of the open-source vector stores designed for this purpose, offering a lightweight solution for storing and querying high-dimensional embeddings in local environments [5]. With the advent of Apple Silicon, running and fine-tuning these models locally has become more feasible, thanks to its unified memory architecture and integrated neural processing capabilities [6]. Apple Silicon is a strong foundation for

local microservices incorporating MLX, RAG, and LLMs, enabling efficient, private, and scalable edge AI deployments.

This study assesses ChromaDB's suitability for local and offline vector search applications on Apple Silicon. To achieve this, the evaluation focuses on performance metrics and the developer experience, including ease of setup and integration. Based on the results, the study offers insights into ChromaDB's strengths, limitations, and potential areas for improvement. A key limitation of this study is that it focuses exclusively on evaluating ChromaDB without performing a direct, empirical comparison against other widely used vector databases such as FAISS, Qdrant, Milvus, or Weaviate.

The evaluation dataset comprises 25 PDF documents from open-access repositories such as Springer and arXiv, with file sizes varying from 0.14 MB to 7.97 MB, with an average size of approximately 2.50 MB. Text was extracted from each file, excluding all images and non-text elements. The extracted text was segmented into fixed-size chunks of 1,000 characters using a sliding window with a 200-character overlap. Before chunking, the text was normalized to remove common PDF artifacts, including Unicode normalization (NFKC), removal of hyphenated line breaks, newline consolidation, space reduction, and stripping of bullets, page markers, and other formatting. Document lengths varied significantly, with word counts ranging from 1935 to 32275 (average: 11926) and character counts from 15150 to 182247 (average: 75617). The number of generated text chunks per document ranged from 19 to 224, with an average of approximately 93 chunks.

ChromaDB processes natural language queries by embedding the input text and comparing it to stored document vectors to return the number of most semantically similar results. By default, Chroma utilizes the “*all-MiniLM-L6-v2*” model from Sentence Transformers to generate

embeddings. It also uses L2 (Euclidean) distance to compute similarity but can be configured to use cosine similarity. By default, ChromaDB generates embeddings on the CPU unless manually configured for GPU use via CUDA, which is unavailable on Apple Silicon. MLX is not supported at the time of evaluation.

A dedicated Python application was developed to support this evaluation, incorporating a modular architecture for dataset loading, preprocessing, validation, and testing. In addition, custom Python scripts were implemented to evaluate key metrics and visualize the results for interpretation. This framework ensures consistency in experimental setup and provides a foundation for extending evaluation to other vector databases in future work.

All experiments were conducted on a local machine equipped with Apple Silicon (M1) architecture, featuring an 8-core CPU and 16 GB of unified memory. This configuration represents a typical development environment for lightweight, offline AI applications.

The evaluation produced a set of results for ChromaDB under local conditions. Figure 1 shows two performance-related plots for ChromaDB. In (a), insertion time generally increases with document character count but shows variability, indicating that processing overhead affects performance. Insertion times into ChromaDB ranged from 0.80 to 1.61 seconds, averaging 0.91 seconds, with most insertions completing between 0.8 and 1.1 seconds. In (b), query time remains stable across varying query lengths, with most queries completing between 0.7 – 0.9 seconds, suggesting that query length has minimal impact on retrieval latency. These results indicate that ChromaDB’s performance is more sensitive to document size during insertion than to query length during retrieval. All queries used a fixed setting of top $n = 3$, returning the three most similar results by vector similarity.

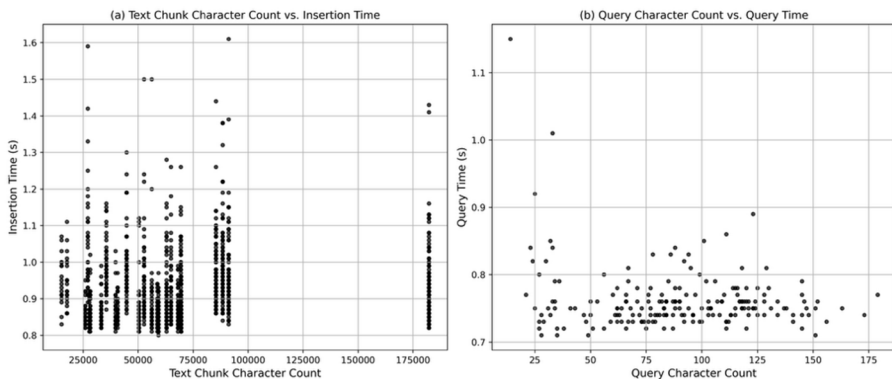


Figure 1. Performance trends in ChromaDB

After inserting the processed text and embeddings, ChromaDB occupied approximately 379.6 MB of disk space, including vector data, metadata, and persistence files. During the evaluation, memory usage ranged from approximately 615 to 1124 MB of real memory.

In summary, ChromaDB stands out for its simplicity, fast setup, and Python-native design. It is well-suited for local experimentation, offline applications and rapid prototyping in LLMs powered by retrieval-augmented generation (RAG) workflows. Its minimal configuration requirements, built-in embedding support, and tight integration with popular LLM allow developers to quickly build and test semantic search systems without the overhead of managing external infrastructure.

However, ChromaDB's SQLite-based persistence limits its scalability for larger datasets. There are opportunities for improvement, particularly by introducing features commonly found in production-grade vector databases, such as hybrid search, fine-grained filtering, and Apple Silicon GPU acceleration.

Despite these constraints, it fills an important niche between low-level libraries and enterprise vector search platforms by offering a practical, developer-friendly tool for academic, educational, or low-scale operational use. Future improvements could expand its relevance to broader applications, such as on-disk indexing, sharding, and real-time querying enhancements.

[1] H. Naveed *et al.*, “A Comprehensive Overview of Large Language Models,” Apr. 09, 2024, *arXiv*: arXiv:2307.06435. Accessed: Jun. 06, 2024. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2307.06435>

[2] S. Zhao, Y. Yang, Z. Wang, Z. He, L. K. Qiu, and L. Qiu, “Retrieval Augmented Generation (RAG) and Beyond: A Comprehensive Survey on How to Make your LLMs use External Data More Wisely,” Sep. 23, 2024, *arXiv*: arXiv:2409.14924. doi: 10.48550/arXiv.2409.14924.

[3] Z. Jing, Y. Su, and Y. Han, “When Large Language Models Meet Vector Databases: A Survey,” Nov. 01, 2024, *arXiv*: arXiv:2402.01763. doi: 10.48550/arXiv.2402.01763.

[4] X. Li, S. Wang, S. Zeng, Y. Wu, and Y. Yang, “A survey on LLM-based multi-agent systems: workflow, infrastructure, and challenges,” *Vicinagearth*, vol. 1, no. 1, p. 9, Oct. 2024, doi: 10.1007/s44336-024-00009-2.

[5] “ChromaDB,” ChromaDB. Accessed: Apr. 17, 2025. [Online]. Available: <https://trychroma.com>

[6] C. Kenyon and C. Capano, “Apple Silicon Performance in Scientific Computing,” in *2022 IEEE High Performance Extreme Computing Conference (HPEC)*, Sep. 2022, pp. 1–10. doi: 10.1109/HPEC55821.2022.9926315.

¹Леонід Озірковський, д.т.н., доцент

^{1,2}Богдан Волочій, д.т.н., професор

²Володимир Онищенко, к.т.н.

¹Юрій Жук

¹Назар Приймак

leonid.d.ozirkovskyi@lpnu.ua, bohdan.y.volochii@lpnu.ua

onishchenkovolodymyr@gmail.com, yurii.p.zhuk@lpnu.ua

nazar.i.pryimak@lpnu.ua

¹Національний університет «Львівська політехніка»

²Національна академія сухопутних військ

імені гетьмана Петра Сагайдачного

ОЦІНЮВАННЯ СТРУКТУРНОЇ ЖИВУЧОСТІ БЕЗДРОТОВОЇ МЕРЕЖІ ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ ГРУПИ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Вступна частина

Група з чотирьох безпілотних ЛА в складі “А”, “В”, “С” і “Д” має виконати певне завдання. Завдання буде виконано, якщо за встановлений час польоту між безпілотними ЛА “А” і “Д” існуватиме зв'язок. В групі безпілотних ЛА кожний БпЛА має своє призначення, а саме: БпЛА “А” – "керівник" групи; безпілотні ЛА “В” і “С” – ретранслятори; БпЛА “Д” – "виконавець". Зв'язок між безпілотними ЛА в групі забезпечують канали 1, 2, 3, 4, 5, показані на рисунку 1. Маємо прийняти до уваги, що в процесі польоту групи ці канали втрачають працездатність. Зауважимо, що виконання завдання групи БпЛА забезпечує створена каналами бездротова мережа зв'язку з сітковою структурою. В доповіді мова йде про оцінювання структурної живучості такої мережі зв'язку.

Зазначимо, що в реальності кількість безпілотних ЛА в групі може бути різною. Зокрема може бути різною кількість ретрансляторів, кількість «виконавців» і кількість «керівників». Тому практичну цінність представляє методика визначення мінімальної кількості безпілотних ЛА в групі, яка забезпечить виконання завдання із заданим значенням показника «ймовірність виконання завдання» групою безпілотних ЛА. Для мережі зв'язку з сітковою структурою цей показник будемо визначати як ймовірність зв'язності між БпЛА “А” і “D” за встановлений час польоту групи.

В доповіді буде показано і обґрунтовано вибір методу для визначення показника "ймовірність парної зв'язності" для бездротової мережі зв'язку з сітковою структурою.

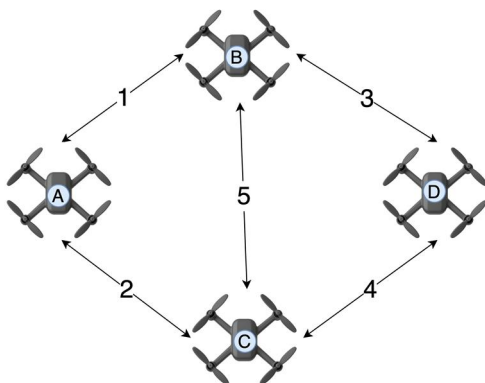


Рисунок 1. Група безпілотних ЛА з бездротовою мережею зв'язку з сітковою структурою

Змістовна частина

Для визначення показника «ймовірність парної зв'язності» для мереж зв'язку з сітковою структурою існує ряд методів логіко-ймовірнісного моделювання. Однак автори цих методів вказують, що

методики їх використання для отримання розрахункових формул не придатні для оперативного аналізу сіткових структур з великою кількістю вузлів та гілок. Тому ми обрали метод логіко-ймовірнісного траєкторного моделювання (ЛЙТМ), який має перевагу над відомими методами в тому, що ступінь формалізації методики його застосування дає змогу компоувати формули для розрахунку значень показника «ймовірність парної зв'язності» для мереж зв'язку з сітковою структурою, в яких є велика кількість вузлів та гілок.

Практичне використання методу ЛЙТМ показало, що результати обчислення показника «ймовірність парної зв'язності» для мережі зв'язку з сітковою структурою залежать від призначеного порядку розгляду траєкторій, які мають спільні гілки. У методі ЛЙТМ порядок вибору траєкторій для проходження ймовірнісних пакетів і відповідного компоування формули не обумовлений.

На рис.2 графічно зображено всі прості траєкторії проходження між початковим А і кінцевим D вузлами (полюсами) топологічного графа мережі зв'язку під час компоування формули для розрахунку значення показника її структурної живучості – ймовірність парної зв'язності.

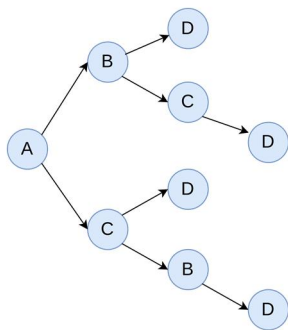


Рисунок 2. Зображення всіх простих траєкторій проходження ймовірнісних пакетів між початковим А і кінцевим D вузлами

Порівняємо два сценарії для встановлення порядку розгляду траєкторій для компонування формули:

- I в першому сценарії перше проходження з формуванням ймовірнісних пакетів здійснюється по траєкторії A-B-D;
- I в другому сценарії перше проходження з формуванням ймовірнісних пакетів здійснюється по траєкторії A-B-C-D.

Ймовірнісні пакети формуються шляхом послідовного проходження гілок траєкторії з урахуванням як ймовірностей існування, так і ймовірностей не існування цих гілок.

В таблиці 1 показано, як результати обчислення показника «ймовірність парної зв'язності» для мережі зв'язку з сітковою структурою залежать від призначеного порядку розгляду траєкторій, які мають спільні гілки.

Таблиця 1. Значення показника зв'язності для мережі зв'язку в сітковою структурою між полюсами A та D для двох сценаріїв проходження траєкторій між ними.

Перша траєкторія у встановленому порядку проходження траєкторій	Ймовірності зв'язності між вузлами A і D	Ймовірності не зв'язності між вузлами A і D
A-B-D	0,97119	0,02881
A-B-C-D	0,83439	0,16561

Тобто метод логіко-ймовірнісного траєкторного моделювання є чутливим до встановлення порядку розгляду траєкторій для проходження ймовірнісних пакетів. В цій роботі сформульовано правило призначення порядку розгляду траєкторій. В даному розгляді спільну гілку АВ мають перша і друга траєкторії. А спільну гілку АС мають

третя і четверта траєкторії. Для призначення порядку розгляду траєкторій, які мають спільну гілку, треба визначити значення ймовірностей існування траєкторій. Ймовірність існування кожної траєкторії визначаємо як добуток відповідних ймовірностей існування гілок, що її складають (утворюють). Отже призначати порядок розгляду траєкторій треба від траєкторії з найбільшим значенням ймовірності існування до траєкторії з найменшим значенням. Згідно запропонованого правила в розглянутому вище прикладі, порядок розгляду траєкторій має бути такий: $ABD \rightarrow ABCD \rightarrow ACD \rightarrow ACBD$.

Ця робота виконана за підтримки Національного фонду досліджень України, проект № 2023.04/0116 «Модульна акустична система моніторингу повітряного простору» за конкурсом «Наука для зміцнення обороноздатності України».

Висновок

Використання методу ЛЙТМ забезпечує визначення показника живучості великої групи БпЛА, для якої виконання завдання забезпечує бездротова мережа зв'язку з сітковою структурою.

І приймаючи до уваги вимогу до значення показника «ймовірність виконання завдання», метод дає можливість обґрунтовано вводити в склад групи додаткові безпілотні ЛА для забезпечення необхідного рівня її живучості.

Карнаух Д.М., аспірант
Тягунова М.Ю., канд. техн. наук, доц.
Киричек Г.Г., канд. техн. наук, доц.
d.karnaukh@gmail.com
mary.tyagunova@gmail.com
kirgal08@gmail.com
НУ «Запорізька політехніка»

РЕСУРСИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ДО ПЕРЕШКОД БЕЗДРотовИХ МЕРЕЖ СИСТЕМ ІОТ

Актуальна тенденція для сучасного соціуму – підвищення безпеки і комфорту шляхом використання інтелектуальних електронних систем, що використовують велику кількість пристроїв: камер, датчиків, актуаторів та інших елементів системи «Інтернету речей» (IoT), об'єднаних у мережі. Наприклад, проблема оптимізації адаптивного регулювання дорожнього руху на перехрестях з використанням новітніх підходів, пов'язаних із застосування штучного інтелекту [1], розвиток міської інфраструктури в «розумних» містах через інтеграцію інформаційно-комунікаційних технологій та IoT [2], попит на комфортне та безпечне сучасне житло [3] та інше.

Використання провідних з'єднань стає неприпустимо складним, збільшує вартість інсталяції та обслуговування всієї системи. Можливість заміни провідних мереж передачі даних з великою кількістю пристроїв на бездротові мережі знімає ці обмеження, але вимагає забезпечення високої завадостійкості в складних умовах перехресних та індустріальних перешкод в міських агломераціях. Телекомунікаційна мережа повинна вміти реагувати на можливі зміни в середовищі поширення сигналу.

Підвищення стійкості радіоканалів зв'язку до перешкод – актуальне науково-технічне завдання в контексті розбудови цифрових мереж, існує значний запит на надійний зв'язок з підвищеною перешкодо-дозахищеністю для коротких дистанцій.

Новий стандарт IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) для бездротових мереж надає додаткові можливості для створення гнучких мереж пристроїв IoT, що демонструють високу стійкість до радіоперешкод.

Ключові функції IEEE 802.11be, які підвищують стійкість мережі до радіоперешкод:

- смуга пропускання розширена до 320 МГц;
- додано частотний діапазон 6ГГц, який менш завантажений, ніж діапазони 2,4ГГц і 5ГГц, що використовуються зараз;
- множинний доступ із ортогональним частотним поділом (OFDMA) – надає змогу кільком споживачам поділяти між собою ресурси одного каналу [4];
- багатоканальна робота (Multi-Link Operations) – це ключовий аспект нового стандарту, він надає можливість відправлення та отримання потоку даних з допомогою кількох радіоінтерфейсів одночасно з використанням всіх наявних частотних ресурсів системи в смугах 2,4ГГц, 5ГГц та 6ГГц.

IEEE 802.11be об'єднує декілька фізичних радіоінтерфейсів в один віртуальний, з однією MAC-адресою. Потік даних розподіляється між інтерфейсами (радіоканалами) автоматично, залежно від якості сигналу. Для клієнта мережі канали усіх частотних діапазонів (2,4ГГц, 5ГГц та 6ГГц) віртуально об'єднані в один діапазон. Це дозволяє виключити затримки перемикання на канал іншого частотного діапазону (через слабкий рівень сигналу або зовнішні перешкоди) [4,5].

Дані можна передавати асинхронно через декілька каналів. Це значно покращує стійкість з'єднання до перешкод. Перемикання між каналами відбувається динамічно, без розриву з'єднання [5,6].

У дослідженні [7] було здійснено випробування ефективності роботи багатоканальних комунікаційних протоколів. Конфігурації для тестів наведено на рис. 1, результати тестування – на рис. 2.

Багатоканальні конфігурації демонструють суттєво кращі результати, ніж одноканальні. А при модуляції 4096-QAM та ширині смуги 320МГц пропускна здібність досягає до 30 Гбіт/с.

Cases	Aggregation	Link	CBW (MHz)	QAM
Case 1-1	1024 ✓	1	320 ✓	4K ✓
Case 1-2	256	2 (320 MHz for link 1 + 160 MHz for link 2) ✓	320 ✓	4K ✓
Case 1-3	256	2 (320 MHz for link 1 + 320 MHz for link 2) ✓	320 ✓	4K ✓
Case 1-4	1024 ✓	2 (160 MHz for link 1 + 160 MHz for link 2) ✓	160	4K ✓
Case 1-5	1024 ✓	2 (320 MHz for link 1 + 160 MHz for link 2) ✓	320 ✓	1K
Case 1-6	1024 ✓	2 (320 MHz for link 1 + 320 MHz for link 2) ✓	320 ✓	1K
Case 2-1	1024 ✓	2 (320 MHz for link 1 + 160 MHz for link 2) ✓	320 ✓	4K ✓
Case 2-2	1024 ✓	2 (320 MHz for link 1 + 320 MHz for link 2) ✓	320 ✓	4K ✓
Case 3	1024 ✓	3 (320 MHz for link 1 + 160 MHz for link 2 + 160 MHz for link 3) ✓	320 ✓	4K ✓

Рисунок 1. Конфігураційні параметри [7]

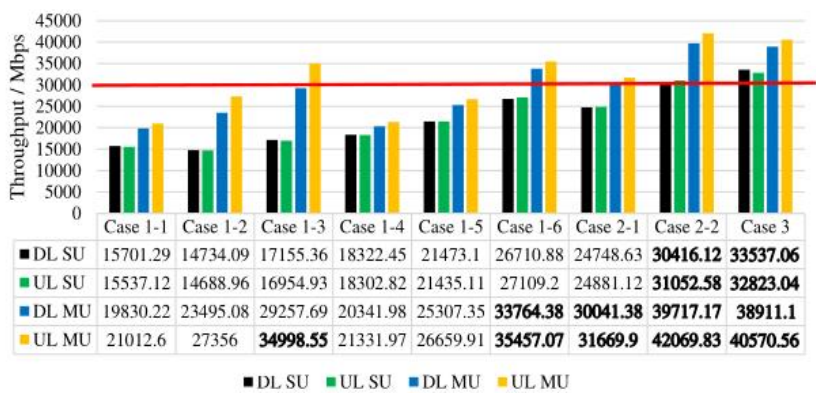


Рисунок 2. Пропускна спроможність [7]

Висновки. Зростання числа пристроїв IoT, збільшення вимог до стабільності бездротового з'єднання є основними факторами розвитку мереж бездротового зв'язку. Стандарт IEEE 802.11be суттєво покращує стійкість, надійність та пропускну здатність бездротових каналів завдяки впровадженню багатоканального режиму та вдосконаленим механізмам управління якістю обслуговування. Функціонал стандарту знайде широке застосування в таких сферах, як промисловий IoT, «розумні міста», для підключення сенсорів, контролерів, роботів та ін. IEEE 802.11be є перспективним для бездротових мережевих технологій.

[1] М.Ю. Тягунова, Д.М. Карнаух, «Доцільність розробки інтелектуальних систем регулювання руху на перехрестях». Наукові праці ДонНТУ. Серія «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка». 2024. №1(38). DOI: 10.31474/1996-1588-2024-1-38-71-76.

[2] H. Rehan, «Internet of Things (IoT) in Smart Cities: Enhancing Urban Living Through Technology». Journal of Engineering and Technology, vol.5, no.1, pp.1-16, June 2023, URL: https://www.researchgate.net/profile/Hassan-Rehan/publication/383611526_Internet_of_Things_IoT_in_Smart_Cities_Enhancing_Urban_Living_Through_Technology/links/66d40d512390e50b2c2463e4/Internet-of-Things-IoT-in-Smart-Cities-Enhancing-Urban-Living-Through-Technology.pdf

[3] S. Padmanaban, M.A. Nasab, M.E. Shiri, H.H. Javadi, M.A. Nasab, M. Zand, T. Samavat, «The Role of Internet of Things in Smart Homes. Artificial Intelligence based Smart Power Systems» / ed. by S. Padmanaban, S. Palanisamy, S. Chenniappan, J.B. Holm-Nielsen. 2022. P.259-271. DOI: 10.1002/9781119893998.ch13

[4] E. Avdotin, D. Bankov, E. Khorov, A. Lyakhov, «Resource allocation strategies for real-time applications in Wi-Fi 7». 2020 IEEE International

Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom). 2020. DOI: 10.1109/BlackSeaCom48709.2020.9234994.

[5]. A. Jeknic, E. Kocan, «Development Steps that Brought to Wi-Fi 7» in ETF Journal of Electrical Engineering, vol.29, no.1, 2023. DOI: 10.59497/jee.v29i1.266, URL: <https://jee.ucg.ac.me/index.php/files/article/download/266/99/311>.

[6] Á. López-Raventós, B. Bellalta, «Multi-Link Operation in IEEE 802.11be WLANs» in IEEE Wireless Communications, vol.29, no.4, pp.94-100. 2022. DOI: 10.1109/MWC.006.2100404. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=10474403>.

[7] X. Liu, Y. Dong, Y. Li, Y. Lin, X. Yang, M. Gan, «IEEE 802.11be Wi-Fi 7: Feature Summary and Performance Evaluation» in arXiv, pp.1-6, September 27, 2023. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.15951>.

Костецький Д.В., магістр
Тягунова М.Ю., канд. техн. наук, доц.
Киричек Г.Г., канд. техн. наук, доц.
dimakost1111@gmail.com
mary.tyagunova@gmail.com
kirgal08@gmail.com
НУ «Запорізька політехніка»

ОСОБЛИВОСТІ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ НА БАЗІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

У світі, де межі між фізичною та цифровою присутністю поступово стираються, освіта теж переживає трансформацію. Пандемія, війна, загроза безпеці і нестабільність, зробили дистанційне навчання життєво необхідним інструментом.

Сучасний студент має доступ до мільйонів сторінок інформації, але не завжди розуміє, які саме знання йому потрібні. Викладач витрачає години на створення тестів, проте не завжди бачить, чому студенти роблять помилки.

Саме у відповідь на ці виклики й була розроблена комп'ютерна система для дистанційного навчання з інтегрованим штучним інтелектом – не просто сайт із лекціями та тестами, а інтелектуальний помічник викладача і гнучкий інструмент для всієї освітньої інфраструктури.

В основі цієї системи – сучасні вебтехнології (Laravel, React), структурована база знань та нейромережеві моделі на базі GPT. Але головне – це науковий підхід до навчального процесу: не просто

контролювати знання, а розуміти слабкі місця, рекомендувати, пояснювати, навчати.

Там, де Moodle завершує свій функціонал – дана система починає аналіз. Ця платформа – це крок у бік майбутнього освіти, де штучний інтелект допомагає кожному студенту зрозуміти більше, і вчитись на своїх помилках.

На даний момент вже є кодова база системи у вигляді MVP (minimum viable product), що вже включає в себе: модуль автентифікації з розподілом ролей, створення курсів, додавання матеріалів, організація тестів, моніторинг успішності, генерація тестів на основі теми і короткого опису через API GPT, розклад занять, захищена система шифрування облікових даних, журналювання дій та контроль доступу до API.

Провівши експерименти було практично розглянуто переваги розробленої системи перед звичним підходом у створенні тесту, а саме порівняння витрат часу при створенні тестів за допомогою ІІІ та без ІІІ [1].

Проведене практичне тестування функціоналу виявило, що система створила тести з ідеальною якістю, а зайняло це близько 20 хвилин проти 125 коли вони створювались вручну. Отримані результати свідчать про великий потенціал цієї інновації для практичного використання.

Одним із напрямів подальшого розвитку системи є впровадження інтелектуального блоку розширеного аналізу результатів тестування, який виконує такі завдання:

1. Пояснювальний компонент, в якому студенти отримують коментарі до кожного питання у форматі: "Ваша відповідь – неправильна, тому що... Правильна відповідь – ... оскільки...". Це формує критичне мислення та глибше розуміння матеріалу;

2. Аналіз успішності, в якому система визначає найчастіше обрані хибні варіанти, класифікує типові помилки (наприклад, "логічна плутанина", "термінологічна помилка", "неуважність") – що може бути використано для групового аналізу на занятті;

3. Формування рекомендованих ресурсів, коли на основі помилок, студенту надаються індивідуальні посилання на розділи конспектів, відео чи методичні вказівки;

4. Формування адаптивних тестів, коли система автоматично формує нові тести за слабкими темами, що дозволяє студенту повторно перевірити матеріал з яким у нього були проблеми.

Цей функціонал може бути побудований на основі окремої підсистеми із власною БД знань, або з нейронною моделлю, що тренується на локальних навчальних матеріалах, щоб бути повністю впевненим в тому, що джерела будуть коректними.

Запропонована система поєднує сучасні вебтехнології та інструменти штучного інтелекту, відкриваючи новий етап у розвитку платформ для дистанційного навчання. Завдяки науковій новизні – переходу від контролю знань до інтелектуального супроводу – система має потенціал бути використаною як у закладах вищої освіти, закритих корпоративних навчальних середовищах, так і для простого саморозвитку в якійсь новій сфері.

[1] Kostetskyi D. V., Tiahunova M.Yu., Kyrychek H. H. Computer system for distance learning with integrated artificial intelligence. Proceedings of the IX International Workshop on Professional Retraining and Life-Long Learning using ICT: Person-oriented Approach (3L-Person 2024) co-located with 19th International Conference on ICT in Education, Research, and Industrial Applications (ICTERI 2024). Lviv, Ukraine, September 23, 2024. P. 160 -174. <https://ceur-ws.org/Vol-3781/paper22.pdf>

Іван Лісовий, д. т. н., професор

Igor Makarov

ur5fo55@gmail.com

miv_2000@ukr.net

Державний університет інтелектуальних
технологій і зв'язку, м. Одеса

ВПЛИВ НЕСТАБІЛЬНОСТІ ПАРАМЕТРІВ КАНАЛУ НА РІВЕНЬ ЗАВАД У РЕГЕНЕРАТОРАХ ЦИФРОВИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ

Регенерація цифрового сигналу в ЦСП по своїй природі є двомірним процесом, що включає установку по амплітуді і моменту відліку. Якість функціонування цифрової системи передачі оцінюють по око-діаграмі сигналу на вході пристрою прийняття рішення. По око-діаграмі можливо оцінити зв'язок між захищеністю сигналу від завад та ймовірністю помилки.

Відхилення характеристик тракту кабель-коректор, виявлення форми елементарного сигналу на вході пристрою прийняття рішення регенератора на фазові тремтіння сигналу тактової синхронізації (відхилення моменту відліку від оптимального) призводять до зменшення розкриття око-діаграми.

Ці відхилення від їх номінальних значень виникають внаслідок неточностей, допущених у процесі виготовлення та налаштування апаратури, а також змін параметрів елементів апаратури та зовнішніх умов, що виникли в процесі експлуатації ліній зв'язку. Крім того, зміна ряду параметрів може викликати відхилення характеристик підсилювача від розрахованої оптимальної форми. Усі ці відхилення можуть викликати появу інтенсивної міжсимвольної завади та підвищення

ймовірності помилок при передачі інформації. Будемо розглядати лише міжсимвольні завади, пов'язані з спотвореннями у високочастотній частині спектра прийнятих імпульсів. У відомих авторах монографіях [1 – 4], а також виданих у періодичній літературі статтях цим питанням не приділено належної уваги.

У монографії [4] запропоновано наближений аналітичний метод оцінки впливу малих відхилень АЧХ аналогової частини регенераційного ділянки ЦСП на форму елементарного сигналу на вході пристрою прийняття рішення регенератора.

Розглянемо методику оцінки впливу нестабільності параметрів на рівень межсимвольних завад. У проведеному нижче аналізі у всіх випадках будемо вважати, що коригуючий підсилювач регенератора забезпечує лінійність фазо-частотної характеристики тракту кабель-корректор.

Позначимо відхилення моментів взяття відліків у пристрої прийняття рішення відносно моментів, максимального рівня імпульсів. Міжсимвольна завада від імпульсів сусіднього тактового інтервалу визначається виразом

$$s_{МЧИ}(T + Dt) = \frac{1}{p} \int_0^{\pi} S(w) \times K_{каб}(w) \times K_{КVC}(w) \times \cos w(T + Dt) dw, \quad (1)$$

де $S(w)$ - спектр елементарного сигналу на вході регенераційного ділянки; $K_{каб}(w)$ - амплітудно-частотна характеристика середовища розповсюдження лінійного сигналу; $K_{КVC}(w)$ - амплітудно-частотна характеристика підсилювача – коректора; T - тривалість тактового інтервалу.

Коефіцієнт впливу параметра Dt на рівень міжсимвольних завад можливо оцінювати частковою похідною наступного виду:

$$\left| \frac{ds(T + Dt)}{dt} \right| = \left| \frac{1}{p} \int_0^{\infty} \omega S(\omega) \times K_{KK}(\omega) \times \sin \omega T \times d\omega \right|, \quad (2)$$

де $K_{KK}(\omega) = K_{kab}(\omega) \times K_{KVC}(\omega)$ - амплітудно-частотна характеристика тракту кабель-коректор.

Для визначення чутливості системи до неточності моменту відліку використовуються відповідні величини, відрховуючи рівень завади відносно порогового рівня $U_{пор}$ і відхилення Dt відносно тривалості тактового інтервалу T .

$$S_t^{\pi} = \frac{T}{U_{пор}} \left| \frac{ds(T + Dt)}{dt} \right| = \frac{T}{pU_{пор}} \left| \int_0^{\infty} \omega S(\omega) \times K_{KK}(\omega) \times \sin \omega T \times d\omega \right|. \quad (3)$$

Нехай передатна функція тракту кабель-коректора відповідає характеристикам ідеального фільтра нижньої частоти. Приймаємо форму елементарного сигналу на вході ділянки регенерації прямоутною та тривалістю $t_H = T/2$.

Спектральна густина таких імпульсів:

$$S(\omega) = \frac{UT}{2} \frac{\sin \omega T/4}{\omega T/4}. \quad (4)$$

Зверніть також увагу, що в пристрої прийняття рішення регенератора поріг $U_{пор}$ встановлюється на рівні половини амплітудного значення імпульсу на виході коректуючого підсилювача.

$$U_{пор} = \frac{1}{2} s(0) = \frac{1}{2p} \int_0^{\infty} \omega S(\omega) \times K_{KK}(\omega) \times d\omega. \quad (5)$$

Підставивши вирази (4) і (5) в (3), перейшовши до нормованої частоти $p = \omega/\omega_T$ та скінченим межам інтегрування для обчислення інтегралу

числовими методами на комп'ютері, отримали вираз чутливості до неточності хромування пристрою прийняття рішення регенератора

$$S_t'' = \frac{4p \left| \int_0^2 \frac{\sin pn/2}{pn/2} \times K_{KK}(n) \times \sin 2pn \times dn \right|}{\int_0^2 \frac{\sin pn/2}{pn/2}}. \quad (6)$$

Вплив варіації тривалості елементарного сигналу.

Оптимальна характеристика підсилювача-корректора розраховується у припущенні номінальної тривалості елементарного сигналу на вході регенераційної ділянки. При цьому зміна тривалості імпульсів призводить до того, що характеристика корегуючого підсилювача для цих нових умов вже не буде оптимальною, що викликає підвищення рівня міжсимвольних завад.

При визначенні чутливості до відхилень тривалості елементарного сигналу у виразі міжсимвольної завади представлено в спектральній функції імпульсів $S(w)$:

$$S(w) = \frac{2U}{w} \sin(w t_H / 2).$$

Таким чином, коефіцієнт впливу відхилень тривалості елементарного сигналу на рівень міжсимвольних завад буде визначатися виразом

$$\begin{aligned} \left| \frac{ds_{\text{вих}}(T)}{dt_H} \right| &= \left| \frac{d}{dt_H} \int_0^{\infty} \frac{2U}{w} \sin(w t_H / 2) \times K_{KK}(w) \times \cos wT \times dw \right| = \\ &= \frac{U}{p} \left| \int_0^{\infty} \cos wT / 4 \times K_{KK}(w) \times \cos wT \times dw \right|. \end{aligned} \quad (7)$$

Перейдемо до нормованих значень напруги завади, напруги порога та тривалості імпульсу – відношення $2t_H / T$.

При цьому

$$S_{t_H}^{II} = \frac{T}{2U_{nop}} \left| \frac{dS_{KK}(T)}{dt_H} \right| = \frac{2 \int_0^{\frac{T}{4}} \cos(w T/4) \times K_{KK}(w) \times \cos v T \times dw}{\int_0^{\frac{T}{4}} \frac{\sin v T/4}{w T/4} \times K_{KK}(w) \times dw}.$$

Перейдемо в підінтегральному виразі до нормованої частоти η , обмеживши межі інтегрування, отримуємо

$$S_{t_H}^{II} = 2 \frac{\int_0^{\frac{1}{2}} \cos(p \eta/2) \times K_{KK}(\eta) \times \cos 2p\eta \times d\eta}{\int_0^{\frac{1}{2}} \frac{\sin(p \eta/2)}{p \eta/2} \times K_{KK}(\eta) \times d\eta}.$$

Чутливість до зміни смуги пропускання підсилювача-корректора

Вважатимемо, що змінюється смуга пропускання каналу, але форма амплітудно-частотної характеристики залишається незмінною. Ці умови відображаються в коефіцієнті передачі підсилювача $K_{KVC}(w)$, замінивши аргумент w на w/g , де g - коефіцієнт, відхилення якого від одиниці характеризує зміну смуги пропускання підсилювача.

Відхилення імпульсного відгука тракту визначається за відхиленням його АЧХ, застосовувавши числові методи з використанням перетворення Фур'є.

Тоді вираз міжсимвольної завади від імпульсів сусіднього тактового інтервалу запишемо у вигляді

$$\begin{aligned} s_{MCH}(T) &= \frac{1}{p} \int_0^{\frac{w_c}{p}} S(w) \times K_{kab}(w) \times K_{KVC}\left(\frac{aw}{g}\right) \times \cos w(T) dw = \\ &= \frac{1}{p} \int_0^{\frac{w_c}{p}} \frac{UT}{2} \times \frac{\sin w \frac{T}{4}}{w \frac{T}{4}} \times e^{-a T \sqrt{w}} \times K_{KVC}\left(\frac{aw}{g}\right) \times \cos w T \times dw, \end{aligned}$$

Висновки

Зменшення тривалості елементарного сигналу викликає зменшення амплітуди сигналу на вході пристрою прийняття рішення регенератора та зменшення впливу міжсимвольної завади але зростає вплив власних завад.

Збільшення тривалості елементарного сигналу призводить до збільшення амплітуди сигналу на вході пристрою прийняття рішення регенератора та зростанню впливу міжсимвольної завади.

Необхідно визначити оптимальне співвідношення тривалості елементарного сигналу до тривалості тактового інтервалу, що мінімізує як вплив МСІ так власного шуму каналу. Це є предметом подальших досліджень.

[1] Electronic communications systems Fundamentals Through Advanced, Fifth Edition, Wayne Tomasi, DeVry university, Phoenix, Arizona Prentice Hall, 2004.

[2] Benedetto S., Biglieri E. and Castellani V. Digital Transmission Teory. Prentice Hall, 1987.

[3] Digital communications/ Fundamentals and applications, Second Edition/ Bernard Skar. Communications Engineering Service, Tarzana, California and University of California, Los Angeles. Prentice Hall P T R Upper Saddle River, New Jersey 07458, www.phptr.com

[4] Digital transmission systems. P. Bylanski, M.G.W. Ingram, Rev. 2nd ed, London, Peter Peregrinus, Ltd, 1980.

Володимир Сологуб, аспірант
Віктор Корнєєв, аспірант
Олег Яремко, к.т.н., доц.
volodymyr.r.solohub@lpnu.ua
viktor.s.kornieiev@lpnu.ua
oleh.m.yaremko@lpnu.ua

Національний університет «Львівська політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ БЕЗПРОВІДНОГО ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ МЕРЕЖ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ (IOT), ЗОКРЕМА МОДУЛЯЦІЙ LORA І LR-FHSS

Еволюція технологій бездротового зв'язку, орієнтованих на застосування в мережах Інтернету речей (IoT), зокрема модуляцій LoRa та LR-FHSS. LoRaWAN використовує модуляцію LoRa на основі розширення спектра за допомогою частотних імпульсів (CSS), зарекомендувала себе як одна з найефективніших технологій для забезпечення енергоощадного зв'язку на великі відстані. Водночас класичний підхід до реалізації LoRaWAN обмежений у пропускній здатності через спрощені MAC-протоколи та регуляторні обмеження, притаманні різним регіонам.

LoRaWAN є об'єктом активного дослідження в науковій спільноті завдяки її здатності забезпечувати ефективний зв'язок на великі відстані як у приміщенні, так і на відкритому просторі. У роботі [1] аналізується модуляція CSS, що використовується як фізичний рівень у LoRaWAN.

Запроваджуються алгоритми на основі геометричного розподілу (GD) для вдосконалення механізму адаптивного регулювання швидкості передачі (ADR), який використовується в мережах LoRaWAN [2].

Порівнюючи підхід з рівномірним розподілом вузлів і існуючими алгоритмами, такими як ADR, EXPLoRa, QCVM і SD доходимо до висновку, що вибір між коефіцієнтом успішної доставки пакетів (DER) та енергоспоживанням має базуватися на специфіці застосування.

Дослідження архітектури LoRaWAN і її основним характеристикам та застосування технології у сфері постачання, класифіковано типи таких застосувань, оцінено ефективність LoRaWAN та надано рекомендації щодо її використання для управління ресурсами в IoT [3].

Для прямого підключення до Інтернету речей (DtS-IoT) можливе застосування конструкції приймача-передавача з використанням технології LR-FHSS [4] на базі ASIC та FPGA, результати яке забезпечує широке покриття, стабільність з'єднання та високошвидкісну передачу даних для майбутніх 6G-мереж.

Заслужує уваги підхід до підвищення масштабованості LR-FHSS для задоволення потреб масових з'єднань у IoT-середовищі [5].

Історію розвитку, принципи та приклади використання методу FHSS у військовій і цивільній сферах наведено в [6]. Зокрема, відзначено його високу завадостійкість, здатність ускладнювати перехоплення зв'язку та забезпечувати кодовий поділ каналів через множинний доступ.

Декодування FHSS-сигналів проводиться з використанням GFSK-модуляції [7]. Запропонований метод компресії сигналів показав вищу ефективність виявлення прийнятих частот і кращу точність декодування в порівнянні з іншими підходами (EOMP, адаптивне вибіркове ядро). Покращення результатів досягнуто завдяки зменшенню нормалізованої середньоквадратичної помилки та ймовірності помилки декодування. Порівняння проведено на основі симуляцій у MATLAB із використанням ROC-кривих.

Залежно від вимог до швидкості передачі даних, система може динамічно виділяти різну кількість кодових каналів, що дозволяє оптимізувати використання доступного частотного ресурсу. Одним із ключових завдань коефіцієнта розширення спектра є забезпечення ортогональності сигналів, чого досягають завдяки використанню OVFSF-кодів (Orthogonal Variable Spreading Factor). Ці коди дозволяють формувати сигнали, які можуть передаватися одночасно без взаємних перешкод.

Наприклад, при коефіцієнті розширення 4 можливо створити чотири ортогональні канали для одночасної передачі даних від чотирьох користувачів без взаємних завад. Оскільки голосовий трафік і передача даних вимагають різної пропускної здатності, для них застосовуються відповідні значення коефіцієнтів розширення.

Технологія FHSS (Frequency-Hopping Spread Spectrum — спектр із перестрибуванням частот) реалізує зміну несучої частоти сигналу за попередньо визначеним і синхронізованим шаблоном, що узгоджено між передавачем і приймачем. Для стороннього приймача, який не має синхронізації, такий сигнал виглядає як випадковий імпульсний шум, що значно ускладнює перехоплення або навмисне заглушення передачі.

Застосування FHSS є актуальним у випадках, коли тривалість передачі пакета перевищує встановлені регуляторні обмеження на перебування на одній частоті. У LoRa технологія частотного перестрибування активується шляхом налаштування параметрів у регістрах RegHopPeriod та FreqHoppingPeriod.

Також варто зазначити, що LoRa-модем підтримує два режими формування пакета: explicit (явний) і implicit (неявний).

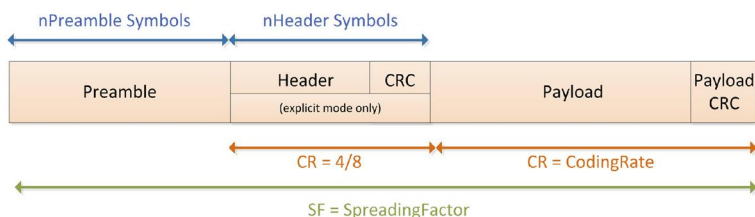


Рисунок 1. Структура пакета LoRa

У явному режимі передається короткий заголовок, який містить інформацію про довжину пакета, коефіцієнт корекції помилок (FEC) і наявність контрольної суми CRC. Структура пакету (рис. 1) включає такі основні частини: Преамбула (Preamble), Заголовок (Header) (необов'язковий, залежно від режиму), Корисне навантаження (Payload)

[1] Maleki A., Nguyen H. H., Bedeer E., Barton R. A Tutorial on Chirp Spread Spectrum Modulation for LoRaWAN: Basics and Key Advances IEEE // Open Journal of the Communications Society. – 2024. – Vol. 5. – P. 4578–4612. – DOI: 10.1109/OJCOMS.2024.3433502.

[2] Tempiem P., Silapunt R. Enhancing Spreading Factor Assignment in LoRaWAN with a Geometric Distribution Approach for Practical Node Distributions // Telecom. – 2024. – Vol. 5, No. 4. – P. 941-960. – DOI: <https://doi.org/10.3390/telecom5040047>.

[3] Khairullah E. F., Alghamdi A. M., Al mojamed M. M., Zeadally S. LoRaWAN-based smart water management IoT applications: a review // Journal of Information and Telecommunication. – 2025. – P. 1–27. – DOI: <https://doi.org/10.1080/24751839.2025.2458889>.

[4] Jung S., Jeong S., Kang J., Im G., Lee S., Oh M.-K., Ryu J. G., Kang J. LR-FHSS transceiver for direct-to-satellite IoT communications: Design,

implementation, and verification // arXiv. – 2025. – DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.14154>.

[5] Maldonado D., Kaneko M., Fraire J. A., Guitton A., Iova O., Rivano H. Enhancing LR-FHSS scalability through advanced sequence design and demodulator allocation // arXiv preprint arXiv. – 2024. – DOI: <https://arxiv.org/abs/2407.03490>.

[6] Ristić V., Todorovic B., Stojanovic N. Frequency hopping spread spectrum: History, principles and applications // Military Technical Courier. – 2022. – DOI: 70. 856-876. 10.5937/vojtehg70-38342.

[7] Ghanem S. Decoding and measurement of frequency-hopping spread spectrum signals using an adaptive algorithm-based compressive sensing // Int. J. Commun. Syst. – 2021. – Vol. 34, No. 3. – DOI: 10.1002/dac.4675.

Mykola Kaidan, Dr. of Tech. Sc., Prof.
Pavlo Beshley, PhD student
mykola.v.kaidan@lpnu.ua
pavlo.i.beshlei@lpnu.ua
Lviv Polytechnic National University

CONCEPT OF SMART ENERGY MANAGEMENT BASED ON AI, BLOCKCHAIN, AND ICT INTEGRATION

In the era of global digitalization and heightened environmental challenges, sustainable energy management and business continuity have become critical priorities for organizations worldwide. The integration of AI and ICT offers transformative opportunities to address these demands by enabling smarter energy consumption, predictive maintenance, dynamic resource allocation, and enhanced operational resilience. AI-driven analytics, combined with real-time ICT infrastructures, provide the ability to monitor, forecast, and optimize energy usage patterns, while simultaneously ensuring that businesses can maintain uninterrupted operations even under adverse conditions [1].

This research paper focuses on the evolution of the role of artificial intelligence and ICT in shaping sustainable energy development strategies and ensuring business continuity. It highlights how machine learning algorithms, Internet of Things (IoT) networks, intelligent automation, and data-driven decision-making are reshaping energy management practices and operational risk mitigation. By examining recent advances, best practices, and practical implementations, this study provides a comprehensive overview of how technology-driven approaches contribute to achieving sustainability goals and enhancing organizational resilience in an increasingly complex and uncertain environment.

The conceptual architecture of an intelligent energy management and monitoring system, integrating AI, ICT, distributed energy resources, blockchain technologies, and multi-network communication channels (2G/3G/5G and optical networks), is depicted in Fig. 1.

This concept demonstrates the interaction between conventional power generation, smart communities with residential prosumers, distributed renewable energy sources, edge computing nodes, blockchain-based data centers, and monitoring centers to enable real-time energy management, power trading, and sustainability-driven decision-making [2].

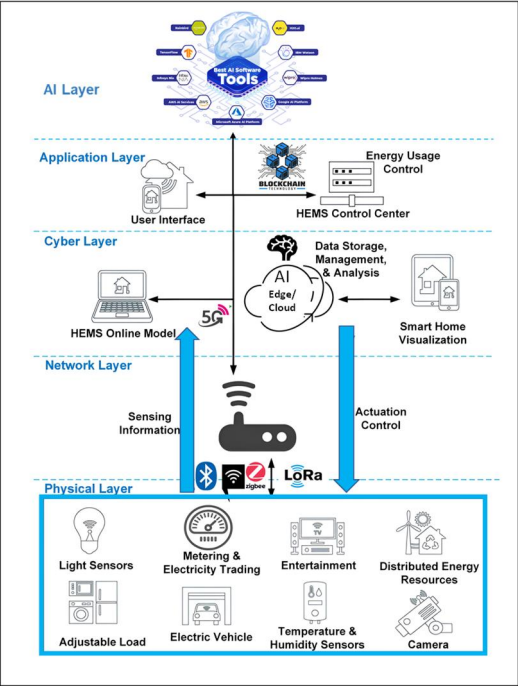


Figure 1. Conceptual representation of AI, blockchain and ICT-based approaches to smart energy management

The architecture of proposed concept consists of four functional layers: the physical layer, the network layer, the cyber layer, and the application layer. The physical layer comprises household electrical appliances, sensors, data collection devices, and actuators, along with distributed energy resources, storage systems, and electric vehicles that support two-way energy flows. The network layer ensures data transmission through wireless technologies such as Wi-Fi and ZigBee, and long-distance communication via 5G. The cyber layer manages data storage, processing, and analysis using cloud computing technologies, enabling seamless bidirectional interaction between physical devices and digital control systems. The application layer provides user-oriented services, including demand response management and condition monitoring. In a practical scenario, the local home area network aggregates environmental and energy consumption data, which is then transmitted to a remote cloud center operated by a service provider. The data is processed and analyzed using CPPS platforms to optimize the SHEMS model and generate control parameters. Based on these insights, the control center issues commands to actuators to manage energy consumption effectively. The integration of blockchain technologies into this architecture enhances security by ensuring the integrity and transparency of transactions [3]. As Ukraine rebuilds its energy infrastructure in the aftermath of the war, it has the opportunity to establish a modern energy system founded on advanced technologies, including artificial intelligence, IoT, blockchain, 5G, and cloud computing. The hypotheses formulated within the conceptual framework remain highly relevant for solving a significant scientific and practical challenge: the development of innovative methods and hardware solutions for data transmission, processing, monitoring, management, and

accounting across the full life cycle of energy resources. The ongoing missile and cyberattacks on Ukraine's critical infrastructure have exposed vulnerabilities that can be partially addressed through the modernization of the energy sector using the proposed solutions. In the short term, modernization will improve monitoring and management efficiency. In the long term, it will contribute to the creation of an intelligent, next-generation energy system characterized by resilience, operational reliability, and efficiency across generation, transportation, and consumption processes [4].

A new concept known as "Smart Grid 2.0" is currently being proposed for implementation beginning in 2025. This next generation of smart grids introduces significant advancements compared to current systems. Smart Grid 2.0 envisions enhanced interaction between energy supply and demand through the deployment of advanced smart metering infrastructures and the establishment of information infrastructures that enable the distribution of energy and related information among stakeholders.

This concept also introduces flexible energy exchange mechanisms, such as vehicle-to-grid systems, where distributed energy resources, including electric vehicles, can supply energy back to the grid. The principle of "plug and play" allows distributed generation sources to connect easily to the grid, supporting the role of consumers who also act as energy suppliers, known as "prosumers." In Smart Grid 2.0, a significantly wider range of equipment will be under operational control, enhancing the flexibility of the energy network. Managing such a diverse and extensive infrastructure will require the application of advanced big data analytics and real-time management tools. Projections indicate that more than half of the overall energy demand will be under real-time control, improving the efficiency of electricity markets. Participants will engage in peer-to-peer

(P2P) market transactions via online interfaces, directly linking sellers and buyers. Unlike the first-generation smart grids, which primarily focused on deploying advanced metering infrastructures at the local level, Smart Grid 2.0 aims for a more global scale of implementation.

[1] M. Meliani, A. E. Barkany, I. E. Abbassi, A. M. Darcherif, and M. Mahmoudi, "Energy management in the smart grid: State-of-the-art and future trends," *Int. J. Eng. Bus. Manag.*, vol. 13, p. 184797902110329, 2021.

[2] D. Guetter, A. Luntovskyy, P. Beshley, and M. Beshley, "The energy transition in Germany requires an AI-supported dynamic control of the power supply network," in *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 184–228.

[3] P. Beshley, N. Kryvinska, M. Beshley, "AI-based IoT System for Energy Forecasting and Load Management in Smart Grid," in *Lecture Notes in Computer Science*, Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 26–36.

[4] P. Beshley, M. Kaidan, M. Beshley, A. Masiuk, S. Mokhun and Y. Drohobytский, "Intelligent Class-based Electricity Consumption Profiling for Optimized Load Forecasting and Energy Planning," 2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv, Ukraine, 2024, pp. 257-260

**SECTION 6. Avionics. Automotive electronics.
Biomedical engineering. Robotics.
Automated control systems**

**СЕКЦІЯ 6. Авіоніка. Автомобільна електроніка.
Біомедична інженерія. Робототехніка.
Автоматизовані системи керування**

Denys Khorunzhyi, Master's Degree Student
Mariia Stankevych, Assistant of the Department of Foreign Languages
d.khorunzhyi@student.csn.khai.edu
m.d.stankevych@khai.edu
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"

**ADVANCED APPROACHES TO THE DEVELOPMENT OF
MOBILE ROBOTIC SYSTEMS**

The field of robotics has seen significant development over the past decade, driven by advances in artificial intelligence, sensor technologies, and embedded systems. Mobile robotic systems, in particular, have been rapidly evolving, with new methodologies for path planning, obstacle avoidance, and autonomous decision-making being implemented across various industries.

One of the key trends is the integration of deep learning algorithms into robotic platforms. Neural networks enable robots to adapt to dynamic environments and perform complex tasks with minimal human intervention. Recent studies [1] demonstrate that convolutional neural networks can

significantly enhance object recognition accuracy, leading to safer and more efficient robot navigation.

Simultaneous localization and mapping (SLAM) algorithms are crucial for allowing robots to map unknown environments while tracking their own position. The combination of visual SLAM and LiDAR-based solutions provides robust capabilities for both indoor and outdoor mobile systems [2]. Particularly in cluttered environments, hybrid SLAM algorithms combining visual, ultrasonic, and infrared data streams significantly improve navigation reliability.

In terms of practical application, mobile robotic systems are increasingly used in logistics for warehouse automation, in healthcare for hospital deliveries, and in agriculture for crop monitoring and field analysis. In these contexts, mobility, environmental adaptability, and energy efficiency are critical features ensuring operational success.

From the hardware perspective, improvements in energy storage technologies, such as solid-state batteries and supercapacitors, have extended operational time and agility of robotic systems. Battery management systems (BMS) play a vital role in ensuring efficient power consumption and safety, which is critical for mobile applications where size and weight constraints are stringent.

The development of swarm robotics has opened new possibilities for solving complex tasks through the cooperation of multiple simple agents. Research in decentralized control algorithms, such as ant colony optimization and particle swarm optimization [3], highlights the potential of swarm intelligence for tasks like environmental monitoring, disaster response, and military reconnaissance.

Sensor integration remains another critical trend. Robots now utilize a variety of sensors including LiDAR, radar, ultrasonic, and vision sensors to

build a comprehensive understanding of their environment. Sensor fusion techniques ensure that data from heterogeneous sources is processed effectively to provide robust perception under varying lighting, weather, and terrain conditions.

Security aspects are gaining increasing attention as mobile robots become connected to cloud services and wider networks. Cybersecurity threats can endanger mission-critical robotic systems, leading to potentially dangerous failures. Therefore, robust authentication protocols, encrypted communications, and AI-based anomaly detection systems are becoming essential components of modern mobile robotics infrastructure.

Future trends point towards greater autonomy, enabled by advances in reinforcement learning, transfer learning, and federated learning. These techniques allow robots not only to learn from their own experiences but also to benefit from knowledge shared across a fleet of devices, significantly accelerating adaptation and capability development.

Furthermore, edge computing and on-device AI are reducing reliance on cloud infrastructures, enabling faster decision-making and decreasing vulnerability to network interruptions. Combined with miniaturization of hardware components and optimization of real-time processing algorithms, mobile robots are becoming increasingly autonomous and capable of operating in previously inaccessible environments.

In conclusion, robotics continues to be a rapidly advancing field with tremendous potential for transforming numerous sectors. By addressing current technological challenges and leveraging interdisciplinary innovations, the next generation of mobile robotic systems will become more autonomous, reliable, intelligent, and safe. Such advancements will

lead to wider adoption across industries, ultimately improving efficiency, safety, and the quality of human life.

1. Redmon, J., Farhadi, A. YOLOv3: An Incremental Improvement. arXiv preprint arXiv:1804.02767, 2018.
2. Mur-Artal, R., Tardós, J.D. ORB-SLAM2: An Open-Source SLAM System for Monocular, Stereo, and RGB-D Cameras. IEEE Transactions on Robotics, 2017.
3. Brambilla, M., Ferrante, E., Birattari, M., Dorigo, M. Swarm Robotics: A Review from the Swarm Engineering Perspective. Swarm Intelligence, 2013.
4. Khamis, A., Hussein, A., Elmogy, A. Multi-robot Task Allocation: A Review of the State-of-the-Art. Studies in Informatics and Control, 2015.

Барановський Д. М., канд. техн. наук, доц.

bdn993@gmail.com

ДУ «Київський авіаційний інститут»

ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ СІМЕЙНОГО ЛІКАРЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРИКЛАДНИХ ТА ГРАДІЄНТНИХ МЕТОДІВ

Сімейні лікарі є основою системи первинної медичної допомоги в Україні, виконуючи важливі функції з профілактики, діагностики та лікування широкого спектра захворювань. Робота сімейних лікарів ускладнена обмеженим часом, нестачею даних і різноманітністю клінічних випадків. Точна діагностика є ключовою, адже від неї залежить правильний вибір лікування. Помилки на етапі діагностики можуть призвести до серйозних наслідків, таких як призначення неефективного лікування, погіршення стану хворого чи навіть летальні випадки.

Сучасні інформаційні технології, зокрема системи підтримки прийняття рішень (СППР), стають ключовими інструментами для підвищення якості медичної практики. Такі системи дозволяють сімейним лікарям обробляти великі обсяги даних, інтегрувати інформацію з різних джерел (електронні медичні картки, лабораторні результати, протоколи лікування) та отримувати обґрунтовані рекомендації. Проте для забезпечення високої ефективності СППР необхідно постійно вдосконалювати, використовуючи передові методи оптимізації, такі як прикладні та градієнтні методи. Ці підходи допомагають адаптувати систему до реальних потреб медичної практики та підвищувати її надійність.

Метою цієї роботи є аналіз і розробка шляхів оптимізації систем підтримки прийняття рішень для сімейних лікарів в Україні з використанням прикладних та градієнтних методів оптимізації. Особлива увага приділяється вдосконаленню етапів, які дозволяють виявляти потенційні проблеми в роботі системи та оперативно їх усувати. Дослідження спрямоване на формування теоретичної основи для вдосконалення СППР, а також на практичне впровадження таких систем у повсякденну роботу сімейних лікарів, що сприятиме підвищенню якості медичних послуг.

Системи підтримки прийняття рішень (СППР) є ефективним інструментом у медицині, що підтверджують дослідження в Україні та за кордоном. Н. В. Білак наголошує на структурованому підході до рішень у складних клінічних ситуаціях [1], а Є. Б. Радзішевська та О. В. Висоцька – на перевагах інтеграції E-Health для оптимізації діагностики й лікування [2]. Зарубіжні вчені, зокрема R. T. Sutton та ін., відзначають підвищення точності діагностики СППР, але вказують на ризики технічних збоїв і недостатню підготовку персоналу [3]. Автор статті запропонував модель СППР для України, враховуючи вимоги МОЗ і локальні особливості [4].

Окремої уваги заслуговують методи оптимізації, які активно застосовуються у вдосконаленні СППР. Градієнтні методи навчання штучних нейронних мереж є особливо перспективними для вирішення задач багатовимірної нелінійної оптимізації. Вони дозволяють системі обробляти складні набори даних, знаходити оптимальні рішення в умовах невизначеності та адаптуватися до нових викликів медичної практики.

СППР – це комплексне програмно-апаратне рішення, яке допомагає сімейним лікарям у процесі аналізу медичних даних, постановки діагнозу та вибору оптимальних лікувальних стратегій. Основні

компоненти СППР включають: Базу знань, яка містить медичні протоколи, стандарти (МКХ-10), клінічні рекомендації та іншу релевантну інформацію; алгоритми обробки даних, що аналізують введені лікарем дані (симптоми, анамнез, результати обстежень); інтерфейс користувача, який забезпечує зручну взаємодію з системою навіть для лікарів з мінімальним досвідом роботи з технологіями; модуль рекомендацій, що генерує обґрунтовані пропозиції щодо діагностики та терапії на основі оброблених даних [4]. Розроблена для сімейних лікарів України СППР враховує специфіку місцевої системи охорони здоров'я: обмеженість ресурсів, необхідність відповідності вимогам МОЗ, а також типові клінічні ситуації, з якими стикаються лікарі. Система автоматизує рутинні процеси, зменшує вплив суб'єктивного фактора та допомагає інтегрувати різноманітні джерела інформації – від електронних карток до даних лабораторних досліджень – для створення цілісної картини стану пацієнта. Для підвищення її ефективності застосовуються методи оптимізації, які детально розглядаються нижче [4, 5].

Прикладні методи оптимізації відіграють важливу роль у вдосконаленні СППР на різних етапах роботи сімейного лікаря:

- Розподіл ресурсів. У первинній медичній допомозі ресурси (час, обладнання, персонал) часто обмежені. Оптимізація дозволяє розподілити їх максимально ефективно, наприклад, визначаючи пріоритетність обстежень для пацієнтів із критичним станом чи оптимізуючи графік роботи медичного персоналу.

- Розробка протоколів лікування. Методи оптимізації допомагають створювати стандартизовані протоколи, які враховують як загальні клінічні рекомендації, так і індивідуальні особливості пацієнтів (вік, супутні захворювання, алергії). Це підвищує ефективність терапії та знижує ризик лікарських помилок.

- Планування обстежень. Оптимізація визначає найкращий час і послідовність проведення діагностичних процедур, щоб отримати максимум інформації за мінімальних витрат ресурсів. Наприклад, СППР може рекомендувати провести базові аналізи перед складними візуалізаційними дослідженнями.

- Вибір лікувальних методів. На цьому етапі методи оптимізації, зокрема градієнтні, допомагають обрати оптимальну стратегію терапії, враховуючи велику кількість змінних – від симптомів до прогнозованих результатів.

У медичних задачах обсяг параметрів може бути величезним через складність даних (зображення, історії хвороб). Тому застосовуються модифікації градієнтного спуску – Adam, RMSprop, Adagrad – які прискорюють навчання та підвищують його точність. Наприклад, у СППР нейронна мережа може навчатися на даних тисяч пацієнтів, щоб точно прогнозувати ймовірність певного діагнозу чи оптимальність терапії [5].

Етап вибору лікувальних методів є найвідповідальнішим у роботі сімейного лікаря. Для його оптимізації пропонується інтеграція блоку штучного інтелекту на основі нейронних мереж, навчених градієнтними методами. Це забезпечить покращення діагностики, дозволить персоналізувати лікування враховуючи індивідуальні особливості пацієнта, аналізувати медичні зображення та підвищити точність досліджень. Такий підхід дозволяє автоматизувати складні процеси, зменшувати суб'єктивність і підвищувати якість медичних рішень.

Висновок. Застосування прикладних та градієнтних методів оптимізації в СППР для сімейних лікарів підвищує якість медичної допомоги в Україні. Вони оптимізують роботу лікаря від розподілу

ресурсів до вибору терапії, покращуючи діагностику та ефективність, що позитивно впливає на здоров'я населення.

[1] Н. В. Білак, Основи системного аналізу та прийняття рішень: конспект лекцій. Київ, Україна: НАУ, 2023, 81 с.

[2] Є. Б. Радзішевська і О. В. Висоцька, Інформаційні технології в медицині E-Health: підручник. Харків, Україна: ХНМУ, 2019, 73 с.

[3] R. T. Sutton, D. Pincock, D. C. Baumgart, D. C. Sadowski, R. N. Fedorak, і K. I. Kroeker, "An overview of clinical decision support systems: benefits, risks, and strategies for success," *npj Digital Medicine*, vol. 3, no. 17, 2020, doi: 10.1038/s41746-020-0221-y

[4] Д. М. Барановський, «Розробка системи підтримки прийняття рішень сімейного лікаря на засадах системного аналізу,» *Технічна інженерія*, no. 2 (92), pp. 89–95, 2023.

[5] Д. М. Барановський, «Застосування прикладних методів оптимізації при розробці системи підтримки прийняття рішень сімейного лікаря,» in *Innovative Development of Science, Technology and Education*, Toronto, Canada: Perfect Publishing, Aug. 2024, pp. 1–367.

Rabiichuk I.O.
Fechan A.V.
ihor.o.rabiichuk@lpnu.ua
andrii.v.fechan@lpnu.ua
Lviv Polytechnic National University

OVERVIEW OF THE POSSIBILITY OF USING CELLULAR AUTOMATA FOR SWARMS OF AUTOMATED DEVICES IN DYNAMIC ENVIRONMENTS

Cellular Automata (CA) are mathematical models that demonstrate complex behavior through simple local rules. The paper outlines classification based on transition rules, states, structure, and grid layout. Special attention is given to the operating principles of cellular automata and their application in both military and civil aviation, particularly in swarms of autonomous robotic devices such as robot groups. The analysis explores CA applicability in rapidly changing dynamic environments, emphasizing their parallelism and adaptability. The paper also reviews new modeling approaches involving active cells, hexagonal grids, and probabilistic modeling.

Keywords: cellular automata (CA), path planning, swarm of unmanned vehicles in dynamic environments.

Cellular automata (CA) are dynamic systems that generate complex collective behavior through simple local interactions and computational processes. They were first developed by John von Neumann in the 1950s and have been used to model physical, biological, and technological processes. A CA consists of a grid of cells, each acting as an automaton with its own state, determined by the states of neighboring cells.

CA exist in one-dimensional (e.g., Wolfram's automaton), two-dimensional (e.g., Conway's Game of Life), and higher-dimensional forms. Three-dimensional automata can simulate physical environments. They may be finite or infinite, with fixed or periodic boundaries. Based on neighborhood structure, CAs are classified into von Neumann automata (considering four orthogonal neighbors), Moore automata (including diagonal neighbors—up to eight), and Margolus neighborhood automata (where cells are grouped into blocks like 2×2 or 4×4 and updated as units). CA grids can also be non-traditional, such as hexagonal, triangular, or hyperbolic.

By the number of states, CAs are divided into binary (two-state) and multi-state automata (with more than two states), which enables modeling of various particle types or genetic processes. Based on the type of transition rules (local updates), CAs can be:

- Homogeneous (each cell uses the same rule),
- Programmable (cells can change their rule over time, suited for dynamic, adaptive models),
- Stochastic (transitions occur with certain probabilities),
- Totalistic (a cell's state depends on the sum of its neighbors' states).

To study CA behavior, tools such as de Bruijn graphs, matrix algebra, reachability trees, and parameters like λ , Z , Θ are used [1].

CA are applied in modeling transportation dynamics, including both civil and combat aviation, ground drones, aerial unmanned vehicles, and maritime systems—which is especially relevant during wartime. They are also used to simulate physical systems (e.g., gas models, Ising models for studying phase transitions in magnetism, fire spread, waves, and heat), biological processes (e.g., cell growth, morphogenesis, population behavior), and cryptographic applications (e.g., stream ciphers, hash functions, key and ciphertext generation).

There are developments in CA-based path planning for commercial robot swarms, which can be adapted for swarms of ground-based unmanned drones. These rely on a method that allows robots to move along their trajectories simultaneously in rapidly changing dynamic environments while avoiding collisions with obstacles and other robots. The robot movement is based on a grid where local transition rules determine the next cell, influenced by individual goals. A distinguishing feature of this model is that robots not only seek a path to the target but also consider the positions of others to avoid deadlocks and collisions. Decisions are made locally but with awareness of the global environment. The method includes:

- Space Initialization (creating cells, obstacles, start and end points),
- Local Analysis (analyzing neighboring cells for optimal direction),
- Movement and State Update,
- Coordination (devices assess priority or seek alternative paths in case of conflict).

Authors also propose a model where robots are repelled from obstacles and each other to prevent deadlock. Advantages include parallelism and real-time adaptability [2].

Ukrainian researchers have proposed a new method for strike aviation flight planning to target ground objectives based on a three-dimensional CA model of a lattice gas. This multi-criteria task distinguishes between automated and non-automated route planning methods. To solve it, the 3D airspace is divided into uniform cells, each of which may be empty or occupied. Routes are generated through probabilistic transitions between cells, factoring in the desired direction and spatial risks. The method also accounts for spatial constraints such as no-fly zones or hazardous areas, modeled as parts of a 3D grid. Studies demonstrate this approach's efficiency and flexibility in environments with multiple constraints and complex conditions [3].

Another paper presents an improved navigation method for autonomous robots in complex environments using CA with active cells. The goal is to enhance navigation efficiency and computational capacity, enabling real-time obstacle avoidance and movement decisions. Here, each environmental cell has a state and activity property. Active cells contain path-related information, considering obstacles, and help robots make locally optimal decisions. To optimize computation, only nearby cells are active and pass information forward, constructing possible optimal paths without evaluating the entire space at once. The grid uses hexagonal cells (not standard square ones), enabling more neighbors and reducing computational load. This local-computation-focused method allows operations without GPS, which is critical in tunnels or low-signal areas [4].

CA are also used in civil aviation route planning, offering reductions of up to 41.67% in node count, 5.82% in route length, and 6.22% in operational costs compared to existing networks. This method constructs airspace based on classical CA, using Moore neighborhood rules (eight neighbors). The objective is network optimization—minimizing nodes, path lengths, and operational costs. The model accounts for no-fly zones, weather conditions, and military zones to ensure accurate constraints. Therefore, it can be adapted for UAV optimization, enhancing fuel efficiency and mission persistence while avoiding natural and man-made obstacles [5].

In conclusion, cellular automata offer a powerful approach for simulating complex systems and are effective in navigation and pathfinding for autonomous robotic devices and aircraft. Thanks to their flexibility, simplicity, and parallel processing capabilities, CAs enable the development of adaptive swarm algorithms in rapidly changing environments, allowing autonomous decision-making without reliance on external coordinate systems. The presented results show the potential of CA in both defense and civilian sectors, especially under spatial constraints and

complex topologies. Future research should focus on UAV swarm flight modeling in the conditions of military operations, integration of CA with other AI techniques, and their use in multi-component systems.

1. Bhattacharjee, K., Naskar, N., Roy, S., & Das, S. (2020). A survey of cellular automata: Types, dynamics, non-uniformity and applications. *Natural Computing*, 19(2), 433–461. <https://doi.org/10.1007/s11047-018-9696-8>

2. Ioannidis, K., Sirakoulis, G. Ch., & Andreadis, I. (2011). A PATH PLANNING METHOD BASED ON CELLULAR AUTOMATA FOR COOPERATIVE ROBOTS. *Applied Artificial Intelligence*, 25(8), 721–745. <https://doi.org/10.1080/08839514.2011.606767>

3. Воробйов, Є.С & Павленко, М.А & Хлебніков, Є.Ю & Гладішев, М.Г. (2018). Використання кліткового автомату у методі вибору варіанту маршруту польоту ударних літаків щодо ураження наземних цілей. *Системи озброєння і військова техніка*. 84-90. <https://doi.org/10.30748/soivt.2018.53.12>.

4. Alzoubi, S., & Miraz, M. H. (2024). Enhancing Robot Navigation Efficiency Using Cellular Automata with Active Cells. *Annals of Emerging Technologies in Computing (AETiC)*, 8(2), 51–61. <https://doi.org/10.33166/AETiC.2024.02.005>

5. Wang, S., Cao, X., Li, H., Li, Q., Hang, X., & Wang, Y. (2017). Air route network optimization in fragmented airspace based on cellular automata. *Chinese Journal of Aeronautics*, 30(3), 1184–1195. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2017.04.002>

Mehmet KORKMAZ, PhD., Assoc. Prof.
mehmetkorkmaz@aksaray.edu.tr
Aksaray University

EVALUATION OF DIFFERENT BAYES FILTERS FOR SOC ESTIMATION

Abstract. This study investigates the accurate estimation of the State of Charge (SoC) of batteries, which are increasingly utilized in the fields of radioelectronics and telecommunications. SoC estimations are performed using a well-characterized battery. Various Bayesian filtering algorithms are employed for this purpose, and their estimation performances are compared. Among the methods, the Particle Filter (PF) demonstrates superior performance in SoC estimation while the Extended Kalman Filter (EKF) offers significantly lower computational cost and faster execution time. These findings highlight the trade-off between estimation precision and computational efficiency in battery related applications.

Keywords. Battery models, Kalman filter, SoC estimation

Introduction

Machine learning, regression, optimization, deep learning, and various filtering techniques constitute today's knowledge-based systems. These technologies have found widespread application in battery-related systems, especially in electric vehicles [1-4]. As batteries become increasingly popular, one of the most critical challenges is the accurate estimation of the remaining charge, commonly referred to as the State of Charge (SoC) [5-7].

The SoC indicator provides essential information about the available energy in a battery and plays a vital role in ensuring reliable and safe operation. Numerous studies in literature have addressed this issue from

various perspectives, including both algorithmic/model-based approaches and data-driven techniques [6-9].

Given the complexity and importance of battery behavior, there are several technical and computational challenges that need to be addressed [5, 7]. This work focuses on analyzing and comparing the performance of different prediction algorithms on a specific battery dataset and presents the results in terms of pros and cons.

Content

In this study, a Turnigy Graphene 5000 mAh lithium-polymer battery was analyzed under various discharge conditions at different ambient temperatures. The data used for evaluation was obtained from the UDDS (Urban Dynamometer Driving Schedule), a standardized driving cycle designed to replicate urban driving patterns. In the datasets, the discharge profile corresponding to 25 °C was selected as a representative operating condition for detailed analysis [10].

To estimate the battery's State of Charge (SoC) considering the conditions, four distinct Bayesian filtering algorithms were implemented and comparatively evaluated. These algorithms are the Extended Kalman Filter (EKF), Unscented Kalman Filter (UKF), Ensemble Kalman Filter (EnKF), and Particle Filter (PF) [5, 6, 10]. Although these algorithms share a common Bayesian foundation, they differ in their approaches in a way to handle the problem. All of them operate through two principal stages: a prediction step and a measurement/update step, which iteratively refine the state estimation. A conceptual overview of this Bayesian filtering process is illustrated in Figure 1.

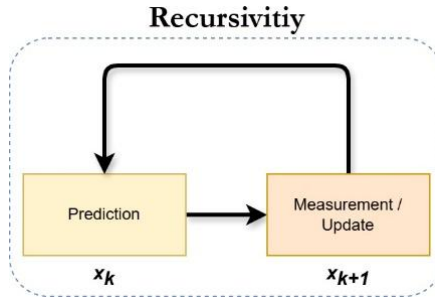


Figure 1 Bayes Filters

Figure 2 presents a comparative analysis of the State of Charge (SoC) estimation errors produced by each algorithm. In the plot, the black squares are the Particle Filter (PF), the red circles correspond to the Ensemble Kalman Filter (EnKF), the blue triangles represent the Unscented Kalman Filter (UKF), and the green inverted triangles are the performance of the Extended Kalman Filter (EKF).

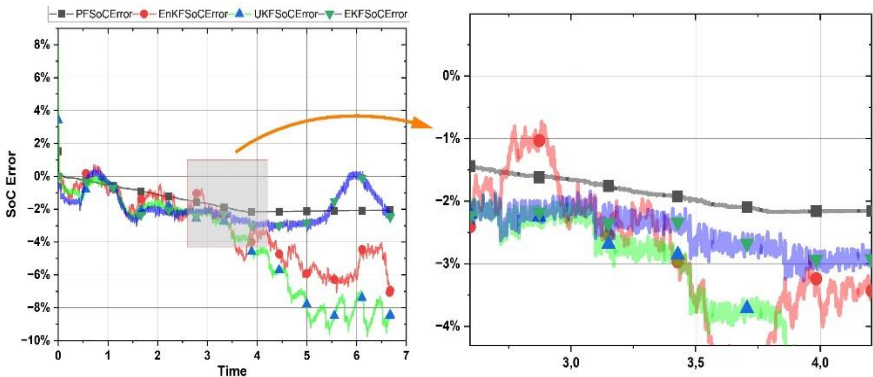


Figure 2. SoC error values for the estimation results of the algorithms (left: general view, right: zoomed part)

As illustrated, the PF algorithm exhibits the closest results to the reference SoC values which emphasize its superior accuracy in terms of varied nonlinearities. The EKF also demonstrates competitive performance with relatively small deviations, making it a strong candidate for real-time applications due to its computational efficiency. In contrast, the UKF algorithm shows the largest estimation errors, which makes it the worst one of all algorithms.

Figure 3 provides a statistical interpretation of the terminal voltage estimation errors across the evaluated algorithms. The vertical axis represents the magnitude of the voltage errors, and the horizontal axis denotes the individual algorithms. The graph refers to the distribution of error values for each method and maximum/minimum limits. The central box indicates the interquartile range (IQR), encompassing approximately 80% of the data.

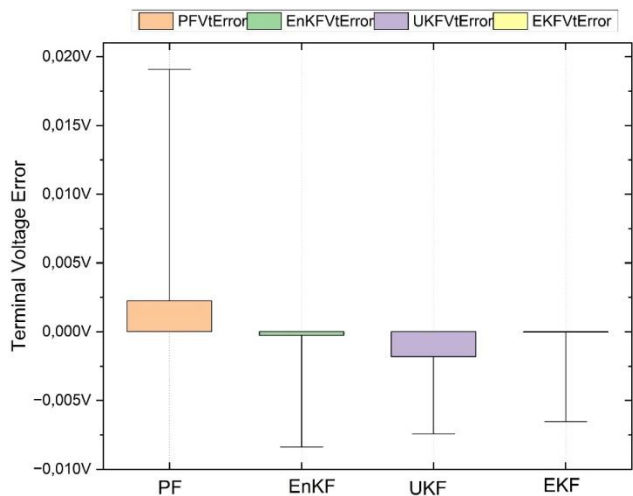


Figure 3. Terminal voltage error values for the estimation results of the algorithms

Examining the graph, it is obviously seen that all algorithms exhibit comparable error ranges, indicating similar levels of performance in voltage prediction. However, the EKF and EnKF algorithms stand out by exhibiting a tighter clustering of error values, indicating a more consistent and stable performance in predicting terminal voltage than other approaches.

A comprehensive evaluation of the algorithms was conducted using performance index values, the Root Mean Square Error (RMSE). The RMSE results, normalized to a 0–100 scale for clearer comparative analysis, are illustrated in Figure 4. This normalization simplifies the evaluation of the relative performance of each algorithm.

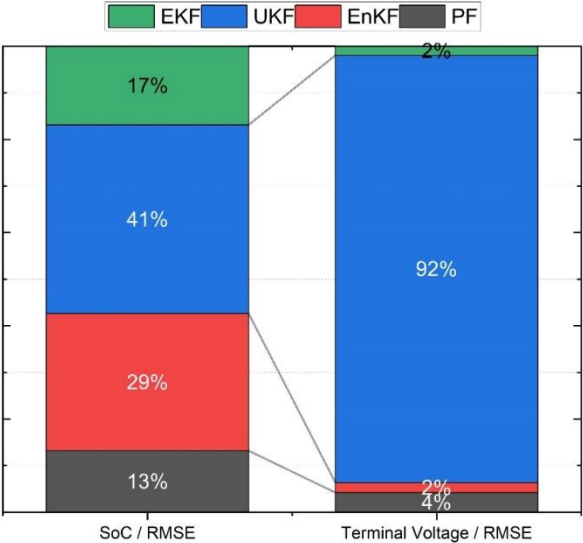


Figure 4. RMSE values normalized to 100% for SoC and terminal voltage errors (left SoC, right voltage)

As depicted in the graph, the Particle Filter (PF) yields the most accurate results in SoC estimation, outperforming all other algorithms. It is closely followed by the Extended Kalman Filter (EKF), which also demonstrates high accuracy. Conversely, the Unscented Kalman Filter (UKF) exhibits the poorest performance, producing the largest RMSE values.

This outcome is consistent with the findings from the previous SoC error analysis (Figure 2), where PF showed superior tracking capability and UKF lagged. Likewise, in terms of terminal voltage estimation, UKF again recorded the highest error values, while the other algorithms produced comparably reliable results.

Conclusion

Batteries play a critical role in electric vehicles, household electronics, communication devices, etc. One of the key challenges in battery management is accurately determining the remaining energy (SoC). The study at hand addresses this issue by implementing SoC estimation for a 5000 mAh lithium polymer battery using various Bayesian filtering algorithms. Among the methods, the Particle Filter (PF) demonstrated the highest estimation accuracy. Although its superior performance, the computational time is very high making it less suitable for real-time or online applications. In contrast, the Extended Kalman Filter (EKF) provided results that closely matched those of the PF while maintaining a much lower computational burden. Given these findings, PF is recommended for applications where accuracy is the priority and computational resources are not limited, whereas EKF offers a good trade-off between performance and efficiency in time-sensitive environments.

Future studies could explore performance under different temperatures and driving cycles to enhance the generalizability of the results.

[1] Asar, Yasin. "Performance of A New Bias Corrected Estimator in Beta Regression Model: A Monte Carlo Study". Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, c. 5, sy. 2, 2023, ss. 75-87, doi:10.47112/neufmbd.2023.11.

[2] V. Yakovyna, O. Khil "Challenges of Using Machine Learning Algorithms for Evaluating and Predicting Software Defects" International conference on Advanced Trends in Radioelectronics and Telecommunications, May 22-23, 2024, Lviv, Ukraine

[3] Özen, Fatih vd. "Deep Learning Based Temperature and Humidity Prediction". Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, c. 5, sy. 2, 2023, ss. 219-2, doi:10.47112/neufmbd.2023.20.

[4] Ünlü, Alper, and İlhan İlhan. "A novel hybrid gray wolf optimization algorithm with harmony search to solve multi-level image thresholding problem." Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi 5.2 (2023): 230-245. Ünlü, Alper, and İlhan İlhan. "A novel hybrid gray wolf optimization algorithm with harmony search to solve multi-level image thresholding problem." Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi 5.2 (2023): 230-245.

[5] Hossain, Monowar, M. E. Haque, and Mohammad Taufiqul Arif. "Kalman filtering techniques for the online model parameters and state of charge estimation of the Li-ion batteries: A comparative analysis." Journal of Energy Storage 51 (2022): 104174.

[6] Cui, Zhenjie, et al. "An extended Kalman filter based SOC estimation method for Li-ion battery." Energy Reports 8 (2022): 81-87.

- [7] Zaki, Mohamed R., Mohamed A. El-Beltagy, and Ahmed E. Hammad. "SOC estimation of high capacity NMC lithium-ion battery using ensemble Kalman Bucy filter." *Ionics* (2025): 1-15.
- [8] Rezaei, Omid, Reza Habibifar, and Zhanle Wang. "A robust kalman filter-based approach for soc estimation of lithium-ion batteries in smart homes." *Energies* 15.10 (2022): 3768.
- [9] Rana, Md Masud, and Li Li. "Kalman filter based microgrid state estimation using the internet of things communication network." 2015 12th International Conference on Information Technology-New Generations. IEEE, 2015.
- [10] Khanum, Fauzia, et al. "A Kalman filter based battery state of charge estimation MATLAB function." 2021 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC). IEEE, 2021.

Іван Берневек, аспірант
Олег Яремко, к.т.н., доц.
ivan.a.bernevek@lpnu.ua
Національний університет «Львівська політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕГРОВАНОГО КЕРУВАННЯ ГРУПОЮ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Сфера застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) демонструє постійне розширення, що супроводжується ускладненням вимог до їх функціонування. Якщо раніше для виконання окремих завдань достатньо було використання одного апарата, то сучасні реалії вимагають впровадження комплексних підходів. Ці підходи включають удосконалене керування, створення захищених каналів зв'язку, використання різноманітних систем позиціонування, автоматизоване пілотування, а також синхронізоване, колективне використання декількох апаратів. Групове розгортання БПЛА забезпечує підвищену ефективність завдяки раціональному розподілу функцій між апаратами, можливості охоплення більших територій і здатності продовжувати виконання завдань навіть за умови втрати частини апаратів. Для повноцінної реалізації такого підходу необхідно впровадження чітко визначених протоколів взаємодії у межах системи.

Системи позиціонування відіграють ключову роль в управлінні групою БПЛА. Їх значущість обумовлена тим, що кожен БПЛА повинен передавати інформацію про своє місцезнаходження іншим компонентам системи, а також отримувати дані про позиції інших БПЛА. Це забезпечує правильну взаємодію та допомагає уникнути зіткнень. Крім того, такі системи використовуються для

автоматичного пілотування, яке є основним елементом алгоритмів інтегрованого керування[1].

Взаємодія з групою БПЛА полягає в обміні інформацією між усіма компонентами системи. Повідомлення умовно поділяються на: синхронізацію, маршрутну інформацію, дані для конкретного БПЛА, статистичну інформацію, команди виконання завдань.

Синхронізуюча інформація надходить від комплексу керування до всієї групи та використовується для корекції затримок при отриманні команд. Маршрутна інформація охоплює координати точок, час їх проходження, висоту, швидкість, перешкоди, вітер. На основі цих даних кожен БПЛА розраховує власну траєкторію. Повідомлення для окремого БПЛА включають його позицію в групі, зміну місця в групі, траєкторію, виконання спеціальних функцій і коригування польоту. Статистична інформація передбачає параметри польоту, відхилення від маршруту та зовнішні впливи, які передаються до комплексу керування. Команди на виконання завдань конкретним БПЛА містять траєкторію, перелік маневрів і способи повернення до групи.

Алгоритм передбачає три етапи: розгортання, політ і завершення польоту. Розгортання починається з реєстрації БПЛА в системі. Кожному БПЛА присвоюється унікальний ідентифікатор для прийому команд, виконується синхронізація часу з комплексом керування. Після реєстрації встановлюється нульова точка групи, визначається положення кожного БПЛА та координати їх розташування відносно центру групи. БПЛА отримують траєкторії виходу на позиції, здійснюють вихід і звітують про результат. Діаграма підготовки до польоту наведені на рис.1.

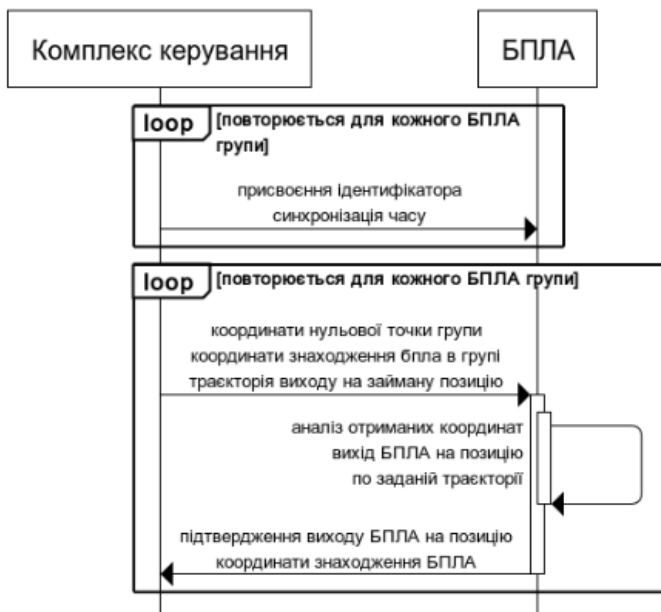


Рисунок 1. Діаграма процесу підготовки групи БПЛА до польоту.

Координація польоту групи БПЛА починається з отримання списку координат і параметрів польоту: швидкості, висоти, прискорення тощо. Кожен БПЛА розраховує свою траєкторію, враховуючи координати, положення в групі, технічні характеристики та математичну модель. Після отримання сигналу про старт група розпочинає рух. Комплекс керування надсилає оновлений список координат після кожної пройденої точки, видаляючи пройдені і додаючи нові. Процес повторюється до завершення польоту. Кожен БПЛА після проходження точки звітує про координати та параметри польоту. У разі відхилень комплекс керування коригує параметри польоту для всієї групи чи окремих БПЛА. Якщо

БПЛА значно відстає, може бути ухвалене рішення про його повернення на базу. Деталі координації польоту наведені на рис.2.

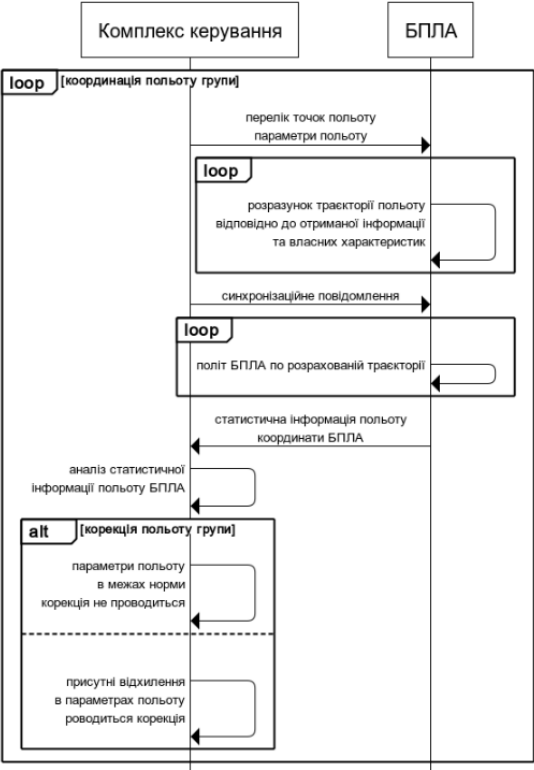


Рисунок 2. Діаграма процесу координації польоту групи БПЛА.

Після завершення польоту група зупиняється. Комплекс керування, керуючись командами оператора, поступово передає кожному БПЛА команди на посадку. Повідомлення включає координати точки приземлення та траєкторію для заходу на посадку. Кожен апарат

здійснює посадку та відправляє підтвердження до системи керування. Деталі завершення польоту наведені на рис.3.

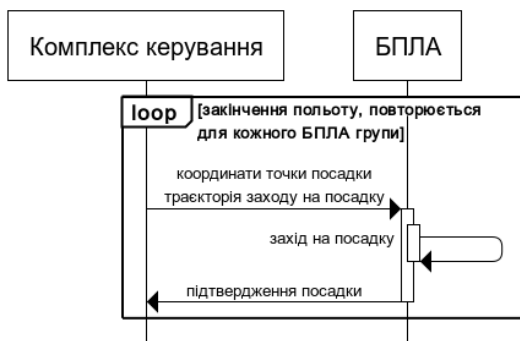


Рисунок 3. Діаграма етапу завершення польоту.

Запропонований підхід забезпечує контроль за положенням і переміщенням, а також точну синхронізацію всіх компонентів системи, що дозволяє здійснювати маневрування у складі групи в режимі реального часу. Застосування методу спільних повідомлень для керування груповими діями сприяє оптимізації використання каналу зв'язку, оскільки обчислення траєкторій польоту відбувається автономно на рівні кожного БПЛА відповідно до заздалегідь визначених параметрів. Аналіз і накопичення статистичних даних про польоти БПЛА дають змогу оперативно виявляти відхилення в діях групи та своєчасно коригувати параметри польоту з урахуванням поточних обставин.

[1] Elkhan Sabziev (2021) "A control algorithm for joint flight of a group of drones", Scientific Journal of Silesian University of Technology Series Transport, 2021, no. 110, pp. 157-167. doi:10.20858/sjsutst.2021.110.13

[2] Dung D. Nguyen, Daniel Rohacs¹ (2021) “Air traffic management of drones integrated into the smart cities”, 32nd congress of the International council of the Aeronautical sciences, available at: https://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2020/data/papers/ICAS2020_0456_paper.pdf (Accessed 8 May 2025).

[3] Konrad Wojtowicz, Przemysław Wojciechowski (2023) “Synchronous Control of a Group of Flying Robots Following a Leader UAV in an Unfamiliar Environment”, *Advanced Intelligent Control in Robots* 2023, no. 23, p. 740. doi: 10.3390/s23020740

Скачков В.В., д-р техн. наук, проф.
Братченко Г.Д., д-р техн. наук, проф.
Гончарук А.А., канд. техн. наук, с.н.с.
Жарков Я.А.
bratchenkohd@gmail.com
Військова академія (м. Одеса)

КОМПЛЕКСУВАННЯ АДАПТИВНОЇ ОБРОБКИ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИХ СИГНАЛІВ ТА ТЕХНОЛОГІЇ DS-CDMA ДЛЯ КЕРУВАННЯ ГРУПОЮ БЕЗПІЛОТНИХ ЗАСОБІВ В УМОВАХ РАДІОПРОТИДІЇ

У сучасній російсько-українській війні відмічається стійка тенденція бойового застосування безпілотних систем наземного, повітряного і морського базування. Системи зазначеного класу успішно вирішують завдання розвідки і ураження об'єктів противника. Зрозуміло, що поява таких систем вимагає удосконалення технологій і розробки нових способів застосування спрямованих на підвищення ефективності бойових дій підрозділів збройних сил.

Перш за все, втілення в практику збройної боротьби безпілотних систем різного призначення потребує розвитку технології керування такими системами в складних умовах радіопротидії противника. Тут слід акцентувати увагу на технології бездротового керування групою безпілотних засобів (БЗ), оскільки керування поодиноким об'єктом є окремим випадком групового керування. Очевидно, що бездротове керування (керування по радіоканалу) групою об'єктів в реальному масштабі часу дозволяє повною мірою реалізувати бойові можливості БЗ різного призначення. Однак, у цьому випадку актуальною є

проблема забезпечення необхідної пропускної спроможності і завадозахищеності системи керування безпілотними об'єктами.

Сучасні тенденції підвищення пропускної спроможності системи керування групою об'єктів зосереджені на перспективній технології комплексування обробки просторово-часових сигналів за допомогою адаптивних антенних решіток (ААР) і кодування широкосмугових сигналів для прийому і передачі. Застосування ААР дозволяє реалізовувати складні методи просторово-часової обробки сигналів у системах з багатоканальним входом і виходом (МІМО), що сприяє зростанню пропускної спроможності каналів бездротового зв'язку з мобільними об'єктами.

Метою роботи є теоретичне обґрунтування реалізації бездротових систем групового керування, що відрізняються високою пропускною спроможністю, електромагнітною сумісністю і завадозахищеністю, на основі комплексування технологій ААР та DS-CDMA.

В узагальненому уявленні сигнал на виході ААР $\hat{S}$ є результатом вагового підсумовування сукупності сигналів, які поступають на входи ААР і представлені вектором спостережень U :

$$\hat{S}(M,1) = W^H(M,N)U(N,1), \quad (1)$$

де $W^H(M,N)$ – комплексна $(M' \times N)$ -мірна матриця вагових коефіцієнтів ААР; N – розмірність ААР (кількість входів); M – кількість виходів; H – символ комплексно-спряженої транспозиції.

Вираз (1) є основним рівнянням системи МІМО, де $N > M$. Фактично M – це кількість БЗ, на які можуть бути орієнтовані проміні діаграми спрямованості багатопроменевої ААР.

Прямокутна матриця $\mathbf{W}^H(M, N)$ в (1) поєднує M векторів-стовбців, кожний з яких має розмірність $(1 \times N)$.

Відомо, що оцінка (1) задовольняє критерію максимальної правдоподібності, якщо будь-який параметричний вектор $\mathbf{AP}$ $\mathbf{W}_i(N, 1) \hat{=} \mathbf{W}(N, M), i \hat{=} [1, M]$ має значення

$$\mathbf{W}_i(N, 1) = \frac{\hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{V}_i(N, 1)}{\mathbf{V}_i^H(1, N) \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{V}_i(1, N)}, i \hat{=} [1, M], \quad (2)$$

де $\hat{\mathbf{R}}^{-1} = \hat{\mathbf{R}}^{-1}(N, N)$ – інверсія оцінки кореляційної матриці спостережень; $\mathbf{V}_i(N, 1)$ – вектор комплексних експонент, який визначає орієнтацію в просторі максимуму діаграми спрямованості ААР. Тому можна записати рівність $\mathbf{V}_i(N, 1) = \mathbf{V}(\mathbf{q}_i)$, де $\mathbf{q}_i$ кутова координата i -го об'єкта відносно нормалі до розкриву ААР.

Процедура інверсії оцінки кореляційної матриці спостережень $\hat{\mathbf{R}}^{-1}$ в алгоритмі (2) може бути організована у цифровому вигляді за рекурентною схемою обчислення.

Виходячи із (1), (2), можна визначити ескіз структури приймальної частини ААР, яка забезпечує зв'язок з групою мобільних об'єктів в умовах завад.

В загальному випадку кодований сигнал Z_m є прямим добутком векторів вихідного корисного сигналу і кодової послідовності, тривалість якої дорівнює L :

$$Z_m(1, K > L) = S_m(1, K) \hat{\Delta} \Phi_m(1, L), \quad (4)$$

де $\Phi_m(1, L)$ – кодова послідовність L елементів; $S_m(1, K)$ – вектор корисного сигналу, який поєднує K -вибірок; m – номер

джерела корисного сигналу (мобільного об'єкта); $\ddot{A}$ – символ прямого добутку матриць.

Кодова послідовність $\Phi_m(1, L)$ належить до множини ортогональних кодових послідовностей $W_M(\Phi)$ (M – кількість мобільних об'єктів), які задовольняють умові

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}_m(1, L) \Phi_m^T(L, 1) &= L; \ddot{\Phi}_m(1, L) \Phi_m^T(L, 1) = 0; \\ \dot{\Phi}_m(1, L) \Phi_K^T(L, 1) &= 0; \\ m \in [1, M]; \quad K \in [1, M]. \end{aligned} \quad (5)$$

Ефективність комплексування адаптивної обробки просторово-часових сигналів і технології DS-CDMA підтверджується результатами імітаційного моделювання. Імітувалися вихідні послідовності S_1 і S_2 і результати згортки в RAKE-приймачі $\dot{S}_1$, $\dot{S}_2$ кодованих Z_1 , Z_2 і опорних послідовностей («ключів») Φ_1 , Φ_2 . При цьому кодовані за технологією DS-CDMA послідовності відповідають виходу ААР.

Розмір адаптивної ААР дорівнює $N = 10$. На входи ААР одночасно впливають три шумові завади з напрямків $q_1 = -15^\circ$; $q_2 = 8^\circ$; $q_3 = 15^\circ$ і корисні сигнали від двох мобільних об'єктів ($M = 2$), які розташовані на одному напрямку $q_s = 0^\circ$. Енергетичне перевищення кожної із завад над внутрішнім шумом складає $q_1 = 30$ дБ; $q_2 = 20$ дБ; $q_3 = 30$ дБ. Енергія сигналів перевищує внутрішній шум ААР на величину $q_s = 10$ дБ.

Результати моделювання демонструють стійке розділення сигналів $\dot{S}_1$ і $\dot{S}_2$, незважаючи на відсутність частотних, часових і просторових відмінностей між ними, а також наявність шумових завад у каналах зв'язку.

Результати дослідження підтверджують ефективність комплексування обробки просторово-часових сигналів та технології DS-CDMA в системах керування групою безпілотних (безекіпажних) засобів в умовах радіопротидії за відсутності частотних, часових та просторових відмінностей параметрів їх сигналів.

З аналізу результатів моделювання витікає, що, у порівнянні з традиційним кодовим розділенням сигналів за технологією DS-CDMA, комплексування методів обробки сигналів за схемою «AAP + DS-CDMA» дозволяє суттєво підвищити пропускну здатність системи керування БЗ в умовах радіопротидії. Ця обставина має виключне значення для організації одночасного керування групою незалежних БЗ в недетермінованій сигнально-завадовій ситуації. Отримані результати вказують на користь комплексування адаптивної просторово-часової обробки сигналів і технології кодового розділення DS-CDMA при організації радіокерування безпілотними транспортними платформами в умовах радіопротидії.

Канцедал В.М., канд. техн. наук, старший науковий співробітник,
Могила А.А., канд. фіз-мат. наук, старший науковий співробітник.

kantsedalvaleri@gmail.com

moganat1196@gmail.com

ІРЕ ім. О.Я. Усікова НАН України

ОСОБЛИВОСТІ МІЖ ЕТАПНОГО СИТУАЦІЙНОГО УПРАВЛІННЯ НАЗЕМНИМ КОМПЛЕКСОМ РАДІОЕЛЕКТРОННОГО ПРИДУШЕННЯ МАЛИХ БПЛА

В системі автоматизованого управління комплексом РЕП [1-4] на його етапах функціонування приймається велика кількість різноманітних рішень стосовно внутрішньо та між етапного ситуаційного управління. Вони різняться за змістом, термінами дії та розробленням, спрямованістю впливу, інформаційною забезпеченістю, використанням ресурсів, рівнем прийняття рішень тощо. У зв'язку з цим, виникає необхідна потреба в упорядкуванні рішень між етапного ситуаційного управління для підвищенні керованості та результативності наземного комплексу РЕП при протидії малим (легким) БПЛА при захисті важливого інфраструктурного об'єкту для сценаріїв керованого та автономного польотів БПЛА в умовах дефіциту часу протидії.

Мета доповіді: показати структуру та особливості паралельно-послідовного побудови алгоритму циклу між етапного ситуаційного управління функціонуванням наземного комплексу РЕП залежно від ТТХ БПЛА і тактики його застосування та різних нижче зазначених факторів впливу.

Методика дослідження у мінливій обстановці складається з інформаційного опису спрощеної двосторонньої динамічної моделі конфліктної взаємодії складових частин багатofункціональних структур

наземного комплексу РЕП та малого (легкого) БПЛА. Ця модель враховує потенційно можливу заздалегідь організацію цілеспрямованих етапів функціонування такого комплексу РЕП, його циклів внутрішньо етапного ситуаційного управління засобами розвідки, фізичного сигнального та прихованого інформаційного придушення структурних елементів БПЛА, а також координації – виконання умов узгодженості, інтеграції та контролю процесів та результатів їх взаємодії в циклі між етапного ситуаційного управління.

Результати дослідження полягають у наступному. Надано інформаційні описи динамічного стану конфліктної ситуації, що є узагальненим об'єктом управління в динаміці конфлікту на основних етапах функціонування комплексу РЕП. Описи стану містять за потребою його етапів функціонування вхідні і вихідні складові конфліктної ситуації у різні моменти часу на інтервалі робітного часу комплексу, як протистояння критично важливого переліку показників узагальнених тактико-технічних характеристик БПЛА та комплексу. Наведено для сценаріїв керованого або автономного польотів БПЛА переліки можливих етапів паралельно-послідовного функціонування комплексу РЕП, що заздалегідь орієнтовані на скоординоване досягнення Головної мети управління – нейтралізацію їх загроз об'єкту захисту. Виділено кроки алгоритму циклу між етапного ситуаційно управління, які, крім забезпечення оптимізації розв'язання завдань поточного етапу при обмеженні витрат ресурсів, здійснюють умови узгодження, інтеграцію та контроль результатів керування при зміні етапів, щоб отримати результативність, безперервність керування та закінчення циклу управління. Особливості побудови алгоритму криються у спільному використанні на інтервалі робітного часу комплексу засобів

розвідки та засобів придушення, нарощування зусиль за зміни етапів у міру накопичення та надходження розвідувальної інформації для керування, а також у технологічних особливостях його реалізації, що пов'язані із необхідністю застосування засобів штучного інтелекту

Ефективність алгоритму, що розглядається, характеризується певним приростом результативності комплексу РЕП – поліпшенням показників придушення БПЛА за більш короткий час функціонування і на більшій відстані від об'єкту захисту при забезпеченні безперервності управління засобами розвідки і спрямованого за напрямком придушення комбінаціями різних видів завад з наростаючим маскуючим або/та імітуючим ефектами впливу [4,5] .

Наведено обмеження, властиві наземному комплексу РЕП, розуміння яких відкриває шлях до їх подолання. Наприклад, включення до його складу прив'язного аеростату веде до досягнення потенційної результативності протидії різним типам малих БПЛА за рахунок суттєвого розширення функціональних можливостей комплексу, збільшення його інтервалу робітного часу, появи нових об'єктів розвідки та придушення в нових умовах протидії, де використовується вся структура малої безпілотної системи, яка раніше була недоступна наземному комплексу РЕП.

[1] Generation of Counter UAS Systems to Defeat of Low Slow and Small (LSS) Air Threats. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1152139.pdf>

[2] Певцов Г.В., Олещук М.М. Аналіз спроможностей оглядових РЛС РТВ щодо виявлення, супроводження та ідентифікації безпілотних літальних апаратів. *Системи озброєння і військова техніка*. 2021. № 3(67). С. 24-30. <https://doi.org/10.30748/soivt.2021.67.03>

[3] Kaidenko M. M., Kravchuk S. O. Protection against the effect of different classes of attacks on UAV control channels // Information and telecommunication sciences. 2022. Vol. 13, №1. – P. 35–43.

[4] Канцедал В.М. Поліпшення рівня формалізації процесів управління на основних етапах радіоелектронної протидії малій безпілотній авіаційній системі для отримання конфліктних переваг / В.М. Канцедал // Радіотехніка : Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2024. Вип. 219. С. 68 – 81. DOI:10.30837/rt.2024.4.219.08

[5] В.М, Канцедал, А.А. Могила. Особливості управління завадо захищеністю оглядової РЛС при її придушенні активними завадами та інформаційними впливами, що заважають. // ISSN 0485-8972 Радіотехніка. 2021. Вип. 207, – С. 89–101.

Oleksii M. Liske, PhD (Technical Sciences)
Vasyl I. Lozynskyi, PhD., Assoc. Prof.
oleksii.m.liske@lpnu.ua
vasyl.i.lozynskyi@lpnu.ua
Lviv Polytechnic National University

EVALUATION OF THE RELIABILITY OF BIOMETRIC FINGERPRINT IDENTIFICATION

Introduction. The use of fingerprints in biometric identification remains one of the most relevant and widespread authentication methods due to the uniqueness and stability of papillary patterns throughout a person's lifetime. This method is actively employed in access control systems, mobile devices, banking operations, and government registries. Fingerprints offer a high level of accuracy and efficiency, making them well-suited for large-scale applications [1]. Furthermore, modern fingerprint recognition technologies enable high-speed data processing even in systems with a large number of users [2]. A well-established method for recognizing partial fingerprints, based on localized secondary features derived from the relative information of minutiae, enables high accuracy even when dealing with incomplete or low-quality images [3].

The aim of this study is to improve the accuracy and reliability of fingerprint-based biometric identification systems by examining the impact of decision threshold values on error rates.

The specific objectives of the study are as follows:

1. To analyze current fingerprint identification methods and the stages of fingerprint image processing.

2. To implement an algorithm for image preprocessing, feature (minutiae) extraction, and data storage in numerical format.

3. To develop a fingerprint matching procedure based on similarity assessment and threshold determination.

4. To conduct an experimental investigation of the dependence of False Acceptance Rate (FAR) and False Rejection Rate (FRR) on the selected threshold.

5. To determine the optimal threshold value that ensures a balance between system accuracy and user convenience.

Research Methodology. This study implements a complete fingerprint image processing cycle, including preprocessing, minutiae extraction, template matching, and accuracy evaluation. A dataset of 72 images was used, and all processing was performed in the MATLAB environment. Special attention was given to the selection of the decision threshold, as it significantly affects the balance between FAR and FRR errors. These errors may result from poor fingerprint quality, hardware limitations, or human factors [4].

In practice, the optimal threshold is often determined empirically or through analysis of the receiver operating characteristic curve, which provides a visual representation of the trade-off between FAR and FRR [2]. The analysis demonstrated that a threshold set too low increases the likelihood of unauthorized access, whereas an excessively high threshold leads to a greater number of false rejections. An optimal threshold ensures a balance between security and usability, as confirmed by the observed relationship between FAR and FRR.

Main Results. Fingerprint image processing is a sequential procedure that begins with image acquisition using a sensor (optical, capacitive, or ultrasonic), which captures a grayscale image with visible papillary ridges (Image 1a).

For fingerprint image preprocessing, the MATLAB software was used. Initially, noise is removed from the image, brightness is normalized, contrast is enhanced, and the image is binarized (Image 1b). During the enhancement stage, specialized filters such as Gabor filters are applied to emphasize ridge contours, thereby facilitating subsequent analysis.

The next step is thinning, which reduces thick ridges to a single pixel in width – an essential process for the accurate analysis of the ridge structure (Image 1c).

Following this, feature extraction is performed, most commonly involving minutiae such as ridge endings and bifurcations. To locate these points, a crossing number method is used for each black pixel (value 1) in the image. The algorithm evaluates its eight neighboring pixels (in a 3×3 window) and counts the number of transitions from white (0) to black (1) as the neighborhood is scanned in a circular manner.

The minutiae information, including the coordinates and the orientation of the ridge or bifurcation approaching each minutia, is represented as a numerical data array and can be stored in a text format (Figure 1d).



Figure 1. Stages of fingerprint image processing

After feature extraction, the program initiates the matching stage, in which the new fingerprint is compared with all templates stored in the database. For each pair, a similarity score is calculated: the minutiae structures are aligned, and the number of matching points is determined based on their spatial positions and orientations. A final matching score is then computed based on this comparison.

This score is compared with a predefined threshold. If the score exceeds the threshold, the system recognizes a match and returns the user identifier. If the score is below the threshold, the program reports that no matching fingerprint was found.

The total number of fingerprint images used in the study was 72. As a result of repeated comparisons, a graph showing the relationship between the error rates and the threshold value was obtained (Figure 2). The higher the matching score, the greater the similarity between the two fingerprint images.

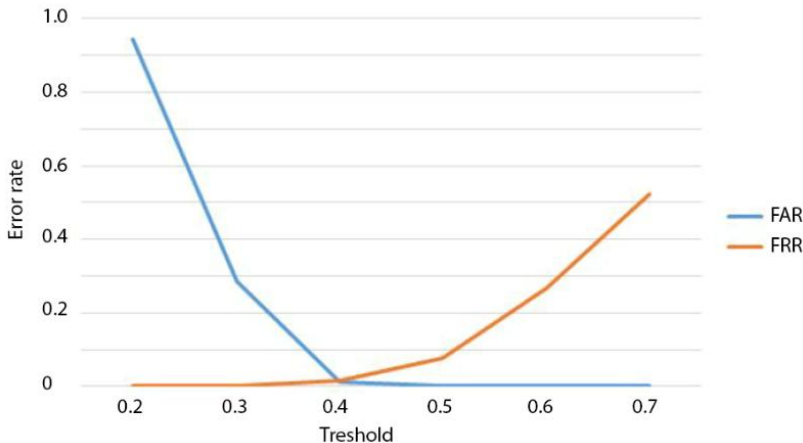


Figure 2. Dependence of FAR and FRR errors on the threshold

As shown in Figure 2, at the intersection point of the two curves, when the threshold is 0.4, the values of FAR and FRR are approximately equal to 0.015. Systems requiring high security, such as access control in military or financial institutions, prioritize a low FAR, while applications focused on user convenience, like smartphone unlocking, favor a low FRR.

Conclusions. The study has determined that the threshold value has a significant impact on the accuracy of fingerprint identification. An optimal balance between FAR and FRR is achieved at a threshold value of 0.4. The results can be used to improve the reliability of biometric systems.

[1] Jain, A. K., Bolle, R., & Pankanti, S. (Eds.). (2006). *Biometrics: Personal Identification in Networked Society*. Springer-Verlag. DOI: <https://doi.org/10.1007/b117227>.

[2] Maltoni, D., Maio, D., Cappelli, R., & Wayman, J. L. (2003). *Handbook of Fingerprint Recognition*. Springer-Verlag. DOI: <https://doi.org/10.1007/b97303>.

[3] Bansal, R., Sehgal, P., & Bedi, P. (2011). Minutiae Extraction from Fingerprint Images – a Review. arXiv. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1201.1422>.

[4] Ulery, B. T., Hicklin, R. A., & Roberts, M. A. (2011). The accuracy and reliability of fingerprint analysis: A comprehensive evaluation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(12), 5085-5090. DOI: [10.1073/pnas.1018707108](https://doi.org/10.1073/pnas.1018707108).

Севостьянов Ю.В., канд. техн. наук.
Могила А.А., канд. фіз-мат. наук., старш. наук. співр.
sevuriy@ukr.net
moganat1196@gmail.com
ІРЕ ім. О.Я.Усикова НАН України

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ПЕРЕВІРКИ АЗИМУТАЛЬНОГО КАНАЛУ РАДІОТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ БЛИЖНЬОЇ НАВІГАЦІЇ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН ЦИВІЛЬНОЇ АВІАЦІЇ

Розглядаються пропозиції щодо перспективного розвитку та застосування контрольно–перевірочної апаратури, яка призначена для контролю технічних параметрів блоків авіаційного радіоелектронного обладнання (АРЕО) повітряних суден (ПС) цивільної авіації (ЦА) з метою підвищення своєчасності виявлення відмов АРЕО, скорочення часу на пошук відмов АРЕО, збільшення кількості блоків АРЕО, які підлягають контролю, зменшенні людських затрат, підвищенні точності й достовірності результатів контролю блоків АРЕО, яке перевіряється в результаті проведення регламентних та ремонтних робіт на АРЕО ПС цивільної авіації.

Нині при збільшенні потреби перевезення пасажирів і вантажів на різних континентах нашої планети авіаційним транспортом, гостро зростає потреба розширення парку ПС пасажирської і транспортної ЦА та ще гостріше виникає проблема обслуговування та ремонту ПС ЦА. Проблема полягає перш за все у збільшенні вимог до безпеки авіаційних перевезень незалежно від відстані між пунктами призначення, їх розміщення на земній поверхні, метеорологічних умов, а також у кількості і своєчасності перевезень пасажирів і вантажів, зменшенні кількості членів екіпажу ПС ЦА. В наслідок цього виникає

потреба у підвищенні функцій при автоматичній роботі АРЕО, що відповідає збільшенню АРЕО своїх функціональних задач і, тим самим, кількості функціональних вузлів АРЕО. Тому, світові флагмани – виробники АРЕО ПС ЦА, такі, як Airceon [1], постійно ведуть роботи щодо розвитку технологій проектування та виробництва сучасної електронної бази АРЕО. При розкриванні цих факторів, виникає задача обслуговування та ремонту сучасних блоків АРЕО шляхом розвитку сучасної контрольно–перевірочної апаратури спеціального (для перевірки тактичних характеристик АРЕО, таких як азимут, дальність, курс і т.д.) та універсального призначення для перевірки технічних характеристик (осцилографи, мультиметри, частотоміри та інше).

У доповіді розглядається принцип розробки та застосування пристрою для перевірки азимутального каналу радіотехнічної системи ближньої навігації (РСБН) ПС ЦА з застосуванням персональних комп'ютерів (ПК), мікроконтролерних платформ типу Arduino, USB – генераторів та радіомодулів (рис. 1) [2]. За допомогою ПК до мікроконтролера записується програма з радіонавігаційними параметрами умовного польоту ПС за умовним або реальним маршрутом. Мікроконтролер формує низькочастотні відеоімпульсні сигнали амплітудою U_{m1} , тривалістю імпульсу $\tau_{BI} = 6$ мкс та періодом $T_{пBI} = 58$ мкс (рис. 2), аналогічні тим, які формує наземний радіомаяк РСБН-Н типу VOR, TACAN [3] і видає їх на USB – генератор, який у свою чергу перетворює їх у низькочастотні радіоімпульсні послідовності U_{m2} (рис. 2), з періодом $T_{пBI} = 58$ мкс та тривалістю імпульсу $\tau_{BI} = 6$ мкс, які закладені у програмі мікроконтролера. В радіомодулі ці сигнали перетворюються у високочастотні радіоімпульсні послідовності U_{m3} , (рис. 2) з тим же періодом $T_{пPI} = T_{пBI}$ та тривалістю імпульсу $\tau_{BI} = \tau_{PI}$. У радіомодулі сигнали U_{m3} підсилюються, до рівня U_{m4} (рис. 2), і

випромінюються за допомогою антени і потім приймаються антенною бортової РСБН ПС.

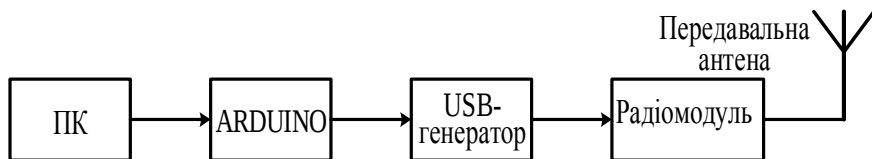


Рисунок 1. Блок-схема пристрою перевірки азимутального каналу РСБН повітряних суден

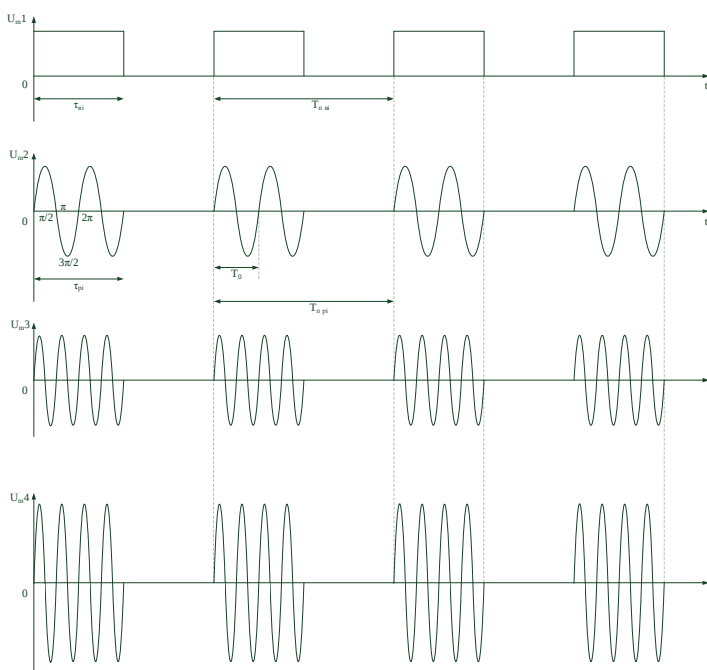


Рисунок 2. Епюри сигналів мікроконтролера U_{m1} , USB – генератора U_{m2} та радіомодуля U_{m3} , U_{m4}

Програма мікроконтролера типу ARDUINO розроблялася на мові програмування "C" та за допомогою ПК завантажувалася до мікроконтролера [4]. У скетчі описані параметри підключення одного з цифрових виходів до USB – генератора за допомогою команди "pinMode(13, OUTPUT)", де 13 це підключений вихід. Параметри $T_{\text{пВІ}}$ та $\tau_{\text{ВІ}}$ описують формування фронтів і зрізів, тривалість імпульсів і часовий інтервал між ними відповідно за допомогою команд: digitalWrite(13, HIGH); digitalWrite(13, LOW); delay(0,006); delay(0,0018). Команда "HIGH" переводить цифровий вихід 13 у стан логічної "1". Команда "LOW" переводить цифровий вихід 13 у стан логічного "0". Команда " delay(0,006)" формує тривалість імпульсу 6 мкс. Команда delay(0,0018) формує часовий інтервал між імпульсами 18 мкс. Період $T_{\text{пВІ}}$ формується командами delay(0,006) + delay(0,0018).

Отже, цей пристрій створено для заміни існуючих пристроїв типу ПКСО-69, ПСО4-315И [5], що зменшить кількість помилок при вимірюванні радіонавігаційних параметрів, підвищить точність і достовірність результатів перевірки. За допомогою розробленого пристрою виконується імітація польоту ПС, при якому здійснюється перевірка блоків бортової РСБН у повному обсязі. Це дозволяє не виконувати контрольний політ ПС після регламентних і ремонтних робіт засобів радіонавігації і, отже, суттєво економити на авіаційних паливо-мастильних матеріалах, наземному забезпеченні радіозв'язком, штурманському, інженерно-авіаційному, радіонавігаційному та метеорологічному забезпеченні, на підготовці до польоту руліжних доріжок і злітно-посадкової смуги шляхом контролю на відсутність вибоїн, тріщин, наявності сторонніх предметів [6], чого

неможливо уникнути при експлуатації приладів типу ПКСО-69, ПСО4-315И та їм подібних.

[1] Aireon: URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Aireon> (дата звернення: 10.11.2018).

[2] Ю. В. Севостьянов, М. Р. Арасланов, "Азимутальний канал пристрою для перевірки бортових радіонавігаційних систем з перепрограмувальним ARDUINO". Патент на корисну модель № 125038, Квіт. 2018.

[3] Very high frequency Omni directional radio Range: URL: <https://www.avsim.su/wiki/VOR> (дата звернення: 25.05.2017).

[4] Programming Arduino: URL: <https://coollib.cc/b/369142-saymon-monk-programmiruem-arduino/read> (дата звернення: 12.03.2018).

[5] Ан-24, Ан-26, Ан-30. ТУ по выполнению регламентных работ. выпуск 19, часть 2 (Периодическое ТО): URL: <https://an-26.com/TU-24/18-19/TU-19-2.pdf>. (дата звернення: 02.04.2019).

[6] Про затвердження Правил інженерно-авіаційного забезпечення державної авіації України. Міністерство Оборони України. Наказ № 343 від 05.07.2016: URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1101-16#Text> (дата звернення: 22.03.2017).

Oleksii M. Liske, PhD (Technical Sciences)

oleksii.m.liske@lpnu.ua

Lviv Polytechnic National University

SIMULATION OF AN AUTOMATIC CONTROL SYSTEM WITH A PID CONTROLLER: A CASE STUDY OF AN INVERTED PENDULUM

Introduction

The design of self-balancing robots based on the inverted pendulum plays a crucial role in robotics, autonomous navigation, and control theory education. These inherently unstable systems serve as benchmarks for stabilization techniques, with PID controllers widely used for their simplicity and effectiveness. These systems integrate theoretical knowledge with practical skills in electronics, modeling, and programming. In [1], a two-wheeled robot with a PID controller demonstrates effective stabilization. Study [2] emphasizes kinematic modeling for robotic systems, while [3] explores model-based and data-driven approaches, highlighting the relevance of this research in contemporary science.

The aim of this study is to develop, model, and construct a self-balancing mobile robot based on the inverted pendulum principle.

The study aims to develop a mathematical model of the self-balancing robot in Scilab, implement a hardware platform based on a microcontroller that utilizes an inertial measurement unit and a wheel drive system, implement a PID-based control system to maintain stable equilibrium, and analyze the system's performance under varying PID coefficients to assess their impact on stability and balancing accuracy.

Research Methodology

This study uses mathematical modeling of inverted pendulum dynamics in Scilab, experiments with the MPU6050 inertial sensor for position measurement, PID controller implementation on the ESP32 microcontroller, empirical tuning of PID coefficients through controlled experiments, and comparative analysis of test results to assess stability and balancing accuracy.

Key Results

The inverted pendulum is an inherently unstable and nonlinear system that requires an active controller to maintain its center of mass above the pivot point, i.e., to preserve equilibrium. A common approach to implementing the inverted pendulum is to mount the pivot point on a cart that is able to move horizontally.

By applying a free-body diagram and summing the forces, two equations are derived to describe the system's behavior – one for the pendulum's position and one for the cart's position relative to the applied force.

The transfer function $G(s)$ of the output, i.e., the pendulum position $\Phi(s)$ with respect to the driving force F , is given by:

$$G(s) = \frac{\Phi(s)}{F(s)} = \frac{\frac{ml}{q}s}{s^3 + \frac{b(I + ml^2)}{q}s^2 - \frac{(M + m)mgl}{q}s - \frac{bmgl}{q}} \left[\frac{rad}{N} \right],$$

where $q = (M + m)(I + ml^2) - (ml)^2$.

The transfer function $G(s)$, representing the output – i.e., the pendulum position $\Phi(s)$ with respect to the driving force F – is given by:

$$H(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{\frac{I + ml^2}{q}s^2 - gml}{s^4 + \frac{b(I + ml^2)}{q}s^3 - \frac{(M + m)mgl}{q}s^2 - \frac{bmgl}{q}s} \left[\frac{m}{N} \right],$$

where M is the mass of the cart, m is the mass of the pendulum, b is the cart's friction coefficient, l is the distance to the pendulum's center of mass, I is the pendulum's moment of inertia, F is the force applied to the cart, φ is the angular position of the pendulum, and x is the position of the cart.

The mathematical modeling of the inverted pendulum dynamics was carried out in the Scilab environment (Figure 1). The result of the simulation of the impulse response of the pendulum without the action of the PID controller is shown in Figure 2a.

The inverted pendulum with a PID controller was implemented on an ESP32 microcontroller, with the code written in Arduino IDE. The control system software consists of a simple loop.

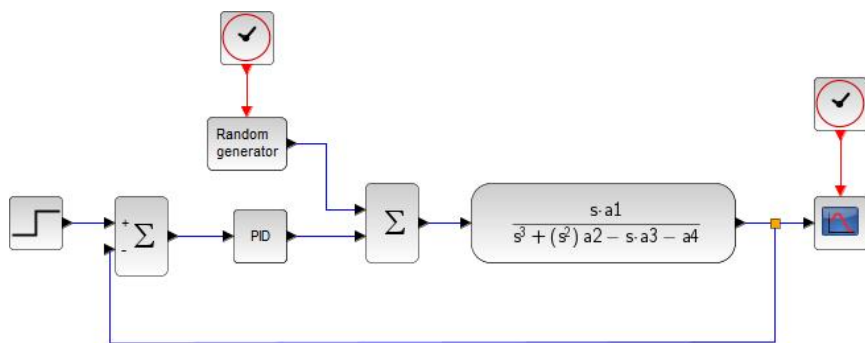


Figure 1. Block diagram of the inverted pendulum with a PID controller

Sensor values are read, stored, scaled, and filtered for reliable data. The error between input values and the setpoint is calculated and processed by the PID controller to generate a control signal. The motor speed and direction are adjusted, causing the robot to compensate for the error and maintain balance.

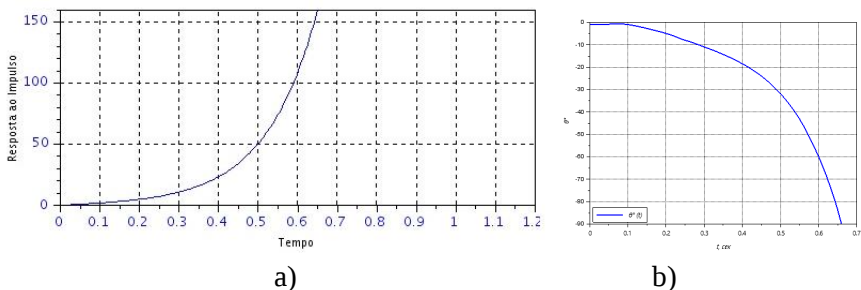


Figure 2. Pendulum in free fall without PID control: a – simulation; b – measurement

Figure 2b shows the results of the physical modeling of the impulse response of the inverted pendulum without the action of the PID controller. The system is unstable in the absence of control: an input with limited energy produces an output of unbounded magnitude.

Figure 3 presents results illustrating the effect of the PID controller coefficients on the system's transient responses in the time domain

When all three components of the PID controller are used, the system becomes stable, as evidenced by its response to a short-duration impulse.

A study was also conducted on the influence of mass distribution in the object to be stabilized.

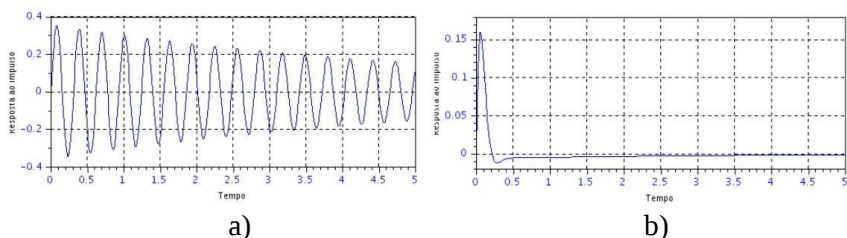


Figure 3. Time-domain impulse response with PID controller:

a – $K_p=60$, $K_i=0$, $K_d=0$; b – $K_p=60$, $K_i=20$, $K_d=4$

It was found that the mass distribution affects the quality of the transient response. This finding was taken into account during the design of the experimental prototype. In particular, the battery compartment, which is the heaviest of the components used, was elevated to the second tier.

Conclusions

The study developed a mathematical model of the inverted pendulum system and implemented it using a PID controller on an ESP32 microcontroller. The experiments investigated the effect of PID parameters on stability and balancing performance. Results confirm the PID controller's effectiveness in stabilizing inherently unstable nonlinear systems in real time. The system can serve as an educational example for modeling, programming, and designing automatic control systems.

[1] A. Das, M.M. Rahman, A.R. Adib, M.R. Anam, "Object avoiding self-balancing robot with PID-controller using ultrasonic sensor", Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering and Renewable Energy 2021 12 – 14 December 2021, Chattogram, Bangladesh, Pages 1-7.

[2] K. Remell, K. Mordi, U.C. Wejinya, "Kinematic Modeling and Simulation of Inverted Pendulum for Balancing a Two-Wheeled Robot" Online Journal of Robotics & Automation Technology, Volume 1, Issue 5, 2023, Pages 1-8, DOI:10.33552/OJRAT.2023.01.000523.

[3] A. Abdelgawad, T. Shohdy, A. Nada, "Model- and Data-Based Control of Self-Balancing Robots: Practical Educational Approach with LabVIEW and Arduino" IFAC-PapersOnLine, Volume 58, Issue 9, 2024, Pages 217-222, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.07.399>.

Таращик Є.О., аспірант
Малий О.Ю., к.т.н., доцент
maze.ultramarine@gmail.com
НУ «Запорізька політехніка»

РОЗРОБКА НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ ДЛЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЙ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ

У сучасних умовах безпілотні літальні апарати (БПЛА) активно використовуються в середовищах, де традиційні навігаційні методи, зокрема GPS, недоступні або нестабільні. Це актуально для польотів у приміщеннях, тунелях, лісах чи підземних спорудах. З огляду на це, виникає потреба у створенні автономних навігаційних систем, що дозволяють визначати положення та швидкість БПЛА без зовнішніх сигналів. Одним із перспективних напрямів є застосування технологій технічного зору – аналізу зображень, отриманих із камер, встановлених на борту дрона

Технічний зір дозволяє БПЛА сприймати навколишнє середовище через обробку відеопотоку. Основні завдання:

- визначення координат за допомогою реперних маркерів;
- розрахунок переміщення за оптичним потоком;
- побудова локальних карт і орієнтація у просторі.

Ці методи забезпечують високу автономність, оскільки потребують лише камери та алгоритмів обробки зображень.

Для обробки зображень використовується модель камери-обскури. Вона описується внутрішніми (фокусна відстань, оптичний центр, дисторсія) та зовнішніми параметрами (положення і орієнтація в просторі). Для усунення геометричних спотворень застосовується

калібрування за шаховим полем з використанням алгоритмів OpenCV або ROS. Це дозволяє коректно позиціонувати об'єкти у тривимірному просторі.

Проективна геометрія є основою для перетворень між 3D-сценою та 2D-зображенням. Ключовими інструментами є:

- однорідні координати;
- матриця камери;
- гомографія для обчислення положення камер відносно об'єктів.

Ці методи дозволяють виконувати точне позиціонування апарата, орієнтуючись на відомі візуальні орієнтири.

Реперні маркери – це спеціальні графічні фігури з унікальним кодом (наприклад, ArUco). Вони легко ідентифікуються за чотирма кутовими точками, що дозволяє визначити як положення, так і орієнтацію камери. Системи з маркерами вирізняються простотою реалізації, дешевизною і високою точністю, особливо в контрольованих середовищах (лабораторії, склади).

Оптичний потік – це векторне поле, яке відображає зміну положення об'єктів між кадрами. Для його розрахунку застосовують алгоритм Лукаса-Канаде. Недоліки – чутливість до освітлення і текстури, накопичення помилки з часом (дрейф). Вирішенням є поєднання з дальномірами та застосування ієрархічних (пірамідальних) структур зображень.

Найбільш ефективними є системи, які поєднують оптичний потік (для локального переміщення) і реперні маркери (для глобальної корекції положення). Такі системи тестуються у симуляторах (Gazebo, AirSim), що дозволяє моделювати реальні умови без ризику.

Висновки:

1. Технічний зір є ключовим інструментом для побудови автономних навігаційних систем БПЛА у GPS-недоступних зонах.
2. Методи на основі реперних маркерів забезпечують високу точність, а оптичний потік – безперервне позиціювання у просторі.
3. Поєднання методів дозволяє отримати стабільні результати, навіть за змінних умов навколишнього середовища.

Пропозиції:

- Розробити **легку модульну систему з відкритим кодом** для впровадження навігації на основі технічного зору у малих БПЛА.
- Забезпечити **інтеграцію з автопілотом PX4 або ArduPilot** через MAVLink для практичного застосування.
- Використати симулятори Gazebo або AirSim для **масштабного тестування і навчання моделей**, зокрема із використанням нейромереж у подальшому.
- Розширити систему за рахунок **поєднання технічного зору з ІНС** (інерційною навігаційною системою) для кращої точності у довготривалих польотах

1. Bradski G., Kaehler A. Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library. — O'Reilly Media, 2008.
2. Faugeras O. Three-Dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint. — MIT Press, 1993.
3. Hartley R., Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision. — Cambridge University Press, 2004.

4. Rublee E., Rabaud V., Konolige K., Bradski G. ORB: An Efficient Alternative to SIFT or SURF. — In ICCV 2011.
5. Garrido-Jurado S. et al. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. — Pattern Recognition, 2014.
6. Білоус В.С., Лавров Д.О. Автоматизовані системи керування безпілотними літальними апаратами. — Харків: ХАІ, 2020.
7. Кривошей С.І. Математичне моделювання систем технічного зору. — Київ: НАУ, 2018.
8. Лисенко В.А., Копилов С.О. Засоби та методи комп'ютерного зору у задачах робототехніки. — Вісник ХНУРЕ. — №3, 2021.
9. Пелешко Д.Я., Квасниця І.В. Інформаційні технології в системах автоматизованого управління БПЛА. — Наукові вісті НТУУ "КПІ", 2019, №2.
10. Руденко В.Г., Гнатенко О.В. Розробка інтелектуальних систем керування для автономних мобільних роботів. — Системи управління, навігації та зв'язку, 2020, №4.

Гарачук С.А., ст. викладач
Малий О.Ю., канд. техн. наук, доц.
Костяной П.А., аспірант
sagarachuk@zp.edu.ua
docsasha2@gmail.com
mahoneykos@gmail.com
НУ «Запорізька політехніка»

ОПТИМІЗАЦІЯ СХЕМОТЕХНІКИ ТА КОНСТРУКЦІЇ БЕЗДРотовИХ ПРИЙМАЧІВ АНАЛОГОВОГО ВІДЕОСИГНАЛУ ПРИ ЇХ ЗАСТОСУВАННІ ДЛЯ ДЕТЕКТУВАННЯ БПЛА

У сучасних системах дистанційної бездротової передачі відеосигналів з FPV-дронів під час їх польоту і бездротового відеоспостереження важливу роль відіграють приймачі, здатні працювати в діапазоні 5,8 ГГц. Один із найбільш популярних варіантів приймачів аналогового відеосигналу в цьому діапазоні – модуль RX5808, що поєднує компактність, простоту інтеграції й ефективну роботу в системах аналогової передачі відео. Вивчення та оптимізація його структури та схемотехніки є важливим для розробки власних приймачів, що можуть застосовуватись як для створення наземних систем приймання відео з якими працюють оператори БПЛА так і для побудов детекторів аналогового відеосигналу для виявлення БПЛА противника чи зловмисника.

RX5808 – це готовий модуль відеоприймача діапазону 5,8 ГГц, який широко використовується у FPV-системах. Він дозволяє приймати аналоговий відеосигнал, що передається за допомогою FM-модуляції, і виводити його у вигляді композитного сигналу (CVBS). Модуль не має мікроконтролера для керування, а являє собою лише радіочастотну

частину і для керування ним необхідно використовувати мікроконтролер, який буде подавати команди керування по шині SPI. Основою модуля є чип RTC6715, який забезпечує демодуляцію сигналу, налаштування частоти через SPI та автоматичне регулювання підсилення (AGC). Структурна схема приймача RX5808 зображена на рисунку 1.

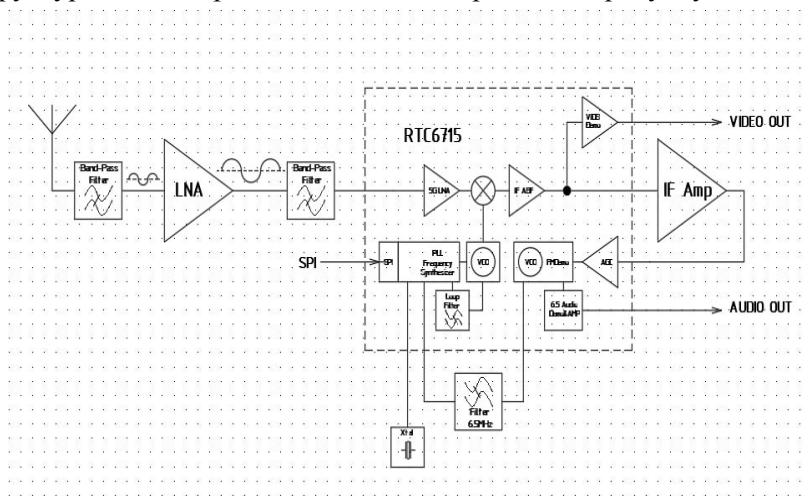


Рисунок 1. Структурна схема приймача RX5808

Модуль RX5808 працює за таким принципом: прийнятий антеною 5.8 ГГц аналоговий відеосигнал проходить через вхідний смуговий фільтр для відбору потрібного діапазону частот, після чого підсилюється малoshумним підсилювачем (LNA) для підвищення чутливості. Далі сигнал надходить на змішувач, де перетворюється на проміжну частоту (IF) за допомогою сигналу від гетеродинна (VCO), стабілізованого системою ФАПЧ (PLL). Сигнал проміжної частоти фільтрується та підсилюється, а потім демодулюється FM демодулятором для вилучення вихідних аналогових відео та (за наявності) аудіосигналів, рівень яких автоматично регулюється системою AGC перед

подачею на відповідні виходи. Зображення модуля RX5808 з вказанням блоків показано на рисунку 2.

В роботі проведено комплексне дослідження параметрів та конструктивних особливостей приймача аналогового відеосигналу RX5808. Метою дослідження було глибоке розуміння його можливостей та обмежень для подальшого проектування аналогічного приймача з покращеними характеристиками, орієнтованого на застосування в системах детектування безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

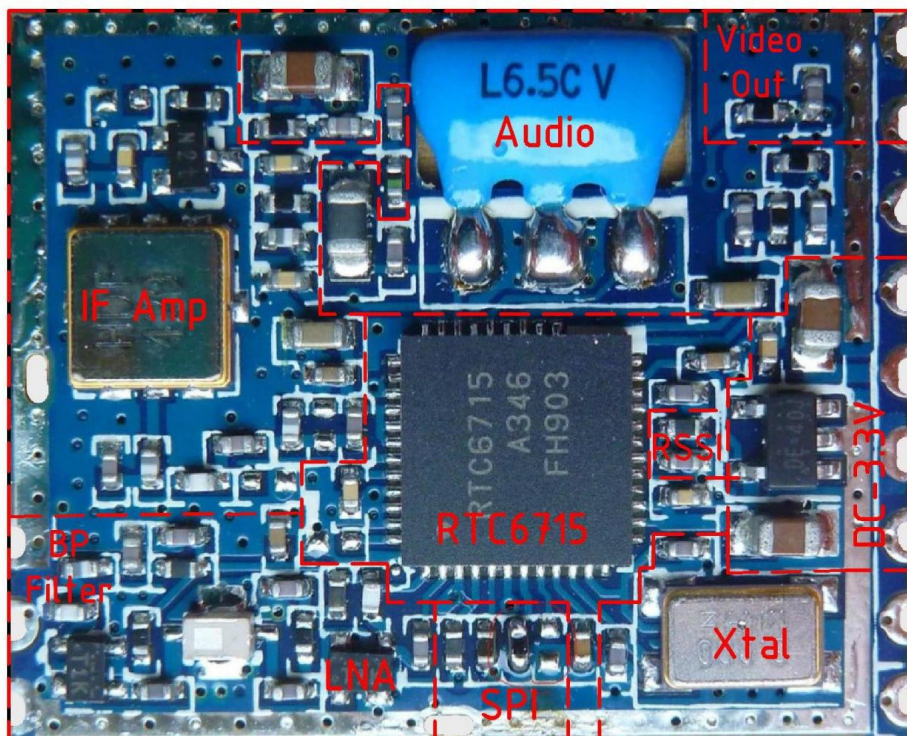


Рисунок 2. Модуль RX5808

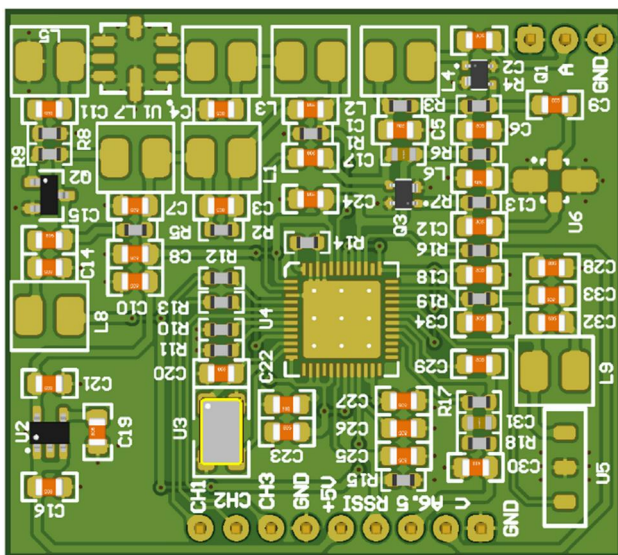


Рисунок 3. Розроблена плата аналога модуля RX5808

Дослідження виконувалось за наступними етапами:

- дослідження конструкції модуля, компонентної бази та особливостей трасування друкованої плати;
- експериментальне дослідження ключових параметрів модуля;
- вимірювання чутливості приймача;
- оцінка вибіркості та здатності пригнічувати позасмугові завади;
- визначення рівня власних шумів приймача.
- вимірювання споживання струму та ефективності енергоспоживання.
- дослідження стабільності роботи в різних умовах (наприклад, при зміні напруги живлення).
- виявлення обмежень та потенціалу для покращення.

Практичним результатом даної роботи є розроблена друкована плата аналога модуля RX5808, яка слугуватиме експериментальною платформою для дослідження характеристик приймачів 5.8ГГц та вивчення можливостей їхньої оптимізації для застосування у системах виявлення БПЛА. Етап експериментального тестування розробленої плати знаходиться на стадії виконання, а отримані дані стануть основою для подальшого аналізу та висновків.

[1] Структура та основні компоненти сучасних безпілотних літальних апаратів для автономних завдань / Левченко Д.С., Баранов Є.О., Гаврилюк А.О., Малий О.Ю. // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – Том 35 (74) № 6, 2024. – с. 124-128 <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.1/21>

[2] Малий О.Ю., Фурманова Н.І., Онищенко В.Ф. Шифрування аналогового відеосигналу з використанням хаотичних сигналів/Матеріали І Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми в радіoeлектроніці, телекомунікаціях» (СПРТ'2024), Львів, Україна, 22–23 травня 2024. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2024. с. 172-176– Режим доступу: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/attachments/2024/apr/34397/atrt-2024conferenceproceedings.pdf> . 22–23 травня 2024 р., Львів, Україна, гібридний формат

Oleksii M. Liske, PhD (Technical Sciences)

Roman M. Velychko, student

oleksii.m.liske@lpnu.ua

roman.velychko.ap.2024@lpnu.ua

Lviv Polytechnic National University

ACCESS CONTROL SYSTEM USING FACIAL AND HAND GESTURE RECOGNITION ON ARDUINO

Introduction. In modern access control systems, the use of facial recognition technologies based on Arduino microcontrollers is gaining increasing popularity due to their affordability, flexibility, and ability to integrate with actuators such as servo motors. These systems enable contactless, automated user identification, which is particularly relevant for enhancing security in smart homes, offices, educational institutions, and transportation facilities. For instance, the study in [1] presents an IoT-based solution for automated door opening using the ESP32-CAM, which combines facial recognition with servo motor control.

Another study [2] demonstrates the implementation of an Arduino-based access control system employing machine learning algorithms for facial recognition, highlighting the effectiveness of such approaches in enhancing security. Furthermore, the work in [3] explores the integration of facial recognition with contactless temperature measurement to improve safety in the context of a pandemic. These studies emphasize the importance of continued scientific research in this field to develop more reliable, adaptive, and secure access control systems.

The purpose of this development is to design a user identification system based on facial recognition using a camera and biometric data,

which also processes hand gestures and activates motors when specific conditions are met.

Research Objectives:

1. To investigate biometric identification methods, image and gesture recognition techniques; to define the system's technical requirements, select appropriate hardware, and develop machine learning algorithms for facial and gesture recognition.

2. To integrate the algorithms with the motor control system; to design and test a prototype under conditions close to real-world environments; to evaluate accuracy using test data; to assess system performance and security, followed by further optimization.

Main Results

A key component of the recognition system, implemented in Python, is a subroutine for building a user face database. It utilizes technologies such as OpenCV, dlib, face_recognition, and NumPy. This module captures images from a webcam (via OpenCV), recording faces from various angles and lighting conditions to improve recognition accuracy. During the preprocessing stage, illumination equalization, color normalization, and noise filtering are applied using OpenCV image processing functions. Feature extraction is performed using histogram of oriented gradients and local binary patterns algorithms, available through the dlib and scikit-image libraries. Face vectors are generated using the face_recognition library, which is based on deep neural networks. The resulting data is stored in files or databases with optional encryption.

To optimize performance, clustering algorithms and data compression techniques are used to speed up subsequent searches. The final stage involves recognition accuracy testing and automatic database updates, ensuring data relevance and stable real-time system operation. Altogether,

this enables the creation of a user-friendly application that requires minimal manual intervention while providing high identification accuracy.

User Enrollment Mode

The process of creating a facial image database begins with capturing images of a new user by activating the webcam through the program's menu interface (Figure 1). Image enhancement is performed using a contrast-limited adaptive histogram equalization method. The facial region is then detected using a Dlib-based face detector. Detected faces are cropped and resized to 200×200 pixels, and a specified number of grayscale images (as defined via the GUI) are saved in a folder named according to the user input provided in the GUI text field.



Figure 1. Program menu and user interface

The next stage involves training the recognition model based on the collected data. Once trained, the model is saved, allowing it to be reused in the future without retraining – simply by loading the existing model.

The process concludes with testing and validating the model using new data and cross-validation techniques, during which key performance metrics such as accuracy, sensitivity, and specificity are evaluated to assess recognition effectiveness. During this stage, images are captured from the

camera, the region containing a face is detected, and each detected face is passed to the model, which returns a confidence score. If the confidence is below a predefined threshold (e.g., `unknown_threshold = 80.0`), the system displays the corresponding user's name from the database.

In recognition mode, in addition to user identification based on facial imagery, hand gestures are also recognized. The MediaPipe library is employed to track hand movements and calculate the distance between fingertips. Specifically, the distance between the index finger and the thumb (landmarks 4 and 8) is measured.

The recognition performance was evaluated by analyzing the dependence of the False Acceptance Rate (FAR) and False Rejection Rate (FRR) on the threshold value (see Figure 2).

Arduino receives data via the serial port. This data includes information about the distance between fingertips, the presence of a hand in the frame, and the user's name, if a hand is detected. If a hand is present and the recognized user is authorized to control the system, a message in the format `distance;` is transmitted. If no hand is detected or the user's name does not match, the message `0;` is sent.

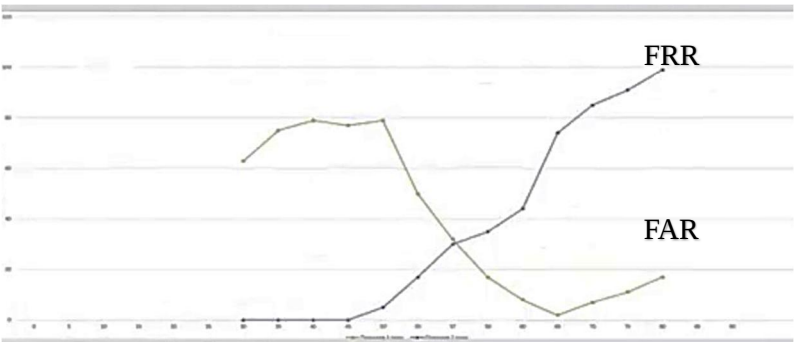


Figure 2. The dependence of FAR and FRR errors on the threshold value

Arduino processes this input for further actions, such as controlling a device (e.g., a motor or sensor). In such a case, if the distance changes (e.g., between fingers), Arduino responds accordingly and performs predefined actions.

Conclusions

As a result of the research work, an autonomous access control system based on biometric authentication was developed. The errors of the facial recognition system were also evaluated. The system operates independently and does not require external computational resources.

[1] Binti Harun, N., & Bin Zainal, M. S. Development of Face Recognition Smart Door Lock System Using ESP32-CAM and Telegram Application As Media Control and Monitoring. *Progress in Engineering Application and Technology*, 4(2) 2023, 035-048.

[2] Nasir, J., Ramli, A., & Michael. Design of Door Security System Based on Face Recognition with Arduino. *JOIV: International Journal on Informatics Visualization*, Vol. 3 (2019) No. 2, 127-131.

[3] Li, L., Yang, J., Hong, R., & Yu, M. (2022). Integrated Access Control System of Face Recognition and Non-Contact Temperature Measurement Based on Arduino. *International Journal of Computer and Organization Trends*, Volume 12, Issue 2, 2022, 1-5.

Тарас Роса, аспірант
Олег Яремко, к.т.н., доц.
taras.v.rosa@lpnu.ua

Національний університет «Львівська політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ІНЕРЦІЙНОГО КЕРУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ

Сучасний розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА) супроводжується дедалі вищими вимогами до точності їхнього позиціонування та автономності керування. Інерційне керування стало одним із ключових напрямів досліджень у цій галузі, оскільки воно забезпечує високу надійність в умовах, де використання лише супутникових навігаційних систем, таких як GPS, може бути обмеженим. Наприклад, у міських умовах, під час польотів в ущелинах або в умовах радіоперешкод супутникова навігація може стати ненадійною. Це створює потребу у використанні комбінованих систем навігації, які об'єднують інерційні сенсори, альтиметри, давачі швидкості, а також методи обчислювального аналізу даних для покращення точності позиціонування.

Існуючі підходи до інерційного керування базуються на застосуванні:

1. Класичних інерційних навігаційних систем (ІНС). Вони використовують гіроскопи та акселерометри для обчислення положення, швидкості та орієнтації БПЛА (рис. 1). Основний недолік таких систем полягає в накопиченні похибок через дрейф сенсорів, що обмежує їхню точність при тривалому використанні [1].

2. Методів комбінованої навігації. Ці системи поєднують дані ІНС з GPS, що дозволяє компенсувати похибки дрейфу. Наприклад, у [2] запропоновано алгоритм фільтру Калмана, який поєднує GPS та інерційні дані для високоточного позиціонування. Проте такі підходи вразливі до втрати сигналу GPS.

3. Використання Lidar та інших сенсорів. Lidar дозволяє точно визначати висоту та відстань до об'єктів у навколишньому середовищі. У роботі [3] розглядається інтеграція Lidar-даних з інерційними для покращення автономного керування БПЛА в умовах обмеженої видимості (рис. 2).

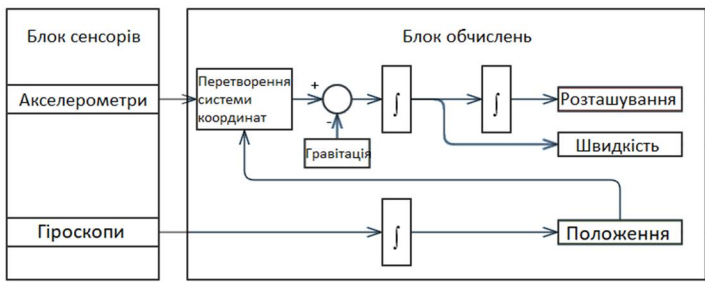


Рисунок 1. Структурна схема класичної системи інерційної навігації

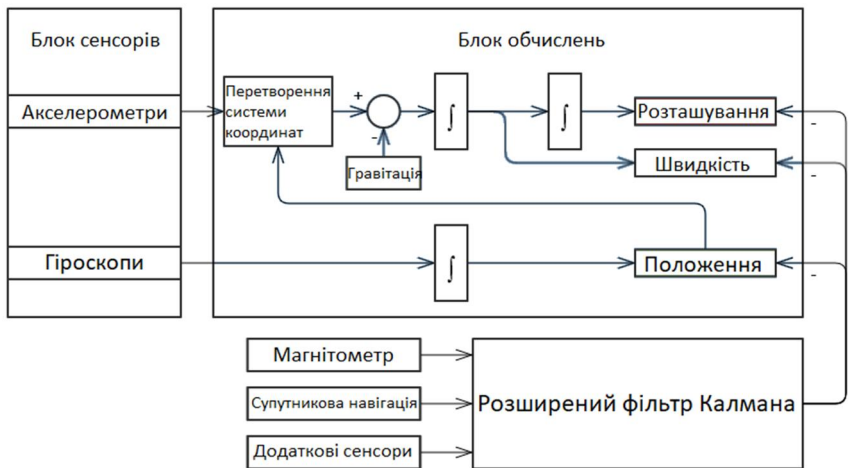


Рисунок 2. Структурна схема розширеної системи інерційної навігації з додатковими сенсорами

Одним із ключових елементів сучасного інерційного керування є алгоритм фільтра Калмана, який дозволяє ефективно об'єднувати дані з різних сенсорів з урахуванням їхніх похибок та динаміки системи. Інерційна навігаційна система надає високу частоту оновлення інформації про положення, швидкість та орієнтацію БПЛА, однак її точність з часом знижується через накопичення похибок, зумовлених дрейфом сенсорів. Для компенсації цього ефекту фільтр Калмана використовує вимірювання з додаткових джерел таких як GPS, магнітометри, барометри чи Lidar. На основі попереднього стану та моделі руху він прогнозує нове положення БПЛА, а при надходженні нових сенсорних даних виконує корекцію прогнозу, зважуючи внесок кожного сенсора відповідно до його надійності. Такий підхід дозволяє значно підвищити точність позиціонування та забезпечити надійне автономне керування навіть за умов втрати сигналу GPS або в умовах радіоперешкод. Зокрема, у програмному забезпеченні Ardupilot реалізовано розширений фільтр Калмана (EKF), який інтегрує дані з інерційних сенсорів, супутникової навігації, магнітометрів та висотомірів для формування стійкої та узгодженої оцінки стану літального апарата в реальному часі.

Програмне забезпечення, таке як Ardupilot та Mission Planner, є потужними інструментами для реалізації систем автономного керування БПЛА. Вони забезпечують роботу з завантаженими картами та дозволяють гнучко налаштовувати алгоритми позиціонування. У [4] показано, як Ardupilot інтегрує дані GPS, магнітометра та інерційних сенсорів для побудови точних траєкторій польоту.

Окрім традиційних підходів до інерційного керування, у сучасних дослідженнях все частіше використовуються методи штучного інтелекту, зокрема машинного навчання, для обробки сенсорних даних та

підвищення точності прогнозування траєкторії БПЛА. Наприклад, нейронні мережі можуть ефективно компенсувати похибки, викликані нестабільністю сенсорів або непередбачуваними зовнішніми впливами, такими як вітер або турбулентність.

Значну роль відіграють також методи фільтрації, зокрема розширені варіанти фільтра Калмана (Extended Kalman Filter, Unscented Kalman Filter), які здатні працювати з нелінійними моделями руху БПЛА та забезпечувати вищу стійкість і точність навігаційних обчислень.

Одним із важливих викликів у реалізації інерційного керування є мініатюризація апаратних засобів, що зберігають достатню точність при зниженій масі та енергоспоживанні. MEMS-інерційні сенсори (мікроелектромеханічні системи) стали важливим компонентом сучасних БПЛА завдяки своїй компактності, проте вони характеризуються вищим рівнем шумів та нестабільністю, що потребує складніших алгоритмів обробки.

Значну увагу приділяють також системам самокалібрування інерційних сенсорів у реальному часі, які дозволяють адаптуватися до змін навколишнього середовища та зношування компонентів. Такі підходи забезпечують зростання автономності БПЛА, особливо у сценаріях, де відсутній доступ до зовнішніх джерел навігаційних даних.

З огляду на постійне зростання ролі БПЛА у цивільних та військових сферах, від сільського господарства до аерофотозйомки та моніторингу інфраструктури, ефективні методи інерційного керування мають стратегічне значення. Подальші дослідження зосереджуються на створенні гібридних систем, здатних до само-

навчання, відновлення після відмов та високої стійкості до складних погодних умов.

[1] W. Titterton and J. Weston, Strapdown Inertial Navigation Technology, 3rd ed., Institution of Engineering and Technology, 2014.

[2] Grewal, Mohinder S., and Angus P. Andrews. Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB, Wiley, 2020.

[3] Zhang, J., & Singh, S. (2017). "LOAM: Lidar Odometry and Mapping in Real-time." Robotics: Science and Systems.

[4] Ardupilot Documentation, "Ardupilot Overview," [Online]. Available: <https://ardupilot.org>

SECTION 7. Security of information and communication systems

СЕКЦІЯ 7. Безпека інфокомунікаційних систем

Бальковський Н.Я., аспірант

Климаш М.М., д.т.н., проф.

nazarii.y.balkovskyi@lpnu.ua

Національний університет «Львівська політехніка»

МОДЕЛЬ ВИЯВЛЕННЯ МЕРЕЖЕВИХ АТАК НА ОСНОВІ RANDOM FOREST ТА SHAP-АНАЛІЗУ

Вступ

Зростання складності та обсягів мережевого трафіку у сучасних інформаційно-комунікаційних системах підвищує ризики несанкціонованого доступу, атак типу DoS, ін'єкцій та інших кіберзагроз. Одним із найефективніших напрямів захисту є автоматизоване виявлення аномалій у мережеских потоках з використанням алгоритмів машинного навчання. Алгоритм *Random Forest*, як один із найбільш стійких та інтерпретованих методів, широко застосовується у задачах класифікації аномального трафіку [1], зокрема на відомих наборах даних таких як CICIDS 2017 [2].

Утім, для практичного застосування моделі у реальних інфраструктурах важливо не лише досягти високої точності, але й пояснити, чому система прийняла певне рішення. У цьому контексті метод *SHAP* (SHapley Additive exPlanations) [3] є одним із найбільш поширених інструментів для побудови інтерпретованих моделей

машинного навчання, включаючи ті, що побудовані на основі *Random Forest*. Завдяки цьому з'являється можливість як для глобального аналізу моделі, так і для пояснення окремих рішень у критично важливих системах.

Методологія

У роботі використано повний набір CICIDS 2017 [2], що містить різноманітні типи мережевого трафіку з позначенням класів «атака» або «нормальний трафік». Дані були попередньо нормалізовані за допомогою StandardScaler. До тренування моделі *Random Forest* залучено 80 % зразків, решту 20 % використано для валідації.

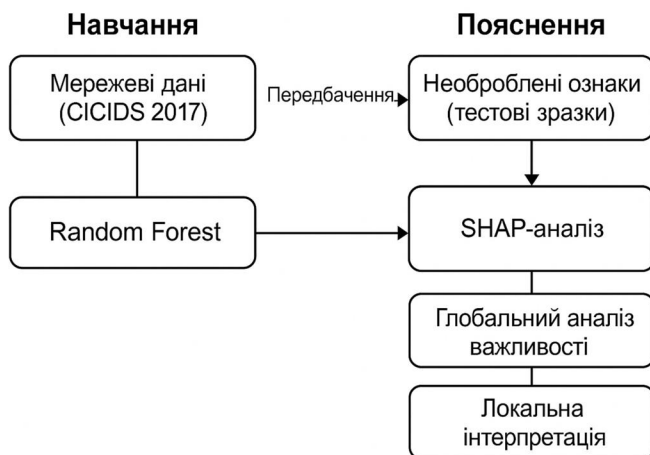


Рисунок 1. Блок-схема побудови пояснюваної моделі на основі Random Forest із SHAP-аналізом

Алгоритм *Random Forest* обрано завдяки його здатності працювати з великою кількістю ознак та стійкості до шумів у даних [3]. Після тренування моделі для пояснення її рішень використано метод SHAP

(*TreeExplainer*), який дозволяє отримати як глобальний вплив кожної ознаки на передбачення, так і локальні пояснення для конкретних зразків [3].

Глобальний аналіз виконувався шляхом розрахунку середнього абсолютного SHAP-впливу для кожної ознаки на тестовій вибірці. Локальне пояснення реалізовано за допомогою *waterfall-графіка* для окремих прикладів, що дозволяє простежити, які саме ознаки зміщували прогноз у бік класу «атака» або «норма» [4].

Результати

Після тренування моделі *Random Forest* на вибірці CICIDS 2017 із понад 70 числовими ознаками було проведено SHAP-аналіз на частині тестових даних. Глобальна інтерпретація показала, що найбільший вплив на рішення моделі щодо класифікації трафіку як «атака» мають такі характеристики, як *Bwd Packet Length Std*, *Init_Win_bytes_backward*, *Packet Length Mean*, *Fwd IAT Std* та *Destination Port*.

Рисунок 2 ілюструє результати глобального аналізу важливості ознак: зображено 5 ознак із найвищим середнім абсолютним SHAP-впливом. Це дозволяє зробити висновок, що модель ґрунтується переважно на характеристиках, пов'язаних з обсягом, напрямком і структурою потоку даних.

Для локального пояснення рішення моделі щодо конкретного зразка використано *waterfall-графік*, зображений на рис. 3. На ньому видно, як окремі ознаки, зокрема *Average Packet Size*, *Init_Win_bytes_backward* та *Bwd Packet Length Std*, збільшують логарифмічну ймовірність віднесення зразка до класу «атака». Водночас ознака *Destination Port* зменшувала загальне значення функції активації. Цей підхід дозволяє аналізувати не лише загальні закономірності, а й механізми прийняття рішень для окремих випадків.

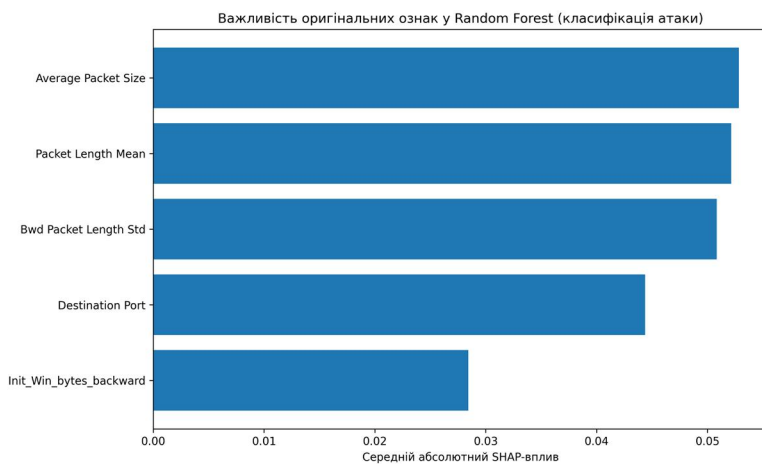


Рисунок 2. Топ-5 впливових ознак за результатами SHAP-аналізу (TreeExplainer, клас «атака»)

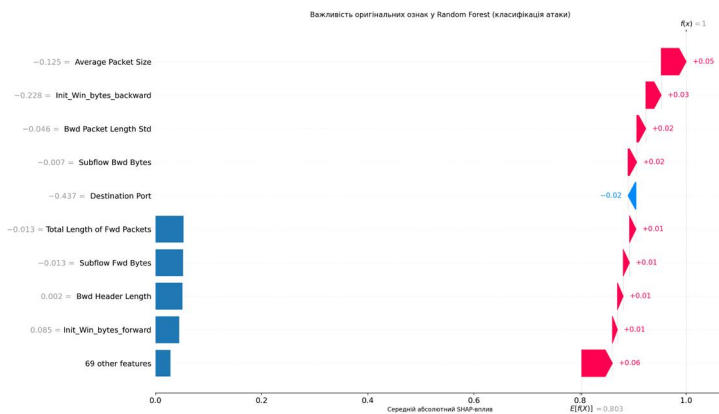


Рисунок 3. Локальне пояснення передбачення моделі Random Forest за допомогою SHAP waterfall-графіка для одного зразка (класифікація як «атака»)

Локальний аналіз із використанням waterfall-графіка дозволив інтерпретувати окремі випадки класифікації. Наприклад, для одного зі зразків аномального трафіку найбільший вплив на рішення моделі щодо класифікації як «атака» мали високі значення *Bwd Packet Length Std*, *Init_Win_bytes_backward* та *Packet Length Mean*. Водночас ознака *Destination Port* мала стримуючий вплив і знижувала ймовірність класифікації зразка як шкідливого. Такий підхід дозволяє чітко простежити внесок окремих характеристик у прийняття рішення на рівні конкретного трафіку.

Висновки

У роботі було продемонстровано ефективність поєднання моделі *Random Forest* із SHAP-аналізом для задачі виявлення мережевих атак. Отримані результати підтверджують, що SHAP дозволяє не лише досягти високої точності класифікації, але й забезпечує інтерпретованість моделі, що є важливою умовою для практичного застосування у системах кіберзахисту.

Побудова глобального профілю важливості ознак дає змогу виявити, які характеристики трафіку є найінформативнішими при виявленні атак. Локальні пояснення, своєю чергою, можуть бути використані адміністраторами безпеки для інтерпретації окремих інцидентів та ухвалення рішень у реальному часі.

У подальших дослідженнях планується інтеграція пояснень у систему моніторингу трафіку з можливістю автоматизованого

реагування на події, а також розширення підходу для роботи з потоками в режимі online.

[1] M. Loecher, “Debiasing SHAP scores in random forests,” *AStA Advances in Statistical Analysis*, vol. 108, pp. 427–440, 2023. doi: 10.1007/s10182-023-00479-7.

[2] Canadian Institute for Cybersecurity, *CICIDS 2017 Dataset*. [Online]. Available: <https://www.unb.ca/cic/datasets/ids-2017.html>

[3] S. M. Lundberg and S.-I. Lee, “A Unified Approach to Interpreting Model Predictions,” *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 30, arXiv preprint arXiv:1705.07874, 2017.

Pavlo Vlasenko, PhD Student
Serhii Samoilyk, PhD., Assoc. Prof.
vlasenko@zp.edu.ua
NU «Zaporizhzhia Polytechnic»

SIMULATION-BASED TEST OF SOURCE-SIDE AUTHENTICATION IN ANALOG VIDEO TRANSMISSION SYSTEMS

Nowadays the analog-video transmission systems are considered outdated and actively are being replaced by digital counterparts. However, in certain situations they are still a valid option, especially when cost, low-latency and resilience in noisy environments are priorities, for example in unmanned vehicle operations or surveillance systems.

This work is focused on developing a method for the analog-video source verification using modern asymmetric cryptographic algorithms, adding the ability to reliably check if the video transmission is coming from the verified source.

Previously known works focused mostly on the signal encryption [1][2] or copyright protection [3][4] methods, and based on symmetric cryptographic algorithms, such as DES, AES, ГОСТ- 28147-89 [1][2]. The proposed method uses both symmetric (AES) and asymmetric

(RSA) algorithms for video encryption and source validation, preventing most of the security risks, such as signal spoofing, key injection or key replacement, man-in-the-middle attacks and unauthorized viewing.

Video stream is encoded using block-permutation (16x16 blocks) and XOR-masking, with AES-128 in CTR used as a secure random-number generator for session encryption keys. Session metadata that contains session key and nonce is encrypted on the transmitter side using the receiver RSA-2048 public key, and then the resulting sequence is digitally signed with RSASSA-PKCS1-v1_5 with SHA-256 using the transmitter private RSA-2048 key. Encrypted metadata with a digital signature is encoded into the VBI region of the frame. On the receiver side the payload is decoded from the VBI region, decrypted with the receiver's private key and digital signature is verified using the transmitter's public key. Next – encrypted video frame is decrypted using the session key information from the VBI metadata.

The simulation consists of two separate Python-based modules: a transmitter and a receiver. The simulation environment uses OpenCV for video processing and socket-based networking to emulate real-time transmission. Test video sequences were processed to validate both functional integrity and source authentication behavior. Real-time toggling of signature generation was implemented to demonstrate the receiver's capability to detect signature mismatches (the results are shown on Figure 1).

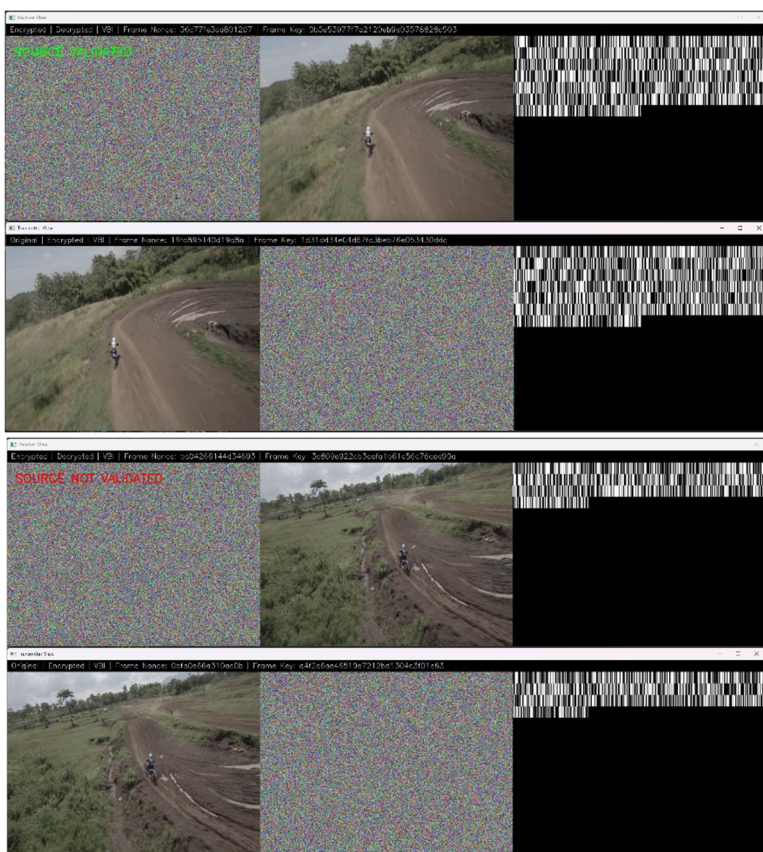


Figure 1. Source validation simulation results

The presented simulation demonstrates the feasibility of secure key distribution and source authentication over analog video links using VBI without altering the visible content. This makes the approach applicable to legacy systems where full digital migration is not feasible. Future work includes experimental validation on real analog transmission hardware,

evaluation of noise resilience in real-world conditions, and optimization of payload capacity to maximize metadata throughput without compromising signal integrity.

[1] Глухов В.С., Мельник А.О., Пуйда В.Я. Дослідження шляхів створення кодера та декодера відеосигналу // Вісн. Держ. ун-ту «Львівська політехніка». – 2003. – Вип. 492.

[2] Yang C.-H. Design and Implementation of Cryptographic Systems Using 68HC05 Microcontrollers. Proceedings of the APCMTA 2000. Taiwan: National Kaohsiung First University of Science and Technology, 2000. P. 1–4.

[3] Macrovision Corporation. Analog Protection System: A Presentation to the Ana-log Reconversion Discussion Group. March 5, 2003. Available at: https://w2.eff.org/IP/DMCA/Macrovision_v_321Studios/20030320_Macrovision_APS.pdf

[4] US7162146B2 – System and method for the assertion and identification of rights information in an analog video signal. U.S. Patent. Issued January 9, 2007.

Vadym Chakrian, PhD.
Maryna Ievdokymenko, PhD., Prof.
vadym.chakrian@nure.ua
marina.ievdokymenko@nure.ua
Kharkiv National University of Radio Electronics

**META-ANALYSIS OF TIME-TO-EXPLOIT AND SEVERITY
OF EXPLOITED VULNERABILITIES BY THREAT ACTORS,
AND HOW IT AFFECTS THE PRIORITIZATION
OF VULNERABILITY REMEDIATION EFFORTS IN ENTERPRISE
INFOCOMMUNICATION NETWORKS**

Introduction

Enterprise infocommunication networks face a continuously evolving threat landscape in which adversaries actively exploit software vulnerabilities to gain unauthorized access, disrupt operations, or exfiltrate sensitive data. As attack sophistication and automation capabilities increase, so does the speed at which threat actors weaponize newly disclosed vulnerabilities. Traditional remediation models that rely on fixed patch cycles or reactive prioritization are no longer adequate to address the growing risks. Recent research reveals a marked decrease in the average time-to-exploit for disclosed vulnerabilities, compelling enterprises to adopt more dynamic and intelligence-driven vulnerability management strategies [1, 2].

The prioritization of remediation efforts must therefore be informed not only by the severity score (e.g., CVSS) of a vulnerability but also by exploitation likelihood and the observed time between public disclosure and first exploitation in the wild [1]. This paper presents a meta-analysis of

statistical and research-based findings from 2018 to 2023 to inform more responsive and effective remediation planning.

Time-to-Exploit and Vulnerability Severity: Empirical Trends

Recent studies confirm that threat actors are exploiting vulnerabilities faster than ever. The following summarizes key findings:

- Critical vulnerabilities (CVSS $\geq$ 9.0):
 - o Median time to first known exploitation has declined from 22–63 days in 2018 to $\leq$ 5 days in 2023 [1, 2].
 - o Over 50% of critical vulnerabilities are now exploited within 7 days of public disclosure [1, 2].
 - o Case studies such as VMware Workspace ONE Access (CVE-2022-22954) and F5 BIG-IP (CVE-2020-5902) demonstrated exploitation within a few days of disclosure [3, 4].
- Non-critical vulnerabilities (CVSS < 9.0):
 - o A significantly lower percentage are ever exploited; only 4–5% of all published CVEs are exploited in the wild [5, 6].
 - o When exploited, the typical delay ranges from weeks to months, and often in targeted or opportunistic scenarios [1, 2].
 - o Exploitation of medium/low CVSS vulnerabilities is often associated with ease of exploitation and presence of public PoC [5, 6].
- Trend over time:
 - o Average time-to-exploit decreased from ~63 days in 2018 to ~5 days in 2023 (Google/Mandiant) [1].
 - o Rapid7 reported an increase from 30% (2020) to 56% (2022) of vulnerabilities being exploited within one week [2].

- o Increased availability of PoC code, vulnerability diffing techniques, and attacker automation tools has accelerated weaponization [3, 4, 7].

Conclusion and Recommendations

The accelerated exploitation timelines of critical vulnerabilities necessitate reevaluating enterprise remediation practices. Based on the meta-analysis, the following practical recommendations are proposed:

1. *Adopt a risk-based prioritization model* incorporating CVSS score, exploit availability, active exploitation status (e.g., CISA KEV catalog), and asset criticality [1, 8].
2. *Remediate critical vulnerabilities (CVSS ≥ 9)* ideally within 48–72 hours of disclosure. Use emergency patching pipelines and interim mitigations where direct patching is not immediately feasible [1, 2].
3. *Continuously monitor exploit developments* and update prioritization in near real-time using threat intelligence feeds [7, 8].
4. *Automate vulnerability scanning, ticketing, and patch deployment* across hybrid environments to reduce operational delays [8].
5. *Educate IT and security teams* on time-to-exploit trends and reinforce urgency in patch management procedures [1, 2].

Limitations and Future Research

This study synthesizes open vendor telemetry and public research but lacks access to proprietary exploit telemetry from private sector sources. As such, true time-to-exploit may in some cases be shorter than observed. Furthermore, the role of attacker motivations (e.g., APT vs. cybercrime) and exploit reuse patterns were not explored.

Future work will examine:

- The correlation between exploit predictability (via EPSS) [9] and actual exploitation timelines.

- Industry-specific trends in vulnerability exploitation speed (e.g., finance vs. healthcare).
- The effectiveness of real-time threat intelligence integration into enterprise vulnerability management platforms.

By understanding the shrinking window for defensive action, enterprise defenders can better align remediation strategies to counter the evolving speed of threat actor operations.

[1] Google Cloud, “How Low Can You Go? An Analysis of 2023 Time-to-Exploit Trends,” Google Cloud Blog, Nov. 15, 2023. [Online]. Available: <https://cloud.google.com/blog/topics/threat-intelligence/time-to-exploit-trends-2023>

[2] Rapid7, “Vulnerability Intelligence Report 2022,” 2023. [Online]. Available: <https://www.rapid7.com/about/press-releases/rapid7-vulnerability-intelligence-report-shows-attackers-developing-and-deploying-exploits-faster-than-ever/>

[3] C. Condon, “Widespread Exploitation of VMware Workspace ONE Access CVE-2022-22954,” Rapid7 Blog, Apr. 29, 2022. [Online]. Available: <https://www.rapid7.com/blog/post/2022/04/29/widespread-exploitation-of-vmware-workspace-one-access-cve-2022-22954/>

[4] Cybersecurity and Infrastructure Security Agency, “Threat Actor Exploitation of F5 BIG-IP CVE-2020-5902,” Cybersecurity Advisory AA20-206A, Jul. 24, 2020. [Online]. Available: <https://www.cisa.gov/news-events/cybersecurity-advisories/aa20-206a>

[5] A. D. Householder, J. Chrabaszcz, T. Novelty, D. Warren, and J. M. Spring, “Historical Analysis of Exploit Availability Timelines,” Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, Tech. Rep. CMU/SEI-2020-TR-001, 2020. [Online]. Available: https://insights.sei.cmu.edu/documents/596/2020_019_001_644727.pdf

[6] W. Haydock, “But is it exploitable? Studies examining the risk posed by CVEs,” Deploy Securely, Sep. 2, 2022. [Online]. Available: <https://blog.stackaware.com/p/but-is-it-exploitable>

[7] MITRE Engenuity, “Adversary Emulation Library,” Center for Threat-Informed Defense, Sep. 10, 2020. [Online]. Available: <https://ctid.mitre.org/resources/adversary-emulation-library/>

[8] National Institute of Standards and Technology (NIST), “Framework for Improving Critical Infrastructure Cybersecurity,” Version 1.1, 2018. [Online]. Available: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/cswp/nist.cswp.04162018.pdf>

[9] Forum of Incident Response and Security Teams (FIRST), “Exploit Prediction Scoring System (EPSS),” 2025. [Online]. Available: <https://www.first.org/epss/>

Озірковський Л.Д., д.т.н., доц.
Волочій Б.Ю., д.т.н., проф.
Змисний М.М., к.т.н., ст. викл.
Гусяк Б., аспірант
leonid.d.ozirkovskyi@lpnu.ua
bohdan.y.volochii@lpnu.ua
mykhailo.m.zmysnyi@lpnu.ua
bohdan.y.husiak@lpnu.ua

Національний університет «Львівська політехніка»

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ БЕЗПЕЧНОСТІ ВІДМОВОСТІЙКОЇ СИСТЕМИ

Вступ

Системи відповідального призначення (англ. – Safety Critical Systems, SCS) займають ключове місце в інфраструктурах, де порушення їх функціонування може призвести до катастрофічних наслідків. Системи відповідального призначення використовуються у військовій, авіаційній, медичній, транспортній, енергетичній та космічній сферах. Їх основними характеристиками є здатність функціонувати в умовах відмов їх підсистем чи модулів, адаптивність до змін навколишнього середовища, а також високий рівень надійності та безпечності. Проєктування таких систем здійснюється відповідно до міжнародних стандартів безпечності, таких як IEC 61508, ISO 26262, DO-178C із використанням відмовостійких архітектур, зокрема мажоритарних структур.

Мажоритарна структура [1,2] є ефективним рішенням для підвищення надійності та безпечності SCS. Вона базується на принципі голосування, коли вхідні дані обробляються трьома або більше модулями, а результат визначається за більшістю, методом

голосування. У разі відмови одного з модулів така система зберігає працездатність, оскільки мажоритарний елемент ідентифікує та відкидає некоректний результат. Крім цього, мажоритарна структура дозволяє виявляти та нівелювати окремі збої, що суттєво підвищує безпеку та загальну стійкість системи до відмов.

Оцінювання показників безпеки відмовостійких систем на етапі проєктування

На системотехнічному етапі проєктування систем відповідального призначення (SCS), коли ще не існує фізичної реалізації, надзвичайно важливо оцінити ефективність застосованих механізмів безпеки та надлишковості [3]. Це дає змогу ще до впровадження системи в експлуатацію проаналізувати її поведінку в умовах відмов, які призводять до аварійних ситуацій. Серед поширених методів оцінювання показників безпеки — дерева відмов (FTA), дерева подій (ETA), аналіз видів і наслідків відмов (FMEA/FMECA), структурні схеми надійності (RBD) та метод простору станів. [4] Проте ці методи мають низку суттєвих обмежень: не враховують кореляцій між аварійними ситуаціями, базуються лише на точкових оцінках показників, а також не враховують стратегії повернення системи до нормального стану після відмови. Це ускладнює оцінку показників безпеки відмовостійкої системи з врахуванням особливостей її поведінки.

У зв'язку з цим все більшої актуальності набуває удосконалений метод простору станів, [5] який дає змогу моделювати систему як сукупність можливих станів із урахуванням часової динаміки їх змін. Цей підхід дозволяє розраховувати як показники надійності (ймовірність безвідмовної роботи $R(t)$, середній час до відмови (MTTF), так і показники безпеки (ймовірність настання аварійної ситуації $Q(t)$, частота її виникнення $w(t)$, функція аварійності $FA(t)$) з

єдиної моделі. Завдяки цьому методу можливо простежити вплив змін конфігурації системи, таких як додавання резервних модулів, зміна правила голосування чи запровадження технічного обслуговування, на показники функційної безпечності системи.

Побудова моделі за удосконаленим методом простору станів [5] починається з формування вербальної моделі, на основі якої шляхом логічного аналізу створюється граф станів і переходів. Важливою особливістю є те, що відмови не об'єднуються в один стан, як у класичному методі простору станів, а утворюють підпростір непрацездатних станів. Для кожного модуля використовується окрема компонента вектора станів, що дозволяє отримати повну інформацію про працездатність кожного модуля системи в будь-який момент часу. Це, з одного боку, суттєво розширює підпростір працездатних станів, а з іншого – забезпечує точне відображення динаміки функціонування системи при порушеннях працездатності.

Аналітична модель у вигляді системи лінійних диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена з постійними коефіцієнтами будується на основі графа станів і переходів, де кількість рівнянь відповідає кількості станів у графі. Для кожного стану рівняння описує зміну ймовірності його досягнення, як суму впливів інших станів — з урахуванням інтенсивностей переходів між ними. Розв'язання побудованої системи рівнянь (наприклад, методом Рунге-Кутти-Мерсона) дозволяє визначити ймовірності перебування системи в кожному зі станів. З ймовірностей перебування у кожному стані формують вирази для розрахунку показників надійності та безпечності відмовостійкої системи.

Методика визначення показників безпечності відмовостійкої системи з використанням удосконаленого методу простору станів

Використання удосконаленого методу дає змогу отримати функцію аварійності з графу станів та переходів. Функція аварійності ($FA(t)$) є аналогом сукупності мінімальних січень (MSC) на усьому інтервалі експлуатації SCS). Розроблена методика проілюстрована на прикладі відмовостійкої системи відповідального призначення з мажоритарною структурою 2 з 3-х без відновлення. Методика складається з 6-ти послідовних етапів:

1. Формування логічної умови відмови системи.
2. Мінімізація логічної функції умови відмови за правилами алгебри логіки.
3. Формування масок аварійних ситуацій.
4. Вибір станів, з підпростору непрацездатних станів, які відповідають конкретній аварійній ситуації.
5. Формування виразів для визначення часових залежностей функцій аварійності.
6. Формування виразу для обчислення ймовірності потрапляння системи в аварійну ситуацію.

На першому етапі необхідно сформувати логічну функцію відмови системи у вигляді диз'юнкції кон'юнкцій. В даному випадку система виходить з ладу, якщо несправними стають два з трьох модулів, що може відбутися в одній із трьох можливих комбінацій: перший і другий модулі, перший і третій або другий і третій.

На другому етапі необхідно мінімізувати логічну функцію умови відмови відповідно до правил алгебри логіки. На третьому етапі, з мінімізованої умови формуються маски аварійних ситуацій, кількість яких відповідає числу елементарних кон'юнкцій. Оскільки у випадку

мажоритарної структури 2 з 3-х є три таких кон'юнкції, то отримуємо три відповідні маски: $(V1=0 \text{ AND } V2=0)$, $(V1=0 \text{ AND } V3=0)$ та $(V2=0 \text{ AND } V3=0)$.

Далі, за допомогою цих масок визначаються конкретні стани системи, що відповідають аварійним ситуаціям. Маска $(V1=0 \text{ AND } V2=0)$ включає стани, в яких перші дві компоненти вектора дорівнюють нулю. Маска $(V1=0 \text{ AND } V3=0)$ охоплює стани, де перша та третя компоненти рівні нулю. Маска $(V2=0 \text{ AND } V3=0)$ відповідає станам, де друга і третя компоненти дорівнюють нулю.

Наступним етапом є формування виразів для визначення часових залежностей функцій аварійності. Функція аварійності визначається як сума ймовірностей перебування у станах, вибраних за допомогою масок. Таким чином, для відмовостійкої системи з мажоритарною структурою 2 з 3-х отримано три функції аварійності:

$$\begin{aligned} FA1(t) &= P5(t) + P8(t) \\ FA2(t) &= P6(t) + P8(t) \\ FA3(t) &= P7(t) + P8(t) \end{aligned} \quad (1)$$

Графіки залежностей функцій аварійності (точкові, штрихові та штрих-пунктирні лінії) від періоду експлуатації відмовостійкої системи відповідального призначення з мажоритарною структурою 2 з 3-х представлено на рис. 1.

Ймовірність потрапляння системи в аварійну ситуацію $Q(t)$ обчислюється як сума функцій аварійності:

$$Q(t) = 1 - (1 - FA1(t)) \cdot (1 - FA2(t)) \cdot (1 - FA3(t)) \quad (2)$$

Графік залежності ймовірності потрапляння в аварійну ситуацію (суцільна крива) від періоду експлуатації відмовостійкої системи відповідального призначення з мажоритарною структурою 2 з 3-х представлено на рис. 1.

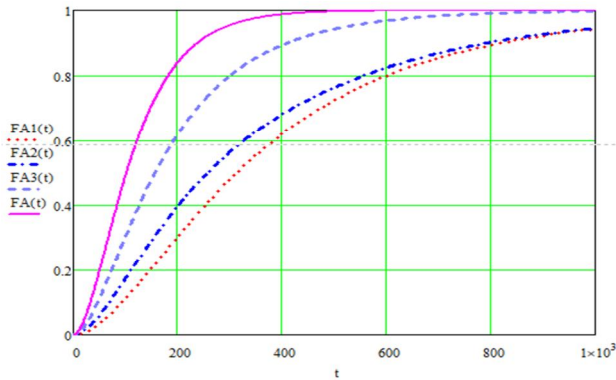


Рисунок 1. Функції аварійності ($FA1(t)$, $FA2(t)$, $FA3(t)$) та ймовірність потрапляння в аварійну ситуацію ($Q(t)$) відмовостійкої системи відповідального призначення з мажоритарною структурою 2 з 3-х

Ця робота виконана за підтримки Національного фонду досліджень України, проект № 2023.04/0116 «Модульна акустична система моніторингу повітряного простору» за конкурсом «Наука для зміцнення обороноздатності України»

Висновки

Методика визначення показників безпечності відмовостійких систем на основі удосконаленого методу простору станів, дає змогу отримати показники безпечності не як точкові оцінки, а як часові залежності на всьому інтервалі експлуатації системи. Побудовані функції аварійності дозволяють дослідити часову динаміку слабких місць з урахуванням не тільки структури системи, а також її поведінки при відмовах підсистем чи модулів. Такий підхід дозволяє оцінити взаємозалежності між окремими аварійними ситуаціями, що суттєво

підвищує достовірність результатів аналізу показників безпечності порівняно з традиційними методами.

1. Ruchkov, E., Kharchenko, V., Kovalenko, A., Babeshko, I., & Poroshenko, A. (2020) "Reliability assessment of 2oo3 and 1oo2 redundant structures taking into account the means of information processing and communications. *Advanced Information Systems*", 4(4), 77–83. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.4.11>.

2. Summatta, C., Khamsen, W., Pilikeaw, A., and Deon, S. (2016) "Design and analysis of 2-out-of-3 voters sensing in electrical power drive system", 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Chiang Mai, Thailand, 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/ECTICon.2016.7561336.

3. Goble, W. M., & Cheddie, H. (2005). *Safety Instrumented Systems Verification: Practical Probabilistic Calculations*. ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society. ISBN: 978-1-55617-909-9. *Safety Instrumented Systems Verification*.

4. A. Birolini (2010). "Reliability Engineering: Theory and Practice", *Reliability Analysis During the Design Phase (Nonrepairable Elements up to System Failure)*, ISBN: 978-3-642-14951-1., pp. 25-80, doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-642-14952-8>

5. Ozirkovskyy, L., Volochiy, B., Shkiliuk, O., Zmysnyi, M., & Kazan, P. (2022). "Functional safety analysis of safety-critical system using state transition diagram", *Radioelectronic and Computer Systems*, 0(2), 145-158. doi:<https://doi.org/10.32620/reks.2022.2.12>

Roxana Tors'ka, PhD., Asst. Lecturer
Dmytro Dosyn, Dr. of Tech. Sc., Prof.
roksana.v.torska@lpnu.ua
dmytro.h.dosyn@lpnu.ua
Lviv Polytechnic National University

PERFORMANCE ENHANCEMENT OF COVERT UAV COMMUNICATION SYSTEMS VIA CDMA TECHNIQUES

This thesis presents an adaptive code division multiple access (CDMA) based method to enhance covert unmanned aerial vehicles (UAVs) communications. The approach improves throughput and reduces detection risk under realistic fading and jamming conditions. Simulation results show significant gains in reliability and stealth compared to static methods.

Index Terms: Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), covert communication, Code Division Multiple Access (CDMA), anti-jamming, secure wireless communication.

Introduction. Covert communication is essential for UAV operations in contested environments to ensure stealth and mission success. CDMA techniques enhance covert UAV communication by enabling multi-user access with low probability of detection and resilience to interference. Prior works demonstrated CDMA's effectiveness in dense UAV radar systems, optimization of covert transmission under jamming [1], and adaptive covert frameworks for robotic swarms [2]. This thesis advances these efforts by proposing novel CDMA-based code and power allocation schemes to maximize covert throughput while minimizing detectability, supported by analytical modeling and simulation.

Threat and Detection Model. In covert UAV communication, the system must avoid detection by a passive adversary (warden) monitoring the spectrum. The warden may apply energy detection or likelihood ratio tests to identify signal presence. To ensure covertness, the probability of detection must be bounded as $P_d \leq \epsilon$, where ϵ is a small predefined threshold representing acceptable detection risk. This model considers realistic air-to-ground fading and additive noise conditions. CDMA's spectral spreading reduces energy concentration and cross-user interference, aiding in satisfying covert constraints without degrading communication quality.

Proposed CDMA-Based Covert Strategy. Spreading Techniques and Jamming Mitigation. Unlike conventional CDMA systems, the proposed strategy significantly enhances performance by integrating advanced spreading and robust anti-jamming mechanisms. While traditional approaches rely on fixed spreading codes, this system employs orthogonal or pseudo-orthogonal codes specifically chosen to minimize multiple access interference (MAI) and preserve signal separability among UAV nodes operating simultaneously. In contrast to static signaling schemes, the proposed method introduces adaptive code selection and frequency hopping across CDMA subchannels, dramatically increasing signaling variability. This dynamic and unpredictable transmission pattern greatly complicates efforts by passive detectors and active jammers, enabling low-probability-of-detection communications in highly contested and adversarial environments.

Power and Code Allocation Method. To balance throughput and covertness, a joint power and code allocation strategy is employed. UAV transmit powers are dynamically adapted based on channel state information (CSI) and estimated detection risk. Spreading codes are

assigned to minimize MAI and maximize signal-to-interference-plus-noise ratio (SINR), defined as the ratio $SINR = P_{signal} / P_{interference} + P_{noise}$. The optimization objective is to maximize covert throughput under detection and power constraints:

$$\max_{\mathbf{P}, \mathbf{C}} R_{covert}(\mathbf{P}, \mathbf{C}) \quad \text{subject to} \quad P_d \leq \epsilon, \quad P_i \leq P_{max}$$

where $\mathbf{P}$ and $\mathbf{C}$ denote the vectors of power and code assignments, respectively, and P_i is the transmit power of the i^{th} UAV.

Performance Metrics. SINR: indicates link quality by comparing signal power to the combined interference and noise. Higher SINR corresponds to more reliable communication.

Probability of detection (P_d): reflects the likelihood that an adversary detects a UAV transmission. Maintaining $P_d \leq \epsilon$ ensures covert operation.

Throughput: represents the effective data rate achievable under covert constraints, measuring system efficiency and overall communication performance.

Simulations and Results. Simulations evaluated the proposed CDMA-based covert UAV communication system under realistic conditions. The number of active UAVs ranged from 1 to 10, with the channel modeled as Rician fading and subjected to both jamming and noise.

SINR performance: the adaptive power and code allocation strategy maintained SINR levels from 25 dB (with 1 UAV) to 15 dB (with 10 UAVs), significantly outperforming the static allocation approach, which dropped below 10 dB at 10 UAVs. This result demonstrates superior interference management and improved link quality.

Throughput under covert constraints: throughput decreased with more UAVs but remained high with the adaptive method, achieving about

950 kbps for 1 UAV and 850 kbps for 10 UAVs. This is roughly 30% higher than static allocation, showing improved data rates while keeping the detection probability P_d below 0.1.

Probability of detection vs. jamming: under jamming (JSR 0–20 dB), adaptive power control kept P_d below 0.1, preserving covertness. Static power control exceeded this threshold at higher JSR, risking detection.

Robustness to burst jamming: throughput and SINR degraded gracefully with increasing JSR under burst jamming. At 20 dB JSR, throughput remained about 460 kbps and SINR around 11 dB, confirming the framework’s robustness to hostile interference.

Table 1. Performance Comparison:
Adaptive CDMA vs. Static Approach

Metric	Static CDMA	Adaptive CDMA (Proposed)	Improvement
SINR at 10 UAVs	< 10 dB	15 dB	↑ 5 dB
Throughput at 10 UAVs	650 kbps	850 kbps	↑ ~30%
Throughput at 1 UAV	730 kbps	950 kbps	↑ ~30%
P_d at JSR=20 dB	> 0.1	< 0.1	Covert
Robustness to Burst Jamming	Low	High	Maintains SINR/Throughput

These results validate that adaptive joint power and code allocation enhances covert communication performance by balancing throughput, interference, and detection risk in challenging environments.

This thesis developed an adaptive CDMA-based covert communication method for UAVs. Results show improved throughput, signal quality, and jamming resilience while maintaining low detection probability. The approach enables reliable and stealthy UAV communication in contested environments.

[1] H. Chen, R. Guo, and Z. Chen, “Enhanced Performance of Secondary Surveillance Radar in Dense UAV Environments Using CDMA Techniques,” *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 19, no. 1, pp. 1–10, Jan. 2025, doi: 10.1049/rsn2.12680.

[2] C. Chen, S. Wang, L. Li, S. Ke, C. Wang, and X. Bu, “Intelligent Covert Satellite Communication for Military Robot Swarm,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 183213–183221, Dec. 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2963320.

НАУКОВЕ ЕЛЕКТРОННЕ ВИДАННЯ

Міжнародна науково-технічна конференція

**Сучасні проблеми в радіоелектроніці
та інфокомунікаціях (СПРІК-2025)**

Матеріали

21–22 травня

Режим доступу:

<https://science.lpnu.ua/atric-2025/conference-proceedings>

Видавець і виготівник: Видавництво Львівської політехніки
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК з 4459 від 27.12.2012 р.

вул. Ф. Колесси, 4, Львів, 79005
тел. +380 32 2584103, факс +380 32 2584101
vlp.com.ua, ел. пошта: vmr@vlp.com.ua

