

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

ДИПЛОМНА РОБОТА

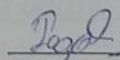
другого (магістерського) рівня
Освітній рівень

ГАЛУЗЬ ЗНАНЬ 17 «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації»
Шифр і назва галузі
СПЕЦІАЛЬНІСТЬ 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»
Шифр і назва спеціальності
ОСВІТНЯ ПРОГРАМА «Електронні інформаційно-комунікаційні системи та мережі»
Назва освітньої програми

на тему Метод відновлення значень біфуркаційних параметрів хаотичного генератора

Шифр ДРЕКР.024028.01.06.ПЗ

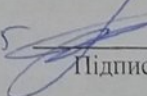
Виконав: здобувач 2 курсу, група ЕКРм-24-1


Підпис

О.О. Разовий
Ініціали, прізвище

Керівник: к.т.н., доц.

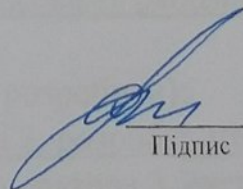
10.12.2025


Підпис

О.С. Пивовар
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. Кафедри: д-р техн. наук, проф.


Підпис

С.К. Підченко
Ініціали, прізвище

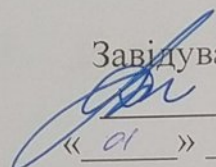
«14» 12 2025 р.

Хмельницький, 2025

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Хмельницький національний університет

Факультет «Інформаційних технологій»
Кафедра «Телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій»
Освітній рівень Другий (магістерський)
Галузь знань 17 «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації»
Спеціальність 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»
Освітня програма «Електронні інформаційно-комунікаційні системи та мережі»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ТМІТ

С.К. Підченко
« 01 » 09 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Разовому Олександрю Олеговичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1 Тема роботи: Метод відновлення значень біфуркаційних параметрів хаотичного генератора

керівник роботи: к.т.н., доцент Пивовар О. С.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом по університету від « 25 » 08 2025р. № 65

2 Термін подання здобувачем роботи на кафедру 5.12.2025

3 Вихідні дані до роботи _____

Мета роботи: Розробити та експериментально обґрунтувати метод відновлення біфуркаційних (керуючих) параметрів практичної реалізації хаотичного генератора, який забезпечує високу точність, скритність і завадостійкість роботи в умовах реального фізичного каналу зв'язку.

Об'єкт дослідження: Хаотичні динамічні системи та їх практичні апаратні реалізації, зокрема фізичний хаотичний генератор (генератор Ракліджа).

Предмет дослідження: Методи та алгоритми відновлення значень біфуркаційних параметрів хаотичного генератора за часовими рядами його вихідного сигналу в умовах дії шуму та апаратних похибок.

4 Зміст ПЗ (перелік питань, які потрібно розробити):

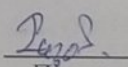
1. Аналіз літератури та постановка задачі 2. розробка методики відновлення біфуркаційних параметрів хаотичного генератора 3. експериментальні дослідження та результати

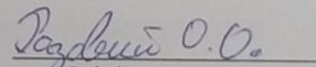
5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень): _____
презентаційні слайди

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

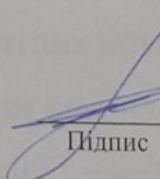
№ з/п	Найменування етапу (розділу) дипломної роботи	Термін виконання етапу роботи	Примітка
1	Вибір тематики	до 5.09.25	обрано
2	Аналіз початкових даних	5.09.25 — 14.09.25	проаналізовано
3	Написання вступу та 1 розділу (аналіз)	15.09.25 — 30.09.25	виконано
4	Оформлення та подання публікацій	1.10.25 — 14.10.25	подано
5	Написання 2 розділу (модель)	10.10.25 — 21.10.25	виконано
6	Моделювання та аналіз практичних результатів	15.10.25 — 30.10.25	виконано
7	Обробка експериментальних даних, оформлення графічної частини	1.11.25 — 21.11.25	виконано
8	Написання 3 розділу	21.11.25 — 1.12.25	виконано
9	Виправлення зауважень, помилок, підготовка до захисту	17.11.25 — 24.11.25	враховано
10	Антиплагіат та опонування	21.11.25 — 1.12.25	пройдено
11	Подання готового проекту	1.12.25	виконано

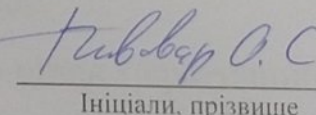
Здобувач


Підпис


Ініціали, прізвище

Керівник роботи


Підпис


Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

Тема дипломної роботи: «Метод відновлення значень біфуркаційних параметрів хаотичного генератора»

Автор роботи: Разовий Олександр Олегович

Керівник роботи: к.т.н., доцент Пивовар О. С.

Пояснювальна записка: 84 сторінок, 30 рисунків, 4 таблиці, 47 джерел, 3 додатки.

Графічна частина: 14 презентаційних слайдів.

Ключові слова: хаос, хаотичний генератор Ракліджа, керуючі параметри генератора хаосу, хаотична динаміка, нелінійні динамічні системи, дивний атрактор, біфуркаційні параметри, ідентифікація (відновлення) параметрів

Мета роботи: Розробити та експериментально обґрунтувати метод відновлення біфуркаційних (керуючих) параметрів практичної реалізації хаотичного генератора, який забезпечує високу точність, скритність і завадостійкість роботи в умовах реального фізичного каналу зв'язку.

Об'єкт дослідження: Хаотичні динамічні системи та їх практичні апаратні реалізації, зокрема фізичний хаотичний генератор (генератор Ракліджа).

Предмет дослідження: Методи та алгоритми відновлення значень біфуркаційних параметрів хаотичного генератора за часовими рядами його вихідного сигналу в умовах дії шуму та апаратних похибок.

У першому розділі магістерської роботи виконано огляд і критичний аналіз методів відновлення параметрів хаотичних систем, виокремлено ключові проблеми практичної ідентифікації та сформовано вимоги до методу.

У другому розділі подано математичну модель генератора Ракліджа та фізичну інтерпретацію біфуркаційних параметрів, обґрунтовано вибір робочого хаотичного режиму і розроблено підхід до оцінювання, зорієнтований на статистичний аналіз форми сигналу.

У третьому розділі проаналізовано завадостійкість методу в умовах адитивного шуму, кількісно встановлено порогові межі достовірного відновлення, отримано узагальнювальні експоненційні моделі, реалізовано апаратний прототип.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ.....	9
1.1 Основні етапи розвитку наукової думки щодо відновлення біфуркаційних параметрів у практичних реалізаціях хаотичних генераторів.....	9
1.2 Класифікація джерел за проблематикою та географією.....	13
1.3 Аналіз нерозв’язаних питань і визначення місця дослідження.....	19
1.4 Наукові школи хаосу в Україні.....	23
1.5 Експериментальні та комерційні системи з використанням хаосу.....	25
1.6 Постановка задачі.....	33
Висновки до першого розділу.....	36
2 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ВІДНОВЛЕННЯ БІФУРКАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ХАОТИЧНОГО ГЕНЕРАТОРА.....	38
2.1 Математична модель генератора Ракліджа та його параметри.....	38
2.2 Алгоритм відновлення параметрів за сигналом хаотичного генератора.....	41
2.3 Алгоритм відновлення на ідеальному генераторі.....	44
2.4 Концепція апаратної реалізації методу.....	46
Висновки до другого розділу.....	51
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ.....	53
3.1 Моделювання та оптимізація параметрів алгоритму в умовах завад.....	53
3.2 Апаратна реалізація генератора хаосу.....	62
3.3 Стенд для дослідження хаотичної динаміки.....	67
3.4 Результати відновлення параметрів на реальному генераторі.....	71
3.5 Порівняння з еталонним ідеальним генератором.....	73
Висновки до третього розділу.....	76
ВИСНОВКИ.....	78
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ТА ПОСИЛАННЯ.....	80
ДОДАТОК А.....	85
ДОДАТОК Б.....	94
ДОДАТОК В.....	104

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

EKF — extended Kalman filter

FPGA — field-programmable gate array

АЦП — аналого-цифровий перетворювач

VLC — visible light communication

OFDM — orthogonal frequency-division multiplexing

DCSK — differential chaos shift keying

SDR — software-defined radio

UWB — ultra-wideband

WPAN — wireless personal area network

USB — Universal Serial Bus

UDP — User Datagram Protocol

ЦОС — Цифрова обробка сигналів

SPI — Serial peripheral interface

I₂C — Inter-Integrated Circuit

ВСТУП

Детермінований хаос є фундаментальним проявом нелінійної динаміки, коли строго детермінована модель породжує неперіодичні коливання та чутливість до початкових умов. Теоретичний базис напряду сформовано, зокрема, у праці Е. Лоренца (1963), а подальший розвиток і прикладні перспективи підтверджено експериментальною реалізацією хаотичних електронних кіл (double scroll атрактор Чуа) та відкриттям синхронізації хаотичних систем (Pecora–Carroll, 1990).

Хаотичні генератори дедалі ширше застосовуються в радіотехнічних, телекомунікаційних та криптографічних пристроях завдяки їхнім унікальним властивостям. Проте практичне використання хаосу стримується проблемою нестабільності параметрів: для підтримання потрібного режиму необхідно точно знати та налаштувати значення біфуркаційних параметрів генератора. В реальних схемах параметри можуть змінюватися з часом або бути спочатку невідомими (наприклад, при спробі перехоплення сигналу від чужого хаотичного передавача). Тому розробка методів відновлення параметрів хаотичного генератора за його сигналами є актуальною науковою і практичною задачею. Зокрема, генератор Ракліджа привертає увагу тим, що володіє двома керуючими параметрами і може забезпечувати кращі спектрально-кореляційні показники сигналу, ніж класичні системи.

Метою дослідження є розробка та експериментальне обґрунтування методу відновлення біфуркаційних (керуючих) параметрів практичної реалізації хаотичного генератора, який забезпечує високу точність, скритність і завадостійкість роботи в умовах реального фізичного каналу зв'язку.

Об'єктом дослідження є хаотичні динамічні системи та їх практичні апаратні реалізації, зокрема фізичний хаотичний генератор (генератор Ракліджа).

Предметом дослідження є методи та алгоритми відновлення значень біфуркаційних параметрів хаотичного генератора за часовими рядами його вихідного сигналу в умовах дії шуму та апаратних похибок.

Наукова новизна:

- Запропоновано метод відновлення біфуркаційних параметрів генератора Ракліджа, що ґрунтується виключно на аналізі часових рядів генератора та виведеному унікальному характеристичному рівнянні.
- Отримано експериментальні залежності між рівнем шуму (SNR), параметрами згладжування та точністю відновлення параметрів для фізичного хаотичного генератора.
- Продемонстровано практичну реалізацію системи відновлення значень біфуркаційних параметрів в режимі реального часу на унікальній апаратній платформі аналогового хаотичного генератора, використовуючи метод цифрової обробки сигналів.
- Показано узгодженість результатів моделювання й експерименту та встановлено граничні умови коректної роботи запропонованого методу.

1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

1.1 Основні етапи розвитку наукової думки щодо відновлення біфуркаційних параметрів у практичних реалізаціях хаотичних генераторів

Динамічний хаос як явище був відкритий у середині ХХ ст. у роботах Е. Лоренца, який досліджував негарзди у метеорологічній моделі і виявив “детермінований неперіодичний рух” [1]. Класична система Лоренца стала першою широко відомою хаотичною системою, що продемонструвала чутливість до початкових умов і складну атракторну поведінку. На початку 1980-х років Л. О. Чуа запропонував перший електронний хаотичний генератор, який експериментально підтвердив існування хаосу в електричних колах. Зокрема, вже у 1986 р. було реалізовано так званий double scroll – атрактор Чуа [2]. Ці класичні роботи заклали основу для подальших досліджень хаотичних генераторів і стимулювали інтерес до контролю та ідентифікації їхніх параметрів.

Подальший розвиток наукової думки зосередився на можливості керування хаотичними системами та синхронізації хаотичних генераторів. У 1990 р. Л. Пекора та Т. Керролл запропонували метод синхронізації двох ідентичних хаотичних систем [3], що відкрило шлях до використання хаосу в передачі інформації та криптографії. Одночасно метод OGY (Ott, Grebogi, Yorke) продемонстрував можливість керування хаотичним режимом через малі параметричні впливи. Багато ранніх підходів до синхронізації й контролю хаосу виходили з припущення, що параметри системи відомі наперед. Однак у реальних умовах параметри можуть бути невизначеними або дрейфувати, тож проблема ідентифікації параметрів хаотичних систем за спостережуваними сигналами набула актуальності.

У середині 1990-х з'явилися перші методи оцінювання параметрів хаотичних динамічних моделей на основі синхронізації. Так, У. Парліц та співавт. запропонували підлаштовувати параметри моделі до експериментального часового ряду шляхом автосинхронізації – динамічного зворотного зв'язку, що мінімізує різницю сигналів. У роботі *Synchronization based parameter estimation from time series* [4] продемонстровано, що налаштування параметрів досягається за рахунок синхронного режиму: модельна система автоматично синхронізується з реальними даними при правильному виборі параметрів. Інша їхня робота *Estimating model parameters from time series by autosynchronization* [5] показала успішність підходу автосинхронізації для різних хаотичних систем. Ці класичні дослідження відкрили новий напрям – відновлення параметрів хаотичних систем за часовими реалізаціями, і заклали фундамент подальших оптимізаційних методів.

Наприкінці 1990-х був зроблений крок до використання адаптивного керування для ідентифікації параметрів. Зокрема, А. Майбгате і Р. Амріткар запропонували комбінувати синхронізацію з адаптивним законом зміни параметрів[6]. У їх роботі введено допоміжне рівняння для оцінки параметра на основі різниці сигналів двох синхронізованих генераторів. Цей метод дозволив оцінювати невідомі параметри, використовуючи лише один скалярний сигнал, і продемонстрував успішну ідентифікацію параметрів в таких системах, як атрактор Ресслера та Лоренца. Важливо, що адаптивні алгоритми показали кращу стійкість до завад порівняно з простими підбором: у роботі [6] зазначено, що комбінація зворотного зв'язку та адаптивного налаштування параметрів була “ефективною і достатньо робастною за наявності шуму”. Це був критичний результат, адже хаотичні сигнали часто спотворюються вимірвальним шумом. Проте адаптивні підходи мають і недоліки: вони вимагають розробки стабілізуючих законів керування для кожної конкретної системи і можуть збігатися до хибних значень за сильного шуму або неправильних початкових умов.

Паралельно розвивалися інші підходи до відновлення параметрів. Один із напрямів – статистичний аналіз сигналів. Наприклад, Г. Альварес та колеги використали символічну динаміку: вони відстежували двійкові символічні послідовності, що генеруються хаотичним відображенням, і за їх статистичними властивостями визначали параметр системи [7]. Зокрема, в роботі Альвареса параметр логістичного відображення було успішно оцінено за послідовністю символів 0/1, отриманою шляхом квантованого сигналу. Подальші дослідження розвинули цей підхід: У роботі *Parameter estimation only from the symbolic sequences generated by chaos system* [8] запропоновано метод оцінки параметрів винятково за символічними послідовностями хаотичної системи, що дозволило ідентифікувати параметри навіть коли початковий стан системи невідомий. Символьні та статистичні методи цікавлять дослідників тим, що є стійкими до шуму квантового характеру, але вони, як правило, обмежені дискретними або низьковимірними системами та вимагають достатньо довгих реалізацій для надійної статистики.

Ще одним напрямом стало застосування методів оптимізації. Через те, що задача оцінювання параметрів хаотичної системи можна сформулювати як багатовимірну оптимізаційну проблему мінімізації різниці між модельним та реальним сигналами, дослідники почали залучати еволюційні та інші чисельні алгоритми. Вже в 2002 р. було здійснено спробу використати генетичний алгоритм для пошуку оптимального параметра системи Лоренца. У роботі *An approach of parameter estimation for a chaotic system based on genetic algorithm* [9] автори показали принципову можливість генетичного налаштування одного параметра хаотичного атратора. Однак алгоритм виявився обмеженим щодо швидкості збіжності та мав труднощі з оцінкою кількох параметрів одночасно. Значного розвитку ця лінія набула з появою методів ройової оптимізації. У 2006 р. Цяо Хе, Л. Ван та Б. Лю вперше застосували алгоритм часток рою (PSO) для оцінювання одразу трьох параметрів системи Лоренца [10]. Як повідомляється у їх статті, PSO продемонстрував високу ефективність та стійкість, перевершивши генетичний алгоритм за точністю і швидкістю збіжності.

Застосування PSO стало важливим етапом, адже цей метод глобальної оптимізації менш схильний застрягати у локальних мінімумах цільової функції. При цьому автори відзначили, що через наявність численних локальних екстремумів у ландшафті функції помилки традиційні градієнтні методи не гарантують знаходження глобально правильних параметрів хаотичної системи. PSO же успішно розв'язав цю проблему, хоча і потребує значних обчислювальних ресурсів для багаторазового моделювання системи при різних наборах параметрів.

Крім генетичних алгоритмів та PSO, у 2000–2010-х роках випробовувалися й інші оптимізаційні ідентифікаційні методи: диференційна еволюція, методи рою бджіл, імперіалістичний алгоритм тощо. Загальна тенденція була спрямована на використання стохастичних глобальних алгоритмів, котрі не вимагають гладкості моделі і можуть працювати з будь-якою хаотичною системою як “чорним ящиком”. Недоліком цих методів є велика обчислювальна складність і, як правило, офлайн-режим роботи (після збору даних). Для реального часу вони менш придатні, оскільки вимагають сотні або тисячі інтегрувань модельних рівнянь для підбору параметрів.

Окремо слід відзначити внесок у хаотичну криптографію, де проблема відновлення параметрів проявилася як вразливість систем. У 2004–2006 рр. низка робіт продемонструвала, що секретні ключові параметри хаотичних генераторів можна визначити, перехоплюючи сигнал. Зокрема, А. Оруе з співавторами показали, що з відкритого каналу двоканальної хаотичної системи на основі Лоренца можна оцінити параметр генератора і зламати шифр[11]. У їх праці наведено методіку, як з двох проекцій хаотичного сигналу відновити значення параметра і тим самим розкрити зашифроване повідомлення. Аналогічно, інші автори вказували, що за природою деяких хаотичних систем (Лоренца, Чуа) секретні параметри можуть бути визначені з передавального сигналу та його похідних[12]. Такі результати примусили дослідників четвертої генерації хаотичного зв'язку шукати способи підвищити чутливість до невідповідності параметрів. Наприклад, Лі та інші ввели поняття

“збільшувального скла” – спеціального способу для штучного підсилення впливу малої різниці параметрів на динаміку сигналу[13][14], щоб зробити хаотичну систему більш чутливою до розсинхронізації при найменшому відхиленні параметрів. Це, з одного боку, підвищує безпеку, але з іншого – підкреслює фундаментальну проблему: хаотичні системи можуть тривалий час залишатися синхронізованими навіть при невеликих розбіжностях параметрів, ускладнюючи їх виявлення. Відповідно, методи відновлення параметрів повинні бути достатньо точними, щоб вловити ці дрібні відмінності на фоні шумів та нестабільностей.

Отже, розвиток наукової думки щодо відновлення біфуркаційних параметрів хаотичних генераторів пройшов кілька етапів: від концептуальних основ хаосу (Лоренц, Чуа) через синхронізаційні та адаптивні підходи 1990-х, до впровадження статистичних та оптимізаційних методів у 2000-х. Сучасні підходи дедалі більше комбінують різні методи, щоб досягти кращої точності і завадостійкості. Критичний аналіз показує, що кожен з методів має свої переваги і недоліки. Так, методи синхронізації зазвичай працюють швидко і можуть діяти в реальному часі, але чутливі до шумів і потребують хорошого збігу моделей; статистичні методи стійкіші до шуму, проте вимагають довгих сигналів і можуть втрачати ефективність для систем високої розмірності; оптимізаційні алгоритми є універсальними, але ресурсомісткими і не гарантують роботи в режимі онлайн. Ці аспекти детальніше розглядаються в наступних підрозділах при класифікації джерел та визначенні нерозв’язаних проблем.

1.2 Класифікація джерел за проблематикою та географією

Аналіз літературних джерел, присвячених відновленню параметрів хаотичних генераторів, дозволяє умовно розділити роботи на три групи: (1) загальні методологічні основи; (2) розробка конкретних методів; (3) практичні

реалізації та експериментальні системи (FPGA, АЦП, аналогові схемні рішення). Розглянемо кожну групу окремо, зазначаючи основні результати та представленість наукових шкіл у цих напрямках.

1) Загальні методології. До першої групи віднесемо роботи, що закладають теоретичні та методичні основи ідентифікації параметрів хаотичних систем. Сюди належать класичні праці з теорії динамічного хаосу та спостереження хаотичних систем. Зокрема, роботи з аналізу атракторів і реконструкції динаміки за часовими рядами створили підґрунтя для формування задачі оцінки параметрів як окремого випадку задачі реконструкції системи. Методологічно важливими є дослідження ідентифікаційної спостережуваності та ідентифіковності хаотичних систем. Наприклад, М. Дедьє та М. Огоржалек у кінці 1990-х дослідили умови ідентифікування хаотичних систем на основі адаптивної синхронізації [15] – вони показали, що для успішної оцінки параметра необхідно, аби динаміка різниці між системами згасала за правильних параметрів. Ці теоретичні критерії встановлюють принципову можливість (або неможливість) відновлення конкретного параметра з наявних вимірюваних змінних. Загальні методологічні роботи, як правило, націлені не на конкретну систему, а пропонують універсальні принципи (як-от метод найменших квадратів для хаотичних систем, спостерігачі Луенбергера, фільтр Калмана тощо). В Україні фундаментальні дослідження з теорії хаосу ведуться, зокрема, у Національному університеті «Львівська політехніка» та в Харківському національному університеті радіоелектроніки (ХНУРЕ).

2) Розробка конкретних методів. До другої групи належать роботи, що безпосередньо пропонують або вдосконалюють методи відновлення параметрів хаотичних генераторів. Сюди можна віднести всі описані в підрозділі 1.1 підходи – синхронізаційні, адаптивні, статистичні, оптимізаційні – але головне, що в цих роботах автори висувають нову методику і демонструють її на одній чи кількох системах. Наприклад, синхронізаційно-оптимізаційні методи були запропоновані Парліцом (1996) та Майбгате й Амріткармом (1999), які ми вже

згадували: їх можна розглядати як конкретні методи (автосинхронізація, адаптивна синхронізація). Адаптивно-спостережницькі методи розвивалися у 2000-х – зокрема, Фостен і Воафо запропонували алгоритм адаптивної синхронізації з одночасною оцінкою параметрів для модифікованого генератора ван дер Поля–Даффінга [16], показавши, що правильно налаштований спостерігач може відстежувати еволюцію параметра в реальному часі. Статистичні методи отримали розвиток у роботах Вовчука та Політанського (Чернівці), де було досліджено кореляційні та спектральні властивості хаотичних сигналів для підвищення завадостійкості передачі даних. Зокрема, в роботі «Кореляційні властивості хаотичних символічних послідовностей»[17] досліджено, як різні параметри впливають на автокореляційну функцію вихідного двійкового хаотичного сигналу, що може бути використано для ідентифікації.

Окрему підгрупу складають методи на основі оптимізації і штучного інтелекту. Сюди належить вже згаданий генетичний алгоритм (2002) та метод PSO (2006) для оцінювання параметрів. Сучасніші роботи застосовують інші евристичні методи: наприклад, метод рою бджіл, мурашиний алгоритм, гібридні методи. У прикріпленому файлі наведено приклад, де хаотична система використовується в самій оптимізації – “хаотична оптимізація” для синтезу регулятора – але це дещо інша задача. Щодо відновлення параметрів, то у 2010-х рр. почали з’являтися методи з використанням елементів штучного інтелекту: нейронні мережі, методи машинного навчання. Хоча таких джерел небагато у відкритій літературі, варто згадати підхід резервуарних обчислень (Reservoir Computing) для реконструкції атракторів і навіть біфуркаційних діаграм з неповних даних[18][19]. Це радше прогностичний підхід, але його можна адаптувати і для задачі ідентифікації параметрів, тренуючи модель відтворювати поведінку системи при різних параметрах.

В контексті розробки конкретних методів важливо підкреслити внесок українських учених, особливо в останні роки. У Національному університеті ім. Ю. Федьковича (Чернівці) та Хмельницькому національному університеті

сформувались наукові групи, що займаються хаотичними системами в телекомунікаціях. Ними запропоновано кілька нових методів і критеріїв для відновлення параметрів за сигналами. Так, Пивовар О., Голевич О. та інші (Хмельницький) розробили універсальний критерій рівня хаотичної синхронізації на основі порівняння енергії сигналів основного та допоміжного генераторів. У їх роботі «Синтез критерію рівня синхронізму в хаотичній системі зв'язку із допоміжним генератором»[20] описано метод визначення бінарних логічних рівнів (0 або 1), що передаються шляхом зміни біфуркаційного параметра в передавачі, через оцінку міри подібності еволюції хаотичних систем на приймачі. Запропонований критерій – нормалізована різниця енергії сигналів – виявився мало чутливим до адитивного шуму (стійкий до -10 дБ) та нелінійних спотворень каналу. Такий статистичний підхід по суті використовує форму сигналу (розподіл енергії в просторі станів) для відновлення параметра, тобто належить до групи новітніх методів за формою хаотичного сигналу. Його новизна полягає в тому, що замість прямого мінімізації різниці сигналів чи їх спектрів вводиться спеціальний показник “ідентичності еволюцій” двох генераторів, який досягає максимуму при правильному значенні параметра. Цей підхід є продовженням ідеї синхронізаційних методів, але з фокусом на статистичні характеристики сигналу (енергія, кореляція) для підвищення надійності.

До другої групи також можна віднести роботи, що впроваджують оптимізаційні методи в умовах завад. Наприклад, у роботі «Chaos, signal communication and parameter estimation»[21] запропоновано комбінувати хаотичну синхронізацію та фільтрацію сигналу для одночасної передачі і оцінки параметра. Такі методи наближаються до практичних застосувань, бо враховують реальні умови (шум, обмежену смугу пропускання тощо).

3) Практичні реалізації та апаратні рішення. Третя група охоплює публікації, де розглядаються питання реалізації хаотичних генераторів і систем ідентифікації параметрів у апаратурі – аналогових схемах, мікроконтролерах, програмованих логічних інтегральних схемах тощо. Якщо перші дві групи

здебільшого теоретичні або симуляційні, то тут увага надається апаратним обмеженням, реальним сигналам та експериментам.

Перш за все, слід згадати реалізації самих хаотичних генераторів. Ще з кінця 1980-х ентузіасти почали збирати аналогові кола, що демонструють хаос (схема Чуа, генератор Колпітса, транзисторні генератори). Наприклад, у 1993 р. було створено інтегральну мікросхему генератора Чуа, що довело принципову можливість перенесення хаосу “на кремній”. В подальші роки реалізовано багато схем: від низькочастотних (кілька кГц, на операційних підсилювачах) до високочастотних (десятки МГц, на транзисторах і мікрохвильових приладах). Ці дослідження важливі з точки зору розуміння, які апаратні фактори впливають на параметри: паразитні ємності, нелінійності елементів, температурний дрейф – усе це спричиняє розбіжності між реальною схемою і ідеальною математичною моделлю. Відтак, задача відновлення параметрів у реальних генераторах ускладнюється: необхідно або враховувати ці фактори в моделі, або фільтрувати/компенсувати їх вплив під час вимірювань.

Сучасний тренд – цифрові та гібридні реалізації хаотичних систем. Використання FPGA дозволяє досягти високої швидкодії та повторюваності хаотичних сигналів. У 2009–2015 рр. з’явилися роботи, де хаотичні генератори (наприклад, система Лоренца) реалізовано на FPGA з метою криптографії та генерації випадкових чисел[22]. Наприклад, Shuh-Chuan Tsay і співавтори побудували двосторонню систему зв’язку на двох аналогових схемах Лоренца, продемонструвавши успішну синхронізацію та передачу інформації через хаотичний носій[23]. В їх експерименті використовувалися ідентичні електронні генератори, з’єднані каналом, і досягалася синхронізація при збігу параметрів. Ця робота показала, що реальні хаотичні пристрої можуть синхронізуватися, але також виявила критичну потребу в точному налаштуванні параметрів обох генераторів. Навіть 1% розходження резисторів у схемах Лоренца приводило до появи помилки в відновленому повідомленні. Це підкреслює важливість задачі відновлення/настройки параметрів у апаратних

реалізаціях: у практичних системах потрібно калібрувати хаотичні генератори, щоб забезпечити їх синфазність.

Для вирішення цієї проблеми на практиці застосовують різні підходи. Один з них – використання цифрових потенціометрів та мікроконтролерів для автоматичної настройки параметрів аналогового генератора. Цифровий потенціометр дозволяє цифровим сигналом змінювати опір резистора, тим самим налаштовуючи параметр в схемі (наприклад, значення R чи K). Уявімо хаотичний генератор, в якому один з біфуркаційних параметрів визначається резистором – заміна цього резистора на цифровий потенціометр дає можливість програмно змінювати параметр і навіть виконувати алгоритм ідентифікації у реальному часі: мікроконтролер вимірює вихідний сигнал (через АЦП), порівнює його з моделлю або критерієм, і підкручує цифровий потенціометр, поки не досягне потрібного режиму. Такий підхід використовується, наприклад, у гібридних системах синхронізації, де цифрова модель підлаштовує аналоговий генератор. В доступних джерелах є повідомлення про успішну реалізацію комбінованої цифро-аналогової синхронізації: наприклад, Карімов і інші запропонували техніку, в якій цифрова копія хаотичної системи повторює поведінку аналогової, постійно ре-ідентифікуючи її параметри і таким чином досягаючи точного синхронізму[24].

В українських наукових колах практичні аспекти хаотичних генераторів для зв'язку досліджувались переважно у Чернівцях та Львові. Зокрема, Л. Ф. Політанський і колеги експериментально досліджували процес хаотичного маскування цифрових сигналів із використанням аналогових генераторів Чуа і Ресслер. В їх роботах та інших повідомляється про створення лабораторного стенду, де генератори хаосу з'єднано каналом і передається цифровий сигнал, прихований у хаотичних коливаннях[25]. Такі експерименти дозволили оцінити вплив реальних факторів – шуму каналу, дискретності оцифрування сигналу, нелінійності підсилувачів – на якість відновлення переданої інформації. З погляду нашої задачі, вони також демонструють, як розходження параметрів ведучого і веденого генераторів впливає на синхронізацію та декодування.

Результати Вовчука і інших показали, що для успішного маскуванню і демаскуванню сигналу потрібно підтримувати параметри генераторів узгодженими з високою точністю – відхилення більше 2–3% призводило до помітного десинхронізму і погіршення кореляції сигналів. Це вказує на необхідність автоматизованого відстеження параметрів в реальних пристроях.

Ще один аспект практичної реалізації – АЦП та дискретизація хаотичних сигналів. Хаотичний сигнал має широку смугу частот і великий динамічний діапазон коливань, тому вибір частоти дискретизації та розрядності АЦП критично впливає на точність відновлення параметрів. Занадто низька частота відліків може призвести до пропуску важливих деталей динаміки (ефект згортки спектра), а недостатня розрядність – до квантування сигналу і спотворення інваріантних характеристик (наприклад, фрактальної розмірності). У практичних роботах (як-от Пивовар та ін.) це враховується тим, що критерій подібності систем будують на відфільтрованих/усереднених метриках (енергія сигналу за період, інтегральні оцінки), що менше чутливі до дискретних шумів оцифрування[20]. Також в деяких роботах застосовують підвищення розрядності через накопичення (oversampling) або алгоритми корекції квантування, щоб поліпшити якість даних для ідентифікації.

Підсумовуючи, третя група джерел висвітлює вирішення реальних проблем: узгодження параметрів двох хаотичних пристроїв, придушення шуму при ідентифікації, врахування обмеженої точності апаратури. Українські дослідники з Чернівців, Харкова, Львова та Хмельницького внесли вклад у цю сферу, зокрема демонструючи працездатність хаотичних систем у прототипах зв'язку і пропонуючи інженерні рішення для параметричної налаштовуваності.

1.3 Аналіз нерозв'язаних питань і визначення місця дослідження

Незважаючи на значний прогрес у розвитку методів відновлення біфуркаційних параметрів, ряд ключових питань залишається відкритим.

Проведений огляд дозволяє виокремити такі нерозв'язані проблеми та ніші, в яких і розташовується дане дисертаційне дослідження:

Відсутність універсальних методів для різних типів генераторів. Більшість існуючих методів створені та випробувані на обмеженому наборі класичних систем (Лоренца, Ресслера, Чуа, логістичного відображення тощо). Кожна з цих систем має свої особливості – кількість і вид біфуркаційних параметрів, розмірність простору станів, спектральні характеристики сигналу. Метод, ефективний для однієї системи, не обов'язково прямо переноситься на іншу. Наприклад, метод символічних послідовностей добре спрацьовує для одновимірних відображень (логістичної карти), але його застосування до тривимірного генератора Ракліджа неочевидне через складність формування символічного алфавіту для багатовимірного сигналу. З іншого боку, адаптивні спостерігачі, розроблені для систем диференціальних рівнянь, важко застосувати до дискретних карт. Таким чином, наразі бракує єдиного універсального підходу, який би дозволяв оцінювати параметри довільної хаотичної системи “чорного ящика” на основі її вихідних сигналів. Це стимулює дослідження зі створення більш загальних методів, які враховують мінімальні апріорні відомості про систему (наприклад, лише гладкість правих частин або топологію атрактора) і є придатними для широкого класу генераторів. У даній роботі акцент зроблено на генераторі Ракліджа, який не входить до числа найбільш вивчених – методи, успішні для Лоренца чи Чуа, для генератора Ракліджа практично не розроблені, що і визначає нішу дослідження.

Складність врахування шумів і завад. У реальних умовах сигнал хаотичного генератора завжди містить шуми – вимірювальні (теплові, квантування АЦП) та інтерференційні (наприклад, завади каналу зв'язку). Багато класичних методів передбачають чистий детермінований сигнал і погіршуються при додаванні шуму. Синхронізаційні методи особливо чутливі: шум може перешкодити досягненню нульової різниці між системами. Методи оптимізації можуть “застрягати” на шумових флуктуаціях, особливо якщо функція помилки має багато локальних мінімумів через випадкові відхилення

точок сигналу. Статистичні методи краще переносять шум, але вимагають знання статистичних характеристик шуму і часто припускають гаусовий білий шум, що спрощує картину. На практиці ж можливі імпульсні завади, дрейфи, зміни характеристик шуму з часом. Тому нерозв'язаним лишається питання робастності ідентифікації параметрів – як забезпечити надійне відновлення параметра за відносно низького відношення сигнал/шум. Сучасні дослідження пропонують різні рішення: фільтрація сигналів перед обробкою, використання функціоналів, нечутливих до шуму, застосування методів оцінювання стану та параметра одночасно (наприклад, розширений фільтр Калмана або фільтр часток, котрі можуть врахувати шум). Проте універсального підходу, який би гарантував стійкість до шуму без значної втрати точності, поки що немає. В контексті генератора Ракліджа ця проблема проявляється особливо: його сигнал має широкий спектр, і адитивний шум може накладатися на ті частоти, що визначають тонку структуру атрактора. Одне з нерозв'язаних питань – як відрізнити вплив зміни параметра від впливу шуму на зміну форми сигналу.

Невідповідність реальних схем і математичних моделей. Більшість методів будується на припущенні, що математична модель точно відтворює поведінку реального генератора. Однак апаратні реалізації завжди містять неточності: номінали елементів відхиляються, характеристики нелінійних елементів лише частково відповідають ідеальним моделям, існують паразитні індуктивності, ємності, затримки. У результаті, реальний генератор може не ідентифікуватися ідеальною моделлю, навіть якщо параметри підбрано оптимально в рамках цієї моделі. Наприклад, у схемі Чуа реальні котушки і конденсатори вносять додаткові динамічні ступені свободи, через що поведінка схеми може дещо відрізнитися від класичних рівнянь Чуа. Це означає, що навіть при відсутності шуму існує базова модельна похибка. Наразі немає загальноприйнятих підходів, як врахувати цю похибку при відновленні параметрів. Один зі шляхів – використовувати розширені моделі з додатковими параметрами (наприклад, врахувати паразитні параметри схеми і теж їх оцінювати), але це ускладнює задачу і може зробити її нерозв'язною через

надмірну кількість параметрів. Інший шлях – коригувати оцінені параметри постфактум, виходячи з емпіричних калібрувань (наприклад, відомо, що реальний опір резистора треба збільшити на 5% відносно оціненого, бо модель нехтувала опором котушки). Проте такий підхід потребує накопичення інженерного досвіду для кожного типу генератора і не є строгим. Таким чином, існує незакрита проблема створення адекватних моделей, що придатні для ідентифікації в реальних умовах, або розробки методів, стійких до неідеальності моделі. У цій роботі увагу приділено саме генератору Ракліджа у схемній реалізації – це означає необхідність врахувати, що реальна схема (наприклад, на операційних підсилювачах і цифрових потенціометрах) може мати особливості, неописані класичними рівняннями. Відсутність таких практичних моделей наразі стримує пряму реалізацію багатьох теоретичних методів.

Обмеження апаратури і їх вплив. Як зазначалося, дискретність керування параметрами (кроки цифрового потенціометра), кінцева розрядність АЦП, обмежена швидкодія процесора для виконання алгоритму – все це накладає обмеження на метод відновлення. Багато методів, що показують високу точність у MATLAB/Simulink, можуть виявитись непридатними на апаратному рівні просто через те, що не вкладаються у часові рамки (наприклад, оптимізаційний метод може вимагати 1000 інтеграцій за кожен секунду сигналу – фізично неможливо виконати на мікроконтролері в реальному часі). Чимало питань виникає і з точки зору енергоспоживання та вартості: складні алгоритми ідентифікації можуть бути недоцільними для вбудованих пристроїв через обмеження батареї чи ціни FPGA. Таким чином, нерозв'язаним (або радше не до кінця вирішеним) є питання компромісу між складністю алгоритму та апаратними можливостями. Ідеальний метод повинен бути достатньо простим для реалізації “на льоту” і водночас достатньо точним. Пошук такого балансу – актуальна задача інженерії хаотичних систем.

З огляду на ці нерозв'язані питання, можна визначити місце даного дослідження. Воно спрямоване на розробку методу відновлення параметрів, що

враховує практичні аспекти (шум, дискретність, апаратні обмеження) для конкретного, але важливого класу генераторів – системи Ракліджа. Генератор Ракліджа обрано не випадково: як вже зазначалось, його сигнали мають перспективні властивості для застосування у системах зв'язку (широкий спектр, хороші кореляційні властивості), але водночас він містить два біфуркаційних параметри, від значень яких залежить режим – від періодичних коливань до хаосу. Відсутність напрацьованих методів для цієї системи означає, що це дослідження заповнює прогалину в літературі. Місце роботи – на перетині теорії хаотичної динаміки, методів оптимізації та схемотехнічної реалізації. Іншими словами, дослідження має інтеграційний характер: поєднує ідеї з першої групи — теоретичні принципи ідентифікації, конкретні напрацювання з другої групи — нові алгоритми, зокрема статистичний критерій, оптимізація, та враховує досвід третьої групи — обмеження і вимоги реальної апаратури, отримані українськими та закордонними експериментаторами. В наступному підрозділі на основі цього аналізу сформульовано мету і задачі роботи.

1.4 Наукові школи хаосу в Україні

Дослідження в області детермінованого хаосу – хаотичних динамічних систем і генераторів хаотичних сигналів – активно ведуться в багатьох університетах України з 2000 по 2025 роки (таблиця 1.1). Ці роботи охоплюють як прикладні аспекти (електронні та оптичні хаотичні генератори, хаотичні сигнали в радіотехніці, криптографії, біомедицині), так і теоретико-математичні аспекти (моделювання динамічних систем, аналіз і контроль хаосу, ідентифікація параметрів та ін.).

Таблиця 1.1 – Наукові школи хаосу в Україні

Місто	ВНЗ	Вчені	Сфера роботи
Київ	КПІ	В. Г. Вербицький, О. В. Борисов, Ю. Ф. Зіньковський, М. В. Зінченко	Генератори хаосу, хаотичні сигнали в радіолокації
Київ	Інститут математики НАН України	О. М. Шарковський	Математична теорія детермінованого хаосу, класифікація динамічних режимів, вивчення біфуркацій і дивних атракторів в дискретних системах
Харків	Харківський національний університет радіоелектроніки (ХНУРЕ)	Є. В. Бодянський, Є. І. Кучеренко, Л. О. Кириченко, Т. А. Радівілова	Аналіз хаотичних сигналів і фрактальних властивостей телекомунікаційних процесів, нейромережеві методи з елементами хаосу, застосування хаосу в задачах розпізнавання та безпеки
Львів	НУ «Львівська політехніка»	Ю. Я. Бобало, З. Ю. Готра, Б. А. Мандзій, А. П. Бондарева, В. Б. Дудикевич, П. Й. Стахіра	застосування детермінованого хаосу в системах передачі інформації, генерація та використання широкосмугових хаотичних сигналів, а також надійність та завадостійкість пристроїв з хаотичними режимами
Одеса	ОНАЗ	І. П. Лісовий	розробка цифрових генераторів хаотичних сигналів, їх реалізація на ПЛІС (FPGA) та застосування в телекомунікаціях (наприклад, для шифрування або spread-spectrum передавальних систем)

Місто	ВНЗ	Вчені	Сфера роботи
Вінниця	ВНТУ	О. В. Осадчук, А. О. Семенов, В. Г. Вербицький, В. Ю. Кучерук	створення та дослідження електронних генераторів детермінованого хаосу в діапазонах радіочастот та НВЧ, математичне моделювання таких генераторів, застосування хаотичних сигналів у вимірjuвальній техніці (сенсорах, перетворювачах) та системах зв'язку.
Чернівці	ЧНУ	Л. Ф. Політанський, С. Д. Галюк, Д. А. Вовчук, Р. Л. Політанський, М. Я. Кушнір	прихована передача інформації за допомогою хаотичних сигналів, методи хаотичного маскування даних, синхронізація та керування хаосом, а також розробка схем генерації та модуляції хаотичних коливань
Хмельницький	ХНУ	О. С. Пивовар, О. Б. Голевич, О. О. Михальчук, І. О. Веремійчук, М. В. Федула	Розробка методів використання хаотичних коливань як несучих сигналів у широкосмугових системах зв'язку, моделювання різних генераторів детермінованого хаосу, дослідження способів керування хаотичними системами та їх синхронізації для практичних цілей

1.5 Експериментальні та комерційні системи з використанням хаосу

Використання хаотичних генераторів та хаотичних сигналів знаходить застосування у сучасних системах зв'язку, як в експериментальних/лабораторних пристроях, так і в комерційних системах. Серед лабораторних хаотичних систем зв'язку можна відзначити:

Оптоволоконний зв'язок на хаотичних несівних (2005)[27].

У цій роботі вперше продемонстровано можливість передачі інформації за допомогою спектрально-широких хаотичних променів по стандартному комерційному оптоволоконному каналу. На передавачі використовувалися напівпровідникові лазери зі зворотним зв'язком для генерації хаотичної оптичної несучої, в якій модулювався цифровий потік. На приймачі застосовувався синхронізований лазер-приймач, який дозволяв відокремлювати і відновлювати цифровий сигнал. Експериментально показано, що на 120 км метрополітенного волокна можна передавати дані в гігабітному діапазоні зі швидкістю близько 1 Гбіт/с і дуже низькою частотою помилок ($BER < 10^{-7}$). Схема використовує пару узгоджених лазерних генераторів і стандартні компоненти волоконного зв'язку, демонструючи стійкість до перешкод і збурень каналу.

Багатоканальний волоконно-оптичний зв'язок на основі хаосу (2023)[28].

Представлено систему високошвидкісного зв'язку по багатомодовому оптоволокну з просторовим мультиплексуванням. Використані синхронізовані напівпровідникові лазери з взаємною ін'єкцією, що генерують хаотичні сигнали, які шифрують вихідні ООК- або QPSK-символи. Передача здійснюється відразу по 7 каналах семиядерного волокна, що розширює сукупну пропускну здатність. Експериментальна реалізація показала передачу хаотично зашифрованих потоків 28 Гбіт/с (ООК) і 64 Гбіт/с (QPSK) на 130 км. Такий підхід дозволив досягти одночасної великої дальності і високої швидкості при збереженні захищеності каналу завдяки властивостям хаосу.

Підводний оптичний зв'язок з хаотичним шифруванням (2021)[29].

Розроблено систему підводного оптичного зв'язку, що використовує лазер з довжиною хвилі ~ 450 нм і дискретно-спредову модуляцію DFT-S DMT для передачі даних через воду. Для безпеки канал шифрується двома рівнями хаотичних послідовностей: спочатку вихідний бітовий потік перемножується з одновимірною хаотичною послідовністю (логістична карта), потім дійсні та

ув'язку частини символів додатково шифруються парами хаотичних послідовностей. В експерименті (рис. 1.1) досягнуто передачу 5 Гбіт/с на відстань 50 м (і 4,5 Гбіт/с на 55 м) в каламутній воді при збереженні продуктивності каналу. Показано, що хаотичне шифрування не погіршує якість зв'язку і забезпечує надійну прихованість лінка.

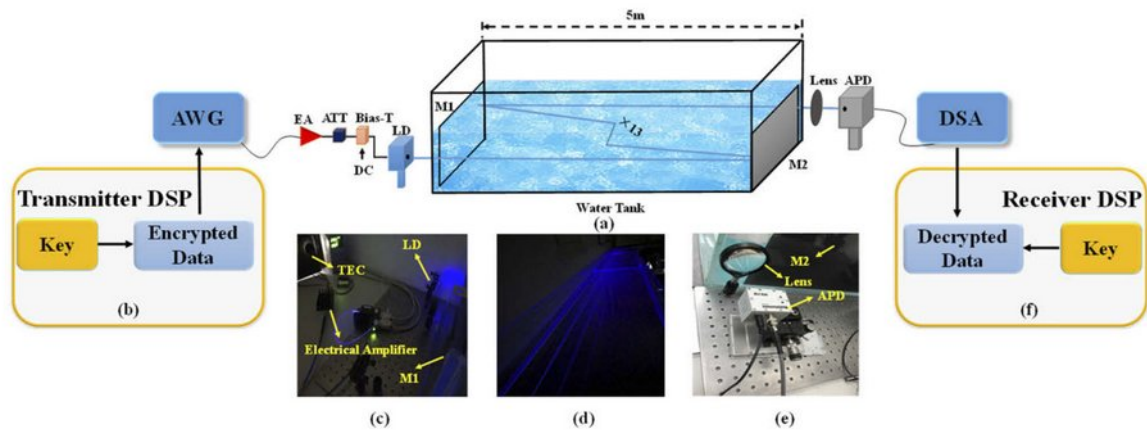


Рисунок 1.1 – (а) Експериментальна схема запропонованої хаотично зашифрованої системи UOWC на основі DFT-S DMT.

(b) та (f) Розділи цифрової обробки сигналу на стороні передавача та приймача відповідно. (c) Сторона передавача. (d)

Поширення світла у водяному резервуарі. (e) Сторона приймача. AWG: генератор довільної форми сигналу; EA: електричний підсилювач; ATT: регульований атенюатор; LD: лазерний діод; TEC: термоелектричний охолоджувач; M1(2): дзеркало 1(2); DSA: цифровий послідовний аналізатор.

Оптичний зв'язок у відкритому просторі на основі хаосу (2025)[30].

Запропоновано систему оптичного FSO-зв'язку для несприятливих атмосферних умов. На передавальній стороні хаотичний сигнал вводиться в лазерний промінь, а на приймачі використовується програмований фотонний чіп з безліччю мікрохвильових антен. Цей приймач в реальному часі збирає різні фрагменти і відновлює спотворений турбулентністю хаотичний сигнал. У випробуваннях (рис. 1.2) навіть під час сильного дощу та сильного вітру чіп дозволяв повністю відновити початкову хаотичну динаміку променя. Автори

зазначають, що таке рішення здатне забезпечити захищений високошвидкісний зв'язок в екстремальних умовах, де традиційні мережі недоступні.

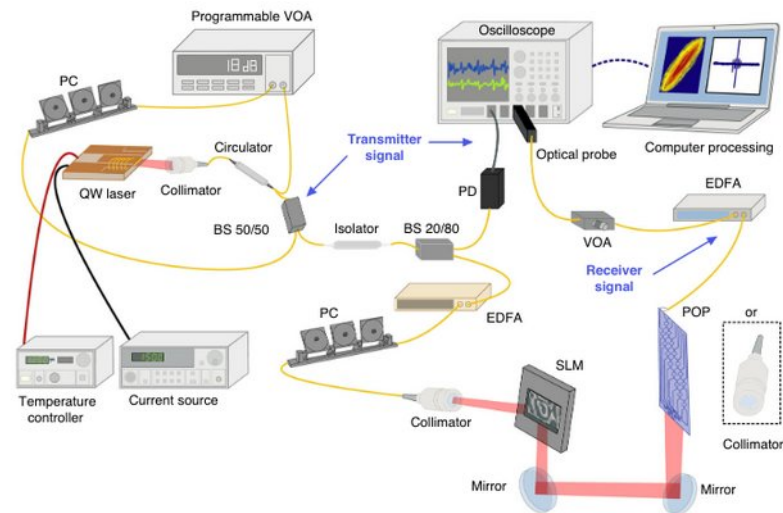


Рисунок 1.2 – Експериментальна схема передачі даних у відкритому просторі на основі хаосу

Прямохаотичний видимий світловий зв'язок (2018)[31].

Реалізовано бездротову VLC-систему (комунікація видимим світлом) з багаторівневим хаотичним шифруванням. В якості користувачів системи використовується схема OFDM+NOMA: дані декількох легітимних приймачі, і одночасно потенційного «прослуховувача» (рис. 1.3), передаються нелінійним чином, а два рівні хаотичного шифрування забезпечують захищеність як від зовнішнього перехоплення, так і приватність між самими користувачами. Експеримент показав, що описана конструкція успішно працює: два легітимних користувачі отримують свої дані, в той час як «прослуховувач» не може витягти повідомлення. Це перша реалізація системи VLC з одночасним поліпшенням безпеки і приватності за допомогою хаотичних послідовностей.

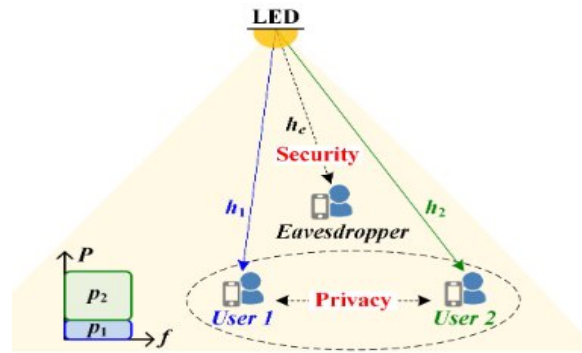


Рисунок 1.3 – Принцип роботи системи прямохаотичного видимого світлового зв'язку

Космічний оптичний зв'язок з хаосом (NASA-концепт)[32].

NASA розглядає використання хаосу разом з квантовими ключами в оптичних каналах великої дальності (наприклад, орбітальний лазерний лінк на відстані місячної орбіти). У концепції хаотичний оптичний сигнал передається спільно з квантово-захищеними параметрами синхронізації. Відзначається, що характер широкого спектру хаотичного сигналу сам по собі служить засобом низької ймовірності перехоплення. Аналізується, що крім квантового захисту, «спред-спектральний» характер хаотичного променя ускладнює ідентифікацію і демодуляцію сигналу неавторизованим приймачем. Хоча реальних комерційних систем поки немає, ця концепція показує шлях до ультразахищеного FSO-зв'язку в космосі.

Бездротовий радіозв'язок з хаотичним осцилятором (2014)[33].

Створено експериментальний прототип (рис. 1.4) бездротового приймача-передавача на частоті $\sim 2,3$ ГГц, де інформаційний сигнал передається через хаотичну піднесівну. Аналоговий вихід з датчика перетворюється в цифровий код, який потім «підмішується» до хаотичного сигналу. На приймальній стороні програмний кореляційний фільтр, заснований на точно вирішуваному хаотичному рішенні, витягує цифрові дані. В експериментах ця система

коректно передавала і відновлювала дані датчика при різних умовах, демонструючи працездатність прямохаотичного радіозв'язку в реальному часі.

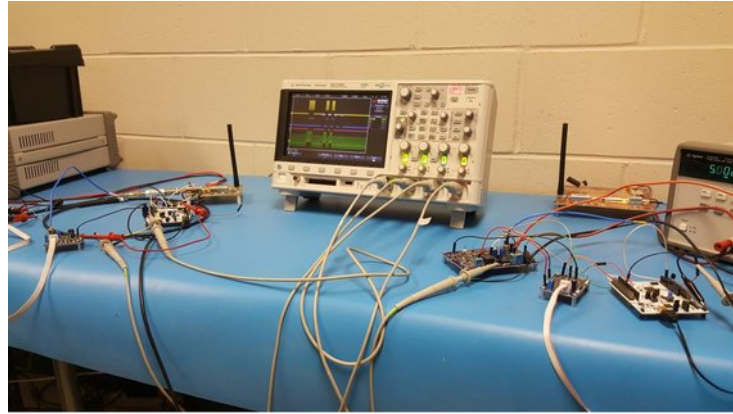


Рисунок 1.4 – Експериментальний прототип бездротового хаотичного приймача

У всіх системах зв'язку демонструється висока швидкість передачі інформації (1 – 64Гбіт/с) та велика дальність передачі, до 130 км, в залежності від умов та типу каналу зв'язку.

Також існують сучасні комерційні системи, що використовують генератори хаосу:

GNU Radio «gr-chaos» (2012) - програмний модуль для реалізації хаотичних модуляцій DCSK. Представляє собою C++ бібліотеку для SDR. Хаотичний генератор базований на логістичному відображенні ($X_{n+1}=1-2X_n^2$). В системі використовуються два послідовні «слоти»: у першому передається еталонний хаотичний сигнал, у другому – той же сигнал, перетворений згідно з бітовою інформацією[35].

ChaosKey (Altus Metrum, 2016) - апаратний USB-генератор випадкових чисел на основі джерела хаотичних сигналів (рис. 1.5). Генератор формує потік випадкових бітів за рахунок детектування транзисторного шуму («каскад

хаосу»). Отримані біти виводяться в хост USB. Пристрій розрахований на криптографічні програми (генерація ключів шифрування, підписи)[36].



Рисунок 1.5 – Пристрій ChaosKey

Chaotic Sequence Spread-Spectrum (Cryptic Vector, 2020) – сімейство LPI/LPD-хвильових форм для малопотенційного захищеного зв'язку. Технічні характеристики: SDR-трансивер зі спеціальною прошивкою генерації хаотичних послідовностей. Принцип дії: розширення спектру даних широкополосним «хаотичним» псевдошумовим сигналом, синхронізація хаотичних генераторів TX/RX без GPS. Вибираються незалежні ортогональні хаотичні коди для кожного каналу передачі. Сфери: тактичний військовий зв'язок з низькою ймовірністю виявлення [37].

UWB Direct Chaotic Communication (Samsung/IRE, 2004) – радіосистема надширокопasmового зв'язку з прямою хаотичною модуляцією. Технічні характеристики: вузькосмуговий генератор формує широкопasmовий хаотичний сигнал у високочастотному діапазоні. Принцип дії: генерується безгетеродинний хаотичний імпульсний UWB-сигнал безпосередньо в смузі, що передається; інформація передається лінійною перестановкою фази чи

амплітуди хаотичного носія. Прийом – кореляційний нелінійний детектор, який вимагає частотної переконвертації. Сфери застосування: високошвидкісний ближній радіозв'язок, WPAN (альтернатива 802.15.4a), захищені канали (за рахунок широкого спектру та стійкості до перешкод)[38].

цифровий хаотичний модем (Harris Corp., 2004). Технічні характеристики: чіп-трансівер, у якому бінарний символ кодується двома хаотичними сегментами. Принцип дії: у перший половинний інтервал передається перший хаотичний сигнал, далі – другий «трансформований» хаотичний сигнал (обидва генеруються контролером хаосу). Символи кодуються вибором відповідного перетворення хаосу. Це насправді різновид DCSK-модуляції з двома хаотичними фазами. Сфери: захищений цифровий зв'язок (військовий сектор); передбачає стійкість до перехоплення/декореляції без явного ключа[39].

Хаотична метаповерхня (Пекінський університет, 2025) – експериментальна система фізичного рівня безпеки. Технічні характеристики: програмована відбиваюча поверхня (рефлектор) керування радіохвилями і FPGA-генератор хаосу. Принцип дії (рис. 1.6): спеціальна метаповерхня генерує щоразу унікальний дзеркальний малюнок, керований хаотичним логічним контролером. Частина поверхні спрямовує сигнал суворо на легітимного приймача, а решта «хаотично» розсіює їх у інші напрями. Таким чином повідомлення без ключа шифрується фізично, тільки одержувачу, що знаходиться в потрібній позиції, видно дані, всі інші бачать лише шум. Сфери застосування: прототипи захищеного зв'язку нового покоління, криптографія фізичного рівня[46].

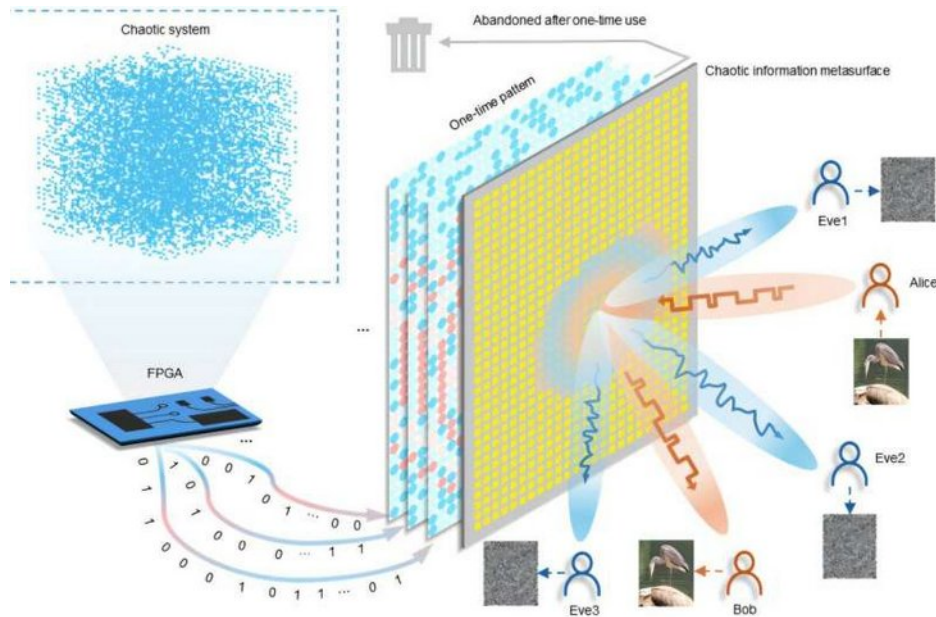


Рисунок 1.6 – Принцип роботи хаотичної метаповерхні

1.6 Постановка задачі

Актуальність дослідження. Хаотичні генератори дедалі ширше застосовуються в радіотехнічних, телекомунікаційних та криптографічних пристроях завдяки їхнім унікальним властивостям. Проте практичне використання хаосу стримується проблемою нестабільності параметрів: для підтримання потрібного режиму необхідно точно знати та налаштувати значення біфуркаційних параметрів генератора. В реальних схемах параметри можуть змінюватися з часом або бути спочатку невідомими (наприклад, при спробі перехоплення сигналу від чужого хаотичного передавача). Тому розробка методів відновлення параметрів хаотичного генератора за його сигналами є актуальною науковою і практичною задачею. Зокрема, генератор Ракліджа привертає увагу тим, що володіє двома керуючими параметрами і може забезпечувати кращі спектрально-кореляційні показники сигналу, ніж класичні системи[26]. Його впровадження у схеми зв'язку з хаотичною маніпуляцією перспективне, але в літературі відсутні універсальні методи оцінки значень цих параметрів за наявності шумів і апаратних похибок. Таким чином, дослідження,

спрямоване на створення методу відновлення біфуркаційних параметрів генератора Ракліджа на основі аналізу його сигналів, відповідає нагальним потребам науки і практики – воно дозволить підвищити надійність хаотичних систем зв'язку та керування, забезпечити автоматичне налаштування генераторів, а також поглибить наше розуміння процесів ідентифікації в умовах хаосу.

Мета роботи – розробити і обґрунтувати метод відновлення значень біфуркаційних параметрів хаотичного генератора Ракліджа за його вихідними сигналами, враховуючи обмеження практичної реалізації. Метод має забезпечити високу точність і стійкість до шумів, а також можливість апаратної реалізації з використанням аналого-цифрових схем, зокрема, із залученням цифрових потенціометрів для налаштування параметрів генератора.

Завдання дослідження. Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі необхідно вирішити такі основні завдання:

1. Аналіз літератури та вибір підходу. Провести детальний огляд існуючих методів відновлення параметрів хаотичних систем (синхронізаційних, статистичних, оптимізаційних, адаптивних тощо) та виявити їх переваги й недоліки з точки зору застосування до генератора Ракліджа. На основі критичного аналізу обґрунтувати вибір підходу, найбільш придатного для даної системи з урахуванням практичних умов.

2. Математична модель генератора Ракліджа у практичній реалізації. Дослідити математичну модель генератора Ракліджа, зокрема визначити його основні біфуркаційні параметри та вплив кожного з них на характер сигналу. Розробити розширену модель, що враховує особливості практичної реалізації – наприклад, кінцеву розрядність керування параметрами через цифрові потенціометри, насичення підсилювачів тощо. Це потрібно для подальшого моделювання і перевірки методу.

3. Розробка методу відновлення параметрів. Запропонувати методику оцінювання параметрів генератора Ракліджа за спостережуваними сигналами. Метод може базуватися на порівнянні еталонних характеристик сигналу

(статистичних, частотних або часових) з вимірними, або на введенні критерію синхронізації допоміжної системи. Планується використати статистичний підхід за формою сигналу (наприклад, енергетичний або кореляційний критерій), що дозволяє зменшити чутливість до випадкових шумових відхилень. Необхідно вивести алгоритми розрахунку цільової функції або критерію та правил підбору параметрів (наприклад, метод градієнтного спуску, ройової оптимізації чи поступового перебору) для знаходження таких значень параметрів, при яких критерій вказує на максимальну відповідність моделі і реальності.

4. Моделювання та оцінка ефективності. Реалізувати розроблений метод у середовищі моделювання (Matlab/Simulink) та провести чисельні експерименти для різних режимів генератора Ракліджа. Перевірити точність відновлення параметрів при різних рівнях шуму, вплив дискретності (квантування параметра та сигналу) на результати. Оцінити швидкість методу – чи зможе він працювати в режимі, близькому до реального часу, чи це офлайн-ідентифікація. На цьому етапі слід підібрати оптимальні значення параметрів самого алгоритму (розмір вибірки, поріг збіжності тощо) і порівняти результати з іншими методами (наприклад, спробувати для контролю застосувати PSO або ЕКФ до тієї ж задачі і зіставити точність).

5. Практична реалізація. Розробити концепцію апаратної реалізації методу: структуру системи автоматичного відновлення параметрів генератора Ракліджа. Запропонувати схему, що містить сам генератор (аналогову частину), блок вимірювання сигналів (АЦП), обчислювальний блок (мікроконтролер, який реалізує алгоритм) та виконавчий пристрій для зміни параметрів генератора (цифрові потенціометри, керовані мікроконтролером). Розробити прототип або виконати експеримент на наявному обладнанні для підтвердження працездатності методу. Якщо прямих експеримент у рамках роботи неможливий, провести віртуальний експеримент – тобто максимально наближене до реального моделювання, включивши до моделі типові апаратні спотворення, й продемонструвати, що алгоритм справляється з ними.

Очікуваним результатом вирішення цих завдань має стати новий метод відновлення біфуркаційних параметрів, який заповнить виявлений пробіл у літературі щодо генератора Ракліджа і буде придатним для практичного застосування. Реалізація такого методу дозволить автоматизувати налаштування хаотичного генератора в схемі та забезпечити надійну демодуляцію інформації в системах зв'язку з хаотичною маніпуляцією параметрів. Таким чином, досягнення мети роботи зробить внесок як у теорію (розвиток методів ідентифікації хаотичних систем), так і в прикладну радіотехніку (створення більш стабільних хаотичних генераторів для пристроїв зв'язку і захисту інформації).

Висновки до першого розділу

1. Узагальнено еволюцію підходів до відновлення біфуркаційних параметрів: від класичних основ динамічного хаосу (Лоренц) і перших електронних генераторів (Чуа) до синхронізаційних, адаптивних, статистичних і оптимізаційних методів. Показано, що сучасна тенденція — комбінування підходів для підвищення точності та завадостійкості, адже кожен клас має власні обмеження (швидкодія/робастність/ресурсомісткість).

2. Проведено систематизацію джерел за проблематикою: (1) методологічні основи й критерії ідентифіковності, (2) конкретні алгоритми оцінювання параметрів, (3) апаратні реалізації та інженерні обмеження. Наголошено на внесок українських дослідницьких груп у прикладні системи зв'язку та розробку критеріїв подібності сигналів (енергія/кореляція) як робастної альтернативи прямому порівнянню траєкторій.

3. Виокремлено нерозв'язані питання: брак універсальних методів для різних генераторів, деградація точності під дією шумів і завад, невідповідність реальної схеми математичній моделі та вплив апаратних обмежень (квантування, дискретність керування, обчислювальні ресурси). Ці фактори

задають вимоги: робастність, відтворюваність і придатність до роботи майже в реальному часі.

4. Сформульовано актуальність, мету й задачі дослідження: розробити метод відновлення біфуркаційних параметрів генератора Ракліджа за його сигналами з урахуванням практичних похибок. Обрано орієнтацію на статистичний аналіз форми сигналу та алгоритмічний підбір параметрів із перспективою апаратної реалізації через АЦП, мікроконтролер і цифрові потенціометри.

2 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ВІДНОВЛЕННЯ БІФУРКАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ХАОТИЧНОГО ГЕНЕРАТОРА

2.1 Математична модель генератора Ракліджа та його параметри

Хаотичний генератор Ракліджа – це тривимірна динамічна система, вперше запропонована А. М. Ракліджем для моделювання подвійної конвекції в обертовому магнітогідродинамічному середовищі[47]. Система описується системою нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -Kx + Ly - yz; \\ \frac{dy}{dt} = x; \\ \frac{dz}{dt} = -z + y^2; \end{cases} \quad (1)$$

де $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ – динамічні змінні (вихідні сигнали генератора), а K і L – параметри системи. Параметр K відіграє роль коефіцієнта лінійного згасання (демонстрація дисипативності по осі x), а L – коефіцієнта підсилення/зв'язку, що визначає інтенсивність «збудження» системи через змінну y . Відомо, що при певних значеннях L і K ця система має дивний атрактор – стохастично неперіодичну траєкторію в просторі станів, чутливу до початкових умов. Зокрема, при $K \approx 2$ та $L \approx 6.7$ система перебуває у хаотичному режимі. Зміна цих параметрів впливає на геометрію атрактора і спектральні властивості сигналів $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$. Отже пара (L, K) може виступати носієм символу інформації, аналогічно до положення точки у двовимірному сузір'ї цифрової модуляції.

При варіації параметрів L і K спостерігається багатий спектр динамічних режимів – від стаціонарних до хаотичних (рис. 2.1). Для малих значень L (за

фіксованого K), система сходиться до стаціонарного стану: всі траєкторії затухають до стабільної рівноваги, тобто змінні x , y , z прямують до сталих значень (рис. 2.1а). Це відповідає режиму спокою (відсутність коливань). Зі збільшенням L до певного критичного рівня система переживає біфуркацію Хопфа: стаціонарна рівновага втрачає стійкість, і народжується стійкий періодичний цикл (рис. 2.1б). Для $K = 2$ критичним є L близько 3 – при цьому з'являються малі періодичні коливання навколо колишніх стаціонарних точок (виникають самоорганізовані конвективні осциляції). Подальше збільшення L призводить до каскаду біфуркацій: періодичний режим ускладнюється, а також можуть виникати квазіперіодичні режими на шляху до хаосу (рис. 2.1в). Нарешті, починаючи з певного діапазону L (для $K=2$ це приблизно $L > 5-6$), в системі встановлюється хаотичний режим – траєкторія не повторюється, а атрактор має фрактальну структуру (рис. 2.1г). Зокрема, при $L = 6.7$, $K = 2$ спостерігається типова хаотична динаміка Ракліджа. Цей хаотичний режим зберігається в деякому інтервалі параметрів, наприклад, при подальшому збільшенні L до ~ 9 і більше хаос усе ще присутній. Важливо, що система Ракліджа є дисипативною – об'єм фазового простору стискається, тому за відсутності збудження (мале значення L) всі рухи затухають, а хаос можливий лише при достатньо великому значенні параметра L , що забезпечує нестійкість руху. Параметр K (ступінь згасання) також впливає на поведінку: при дуже великому K коливання пригнічуються (для виникнення хаосу потрібен не занадто великий демпфінг). Так, для $L = 6.7$ хаос спостерігається при $K = 2$; якщо ж K значно збільшити, система може повернутися до періодичних або навіть стаціонарних режимів через зникнення дивного атрактора. І навпаки, при надто малому K система може стати нестійкою (траєкторії можуть необмежено зростати або виходити за межі атрактора). Таким чином, біфуркаційна діаграма в просторі параметрів (L, K) містить області різних режимів: стаціонарного, періодичного, квазіперіодичного та хаотичного. Експериментально і чисельно показано, що між областями періодичних і хаотичних режимів можливі вузькі вікна складної поведінки – наприклад, сценарії типу біфуркацій Шилнікова,

коли хаос виникає через гомоклінічні траєкторії, подібно до атрактора Лоренца, або послідовності подвоєння періоду (сценарій Фейгенбаума) при певних значеннях L і K . В цілому, збільшення L (за помірною K) має ефект «збудження» системи: від рівноваги – до регулярних коливань – і далі до хаотичних коливань з неперіодичним характером.

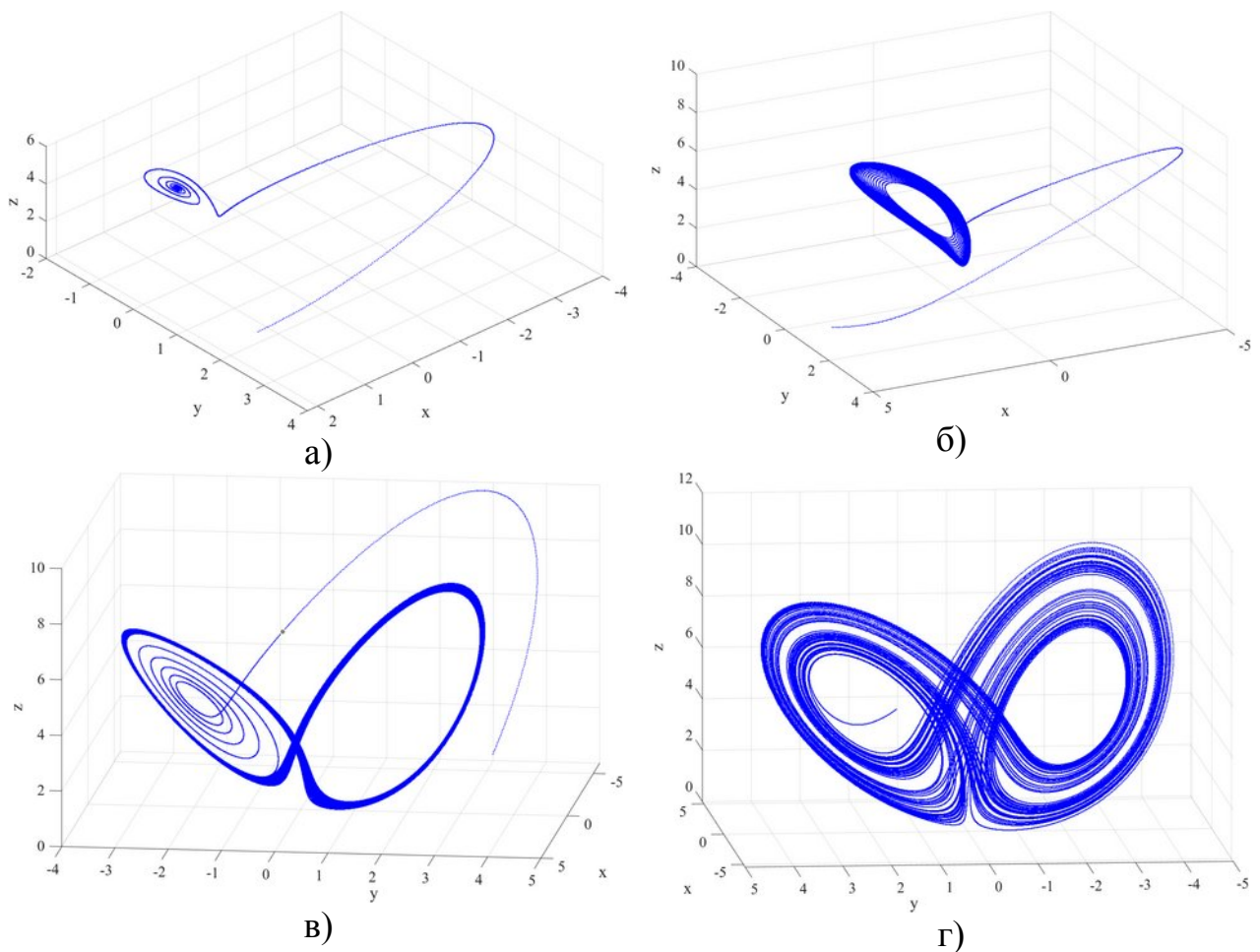


Рисунок 2.1 – Атрактор хаотичного генератора Ракліджа при різних динамічних режимах

Для ітеративного вирішення в системі Matlab, рівняння генератора Ракліджа були записані і вирішені у різницевій формі (2), використовуючи явний метод Ейлера. Для зменшення накопичення похибки розходження траєкторій обрано малий крок інтегрування $dt = 0.005$ с. В ході експерименту, в систему рівнянь (2) підставлено значення $L=2.1$, $K=6.7$.

$$\begin{cases} x_{n+1} = x_n + dt \cdot (-K \cdot x_n \cdot L \cdot y_n - y_n \cdot z_n); \\ y_{n+1} = y_n + dt \cdot x_n; \\ z_{n+1} = z_n + dt \cdot (-z_n + y_n^2). \end{cases} \quad (2)$$

Для відновлення коефіцієнтів L і K , з системи рівнянь у різницевій формі (2) виражено їх значення (3, 4).

$$L_n = \frac{x_{n+1}}{dt \cdot y_n} - \frac{x_n}{dt \cdot y_n} + \frac{K \cdot x_n}{y_n} + z_n \quad (3)$$

$$K_n = \frac{1}{dt} + \frac{L \cdot y_n}{x_n} - \frac{y_n \cdot z_n}{x_n} - \frac{x_{n+1}}{x_n \cdot dt} \quad (4)$$

2.2 Алгоритм відновлення параметрів за сигналом хаотичного генератора

Алгоритм роботи методу відновлення керуючих параметрів можна описати наступним чином:

Нехай задані послідовності $x_n, y_n, z_n, n=1, \dots, N$, і крок по часу $dt > 0$. N – тривалість кожного з часових рядів x, y, z .

Визначимо сітки коефіцієнтів:

$$L_p \in [1, 15],$$

$$K_{p,j} \in [0.5, 6], j=1, \dots, 100.$$

Також визначений набір інтервалів по L :

$$edges = \{ L_{min} + k \Delta L \mid k=0, \dots, M \},$$

де

$$L_{min} = 1, L_{max} = 15, \Delta L = 0,025, M = \frac{L_{max} - L_{min}}{\Delta L}.$$

Центри інтервалів:

$$L_m^{center} = \frac{edges_m + edges_{m+1}}{2}, m = 1, \dots, M.$$

Обчислення часового ряду $L_n(K_{p,j})$:

Для кожного $K_{p,j}$ обчислюється послідовність:

$$L_n^{(j)} = \frac{x_{n+1}}{dt \cdot y_n} - \frac{x_n}{dt \cdot y_n} + \frac{K_{p,j} \cdot x_n}{y_n} + z_n, n = 1, \dots, N - 1.$$

Гістограма для кожного $K_{p,j}$:

Для кожного j обчислюється частотне розподілення:

$$M_{j,m} = \#\{n | L_n^{(j)} \in [edges_m, edges_{m+1}]\}, m = 1, \dots, M.$$

Пошук максимуму матриці:

Визначається глобальний максимум:

$$M_{max} = \max_{j,m} M_{j,m}.$$

Знаходимо індекси:

$$(j', m') = \arg \max_{j,m} M_{j,m}.$$

Оптимальні K і L :

$$K = K_{p,j'},$$

$$L = L_{m'}^{center}.$$

Детальний опис роботи алгоритму відновлення керуючих параметрів зображено на рисунку 2.2.

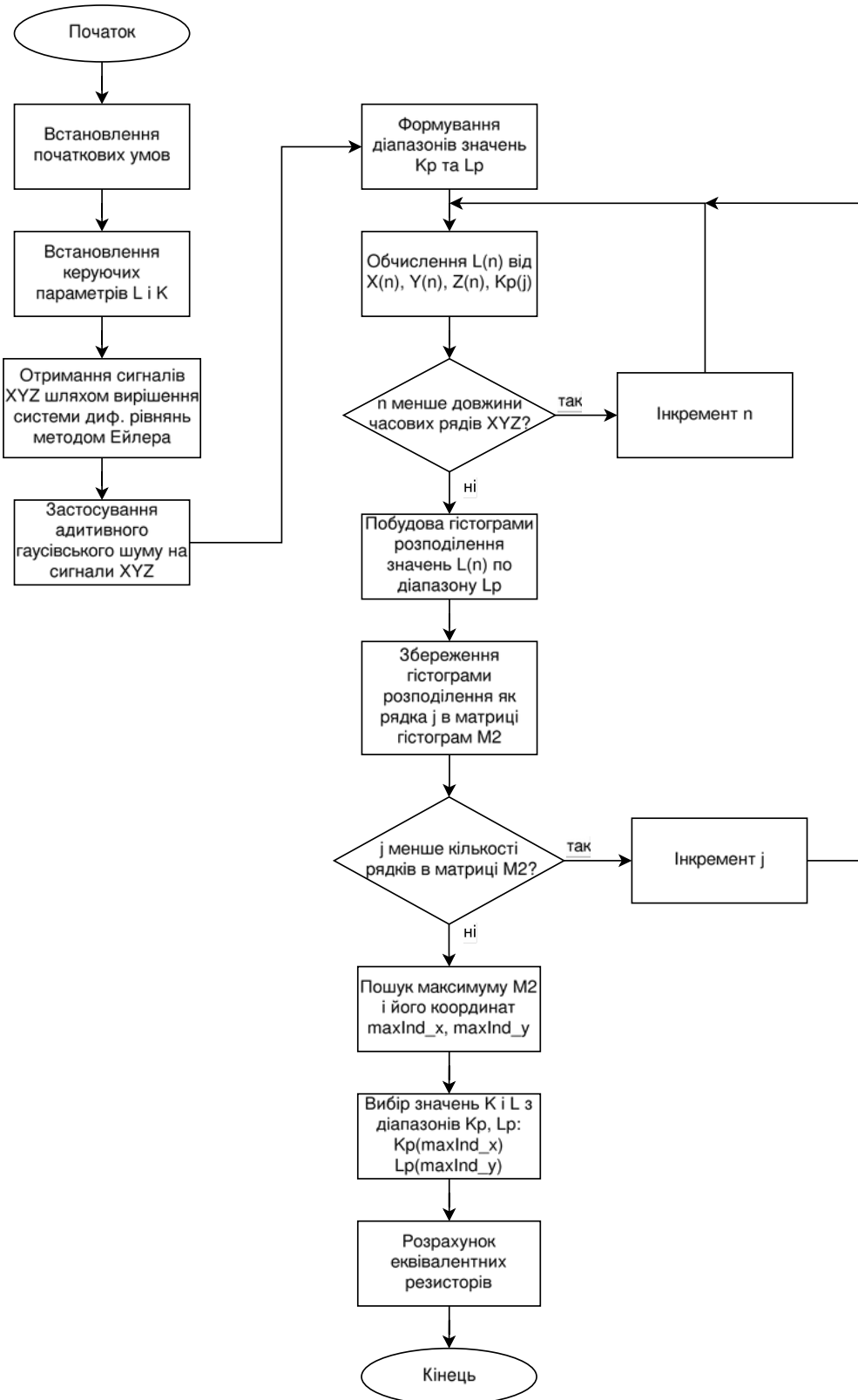


Рисунок 2.2 – Алгоритм відновлення біфуркаційних параметрів L і K

2.3 Алгоритм відновлення на ідеальному генераторі

В теорії, для відновлення значень керуючих параметрів вистачить лише двох вибірок вихідного сигналу генератора, однак, на практиці, через обмежену точність чисел з плаваючою комою, спостерігається похибка відновлення, особливо при різких змінах сигналів (рис. 2.5).

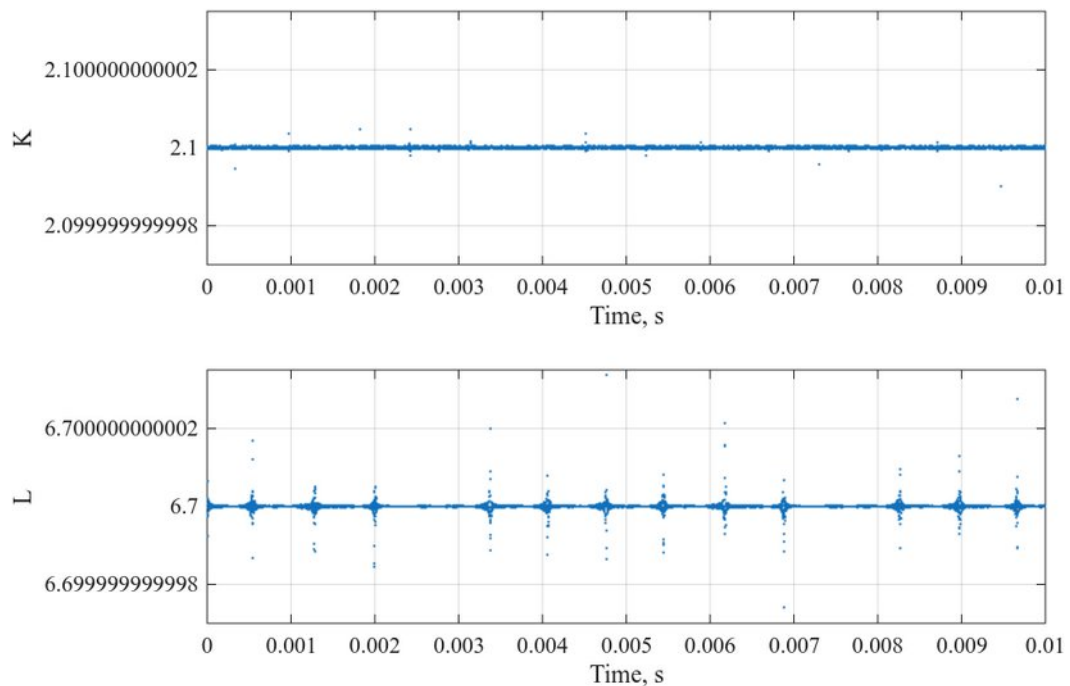


Рисунок 2.3 – Відновлені значення коефіцієнтів

Також, у апаратній реалізації генератора хаосу виникає неточність формування сигналу через шуми у електронних компонентах. Але найбільшою проблемою є завади, що вносяться у сигнал під час передачі по каналу зв'язку та класична висока чутливість генератора хаосу до змін. Наявність всіх цих проблем змушує застосовувати методи імовірнісного прийому та збільшувати тривалість часового ряду вихідних сигналів генератора, для точного відновлення значень керуючих параметрів, що приводить до збільшення тривалості передачі одного біта інформації.

Використавши алгоритм, описаний в розділі 2.2, відновлено значення біфуркаційних параметрів хаотичного генератора по часових рядах його сигналів (рис. 2.4).

Зміна значення керуючого параметру у невеликих межах під час передачі інформації фактично не вносить помітних змін у форму часових рядів та форму атрактора (рис. 2.4), що забезпечує скритність передачі інформації.

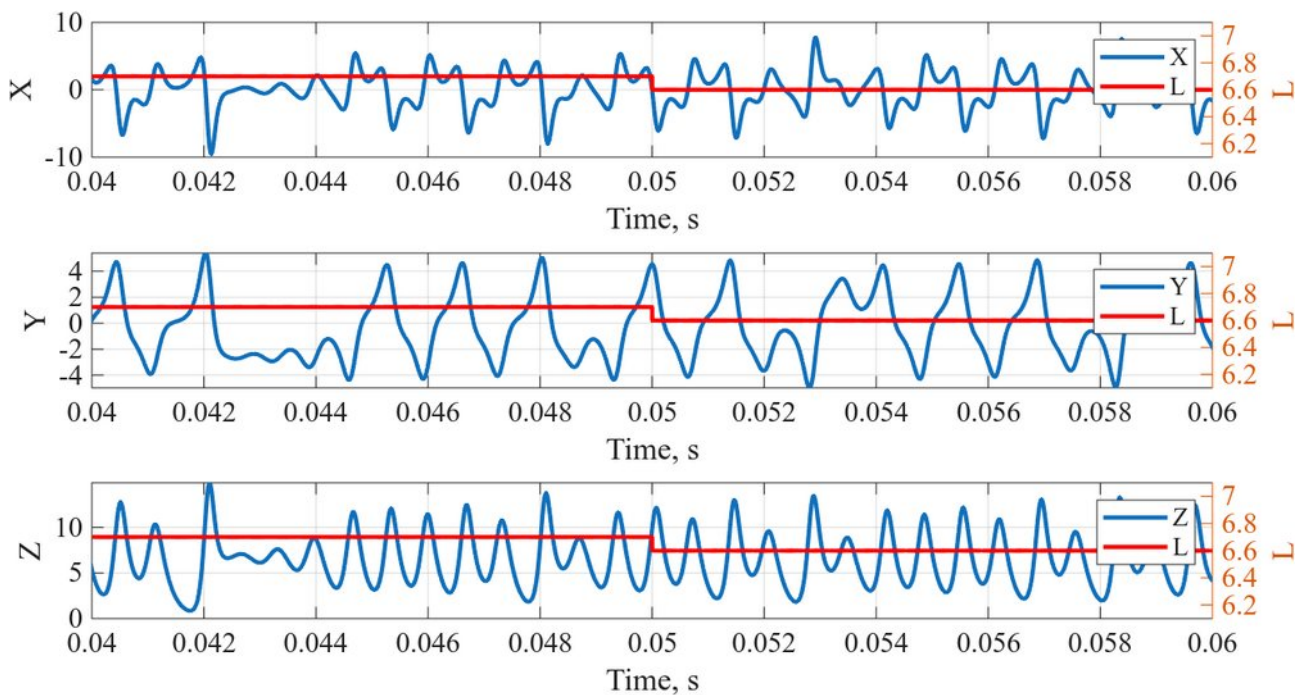


Рисунок 2.4 – Часові ряди сигналів генератора хаосу та відновлене значення керуючого коефіцієнта L

Також, слід відмітити незмінність спектральних характеристик сигналів при зміні значення керуючого параметру (рис. 2.5).

Спектральні характеристики хаотичних сигналів X , Y , Z мають деякі помітні відмінності, зокрема у спектрі сигналу Z помітно присутність однієї спектральної складової в районі 1.7 кГц, що зумовлено особливістю коливального процесу. У спектрі сигналу X присутні дві чітко виражені зони з високою амплітудою. Для передачі інформації найбільш доцільно використовувати хаотичний сигнал Y , оскільки його спектр є рівномірним без характерних іншим сигналам спотворень та нерівномірностей. Забезпечення

високої рівномірності спектру наближає хаотичний сигнал до шумового, що підвищує скритність передачі інформації.

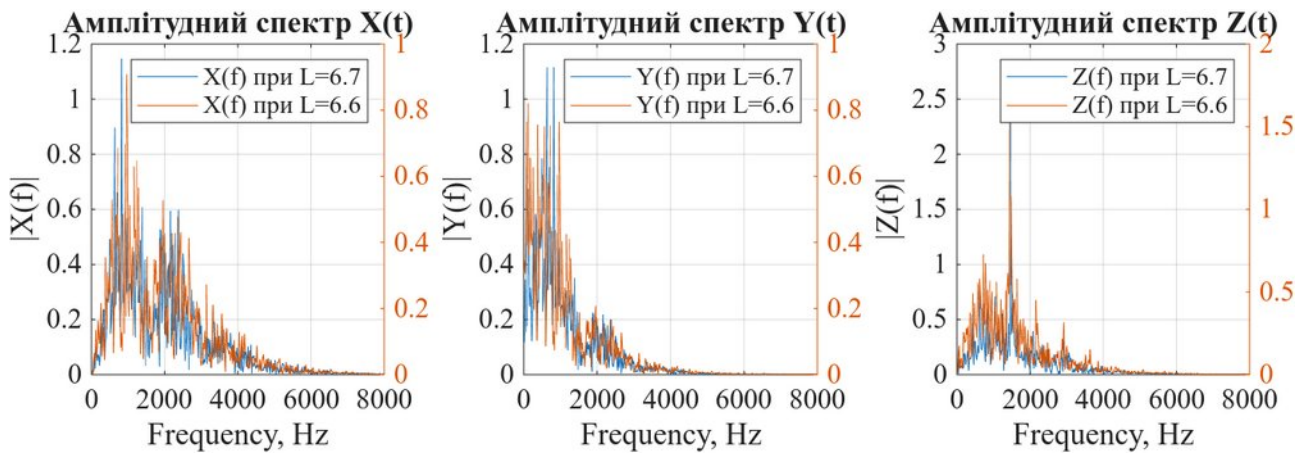


Рисунок 2.5 – Амплітудні спектри сигналів при різних значеннях керуючих параметрів

Для хаотичних сигналів досліджуваного генератора хаосу притаманна мала нерівномірність спектру та відносно велика ширина спектру, що у конкретній реалізації генератора хаосу з постійною інтегрування операційного підсилювача $\tau = \frac{1}{RC} = 5000$ становить 3 кГц. Для використання досліджуваного генератора у реальних системах зв'язку необхідно знизити сталу інтегрування операційних підсилювачів. Ця операція підвищить робочий діапазон частот генератора із збереженням його спектральних властивостей.

2.4 Концепція апаратної реалізації методу

Систему диференціальних рівнянь генератора Ракліджа можливо описати за допомогою аналогової схемотехніки, а саме, за допомогою операційних підсилювачів, перемножувачів та інших аналогових компонентів. Вперше робочу аналогову схему генератора Ракліджа запропоновано Пивоваром О. С. (рис. 2.6)

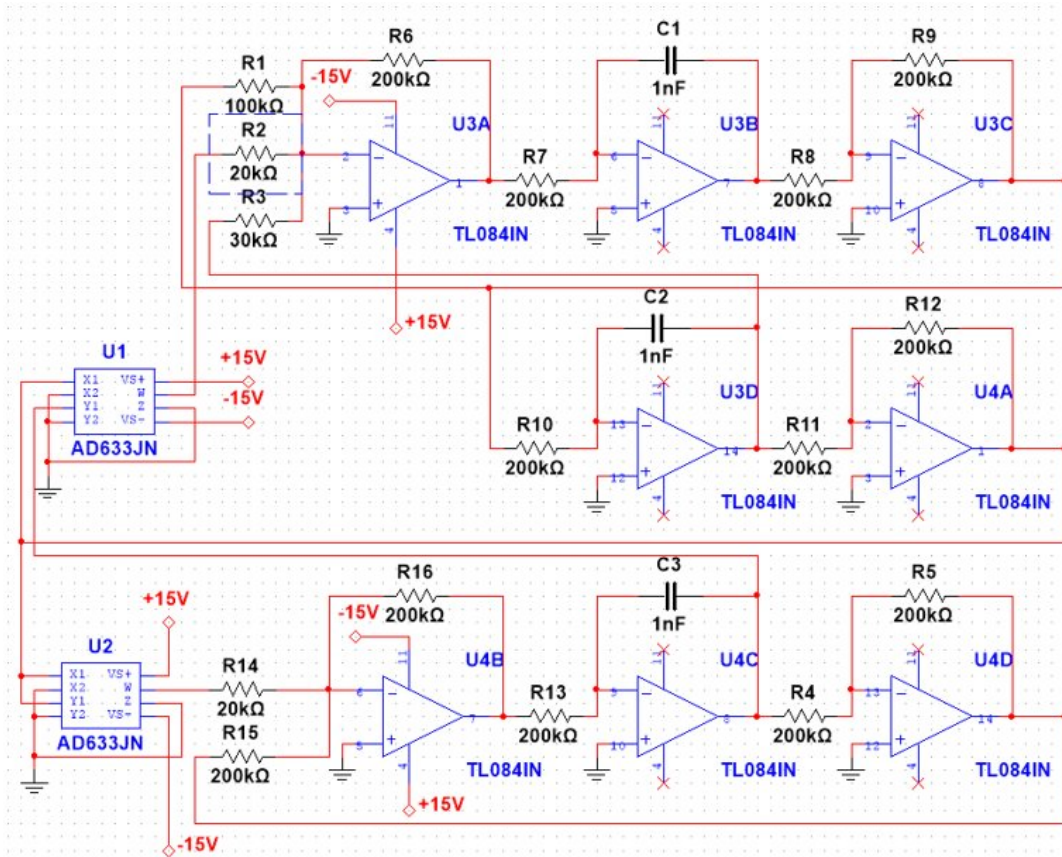


Рисунок 2.6 – Схема хаотичного генератора Ракліджа на аналогових компонентах

Операційний підсилювач з ємністю в колі зворотного зв'язку працює як інтегратор: на виході утворюється напруга, пропорційна інтегралу вхідної напруги за часом. У типовому інвертувальному інтеграторі із резистором R_{in} на вході і конденсатором C у зворотному зв'язку (рис. 2.7) вихідна напруга визначається як:

$$V_{out}(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t V_{in}(t') dt'$$

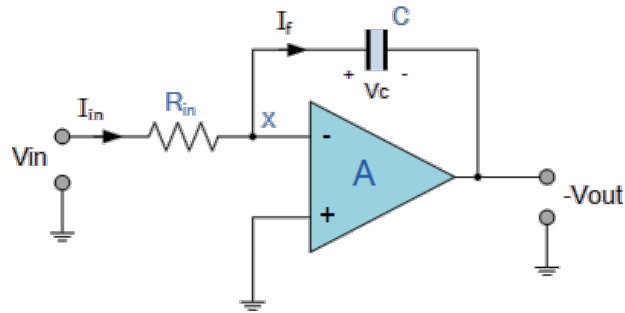


Рисунок 2.7 – Інвертувальний інтегратор на операційному підсилювачі

Такий пристрій реалізує математичне інтегрування сигналу, тобто «нарощує» (лінійно змінює) вихід при подачі постійного вхідного рівня. Постійна часу інтегратора τ визначається добутком $R \cdot C$ – саме цей добуток задає швидкість інтегрування: чим більша τ , тим повільніше змінюється значення на виході інтегратора. У схемі генератора значення τ вибирають виходячи з бажаної динаміки системи; наприклад, при $R=10\text{ к}\Omega$ і $C=2,2\text{ нФ}$ отримаємо $\tau \approx 22\text{ мкс}$, що відповідає високій частоті динаміки, тоді як більші R або C уповільнюють швидкість зміни сигналу.

У схемі генератора використовується операційний підсилювач TL084 – це низькошумний високошвидкісний операційний підсилювач на основі JFET-транзисторів. Наявність чотирьох ОП в одному корпусі дозволяє реалізувати відразу три інтегратори та допоміжний підсилювальний блок у схемі генератора. Вхідний каскад на JFET забезпечує дуже високий вхідний опір і низькі струми зміщення, що мінімізує вплив на пасивні компоненти навколо. TL084 розрахований на джерело живлення до $\pm 18\text{ В}$ і внутрішньо частотно скомпенсований для стабільної роботи. Його параметри дозволяють відтворювати хаотичні сигнали в смузі частот до сотень кілогерц без значного спотворення.

Ключові характеристики TL084:

- Максимальна швидкість наростання (slew rate): $\sim 16\text{ В/мкс}$. Це означає, що вихідний сигнал ОП може змінюватися не швидше $\sim 16\text{ В}$ за мікросекунду,

обмежуючи крутість фронтів сигналу. Важливо, що достатньо швидкість наростання необхідна для точної генерації стрімких коливань у хаотичних режимах.

- Обмеження вихідного сигналу (clipping): вихідна напруга TL084 наближається до меж живлення на відстань приблизно 2–3 В. Зокрема, при живленні ± 15 В максимальна амплітуда виходу становить близько $\pm 13,8$ В (при невеликому навантаженні), після чого сигнал обмежується і підсилювач входить у насичення. Це слід врахувати: у схемі потрібно вибрати масштаб сигналів так, щоб хаотичні коливання не вимагали більшої амплітуди, ніж підсилювач може лінійно відтворити.
- Ширина смуги пропускання: ~ 3 МГц (для коефіцієнта підсилення 1). Це означає, що на частотах до кількох мегагерц підсилювач зберігає рівень підсилення, але на вищих частотах амплітудно-частотна характеристика спадає. У контексті хаотичного генератора, основна енергія сигналу лежить значно нижче 1 МГц (зазвичай в межах десятків кілогерц), тож TL084 має достатній запас по частоті.

TL084 також характеризується широким діапазоном вхідної напруги (вхідний диференційний сигнал може бути майже до рівня $+V_{cc}$), захистом виходу від короткого замикання та відсутністю тенденції до лавинного пробую (latch-up). Його низький рівень шуму і спотворень робить його популярним вибором в аналогових обчислювальних схемах і генераторах хаосу.

В якості перемножувача в схемі використовується AD633JN – це спеціалізований монолітний аналоговий перемножувач, який виконує чотирьох-квadrантне множення двох аналогових сигналів (тобто правильно обробляє будь-які комбінації знаків вхідних напруг). Мікросхема має диференційні входи X_1 , X_2 і Y_1 , Y_2 для двох сигналів та додатковий вхід Z для зміщення вихідного сигналу. На виході W формується сигнал згідно з рівнянням:

$$V_W = \frac{(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2)}{10\text{ В}} + Z,$$

де $(X_1 - X_2)$ і $(Y_1 - Y_2)$ – різниці напруг на відповідних входах. Ділення на «10 В» означає, що внутрішній опорний масштаб становить 10 вольт: наприклад, при подачі по +5 В на входи X та Y, їх добуток (25 В) поділений на 10 В дасть +2.5 В на виході W. Максимальний повний масштаб відповідає приблизно 10 В на виході при входах $\sim \pm 10$ В (тобто $(10 \cdot 10) \div 10 = 10$). Якщо сигнал на виході намагається перевищити $\sim 10 \dots 12$ В, мікросхема входить в насичення (обмежує амплітуду), оскільки зазвичай використовується з двополярним живленням $\pm 12 \dots \pm 15$ В.

AD633 є повністю завершеним модулем множення і не потребує зовнішніх калібрувальних компонентів. Внутрішньо він містить прецизійні вузли перетворення напруги в струм та схему перемноження струмів, а також вихідний підсилювач з вбудованим опорним джерелом на 10 В (стабілітрон) для масштабування результату. Диференційні входи X та Y мають дуже високий вхідний опір (порядку $10\text{ M}\Omega$), тому підключення AD633 не вносить помилок у баланс струмів інтеграторів (не навантажує попередні ланки). Вихід W низькоомний і здатний віддавати струм на навантаження (типово до ~ 5 мА), тому можна безпосередньо підключати його до сумуючого вузла ОП або до осцилографа.

Живлення AD633 може становити від ± 8 В до ± 18 В, найчастіше використовується симетричне ± 12 В або ± 15 В. При цьому рекомендований діапазон вхідних диференційних напруг – приблизно ± 10 В, щоб вихід залишався лінійним в межах ± 10 В. Мікросхема достатньо швидкодійна: типова смуга пропускання становить ~ 1 МГц, а максимальна швидкість наростання вихідної напруги – близько 20 В/мкс. Це означає, що AD633 може перемножувати сигнали до високих частот (сотні кілогерц) без значного спаду амплітуди і може відтворювати досить стрімкі зміни на виході (20 В/мкс відповідає, наприклад, приросту від -10 В до +10 В за ~ 1 мкс). Така швидкодія

цілком задовольняє потреби генератора хаосу, у якого основні компоненти спектра сигналу лежать в області аудіочастот.

Вхід Z дозволяє здійснювати зсув вихідного сигналу або сумувати виходи кількох перемножувачів. Ця особливість використовується для реалізації складніших виразів: наприклад, можна підсумувати кілька добутків або додати постійне зміщення, просто під'єднавши інші джерела до входу Z .

Система диференційних рівнянь Ракліджа має коефіцієнти L та K . В апаратній реалізації ці коефіцієнти задаються співвідношеннями резисторів (5) у сумуючих колах інтеграторів.

$$K = \frac{R6}{R1}, L = \frac{R6}{R3}. \quad (5)$$

Замість постійних $R1$ та $R3$ (Рис. 2.6) доцільно встановити підстроювальні або змінні резистори. Таким чином, змінюючи значення опору резисторів, можна здійснювати контроль параметрів і спостерігати різні режими коливальності – від затухаючих до періодичних і хаотичних.

Висновки до другого розділу

У цьому розділі розроблено методику відновлення біфуркаційних параметрів L і K хаотичного генератора Ракліджа за вимірними часовими рядами $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$. Показано, що пара (L, K) визначає зміну динамічних режимів та може використовуватися як керуючий параметр, зокрема, у задачах прихованої передачі інформації.

1. Уточнено математичну модель генератора й інтерпретацію параметрів: K відповідає лінійному згасанню (дисипативності), L — «збудженню» через змінну u ; для $K \approx 2$ та $L \approx 6.7$ спостерігається типовий хаотичний режим.

2. Досліджено еволюцію режимів при варіації L і K : від стаціонарної рівноваги до періодичного циклу та подальшого переходу до хаосу в певних областях параметрів.

3. Для чисельної реалізації отримано різницеву форму моделі з явним методом Ейлера та кроком $dt = 0.005$ с; із цієї форми аналітично виведено покрокові оцінки L_n і K_n .

4. Запропоновано алгоритм ідентифікації, що поєднує перебір і статистичне узгодження: для сітки $K \in [0.5;6]$ формується ряд L_n , будується гістограма на $L \in [1;15]$ $\Delta L=0.025$, а оцінка K , L береться за глобальним максимумом частот.

5. Показано межі практичної застосовності (скінченна точність, шуми, завади каналу), що зумовлює потребу в імовірнісному прийманні та збільшенні тривалості часових рядів. Водночас малі зміни керуючого параметра майже не змінюють форму атрактора й спектральні характеристики; як носій інформації найбільш придатний сигнал Y . Запропоновано апаратну реалізацію на інтеграторах ОП і аналогових перемножувачах із заданням K та L через відношення резисторів.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

3.1 Моделювання та оптимізація параметрів алгоритму в умовах завад

Забезпечення достовірного відновлення таких керуючих параметрів на прийнятному боці за наявності шумів у каналі зв'язку залишається відкритою проблемою. Дія адитивного шуму спотворює хаотичний сигнал та відповідний атрактор системи, суттєво ускладнюючи пряму оцінку параметрів з отриманого часового ряду. Властива хаотичним системам чутливість до початкових умов призводить до того, що навіть невеликі завади можуть викликати значні відхилення траєкторії та накопичення похибки при оцінюванні параметрів. Більшість існуючих методів відновлення параметрів (синхронізація, спостереження по одному виходу, багатопараметровий аналіз ряду, прямий підгін диференціальних рівнянь, машинне навчання [40-45]) розроблені переважно для ідеальних умов і не гарантують надійного результату у реальному зашумленому каналі. Таким чином, практичне завдання оцінювання параметрів генератора хаосу при наявності шуму досі пов'язане зі значними труднощами і вимагає вдосконалених підходів.

Для симуляції реальних умов в каналі зв'язку, до сигналів генератора застосовано адитивний шумовий сигнал у середовищі Matlab.

Для трьох компонент сигналу генератора хаосу:

$$\tilde{x}[n] = x[n] + n_x[n], \quad \tilde{y}[n] = y[n] + n_y[n], \quad \tilde{z}[n] = z[n] + n_z[n],$$

де $n_x[n], n_y[n], n_z[n] \sim N(0, \sigma_x^2), N(0, \sigma_y^2), N(0, \sigma_z^2)$ - незалежні гаусівські процеси. Дисперсії підбираються із значення SNR в децибелах:

$$SNR_{dB}^{(x)} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_x}{\sigma_x^2} \right) \Rightarrow \sigma_x^2 = \frac{P_x}{10^{SNR_{dB}^{(x)}/10}},$$

аналогічно для y, z . Оцінки потужностей:

$$P_x = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n]^2, P_y = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y[n]^2, P_z = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} z[n]^2.$$

Внаслідок дії шуму в каналі зв'язку, форма сигналу та атрактор генератора спотворюються (рис. 3.1), що ускладнює задачу відновлення керуючих параметрів.

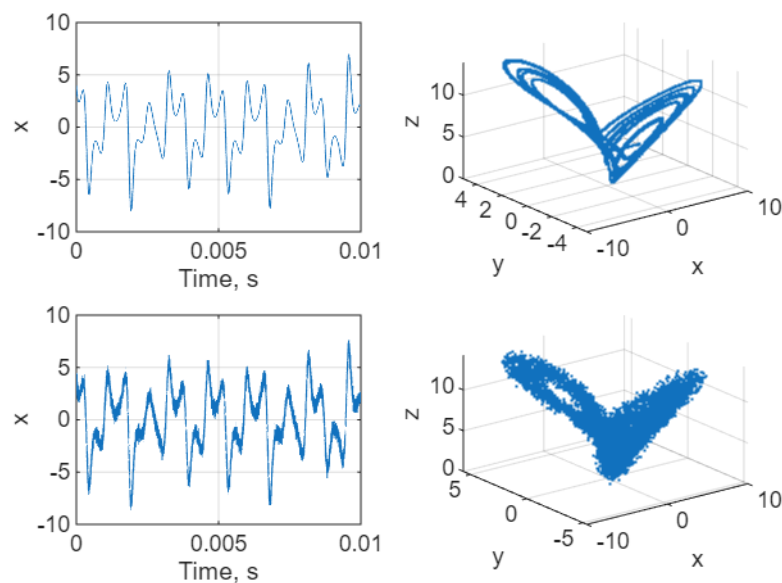


Рисунок 3.1 – Форма ідеального і зашумленого сигналів та відповідні атрактори

Для відновлення коефіцієнтів зашумлені сигнали потрібно відфільтрувати, наприклад, за допомогою функції рухомого середнього з певним розміром вікна усереднення W_d (6). Цей простий лінійний фільтр зменшує високочастотну шумову складову і підвищує ефективне SNR без необхідності складних адаптивних або вейвлет-методів. Такий прийом відомий

як недорого засобами реалізації стратегія підвищення завадостійкості в хаотичних радіоканалах.

$$SMA_t = \frac{1}{W_d} \sum_{W_d=0}^{W_d-1} p_{t-i} \quad (6)$$

де W_d – розмір вікна усереднення, p_{t-i} – елемент підмножини вікна усереднення.

Застосувавши виведені формули (3, 4), до зашумлених часових рядів X, Y, Z тривалістю 1.2 мс, для кожної пари значень сигнал/шум та розміру вікна усереднення отримано значення відновленого параметру, шляхом медіанного усереднення $K(t)$ та $L(t)$ на проміжку часу у 1.2 мілісекунди (рис. 3.2).

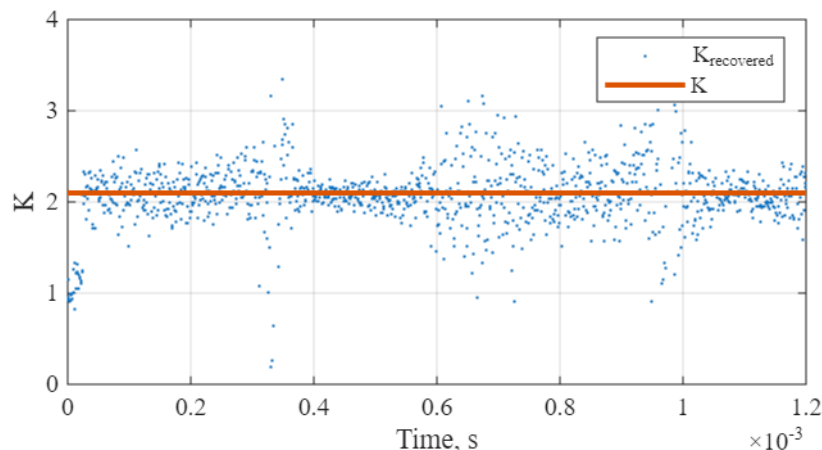


Рисунок 3.2 – Приклад відновленого значення ($K_{recovered}$) та його дійсне значення (K)

Під дією адитивного шуму миттєві оцінки $K_{recovered}(t)$ «коливаються» навколо еталонного значення без помітного систематичного зміщення, утворюючи симетричне розсіювання точок відносно червоної лінії. За таких умов застосування медіанного усереднення до послідовностей на інтервалі 1,2 мс дає оцінку, практично збіжну з істинним значенням параметра, що свідчить про відсутність зміщення енергії розсіювання оцінок відносно «центру». Спираючись на цю властивість, було побудовано алгоритм кількісної оцінки

похибки відновлення керуючих параметрів для різних комбінацій рівня шуму в каналі та тривалості вікна фільтра рухомого середнього (рис. 3.3).

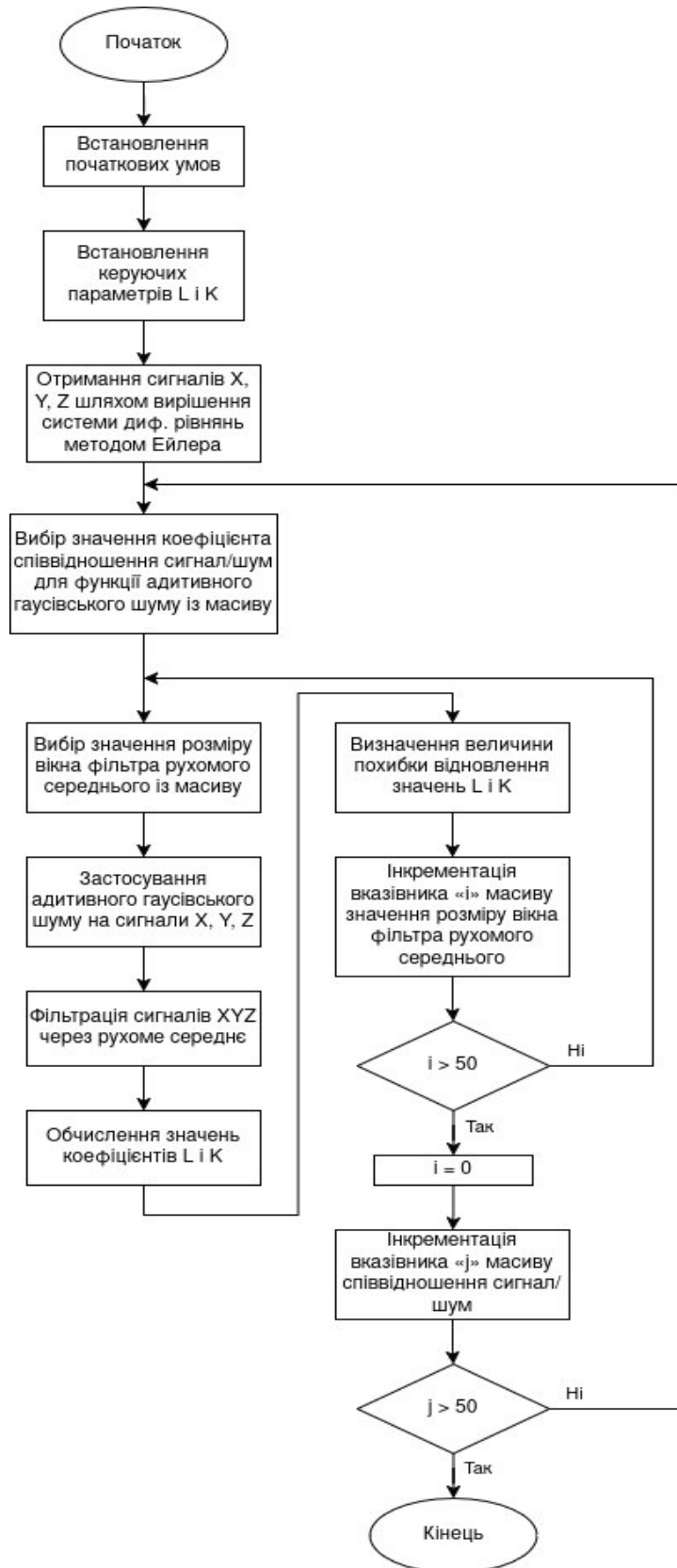


Рисунок 3.3 – Алгоритм визначення похибки відновлення керуючих параметрів

Вплив інтенсивності шуму та розміру вікна усереднення на якість відновлення має нелінійний характер і призводить до різкого зростання похибки після досягнення певного порогу завад (рис. 3.4).

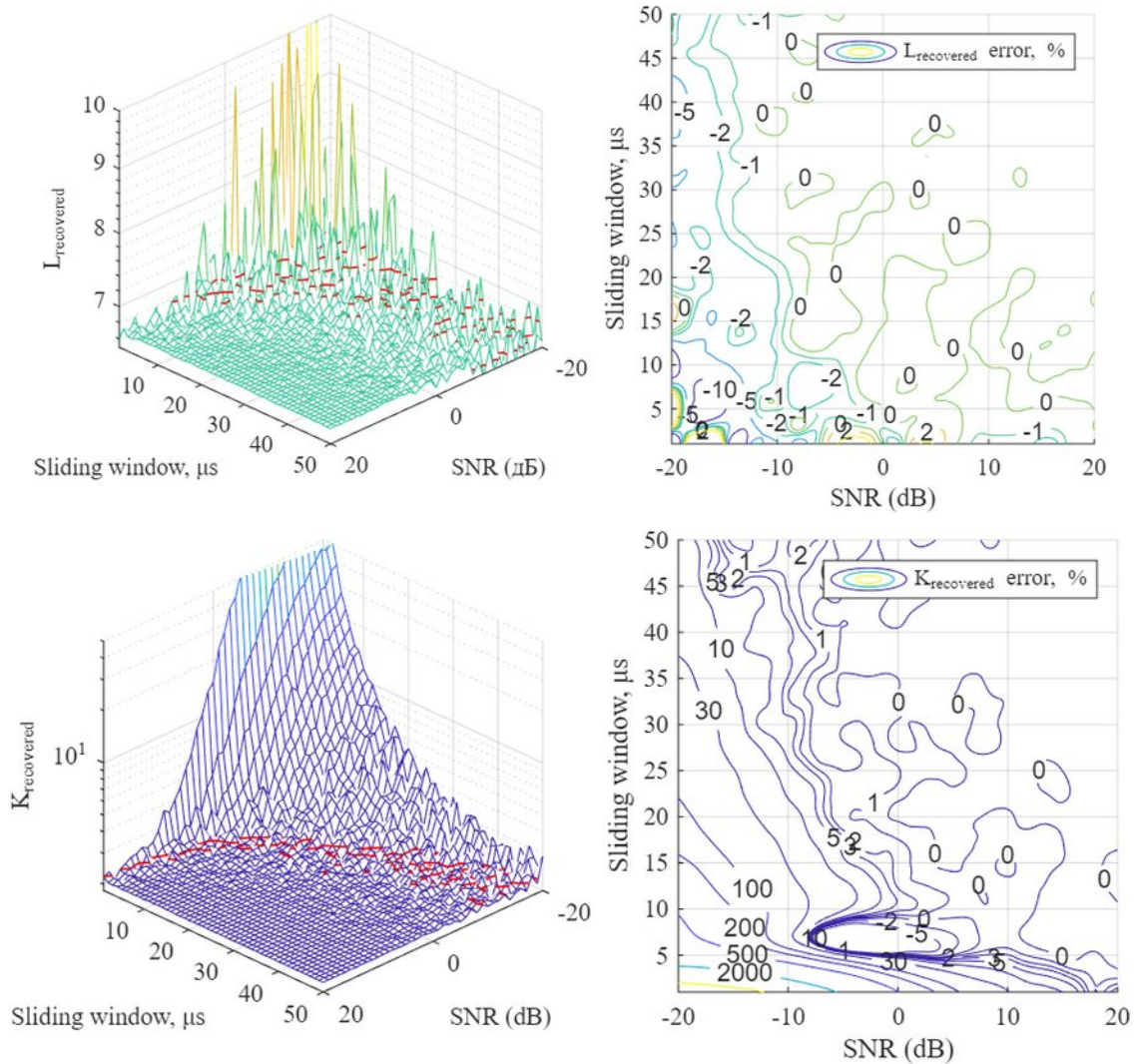


Рисунок 3.4 – Поверхні розподілу значень відновлених параметрів К і L (праворуч) та ізолінії відхилень від дійсного значення, % (ліворуч)

Поверхні похибок відновлення параметрів L та K містять області насичення (плато), в яких значення відносних помилок $L_{\text{recovered error, \%}}$ та $K_{\text{recovered error, \%}}$ наближаються до нуля. Ці області відповідають режимам, за яких збільшення тривалості вікна усереднення W_d та/або підвищення співвідношення сигнал/шум SNR забезпечує ефективне придушення шумової

складової. У дослідженні еталонними обрано значення параметрів $L = 2.1$ та $K = 6.7$.

Для кількісного виділення робочих діапазонів введено критерій допустимої похибки $\pm 2\%$ від еталонних значень L і K ; відповідні ізолінії позначено на поверхнях розподілу похибок червоним кольором (рис. 4, зліва). Згідно з цим критерієм визначено межі достовірного відновлення обох керуючих параметрів: для K — за співвідношення сигнал/шум $SNR \approx -13$ дБ при тривалості вікна усереднення 40 мкс або $SNR \approx -3$ дБ при $W_d = 10$ мкс; для L — за $SNR \approx -18$ дБ при $W_d = 25$ мкс або $SNR \approx -7$ дБ при $W_d = 5$ мкс. Таким чином, компроміс між тривалістю вікна усереднення та вимогами до SNR має виражений нелінійний характер і не може бути описаний простою лінійною залежністю.

Для подальшого формалізованого аналізу отримані двовимірні залежності було дискретизовано: значення відносної похибки відновлення параметрів K і L для всіх комбінацій W_d та SNR занесено до табл. 3.1 і табл. 3.2 відповідно. У цих таблицях області, що задовольняють критерію $|error| \leq 2\%$, виділено напівжирним шрифтом, що дає змогу наочно ідентифікувати робочі зони та їх границі та надалі використовувати їх для побудови узагальненої апроксимаційної залежності $(W_d^x = f(SNR), \text{ мкс})$ тривалості вікна спостереження W_d як функції від SNR для кожного із параметрів K і L відповідно.

Таблиця 3.1 – Значення поверхні відхилення від дійсного значення відновленого параметру K

W_d , μs	SNR, dB																			
	-15	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
5	673	555	450	358	285	223	170	123	83,3	54,1	33,1	18,5	9,1	2,8	0,5	0,3	0	-1,4	-2,4	-1,7
7	287	216	153	104	67	39,8	19,4	2,2	-10,8	-18,9	-21,6	-22,3	-19,7	-16,5	-13	-9,9	-7,1	-5,7	-4,6	-3,4
9	222	176	136	104	78,2	56,3	37,5	22,1	12,4	7,2	3,4	0,9	0,3	0	-0,3	-0,2	0,3	0,5	0,2	0,1
11	173	144	117	92,6	71,8	53,8	39,2	28,3	20,8	16,2	13,3	10,6	8,1	5,8	4,1	2,9	2,3	1,8	1,4	1,2
13	130	105	84,3	66,4	51,1	37,6	28,4	21,8	16,9	12,8	10,5	8,7	6,6	4,7	2,9	1,7	1,1	0,9	0,7	0,6
15	94,5	75,7	61,4	49,5	38,4	28,4	21,2	15,8	11,6	8,2	5,8	4,4	3,6	2,7	2,3	1,7	1,1	0,6	0,1	-0,2
17	71,9	59,9	49,1	39,5	30,8	22,7	15,7	11,3	8,6	6,4	4,1	2,4	1,5	1,5	1,7	1,3	0,9	0,6	0,2	-0,3
19	54,4	46,1	36,6	28,1	22	16,8	12,1	8,6	5,5	3	1,5	1,2	1,1	0,9	0,4	0,3	0	0	-0,1	-0,2
21	43,8	35,2	26,6	19,7	14,5	11,5	9,4	6,6	3,5	1,9	1,4	1,1	1,1	0,8	0,2	-0,3	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4
23	35,7	28,6	21,5	15,4	11,5	9	7	5,6	3,7	1,9	1,2	1,4	1,6	1,6	1,2	0,7	0,1	-0,2	-0,2	-0,1
25	31,3	24,2	18,2	13,4	9,3	6,2	4,5	3,1	1,9	1,2	1	1,1	1,4	1,8	1,8	1,2	0,4	0,1	0,1	0,2
27	23,4	17,3	12,8	9,2	6,6	4,2	2,2	1,2	0,5	0,3	0,6	0,9	1,2	1	0,5	0,1	0	0	0,2	0,1
29	18,8	11,7	7,2	5,1	4,2	3,6	2,6	1	0,1	0,4	1,2	1,4	1,2	0,7	0,1	-0,3	-0,1	0,1	0	-0,2
31	15,3	9,4	5,6	4,1	3,2	3	2,5	1,2	0,3	0,2	0,3	0,7	0,8	0,6	0,4	0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2
33	11,3	8,3	6,7	5,5	3,9	2	1,2	0,7	0	-0,2	0,2	0,6	0,7	0,6	0,4	-0,1	-0,2	-0,2	-0,3	-0,2
35	9,7	8,2	6,7	5,5	4,2	2,9	1,8	0,9	0	-0,2	0,2	0,3	0,1	0,1	0,2	0	-0,3	-0,2	-0,3	-0,3
37	7,5	6,4	5,6	5,2	4,4	3,2	2,6	2	1,5	0,5	-0,3	-0,7	-0,7	-0,5	-0,5	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3	-0,4
39	6,4	5,1	4,6	4,2	3,7	3,2	2,7	2	1,3	0,5	-0,1	-0,5	-0,6	-0,6	-0,4	-0,3	-0,5	-0,8	-0,9	-0,8
41	7,7	6	4,8	4,2	3,7	3,1	1,8	0,6	0	-0,1	0	-0,1	-0,2	-0,2	0,1	0,1	-0,1	-0,7	-0,8	-0,7
43	6,5	6,3	5,5	4,8	3,5	2,1	1,2	0,4	-0,2	-0,1	-0,1	-0,4	-0,4	-0,2	0,1	0,3	0,3	0,1	-0,2	-0,3

Таблиця 3.2 – Значення поверхні відхилення від дійсного значення відновленого параметру L

W_d , μs	SNR, dB																			
	-19	-18	-17	-16	-15	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0
1	-4,1	23,2	41,1	33,1	1,8	-22,5	-11,2	-1,5	-7,2	-5,8	-2,7	-10	-3,9	-0,8	2,9	5,9	8,6	10,4	4,2	-0,4
3	-3,4	-7	-4,3	-1,5	-3,1	-7,4	-9,1	-4,7	-3,3	-2,6	-0,7	0,8	-0,9	-1,5	0,3	1	0,4	-0,2	-0,6	-0,9
5	-0,7	-11,4	-15,4	-15,3	-10,6	-7,1	-5,2	-1,7	-0,7	-0,8	-1,4	-2,2	-1,8	-1,3	-1,4	-1,6	-1,4	-1,1	-0,6	-0,1
7	-3,1	-9,6	-12,7	-13,4	-10,8	-8,1	-4,7	-2,2	-1,1	-1	-1,9	-3,9	-4,6	-3,7	-2,4	-1,7	-0,7	0,2	0,8	0,7
9	-8,7	-7,7	-8,6	-8,2	-7,6	-5,4	-4,6	-4,5	-3,3	-1,5	-1,7	-3,1	-3,9	-3,3	-2,4	-1,3	-0,5	0,4	0,9	1
11	-8,3	-6,2	-5,3	-4,9	-4	-3,6	-3,6	-3,8	-3,3	-1,9	-1,3	-1,2	-0,8	-0,7	-0,8	-0,8	-0,5	-0,1	0,2	0,5
13	-3,8	-4,7	-5	-4,4	-2,6	-1,2	-1,4	-2,1	-2,3	-1,5	-0,4	0,6	1	0,9	0,3	-0,1	-0,2	-0,2	0	0,2
15	0,6	-2,3	-4,5	-5,1	-3,4	-1,7	-1,6	-2,5	-2,7	-1,9	-0,6	0,6	1	0,9	0,6	0,4	0,2	0	-0,1	0
17	0,7	-1	-3,3	-4,1	-3,6	-2,8	-2,4	-2,3	-2,2	-2	-1,1	-0,2	0,3	0,5	0,5	0,3	0	-0,2	-0,2	0
19	-2,4	-2,1	-1,4	-2,3	-3,6	-3,8	-3	-2,7	-2,6	-2,1	-1,2	-0,5	0,1	0,4	0,3	-0,1	-0,4	-0,6	-0,4	0
21	-2,6	-2,2	-1,7	-2,4	-3,3	-3,3	-3,2	-2,6	-2,2	-1,5	-0,9	-0,4	0	0,1	0,1	-0,2	-0,5	-0,6	-0,4	-0,1
23	-4,1	-2,7	-2,1	-2,4	-2,8	-2,5	-1,9	-1,2	-0,9	-0,5	-0,2	0	0,1	0,2	0,1	-0,1	-0,2	-0,3	-0,3	-0,2
25	-3,2	-1,9	-1,8	-2,3	-2,1	-1,3	-0,8	-0,5	-0,4	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,3	-0,1	0,1	0,1	-0,1	-0,3	-0,3
27	-3,7	-3,5	-3,1	-2,4	-1,7	-0,8	-0,4	-0,4	-0,5	-0,4	-0,1	-0,2	-0,5	-0,5	-0,3	0	0,1	0	0	-0,1
29	-4,8	-4,7	-3,8	-2,3	-1,3	-0,9	-0,6	-0,5	-0,6	-0,3	0	0,1	0	-0,1	-0,2	-0,2	-0,2	0	0,1	0,1
31	-5	-4,6	-3,6	-2,5	-1,8	-1,4	-1,1	-0,7	-0,4	-0,2	-0,1	0	0,1	0,1	0	-0,1	-0,3	-0,3	-0,1	0
33	-4,7	-4,9	-3,9	-2,8	-1,6	-1,1	-1	-1	-0,7	-0,5	-0,4	-0,2	-0,1	-0,2	-0,2	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3
35	-4,9	-4,7	-3,7	-2,4	-1,4	-0,9	-0,7	-0,8	-0,6	-0,5	-0,4	-0,5	-0,3	-0,3	-0,2	-0,3	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4
37	-4,7	-4,2	-3,4	-2,6	-1,8	-1,4	-0,8	-0,1	0,3	0,3	-0,1	-0,5	-0,6	-0,4	-0,3	-0,4	-0,3	-0,2	-0,2	-0,2
39	-5,4	-4,1	-3	-2,3	-1,8	-1,2	-0,6	-0,2	0,1	0,1	-0,1	-0,2	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4	-0,3	-0,2	-0,2	-0,2

Границю достовірного відновлення параметрів L та K вирішено встановити на рівні 2% як компроміс між якістю відновлення та швидкістю. Таким чином із таблиць 3.1 і 3.2 можливо встановити оптимальне значення вікна усереднення в залежності від потужності діючого шуму у каналі зв'язку.

Для виведення залежності розміру вікна усереднення від SNR, з таблиць 3.1 і 3.2 вибрано граничні пари значень (W_d, SNR) на рівні $\pm 2\%$ відхилення від дійсного значення відповідного параметру.

На підставі аналізу цих експериментальних даних як таку, що найкраще відтворює їхню поведінку, було обрано модель однократно експоненційної апроксимації (7).

$$y(x) = a \cdot e^{bx}, \quad (7)$$

де a — амплітудний коефіцієнт (масштабний множник), b — показник експоненти, що визначає швидкість зростання або спаду функції, а x — незалежна змінна.

Під час побудови апроксимаційної залежності частину експериментальних точок, позначених на рис. 3.5 червоними позначками, було виключено з розгляду. Попри те, що формально вони потрапляють у діапазон $|\text{error}| \leq 2\%$, ці точки суттєво віддалені від основної границі та відповідають режимам з надмірно великою потужністю шуму, для яких поява поодиноких «вдалих» оцінок на довгих інтервалах спостереження є статистично малоімовірною і не має практичного фізичного змісту, тому при апроксимації вони не розглядалися.

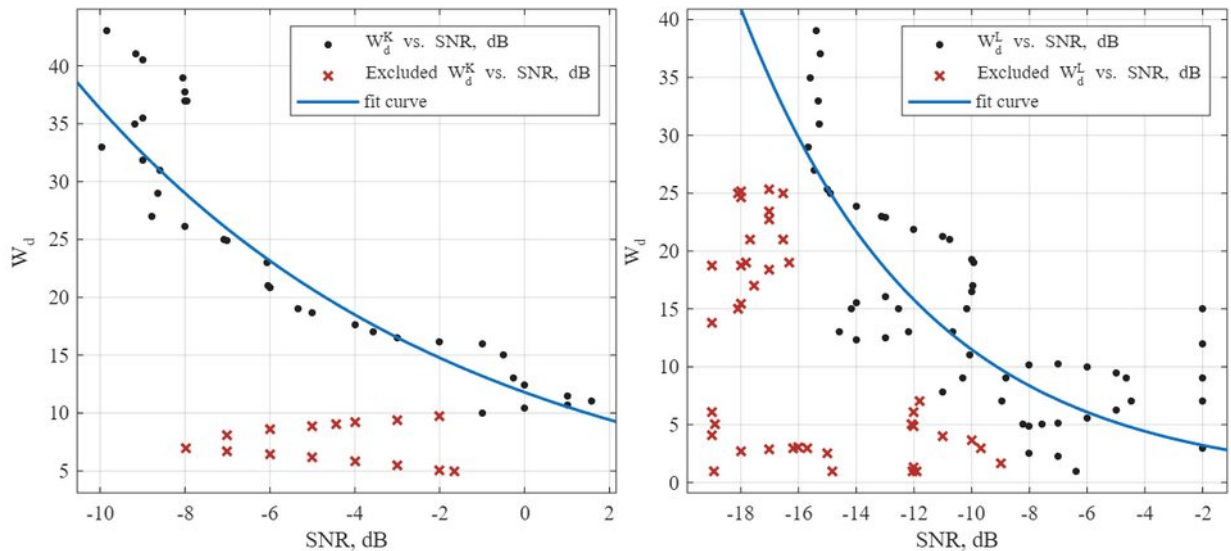


Рисунок 3.5 – Залежність границі достовірного відновлення параметру К (зліва) L (зправа) на рівні $\pm 2\%$ від i SNR, та підбір апроксимаційних кривих

Оцінювання параметрів a та b здійснюється методом найменших квадратів. Мінімізується функція квадратичної похибки (8).

$$S(a, b) = \sum_{i=1}^N [y_i - a \cdot e^{bx_i}]^2, \quad (8)$$

де (x_i, y_i) — експериментальні точки, N — їх кількість. Оскільки модель є нелінійною за параметром b , це завдання розв'язується як задача нелінійної регресії. Matlab застосовує чисельні алгоритми нелінійного методу найменших квадратів (зокрема алгоритми trust-region та Левенберга–Марквардта) для пошуку таких значень a та b , які мінімізують $S(a, b)$.

Використовуючи метод однократної апроксимації, отримано такі значення параметрів a та b : для кривої, що описує граничні значення тривалості вікна усереднення для параметра К, $a_K = 11.796$, $b_K = -0.1124$; для параметра L відповідно $a_L = 2.344$, $b_L = -0.159$. Коефіцієнт a визначає масштаб (номінальний рівень) тривалості вікна при нульовому або близькому до нуля значенні SNR, тоді як коефіцієнт b характеризує швидкість експоненційного спадання необхідної тривалості вікна зі зростанням співвідношення сигнал/шум.

Підставивши ці коефіцієнти у рівняння (7), отримуємо робочі аналітичні залежності для оцінки оптимальної тривалості вікна усереднення W_d^K та W_d^L в залежності від значення SNR для коефіцієнтів K (9) і L (10) відповідно:

$$W_d^K = 11.796 \cdot e^{-0.1124 \cdot SNR} \quad (9)$$

$$W_d^L = 2.344 \cdot e^{-0.159 \cdot SNR} \quad (10)$$

Таким чином, отримано компактні експоненційні моделі, які узагальнюють результати чисельного експерименту та задають однозначну відповідність між потужністю шуму в каналі зв'язку та рекомендованою тривалістю вікна усереднення для забезпечення похибки відновлення значень кожного із керуючих коефіцієнтів не більше 2 %. На практиці це дозволяє реалізувати в приймачі просту адаптивну процедуру: за оціненим значенням SNR миттєво обчислювати W_d^K та W_d^L за (9)–(10) та налаштувати параметри фільтрації без додаткового перебору або емпіричного підстроювання. Зменшення вікна при високому SNR і його збільшення при низькому SNR забезпечує мінімально необхідну тривалість обчислень на один біт інформації за умови збереження заданої точності відновлення керуючих параметрів.

3.2 Апаратна реалізація генератора хаосу

Апаратна реалізація виконана в двох варіантах. Перший варіант — тестова плата, виготовлена в домашніх умовах за фоторезистивною технологією по схемі з Multisim (рис. 2.6), з невеликими змінами: постійні резистори, що задають коефіцієнти L і K, замінені на підстроювальні (рис. 3.6). Цей варіант виготовлявся для перевірки працездатності схеми на реальних аналогових компонентах, і для початкових досліджень.

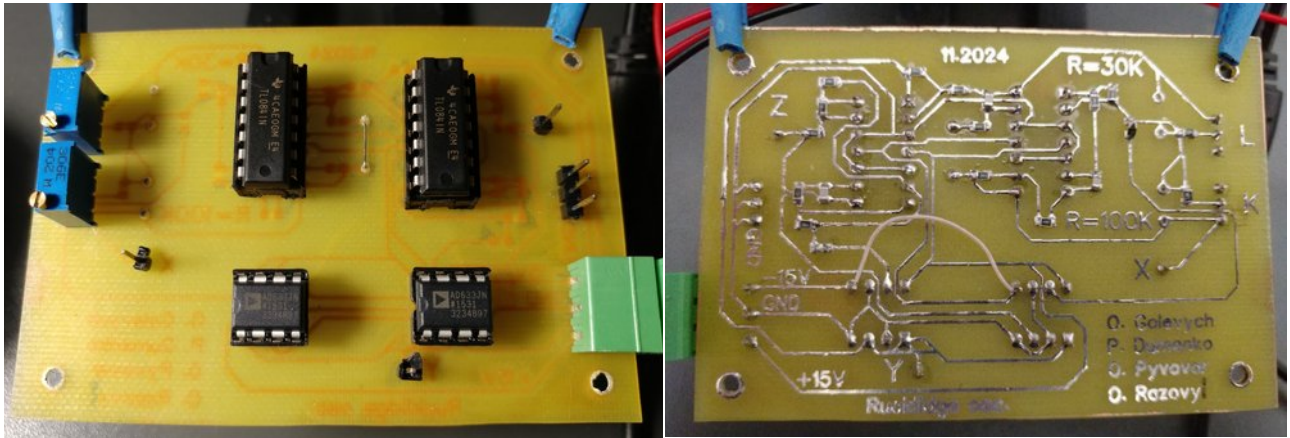


Рисунок 3.6 – Тестова плата генератора хаосу

Для можливості дослідження передачі інформації за допомогою генератора хаосу у схему (рис. 2.6) додано можливість віддаленої динамічної зміни керуючих параметрів за допомогою програмного забезпечення, що також дало змогу дослідити роботу реального генератора у різних режимах (рис. 3.8, 3.11).

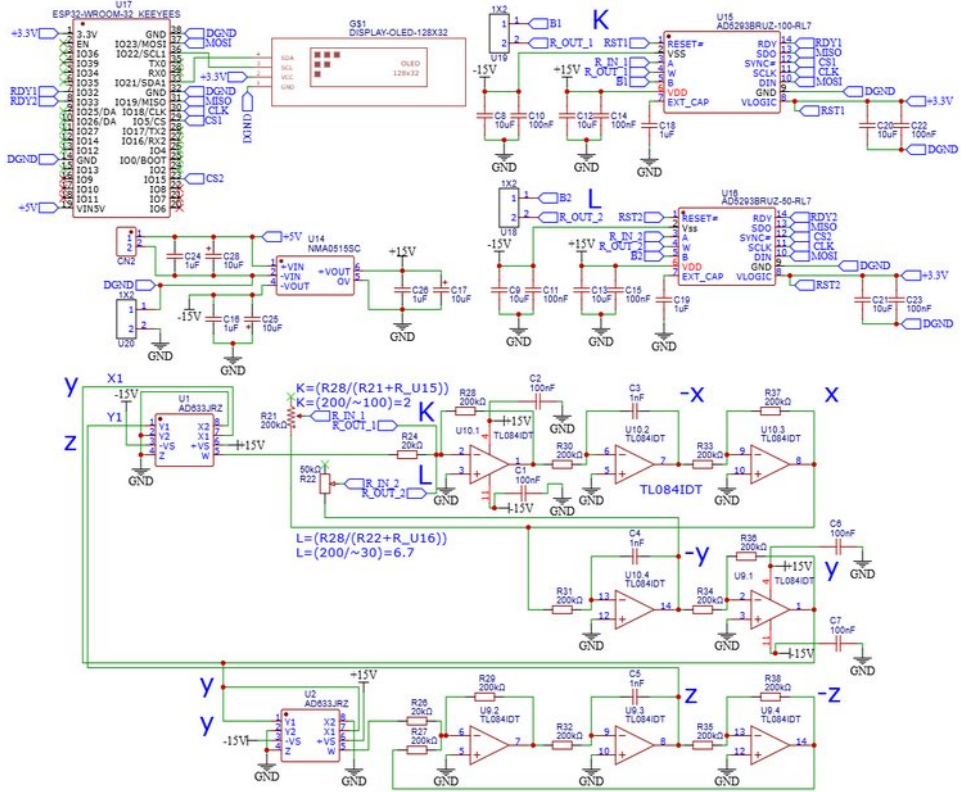


Рисунок 3.7 – Схема генератора хаосу з програмним налаштуванням коефіцієнтів

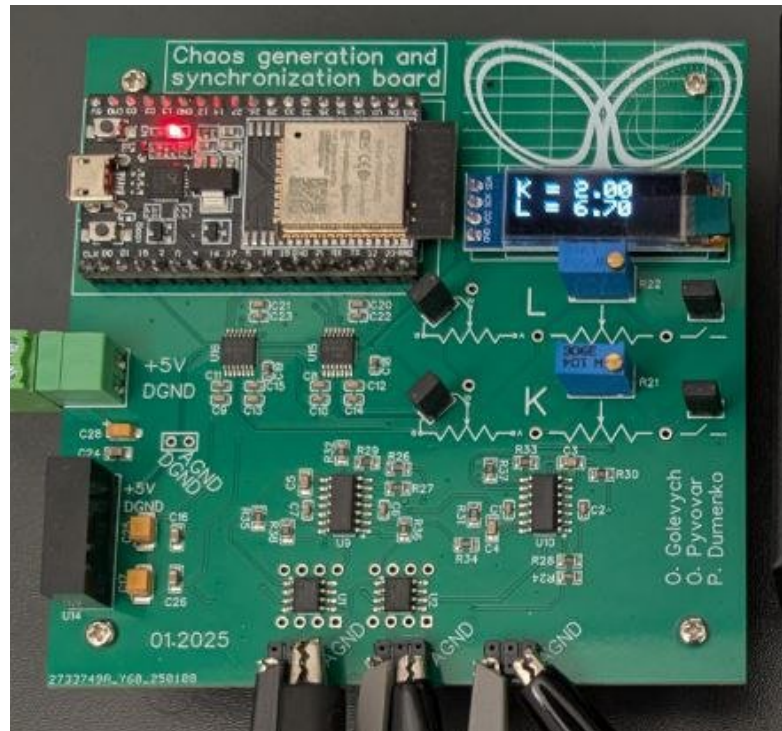


Рисунок 3.8 – Плата генератора хаосу з
можливістю динамічної зміни керуючих
параметрів

У цій схемі послідовно з підстроювальними резисторами під'єднані цифрові потенціометри. Цифровий потенціометр – це електронний компонент з цифровим керуванням, що імітує функції звичайного аналогового потенціометра. Фактично він є твердотільним змінним резистором, яким можна керувати через цифрові сигнали. Внутрішня будова такого потенціометра реалізована у вигляді інтегрованої резистивної матриці з електронними перемикачами на кожному кроці. Зміна положення «повзунка» потенціометра здійснюється вибором одного з відводів резистивної матриці, який під'єднується до виходу – таким чином формується потрібний опір або співвідношення поділу напруги. Кількість дискретних положень визначається розрядністю керування: наприклад, 10-бітний потенціометр має 1024 позиції. Для передачі команд керування цифрові потенціометри зазвичай використовують стандартні інтерфейси зв'язку – такі як I²C або SPI – або ж іноді простіший двосигнальний інтерфейс Up/Down.

В цій апаратній реалізації використовуються два цифрових потенціометри AD5293 – одноканальний прецизійний цифровий потенціометр на 1024 позиції (10-біт). Для встановлення значення коефіцієнта K використовується варіант з максимальним опором 100 кОм, а для коефіцієнта L — 50 кОм. Обидві версії мають однакову будову і параметри, відмінність полягає лише в максимальному значенні опору, тому дискретність зміни значень опору для версії 100 кОм $\Delta R_{100к} = \frac{100 \text{ кОм}}{1024} = 97.65 \text{ Ом}$, а для версії на 50 кОм $\Delta R_{50к} = \frac{50 \text{ кОм}}{1024} = 48.82 \text{ Ом}$.

Враховуючи встановлені значення опорів підстроювальних резисторів $R_{21} = 50.03 \text{ кОм}$ та $R_{22} = 27.05 \text{ кОм}$, за формулами (11), (12) отримуємо діапазони значень коефіцієнтів: для K — від 1.33 до 3.99, а для L — від 2.59 до 7.39.

$$K = \frac{R_{28}}{R_{21} + R_{U15}}, \quad (11)$$

$$L = \frac{R_{28}}{R_{22} + R_{U16}}, \quad (12)$$

де R_{21} , R_{22} — значення опорів відповідних потенціометрів; R_{28} — номінальний опір резистора, що задає значення значення коефіцієнту підсилення в схемі інвертуючого операційного підсилювача для кожного з керуючих коефіцієнтів; R_{U15} , R_{U16} — значення опорів відповідних цифрових потенціометрів (рис. 3.11).

Залежність значень коефіцієнтів L і K від значень опору потенціометрів носить нелінійний характер (рис. 3.9).

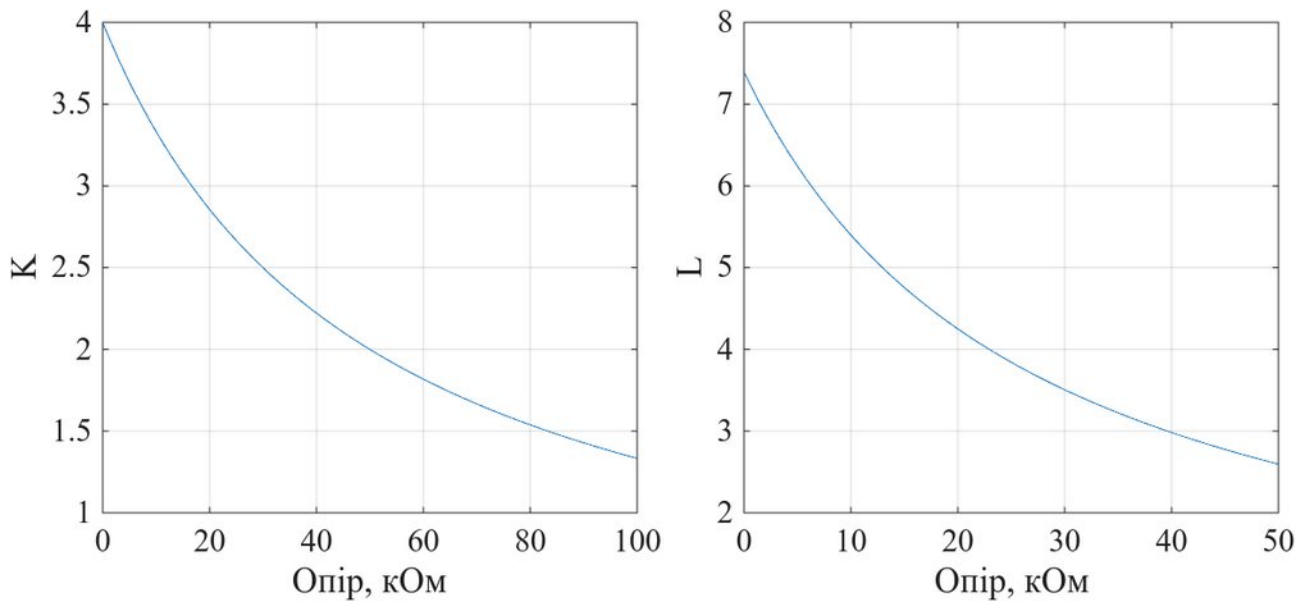


Рисунок 3.9 – Залежність значень керуючих коефіцієнтів від опору потенціометрів

AD5293 має послідовний інтерфейс SPI для керування налаштуванням опору. Інтерфейс SPI сумісний зі стандартними мікроконтролерами та DSP і підтримує швидкості обміну даними до 50 МГц, що дозволяє швидко змінювати налаштування в реальному часі.

Цифровими потенціометрами керує мікроконтролер ESP32 — енергоефективний мікроконтролер від Espressif Systems, що поєднує обчислювальні ядра з бездротовими інтерфейсами Wi-Fi і Bluetooth. Базовий чіп ESP32 містить два 32-розрядні ядра Xtensa LX6, що працюють на тактовій частоті до 240 МГц.

У контексті класичного Bluetooth ESP32 підтримує протокол RFCOMM, що є емуляцією послідовного порту поверх каналу Bluetooth. RFCOMM слугує транспортом для профілю SPP (Serial Port Profile) – стандартного профілю, який надає двосторонній віртуальний COM-порт між пристроями. Інакше кажучи, за допомогою RFCOMM ESP32 може встановлювати бездротовий послідовний зв'язок, подібний до UART, з іншим Bluetooth-пристроєм.

Саме цей протокол використовується для передачі значень опорів цифрових потенціометрів, які потрібно встановити. 10-бітні значення опорів цифрових потенціометрів обчислюються за формулами:

$$val_{U15} = \frac{32 \cdot R_{21}}{3125} - \frac{32 \cdot R_{28}}{3125 \cdot K} + 1024$$

$$val_{U16} = \frac{64 \cdot R_{22}}{3125} - \frac{64 \cdot R_{28}}{3125 \cdot L} + 1024$$

Також, додатково передаються значення опорів підстроювальних резисторів ($R_{21} = 5003 \text{ Ом}$, $R_{22} = 2705 \text{ Ом}$), щоб мікроконтролер міг обчислити значення керуючих коефіцієнтів L і K , для їх подальшого відображення на дисплеї.

На плату встановлено OLED-дисплей на контролері SSD1306, діагоналлю 0.91 дюйма, з роздільною здатністю 128 на 32 точки. Дисплей під'єднаний до мікроконтролера по шині I²C, і на даний момент використовується тільки для відображення встановлених значень керуючих коефіцієнтів L і K .

3.3 Стенд для дослідження хаотичної динаміки

Стенд для дослідження хаотичної динаміки (рис. 3.10) складається з складається з:

- комп'ютера з розробленим програмним забезпеченням у середовищі Matlab, що дає змогу встановлювати значення керуючих параметрів генератора хаосу та застосовувати методи ЦОС до його сигналів;
- цифрового LAN осцилографа;
- хаотичного генератора з блоком програмного налаштування значень керуючих параметрів.

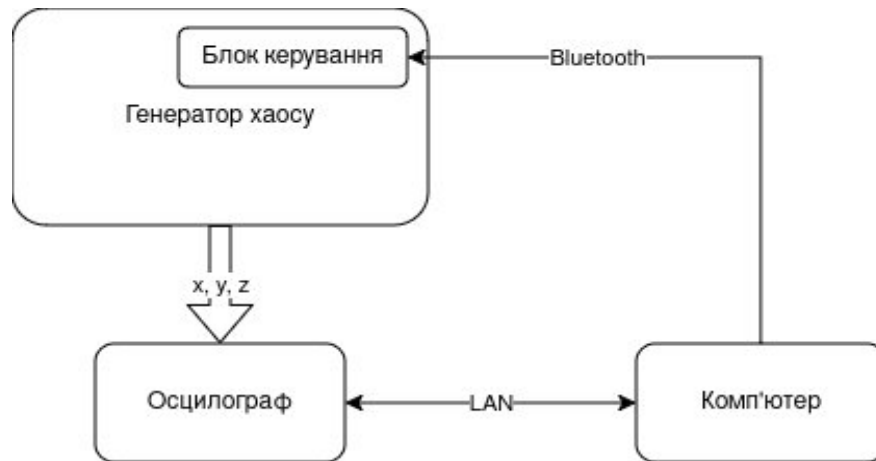


Рисунок 3.10: Функціональна схема стенду

Для дослідження сигналів реального генератора хаосу використано цифровий осцилограф MT4PRO.

- 4 канали зі смугою пропускання 250 КГц;
- 4 канали зі смугою пропускання 1 МГц;
- канал синхронізації;
- апаратні піддіапазони каналу ± 0.1 , ± 0.2 , ± 0.5 , ± 1 , ± 2 , ± 5 , ± 15 , ± 30 , ± 50 , ± 100 , ± 200 і ± 500 В;
- 2 псевдодиференційні входи: 6 — 5, 8 — 7;
- 12-бітний АЦП;
- максимальна частота дискретизації залежить від кількості активних каналів:
 - 1 — 6 МГц;
 - 2 — 3 МГц;
 - 3 — 2 МГц;
 - ≥ 4 — 1 МГц;
 - ≥ 8 — 500 КГц;

Вибір саме цього осцилографа зумовлений його можливістю працювати в режимі самописця та передавати дані з усіх восьми каналів в режимі реального часу через LAN інтерфейс у комп'ютер, що значно спрощує аналіз сигналів генератора хаосу. З огляду на ширину спектру отриманих хаотичних сигналів,

що становить до 6 кГц значення частоти дискретизації осцилографа встановлено на 1 MSa/s що узгоджується з положеннями теореми Котельникова та дозволяє досить точно відтворити згенеровані сигнали.

Під час роботи осцилографа з увімкненими трьома каналами для оцифрування сигналів X, Y, Z генератора хаосу по LAN інтерфейсу генерується трафік у 38 Мбіт/с. Зважаючи, що швидкість LAN з'єднання осцилографа становить 100 Мбіт/с, існує можливість дослідження явищ хаотичної синхронізації, що потребує ще трьох каналів.

По замовчувані осцилограф поставляється з пропрієтарним програмним забезпеченням, яке виконує функцію візуалізації та аналізу сигналів з пристрою. Обмін даними між програмою та пристроєм відбувається через UDP порт 62702. Шляхом зворотної розробки було проаналізовано пакети мережевого трафіку та розроблено власне програмне забезпечення, що дозволяє отримувати дані з осцилографа напряму в Matlab. Ці дії узгоджено з розробниками осцилографа. Таким чином у середовищі Matlab з'явилась можливість у режимі реального часу керувати коефіцієнтами генератора хаосу та відразу ж аналізувати зміни у хаотичних сигналах та застосовувати методи ЦОС до них.

Такий підхід до організації досліджень та створення програмно-апаратного комплексу по суті являє собою стенд по дослідженню хаотичної динаміки, що відкриває широкі можливості до дослідження хаосу і не тільки (рис. 3.11).

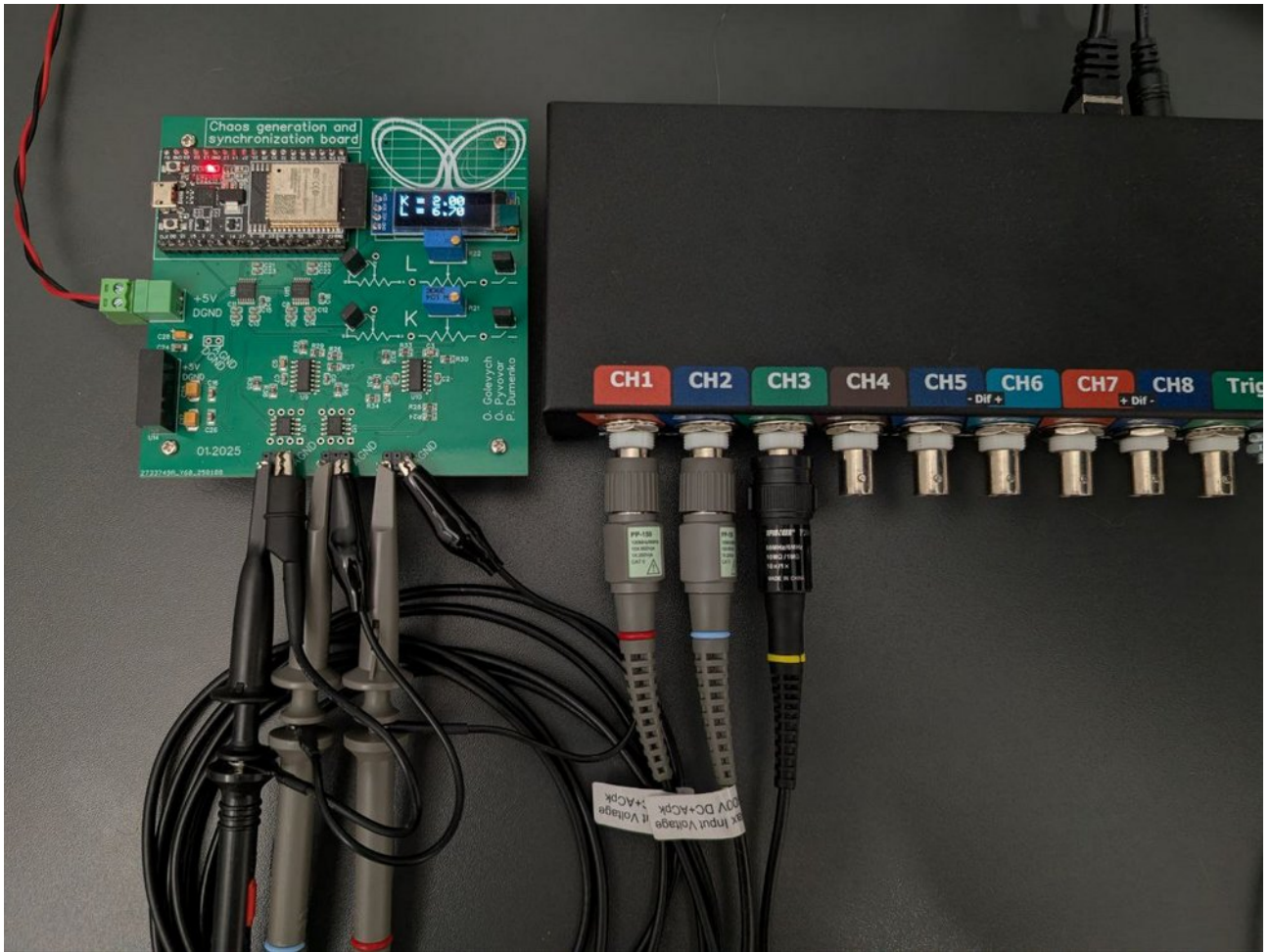


Рисунок 3.11 – Експериментальний стенд по дослідженню хаотичної динаміки

Розроблене програмне забезпечення інтегрує осцилограф у середовище Matlab та являє собою клас методи якого виконують наступні функції:

- пошук та ініціалізація осцилографа;
- визначення розміру дейтаграм;
- обробка таймауту підключення;
- початку та завершення передачі даних;
- вчитування дейтаграм з інформацією з каналів осцилографа;
- перетворення даних з дейтаграм у готові часові ряди кожного з каналів осцилографа.

3.4 Результати відновлення параметрів на реальному генераторі

Через недосконалість ланок АЦП осцилографа сигнали реального генератора хаосу спотворені шумом та потребують фільтрації (рис. 3.12).

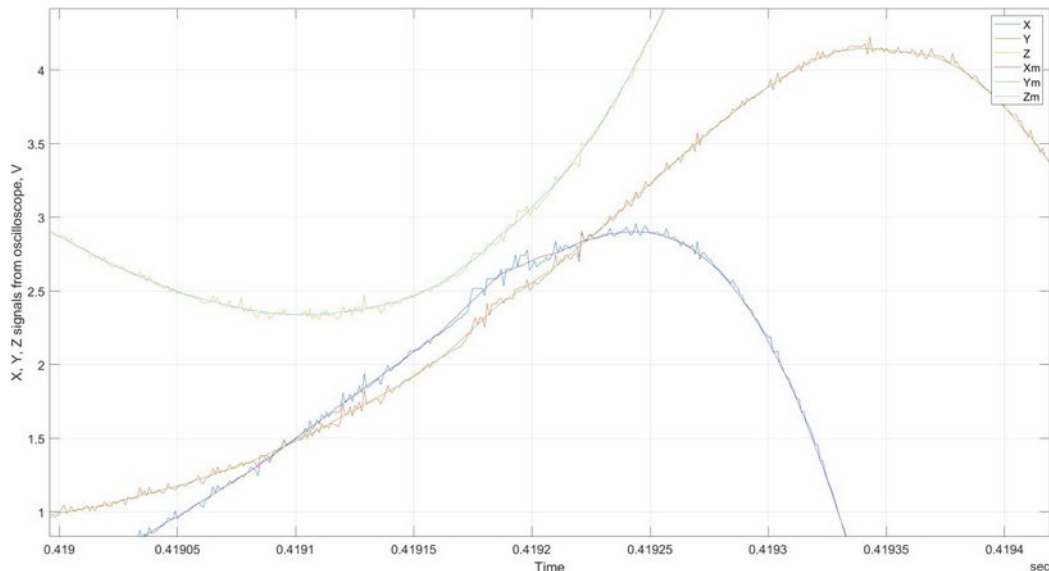


Рисунок 3.12 – Оцифровані сигнали генератора хаосу та їх фільтрація

Експериментальним шляхом встановлено що найкращим співвідношенням швидкодія/якість володіє метод фільтрації рухомого середнього з розміром вікна у 50 вибірок (50 мкс). Таке налаштування фільтра використовується у всіх подальших дослідженнях.

Для дослідження якості роботи методу відновлення керуючих параметрів генератора хаосу у розробленому програмному забезпеченні задано наступні пари коефіцієнтів: $K=2, L=6$ і $K=2, L=6.2$. Очікується, що відновлені по часових рядах значення коефіцієнтів будуть співпадати із заданими з деякою похибкою.

Для забезпечення встановлення пари коефіцієнтів $K=2, L=6$ через bluetooth з'єднання, на плату генератора хаосу відправлено команду для встановлення наступних значень опорів цифрових потенціометрів: $R_{U15} = 49.97$ кОм, $R_{U16} = 6.77$ кОм. А для пари коефіцієнтів $K=2, L=6.2$ — $R_{U15} = 49.97$ кОм, $R_{U16} = 5.14$ кОм відповідно.

До згенерованих таким чином сигналів генератора хаосу далі застосовано запропонований алгоритм відновлення значень керуючих параметрів (рис. 3.13)

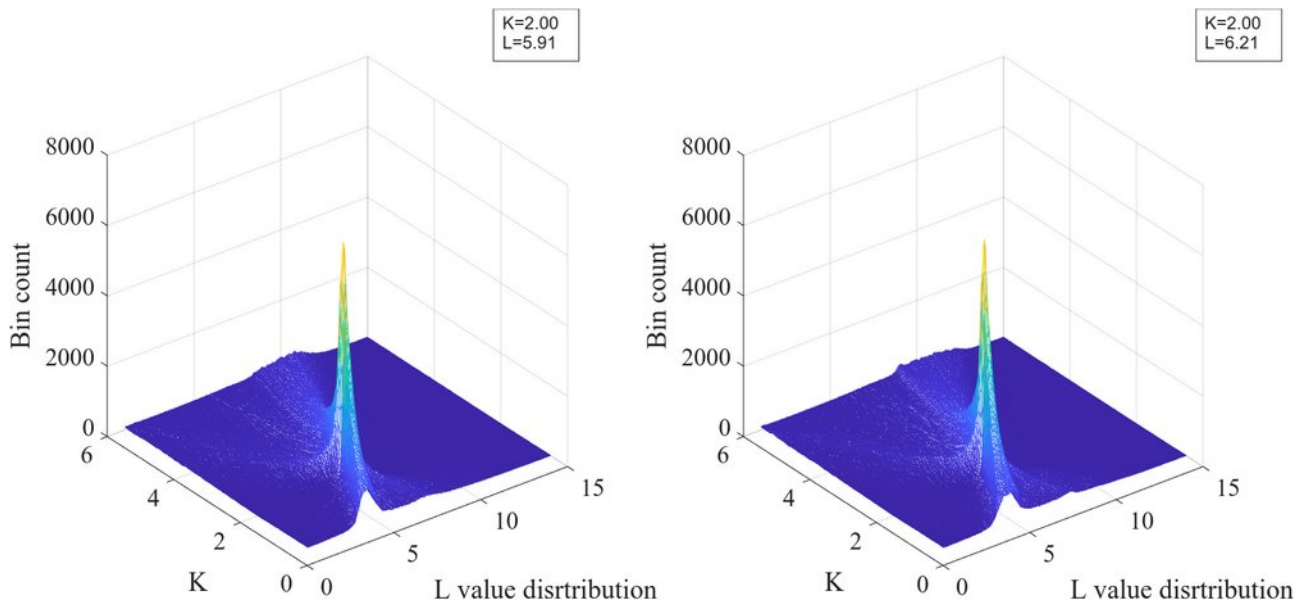


Рисунок 3.13 – Робота алгоритму відновлення керуючих параметрів для двох заданих пар коефіцієнтів

В обох випадках запропонований алгоритм виділив чітку зону, в якій знаходяться шукані параметри та їх значення. Також такий аналіз дозволяє чітко відокремити послідовну зміну значень керуючих параметрів, що відображено на рисунку 3.14 у вигляді двох чітких піків, що по суті можна вважати маркерами бітів передачі інформації.

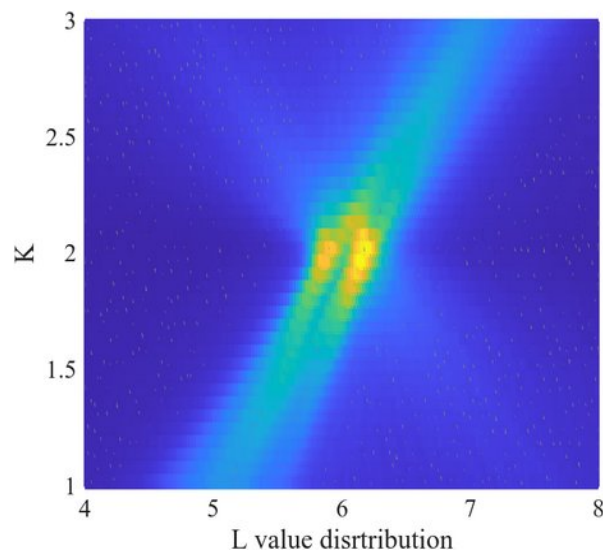


Рисунок 3.14 – Графічна демонстрація визначення обох пар значень керуючих параметрів реального генератора хаосу

3.5 Порівняння з еталонним ідеальним генератором

В ході експерименту зміна значень керуючих параметрів відбувалась з періодом 0.1 секунди. Для більш детального ознайомлення з характером розподілу випадкової величини навколо дійсного значення відновленого керуючого параметру L зображено гістограму 3.15.

Гістограмний аналіз показує що деяка частина відновленого значення сигналу розподілена навколо дійсного значення, що зумовлено наявністю шумів у каналі зв'язку та спотвореннями фільтрації.

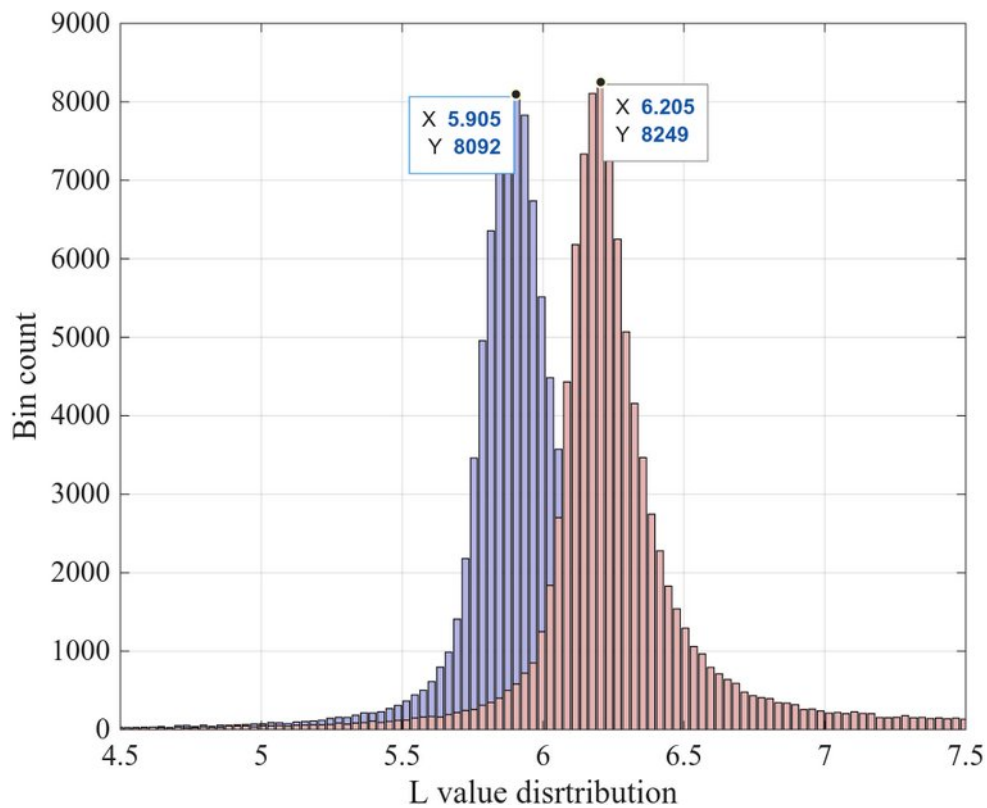


Рисунок 3.15 – Гістограми розподілу значень коефіцієнту L при зміні опору потенціометра

Розпізнавання обох пар значень керуючих параметрів, або як у даному випадку зміни значення параметру L вимагає врахування кількох особливостей, що ведуть до вирішення мінімаксної задачі:

- для забезпечення максимально схожих спектральних та статистичних властивостей передаваного сигналу необхідно забезпечити мінімальну різницю між значеннями керуючих параметрів, що кодують собою біти інформації;
- відстань між сусідніми значеннями керуючих параметрів повинна бути достатньо великою для забезпечення змоги достовірного відновлення значень обох сусідніх параметрів;
- сітка можливих значень керуючих параметрів повинна бути обмежена зонами генерації хаотичних сигналів;
- тривалість сигналу, що передає один біт інформації повинна бути якомога меншою для забезпечення високої швидкості передачі інформації;
- тривалість сигналу повинна бути достатньо великою для ефективного відновлення значення керуючого параметру.

Вирішення цієї задачі потребує комплексного, об'ємного та тривалого дослідження, що виходить за рамки даної роботи та буде проведено у подальшій науковій роботі. Однак, визначення відхилення дійсного значення шуканого керуючого параметру між ідеальним та реальним генераторами хаосу потребує кількісної оцінки (рис. 3.16).

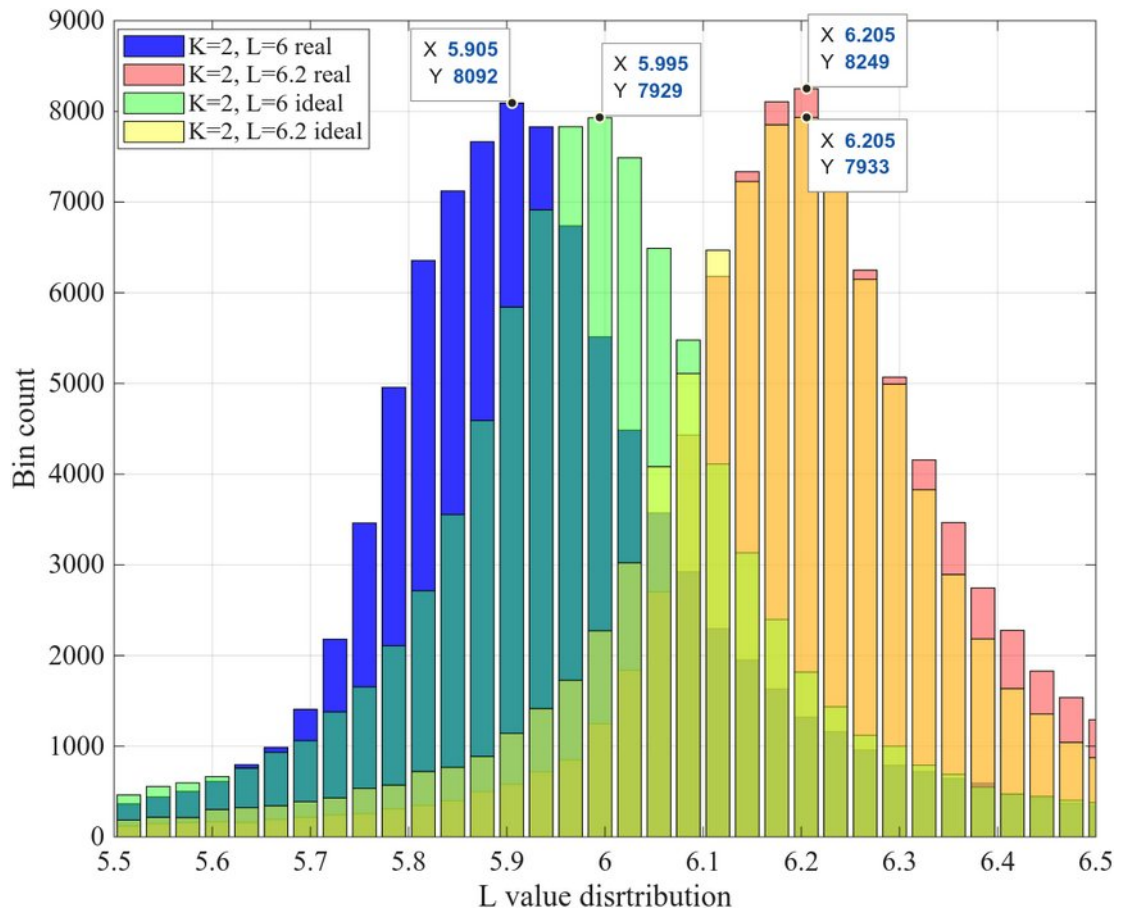


Рисунок 3.16 – Частотне розподілення відновлених значень L реального та ідеального хаотичного генератора

В ході експерименту між ідеальним та реальним генераторами хаосу забезпечено однакові умови генерації хаотичних сигналів, що полягають у однаковій тривалості сигналів (0.1 с), задання однакових керуючих параметрів та підбір шумових характеристик каналів зв'язку (SNR 34 дБ).

Основне відхилення полягає у різниці в ~ 0.1 при визначенні керуючого параметру L реального генератора хаосу при заданому значенні L 6.0. При заданому значенні L 6.2 відхилення визначеного значення від заданого не спостерігається. Це говорить про нелінійну залежність спотворень апаратної реалізації генератора хаосу на його сигнали.

Для верифікації роботи методу відновлення керуючих параметрів аналогічні обчислення були застосовані до сигналів ідеального генератора хаосу у тих самих умовах. Показано, що відновлення значення керуючого параметру

відбувається без суттєвих похибок (менше 0.1%) як для заданого значення $L = 6$, так і для $L = 6.2$ (рис. 3.16). Детальні значення розбіжностей у відновлені значень керуючих параметрів наведено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Оцінка відносного відхилення відновлених значень коефіцієнтів ідеального і реального генераторів хаосу

Пари керуючих параметрів	Реалізація генератора хаосу	
	Ідеальний	Реальний
$K=2$ $L=6$	$\delta_{\%} = \frac{ 6 - 5.995 }{6} \cdot 100\% \approx 0.08\%$	$\delta_{\%} = \frac{ 6 - 5.905 }{6} \cdot 100\% \approx 1.58\%$
$K=2$ $L=6.2$	$\delta_{\%} = \frac{ 6.2 - 6.205 }{6.2} \cdot 100\% \approx 0.08\%$	$\delta_{\%} = \frac{ 6.2 - 6.205 }{6.2} \cdot 100\% \approx 0.08\%$

Запропонований метод відновлення значень заданих керуючих коефіцієнтів показав ефективність як при роботі в ідеальних умовах так і в реальному каналі зв'язку. Показано, що чутливість методу не змінюється в залежності від типу виконання генератора та дозволяє виявити недосконалість апаратної реалізації генератора хаосу разом з достовірним відновленням значень керуючих параметрів.

Висновки до третього розділу

1. Встановлено, що відновлення керуючих параметрів хаотичного генератора в умовах адитивного шуму суттєво ускладнюється деформацією часових рядів і атрактора та накопиченням похибки через високу чутливість хаотичної траєкторії до малих збурень.

2. Запропоновано практичну схему підвищення завадостійкості: попередню фільтрацію рухомим середнім із розміром вікна W_d та робастне узагальнення оцінок параметрів медіанним усередненням на інтервалі

спостереження, що забезпечує майже незміщене відновлення у робочих режимах.

3. Показано нелінійний компроміс «SNR– W_d » і наявність порогу, після якого похибка відновлення різко зростає. За критерієм $|\text{error}| \leq 2\%$ визначено межі достовірного відновлення: для K — SNR ≈ -13 дБ при $W_d \approx 40$ мкс або SNR ≈ -3 дБ при $W_d \approx 10$ мкс; для L — SNR ≈ -18 дБ при $W_d \approx 25$ мкс або SNR ≈ -7 дБ при $W_d \approx 5$ мкс.

4. Границі робочих зон узагальнено однократно експоненціальними моделями, параметри яких оцінено нелінійними МНК: $W_{dK} = 11.796 \cdot e^{-0.1124 \cdot \text{SNR}}$ та $W_{dL} = 2.344 \cdot e^{-0.159 \cdot \text{SNR}}$. Отримані залежності задають однозначне правило адаптивного вибору W_d за оціненим SNR без емпіричного перебору.

5. Реалізовано апаратний прототип з використанням цифрових потенціометрів, керуванням через Bluetooth та OLED-індикацією, і стенд «Matlab–LAN-осцилограф–генератор». На реальному генераторі продемонстровано локалізацію оцінених K і L та детектування зміни параметрів як маркерів бітів. Порівняння з ідеальною моделлю при SNR ≈ 34 дБ виявило апаратно зумовлені нелінійні спотворення (для L = 6.0 відхилення близько 0.1, тобто $\approx 1.58\%$), тоді як для ідеального генератора похибка відновлення не перевищує $\approx 0.1\%$, що підтверджує ефективність підходу у реальному каналі та його придатність для діагностики апаратних відхилень.

У сукупності наведені результати формують основу для адаптивного налаштування приймального тракту та подальших досліджень хаотичної синхронізації й оптимального кодування параметрів.

ВИСНОВКИ

У роботі за результатами виконаних теоретичних і експериментальних досліджень розроблено та обґрунтовано метод відновлення біфуркаційних параметрів хаотичного генератора Ракліджа за його вихідними сигналами з урахуванням реальних похибок і завад.

Розглянуто генератор Ракліджа як тривимірну нелінійну систему з керуючими параметрами K і L , для яких існують області стаціонарних, періодичних і хаотичних режимів; зміна (L, K) впливає на геометрію атрактора та може бути носієм інформації.

Підтверджено, що адитивний шум деформує часові ряди й атрактор та через чутливість хаотичної траєкторії призводить до накопичення похибок. Для підвищення завадостійкості запропоновано попередню фільтрацію рухомим середнім і медіанне усереднення оцінок.

Кількісно встановлено нелінійний компроміс між SNR та розміром вікна фільтра і наявність порогу деградації точності; за критерієм $|\text{error}| \leq 2\%$ визначено межі достовірного відновлення: для K : SNR ≈ -13 дБ при розмірі вікна (W_d) ≈ 40 мкс або SNR ≈ -3 дБ при $W_d \approx 10$ мкс; для L : SNR ≈ -18 дБ при $W_d \approx 25$ мкс або SNR ≈ -7 дБ при $W_d \approx 5$ мкс. Межі узагальнено однокспоненційними моделями $W_{dK} = 11.796 \cdot e^{-0.1124 \cdot \text{SNR}}$ та $W_{dL} = 2.344 \cdot e^{-0.159 \cdot \text{SNR}}$, що задає правило адаптивного вибору W_d за оціненим SNR.

Розроблено алгоритм відновлення значень керуючих коефіцієнтів K та L на основі вихідних часових рядів генератора хаосу. Чисельні експерименти для ідеального генератора показали високу точність методу: відносні похибки оцінювання параметрів не перевищують десятих часток відсотка.

Реалізовано апаратний прототип з використанням цифрових потенціометрів, керуванням через Bluetooth та OLED-індикацією, і стенд «Matlab–LAN-осцилограф–генератор» для зчитування та обробки сигналів. Це забезпечило можливість комплексної верифікації методу на реальних даних.

Порівняння з ідеальною моделлю показало, що метод зберігає високу точність: для ідеального генератора похибка $\lesssim 0.1\%$, а у реальній реалізації може виявляти апаратно зумовлені відхилення (для $L = 6$: $\approx 1.58\%$).

Узагальнюючи результати роботи, можна зробити висновок, що поставлена мета – розробити та експериментально обґрунтувати метод відновлення біфуркаційних параметрів практичної реалізації хаотичного генератора, який забезпечує високу точність, скритність і завадостійкість роботи в умовах реального фізичного каналу зв'язку – досягнута повністю.

Запропонований метод може стати основою для подальших досліджень та експериментів по передачі інформації за допомогою хаотичних сигналів. Також, перспективними напрямками подальших робіт є автоматизоване оцінювання SNR для вибору розміру вікна фільтра та перенесення алгоритму на вбудовані платформи.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ТА ПОСИЛАННЯ

1. E. N. Lorenz, “Deterministic nonperiodic flow,” *J. Atmos. Sci.*, vol. 20, no. 2, pp. 130–141, 1963.
2. Chua, L. O., Komuro, M. & Matsumoto, T. [1986] “The double scroll family,” *IEEE Trans. Circuits Syst. CAS-33*, 1073–1118.
3. L. K. Pecora and J. L. Carroll, “Synchronization in chaotic systems,” *Phy. Rev. Lett.*, vol. 64, pp. 821–824, 1990.
4. Parlitz U, Junge L. Synchronization based parameter estimation from times series. *Phys Rev E* 1996;54:6253–9.
5. Parlitz U. Estimating model parameters from time series by autosynchronization. *Phys Rev Lett* 1996;76:1232–5.
6. Maybhate A, Amritkar RE. Use of synchronization and adaptive control in parameter estimation from a time series. *Phys Rev E* 1999;59:284–93.
7. Alvarez G, Montoya F, Romera M, Pastor G. Cryptanalysis of an ergodic chaotic cipher. *Phys Lett A* 2003;311:172–9.
8. Wu XG, Hu HP, Zhang BL. Parameter estimation only from the symbolic sequences generated by chaos system. *Chaos, Solitons & Fractals* 2004;22(2):359–66.
9. Dai D, Ma XK, Li FC, You Y. An approach of parameter estimation for a chaotic system based on genetic algorithm. *Acta Phys Sinica* 2002;11:2459–62 [in Chinese].
10. Qie He, Ling Wang, Bo Liu, “Parameter estimation for chaotic systems by particle swarm optimization”, *Chaos, Solitons & Fractals* Volume 34, Issue 2, October 2007, Pages 654-661
11. A. Orue, G. Alvarez, M. Romera, G. Pastor, F. Montoya, and S. Li, “Lorenz system parameter determination and application to break the security of two-channel chaotic cryptosystems,” *arXiv:nlin/0606029*, 2006.

- 12.S. Li, G. Alvarez, and G. Chen, "Breaking a chaos-based secure communication scheme designed by an improved modulation method," *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 25, no. 1, pp. 109–120, 2005.
- 13.Z. G. Li, C. Y. Wen, and Y. C. Soh, "Analysis and design of impulsive control systems," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 46, pp. 894–897, June 2001.
- 14.Z. G. Li, C. Y. Wen, Y. C. Soh, and W. X. Xie, "The stabilization and synchronization of Chua's oscillators via impulsive control," *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, vol. 48, pp. 1351–1355, Nov. 2001.
- 15.H. Dedieu and M. J. Ogorzałek, "Identifiability and identification of chaotic systems based on adaptive synchronization," *IEEE Trans. Circuits and Systems I*, vol. 44, no. 10, pp. 948–962, 1997.
- 16.Fostin HB, Woafu P. Adaptive synchronization of a modified and uncertain chaotic van der Pol–Duffing oscillator based on parameter identification. *Chaos, Solitons & Fractals* 2005;24:1363–71.
- 17.Вовчук Д.А. Кореляційні властивості хаотичних символічних послідовностей / Д.А. Вовчук, С.Д. Галюк // Матеріали V Міжнародної молодіжної науково-технічної конференції «РТ-2012». – Севастополь, 2012. – С. 58.
- 18.L.-W. Kong, Y. Weng, B. Glaz, M. Haile, and Y.-C. Lai, Reservoir computing as digital twins for nonlinear dynamical systems, *Chaos* 33, 033111 (2023).
- 19.H. Luo, Y. Du, H. Fan, X. Wang, J. Guo, and X. Wang, Reconstructing bifurcation diagrams of chaotic circuits with reservoir computing, *Phys. Rev. E* 109, 024210 (2024).
- 20.Пивовар О. С., Голевич О. Б., Каменяр, М. Синтез критерію рівня синхронізму в хаотичній системі зв'язку із допоміжним генератором // Вісник ХНУ. - 2024. - №6 – С.440-446.
- 21.Saha P, Banerjee S, Chowdhury AR. Chaos, signal communication and parameter estimation. *Phys Lett A* 2004;326:133–9.

- 22.L. De la Fraga, E. Torres-Pérez, E. Tlelo-Cuautle, and C. Mancillas-López, "Hardware implementation of pseudo-random number generators based on chaotic maps," *Nonlinear Dyn.*, vol. 90, pp. 1661–1670, Nov. 2017.
- 23.Tsay S.C. Implementation of bidirectional chaotic communication systems based on Lorenz circuits / Shuh-Chuan Tsay, Chuan-Kuei Huang, DongLiang Qiu, Wan-Tai Chen // *Chaos, Solitons and Fractals.* – 2004. – Vol. 20. – P. 567 – 579.
- 24.Karimov T, Butusov D, Andreev V, Karimov A, Tutueva A. Accurate Synchronization of Digital and Analog Chaotic Systems by Parameters Re-Identification. *Electronics.* 2018; 7(7):123. <https://doi.org/10.3390/electronics7070123>
- 25.Vovchuk D.A. Experimental Research of the Process of Masking of Digital Information Signals Using Chaotic Oscillations / D.A. Vovchuk, L.F. Politanskii, S.D. Galiuk // *Eastern European Scientific Journal.*- 2014. - №3. – P. 245-253.
- 26.Golevykh.O, Pyvovar. O. Dumenko.P "Synchronization of non-linear dynamic systems under the conditions of noise action in the channel", *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences Открытый доступ* Volume 55, Issue 3, 1 June 2018, Pages 70-76 DOI: <https://doi.org/10.2478/lpts-2018-0023>.
- 27.Argyris A, Syvridis D, Larger L, et al. Chaos-based communications at high bit rates using commercial fibre-optic links. *Nature.* 2005;438(7066):343-346. <https://doi.org/doi:10.1038/nature04275>
- 28.Zhongyang Wang, Lei Shen, Min Yang, Ziyi Tang, Lei Zhang, Changkun Yan, Liubo Yang, Ruichun Wang, Jun Chu, Jing Du, and Jian Wang, "High-speed chaos-based secure optical communications over 130-km multi-core fiber," *Opt. Lett.* 48, 4440-4443 (2023). <https://doi.org/10.1364/OL.495619>
- 29.Du J, Wang Y, Fei C, et al. Experimental demonstration of 50-m/5-Gbps underwater optical wireless communication with low-complexity chaotic encryption. *Opt Express.* 2021;29(2):783-796. doi:10.1364/OE.416117

30. Zaminga, S., Martinez, A., Huang, H. et al. Optical chaotic signal recovery in turbulent environments using a programmable optical processor. *Light Sci Appl* 14, 131 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41377-025-01784-3>
31. Yang Y, Chen C, Zhang W, et al. Secure and private NOMA VLC using OFDM with two-level chaotic encryption. *Opt Express*. 2018;26(26):34031-34042. doi:10.1364/OE.26.034031
32. Mahmud, N., MacGillivray, A., Rai, A. et al. Combining quantum key distribution with chaotic systems for free-space optical communications. *Quantum Inf Process* 20, 354 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11128-021-03299-3>
33. Whitney, D. A. *Wireless Communication Demonstration in Hardware Using an Exactly Solvable Chaotic System*. Auburn University. 2019.
34. Dmitriev, A.S., Efremova, E.V., Itskov, V.V. et al. Direct Chaotic Ultra-Wideband Wireless Communications in the Very High Frequency and Ultra High Frequency Radio Bands. *J. Commun. Technol. Electron.* 67, 1013–1021 (2022). <https://doi.org/10.1134/S1064226922080046>
35. Kaddoum, G., Olivain, J., Samson, G. B., Giard, P., Gagnon, F. Implementation of a Differential Chaos Shift Keying Communication system in GNU Radio. *International Symposium on Wireless Communication Systems*. 2012. №9. DOI: 10.1109/ISWCS.2012.6328505
36. Altus Metrum, «ChaosKey». URL: <http://altusmetrum.org/ChaosKey>
37. Cryptic Vector LLC, Low SWaP Tactical Ultra-Secure Communications System. URL: https://swx-project-prod.s3.amazonaws.com/CPO_55_SBIR_22_1_Phase_I_Cryptic_Vector_FINAL_Transition_Quad.pdf
38. Chong, Chia-Chin & Yong, Su & Lee, Seong. (2005). UWB Direct Chaotic Communication Technology. *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*. 4. 316 - 319. DOI: 10.1109/LAWP.2005.855632.
39. Methods and systems for transceiving chaotic signals пат. US7593531B2 США; заявл. 07.05.2004; опубл. 22.09.2009.

40. Mossayebi, F., Qammar, H. K., & Hartley, T. T. Adaptive estimation and synchronization of chaotic systems. *Physics Letters A*. 1991. №161. С. 255-262. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(91\)90013-X](https://doi.org/10.1016/0375-9601(91)90013-X)
41. Baake, E., Baake, M., Bock, H. G., & Briggs, K. M. Fitting ordinary differential equations to chaotic data. *Physical Review A*. №45. С. 5524-5529. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.45.5524>
42. Parlitz, U. Estimating model parameters from time series by autosynchronization. *Physical Review Letters*. 1996. №76. С. 1232-1235. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.76.1232>
43. Zhang, Y., Tao, C., & Jiang, J. J. Theoretical and experimental studies of parameter estimation based on chaos feedback synchronization. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Dynamics*. 2006. №16. ID 043122. <https://doi.org/10.1063/1.2404356>
44. Прикладне застосування теорії хаотичних систем у телекомунікаціях : монографія / Ю. Я. Бобало, С. Д. Галюк, М. М. Климаш, Р. Л. Політанський; Міністерство освіти і науки України, Національний університет "Львівська політехніка". – Львів; Дрогобич : Коло, 2015. – 184 с.
45. Pyvovar, O.S., Polikarovskiykh, O.I. A System of Secure Communication with Chaos Masking Based on Rucklidge Generators, 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2018 - Proceedings DOI: 10.1109/ELNANO.2018.8477566.
46. Xu, J.W., Wei, M., Zhang, L. et al. Chaotic information metasurface for direct physical-layer secure communication. *Nat Commun* 16, 5853 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41467-025-60725-1>
47. Rucklidge, A.M. Chaos in models of double convection. *Journal of Fluid Mechanics*. 1992. №237. С. 209-229. <https://doi.org/10.1017/S0022112092003392>

ДОДАТОК А

АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НА КОНФЕРЕНЦІЇ

Міністерство освіти і науки України
Хмельницький національний університет



ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
за матеріалами XVII Всеукраїнської науково-практичної конференції
«Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2025»

14-15 листопада 2025

Хмельницький 2025

УДК 004:37:001:62

Збірник наукових праць за матеріалами XVII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2025». Хмельницький. 2025. 500с.

У збірнику наукових праць подані перспективні практичні розробки аспірантів, студентів та здобувачів в області сучасних інформаційних технологій. Розглянуто актуальні проблеми комп'ютерних наук, комп'ютерної інженерії, прикладної математики й інженерії програмного забезпечення, приведено ряд робіт по впровадженню інформаційних технологій у виробництво та управління. Висвітлено перспективні розробки сучасних систем пошуку, обробки й захисту інформації, медійних та комунікаційних системи.

УДК 004:37:001:62

Матеріали конференції відтворені з авторських оригіналів, друкуються в авторській редакції та наведені в алфавітному порядку прізвищ авторів. При макетуванні можливі незначні зміни компоновки контенту авторських оригіналів. Відповідальність за якість та зміст публікацій несе автор.

Участь у конференції та складові всіх її етапів (розгляд праць, перевірка на плагіат, макетування, публікація збірника наукових праць та видача сертифікатів) є безкоштовними для всіх учасників. Оргкомітет конференції висловлює подяку учасникам конференції та сподівається на подальшу співпрацю.

З питань проведення конференції та подальшого обміну інформацією звертатись на e-mail конференції: apkt.khnu@gmail.com

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ КОМП'ЮТЕРНИХ НАУК - 2025

XVII Всеукраїнська науково-практична конференція

Метою конференції є висвітлення актуальних проблем комп'ютерних наук, інформатики та інформаційних технологій.

Робочі мови конференції:

українська, англійська

СЕКЦІЇ КОНФЕРЕНЦІЇ:

1. Комп'ютерні науки, штучний інтелект та прикладні інформаційні технології.
2. Комп'ютерна інженерія та системи захисту інформації.
3. Математичне моделювання та інженерія програмного забезпечення
4. Телерадіокомунікації, медійні та комунікаційні системи.
5. Проблеми впровадження інформаційних технологій у виробництво та управління.

СПИСОК ОРГАНІЗАЦІЙ,

**ПРЕДСТАВНИКИ ЯКИХ БРАЛИ УЧАСТЬ У РОБОТІ
КОНФЕРЕНЦІЇ:**

Донбаська державна машинобудівна академія
Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України
Кам'янський енергетичний фаховий коледж
Київський національний університет імені Т. Г. Шевченка
Національного аерокосмічного університету імені М. С. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
Сумський державний університет
Харківський національний університет радіоелектроніки
Хмельницький національний університет
Хмельницький фаховий економіко-технологічний коледж УЕП

ОРГКОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ:

СИНЮК О. М. – голова оргкомітету, проректор Хмельницького національного університету з наукової роботи, доктор технічних наук, професор.

ГОВОРУЩЕНКО Т. О. – заступник голови оргкомітету, декан факультету інформаційних технологій Хмельницького національного університету, доктор технічних наук, професор.

БАРМАК О. В. – заступник голови оргкомітету, завідувач кафедри комп'ютерних наук Хмельницького національного університету, доктор технічних наук, професор.

САВЕНКО О. С. – професор кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем Хмельницького національного університету, доктор технічних наук, професор.

ВИСОЦЬКА О. В. – завідувач кафедри радіоелектронних та біомедичних комп'ютеризованих засобів і технологій Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», доктор технічних наук, професор.

ЛАВРОВ Є. А. – доктор технічних наук, професор (Сумський державний університет).

ТИМОФЄЄВА Л. В. – відповідальна за студентську науково-дослідну роботу ХНУ.

МАЗУРЕЦЬ О. В. – секретар конференції, доцент кафедри комп'ютерних наук Хмельницького національного університету, кандидат технічних наук, доцент.

МОЛЧАНОВА М. О. – секретар конференції, старший викладач кафедри комп'ютерних наук Хмельницького національного університету, доктор філософії з комп'ютерних наук.

КОНТАКТНА ІНФОРМАЦІЯ:

e-mail для листування: apkt.khnu@gmail.com

Павлова О.О., Погорслов Д.В. Інтелектуальна інформаційна система рекомендацій у середовищі онлайн-навчання	335
Павлова О.О., Слободзян Р.О. Порівняльний аналіз AWS, Microsoft Azure та Google Cloud для роботи Docker-оркестрованих Node.js API у регіонах, найближчих до України.....	337
Папка С.Ф., Праворська Н.І. Веб-застосунок для персонального обліку фінансів.....	339
Повстенко Р.О. Технології розробки інформаційних систем	343
Приймак М.О., Праворська Н.І. Інтерактивна веб-система для підбору кінотворів на основі стану користувача «MOVI.FLOW ER».....	346
П'явкін В.О., Лисенко С.М. Метод та інформаційна система виявлення підозрілих об'єктів у громадських місцях	350
Разовий О.О., Пивовар О.С., Голевич О.Б. Модель системної завади для багатоканальних хаотичних систем передачі даних.....	354
Ратушняк М.В., Рябчук І.С, Муляр І.В. Аналіз управління ресурсами кіберзахисту в умовах невизначеності та асиметрії інформації шляхом адаптивної пріоритизації заходів захисту	358
Рибак А.М., Лисенко С.М, Лисенко Н.С. Абстрактна модель віртуальної реальності	361
Рисований О.М. Розробка алгоритму отримання псевдовипадкової послідовності на основі реєстру зсуву	365
Романов Б.А., Бармак О.В., Багрій Р.О., Скрипник Т.К. Метод класифікації програмних вимог з використанням великих мовних моделей (LLM)	368
Савчук В.В., Гартрамф М.С., Шкрібета В.С., Муляр І.В. Метод захисту вебзастосунків на основі інтелектуального аналізу трафіку	373

УДК 621.391.1, 621.391.8

Разовий О.О., Пивовар О.С., Голевич О.Б.

Хмельницький національний університет

МОДЕЛЬ СИСТЕМОЇ ЗАВАДИ ДЛЯ БАГАТОКАНАЛЬНИХ ХАОТИЧНИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ

Запропоновано Simulink модель системної завади для дослідження завадостійкості систем зв'язку із використанням сигналів детермінованого хаосу в структурі цифрової передачі даних із детектуванням хаотичних режимів на основі допоміжного генератора.

A Simulink-based interference source model is proposed for evaluating the robustness of multi-channel data transmission systems that use deterministic chaotic signals. The work targets communication schemes in which each channel transmits a chaotic waveform generated by a nonlinear dynamic system (the Rucklidge system) with distinct bifurcation parameters, and the receiver performs nonlinear detection of the active chaotic regime. The model reproduces realistic "system interference," i.e. structured in-band interference generated by other active channels rather than by natural additive noise.

Щільне заповнення радіочастотного спектра випромінювачами створює перехресні завади та ускладнює забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС). У багатоканальних і багатокористувацьких системах рівень взаємних завад між каналами часто перевищує рівень природних шумів. Такі завади мають структуру сигналу і не придушуються стандартними часовими, частотними, просторовими або поляризаційними методами фільтрації. Це вимагає нетрадиційних методів підвищення стійкості каналу зв'язку. Одним із перспективних напрямів є використання сигналів детермінованого хаосу та нелінійної обробки на приймальній стороні.

Традиційне застосування систем часової, частотної, просторової та поляризаційної фільтрації не призводить до пригнічення таких системних завад (СЗ) через те, що їх форма подібна до форми сигналу. Для роботи в таких умовах слід застосовувати нетрадиційні підходи до забезпечення стійкості передачі даних. Перспективними в цьому аспекті є застосування сигналів детермінованого хаосу (СДХ) та нелінійного способу їх обробки в приймальних трактах багатоканальної системи зв'язку [1].

Метою роботи є розробка відтворюваної моделі джерела системної завади для багатоканальної системи передачі даних на основі хаотичних сигналів нелінійної динамічної системи типу Rucklidge.

Основними вимогами, виходячи із визначення системної завади та умов її взаємодії із сигналом, є: наближеність форми та спектру сигналу завади до СДХ, що діє в системі; статистичний характер гаусівського процесу, що враховує сукупну дію багатьох СДХ сусідніх каналів; стабілізація рівня суміші корисного сигналу та СЗ та відсутність точок розриву для можливості неперервної нелінійної обробки.

Відповідно цим вимогам розроблена Simulink модель (рис.1) що дозволила провести синтез параметрів Simulink-блоків для створення системної завади хаотичним каналам зв'язку на базі нелінійної динамічної системи (НДС) Rucklidge [2-4].

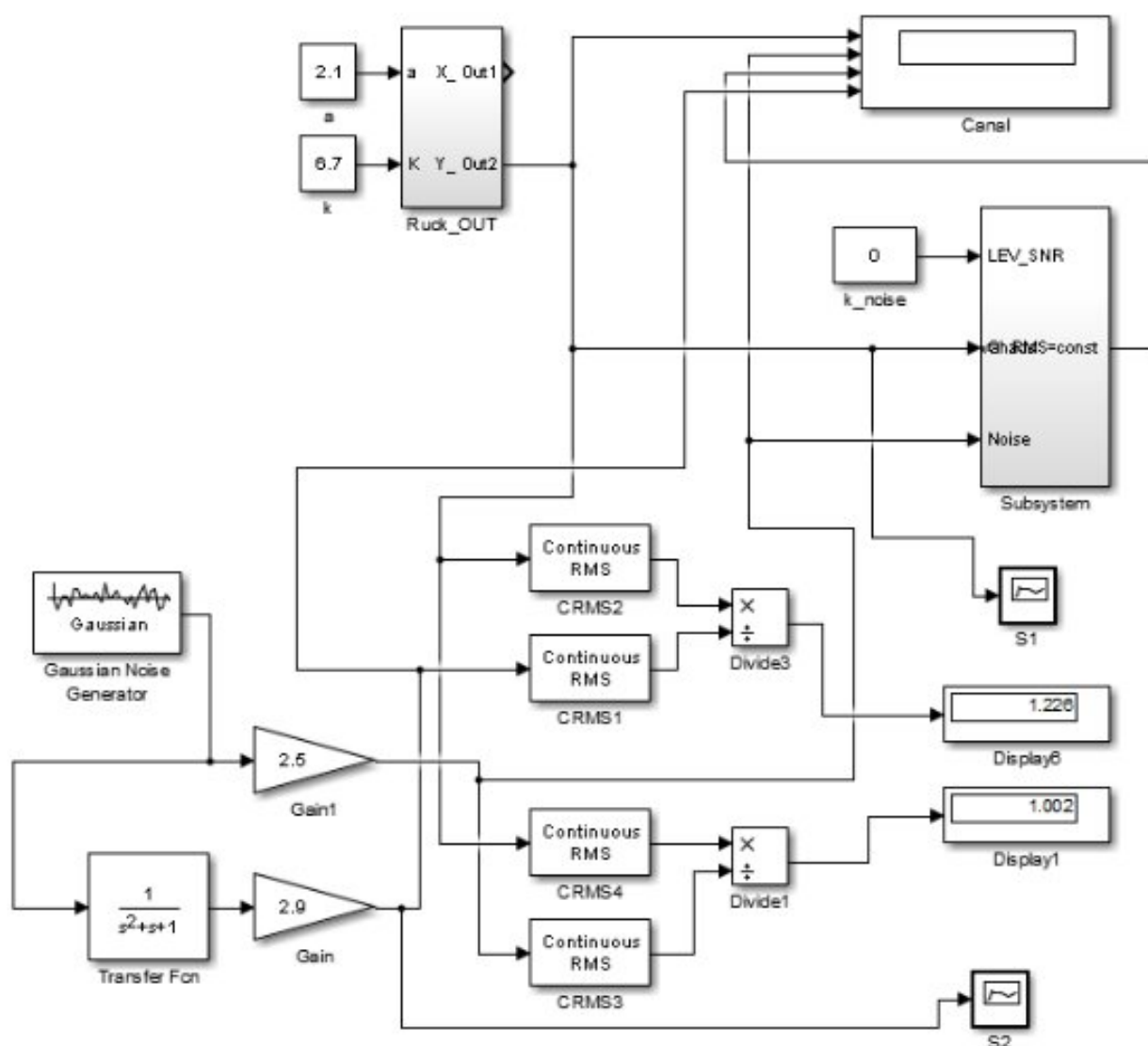


Рисунок 1 – Імітаційна модель системних завад

Модель складається із НДС Rucklidge [3] із певними параметрами біфуркації, гаусівського генератора випадкових чисел із системним фільтром другого порядку та блоків візуалізації. Проблема синтезу саме системної завади полягає в узгодженні дискретного потоку даних гаусівського генератора із аналоговими результатами генерації СДХ моделлю НДС Rucklidge через оптимальних вибір їх параметрів налаштувань.

Через дискретний характер сигналу генератора завод запропоновано для забезпечення плавної зміни сигналу в зоні зміни застосувати інтегруючий елемент у вигляді фільтра низької частоти (ФНЧ) із характеристикою ланки подвійного інтегрування:

$$K(s) = \frac{1}{as^2 + bs + c}, \quad (1)$$

де $s = j\omega$ - комплексна частота.

Регулюванням параметрів (1) можливо обробити дискретизований та квантований сигнал генератора випадкових чисел (рис.1) таким чином, щоб отримати коливання максимально наближене по формі та структурі із хаотичним коливанням (рис.2). Шляхом моделювання встановлено, що найбільш оптимальним є фільтр із параметрами $a, b = 1$. Таке узгодження виключає розриви сигналу і забезпечує коректну подальшу нелінійну обробку в приймачі.

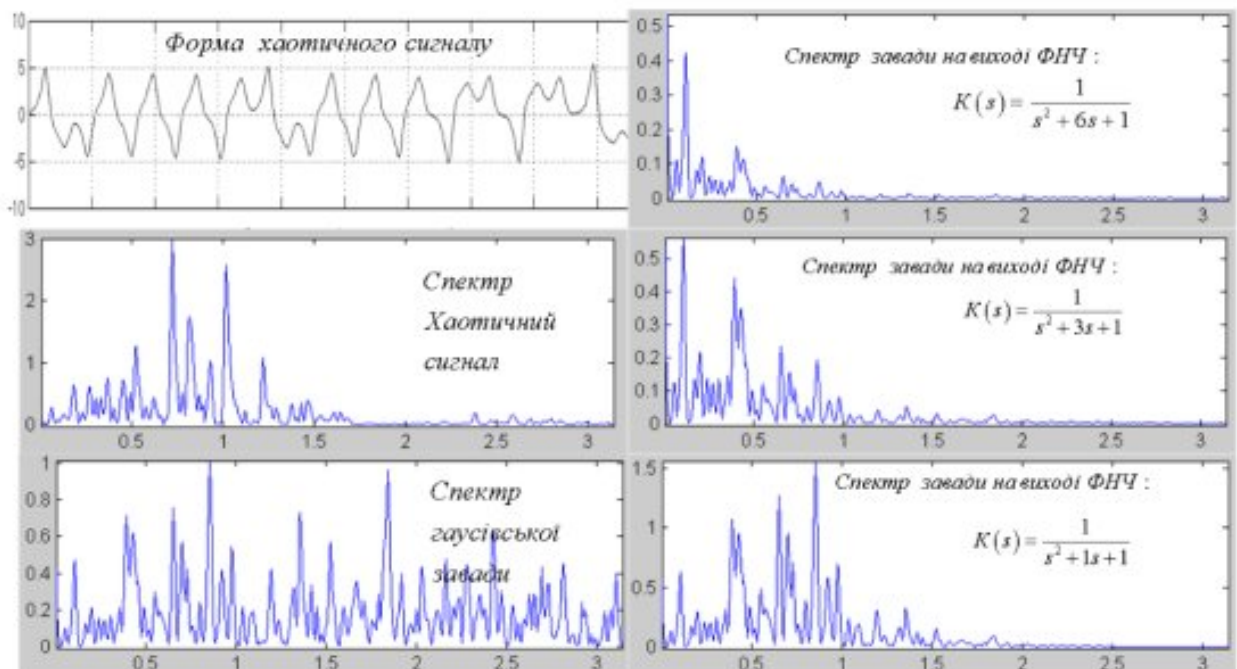


Рисунок 2 – Форма та спектри завади після обробки ФНЧ для досягнення заданих властивостей системної завади для систем передачі на базі НДС Rucklidge

Таким чином, під час досліджень оптимізовано параметр Simulink-блоку гаусівський завад як «Sample time» = 1 та параметри формуючого фільтру таким чином, щоб форма, структура та спектр відповідали СДХ в НДС Rucklidge.

Модель дозволяє згенерувати заваду, яка відтворює як часову форму, так і спектральні властивості корисного каналу. При цьому система зберігає коректне детектування активного хаотичного режиму за відношення сигнал/завада приблизно 10 дБ. Це підтверджує можливість роботи багатоканальної хаотичної лінії зв'язку в умовах сильної внутрішньосистемної взаємодії каналів.

Сформована Simulink-модель може бути використана як еталон при побудові апаратного генератора системних завад для лабораторних випробувань стійкості та ЕМС хаотичних каналів зв'язку на базі НДС Rucklidge.

Перелік посилань

1. Прикладне застосування теорії хаотичних систем у телекомунікаціях : монографія / Ю. Я. Бобало, С. Д. Галюк, М. М. Климаш, Р. Л. Політанський; Міністерство освіти і науки України, Національний університет "Львівська політехніка". – Львів; Дрогобич : Коло, 2015. – 184 с.
2. Golevykh.O, Pyvovar. O. Dumenko.P "Synchronization of non-linear dynamic systems under the conditions of noise action in the channel", Latvian Journal of Physics and Technical Sciences Открытый доступ Volume 55, Issue 3, 1 June 2018, Pages 70-76 DOI: <https://doi.org/10.2478/lpts-2018-0023>
3. Pyvovar, O.S., Polikarovskiykh, O.I. A System of Secure Communication with Chaos Masking Based on Rucklidge Generators, 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2018 - Proceedings DOI: 10.1109/ELNANO.2018.8477566.
4. Boccaletti S. The synchronization of chaotic systems / S. Boccaletti, J. Kurths, G. Osipov, D. L. Valladares, and C. S. Zhou // Physics Report. – 2002. – Vol. 366. – № 1–2. – P. 1–101.

ДОДАТОК Б

АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ У НАУКОВОМУ ЖУРНАЛІ

Міжнародний науково-технічний журнал
«Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах»

ISSN 2219-9365

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-84-23>
УДК 621.391.1, 621.391.8

РАЗОВИЙ Олександр
Хмельницький національний університет
<https://orcid.org/0009-0002-4708-7820>
e-mail: razovyioo@khmnu.edu.ua
ПИВОВАР Олег
Хмельницький національний університет
<https://orcid.org/0000-0002-4041-1248>
e-mail: pyvovarov@khmnu.edu.ua
ГОЛЕВИЧ Олег
Хмельницький національний університет
<https://orcid.org/0009-0001-2987-6722>
e-mail: digasgo@gmail.com

МЕТОД ВІДНОВЛЕННЯ КЕРУЮЧИХ ПАРАМЕТРІВ ХАОТИЧНОГО ГЕНЕРАТОРА ЗА УМОВИ ДІЇ ЗАВАД В КАНАЛІ ЗВ'ЯЗКУ

У статті розглянуто задачу відновлення керуючих параметрів хаотичного генератора Ракліджа в умовах дії адитивних завад у каналі зв'язку. Досліджено вплив співвідношення сигнал/шум (SNR) та ступеня згладжування прийнятого сигналу на точність оцінювання параметрів системи. Показано, що існує оптимальна комбінація рівня шуму та сили фільтрації, за якої забезпечується найменша похибка відновлення. Виведено характеристичні залежності між часом усереднення та співвідношенням сигнал/шум у каналі зв'язку.

Ключові слова: хаотичний генератор Ракліджа, керуючі параметри генератора хаосу, адитивний шум у каналі зв'язку, співвідношення сигнал/шум (SNR), рухоме середнє, відновлення параметрів за часовими рядами, однократно експоненціальна апроксимація, завадостійкі системи зв'язку.

RAZOVYI Oleksandr, PYVOVAR Oleh, GOLEVYCH Oleg
Khmelnyskyi National University

METHOD FOR RECOVERING CONTROL PARAMETERS OF A CHAOTIC GENERATOR UNDER ADDITIVE NOISE IN THE COMMUNICATION CHANNEL

This paper addresses the problem of reliable recovery of control parameters of a chaotic generator operating under additive noise in a communication channel. Accurate estimation of such parameters is a key requirement for chaos-based communication systems, where information can be encoded in the values of system parameters rather than in the waveform itself. In noisy channels, however, the chaotic signal and its attractor are significantly distorted, which makes direct parameter estimation from observed time series a challenging task.

The study focuses on the Rucklidge chaotic generator, chosen due to its well-known properties and suitability for analytical and numerical analysis. The influence of additive noise intensity, expressed through the signal-to-noise ratio (SNR), and the duration of moving average smoothing applied to the received signal on the accuracy of parameter recovery is systematically investigated. An analytical approach is combined with numerical simulation to derive instantaneous estimates of the generator control parameters, which are then statistically processed using median averaging over finite observation intervals.

The results demonstrate that parameter estimation errors exhibit a nonlinear dependence on both SNR and the smoothing window duration. For each control parameter, there exists an optimal combination of noise level and averaging window that minimizes the recovery error. Based on extensive numerical experiments, regions of reliable parameter recovery are identified using a $\pm 2\%$ relative error criterion. These regions define practical operating limits for chaos-based communication systems in the presence of additive noise.

Furthermore, the obtained boundary data are approximated using single-exponential models that describe the relationship between the required averaging window duration and SNR. The resulting analytical expressions provide a compact and practical tool for adaptive receiver design, allowing the smoothing parameters to be dynamically adjusted according to the current noise conditions in the channel. This enables a favorable trade-off between noise robustness and information transmission speed.

The proposed method enhances the feasibility of parameter-based chaotic modulation schemes and can be extended to other classes of chaotic generators and more complex channel models, making it relevant for the development of secure and noise-robust communication systems.

Keywords: Rucklidge chaotic generator, control parameters of chaotic generator, additive noise in the communication channel, signal-to-noise ratio (SNR), moving average filtering, parameter recovery from time series, single-exponential fitting, noise-robust communication systems

Стаття надійшла до редакції / Received 30.09.2025
Прийнята до друку / Accepted 22.08.2025

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Однією з важливих наукових задач є забезпечення надійного відновлення керуючих параметрів хаотичного генератора на прийомальному боці, особливо в умовах дії шумів у каналі зв'язку. Від точності

цього відновлення залежить можливість коректного декодування інформації та швидкості передачі інформації, що робить задачу актуальною як для розвитку теорії хаотичних систем зв'язку, так і для практичних застосувань у галузі захищених телекомунікацій.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Використання хаотичних генераторів та хаотичних сигналів знаходить застосування у сучасних системах зв'язку, як в експериментальних/лабораторних пристроях, так і в комерційних системах. Серед лабораторних хаотичних систем зв'язку можна відзначити оптоволоконні системи[1,2], системи з хаотичним шифруванням[3], оптичні системи[4-6], радіо системи[7,8]. У всіх системах зв'язку демонструється висока швидкість передачі інформації (1 – 64Гбіт/с) та велика дальність передачі, до 130 км, в залежності від умов та типу каналу зв'язку. Також існують сучасні комерційні системи, що використовують генератори хаосу: GNU Radio «gr-chaos» (2012) – програмний модуль для реалізації хаотичних модуляцій DCSK для SDR[9]; ChaosKey (Altus Metrum, 2016) – апаратний USB-генератор випадкових чисел на основі хаотичного джерела сигналів[10]; Chaotic Sequence Spread-Spectrum (CSSS) – сімейство LPI/LPD-хвильових форм для малопотенційного захищеного зв'язку (розроблено Cryptic Vector під DARPA/SOCOM, 2020)[11]; UWB Direct Chaotic Communication (Samsung/IRE, 2004) – радіосистема надширококутвого зв'язку з прямою хаотичною модуляцією[12]; цифровий хаотичний модем (Harris Corp., патент US7593531B2, 2004)[13]; використання генераторів псевдовипадкових кодів на основі хаотичного відображення tent map для складання спредінг-последовностей GNSS (патент WO2008065191A1, 2008)[14]; Хаотична метаповерхня (Пекінський університет) – програмована рефлекторна поверхня управління радіохвилями та FPGA-генератор хаосу (2025)[15].

Забезпечення достовірного відновлення таких керуючих параметрів на приймальному боці за наявності шумів у каналі зв'язку залишається відкритою проблемою. Дія адитивного шуму спотворює хаотичний сигнал та відповідний атрактор системи, суттєво ускладнюючи пряму оцінку параметрів з отриманого часового ряду. Властива хаотичним системам чутливість до початкових умов призводить до того, що навіть невеликі завади можуть викликати значні відхилення траєкторії та накопичення похибки при оцінюванні параметрів. Більшість існуючих методів відновлення параметрів (синхронізація, спостереження по одному виходу, багатопараметровий аналіз ряду, прямий підгін диференціальних рівнянь, машинне навчання [16-26]) розроблені переважно для ідеальних умов і не гарантують надійного результату у реальному зашумленому каналі. Таким чином, практичне завдання оцінювання параметрів генератора хаосу при наявності шуму досі пов'язане зі значними труднощами і вимагає вдосконалених підходів.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Для розв'язання зазначеної проблеми у роботі запропоновано метод, що поєднує аналітичний розрахунок параметрів, згладжування сигналу та статистичне усереднення оцінок. Метою дослідження є виявлення умов у каналі зв'язку, за яких можливе достовірне відтворення керуючих параметрів генератора хаосу за його часовими рядами.

У даній роботі як об'єкт аналізу обрано хаотичний генератор Ракліджа [27] завдяки його властивостям, що роблять його зручним для моделювання та теоретичного дослідження. Генератор Ракліджа демонструє класичний детермінований хаос і характеризується наявністю двох керуючих параметрів (L та K), які легко змінювати та які суттєво впливають на форму атрактора і спектральний склад вихідних сигналів.

Хаотичний генератор Ракліджа представлений у вигляді системи диференціальних рівнянь (1), де: x , y , z – вихідні сигнали генератора; K – константа, що відповідає за лінійне загасання (зі збільшенням пригнічує коливання); L – константа, що відповідає за лінійне підсилення (зі збільшенням посилює коливання). Зміна цих параметрів впливає на геометрію атрактора і спектральні властивості сигналів $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$. Отже пара (L, K) може виступати носієм символу інформації, аналогічно до положення точки у двовимірному сузір'ї цифрової модуляції.

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -Kx + Ly - yz; \\ \frac{dy}{dt} = x; \\ \frac{dz}{dt} = -z + y^2; \end{cases} \quad (1)$$

Для ітеративного вирішення в системі Matlab, рівняння генератора Ракліджа були записані і вирішені у різнищевій формі (2), використовуючи явний метод Ейлера. Для зменшення накопичення похибки розходження траєкторій обрано малий крок інтегрування $dt = 0.005$ с. В ході експерименту, в систему рівнянь (2) підставлено значення $L=2.1$, $K=6.7$.

$$\begin{cases} x(n+1)=x(n)+dt \cdot (-K \cdot x(n) \cdot L \cdot y(n)-y(n) \cdot z(n)); \\ y(n+1)=y(n)+dt \cdot x(n); \\ z(n+1)=z(n)+dt \cdot (-z(n)+y(n)^2) \end{cases} \quad (2)$$

Для відновлення коефіцієнтів L і K, з системи рівнянь у різницевій формі (2) виражено їх значення (3, 4).

$$L(n)=\frac{x(n+1)}{dt \cdot y(n)}-\frac{x(n)}{dt \cdot y(n)}+\frac{K \cdot x(n)}{y(n)}+z(n) \quad (3)$$

$$K(n)=\frac{1}{dt}+\frac{L \cdot y(n)}{x(n)}-\frac{y(n) \cdot z(n)}{x(n)}-\frac{x(n+1)}{x(n) \cdot dt} \quad (4)$$

Для симуляції реальних умов в каналі зв'язку, до сигналів генератора застосовано адитивний шумовий сигнал. Внаслідок дії шуму в каналі зв'язку, форма сигналу та аттрактор генератора спотворюються (рис. 1), що ускладнює задачу відновлення керуючих параметрів.

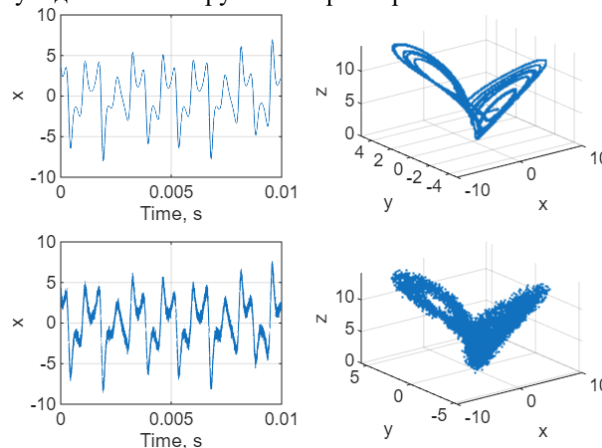


Рис. 1. Форма ідеального і зашумленого сигналів та відповідні аттрактори

Для відновлення коефіцієнтів зашумлені сигнали потрібно відфільтрувати, наприклад, за допомогою функції рухомого середнього з певним розміром вікна усереднення W_d (5). Цей простий лінійний фільтр зменшує високочастотну шумову складову і підвищує ефективне SNR без необхідності складних адаптивних або вейвлет-методів. Такий прийом відомий як недорога засобами реалізації стратегія підвищення завадостійкості в хаотичних радіоканалах.

$$SMA_t=\frac{1}{W_d} \sum_{W_d=0}^{W_d-1} p_{t-i} \quad (5)$$

де W_d – розмір вікна усереднення, p_{t-i} – елемент підмножини вікна усереднення.

Застосувавши виведені формули (3,4), до зашумлених часових рядів X, Y, Z тривалістю 1.2 мс, для кожної пари значень сигнал/шум та розміру вікна усереднення отримано значення відновленого параметру, шляхом медіанного усереднення $K(t)$ та $L(t)$ на проміжку часу у 1.2 мілісекунди (рис. 2).

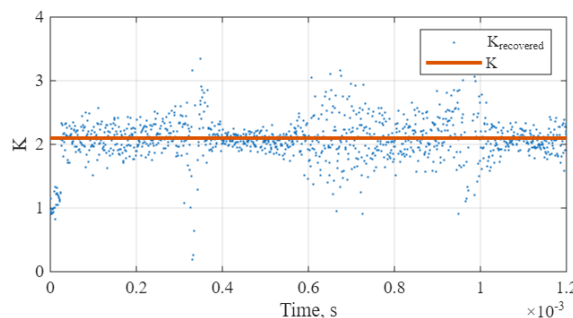


Рис. 2. Приклад відновленого значення ($K_{recovered}$) та його дійсне значення (K)

Під дією адитивного шуму миттєві оцінки $K_{recovered}(t)$ «коливаються» навколо еталонного значення без помітного систематичного зміщення, утворюючи симетричне розсіювання точок відносно червоної лінії. За таких умов застосування медіанного усереднення до послідовностей на інтервалі 1,2 мс дає оцінку, практично збіжну з істинним значенням параметра, що свідчить про відсутність зміщення енергії розсіювання оцінок відносно «центру». Спираючись на цю властивість, було побудовано алгоритм кількісної оцінки похибки відновлення керуючих параметрів для різних комбінацій рівня шуму в каналі та тривалості вікна фільтра рухомого середнього (рис. 3).

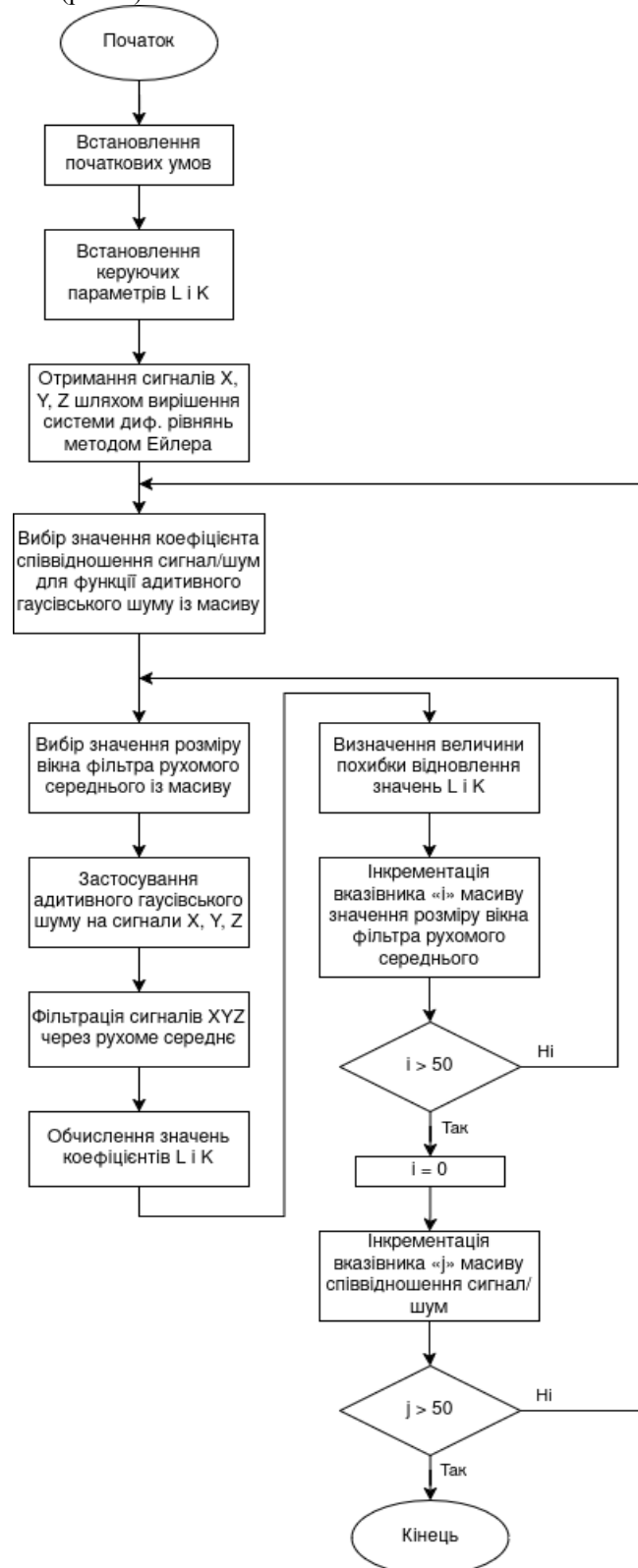


Рис. 3. Алгоритм визначення похибки відновлення керуючих параметрів

Вплив інтенсивності шуму та розміру вікна усереднення на якість відновлення має нелінійний характер і призводить до різкого зростання похибки після досягнення певного порогу завад (рис. 4).

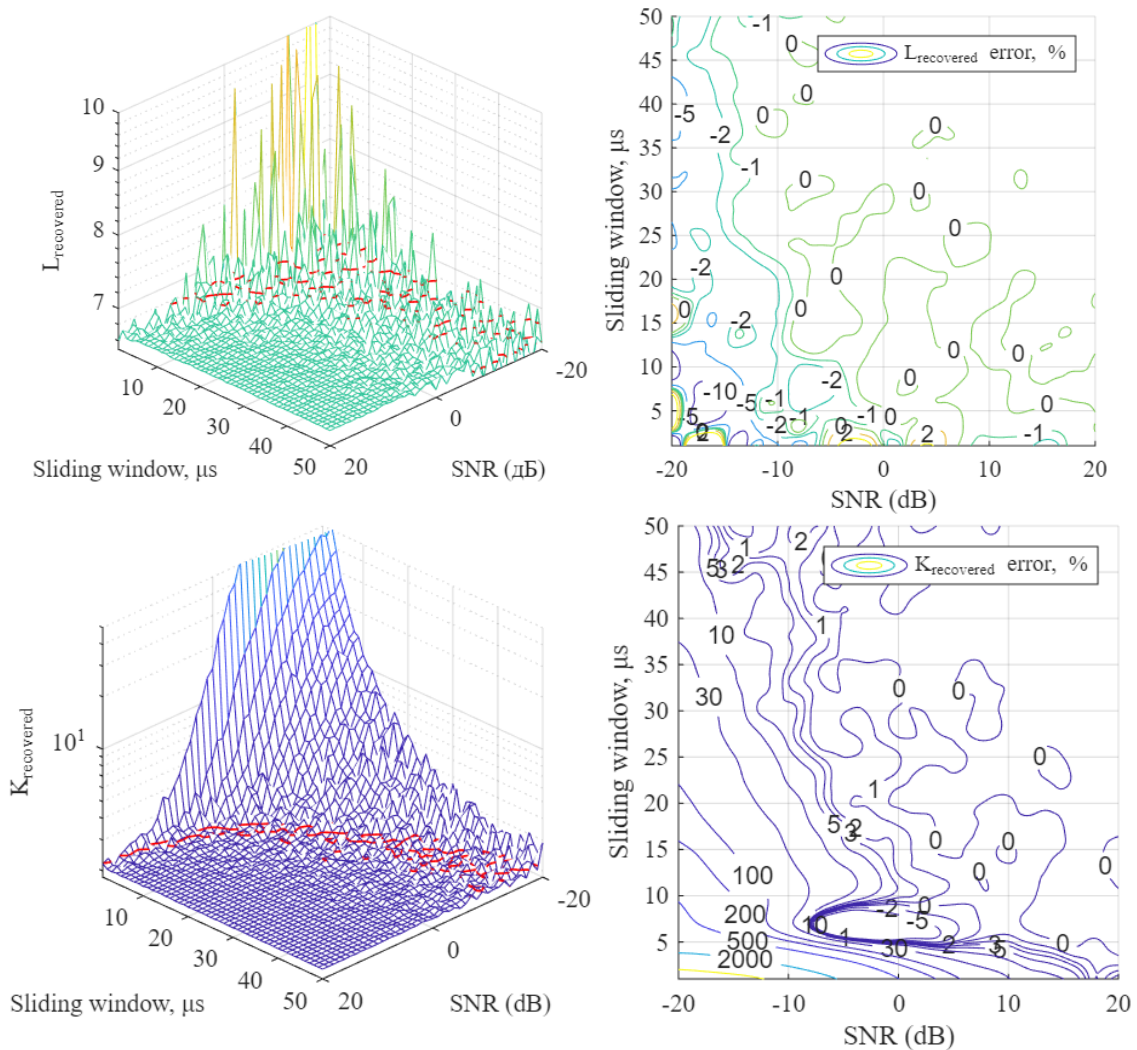


Рис. 4. Поверхні розподілу значень відновлених параметрів К і L (праворуч) та ізолінії відхилень від дійсного значення, % (ліворуч)

Поверхні похибок відновлення параметрів L та K містять області насичення (плато), в яких значення відносних помилок $L_{\text{recovered error, \%}}$ та $K_{\text{recovered error, \%}}$ наближаються до нуля. Ці області відповідають режимам, за яких збільшення тривалості вікна усереднення W_d та/або підвищення співвідношення сигнал/шум SNR забезпечує ефективне придушення шумової складової. У дослідженні еталонними обрано значення параметрів $L = 2.1$ та $K = 6.7$.

Для кількісного виділення робочих діапазонів введено критерій допустимої похибки $\pm 2\%$ від еталонних значень L і K; відповідні ізолінії позначено на поверхнях розподілу похибок червоним кольором (рис. 4, зліва). Згідно з цим критерієм визначено межі достовірного відновлення обох керуючих параметрів: для K — за співвідношення сигнал/шум $SNR \approx -13$ дБ при тривалості вікна усереднення 40 мкс або $SNR \approx -3$ дБ при $W_d = 10$ мкс; для L — за $SNR \approx -18$ дБ при $W_d = 25$ мкс або $SNR \approx -7$ дБ при $W_d = 5$ мкс. Таким чином, компроміс між тривалістю вікна усереднення та вимогами до SNR має виражений нелінійний характер і не може бути описаний простою лінійною залежністю.

Для подальшого формалізованого аналізу отримані двовимірні залежності було дискретизовано: значення відносної похибки відновлення параметрів K і L для всіх комбінацій W_d та SNR занесено до табл. 1 і табл. 2 відповідно. У цих таблицях області, що задовольняють критерію $|\text{error}| \leq 2\%$, виділено напівжирним шрифтом, що дає змогу наочно ідентифікувати робочі зони та їх границі та надалі використовувати їх для побудови узагальненої апроксимаційної залежності ($W_d^x = f(SNR)$, мкс) тривалості вікна спостереження W_d як функції від SNR для кожного із параметрів K і L відповідно.

Таблиця 1.

Значення поверхні відхилення від дійсного значення відновленого параметру K

W_d , μs	SNR, dB																			
	-15	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
5	673	555	450	358	285	223	170	123	83,3	54,1	33,1	18,5	9,1	2,8	0,5	0,3	0	-1,4	-2,4	-1,7
7	287	216	153	104	67	39,8	19,4	2,2	-10,8	-18,9	-21,6	-22,3	-19,7	-16,5	-13	-9,9	-7,1	-5,7	-4,6	-3,4
9	222	176	136	104	78,2	56,3	37,5	22,1	12,4	7,2	3,4	0,9	0,3	0	-0,3	-0,2	0,3	0,5	0,2	0,1
11	173	144	117	92,6	71,8	53,8	39,2	28,3	20,8	16,2	13,3	10,6	8,1	5,8	4,1	2,9	2,3	1,8	1,4	1,2
13	130	105	84,3	66,4	51,1	37,6	28,4	21,8	16,9	12,8	10,5	8,7	6,6	4,7	2,9	1,7	1,1	0,9	0,7	0,6
15	94,5	75,7	61,4	49,5	38,4	28,4	21,2	15,8	11,6	8,2	5,8	4,4	3,6	2,7	2,3	1,7	1,1	0,6	0,1	-0,2
17	71,9	59,9	49,1	39,5	30,8	22,7	15,7	11,3	8,6	6,4	4,1	2,4	1,5	1,5	1,7	1,3	0,9	0,6	0,2	-0,3
19	54,4	46,1	36,6	28,1	22	16,8	12,1	8,6	5,5	3	1,5	1,2	1,1	0,9	0,4	0,3	0	0	-0,1	-0,2
21	43,8	35,2	26,6	19,7	14,5	11,5	9,4	6,6	3,5	1,9	1,4	1,1	1,1	0,8	0,2	-0,3	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4
23	35,7	28,6	21,5	15,4	11,5	9	7	5,6	3,7	1,9	1,2	1,4	1,6	1,6	1,2	0,7	0,1	-0,2	-0,2	-0,1
25	31,3	24,2	18,2	13,4	9,3	6,2	4,5	3,1	1,9	1,2	1	1,1	1,4	1,8	1,8	1,2	0,4	0,1	0,1	0,2
27	23,4	17,3	12,8	9,2	6,6	4,2	2,2	1,2	0,5	0,3	0,6	0,9	1,2	1	0,5	0,1	0	0	0,2	0,1
29	18,8	11,7	7,2	5,1	4,2	3,6	2,6	1	0,1	0,4	1,2	1,4	1,2	0,7	0,1	-0,3	-0,1	0,1	0	-0,2
31	15,3	9,4	5,6	4,1	3,2	3	2,5	1,2	0,3	0,2	0,3	0,7	0,8	0,6	0,4	0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2
33	11,3	8,3	6,7	5,5	3,9	2	1,2	0,7	0	-0,2	0,2	0,6	0,7	0,6	0,4	-0,1	-0,2	-0,2	-0,3	-0,2
35	9,7	8,2	6,7	5,5	4,2	2,9	1,8	0,9	0	-0,2	0,2	0,3	0,1	0,1	0,2	0	-0,3	-0,2	-0,3	-0,3
37	7,5	6,4	5,6	5,2	4,4	3,2	2,6	2	1,5	0,5	-0,3	-0,7	-0,7	-0,5	-0,5	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3	-0,4
39	6,4	5,1	4,6	4,2	3,7	3,2	2,7	2	1,3	0,5	-0,1	-0,5	-0,6	-0,6	-0,4	-0,3	-0,5	-0,8	-0,9	-0,8
41	7,7	6	4,8	4,2	3,7	3,1	1,8	0,6	0	-0,1	0	-0,1	-0,2	-0,2	0,1	0,1	-0,1	-0,7	-0,8	-0,7
43	6,5	6,3	5,5	4,8	3,5	2,1	1,2	0,4	-0,2	-0,1	-0,1	-0,4	-0,4	-0,2	0,1	0,3	0,3	0,1	-0,2	-0,3

Таблиця 2.

Значення поверхні відхилення від дійсного значення відновленого параметру L

W_d , μs	SNR, dB																			
	-19	-18	-17	-16	-15	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0
1	-4,1	23,2	41,1	33,1	1,8	-22,5	-11,2	-1,5	-7,2	-5,8	-2,7	-10	-3,9	-0,8	2,9	5,9	8,6	10,4	4,2	-0,4
3	-3,4	-7	-4,3	-1,5	-3,1	-7,4	-9,1	-4,7	-3,3	-2,6	-0,7	0,8	-0,9	-1,5	0,3	1	0,4	-0,2	-0,6	-0,9
5	-0,7	-11,4	-15,4	-15,3	-10,6	-7,1	-5,2	-1,7	-0,7	-0,8	-1,4	-2,2	-1,8	-1,3	-1,4	-1,6	-1,4	-1,1	-0,6	-0,1
7	-3,1	-9,6	-12,7	-13,4	-10,8	-8,1	-4,7	-2,2	-1,1	-1	-1,9	-3,9	-4,6	-3,7	-2,4	-1,7	-0,7	0,2	0,8	0,7
9	-8,7	-7,7	-8,6	-8,2	-7,6	-5,4	-4,6	-4,5	-3,3	-1,5	-1,7	-3,1	-3,9	-3,3	-2,4	-1,3	-0,5	0,4	0,9	1
11	-8,3	-6,2	-5,3	-4,9	-4	-3,6	-3,6	-3,8	-3,3	-1,9	-1,3	-1,2	-0,8	-0,7	-0,8	-0,8	-0,5	-0,1	0,2	0,5
13	-3,8	-4,7	-5	-4,4	-2,6	-1,2	-1,4	-2,1	-2,3	-1,5	-0,4	0,6	1	0,9	0,3	-0,1	-0,2	-0,2	0	0,2
15	0,6	-2,3	-4,5	-5,1	-3,4	-1,7	-1,6	-2,5	-2,7	-1,9	-0,6	0,6	1	0,9	0,6	0,4	0,2	0	-0,1	0
17	0,7	-1	-3,3	-4,1	-3,6	-2,8	-2,4	-2,3	-2,2	-2	-1,1	-0,2	0,3	0,5	0,5	0,3	0	-0,2	-0,2	0
19	-2,4	-2,1	-1,4	-2,3	-3,6	-3,8	-3	-2,7	-2,6	-2,1	-1,2	-0,5	0,1	0,4	0,3	-0,1	-0,4	-0,6	-0,4	0
21	-2,6	-2,2	-1,7	-2,4	-3,3	-3,3	-3,2	-2,6	-2,2	-1,5	-0,9	-0,4	0	0,1	0,1	-0,2	-0,5	-0,6	-0,4	-0,1
23	-4,1	-2,7	-2,1	-2,4	-2,8	-2,5	-1,9	-1,2	-0,9	-0,5	-0,2	0	0,1	0,2	0,1	-0,1	-0,2	-0,3	-0,3	-0,2
25	-3,2	-1,9	-1,8	-2,3	-2,1	-1,3	-0,8	-0,5	-0,4	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,3	-0,1	0,1	0,1	-0,1	-0,3	-0,3
27	-3,7	-3,5	-3,1	-2,4	-1,7	-0,8	-0,4	-0,4	-0,5	-0,4	-0,1	-0,2	-0,5	-0,5	-0,3	0	0,1	0	0	-0,1
29	-4,8	-4,7	-3,8	-2,3	-1,3	-0,9	-0,6	-0,5	-0,6	-0,3	0	0,1	0	-0,1	-0,2	-0,2	-0,2	0	0,1	0,1
31	-5	-4,6	-3,6	-2,5	-1,8	-1,4	-1,1	-0,7	-0,4	-0,2	-0,1	0	0,1	0,1	0	-0,1	-0,3	-0,3	-0,1	0
33	-4,7	-4,9	-3,9	-2,8	-1,6	-1,1	-1	-0,7	-0,5	-0,4	-0,2	-0,1	-0,2	-0,2	-0,2	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3
35	-4,9	-4,7	-3,7	-2,4	-1,4	-0,9	-0,7	-0,8	-0,6	-0,5	-0,4	-0,5	-0,3	-0,3	-0,2	-0,3	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4
37	-4,7	-4,2	-3,4	-2,6	-1,8	-1,4	-0,8	-0,1	0,3	0,3	-0,1	-0,5	-0,6	-0,4	-0,3	-0,4	-0,3	-0,2	-0,2	-0,2
39	-5,4	-4,1	-3	-2,3	-1,8	-1,2	-0,6	-0,2	0,1	0,1	-0,1	-0,2	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4	-0,3	-0,2	-0,2	-0,2

Границю достовірного відновлення параметрів L та K вирішено встановити на рівні 2% як компроміс між якістю відновлення та швидкістю. Таким чином із таблиць 1 і 2 можливо встановити оптимальне значення вікна усереднення в залежності від потужності діючого шуму у каналі зв'язку.

Для виведення залежності розміру вікна усереднення від SNR, з таблиць 1 і 2 вибрано граничні пари значень (W_d , SNR) на рівні $\pm 2\%$ відхилення від дійсного значення відповідного параметру.

На підставі аналізу цих експериментальних даних як таку, що найкраще відтворює їхню поведінку, було обрано модель однокспоненційної апроксимації (6).

$$y(x)=a \cdot e^{bx}, \quad (6)$$

де a — амплітудний коефіцієнт (масштабний множник), b — показник експоненти, що визначає швидкість зростання або спаду функції, а x — незалежна змінна.

Під час побудови апроксимаційної залежності частину експериментальних точок, позначених на рис. 5 червоними позначками, було виключено з розгляду. Попри те, що формально вони потрапляють у діапазон $|\text{error}| \leq 2\%$, ці точки суттєво віддалені від основної границі та відповідають режимам з надмірно великою потужністю шуму, для яких поява поодиноких «вдалих» оцінок на довгих інтервалах спостереження є статистично малоімовірною і не має практичного фізичного змісту, тому при апроксимації вони не розглядалися.

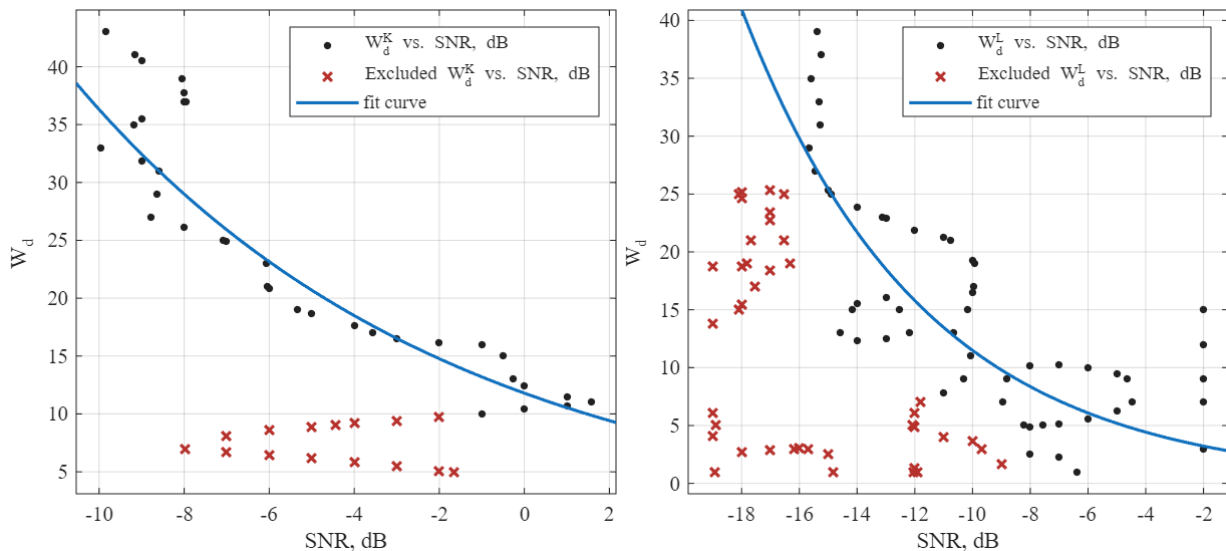


Рис. 5. Залежність границі достовірного відновлення параметру К (зліва) L (зправа) на рівні $\pm 2\%$ від W_d і SNR, та підбір апроксимаційних кривих

Оцінювання параметрів a та b здійснюється методом найменших квадратів. Мінімізується функція квадратичної похибки (7).

$$S(a, b) = \sum_{i=1}^N [y_i - a \cdot e^{bx_i}]^2, \quad (7)$$

де (x_i, y_i) — експериментальні точки, N — їх кількість. Оскільки модель є нелінійною за параметром b , це завдання розв'язується як задача нелінійної регресії. Matlab застосовує чисельні алгоритми нелінійного методу найменших квадратів (зокрема алгоритми trust-region та Левенберга–Марквардта) для пошуку таких значень a та b , які мінімізують $S(a, b)$.

Використовуючи метод одноекспоненційної апроксимації, отримано такі значення параметрів a та b : для кривої, що описує граничні значення тривалості вікна усереднення для параметра К, $a_K = 11.796$, $b_K = -0.1124$; для параметра L відповідно $a_L = 2.344$, $b_L = -0.159$. Коефіцієнт a визначає масштаб (номінальний рівень) тривалості вікна при нульовому або близькому до нуля значенні SNR, тоді як коефіцієнт b характеризує швидкість експоненційного спадання необхідної тривалості вікна зі зростанням співвідношення сигнал/шум.

Підставивши ці коефіцієнти у рівняння (6), отримуємо робочі аналітичні залежності для оцінки оптимальної тривалості вікна усереднення W_d^K та W_d^L в залежності від значення SNR для коефіцієнтів К (8) і L (9) відповідно:

$$W_d^K = 11.796 \cdot e^{-0.1124 \cdot \text{SNR}} \quad (8)$$

$$W_d^L = 2.344 \cdot e^{-0.159 \cdot \text{SNR}} \quad (9)$$

Таким чином, отримано компактні експоненційні моделі, які узагальнюють результати чисельного експерименту та задають однозначну відповідність між потужністю шуму в каналі зв'язку та рекомендованою тривалістю вікна усереднення для забезпечення похибки відновлення значень кожного із керуючих коефіцієнтів не більше 2%. На практиці це дозволяє реалізувати в приймачі просту адаптивну процедуру: за оціненим значенням SNR миттєво обчислювати W_d^K та W_d^L за (8)–(9) та налаштовувати параметри фільтрації без додаткового перебору або емпіричного підстроювання. Зменшення вікна при високому SNR і його

збільшення при низькому SNR забезпечує мінімально необхідну тривалість обчислень на один біт інформації за умови збереження заданої точності відновлення керуючих параметрів.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

У цій статті вдалося знайти межі відновлення керуючих параметрів, в яких похибка відновленого значення не перевищувала 2% за різною інтенсивністю адитивного шуму в каналі та різним розміром вікна усереднення. Показано, що відновлення коефіцієнту K можливе за умови співвідношення сигнал/шум -13дБ при розмірі вікна усереднення в 40мкс, або -3дБ при 10мкс. Відновлення коефіцієнту L можливе за умови співвідношення сигнал/шум -18дБ при розмірі вікна усереднення в 25мкс, або -7дБ при 5мкс. Виявлені рамки достовірного відновлення керуючих коефіцієнтів визначають практичну швидкість та максимальну кількість мод в каналі зв'язку за умови кодування пар L і K як точки двовимірної сузір'явої решітки (напр. FDM, CDM, TDM) по критерію мінімального захисного інтервалу між сусідніми значеннями пар L і K (модами).

Крім того, отримано характеристичні залежності W_d^K та W_d^L , які визначають оптимальну тривалість вікна усереднення залежно від співвідношення сигнал/шум у каналі зв'язку. Ці залежності можуть бути покладені в основу адаптивного програмного забезпечення приймача, у якому параметри усереднення прийнятого сигналу автоматично змінюються відповідно до поточного рівня шуму, що дає змогу забезпечити максимально можливу швидкість передавання інформації за умов динамічної зміни характеристик каналу зв'язку.

У подальших дослідженнях доцільно розширити запропонований підхід на випадки більш складних каналів зв'язку, зокрема з наявністю не лише адитивного білого шуму, а й імпульсних та корельованих завад, а також багатопробеневого поширення. Перспективним напрямом є узагальнення методу для інших класів хаотичних генераторів (Лоренца, Чуа, гіперхаотичних систем тощо) та порівняння досяжних меж достовірного відновлення параметрів між різними моделями, що дозволить обґрунтовано обирати тип генератора для заданих вимог до швидкодії та завадостійкості системи зв'язку. Окремий інтерес становить поєднання аналітичного відновлення параметрів із сучасними методами нелінійної фільтрації (калманівські фільтри, вейвлет-фільтрація, тощо) і методами оптимізації/машинного навчання для покращення точності оцінок у умовах низького SNR.

Ще одним перспективним напрямом є інтеграція одержаних залежностей між SNR та оптимальним вікном усереднення у повноцінну модель системи хаотичного зв'язку у фізичному та каналному рівнях.

Література

1. Argyris A, Syvridis D, Larger L, et al. Chaos-based communications at high bit rates using commercial fibre-optic links. *Nature*. 2005;438(7066):343-346. <https://doi.org/doi:10.1038/nature04275>
2. Zhongyang Wang, Lei Shen, Min Yang, Ziyi Tang, Lei Zhang, Changkun Yan, Liubo Yang, Ruichun Wang, Jun Chu, Jing Du, and Jian Wang, "High-speed chaos-based secure optical communications over 130-km multi-core fiber," *Opt. Lett.* 48, 4440-4443 (2023). <https://doi.org/10.1364/OL.495619>
3. Du J, Wang Y, Fei C, et al. Experimental demonstration of 50-m/5-Gbps underwater optical wireless communication with low-complexity chaotic encryption. *Opt Express*. 2021;29(2):783-796. <https://doi.org/10.1364/OE.416117>
4. Zaminga, S., Martinez, A., Huang, H. et al. Optical chaotic signal recovery in turbulent environments using a programmable optical processor. *Light Sci Appl* 14, 131 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41377-025-01784-3>
5. Yang Y, Chen C, Zhang W, et al. Secure and private NOMA VLC using OFDM with two-level chaotic encryption. *Opt Express*. 2018;26(26):34031-34042. <https://doi.org/10.1364/OE.26.034031>
6. Mahmud, N., MacGillivray, A., Rai, A. et al. Combining quantum key distribution with chaotic systems for free-space optical communications. *Quantum Inf Process* 20, 354 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11128-021-03299-3>
7. Whitney, D. A. *Wireless Communication Demonstration in Hardware Using an Exactly Solvable Chaotic System*. Auburn University. 2019.
8. Dmitriev, A.S., Efremova, E.V., Itskov, V.V. et al. Direct Chaotic Ultra-Wideband Wireless Communications in the Very High Frequency and Ultra High Frequency Radio Bands. *J. Commun. Technol. Electron*. 67, 1013–1021 (2022). <https://doi.org/10.1134/S1064226922080046>
9. Kaddoum, G., Olivain, J., Samson, G. B., Giard, P., Gagnon, F. Implementation of a Differential Chaos Shift Keying Communication system in GNU Radio. *International Symposium on Wireless Communication Systems*. 2012. №9. <https://doi.org/10.1109/ISWCS.2012.6328505>
10. Altus Metrum, «ChaosKey». URL: <http://altusmetrum.org/ChaosKey>
11. Cryptic Vector LLC, Low SWaP Tactical Ultra-Secure Communications System. URL: https://swx-project-prod.s3.amazonaws.com/CPO_55_SBIR_22_1_Phase_I_Cryptic_Vector_FINAL_Transition_Quad.pdf
12. Chong, Chia-Chin & Yong, Su & Lee, Seong. (2005). UWB Direct Chaotic Communication Technology. *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*. 4. 316 - 319. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2005.855632>
13. Methods and systems for transceiving chaotic signals пат. US7593531B2 США; заявл. 07.05.2004;

опубл. 22.09.2009.

14. Chaotic spreading codes and their generation пат. WO2008065191A1 Люксембург; заявл. 30.11.2007; опубл. 05.06.2008.

15. Xu, J.W., Wei, M., Zhang, L. et al. Chaotic information metasurface for direct physical-layer secure communication. Nat Commun 16, 5853 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41467-025-60725-1>

16. Mossayebi, F., Qammar, H. K., & Hartley, T. T. Adaptive estimation and synchronization of chaotic systems. Physics Letters A. 1991. №161. С. 255-262. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(91\)90013-X](https://doi.org/10.1016/0375-9601(91)90013-X)

17. Baake, E., Baake, M., Bock, H. G., & Briggs, K. M. Fitting ordinary differential equations to chaotic data. Physical Review A. №45. С. 5524-5529. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.45.5524>

18. Parlitz, U. Estimating model parameters from time series by autosynchronization. Physical Review Letters. 1996. №76. С. 1232-1235. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.76.1232>

19. Tao, C., Zhang, Y., Du, G., & Jiang, J. J. Estimating model parameters by chaos synchronization. Physical Review E. 2004. №69. ID 036204. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.69.036204>

20. Zhang, Y., Tao, C., & Jiang, J. J. Theoretical and experimental studies of parameter estimation based on chaos feedback synchronization. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Dynamics. 2006. №16. ID 043122. <https://doi.org/10.1063/1.2404356>

21. Chen, M., & Kurths, J. Chaos synchronization and parameter estimation from a scalar output signal. Physical Review E. 2007. №76. ID 027203. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.76.027203>

22. Прикладне застосування теорії хаотичних систем у телекомунікаціях : монографія / Ю. Я. Бобало, С. Д. Галюк, М. М. Климаш, Р. Л. Політанський; Міністерство освіти і науки України, Національний університет "Львівська політехніка". – Львів; Дрогобич : Коло, 2015. – 184 с.

23. Golevych, O., Pyvovar, O., Dumenko, P. "Synchronization of non-linear dynamic systems under the conditions of noise action in the channel", Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, Volume 55, Issue 3, 1 June 2018, Pages 70-76 <https://doi.org/10.2478/lpts-2018-0023>

24. Pyvovar, O.S., Polikarovskiykh, O.I. A System of Secure Communication with Chaos Masking Based on Rucklidge Generators, 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2018 - Proceedings <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2018.8477566>

25. Sheludko, A. S. Parameter estimation for one-dimensional chaotic systems by guaranteed algorithm and particle swarm optimization. IFAC-PapersOnLine. 2018. №51. С. 337-342. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.406>

26. Springer, S., Haario, H., Shemyakin, V., Kalachev, L., & Shchepakina, D. Robust parameter estimation of chaotic systems. Inverse Problems and Imaging. 2019. №13. С. 1189-1212. <https://doi.org/10.3934/ipi.2019053>

27. Rucklidge, A.M. Chaos in models of double convection. Journal of Fluid Mechanics. 1992. №237. С. 209-229. <https://doi.org/10.1017/S0022112092003392>

References

1. Argyris A, Syvridis D, Larger L, et al. Chaos-based communications at high bit rates using commercial fibre-optic links. Nature. 2005;438(7066):343-346. <https://doi.org/doi:10.1038/nature04275>

2. Zhongyang Wang, Lei Shen, Min Yang, Ziyi Tang, Lei Zhang, Changkun Yan, Liubo Yang, Ruichun Wang, Jun Chu, Jing Du, and Jian Wang, "High-speed chaos-based secure optical communications over 130-km multi-core fiber," Opt. Lett. 48, 4440-4443 (2023). <https://doi.org/10.1364/OL.495619>

3. Du J, Wang Y, Fei C, et al. Experimental demonstration of 50-m/5-Gbps underwater optical wireless communication with low-complexity chaotic encryption. Opt Express. 2021;29(2):783-796. <https://doi.org/10.1364/OE.416117>

4. Zaminga, S., Martinez, A., Huang, H. et al. Optical chaotic signal recovery in turbulent environments using a programmable optical processor. Light Sci Appl 14, 131 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41377-025-01784-3>

5. Yang Y, Chen C, Zhang W, et al. Secure and private NOMA VLC using OFDM with two-level chaotic encryption. Opt Express. 2018;26(26):34031-34042. <https://doi.org/10.1364/OE.26.034031>

6. Mahmud, N., MacGillivray, A., Rai, A. et al. Combining quantum key distribution with chaotic systems for free-space optical communications. Quantum Inf Process 20, 354 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11228-021-03299-3>

7. Whitney, D. A. Wireless Communication Demonstration in Hardware Using an Exactly Solvable Chaotic System. Auburn University. 2019.

8. Dmitriev, A.S., Efremova, E.V., Itskov, V.V. et al. Direct Chaotic Ultra-Wideband Wireless Communications in the Very High Frequency and Ultra High Frequency Radio Bands. J. Commun. Technol. Electron. 67, 1013–1021 (2022). <https://doi.org/10.1134/S1064226922080046>

9. Kaddoum, G., Olivain, J., Samson, G. B., Giard, P., Gagnon, F. Implementation of a Differential Chaos Shift Keying Communication system in GNU Radio. International Symposium on Wireless Communication Systems. 2012. №9. <https://doi.org/10.1109/ISWCS.2012.6328505>

10. Altus Metrum, «ChaosKey». URL: <http://altusmetrum.org/ChaosKey>

11. Cryptic Vector LLC, Low SWaP Tactical Ultra-Secure Communications System. URL: https://swx-project-prod.s3.amazonaws.com/CPO_55_SBIR_22_1_Phase_I_Cryptic_Vector_FINAL_Transition_Quad.pdf

12. Chong, Chia-Chin & Yong, Su & Lee, Seong. (2005). UWB Direct Chaotic Communication Technology. Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE. 4. 316 - 319. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2005.855632>

13. Methods and systems for transceiving chaotic signals, US patent US7593531B2, USA; filed 07.05.2004; published 22.09.2009.

14. Chaotic spreading codes and their generation, WO patent WO2008065191A1, Luxembourg; filed 30.11.2007; published 05.06.2008.

15. Xu, J.W., Wei, M., Zhang, L. et al. Chaotic information metasurface for direct physical-layer secure communication. Nat Commun 16, 5853 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41467-025-60725-1>

16. Mossayebi, F., Qammar, H. K., & Hartley, T. T. Adaptive estimation and synchronization of chaotic systems. Physics Letters A.

1991. №161. С. 255-262. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(91\)90013-X](https://doi.org/10.1016/0375-9601(91)90013-X)
17. Baake, E., Baake, M., Bock, H. G., & Briggs, K. M. Fitting ordinary differential equations to chaotic data. *Physical Review A*. №45. С. 5524-5529. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.45.5524>
18. Parlitz, U. Estimating model parameters from time series by autosynchronization. *Physical Review Letters*. 1996. №76. С. 1232-1235. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.76.1232>
19. Tao, C., Zhang, Y., Du, G., & Jiang, J. J. Estimating model parameters by chaos synchronization. *Physical Review E*. 2004. №69. ID 036204. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.69.036204>
20. Zhang, Y., Tao, C., & Jiang, J. J. Theoretical and experimental studies of parameter estimation based on chaos feedback synchronization. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Dynamics*. 2006. №16. ID 043122. <https://doi.org/10.1063/1.2404356>
21. Chen, M., & Kurths, J. Chaos synchronization and parameter estimation from a scalar output signal. *Physical Review E*. 2007. №76. ID 027203. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.76.027203>
22. Applied application of the theory of chaotic systems in telecommunications: monograph / Yu. Ya. Bobalo, S. D. Galyuk, M. M. Klymash, R. L. Politsky; Ministry of Education and Science of Ukraine, National University "Lviv Polytechnic". – Lviv; Drohobych: Kolo, 2015. – 184 p.
23. Golevych, O., Pyvovar, O., Dumenko, P. "Synchronization of non-linear dynamic systems under the conditions of noise action in the channel", *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, Volume 55, Issue 3, 1 June 2018, Pages 70-76 DOI: <https://doi.org/10.2478/lpts-2018-0023>
24. Pyvovar, O.S., Polikarovskyykh, O.I. A System of Secure Communication with Chaos Masking Based on Rucklidge Generators, 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2018 - Proceedings <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2018.8477566>
25. Sheludko, A. S. Parameter estimation for one-dimensional chaotic systems by guaranteed algorithm and particle swarm optimization. *IFAC-PapersOnLine*. 2018. №51. С. 337-342. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.406>
26. Springer, S., Haario, H., Shemyakin, V., Kalachev, L., & Shchepakina, D. Robust parameter estimation of chaotic systems. *Inverse Problems and Imaging*. 2019. №13. С. 1189-1212. <https://doi.org/10.3934/ipi.2019053>
27. Rucklidge, A.M. Chaos in models of double convection. *Journal of Fluid Mechanics*. 1992. №237. С. 209-229. <https://doi.org/10.1017/S0022112092003392>

ДОДАТОК В

ВИХІДНИЙ КОД ПРОГРАМИ МІКРОКОНТРОЛЕРА ESP32

```
#include "AD5293.h"
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>
#include <esp_task_wdt.h>
#include "BluetoothSerial.h"

#define WDT_TIMEOUT 3000
#define CONFIG_FREERTOS_NUMBER_OF_CORES 1
esp_task_wdt_config_t twdt_config = {
    .timeout_ms = WDT_TIMEOUT,
    .idle_core_mask = (1 << CONFIG_FREERTOS_NUMBER_OF_CORES) - 1,
    .trigger_panic = true,
};

uint8_t Serial_buf[10240];
uint32_t sppTotalCharsSent = 0;
BluetoothSerial SerialBT;
volatile bool bt_client = 0;
unsigned long last = millis();
unsigned long count = 0;

#define SCREEN_WIDTH 128
#define SCREEN_HEIGHT 32

#define OLED_RESET -1 // Reset pin
```

```
#define SCREEN_ADDRESS 0x3C
Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire,
OLED_RESET);
```

```
const uint8_t CS_PIN1 = 5;
const uint8_t CS_PIN2 = 15;
AD5293 digPot1;
AD5293 digPot2;
```

```
float R28=200000.0f;
```

```
void setup() {
  display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, SCREEN_ADDRESS);
  Serial.begin(115200);
  digPot1.begin(1, CS_PIN1);
  digPot2.begin(1, CS_PIN2);
  Serial.println("Setup complete!");
  digPot1.configure(0, 0, 1);
  digPot2.configure(0, 0, 1);
```

```
  display.setTextSize(2);
  display.setTextColor(SSD1306_WHITE);
  display.setCursor(0, 0);
  display.println(F("Waiting for data.."));
  display.display();
```

```
  delay(100);
  digPot1.setWiperPosition(0, 256);
  digPot2.setWiperPosition(0, 512);
```

```
SerialBT.register_callback(BT_callback);
SerialBT.enableSSP();
```

```
SerialBT.begin("Chaos1_BT");
```

```
esp_task_wdt_deinit();
esp_task_wdt_init(&twdt_config);
esp_task_wdt_add(NULL);
}
```

```
void loop() {
```

```
  if (SerialBT.available() >= 16) {
```

```
    uint8_t buffer[16];
```

```
    SerialBT.readBytes(buffer, 16);
```

```
    if (buffer[0] == 0xC8 && buffer[14] == 0xCD && buffer[15] == 0xCD) {
```

```
      uint16_t Digital_pot1 = (buffer[1] << 8) | buffer[2];
```

```
      uint16_t Digital_pot2 = (buffer[3] << 8) | buffer[4];
```

```
      float Analog_pot1_R21, Analog_pot2_R22;
```

```
      memcpy(&Analog_pot1_R21, &buffer[5], sizeof(float));
```

```
      memcpy(&Analog_pot2_R22, &buffer[9], sizeof(float));
```

```
      uint8_t state = buffer[13];
```

```
      float Rwa_1 = (1024.0f - (float)Digital_pot1) / 1024.0f * 100000.0f +
Analog_pot1_R21; // K
```

```
      float Rwa_2 = (1024.0f - (float)Digital_pot2) / 1024.0f * 50000.0f +
Analog_pot2_R22; // L
```

```
      float K=R28/(Rwa_1);
```

```
      float L=R28/(Rwa_2);
```

```
Serial.printf("Digital_pot1: %u, Digital_pot2: %u, Analog_pot1_R21: %.3f,  
Analog_pot2_R22: %.3f, R_K: %.3f, R_L: %.3f, K: %.3f, L: %.3f, state: %u\n",  
Digital_pot1, Digital_pot2, Analog_pot1_R21, Analog_pot2_R22, Rwa_1, Rwa_2, K,  
L, state);
```

```
digPot1.setWiperPosition(0, Digital_pot1);  
digPot2.setWiperPosition(0, Digital_pot2);
```

```
// очистка дисплея  
display.clearDisplay();  
display.setCursor(0, 0);  
display.print(F("K = "));  
display.println(K);  
display.print(F("L = "));  
display.println(L);  
display.display();
```

```
// Відправка підтвердження  
SerialBT.write((uint8_t[]){ 0xCE, 0xCE }, 2);  
} else {  
Serial.println("Invalid packet");  
}  
}  
  
if (millis() - last >= 500) {  
esp_task_wdt_reset();  
last = millis();  
}  
}
```

```
void On_ESP_SPP_WRITE(esp_spp_cb_param_t* param) {

    #if VERBOSE
        Serial.println("571 - ESP_SPP_WRITE_EVT: Bluetooth SPP write operation
completed");
        Serial.print("572 - Status = ");
        switch (param->write.status) {
            case ESP_SPP_SUCCESS:
                Serial.println("ESP_SPP_SUCCESS");
                break;

            case ESP_SPP_FAILURE:
                Serial.println("ESP_SPP_FAILURE");
                break;

            case ESP_SPP_BUSY:
                Serial.println("ESP_SPP_BUSY");
                break;

            case ESP_SPP_NO_DATA:
                Serial.println("ESP_SPP_NO_DATA");
                break;

            case ESP_SPP_NO_RESOURCE:
                Serial.println("ESP_SPP_NO_RESOURCE");
                break;
        }
    #endif

    sppTotalCharsSent += param->write.len;
    Serial2.println(sppTotalCharsSent, DEC);
}
```

```
}
```

```
void BT_callback(esp_spp_cb_event_t event, esp_spp_cb_param_t* param) {
```

```
#if VERBOSE
```

```
    Serial.print("event: ");
```

```
    Serial.println(event);
```

```
#endif
```

```
    switch (event) {
```

```
        case ESP_SPP_WRITE_EVT:
```

```
            On_ESP_SPP_WRITE(param);
```

```
            break;
```

```
        case ESP_SPP_SRV_OPEN_EVT:
```

```
            bt_client = 1;
```

```
            Serial.println("Client Connected");
```

```
            break;
```

```
        case ESP_SPP_CLOSE_EVT:
```

```
            bt_client = 0;
```

```
            Serial.println("Client Disconnected");
```

```
            break;
```

```
        default:
```

```
            break;
```

```
    }
```

```
}
```

Кваліфікаційна робота магістра

Метод відновлення значень біфуркаційних параметрів хаотичного генератора

Виконав: студент групи ЕКРм-24-1

Разовий Олександр Олегович

Керівник:

к.т.н., доцент Пивовар Олег Сергійович

Апробація

- **Стаття** у журналі «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» (ВОТТП): **Метод відновлення керуючих параметрів хаотичного генератора за умови дії завад в каналі зв'язку;**
- **Тези** для науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук» (АПКН): **Модель системної завади для багатоканальних хаотичних систем передачі даних.**

Об'єкт дослідження

Хаотичні динамічні системи та їх практичні апаратні реалізації, зокрема фізичний хаотичний генератор (генератор Ракліджа).

Предмет дослідження

Методи та алгоритми відновлення значень біфуркаційних параметрів хаотичного генератора за часовими рядами його вихідного сигналу в умовах дії шуму та апаратних похибок.

Мета дослідження

Розробити та експериментально обґрунтувати метод відновлення біфуркаційних (керуючих) параметрів практичної реалізації хаотичного генератора, який забезпечує високу точність, скритність і завадостійкість роботи в умовах реального фізичного каналу зв'язку.

1. Проаналізувати сучасні методи ідентифікації параметрів хаотичних систем та визначити їхні обмеження.
2. Побудувати математичну модель хаотичного генератора Ракліджа та виділити зони генерації хаосу.
3. Розробити алгоритм відновлення біфуркаційних параметрів за часовими рядами вихідного сигналу генератора з урахуванням завад та характеристичного рівняння.
4. Провести моделювання в MATLAB для оцінки точності методу при різних рівнях шуму, параметрах фільтрації.
5. Реалізувати експериментальний стенд: апаратний генератор + LAN-осцилограф + програмний модуль MATLAB.
6. Виконати експериментальне відновлення параметрів на реальному генераторі та порівняти результати з ідеальною моделлю.
7. Проаналізувати вплив завад та апаратних похибок на якість оцінювання і визначити граничні умови достовірного відновлення біфуркаційних параметрів.

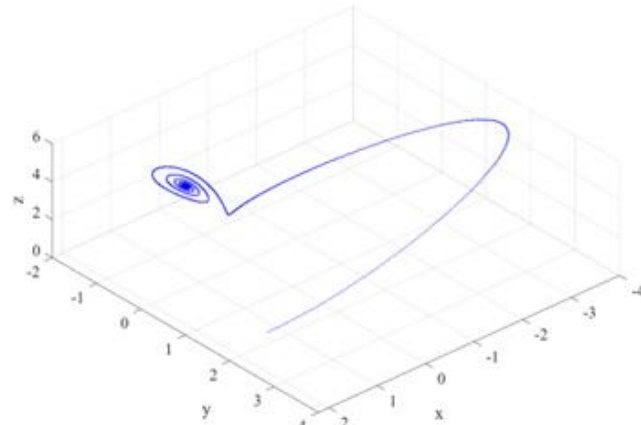
Система рівнянь хаотичного генератора:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -Kx + Ly - yz; \\ \frac{dy}{dt} = x; \\ \frac{dz}{dt} = -z + y^2; \end{cases}$$

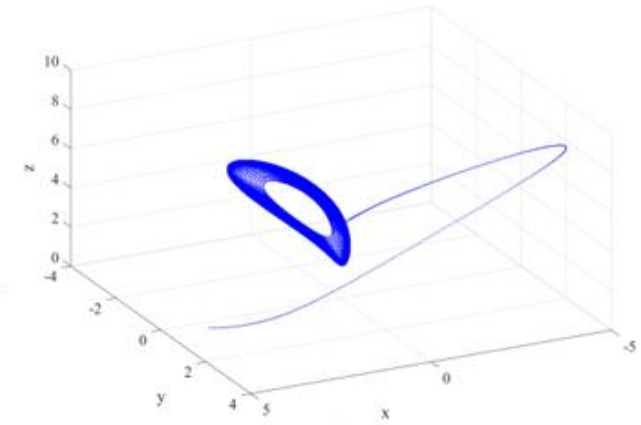
Формули для відновлення значень коефіцієнтів:

$$L_n = \frac{x_{n+1}}{dt \cdot y_n} - \frac{x_n}{dt \cdot y_n} + \frac{K \cdot x_n}{y_n} + z_n$$

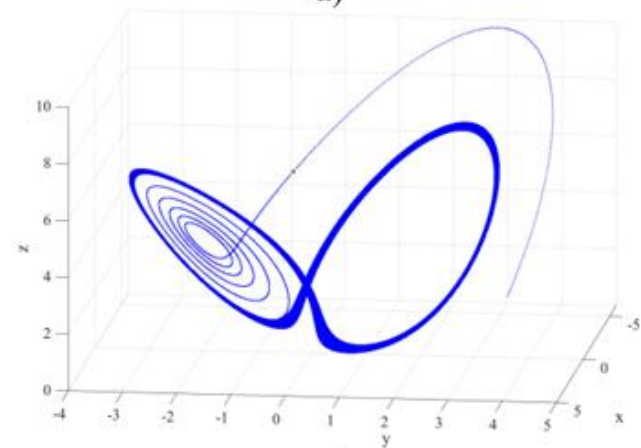
$$K_n = \frac{1}{dt} + \frac{L \cdot y_n}{x_n} - \frac{y_n \cdot z_n}{x_n} - \frac{x_{n+1}}{x_n \cdot dt}$$



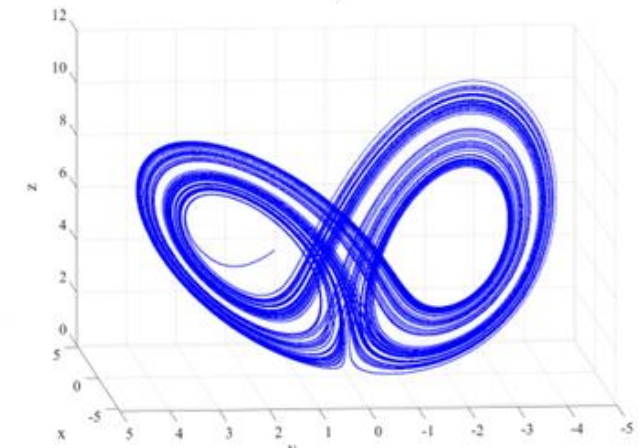
а)



б)



в)



г)

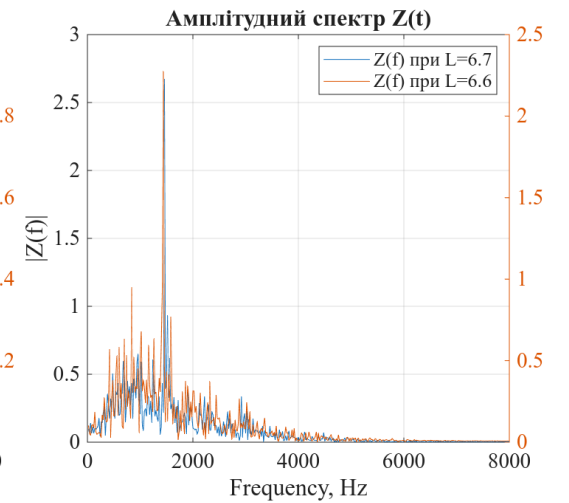
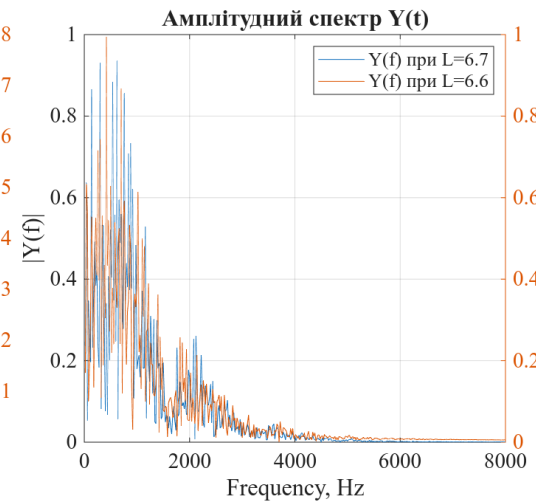
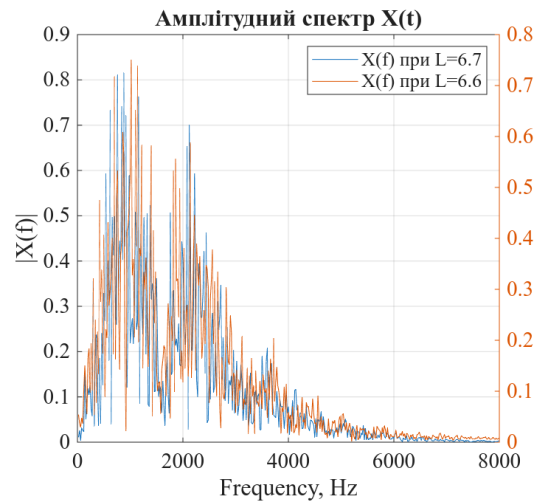
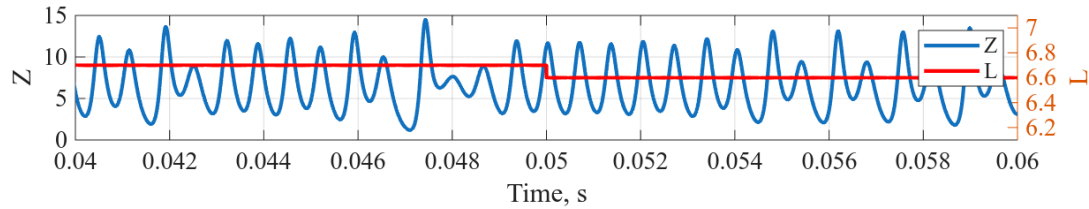
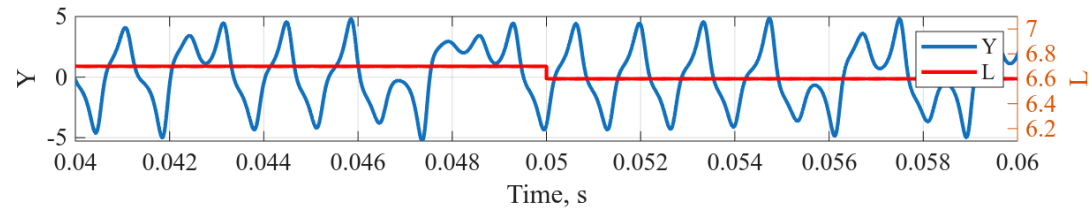
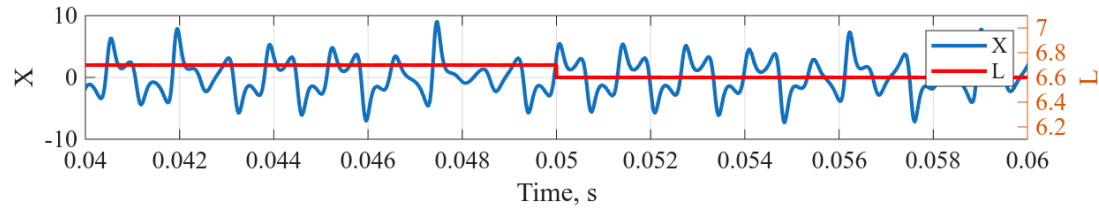
Атрактор хаотичного генератора Ракліджа при різних динамічних режимах: а) $L \approx 2$; б) $L \approx 3.1$; в) $L \approx 3.7$; г) $L > 4.2$;

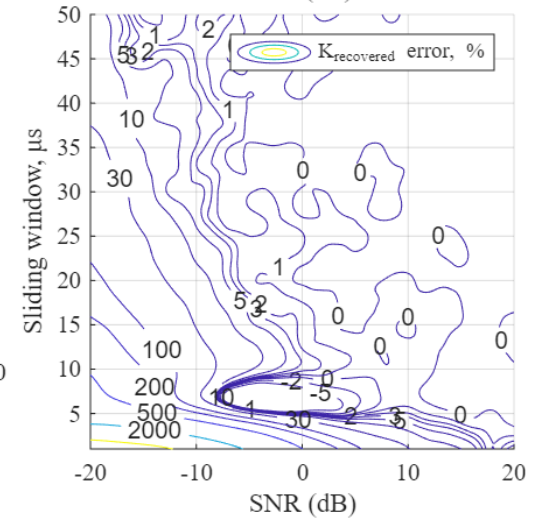
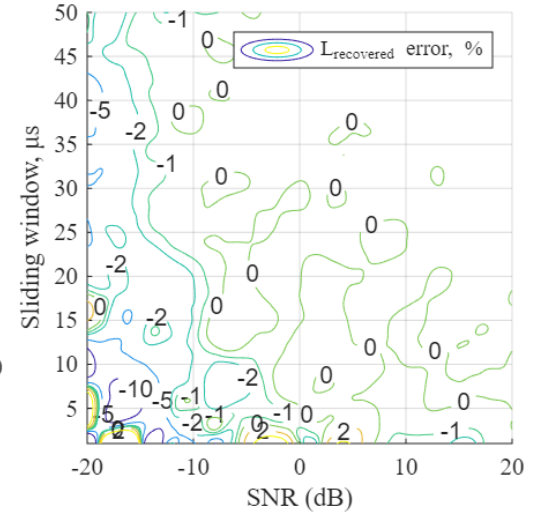
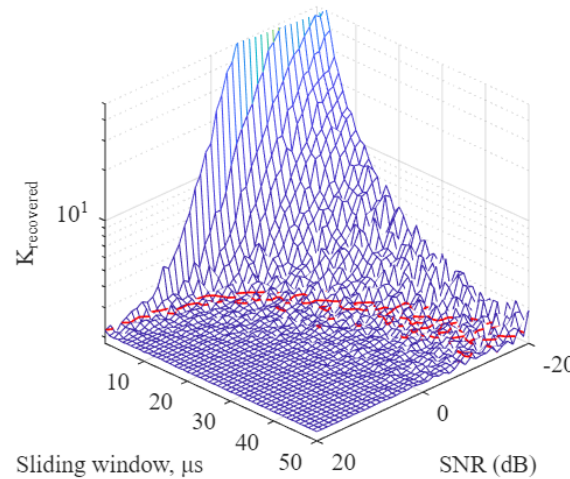
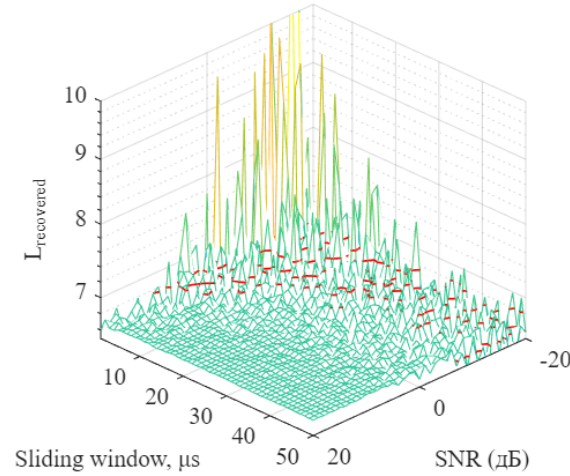
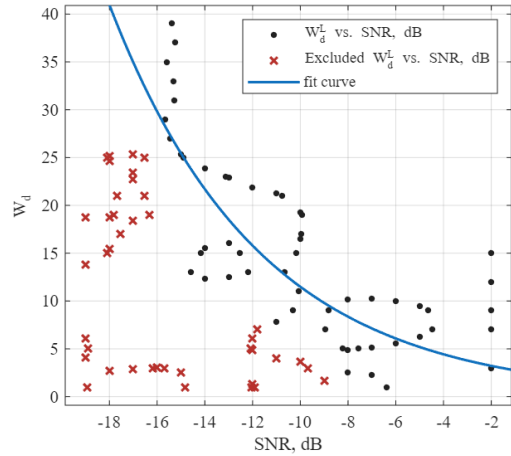
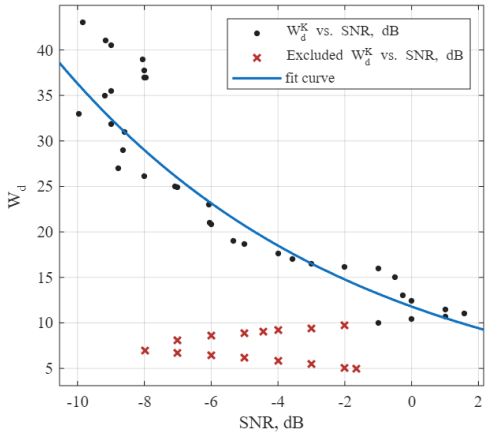
Пропонований метод відновлення біфуркаційних параметрів хаотичного генератора забезпечує:

- **Високу скритність передачі інформації**, оскільки при зміні біфуркаційних параметрів форма сигналів X , Y , Z , їх спектр та атрактор генератора передавача є незмінними, що унеможливорює ідентифікацію факту передачі інформації;
- **Високу криптографічну стійкість**: на приймальному кінці відновити інформацію можливо тільки знаючи параметричне рівняння та масштабуючий коефіцієнт генератора передавача;
- **Зберігаються усі переваги використання хаотичних сигналів**: широкосмуговість, підвищена завадостійкість, висока пропускна здатність, прихованість дії, проникна здатність.

Обґрунтування актуальності методу

7

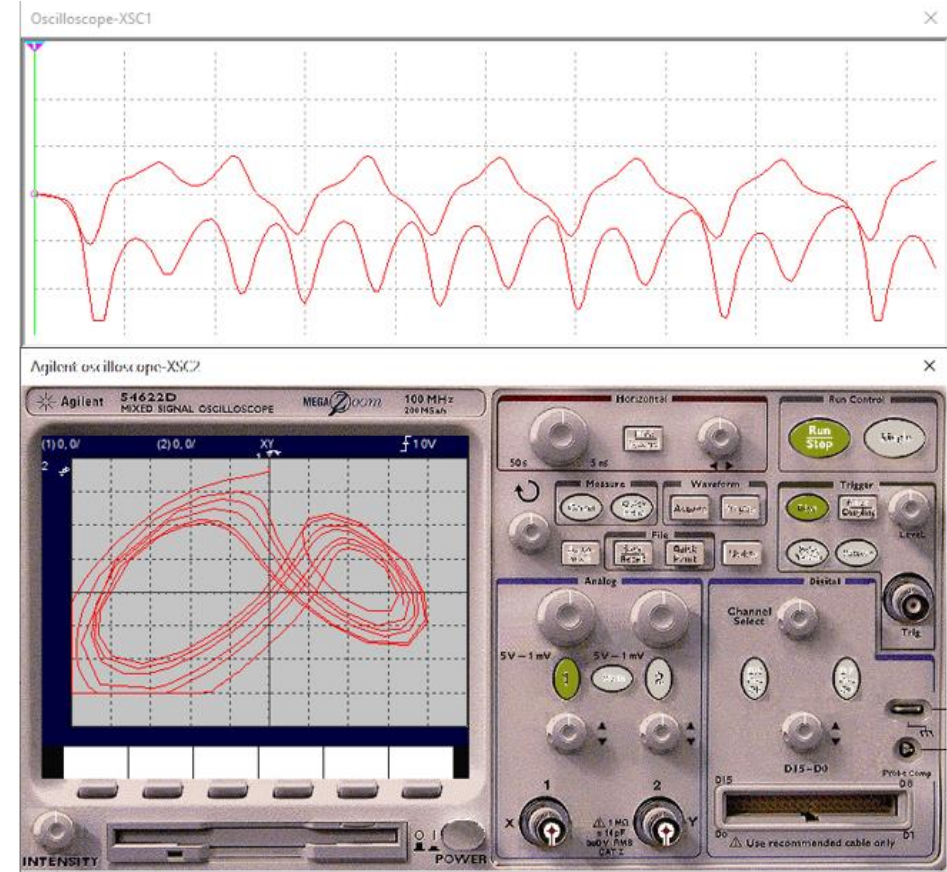
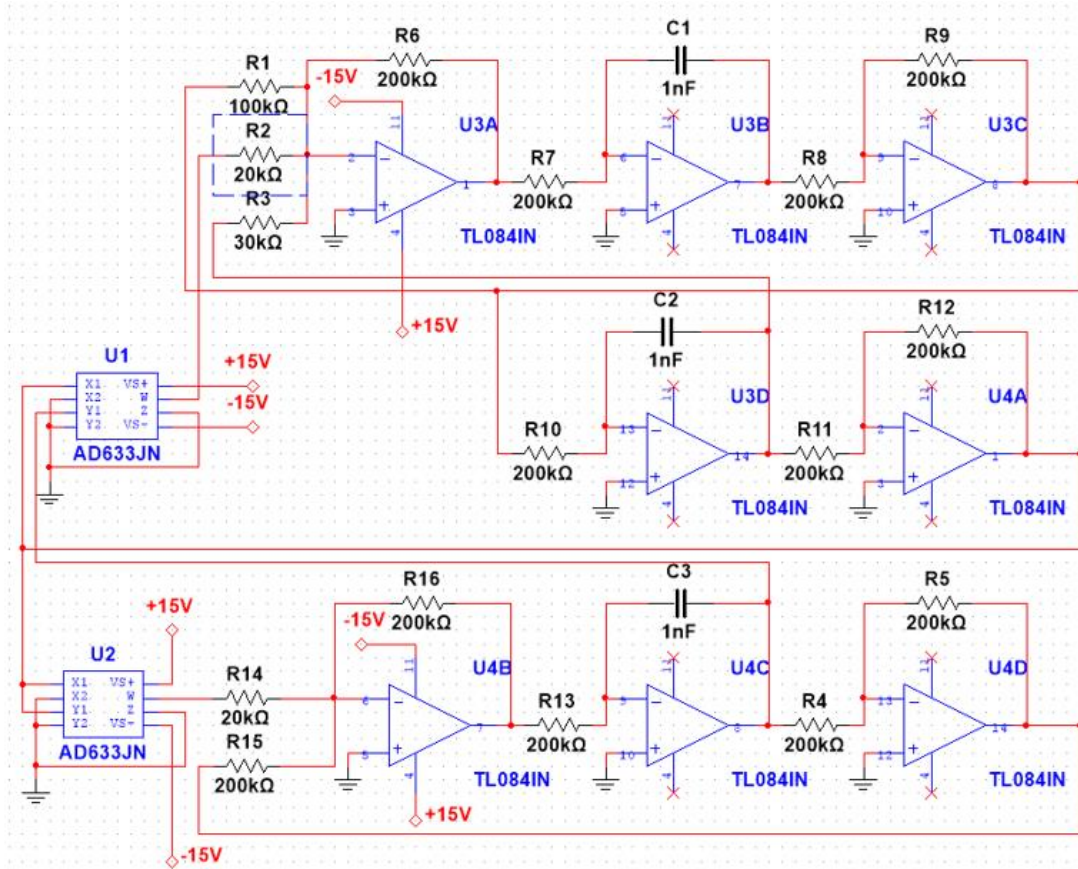


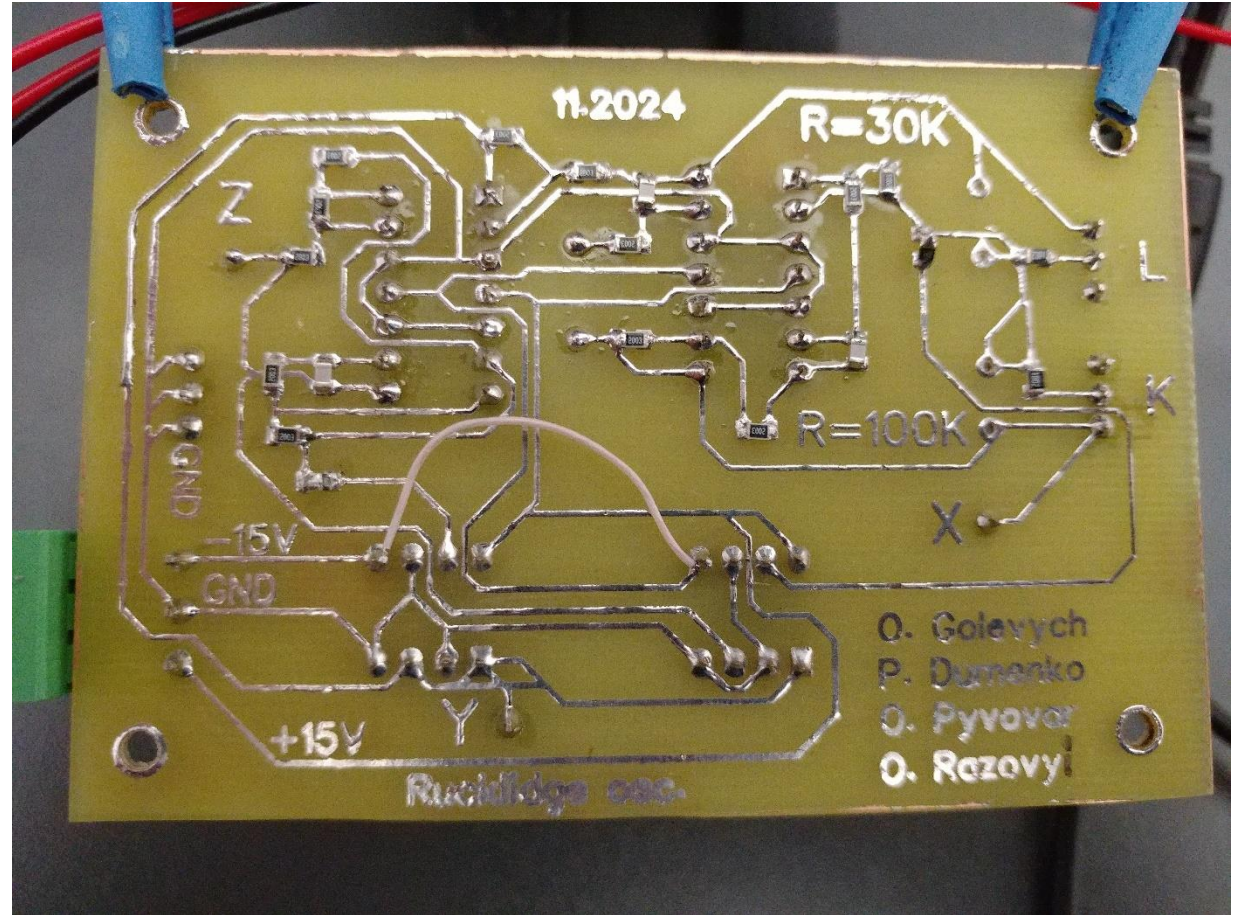
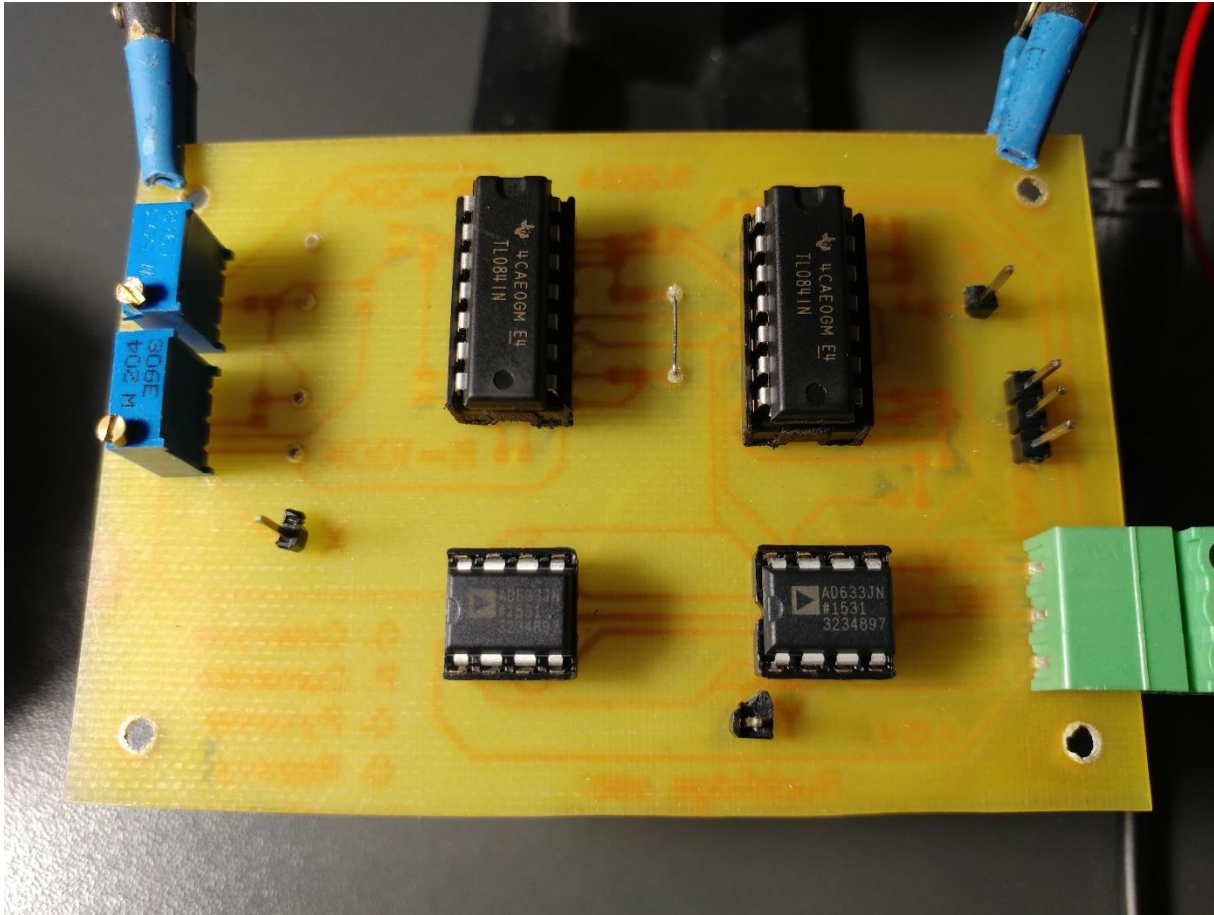


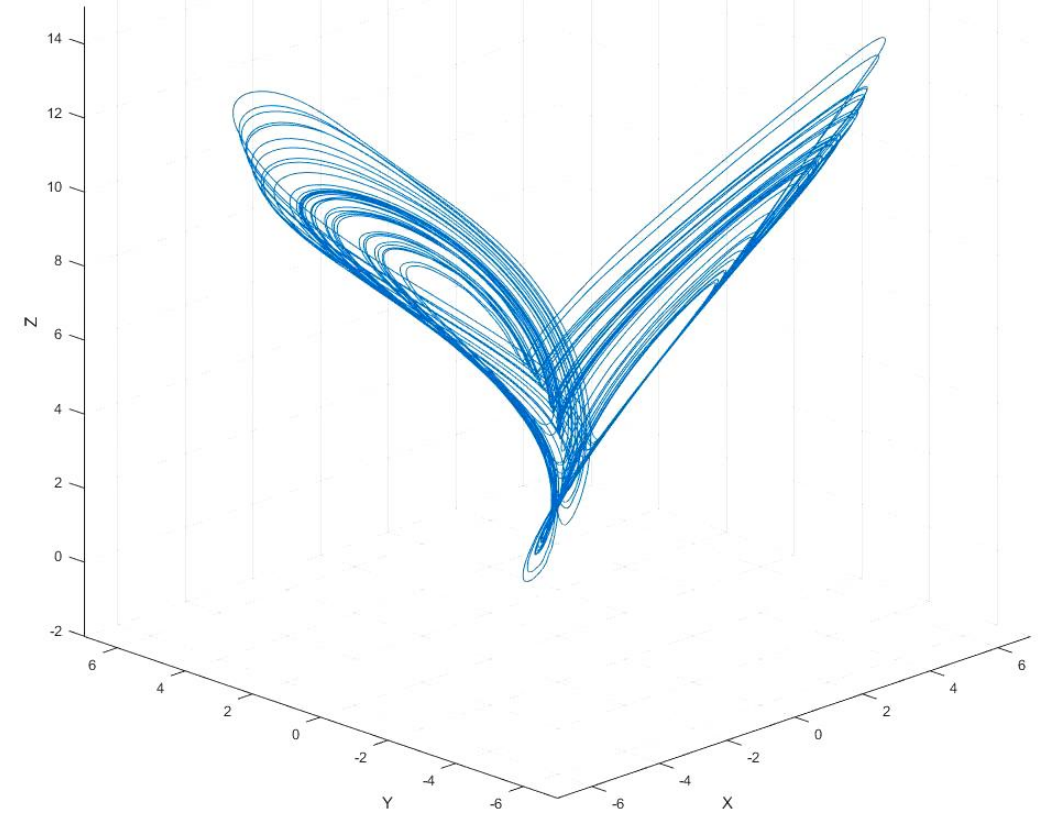
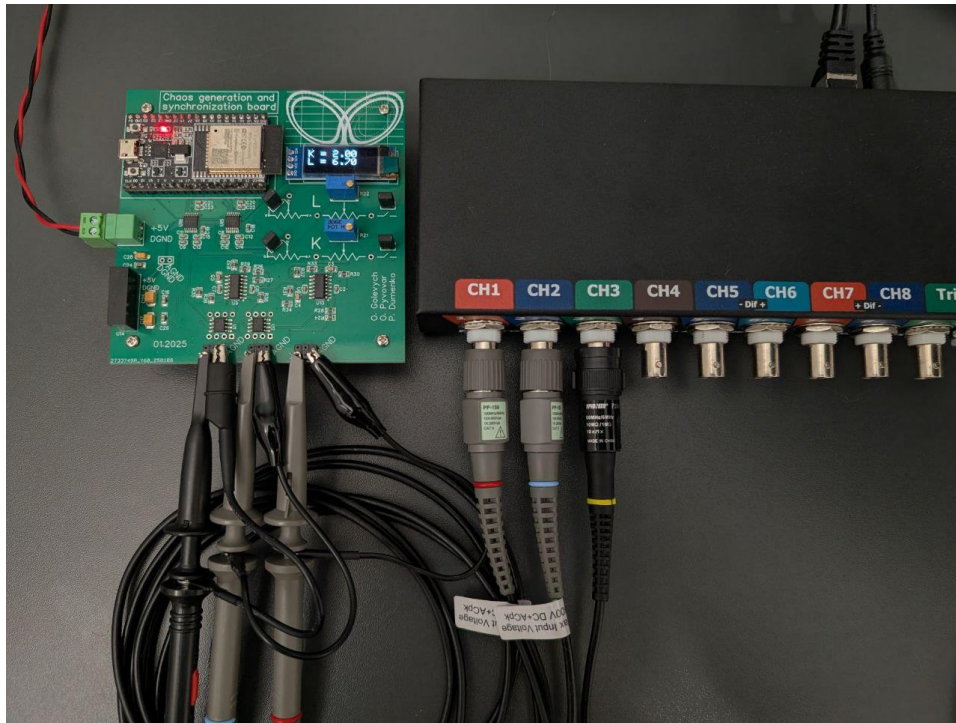
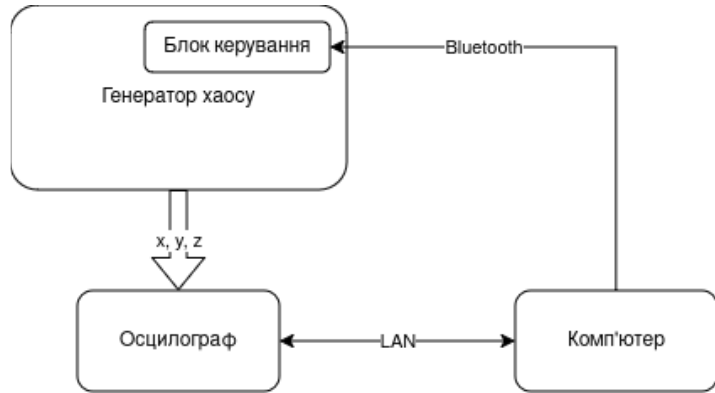
Узагальнені моделі меж достовірного відновлення:

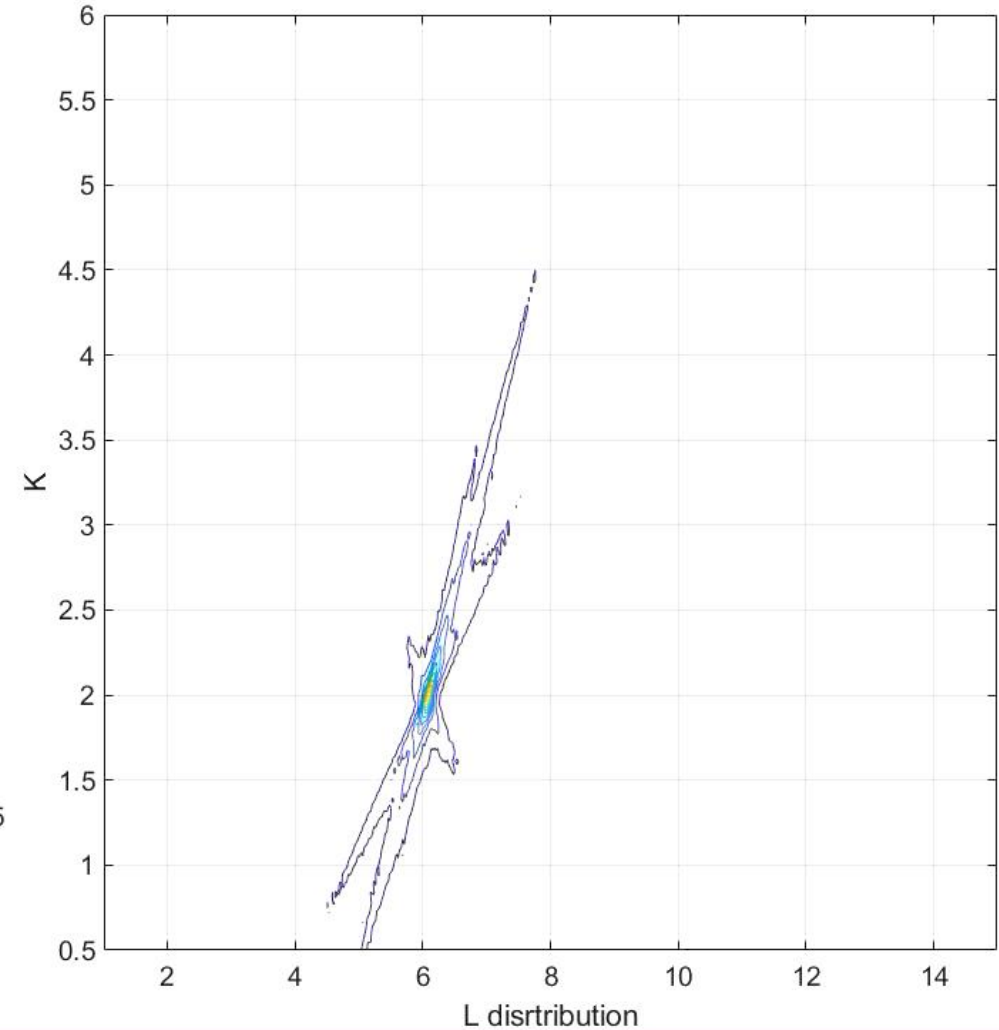
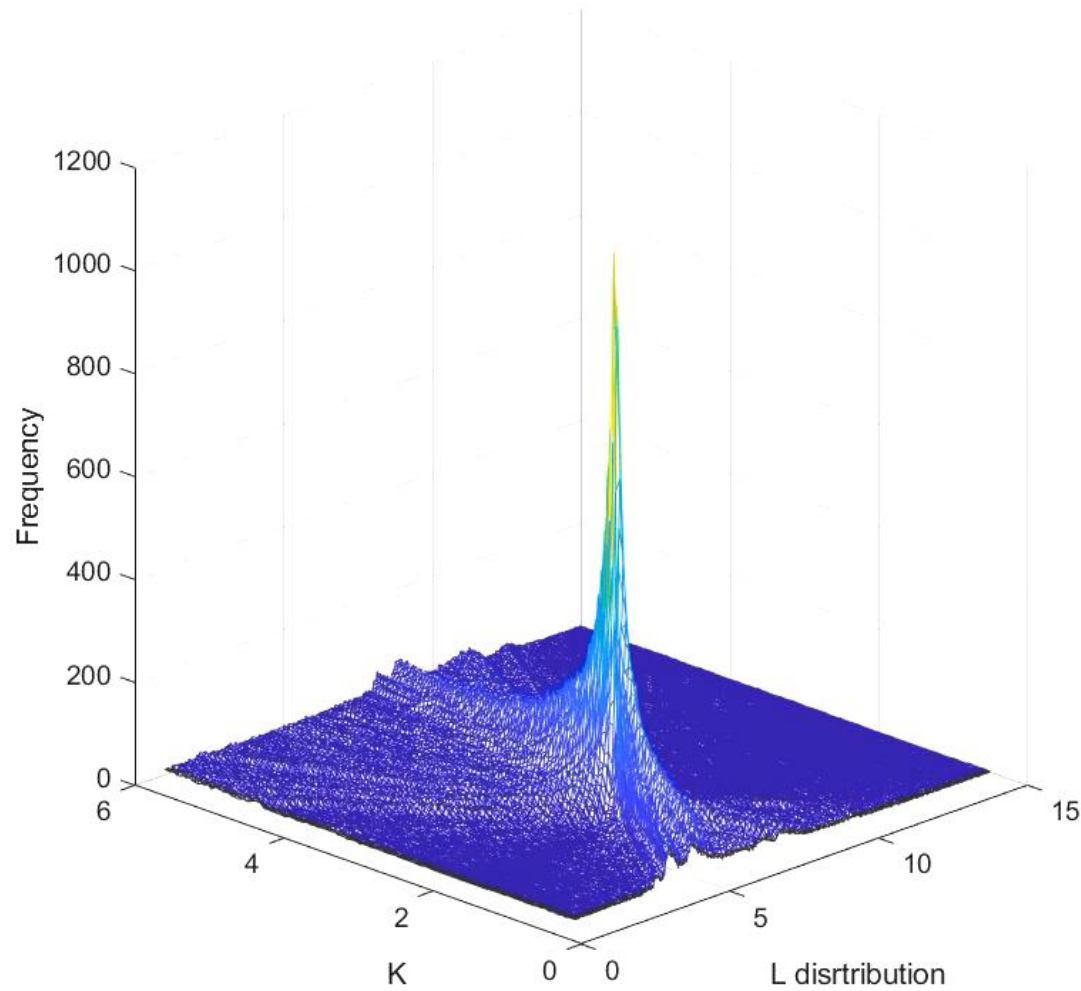
$$W_{dK} = 11.796 \cdot e^{-0.1124 \cdot SNR}$$

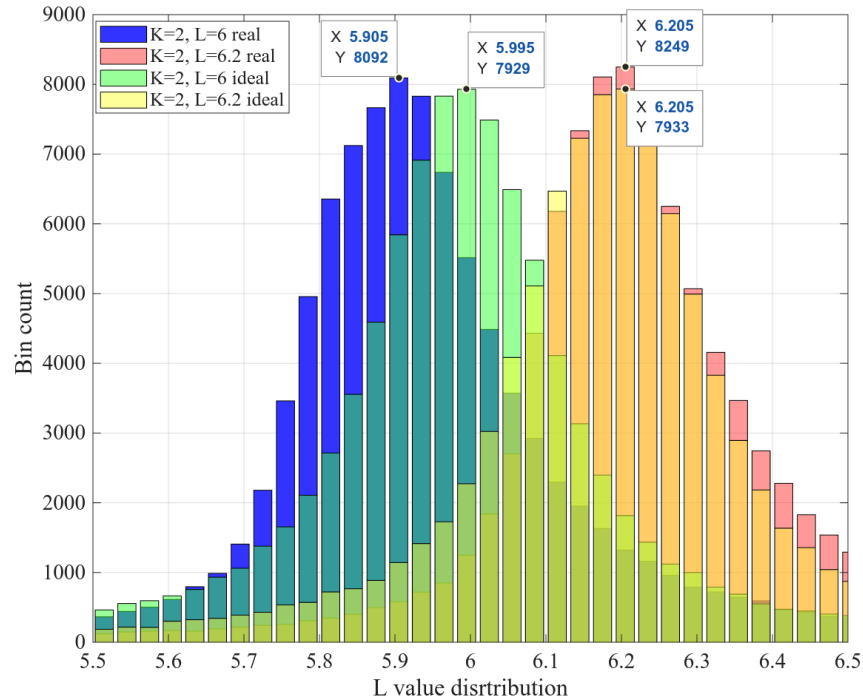
$$W_{dL} = 2.344 \cdot e^{-0.159 \cdot SNR}$$











Пари керуючих параметрів	Реалізація генератора хаосу	
	Ідеальний	Реальний
K=2 L=6	$\delta_{\%} = 0.08\%$	$\delta_{\%} = 1.58\%$
K=2 L=6.2	$\delta_{\%} = 0.08\%$	$\delta_{\%} = 0.08\%$

Основне відхилення полягає у різниці в ~ 0.1 при визначені керуючого параметру L реального генератора хаосу при заданому значенні L 6.0. При заданому значенні L 6.2 відхилень визначеного значення від заданого не спостерігається.

- Запропоновано метод відновлення біфуркаційних параметрів, що полягає в дослідженні часових рядів сигналів фазових змінних деякої практичної реалізації хаотичного генератора із використанням рівнянь еволюції заданого хаотичного генератора.
- Створена практична реалізація системи реального часу для відновлення значень біфуркаційних параметрів на основі апаратної платформи аналогового хаотичного генератора Ракліджа.
- Розроблено алгоритм відновлення значень пари біфуркаційних параметрів на основі цифрової обробки сигналів фазових змінних, що дозволив отримати відносну похибку оцінювання значень декількох біфуркаційних параметрів, що не перевищує 1%.
- Кількісно встановлено нелінійний компроміс між рівнем завад та розміром вікна фільтру опосереднення, а також наявність порогу деградації точності, визначено межі достовірного відновлення біфуркаційних параметрів.
- Реалізовано апаратний прототип з використанням цифрових потенціометрів, керуванням через Bluetooth та OLED-індикацією, і стенд «Хаотичний генератор – LAN-осцилограф – Matlab» для зчитування та обробки сигналів.

Запропонований метод може стати основою для подальших досліджень та експериментів по передачі інформації за допомогою хаотичних сигналів із перенесення алгоритму на вбудовані платформи.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ

Направляється студент Разовий Олександр Олегович на захист дипломного проєкту (роботи)
(прізвище, ім'я, по батькові)

за спеціальністю 172 - Електронні комунікації та радіотехніка

На тему: Метод відновлення значень біфуркаційних параметрів хаотичного генератора

Дипломний проєкт (робота), рецензія і довідка про перевірку на плагіат додаються.

Декан факультету



Тетяна Тобордицево
(ім'я, прізвище)

ДОВІДКА УСПІШНОСТІ

Разовий О.О. з 2024 по 2025 роки повністю виконав навчальний план спеціальності з таким розподілом оцінок за:

національною шкалою: відмінно 12,50 %, добре 25,00 %, задовільно 62,50 %.

шкалою ЄКТС: А 15,38 %, В 0,00 %, С 15,38 %, D 15,38 %, E 53,85 %.

Методист факультету

Григор'єв
(підпис)

Товшкова Катерина
(ім'я, прізвище)

ВИСНОВОК КЕРІВНИКА ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ (РОБОТИ) ТА ОБГРУНТУВАННЯ ОЦІНКИ

Студент Олександр РАЗОВИЙ, під час роботи над кваліфікаційним проєктом вивчив практичні здібності щодо фізичної реалізації записаних точних рішень та складання інформаційно-вимірної частини комплексу ДАУ отримання практичних результатів щодо записаних вихідних даних обробки хаотичних сигналів.

Оцінка дипломного проєкту (роботи)

Відмінно

Керівник дипломного проєкту

Олег Пубовар
(підпис)

Олег Пубовар
(ім'я, прізвище)

" 14 " 12 2025 р.

ВИСНОВОК КАФЕДРИ ПРО ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ)

Дипломний проєкт (роботу) розглянуто. Студент Разовий О.О. допускається до захисту цього проєкту (роботи) в екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедри

Телекомунікацій, медичних та інтелектуальних
(назва)

Саргис ПИЛУЧЕНКО
(підпис, ім'я, прізвище)

Технічної

" 14 " 12 2025 р.

Anti-Plagiarism (UA) v-16.690

The maximum coincidence with one document 0.0%

Dictionaries check: UA, US, RU. Errors in the documents: 12%

ID: 252740 Title: Метод відновлення значень біфуркаційних параметрів хаотичного генератора Added in a DB: 2025-12-13 Authors: Разовий Олександр Олегович Heads: Пивовар Олегович Сергійович Consultants: Opponents:	Document		Sum coincidence on the DB	
	Symbols	Lexemes	Symbols	Lexemes
	95379	1365	1416 (1%)	26 (2%)

Plagiarism sources

ID	Description	Plagiarism presence in the document	
		Symbols	Lexemes

Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Олександр_РАЗОВИЙ_ЕКРМ-24-1

Співавтор:

Назва: Метод відновлення значень біфуркаційних параметрів хаотичного генератора

Науковий керівник: Олег ПИВОВАР, к.т.н., доц.

Підрозділ: Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

Коефіцієнт подібності 1: 6.2%

Коефіцієнт подібності 2: 1%

Мікропробіли: 0

Заміна букв: 6

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2025-12-14 07:23:00.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

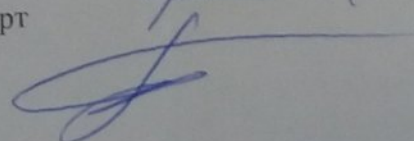
Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедурам. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування: *Виявлені запозичення є випадковими збігами та текстами форми тижневих бланків та антиплагіатом не є.*

Дата *14.12.2025*

експерт

Пивовар Олег Сергійович (каф.ТМІТ)


Завідувачу кафедри
телекомунікацій, медійних та
інтелектуальних технологій (ТМІТ)
Підченко С.К.
здобувача вищої студента
2 курсу, гр. ЕКРм-24-1
Разового Олександра Олеговича

ЗАЯВА

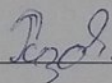
З правилами чинного Положення «Про дотримання академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті» від 26.09.2020 (зі змінами від 26.11.2020), згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений. Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщена та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

14.12.25

дата



підпис

Олександр РАЗОВИЙ

РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ, МЕДІЙНИХ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Назва: Метод відновлення значень біфуркаційних параметрів хаотичного генератора

Автор: **Разовий Олександр Олегович**

Освітня програма: **Телекомунікації, медійні технології та інтелектуальні мережі**

Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень

Спеціальність: **172 Електронні комунікації та радіотехніка**

Науковий керівник: **к.т.н., доц. Пивовар Олег Сергійович**

На основі аналізу кваліфікаційної роботи на дотримання вимог академічної доброчесності (у т.ч. відсутності ознак академічного плагіату) з урахуванням результатів перевірки роботи спеціалізованим програмним засобом(ами) комісія зробила такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Ознаки академічного плагіату	
1.1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є академічним плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних, якщо потрібно). Робота приймається до захисту.	відповідає
1.2	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована.	
1.3	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота може бути допущена до захисту після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
1.4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
2	Інші види порешень академічної доброчесності	

Підтвердження:

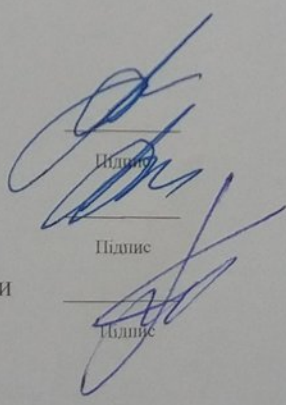
Виявленні запозичення не є плагіатом, так як розміщені у розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження (є власні терміни, визначення тощо), коефіцієнти подібності складають 6,2% та 0,0%, співпадиння мають посилання на приведенний список літературних джерел.

« 14 » 12 2025 р.

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи



Сергій ПІДЧЕНКО

Сергій ПІДЧЕНКО

Олег ПИВОВАР

ВІДГУК

на дипломну роботу студента групи ЕКРм-24-1

Разового Олександра Олеговича

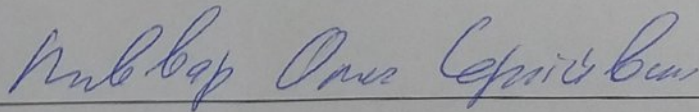
«Метод відновлення значень біфуркаційних параметрів хаотичного генератора»

Розроблений метод відновлення значень параметрів хаотичного генератора показав доволі високу точність як на сигналах з ідеальної моделі так і на сигналах апаратного генератора хаосу. Основною особливістю роботи є реалізація саме апаратного прототипу генератора та стенду для його дослідження, що дає змогу задавати параметри генератора і застосовувати методи цифрової обробки його вихідних сигналів у реальному часі. Також, у роботі описана залежність якості відновлення значень параметрів генератора від рівня сигнал/шум та сили фільтрації, що дозволяє обрати оптимальні параметри при обробці сигналів, переданих через канал зв'язку.

Під час виконання дипломної роботи студент Разовий О. О., з належною наполегливістю віднісся до вирішення поставлених завдань, зарекомендував себе кваліфікованим спеціалістом в області електронних комунікацій та радіотехніки з глибокими системними теоретичними знаннями та добрими практичними навичками.

В цілому дипломна робота Разового Олександра Олеговича «Метод відновлення значень біфуркаційних параметрів хаотичного генератора» відповідає вимогам до дипломних робіт та заслуговує на оцінку «відмінно», а сам автор – на присвоєння кваліфікаційного рівня магістр зі спеціальності 172 – «Електронні комунікації та радіотехніка».

Науковий керівник



«14» 12 2025 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Дипломник: Разовий Олександр Олегович

Тема: Метод відновлення значень біфуркаційних параметрів хаотичного генератора

Спеціальність: 172 Електронні комунікації та радіотехніка.

Обсяг дипломної роботи

Кількість сторінок пояснювальної записки 84

1.Короткий зміст дипломної роботи та прийнятих рішень: Дипломна робота "Метод відновлення значень біфуркаційних параметрів хаотичного генератора" присвячена розробці методу, що дозволить відновити значення керуючих параметрів хаотичного генератора Ракліджа по часових рядах його вихідних сигналів. В перспективі, керуючі параметри генератора можна використати для кодування інформації, що в сукупності з властивостями хаотичних сигналів (широкосмуговість, шумоподібність) створить можливість її прихованої передачі.

2.Висновок про відповідність дипломної роботи завданню: Зміст дипломної роботи повністю відповідає завданню

3.Характеристика виконання кожного розділу: У першому розділі виконано огляд і критичний аналіз наявних підходів до відновлення параметрів хаотичних систем, виокремлено ключові проблеми практичної ідентифікації та сформовано вимоги до методу. Окремо акцентовано увагу на впливі апаратних обмежень та необхідності компромісу між складністю алгоритму й можливостями реалізації в реальному часі. В другому розділі наведено математичну модель генератора Ракліджа, розкрито фізичний зміст керуючих параметрів, обґрунтовано вибір робочого хаотичного режиму та запропоновано підхід оцінювання, орієнтований на статистичний аналіз форми сигналу. Підкреслено наукову новизну: метод ґрунтується на аналізі часових рядів і виведеному унікальному характеристичному рівнянні, а також передбачає практичну реалізацію у реальному часі. У третьому розділі досліджено завадостійкість в умовах адитивного шуму, визначено порогові межі достовірного відновлення, отримано узагальнювальні експоненційні моделі та реалізовано апаратний прототип. Підтверджено ефективність на реальному генераторі та наведено порівняння з ідеальною моделлю.

4.Позитивні сторони дипломної роботи: 1. Чітко сформульовані мета, об'єкт і предмет, орієнтація на роботу в умовах шумів та апаратних похибок. 2. Наукова новизна: метод

відновлення параметрів, що спирається на часові ряди та унікальне характеристичне рівняння, з фокусом на практичну реалізацію. 3. Практична спрямованість і верифікація: реалізовано апаратний прототип та стенд, виконано перевірку на реальних даних. 4. Доволі висока точність: для ідеального генератора наведено похибку близько 0.1%, для апаратної реалізації показано можливість виявляти відхилення (приклад для $L=6$ — $\approx 1.58\%$). 5. Завадостійкість підтверджена кількісно: визначені пороги SNR/параметри згладжування та запропоновано правило адаптивного вибору вікна за оціненим SNR.

5.Негативні сторони дипломної роботи: Серед недоліків роботи можна відмітити обмежену універсальність і сфокусованість на одному об'єкті: метод розроблено саме для генератора Ракліджа та його керуючих параметрів, тому переносимість на інші хаотичні системи потребує окремого обґрунтування.

6.Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки дипломної роботи: З точки зору оформлення дипломна робота представлений 10 презентаційними слайдами і пояснювальною запискою обсягом 84 сторінки, що складається з трьох розділів. Оформлення пояснювальної записки знаходиться на належному рівні, послідовність викладення матеріалу є логічною та зрозумілою. Графічне оформлення виконано відповідно до теми кваліфікаційного проекту. Пояснювальна записка оформлена згідно вимог чинних стандартів

7.Відгук про дипломну роботу в цілому: Виконана робота відповідає загальним вимогам, що пропонуються до дипломних робіт магістра.

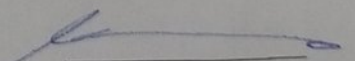
8.Інші зауваження: Немає

9.Оцінка дипломної роботи: Розглянувши представлену роботу, вважаю що вона заслуговує оцінки "відмінно", а Развий Олександр Олегович – присвоєння кваліфікації магістра зі спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка.

10. Рецензент (прізвище, ім'я, по-батькові, місце роботи)

Класов Юрій Петрович, к.т.н., доцент,
зав. кафедрю кібербезпеки ХНУ

«15» 12 2025р.


підпис