

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інформаційних технологій

Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

ДИПЛОМНА РОБОТА

Другий (Магістерський)

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 172 Електронні інформаційно-комунікаційні системи та мережі

Шифр і назва освітньої програми

на тему Метод оптимізації каналу зв'язку в умовах системних завад

ДРМЕКР 2023159.01.01ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група ЕКР_м-23-1


підпис

М.Л. Каменяр

Ініціали, прізвище

Керівник: к.т.н., доц.


підпис

О.С. Пивовар

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри: д-р техн. наук, проф.


підпис

С.К. Підченко

Ініціали, прізвище

9 12 2024 р.

Хмельницький, 2024

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій (ТМІТ)
Освітній рівень другий (магістерський)
Галузь знань 17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації
Спеціальність 172 – Електронні комунікації та радіотехніка
Освітня-професійна програма 172 - Електронні інформаційно-комунікаційні системи та мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою ТМІТ

С.К. Підченко

«1» 09 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Каменяру Миколі Леонідовичу

1 Тема роботи: Метод оптимізації каналу зв'язку в умовах системних завад

Керівник роботи Пивовар Олег Сергійович, к.т.н, доцент.

Затверджено наказом по університету від «26» 08 2024р. № 60

2 Строк подання студентом роботи на кафедру: 01.12.2023р.

3 Вихідні дані (характеристика об'єкта, умов дослідження та ін.)

Мета роботи: покращення завадостійкості передачі цифрових повідомлень в каналах зв'язку із застосуванням хаотичної обробки сигналів.

Об'єктом дослідження є процес передачі інформації в електронних комунікаціях.

Предметом дослідження є методики використання хаотичних режимів роботи для забезпечення завадостійкості електронних комунікацій в умовах системних завад.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)

1. Аналіз систем передачі інформації із застосуванням хаотичних принципів обробки. 2. Поняття системних завад та їх характеристик. 3. Аналіз конструктивного та деструктивного впливу системних завад в нелінійних хаотичних каналах передачі. 4. Синтез та дослідження каналів із хаотичною обробкою для завада із різними характеристиками. 5. Розробка методик та формулювання рекомендацій щодо побудови бінарного каналу зв'язку із хаотичними сигналами в умовах системних завад.

Завдання отримав  М.Л. Каменяр

Науковий керівник  О.С. Пивовар

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

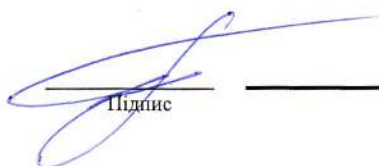
№ п/п	Назва етапів (розділів) дипломної роботи	Строк виконання етапів дипломної роботи	Примітка
1	Вибір тематики	до 5.09.24	обрано
2	Аналіз початкових даних	5.09. 24-14.09. 24	проаналізовано
3	Написання вступу та 1 розділу (аналіз)	15.09. 24-30.09. 24	виконано
4	Написання 2 розділу (аналогії та моделі)	1.10. 24-14.10. 24	виконано
5	Оформлення та подання публікацій	10.10. 24-21.10. 24	подано
6	Написання 3 розділу (розробка моделей)	15.10. 24-30.10. 24	виконано
7	Імітаційне моделювання та аналіз результатів	1.11. 24-14.11. 24	виконано
8	Обробка експериментальних даних, оформлення графічної частини (4 розділ)	10.11. 24-21.11. 24	виконано
9	Оформлення текстової частини, синтез доповіді	21.11. 24-30.11. 24	виконано
10	Виправлення зауважень, помилок, підготовка до захисту	17.11. 24-24.11. 24	враховано
11	Антиплагіат та опонування	21.11. 24-1.12. 24	пройдено
12	Подання готового проекту	1.12. 24	виконано

Здобувач ступеня магістр



М.Л. Каменяр
Ініціали, прізвище

Керівник роботи



О.С. Пивовар
Ініціали, прізвище

РЕФЕРАТ

Дипломна робота магістра 2-го курсу гр. ЕКРРм-23-1 Каменяр Миколи Леонідовича на тему «Метод оптимізації каналу зв'язку в умовах системних завад» виконана на кафедрі «Телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій» Хмельницького національного університету у 2024р. Керівник роботи к.т.н, доц. Пивовар Олег Сергійович.

Робота складається із вступу, 4 розділів, висновків по роботі, переліку із 42 джерел посилання. Обсяг основного змісту роботи складає 88 сторінок і містить 43 рисунків і 1 таблицю на 39 сторінках по тексту та 34 аналітичних залежностей. Обсяг роботи (без додатків)- 104 сторінки.

В роботі розглядається вплив системних завад на бінарний хаотичний канал передачі із модуляцією хаотичних режимів на приймальному боці та детектуванням бінарного сигналу на основі ідентифікації хаотичних режимів за допомогою допоміжного хаотичного генератора. Запропонована модель системної завади та схема її адитивної взаємодії із канальним хаотичним сигналом, ряд критеріїв збігу еволюцій хаотичних генераторів на приймальному боці та на основі імітаційного моделювання здійснено їх оптимальний вибір з точки зору забезпечення максимального рівня ідентифікації логічних рівнів в умовах системних завад.. Обґрунтовано місце та тип локальних нелінійних блоків в каналі зв'язку. В середовищі MATLAB/Simulink проведено імітаційне моделювання хаотичного бінарного каналу передачі за умови дії потужних системних завад .

Ключові слова: хаотичний канал, системна завада, хаотична синхронізація детермінований хаос.

ABSTRACT

Master's thesis proposal "Method for Optimizing a Communication Channel in the Presence of Systemic Interference" written by Kamenyar Mykola Leonidovych, a 2nd-year student of group EKRRm-23-1 at the Department of Telecommunications, Media, and Intellectual Technologies of Khmelnytskyi National University in 2024. Academic advisor: Pyvovar Oleh Serhiyovych, Ph.D., Associate Professor at the TMIT Department.

The thesis consists of an introduction, four sections, conclusions, a list of 42 references, .The main body of the thesis is 88 pages, containing 43 figures and one table (spread across 46 pages of text), and 34 analytical relationships. The total length of the thesis is 104 pages.

The paper examines the influence of systemic interference on a binary chaotic transmission channel, with modulation of chaotic modes on the receiving side and detection of the binary signal based on the identification of chaotic modes using an auxiliary chaotic generator. A model of systemic interference and its additive interaction with the chaotic channel signal is proposed. Several criteria for the synchronization of chaotic generators on the receiving side are introduced, and, through simulation modeling, the optimal selection of these criteria is made to ensure the maximum identification level of logical states under conditions of systemic interference. The placement and type of local nonlinear blocks in the communication channel are substantiated. Using MATLAB/Simulink, simulation modeling of a chaotic binary transmission channel under the influence of powerful systemic interference is performed.

Keywords: chaotic channel, systemic interference, chaotic synchronization, deterministic chaos.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ	8
ВСТУП	9
1 НЕЛІНІЙНІ ДИНАМІЧНІ СИСТЕМИ В ЕЛЕКТРОННИХ КОМУНІКАЦІЯХ.....	15
1.1 Особливості нелінійної динаміки.....	15
1.1.1 Узагальнений механізм нелінійного явища в електроніці.....	15
1.1.2 Опис нелінійних динамічних систем	17
1.2 Фазовий простір та поведінка нелінійних динамічних систем.....	21
1.2.1 Поведінка нелінійних динамічних систем у фазовому просторі	21
1.2.2 Поведінка системи за показниками Ляпунова.....	24
1.3 Хаотичний режим нелінійної системи.....	27
1.3.1 Властивості хаотичної динаміки	27
1.3.2 Ідентифікація режимів роботи нелінійної системи.....	28
1.3.3 Відмінні риси хаотичних процесів.....	31
2 ЗАВАДИ В КАНАЛАХ ЗВ'ЯЗКУ.....	34
2.1 Деструктивні фактори в каналі зв'язку.....	34
2.2 Поняття завадостійкості.....	37
2.2.1 Реальна та потенційна завадостійкості.....	37
2.2.2 Класичні завдання теорії завадостійкості.....	39
2.2.3 Поріг завадостійкості дискретної передачі	41
2.3 Системні завади.....	43
2.3.1 Системні завади в електромагнітній сумісності.....	43
2.3.2 Внутрішньосистемні завади в хаотичних каналах зв'язку.....	46
3 МОДЕЛІ СИСТЕМНИХ ЗАВАД ТА ПРИСТРОЇВ ХАОТИЧНОЇ ОБРОБКИ	50
3.1 Взаємодія інформаційного повідомлення з хаотичним.....	50
3.1.1 Маскування сигналом детермінованого хаосу	50

	7
3.1.2 Нелінійне підмішування інформаційного сигналу.....	52
3.1.3 Внутрішня цифрова хаотична модуляція хаотичних режимів.....	54
3.2 Синтез моделі системних завод.....	56
3.2.1 Нелінійна динамічна система Rucklidge.....	56
3.2.2 Імітаційна модель системних завод.....	60
3.2.3 Параметри системної заводи хаотичного каналу.....	62
3.3 Модель взаємодії сигналу та заводи в хаотичному каналі зв'язку.....	66
3.3.1 Схема та алгоритм пропорційної взаємодії.....	66
3.3.2 Моделювання пропорційної взаємодії.....	69
4 ПРАКТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СИСТЕМНИХ ЗАВАД.....	72
4.1 Імітаційне моделювання окремих блоків.....	72
4.1.1 Декомпозиція моделі Rucklidge для синхронізації.....	72
4.1.2 Моделі енергетичних критеріїв збігу.....	73
4.1.3 Моделі фазових критеріїв збігу.....	75
4.1.4 Моделі мінімаксних критеріїв збігу еволюцій.....	78
4.2 Імітаційне моделювання системи передачі.....	81
4.2.1 Верифікаційна модель системи.....	81
4.2.2 Імітаційна модель для дослідження.....	84
4.3 Вихідні дані для проведення досліджень.....	86
4.3.1 Параметри хаотичної модуляції.....	86
4.3.2 Ініціалізація схеми для досліджень.....	89
4.4 Результати досліджень.....	90
ВИСНОВКИ.....	95
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	97
ДОДАТОК А АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НА КОНФЕРЕНЦІЇ.....	102
ДОДАТОК Б АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ У ФАХОВОМУ ЖУРНАЛІ.....	105

СКРОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

ААТ – ААТ

ГДХ – генератор детермінованого хаосу

КРЗ – критерій рівня збігу

МХС – модульований хаотичний сигнал

НЕЛ – нелінійний елемент

НДС – нелінійна динамічна система

СДХ – сигнал детермінованого хаосу

ТМІТ – кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

ФЗ – фазова змінна

ФТР – фазова траєкторія

ФПР – фазовий простір

ШПС – шумоподібний сигнал

ХНУ – хмельницький національний університет

ХМ – хаотична модуляція

ХСХ – хаотична синхронізація

SNR – відношення сигнал шум

SHR – відношення сигнал – системна завада

RMS – середньоквадратичне відхилення

ВСТУП

Розробка каналів зв'язку, робота яких ґрунтується на відмінних від класичних [1-7] принципах обробки сигналів все більше пригортає увагу фахівців в калужі електронних комунікацій та радіотехніки (ЕКР). Одним із напрямків досліджень в цій галузі є застосування нелінійних динамічних систем (НДС) в режимі генерації сигналів детермінованого хаосу (СДХ) та подальшого їх використання в системі передачі інформації із застосуванням хаотичної синхронізації (ХСХ) роботи приймача та передавача [8].

Саме завдяки ХСХ взаємодіючих НДС можливе досягнення високого рівня таких важливих показників роботи системи електронних комунікацій як високий рівень багатоканальності, прихованості дії, завадостійкості, інтеграції функціональних блоків тощо [9]. Такі позитивні якості подібних систем обумовлені використанням більш узагальнених підходів до нелінійних явищ під час обробки шумоподібних сигналів (ШПС) [10].

Нелінійні принципи із СДХ знайшли своє місце те тільки в ЕКР але і під час роботи із медичними, біологічними, хімічними, соціальними процесами та явищами, тощо [8]. Важливість нелінійних підходів обумовила різке зростання кількості наукових публікацій у рецензованих виданнях Web of Science та Scopus. Численні фахівці намагаються знаходити нові способи використання СДХ та нові режими ХСХ, більшість яких підтверджується складним імітаційним моделюванням [11-18]. Однак, спроб практичного використання СДХ в ЕКР на даний час замало, а відкритих питань з комплексної ефективності їх застосування забагато [19-30].

Одним із важливих для ЕКР та обмежено вивчених питань, є застосування різних типів ХСХ в умовах системних завод. Піонерські дослідження в цьому напрямку були здійснені Н.Ф. Рувльовим (із співавторами) ще у 1995р., де запропоновано застосувати в системі зв'язку метод допоміжної НДС, що названо авторами методом найближчих сусідів

[28-30]. Подальші дослідження підтвердили високу ефективність застосування цього методу.

Математичне обґрунтування можливості застосування ХСХ представлено К. Пірагасом приблизно в той самий час. Автор запропонував спосіб ідентифікації режиму ХСХ шляхом застосування умовних показників Ляпунова для наявних НДС, що описуються системою диференційно-інтегральних рівнянь, а також запропонував спосіб класифікації ХСХ.

Надалі в науковому середовищі представлено публікації [8] в яких основні засади реалізації ХСХ підтверджувались на практиці. Також в цих роботах висвітлювались можливості нових методик ідентифікації появи різних видів ХСХ та методик забезпечення підтримки механізмів для певного виду ХСХ та їх глибинних зв'язків із іншими типами еволюцій в НДС, що взаємодіють між собою через обмін енергією СДХ.

Однак, через відсутність узагальнених рішень для складних НДС отримані результати лише для обмеженої кількості НДС та обмежених діапазонах впливу збурюючих факторів. Останнім часом підтверджено [10], що режим ХСХ спостерігається в мережах НДС, де проблематика побудови моделей та їх дослідження пов'язана із значними технічними та методологічними труднощами. Ці труднощі полягають у хибній думці, що всі методики ХСХ для односпрямованого зв'язку також справедливі для двобічного зв'язку між багатьма НДС, а метод найближчих сусідів можливо поширити і на подібні складні випадки. Таким чином відкривається велике поле для досліджень, що полягає у розробці методів контролю, оптимізації та ідентифікації хаотичних режимів, а універсальних способів використання різних НДС із хаотичними режимами роботи.

Крім того, доволі відкритим питанням залишається режими ХСХ із перемежуванням де СДХ діють разом із класичними сигналами на межі нелінійного збудження, а поява ХСХ характеризується неповнотою та непередбачуваністю періоду. Одним із підходів до розгляду цього явища є розгляд системи генераторів детермінованого хаосу (ГДХ) в умовах завад

індукованих шумом, де в якості зовнішнього впливу застосовуються СДХ, що створюються «паразитними» НДС різної структури, або спорідненими НДС у відмінних хаотичних режимах. За таких умов часто викликає можливість одночасного існування в глобальній НДС цілого ряду механізмів перемежування, виявлення яких може використовуватись в рамках ідентифікації введеного в опорний ГДХ інформаційного цифрового повідомлення [17-19].

Найбільш перспективною методологічною основою для досліджень в галузі НДС, що взаємодіють між собою та налаштовані таким чином, щоб генерувати СДІ є декомпозиція складної НДС до НДС меншого порядку, що взаємодіють між собою за допомогою односпрямованого зв'язку, що дозволяє вводити збурення в лінію передачі між ними, і , таким чином, проводити дослідження та узагальнення впливу на поведінку сукупної фазової траєкторії в межах фазового простору(ФПР) із утворенням нових, або деформації існуючих дивних атракторів (ДАТ) як основних показників сукупної еволюції НДС в хаотичному режимі [11,13-15,23].

Отже через нелінійність обробки в системах передачі інформації, що використовують як несівні сигнали – сигнали детермінованого хаосу (СДХ) передбачити вплив завад, із різними розподілами і різними параметрами та структурою, властивою хаотичним сигналам є важливим завданням та актуальною проблемою на даний час.

Метою роботи є: покращення завадостійкості передачі цифрових повідомлень в каналах зв'язку із застосуванням хаотичної обробки сигналів.

Для досягнення мети роботи під час виконання кваліфікаційної роботи магістра слід вирішити наступні **завдання**:

1. Аналіз досягнень теорії та практики використання нелінійних динамічних систем в галузі електронних комунікацій та радіотехніки для побудови каналів зв'язку на основі хаотичних методів та способів обробки сигналів.

2. Формалізація проблематики утворення та впливу системних завад лінії передачі на канали зв'язку із використанням методів хаотичної нелінійної динаміки.

3. Розробка методу оптимізації впливу системних завад різних класів та типів на передачу цифрових сигналів в каналах зв'язку із хаотичною піднесівною.

4. Створення та дослідження моделей впливу системних завад на хаотичні канали зв'язку із використанням методу узагальненої системи на приймальному боці.

Об'єктом дослідження є процес передачі інформації в електронних комунікаціях.

Предметом дослідження є використання хаотичних режимів роботи для забезпечення завадостійкості електронних комунікацій в умовах системних завад.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Запропоновано метод синтезу моделі системних завад для застосування в каналах передачі із хаотичною піднесівною, що полягає у застосуванні обробки сигналу дискретного генератора числових рядів із гаусівським розподілом фільтром подвійного інтегрування який забезпечує співмірність спектрів та схожість структури завади відповідно модульованому хаотичному сигналу.

2. Запропоновано спосіб пропорційної взаємодії системної завади та сигналу в хаотичному каналі передачі, що передбачає стабілізацію сукупного середнього рівня суміші сигнал – системна завада на вході хаотичного детектора, що забезпечує різке зменшення динамічного діапазону пристроїв обробки хаотичного сигналу за умови низьких відношень сигнал-системна завада до 45дБ.

3. Удосконалено ряд критеріїв збігу еволюції нелінійних динамічних систем, що враховують фазові та амплітудні особливості сигналів детермінованого хаосу під час процесу детектування бінарних повідомлень в

хаотичних каналах передачі. Із запропонованих критеріїв шляхом імітаційного модулювання найбільш оптимальним для роботи в умовах системних завад виявився відносний різницево-фазовий критерій, під час застосування якого для забезпечення достатнього рівня завадостійкості реалізується найменше відношення сигнал-системна завада у 5дБ.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Розроблені моделі системних завад та їх взаємодії із канальними хаотичними сигналами та проведено їх верифікацію із підтвердженням високого рівня адекватності.

2. Розроблені Simulink моделі для реалізації удосконалених критеріїв збігу еволюцій хаотичних генераторів під час однобічної синхронізації. Проведено їх верифікацію із підтвердженням високого рівня адекватності..

3. Розроблено верифікаційну Simulink модель системи передачі бінарної інформації із хаотичними піднесівними, що передбачає паралельну симуляцію передачі логічних станів бінарного сигналу та визначення рівня їх ідентифікації за заданим критерієм збігу еволюцій основного та допоміжного генераторів. Верифікаційна модель забезпечує можливість перевірки адекватності роботи системи в окремих точках спектральної, часової, критеріальної, ймовірнісної, тощо, зони досліджень. Рекомендовано діапазон SHR від -40 до +40 дБ, та діапазон «сили зв'язку» 85% до 95%. Вказано, що стійкість до системних завад орієнтовно на 20 дБ слабша порівняно із впливом шумів.

4. Розроблена оптимізаційна модель хаотичної системи передачі інформації в середовищі Matlab/ Simulink, що відрізняється високою швидкодією та проведено її симуляцію із метою визначення стійкості до системних завад. В результаті досліджень цієї моделі встановлено мінімальне мінімальний рівень відношення сигнал – системна завада в хаотичній системі передачі із модуляцією хаотичних режимів, що має складати близько 10дБ, за умови рівня ідентичності більше 5дБ та застосування запропоновано автором, найбільш оптимального різницево-фазового критерію рівня збігу

еволюції нелінійних динамічних систем Rucklidge на прийнятному боці хаотичної системи передачі із модуляцією хаотичних режимів.

Апробація результатів досліджень. Результати досліджень представлені на щорічній науковій всеукраїнській конференції «Військова освіта і наука: сьогодення та майбутнє» м. Київ 2024, що відбулась 26.11.24 (додаток А), а також у вигляді статті в фаховому науковому журналі «Вісник ХНУ» №5, 2024р (додаток Б).

Методи досліджень. Теорії випадкових величин ймовірностей їх розподілу, теорії електричних кіл та сигналів та теорії їх впливу на роботу систем електронних комунікацій, методи математичної статистики, теорії нелінійних електричних кіл, основ теорії нелінійних систем та методи побудови диференціальних рівнянь їх опису, методи аналітичного, функціонального та імітаційного моделювання в системі імітаційного блоково-матричного моделювання MATLAB/SIMULINK, а також використані можливості офісного програмне забезпечення MS Office для оформлення та представлення результатів виконання кваліфікаційної роботи магістра.

1 НЕЛІНІЙНІ ДИНАМІЧНІ СИСТЕМИ В ЕЛЕКТРОННИХ КОМУНІКАЦІЯХ

1.1 Особливості нелінійної динаміки

1.1.1 Узагальнений механізм нелінійного явища в електроніці

Механізм появи нелінійних явищ природно залежать від особливостей досліджуваних процесів, що спричиняє обмін енергією між об'єктами, пристроями, елементами, структурами тощо. Якщо подати в голову процесу аналізу рівень енергетичного обміну, то можливо в досить узагальненому випадку зазначити універсальну причину нелінійної поведінки [9].

Нелінійність розгляду з'являється в тих випадках, якщо електромагнітний процес характеризується порівняно великим рівнем використаної енергії, а також високими темпами змін, аж до квантових стрибків, різкими перепадами температур тощо.

Тобто, якщо охарактеризувати процес густиною енергії джерела збудження $E_{зб}$, і поточною густиною енергії процесу $E_{пр}$, то прояв нелінійності буде істотним у випадку якщо виконується умова:

$$E_{зб} > E_{пр} . \quad (1)$$

А лінійність домінуватиме під час розгляду за умови:

$$E_{зб} \ll E_{пр} \quad (2)$$

В радіотехніці, а саме в теорії коливальних процесів [6], більш зручно застосовувати поняття амплітуди зовнішньої збуджуючої дії - $A_{зб}$, що практично завжди вживається для опису гармонічних та квазігармонічних кіл

та сигналів, а також амплітуду діючих в системі сигналів A_c , що описує динаміку обробки сигналів в пристрої. За таких визначень (1) та (2) лінійна теорія розгляду застосовується за умови :

$$A_{зб} \ll A_c, \quad (3)$$

в інших випадках слід застосовувати нелінійні методи досліджень поведінки системи.

Узагальнюючи вищеподане (3), ввести узагальнюючий параметр:

$$\mu = \frac{E_{зб}}{E_{np}} = \frac{A_{зб}}{A_c}, \quad (4)$$

що вказує на наближення від нелінійної форми опису до лінійної.

За умови (4) аналітичні нелінійні рівняння моделі процесу лінеаризуються за сукупністю діючих параметрів та їх співвідношень, тобто можливий перехід від диференційної форми представлення залежностей до алгебраїчної [1,2].

Таким чином, лінійні моделі завжди є граничним випадком нелінійних моделей електромагнітних явищ та процесів за умови $\mu \rightarrow 0$. З філософських позицій в даному випадку робиться висновок, що фізика опису нелінійних процесів та явищ набагато більш «потужна» за фізику лінійних явищ, яку зазвичай розглядають на початкових етапах опанування теорії обробки сигналів в електронних комунікаціях [2,4].

Однак, завжди суттєвим є те, що проявами нелінійності неможливо нехтувати навіть якщо виконуються умова (4), наприклад, якщо радіосигнал поширюється в однорідному середовищі практично без дисперсії та поглинання (наприклад, в атмосфері Землі у спокійному стані), але досить довго (на великі відстані). В такому випадку нелінійні ефекти

нагромаджуються і врешті решт переважають. Чим менша відстань, тим менший вплив нелінійностей, але нехтувати ними на 100% неприпустимо [6,7].

Дисперсія, як розсіювання електромагнітних хвиль на неоднорідностях та дисипація як перетворення концентрованої енергії сигналу в шумоподібні форму часто перешкоджають остаточним проявам впливу нелінійностей лінії передачі на сигнал. Наприклад, через дисипацію сигнал може поглинутись до того, як нелінійні прояви лінії передачі стануть вагомими[7].

Всім відомо, що найбільш узагальненої теорією радіотехніки є рівняння Максвелла, однак вони носять лінійний характер щодо своїх змінних. Тому завдяки чому йдеться про нелінійності? Правильна відповідь на це запитання лежить в площині вирішення цих рівнянь за допомогою встановлення граничних умов для поширення електромагнітної хвилі, в які входять параметри та конфігурація середовища, що завжди мають нелінійні властивості [7]. Наприклад, навіть у міжгалактичному середовищі на кубометр простору припадає декілька атомів або елементарних часток, що переносять енергію, що спричиняє залежність відносних тензорів провідності середовища та магнітної і діелектричної проникності середовища поширення від параметрів сигналу!

Таким чином прояви нелінійності є всюдисущими та їх конструктивне використання органічно пов'язано із властивостями середовища поширення сигналів.

1.1.2 Опис нелінійних динамічних систем

Досягнення природничих наук переконливо довели, що Всесвіт, як на макро- так і на мікрорівні динамічно змінюється. Динамічними системами (ДС) прийнято узагальнено називати такий клас систем де відбуваються зміни в структурі або сигналах в реальних ділянках часу. Поняття реальної ділянки часу залежить від кінцевого користувача діяльності системи. В

загальному випадку користувачем є людина, отже мінімальні реальні ділянки часу визначаються часом реакції людини [9].

В першу чергу ДС поділяють на лінійні (ЛДС) та нелінійні (НДС) відповідно структурі зв'язків та функціональних залежностей. НДС переважно записуються різницевиими або нелінійними диференційними рівняннями. Опис реальних процесів більш адекватний через використання саме НДС, що підтверджують такі теорії як загальна теорія відносності, рівняння Максвелла, квантова електродинаміка, тощо. Для глибшого розуміння суті НДС, що будуть розглядатись надалі слід навести опис та визначитись із основними поняттями, що використовуватимуться надалі.

Узагальнено ДС може бути представлена реальним або віртуальним об'єктом або процесом. Модель ДС, незалежно від природи можливо охарактеризувати деяким станом, що складається із кінцевої сукупності значень фазових змінних ФЗ $\xi_n(t)$ в деякий момент часу t . Також задано оператор еволюції (ОЕ) - $F_{ev}(\xi_n(t))$, що пов'язує наступні та попередні значення ФЗ [10]:

$$\{\xi_1(t), \dots, \xi_n(t)\} = F_{ev} \{\xi_1(t_0), \dots, \xi_n(t_0)\} \quad (5)$$

Форми представлення ОЕ в (5) найрізноманітніші, але в рамках НДС його переважно подають у вигляді правої частини диференційних рівнянь, наприклад:

$$\frac{d\xi_i(t)}{dt} = F_{ev} \{\xi_1(t), \dots, \xi_n(t)\} \quad (6)$$

Сукупність всіх станів конкретної НДС інваріантно до аргументу часу (6) задає фазовий простір (ФПР) цієї системи. Кількість незалежних ФЗ визначає геометричну розмірність ФПР, а отже і розмірність НДС.

В рамках класифікації НДС виділяють наступні класифікаційні ознаки [8]:

1. рівень самоорганізації або присутність різких фазових переходів (ламінальні та синергетичні);
2. рівень взаємодії із оточуючим середовищем (закриті та відкриті);
3. рівень збільшення ентропії або переходу енергії ФЗ в ідеальний стохастичний стан (консервативні, де процесів розсіювання не відбувається та дисипативні, де наявні втрати енергії під час еволюції);
4. діапазон припустимих значень в межах ФПР (аналогові, де фазовий простір теоретично може бути заповнений на 100% та дискретні, що відповідають системам із дискретним часом, або цифровим системам);
5. модель структурної побудови (моноблочні та ієрархічні);

Коротко надамо опис систем із різними класифікаційними ознаками. Самоорганізація, або синергетика характеризує появу впорядкованих структур під час еволюції під дією внутрішніх та зовнішніх факторів. Впорядкування проходить через катастрофічні фазові переходи, впорядкування є зменшенням загальної ентропії системи, але за рахунок зовнішніх джерел впорядкованості [12].

Через наявність та всюдисутність носіїв взаємодії (фотони, гравітони, глюони, тощо) всі навколишні НДС є відкритими системами. У відкриту систему можуть в обидва боки протікати потоки енергії в різних формах. Зовнішні потоки, залежно від НДС, найчастіше стимулюють фазові переходи. Закриті системи із практичної точки зору є такими, в яких із зовнішньою взаємодією нехтують для спрощення опису. Часто закриті системи створюють штучно, наприклад, термостат[5].

Відповідно законам термодинаміки усі системи рано чи пізно набувають властивості термодинамічної рівноваги. Відкриті НДС активно взаємодіють із навколишнім середовищем, а загальний стан далекий від

термодинамічної рівноваги. Саме такі системи застосовуються для побудови новітніх засобів ЕКР.

Закриті системи часто представляють як консервативні або Гамільтонові НДС, розуміючи під ними відсутність процесу дисипації або термодинамічної стріли напрямку перетворення енергії. Дія оператора еволюції в таких системах призводить до переходу із одного стабільного стану в інший, хоча таких станів може бути і незлічена кількість, але всі вони мають високий рівень детермінізму. З точки зору ЕКР в таких системах енергія сигналу не переходить в енергію шуму, а перехід із стану в стан відповідає перерозподілу енергії між гармоніками [12].

Цікаве питання, яке на даний час стоїть перед природничими науками що можливо сформулювати як: «Наш світ аналоговий чи дискретний?», поки що відповідь формулюється як – дуальний. Будемо вважати аналоговими такі системи де фазові змінні під час еволюції неперервно змінюються, якщо хоч одна фазова змінна змінюється стрибкоподібно, то – дискретними [4]. Із дискретними системами пов'язані цікаві особливості, наприклад, дрібна приведена геометрична розмірність.

Моноблочні системи відбивають риси поведінки НДС, але в них важко виділити окремі внутрішні структури, точки впливу зовнішніх потоків енергії розпилені, тобто організувати декомпозицію, наприклад, з метою організації ХСХ практично неможливо [28-30]. Ієрархічні системи не тільки мають у складі основні та підкорені блоки із виділенням домінуючого елемента, але і забезпечують чіткий рівень декомпозиції, що важливо і для моделювання, і для практичного застосування.

За наявності як дисипативних так і синергетичних процесів моделювання НДС слід здійснювати через застосування як детермінованих процесів так і стохастичних процесів. Взаємодіє цих двох складових через нелінійний оператор еволюції генерує проблематику передбачення еволюції та поведінки у ФПР загалом [30].

В подальшому розгляді для побудови систем передачі інформації будемо спиратись на властивості аналогових, відкритих, дисипативних, стохастичних, ламінарних або синергетичних НДС, що потребують дослідження взаємодіючих на приймальному та передавальному боці НДС в рамках ЕКР із отриманням позитивних результатів відносно класичних методів комунікацій - одне із головних завдань сучасних технологій передачі сигналів.

1.2 Фазовий простір та поведінка нелінійних динамічних систем

1.2.1 Поведінка нелінійних динамічних систем у фазовому просторі

Під час дослідження НДС основну увагу фокусують на фазовому просторі (ФПР) в якому формується певний фазовий портрет. Під час розгляду фазового портрета НДС встановлюють ряд властивостей поведінки системи (рис.1), таких як [12]:

- 1) форма залежності ФЗ (детермінована, квазидетерміновані, хаотична, стохастична або комбінована із перемежуванням інших форм);
- 2) швидкість еволюції (встановлення значення та знаку показників Ляпунова);
- 3) наявність зон або точок рівноваги та зон або точок біфуркації (характеризує процес самоорганізації та умови для його появи);
- 4) характеристики передбачення поведінки (різновиди фазових портретів у вигляді атракторів).

Лінійні розміри або апертура фазового портрету НДС під час динаміки може прямувати до нескінченності, або стискатись у точку (лінію). Якщо форма та апертура фазового портрету залишається незмінною то така НДС є консервативною гамільтоновою системою без дисипації.

У випадку присутності дисипації фазовий портрет може змінюватись із часом, залежно від внутрішніх властивостей оператора еволюції, також тут можливі синергетичні процеси [16].

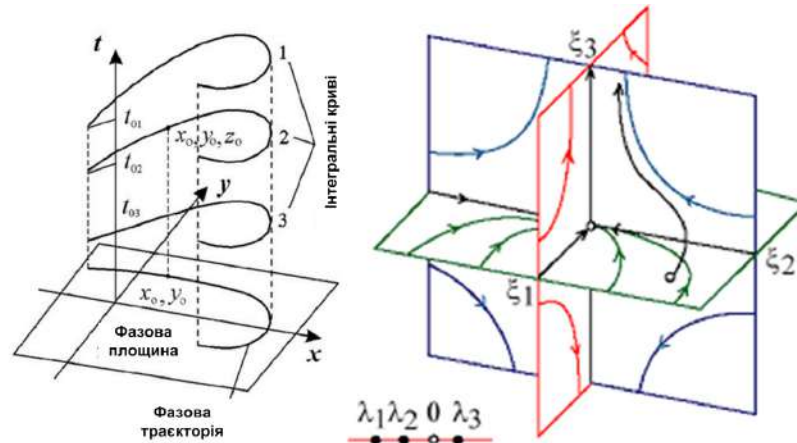


Рисунок 1 – Принцип побудови фазового портрету (ліворуч) та відтворення напрямку еволюції нелінійної динамічної системи

Характерними для фазових портретів є наявність стійких та нестійких рівноваги. Стійка рівновага характеризується нечутливістю до невеликих збурень та поверненням під час еволюції до основного стану. В нестійких точках рівноваги дія зовнішніх збурень може привести до катострофічних наслідків аж до перебудови структури фазового портрету. Наявність нестійких точок характерна ознака синергетичних процесів[21].

Значна кількість НДС, що використовують в ЕКР характеризуються коливальним характером поведінки ФЗ. Поняття коливання тут слід розуміти більш широко відносно класичних уявлень руху по колу. Під час еволюції таких НДС фазовий портрет може прямувати до однієї із 4 узагальнених форм – атракторів (рис.2). Атрактор – результат асимптотичної поведінки системи під час еволюції [11].

Аперіодичні коливальні процеси в НДС виникають під час домінування дисипації та генерують атрактор у вигляді точки. Генератори періодичних детермінованих сигналів працюють на межі балансування підкачування

енергії та дисипації та формують атрактори у вигляді граничного циклу в двовимірній або багатомірній площині (багатомірний тор).

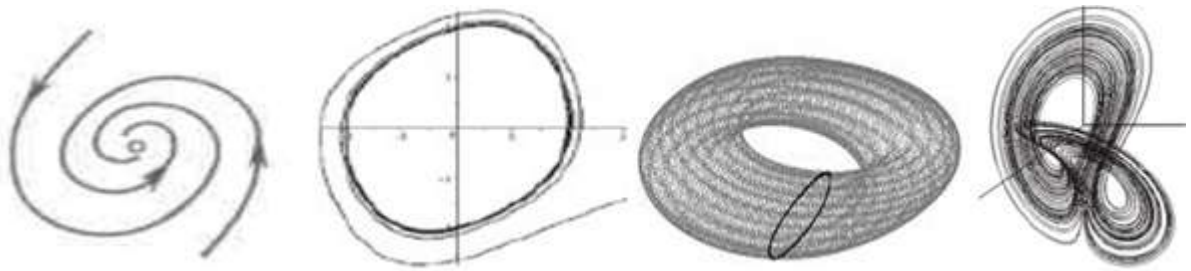


Рисунок 2 – Форми типів атракторів коливальних НДС: зліва направо : точка, граничний цикл, граничний тор, дивний атрактор (ДАТ).

Особливий типом атрактору є дивний атрактор (ДАТ), що формується в особливих режимах де залежність фазових змінних у часі називають сигналами детермінованого хаосу (СДХ), а сам режим – хаотичним режимом. Саме хаотичний режим роботи коливальних НДС є найбільш привабливим для побудови систем передачі інформації із покращеними параметрами та характеристиками. Одна коливальна НДС може мати декілька атракторів залежно від параметрів та оператора еволюції та зазвичай представлена моделями у вигляді системи диференційних рівнянь не вище другого ступеня [14].

Слід відмітити, що для генераторів шуму, що часто застосовуються в практиці ЕКР та розглядаються як автономна НДС, говорити про атрактор немає сенсу, тому що значення фазових змінних можуть бути довільними в усьому фазовому просторі, а реалізація для певної точки ФПР завжди ненульова. Отже, швидкий огляд фазових портретів різних НДС дозволяє зробити попередній висновок про доцільність застосування такої системи для завдань передачі інформації в ЕКР для практичного втілення.

1.2.2 Поведінка системи за показниками Ляпунова

Найбільш інформативним методом аналізу НДС є визначення показників Ляпунова [8]. Показники Ляпунова характеризують еволюцію НДС навколо деякої точки фазового портрету у ФТР, тобто показники Ляпунова є диференціальною величиною, що характеризує НДС. Інтегральною характеристикою НДС можливо вважати форму та апертуру атрактора, а обо об'єм фазового простору.

Із фізико-метричної погляду показники Ляпунова встановлюють диференціальний рівень масштабної деформації фазового простору вздовж ФТР яка обіймає обрану точку. Масштабна деформація може стискати або розтягувати фазовий портрет.

Розрахунок показників Ляпунова вимагає точного визначення ФТР, та можливий якщо явно заданий оператор еволюції НДС. Значення показників Ляпунова обраховуються наступним чином. Припустимо, до дві близькі ФТР деякої НДС системи $\xi_1(t)$ та $\xi_{i+1}(t)$ обирають так, що виконується умова:

$$\xi_{i+1}(t) = \xi_1(t) + \zeta(t), \quad \zeta(0) = \varepsilon, \quad \varepsilon \rightarrow 0 \quad (7)$$

то функція, що визначається за виразом:

$$\Lambda[\zeta(0)] = \lim_{t \rightarrow \infty} \left\{ \frac{1}{t} \ln \left[\frac{\zeta(1)}{\xi(\zeta)} \right] \right\} \quad (8)$$

і (8) може бути розрахована за усіма фазовими змінним та приймає значення $\{\Lambda_i\}, i = 1, 2, \dots, n$, де n - кількість фазових змінних. Такі значення носять назву показників Ляпунова, а їх сукупність називається спектром

показників Ляпунова [9]. Від'ємне значення показника Ляпунова означає стискання фазового портрету, додатне – збільшенню.

Із точки зору математичного аналізу суть доданку всіх показників Ляпунова для даної НДС полягає в опосередненому по всім ФТР значенню дивергенції векторного поля, що описує динаміку деформацій ФТР у ФПР, а саме:

$$\Lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \Lambda_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \left\{ \frac{1}{t} \int_0^t \operatorname{div} \left[\vec{\zeta}(t) \right] dt \right\} \quad (9)$$

Отримавши показники Ляпунова та обрахувавши їх доданок (9) можливо оцінити узагальнену стійкість НДС (рис.3). За умови доданку, що дорівнює нулю НДС характеризується незмінним об'ємом фазового портрету, фазові змінні мають стабільну детерміновану динаміку, атрактор коливальних НДС в цьому випадку має вигляд граничного циклу.

За умови значення доданку більше нуля, об'єм фазового портрету із часом зростає, а динаміка поведінки у часі фазових змінних характеризується як СДХ, або просто хаотичний сигнал. При цьому у ФПР формується дививний атрактор.

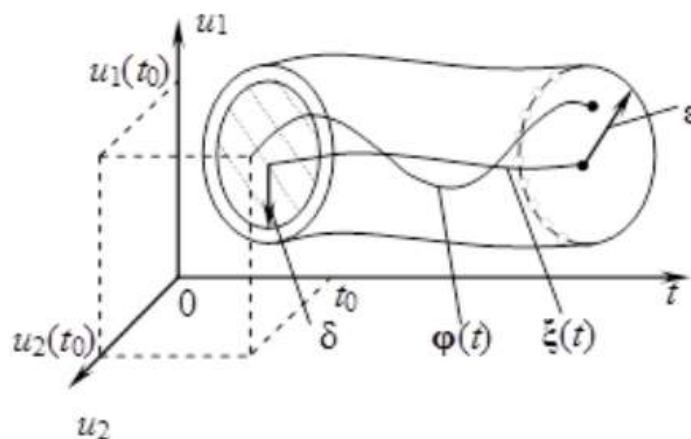


Рисунок 3 – Розбігання фазових траєкторій під час аналізу стійкості за Ляпуновим

Якщо доданок усіх показників Ляпунова менше нуля то об'єм фазового портрету поступово зменшується, загальна енергія фазових змінних розсіюється через дисипацію, а кінцевим результатом еволюції є найбільш простий атрактор – точка. Таких режим характерний для усіх замкнених систем із дисипацією, що не мають енергетичного живлення ззовні.

Фазові траєкторії, що формують фазовий портрет у фазовому просторі під час еволюції НДС в різних режимах можуть оминати деякі зони, тобто є такі стани НДС, в яких вона ніколи не перебуває та не буде перебувати. Для характеристики потенційної можливості обіймання станами системи деякого фазового простору вводять геометричну розмірність фазового портрету НДС, що може обіймати не тільки цілі, але й дробові значення.

Ще однією перевагою застосування показників Ляпунова [9] для аналізу поведінки НДС є те, що за їх допомогою можливо обрахувати оцінку для геометричної розмірності атрактора як

$$D_A = j_\Lambda + \sum_{i=1}^{j_\Lambda} \frac{\Lambda_i}{|\Lambda_{i+1}|} \quad (10)$$

де j_Λ - розмірність за Ляпуновим, що можливо визначити із співвідношень:

$$\sum_{i=1}^j \Lambda_i > 0, \sum_{i=1}^{j+1} \Lambda_i > 0, \quad (11)$$

де, значення (10) генерує верхню оцінку дробової розмірності за Ляпуновим.

Математиками розроблено ряд числових методів обрахунку показників Ляпунова, але усі вони потребують дослідження НДС за допомогою комп'ютерів на тривалих інтервалах часу та потребують потужного програмного та апаратного забезпечення.

1.3 Хаотичний режим нелінійної системи

1.3.1 Властивості хаотичної динаміки

Еволюція будь-якої НДС в різних режимах може мати випадковий, детермінований або хаотичний характер, можливі також перемирення режимів на межі нестійкості та впливу зовнішніх факторів.

Зазвичай поняття детермінізму процесу всі розуміють однаково, однак чіткого визначення та відокремлення хаотичних режимів від випадкових трактується дещо по-різному [8,9]. Наприклад, гуманітарні вчені хаотичні та випадкові процеси ототожнюють.

На практиці дисипативна НДС може еволюціонувати в різні режими (рис.4) із вказаних, залежно від налаштування внутрішніх параметрів та рівня зовнішніх збурень. Часто зустрічається режим перемирення, де генерація СДХ змінюється детермінованим періодичним процесом і навпаки. При цьому період таких змін теж непередбачуваний.



Рисунок 4 – Динаміка розвитку нелінійної системи та характерні точки

Особливими рисами дисипативних НДС в яких може виникнути хаотичний режим роботи та які можуть застосовуватись із практичною метою для побудови засобів ЕКР є [23]:

- 1) чутливість ФТР до мікроскопічних внутрішніх та зовнішніх збурень (ефект метелика);
- 2) чутливість поведінки ФТР до стартових умов еволюції (початкового стану НДС);
- 3) ергодичність ФТР на значних ділянках часу, що дозволяє замінити опосереднення по ансамблю траєкторій опосередненням у часі;
- 4) фрактальність структури фазового портрету;
- 5) поява під час динаміки дивного атрактора.

Ці п'ять визначених властивостей є підтвердженням наявності хаотичного режиму в НДС. Вони можуть бути використані для ідентифікації хаотичних режимів в системі передачі даних. Однак фахівцями запропоновано ще декілька якісних та кількісних методів ідентифікації режимів НДС на основі розгляду параметрів, що характеризують еволюцію НДС.

1.3.2 Ідентифікація режимів роботи нелінійної системи

Розглянемо три відомих способи ідентифікації режимів НДС: кореляційний, ляпунова та фрактальний. Для ідентифікації режимів часто застосовують класичний кореляційний метод аналізу деякої фазової змінної із побудовою графіку (рис.5) нормованої автокореляційної функції [5]:

$$D(\tau) = \frac{\langle \xi(t) \xi(t - \tau) \rangle}{\sqrt{\langle \xi^2(t) \rangle \langle \xi^2(t - \tau) \rangle}}, \quad (12)$$

де рівень кореляції визначає рівень детермінізму.

На графіку кореляційної (12) залежності (рис.5) яскраво виділяється три зони: А, В та С, які відповідають детермінованій, хаотичній та випадковій поведінці. Використання такого способу ідентифікації дозволяє оцінити необхідний час який необхідний впевненого передбачення діючого режиму,

для цього нормований рівень ділиться навпіл та визначається час через проекцію на криву залежності.

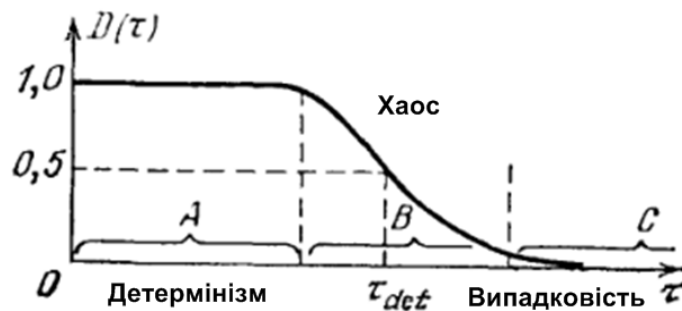


Рисунок 5 – Залежність рівня нормованої кореляційної функції від часу дослідження

Другим способом дослідження режимів НДС є ідентифікація за показниками Ляпунова, що виглядає наступним чином [8]:

1) якщо $\Lambda_{\Sigma} \rightarrow 0$ то НДС має детермінований режим в якому, необхідний час ідентифікації за попереднім критерієм прямує до нескінченості;

2) якщо $\Lambda_{\Sigma} \neq 0 = const$ то в системі реалізується хаотичний процес, а час ідентифікації попереднього критерію визначається обернено пропорційно найбільшому по модулю показнику Ляпунова;

3) якщо $\Lambda_{\Sigma} \rightarrow \infty$ траєкторії швидко розбігаються, що приводить до мінімізації часу ідентифікації та стохастичної поведінки НДС загалом.

Третій спосіб ідентифікації режимів ґрунтується на тому факті, що хаотична поведінка характеризується не тільки дивним атрактором але і фрактальною (само подібною) поведінкою, що проявляється в тому що фазові траєкторії подібні, але неоднакові. Якщо ввести поняття фрактальної розмірності, що задає коефіцієнт заповнення фазового простору із цілою розмірністю, то фрактальна розмірність для хаотичного режиму завжди має нецілі значення [25].

Значення фрактальної розмірності отримують на основі так званого R/S -аналізу, де R – амплітуда приросту функції $\xi(i, n)$, а S — середньоквадратичне відхилення (RMS), запропонованого П. Херстом [25]:

$$\begin{cases} R(i) = \max_{1 \leq i \leq n} \{\xi(i, n)\} - \min_{1 \leq i \leq n} \{\xi(i, n)\}; \\ \xi(i, n) = \sum_{i=1}^n (\xi_i - \bar{\xi}_i). \end{cases} \quad (13)$$

Співвідношення (13) пов'язано однозначно із показником Херста (H_R) як:

$$\frac{R}{S} = \left(\frac{n}{2}\right)^{H_R}, \text{ де } S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (\xi_n - \bar{\xi}_N)^2}, \quad (14)$$

де S – RMS процесу.

А фрактальна розмірність, в свою чергу, вже пов'язана із показником Херста відповідно (14):

$$D_F = 2 - H_R. \quad (15)$$

Співвідношення (13-14) можливо застосувати як для малих, так і для великих інтервалів спостереження, тобто визначити режим за диференціальною або інтегральною поведінкою НДС в рамках дослідження часового ряду, і, таким чином, найбільш придатна для практичного застосування завдяки тому, що не вимагає чіткого математичного опису оператора еволюції.

1.3.3 Відмінні риси хаотичних процесів

Фахівці, намагаючись застосовувати НДС із хаотичними режимами відокремлюють три основні риси хаотичної динаміки [29], завдяки яким відкриваються перспективи застосування СДХ в ЕКР:

1) Складність поведінки. Хаотичний режим характеризується складною та нерегулярною динамікою. Генератор детермінованого хаосу (ГДХ) на основі незмінного оператора еволюції залежно від значень параметрів та початкових умов створює абсолютно різні СДХ. З точки зору прихованості дії в ЕКР це забезпечує високий рівень криптографічного захисту через складність ідентифікації нелінійної функціональної залежності в НДС та унеможливорює передбачення поведінки сигналу на великих інтервалах часу.

2) Широкий та суцільний спектр СДХ забезпечується неперіодичністю часових рядів фазових змінних. Хоча спектр і неперіодичний він одночасно є детермінованим з точки зору можливості відтворення на обох боках каналу зв'язку через застосування ХСХ, крім того обвідну спектру можливо регулювати також зміною біфуркаційних параметрів та додаванням певної зовнішньої дії. В сучасних засобах радіозв'язку властивість широкосмуовості застосовують для боротьби із наслідками багатопроменевого поширення та покращення інформаційної ємності піднесівного колювання.

3) Ортогональні властивості обумовлюються формою автокореляційної функції (АКФ) та взаємної кореляційної функції (ВКФ), що наближається до властивостей шумоподібних сигналів. АКФ хаотичних сигналів швидко спадає, що дозволяє забезпечити роботу засобів ЕКР «під рівнем шуму». Отримати ортогональний базис для СДХ можливо через відокремлення ділянок часових рядів під час еволюції, або через вибір біфуркаційних параметрів, або через зміну оператора еволюції, або традиційними шляхами, застосовуючи проміжну модуляцію. Наприклад, без забезпечення ХСХ навіть однотипні ГДХ створюють сигнали, що слабо корельовано. Властивість

ортогональності дозволяє реалізовувати велику кількість каналів в спільному середовищі передачі, що говорить про перспективність застосування таких сигналів для обслуговування великої кількості абонентів.

Першими практично втіленими системами зв'язку із СДХ є прямохаотичні системи із маскуванню корисного повідомлення. Надалі розвиток впровадження СДХ в практику зв'язку обумовив розробку особливих методів обробки сигналів, що не мають аналогів у класичних технологіях передачі даних, наприклад, нелінійне підмішування, підсилення сигналів за умови сторонніх шумів, узгоджена нелінійна фільтрація, ХСХ тощо[28].

Шумоподібність та можливість хаотичної синхронізації ГДХ потенційно дозволяють будувати системи, що гідно конкуруватимуть із найбільш спорідненим з ними класичними системами із використання псевдовипадкових сигналів (ПВП).

Для вторинної обробки сигналів СДХ доцільно використовувати для різних форм кодування інформації: ефективного кодування, асоціативного збереження, виділення суттєвих рис та стискання із втратами тощо. Корисна інформація в таких НДС зберігається як елемент фазової траєкторії із початковими даними, саме через детермінованість СДХ її завжди можливо відтворити, відтворивши початкові умови.

За допомогою хаотичних систем зв'язку можливо передавати як цифрові так і аналогові повідомлення. Особливу зацікавленість викликає можливість застосування нових нелінійних методів ущільнення-розділення сигналів, що додатково забезпечує високий рівень захисту від несанкціонованого доступу.

Крім того, слід зазначити, що практична реалізація телекомунікаційного каналу на основі застосування хаотичних сигналів має більш просту як структурну так і технічну будову, при чому багато функцій, що в класичній техніці реалізовувались в окремих частинах схеми для хаотичних систем органічно об'єднуються в одну. Однак для роботи із

хаотичними НДС, виникає потреба у високій точності та стабільності дотримання параметрів компонент апаратної реалізації, або потужних ресурсів обчислювальних засобів, якщо система зв'язку реалізується у вигляді цифрової обробки [21].

Отже, найбільш близькими сигналами за властивостями серед класичної техніки зв'язку є ПВП, але, як показано в [19], СДХ окремих ГДХ переважають ПВП за параметрами та характеристиками, що необхідно для створення високопродуктивних систем передачі інформації з високим ступенем захисту від несанкціонованого доступу.

2 ЗАВАДИ В КАНАЛАХ ЗВ'ЯЗКУ

2.1 Деструктивні фактори в каналі зв'язку

Деструктивні фактори погіршують якість передачі інформаційного повідомлення. Такі впливи поділяють на шуми, завади, завмирання, спотворення та помилки (рис.6). Зазвичай шуми характеризуються природним походженням. Завади можуть бути навмисні і ненавмисні. Ненавмисні завади переважно мають природне (гроза, метеори, шуми Землі) та індустріальне походження (іскрові розряди двигунів, взаємний вплив потужних механізмів). Навмисні завади створюються засобами конкурента або ворога [1-4].

Все різноманіття завад зводиться до декількох основних типів: псевдошумових, імпульсних, вузькосмугових (прицільних), системних, ретрансляційних та імітаційних. Шумова завада являє собою зовнішній флуктуаційний процес. Імпульсна завада характеризується короткотривалою дією і залежно від форми такі завади поділяють на псевдо шумові, псевдовідеозавади (які мають постійну та змінну складову) та завади близькі до гармонічного впливу – вузькосмугові.

Короткочасна дія імпульсної завади може бути поодинокую або пакетною (рис.6). Вузькосмугова завада характеризується квазігармонічний впливом, та, як правило, займає у спектрі лише частину спектра сигналу. Системні завади перешкоди притаманні багатоканальним системам зв'язку, сигнал яких займає одну смугу частот із розділенням інформаційних каналів за формою. Системні завади виникають через не ортогональність каналного базису піднесівних та неоптимальності обробки в наскрізному тракті багатоканальних систем. Механізм появи такої завади - неідеальність взаємкореляційних функцій індивідуальних каналів обробки.

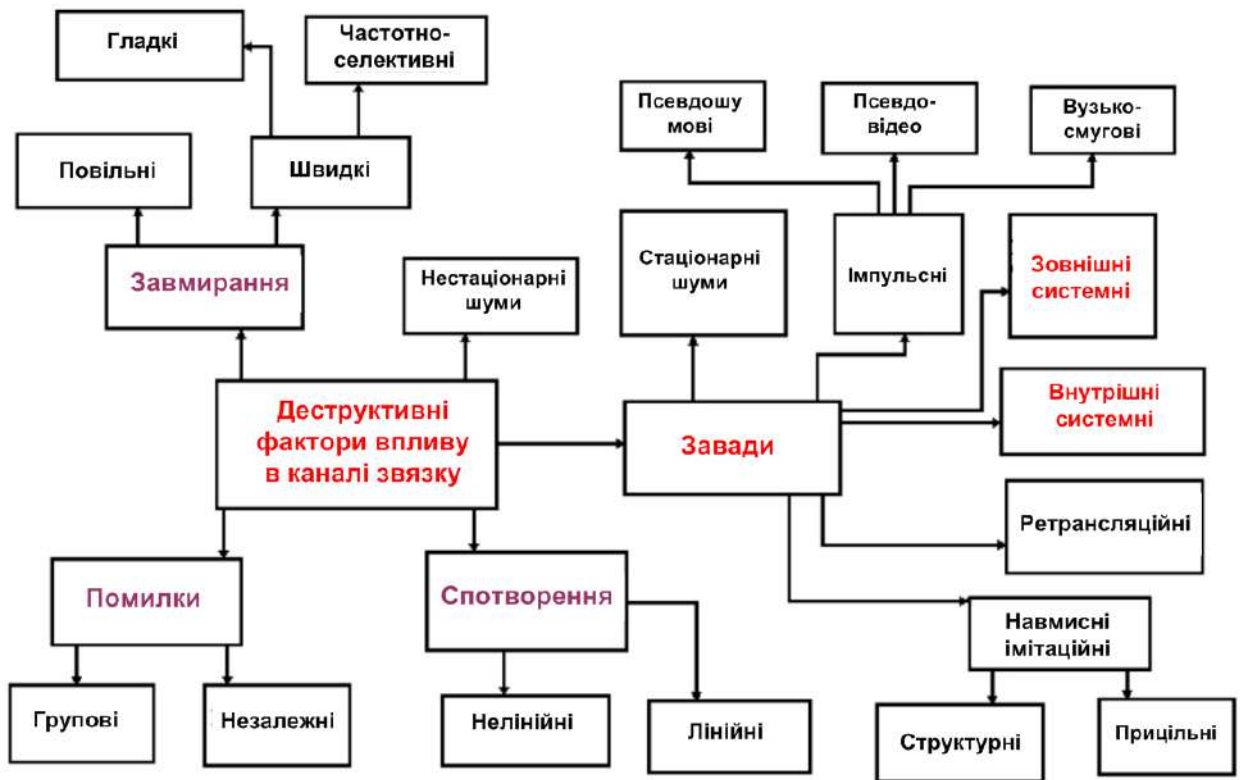


Рисунок 6 – Класифікація деструктивних факторів в каналі передачі

Ретрансляційна завада генерується через підсилення із перевипроміненням сигналу передавача декількома станціями, через що з'являється затриманий сигнал, який потрапляє в цільовий приймач та спотворює. Рівень впливу ретрансляційної завади визначається автокореляційними властивостями сигналів.

Відмінність імітаційної завади полягає у максимальній схожості до діючого в каналі сигналу, вона переважно створюється навмисно. Іноді імітаційну заваду характеризують як структурну прицільну заваду. В найгіршому випадку вплив імітаційної завади виводить з ладу один із каналів багатоканальної системи. В такому випадку імітаційну заваду називають прицільною.

В наземних радіолініях через суттєву наявність оточуючого середовища виникають завмирання. Завмирання виникають за рахунок багатопроменевого поширення сигналів від передавача до приймача. Швидкі завмирання виникають через відбиття від близько розташованих предметів та

становлять основну проблему стільникового мобільного зв'язку. Повільні завмирання проявляються коли багатопромененість створюється віддаленими предметами та особливостями поширення сигналів в атмосфері Землі.

Повільні та швидкі завмирання діють одночасно, через що рівень сигналу на вході приймача суттєво змінюється, а канал передачі під час взаємного переміщення передавачів та приймачів стає нестационарним. Як правило, швидкі завмирання є частотно-селективними, тобто діють в обмеженій смузі частот, а повільні завмирання є гладкими та покривають увесь виділений частотний ресурс системи.

Спотвореннями називають такий різновид деструктивного впливу, що визначається елементами наскрізного тракту поширення сигналу. Вплив лінійних характеристик тракту, наприклад, нерівномірність амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) призводить до появи міжсимвольної інтерференції в цифрових каналах, а обмеження спектру в груповому тракті через нелінійність викликає появу інтермодуляційних та інтершумових спотворень.

Помилки - фактично є результатом неоптимальної роботи на боці приймача, для цифрових каналів вони визначають рівень достовірності передачі повідомлень. Поділ помилок на групові та незалежні або пакетні викликаний широким застосуванням різноманітних завадостійких цифрових кодеків. Групові помилки найбільш небезпечні в під час пакетної передачі, через них можливо втратити інформацію цілого кадру, що в мережевих технологіях неприпустимо.

Через різноманіття та непередбачуваність впливів деструктивних факторів в реальних системах, каналні тракти підлягають ретельному моделюванню. Кожна завада (рис.6) характеризується рядом параметрів, які слід обирати під час моделювання випадково в певному діапазоні. Наприклад, для опису швидких завмирань переважно застосовують розподіли Райса та Релея [5]. Частотна селективність замирань описують

описується експоненційний розподілом, а апроксимація поведінки повільних замирань відповідає логарифмічно-нормальному розподілу.

Найбільш складно боротись із навмисними завадами, деструктивність дії яких тим вища, чим ближче їх статистика до статистики сигналу. Спотворення сигналів переважно вважають розподіленими за гаусівським законом та розглядають як додатковий флуктуаційний шум [31-35].

Для ретельного моделювання деструктивного впливу завад слід використовувати різні моделі. Найбільш простою є модель в яких помилки виникають незалежно одна від одної, такий характер впливу помилок в цифрових каналах описується біноміальним розподілом.

Таким чином, для створення найбільш адекватної моделі деструктивного впливу слід ретельно побудувати моделі завад та їх взаємодії із сигналом в різних ділянках системи передачі.

2.2 Поняття завадостійкості

2.2.1 Реальна та потенційна завадостійкості

Для галузі ЕКР забезпечення завадостійкості є однією з головних умов, що висуваються перед розробниками засобів комунікацій. Система передачі даних має бути спроектована так, щоб під час експлуатації за безумовної наявності різноманітних завад, вона забезпечувала задану якість передачі повідомлень [3].

В умовах домінування цифрових технологій методи боротьби із завадами під час передачі дискретних повідомлень займають домінуюче місце. Це пояснюється як різноманітністю джерел дискретних повідомлень, методів обробки сигналів так і безліччю типів та видів завад. Розрахунки впливу завад і розробка методів обробки сигналів для зменшення цього впливу є основними напрямками досліджень в теорії завадостійкості [4].

Завадостійкістю вважають галузь комунікацій, що займається відновленням повідомлень із заданою ймовірністю за наявності завад. Завадостійкість поділяють на потенційну та реальну. Класичною теорією завадостійкості доведено, що узагальнена завадостійкість цифрової комунікаційної системи визначається характером сигнально-кодової конструкції (СКК), методом обробки сигналів та характеристиками та параметрами завад [6].

Слід пам'ятати, що завадостійкість органічно пов'язана із іншими тактичними характеристиками, такими як розрізнявальна спроможність, пропускна спроможність, дальність дії, коефіцієнт корисної дії (ККД) тощо. Тому під час розгляду методів забезпечення завадостійкості слід вказувати які негативні наслідки такий варіант обробки сигналів накладає на інші параметри якості системи зв'язку.

Потенційна завадостійкість встановлює граничну межу якості передачі цифрових даних за умови відомих сигнально-кодових конструкцій та завади деякого різновиду (типу, класу, виду). Досягнення потенційної завадостійкості можливе через використання оптимальної обробки за допомогою оптимального приймача. Потенційну завадостійкість розглядають теоретично, на основі різноманітних способів моделювання та синтезу методів обробки, її не можливо покращити, вона задає теоретичну межу якості [2].

Реальна завадостійкість це наслідок втілення методів та способів обробки сигналів, що запропоновані в межах розгляду потенційної завадостійкості із урахуванням конструкторсько-технологічної реалізації пристроїв ЕКР. На відміну від потенційної, реальна завадостійкість визначається широким колом факторів впливу, що неможливо наперед передбачити в умовах дослідження потенційної завадостійкості, тому параметри, що описують реальну завадостійкість є завжди гіршими, за параметри теоретичного розгляду потенційної завадостійкості [2].

2.2.2 Класичні завдання теорії завадостійкості

Основні засади теорії потенційної завадостійкості були розроблені у 30-40 рр. минулого сторіччя видатними вченими Н. Вінером, П. Котеєльніковим, Г.Найквістом та ін., де запропоновано виділити три базові завдання, що мають бути вирішені розробниками [2-4]:

1) Синтез оптимального (найкращої завадостійкості) приймача, що вбирає в себе пошук такої структури обробки на приймальному боці, який забезпечує найліпші показники якості, якщо відомо який сигнал передається і які завади на нього діють в каналі передачі.

2) Дослідження запропонованої структури обробки сигналів із встановленням потенційної якості прийнятих повідомлень та визначення параметрів цієї якості із урахуванням властивостей джерел та адресатів повідомлень.

3) Дослідження умов забезпечення висновків теорії потенційної завадостійкості в реальній завадостійкості засобів ЕКР, що розробляються.

Завдання визначення потенційної завадостійкості вирішувалось поступово. Основним критерієм для розробки оптимальної схеми обробки та вибору сигнально-кової конструкції є параметри та характеристики завад.

Подібне завдання було вперше сформульоване та вирішене для гаусівського каналу передачі в якому діють шумові сигнали із гаусівським розподілом. Під час вирішення завдання на основі теорії математичного аналізу та статистичної обробки висунуто ряд критеріїв якості, основним із яких є ймовірність правильного прийому, що для дискретних сигналів формулюється як ймовірність правильного прийому символу. Основним напрямком синтезу структури оптимального приймача є максимізація цієї ймовірності за фіксованої ймовірності хибних наслідків. Подібний тип критерії називають критеріями Байеса.

Отже досягнутий максимум ймовірності правильного прийому, за умови запропонованого методу обробки (модуляції) названо основним

параметром потенційної завадостійкості. Пристрій обробки, що реалізує досягнення цього максимуму називають ідеальним приймачем. Жоден реальний приймач із цієї точки зору не може перевершити ідеальний.

Кількісним показником ймовірності помилки, що характеризує якість дискретних повідомлень є бітовий коефіцієнт помилок (BER):

$$BER = P_{ном} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_{ном}}{N_{\Sigma}} \quad (16)$$

де $N_{ном}$ – кількість помилок під час прийому еквівалентної бітової послідовності;

N_{Σ} - загальний обсяг переданої інформації.

Основним висновком класичної статистичної теорії завадостійкості за (16) за умови детермінованого сигналу та гаусівських завад є визначення граничного відношення сигнал-завада, що забезпечує ідеальний приймач:

$$Q_{max} = \frac{2E_c}{N_0}, \quad (17)$$

де E_c - енергія детермінованого наперед відомого на приймальному боці сигналу;

N_0 - спектральна густина потужностей білого гаусівського шуму.

Сучасна теорія потенційної завадостійкості передачі цифрових повідомлень має відшукати найоптимальнішу операцію обробки вхідного сигналу, що забезпечує мінімальний BER (16), якщо відомі параметри та характеристики джерела, кодера, модулятора, сигнально-кодової конструкції, математична модель завад та способу взаємодії його із сигналом [1-6] відповідно (17).

В таких складних умовах теорія завадостійкості передачі цифрових повідомлень має встановити структуру та метод демодуляції, декодування та подальшої кодової обробки сигналів таким чином, щоб мінімізувати втрати під час передачі повідомлення.

2.2.3 Поріг завадостійкості дискретної передачі

Усі дискретні системи передачі загалом відносять до нелінійних систем, що мають властивість широкосмуговості. Нелінійні системи мають вагомую особливість, що полягає у встановленні певного порогу завадостійкості, що визначається як припустиме відношення сигнал-завада за потужністю на інтервалі передачі (знаку, символу, слова, речення, блоку тощо), що реалізується на вході пристрою оптимальної обробки.

При цьому реалізується так званий пороговий ефект [4]: якщо значення завадостійкості менше порогового то різко погіршується якість передачі інформаційного повідомлення, що фактично еквівалентно втраті зв'язку і навпаки якщо значення перевищує поріг, то суттєвого приросту якості передачі із збільшенням відношення сигнал-завада не відбувається (рис.7).

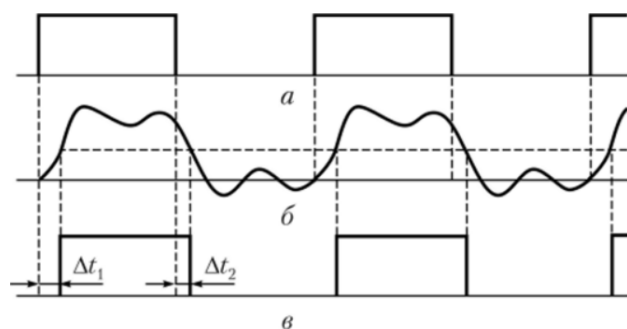


Рисунок 7 – Процес регенерації цифрового сигналу

Саме тому в сучасних системах передачі за умови нестационарних каналів відбувається постійний контроль якості та по зворотному каналу встановлюється на виході передавача такий рівень сигналу, що забезпечує роботу в зоні порогу завадостійкості.

Такий граничний ефект обмежує можливості застосування ширококутових систем передачі дискретних повідомлень, а зниження порогу завадостійкості вважається одним із основних завдань щодо побудови квазіоптимальних схем обробки. Поява порогового ефекту пояснюється придушенням сильним сигналом слабкого сигналу завади під час детектування інформаційного повідомлення.

За умови дотримання порогу обробки під час передачі в цифрових мережах зв'язку із регенераторами можлива регенерація дискретного повідомлення із надзвичайно малою похибкою, що визначається як відмінність форми двох сигналів на виході передавача системи та виході системи обробки за кінцевим інформаційним повідомленням: Похибка прийому в теорії завадостійкості визначається як [4]:

$$\delta^2 = \frac{1}{t_{zm}} \int_0^{t_{zm}} [u(t) - x(t)]^2 dt, \quad (18)$$

де $u(t), x(t)$ - переданий та прийнятий дискретний сигнал відповідно.

Якщо застосовується вузькосмугова лінійна обробка на передавальному та приймальному боках то поріг обробки практично відсутній, а із збільшенням відношення завада-сигнал (рис.8) якість повідомлення на приймальному боці системимонотонно зростає. Для нелінійних систем із природнім або примусовим розширенням спектру, що є основою сучасних сигнально-кодових конструкцій характерно кусково-ламана залежність (рис.1), де чітко виділяється поріг завадостійкості із появою підпорогової та надпорогової зони [6].

Граничним випадком нелінійної обробки є застосування бінарної передачі даних, де в кореляційному приймачі застосовується аналоговий компаратор, поріг спрацьовування якого фіксується між значеннями логічних рівнів. Якщо рівень завад не перевищує рівень порогу, то реалізується

розташування у надпороговій зоні та вплив завад дорівнює нулю. Зазвичай поріг цифрової обробки практично для усіх базових логічних елементів не складає не менше 5-10дБ. Саме такий ефект є основою побудови сучасних транспортних мережевих технологій [5].

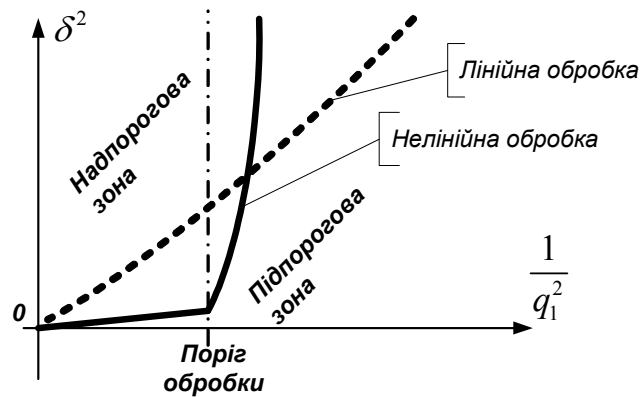


Рисунок 8 – Результат впливу порогового ефекту на якість прийому

Однак, слід пам'ятати, що помилка кінцевої обробки (18) в дискретних широкополосних системах та мережах зв'язку завжди ненульова і загалом завжди у більшому або меншому ступені в надпороговій зоні зменшується із зростанням відношення сигнал-завада.

2.3 Системні завади

2.3.1 Системні завади в електромагнітній сумісності

Електромагнітна сумісність (ЕМС) - це властивість пристроїв та систем ЕКР виконувати покладені на них функції під час зовнішніх електричних, магнітних та електромагнітних впливів (рис.9), а також не генерувати неприпустимих впливів вказаної природи на інші електронні пристрої, електрообладнання, системи та мереж ЕКР [31].

Крім зовнішніх завад в рамках ЕМС також розглядаються перехресні впливи між модулями електронних пристроїв, окремими вузлами та

компонентами. Це обумовлено стійкою тенденцією до мініатюризації апаратури та відповідним зменшенням просторової відстані між компонентами, що є агресорами та рецепторами завад електромагнітної природи.

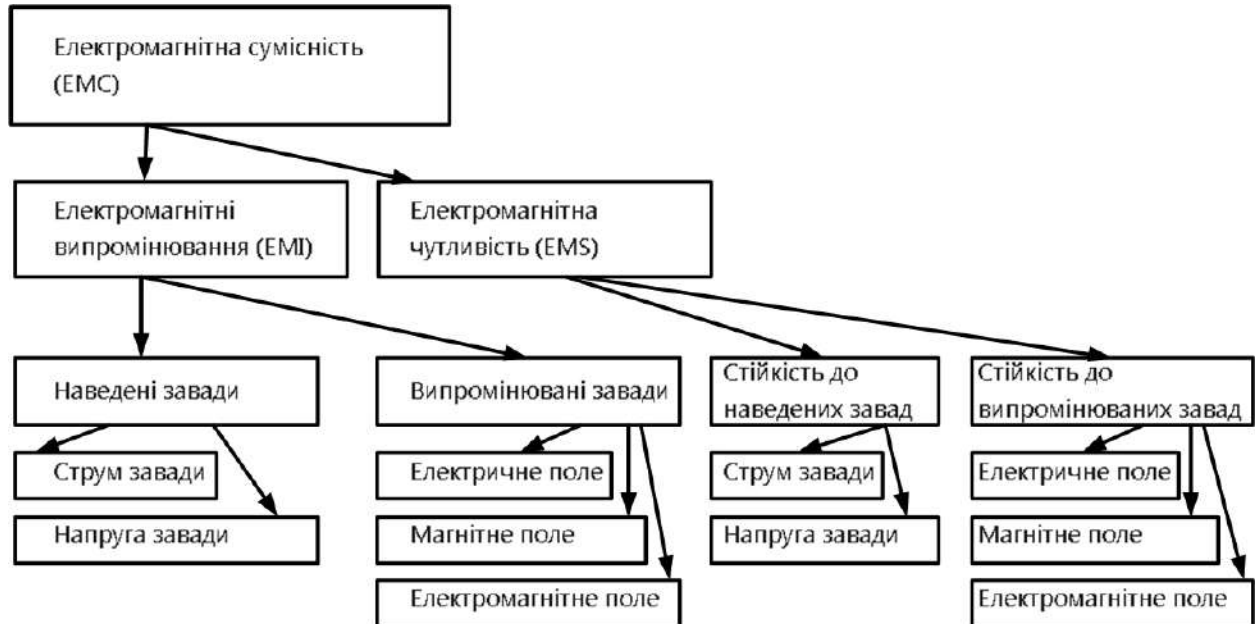


Рисунок 9 – Взаємозв'язок основних понять електромагнітної сумісності

Зростання уваги до виконання норм EMC обумовлено все більшим і більшим охопленням електронними пристроями напрямків та галузей в яких нещодавно використання електронної техніки було сильно обмежене. Особливо потужні системні завади створюються в багатоканальних та багатокористувацьких системах, де їх рівень навіть регламентується стандартами організації таких систем, наприклад, в стільникових системах масового обслуговування.

Отже в даний час в більшість вимог щодо технічного завдання розробки пристрої (рис.10) включають норми електромагнітної сумісності, до якої входить також стійкість до системних завад. Такі норми мають бути виконані як на внутрішньо системному рівні так і зовнішносистемному, при

чому врахування норм має бути перевірено на усіх етапах виробу пристроїв ЕКР.

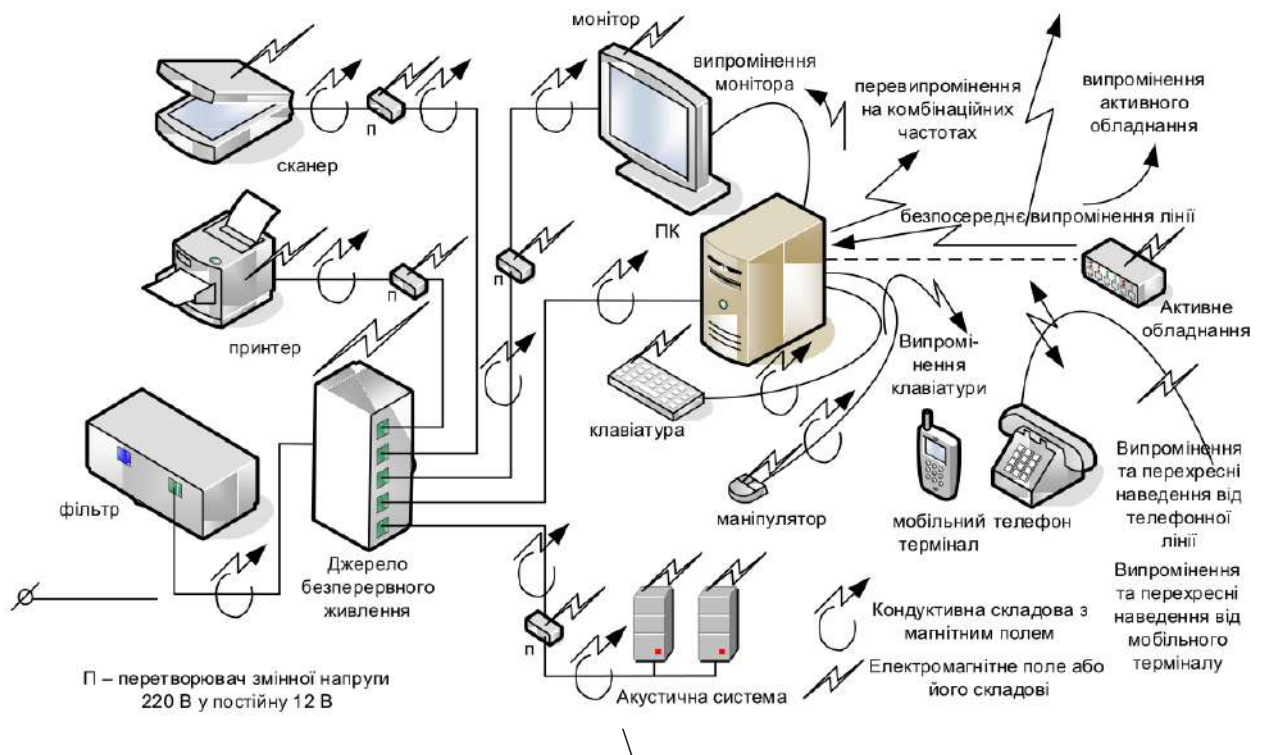


Рисунок 10 – Джерела та рецептори завад для сучасної системи електронних комунікацій

Основні поняття електромагнітної сумісності пристроїв ЕКР (рис.11) охоплюють реалізацію небажаних впливів та методів та методик захисту як по відношенню до сигнальних кіл так і для кіл живлення. З точки зору захисту від завад регламентується поняття стійкості до різноманітних типів завад (рис.10).

Технічною характеристикою стійкості є чутливості обладнання що є рецептором системних радіовипромінювань (системних завад), що розглядається в діапазоні частот від 0 до 400ГГц. Це практично охоплює весь спектр радіосигналів, які активно використовуються в системах та мережах ЕКР [32].

Системні завади виникають як в відкритому просторі, так і в обмежених зонах передачі та обробки сигналів, наприклад, в багатожильних кабелях, або в межах стійок апаратури ущільнення, тощо.

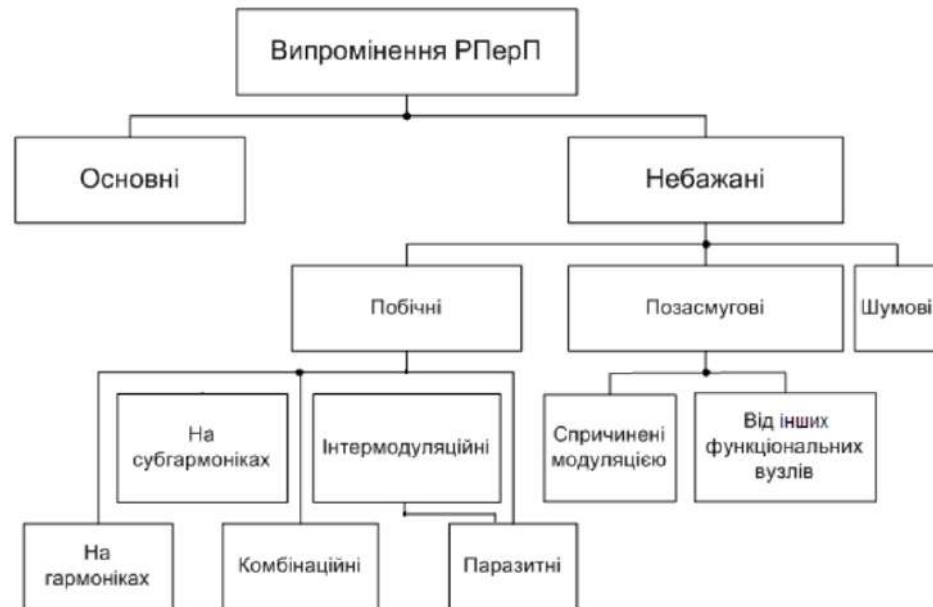


Рисунок 11 – Класифікація електромагнітних випромінювань у ЕМС

Аналізуючи рис.11 системні завади можливо класифікувати як небажані, шумоподібні, що носять інтермодуляційний характер, та створюються сторонніми подібними системами або функціональними вузлами.

2.3.2 Внутрішньосистемні завади в хаотичних каналах зв'язку

Під системними завадами в багатоканальних та багатокористувацьких цифрових системах та мережах передачі будемо розуміти заваду, як носить імітаційний характер [33,34], в сенсі подібності структури її сигнально-кової конструкції (СКК) до структури корисного сигналу. Крім того така завада виникає ненавмисно як через неідеальність структури піднесівних СКК, так і через неідеальність засобів ЕКР.

Системні завади поділяють на внутрішньо системні та зовнішньо системні. Для створення СКК в сучасних цифрових ЕКР традиційно застосовують різноманітні псевдошумові послідовності (ПШП). Створені на її базі СКК дозволяють отримати значну кількість незалежних каналів доступу, легко реалізуються на сучасній елементній базі, їм властива широкосмуговість спектру та гарні кореляційні властивості.

Однак через свою періодичну структуру та особливості спектрального розподілу в спектрі базиси піднесівних, що потрібні для розділення каналів володіють певним рівнем неортогональності. Тобто такі базиси є квазіортогональними. Саме наслідком квазіортогональності є поява внутрішньо системних завад, рівень яких суттєво збільшується із зростанням кількості абонентів.

Зменшити такі системні завади складно, можливо лише врахувати їх вплив і наступним завадостійким кодуванням усунути наслідки їх впливу. Застосування систем селекції за частотою, часом, поляризацією, простором не є радикальним методом боротьби із такими завадами. Найкращим виходом є розробки нових базисів, що ґрунтуються на дещо нових принципах прийому та обробки сигналів. Одним із таких підходів є застосування СДХ в рамках побудови СКК під час забезпечення багатокористувацького доступу або ущільнення-розділення каналів.

Заміна традиційних СКК на СКК із хаотичними сигналами має забезпечити зменшення рівня системних завад в рамках ЕМС через заміну ПВП цифровими сигнатурами СДХ [37]. Зрозуміло, що слід також забезпечити нелінійне розділення на приймальному боці таких СКК та провести оцінювання впливу таких завад. Тобто постає завдання пошуку оптимального генератора хаотичного сигналу, способу його інтеграції в СКК та дослідити рівень системних завад на систему передачі даних, що побудована на основі нелінійної обробки із забезпеченням ХСХ та хаотичного синхронного відгуку.

Дослідженнями у [22] підтверджено теоретичну можливість застосування СДХ для ряду відомих НДС (рис.12) через аналіз їх кореляційних характеристик за кореляційним критерієм, який можливо також розглядати як критерій рівня потужності системних завод:

$$\Xi = \frac{\sqrt{\sum_i^N \sum_j^N g_{i,j}}}{N^2 - N}, i \neq j \quad (19)$$

де N – кількість реалізацій хаотичних сигнатур;

$g_{i,j}$ - недиагональні елементи матриці Грама.

При цьому реалізації хаотичного процесу одного генератора розглядались як кандидати до цифрової сигнатури хаотичної ПВП на основі аналізу Граміана із елементами матриці в (19) їх взаємних кореляційних та автокореляційних характеристик.

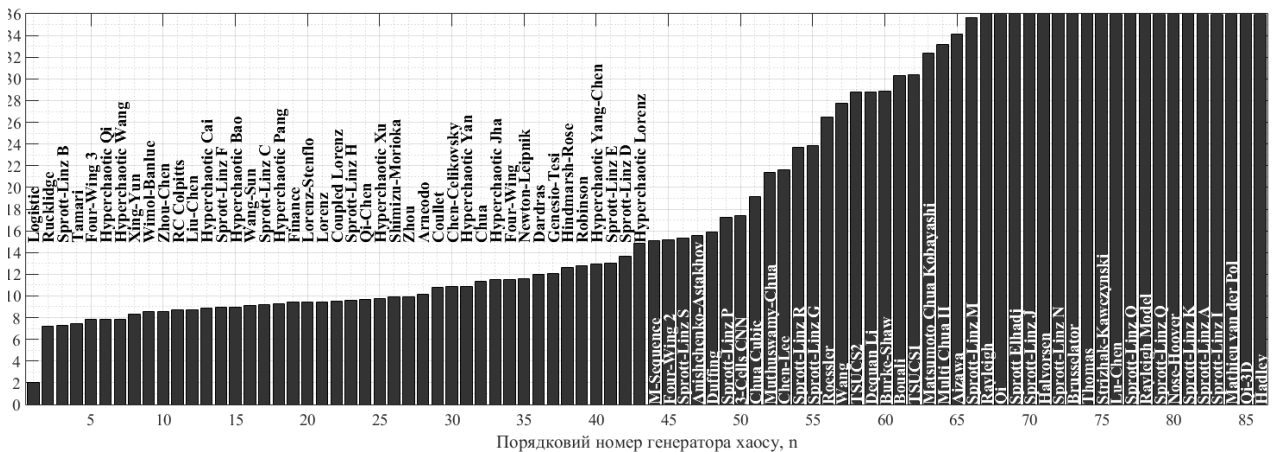


Рисунок 12 – Рівень системних завод за Ξ для сигналів різних генераторів (назви подано на рисунку) детермінованого хаосу за умови $N=200$ та реалізації у 5000 вибірок

Параметри НДС встановлювались в межах забезпечення хаотичного режиму за методом Монте-Карло, надалі обирався найліпший варіант. Для

порівняння аналогічний аналіз проводився для ПВП типу М-последовність. В результаті чого показано (рис.12), що за опосередненими результатами існують такі НДС, що порівняно із ПВП забезпечують менший рівень системних завад, наприклад однією із таких систем є НДС Rucklidge із оптимальним хаотичним режимом роботи.

Серед 84 досліджених сигналів від різноманітних НДС в хаотичного режимі виявлено більше половини таких, що за властивостями зменшення системних завад переважають традиційні ПВП. Однак не всі НДС із хаотичним режимом зручно застосовувати для побудови систем передачі, наприклад, частина має надто вузькі зони параметрів для забезпечення СДХ, частина надто багато параметрів, що ускладнює процес модуляції, в частині слабо досліджені процеси ХСХ, тощо.

З цієї точки зору найбільш оптимальним виявилась НДС Rucklidge [37], яка за вказаним критерієм майже вдвічі перевершує за якістю побудови СКК традиційні М-последовності в цілому. Із практичної точки зору це відповідає збільшенню кількості каналів без використання додаткового частотно-часового ресурсу, покращенню пропускної спроможності системи загалом, відкривається можливість застосування більш стійкого цифрового коду для завадостійкого цифрового кодування тощо [38-42].

Крім того застосування хаотичних сигналів додатково забезпечує покращений рівень криптографічного захисту та прихованості дії, що важливо в умовах потужного застосування засобів РЕБ в умовах сучасний військових конфліктів.

3 МОДЕЛІ СИСТЕМНИХ ЗАВАД ТА ПРИСТРОЇВ ХАОТИЧНОЇ ОБРОБКИ

3.1 Взаємодія інформаційного повідомлення з хаотичним

3.1.1 Маскування сигналом детермінованого хаосу

Натепер назви різновидів введення інформаційного сигналу в хаотичний ще залишаються в процесі обговорення, але вже яким чином освітлюється загальна картина відмінності хаотичних різновидів модуляції від класичних. Тому саме застосування хаотичних несівних для багатоканальних систем ЕКР із збереженням високого рівня ортогональності спряжено із способом введення інформаційного сигналу в хаотичний.

В загальному випадку хаотичний модулятор може складати із однієї або декількох НДС із хаотичними режимами. Під час модуляції генерується створюється доволі складний сигнал, що наприклад, передбачає зміну в несівному коливанні одночасно декількох параметрів, що є частково залежними між собою.

Під час розробки нового способу введення інформаційного сигналу в хаотичний слід зважати, що розробка модулятора та демодулятора є комплексним завданням, де з класичних позицій більшу увагу приділяють саме демодулятору як найбільш складному елементу усього тракту передачі повідомлення. В рамках застосування НДС це спряжено із особливостями вводу НДС в хаотичний режим та його підтримання за умови модуляції хаотичної піднесівної. З точки зору практичної реалізації в першу чергу труднощі пов'язані із дотриманням стабільності параметрів та характеристик компонент ГДХ, що задіяні в структурах модулятора та демодулятора.

На початкових етапах розвитку теорії хаотичних систем ЕКР фахівці використовували ГДХ як джерело шумоподібного широкопоздовжового сигналу, а модуляція інформаційним повідомленням відбувалась по за межами ГДХ,

такі різновиди модуляції отримали назву хаотичне маскування [8]. Хаотичне маскування (рис.13) може відбуватись як лінійний або нелінійний процес.

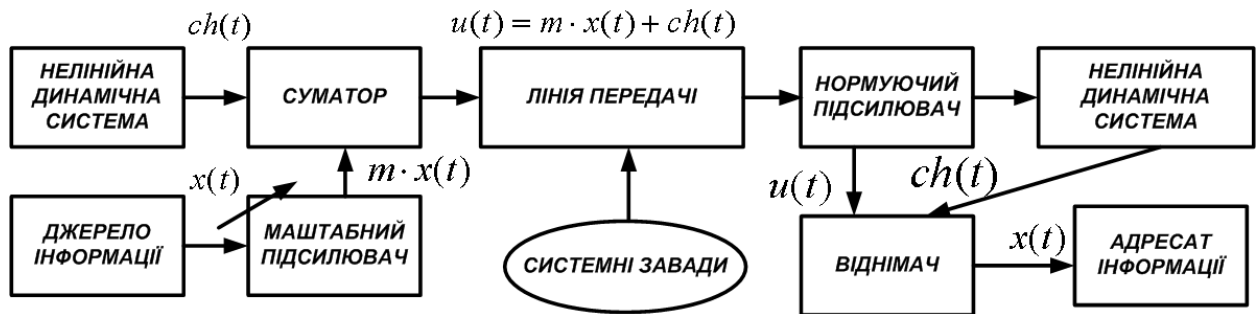


Рисунок 13 – Узагальнена схема введення інформаційного сигналу в хаотичний за методом хаотичного маскування

Демодуляція в таких умовах забезпечується оптимальним вибором рівнів інформаційного та хаотичного сигналів та передбачає можливість забезпечення ХСХ в тому числі і за умови впливу завад. Числені дослідження показали необхідність дотримання в такому процесі великого відношення каналний сигнал завада та великого відношення хаотичний сигнал – інформаційний сигнал, що дозволяє застосовувати такі способи лише для «чистих» каналів із значним динамічним діапазоном. Крім того хаотичне маскування передбачає співмірність спектрів модулюючого та модульованого коливання. Таким чином, хаотичне маскування дозволяє працювати із аналоговими сигналами за рахунок ефекту хаотичного синхронного відгуку на приймальному боці в демодуляторі.

Внутрішня хаотична модуляція відбувається через вплив інформаційного сигналу на параметри НДС, що, змінює поведінку процесу, аж до зміни режиму роботи НДС за умови незмінності структури. Такий вплив в хаотичному режимі призводить до зміни асимптотичної поведінки, або іншим чином – деформації дивного атрактора аж до появи детермінованого періодичного або квазіперіодичного процесу[40].

Використання в таких схемах аналогового модулюючого повідомлення утруднено, тому внутрішня модуляція більш придатна для цифрового

сигналу, найчастіше в формі бінарного потоку. Під час модуляції слід забезпечити максимум переваг діючого каналного сигналу в аспекті завадостійкості, прихованості дії, широкосмуговості, стійкості до зовнішніх впливів, тощо. Тому під час її здійснення намагаються зберегти хаотичний режим роботи, а значить асимптотичну поведінку у формі дивного атрактора. В ідеальному випадку слід обрати спосіб цифрової хаотичної модуляції таким чином, щоб загальна форма атрактора змінювалась мінімально, але залишалась можливість виділення інформаційного повідомлення на приймальному боці за мінімальні інтервали часу.

З точки зору впливу на атрактор, внутрішня модуляція може змінювати, наприклад, масштаб атрактора, переміщувати атрактор в іншу точку фазової площини, змінювати розмірність атрактора, змінювати умови ХСХ, забезпечувати перехід від одного до іншого способу ХСХ, змінювати співвідношення між складовими спектру або складовими кореляційної функції тощо.

Ряд розроблених та підтверджених моделюванням методик хаотичної модуляції-демодуляції через керуванням рівнем ХСХ є найбільш досконалими з точки зору забезпечення завадостійкості, широкосмуговості, стійкості до системних завад та збурень до 30дБ, тому саме їх оберемо за основу для подальших досліджень в умовах імітаційного моделювання.

3.1.2 Нелінійне підмішування інформаційного сигналу

Недоліки хаотичного маскування в першу чергу пов'язані із чутливістю як до рівня завад, так і до рівня лінійних та нелінійних спотворень в каналі. Вони не дозволяють організувати в системі передачі, що будується на базі хаотичних принципів обробки високий рівень прихованості дії та конфіденційності зв'язку, тому розробники спрямували зусилля на розробку методів модуляції-демодуляції із керуванням внутрішніми параметрами НДС.

Для внутрішнього керування режимами НДС доступні дві групи параметрів [9]:

1. Параметри біфуркації, модуляція яких призводить до зміни коефіцієнтів Ляпунова і відповідно деформації фазового портрету. Такі параметри слушно застосовувати на ділянках, що відповідають декільком фазовим квазіциклам.
2. Стартові параметри (параметри ініціалізації), що слушно застосовувати на ділянках часу що за тривалістю не перевищують фазового циклу.

Під час розробок найбільш вдалим з точки зору подальшої демодуляції та виділення інформаційного повідомлення виявилася методи на основі зміни параметрів біфуркації. Одним із перших подібних розроблених методів, що фактично є перехідним від хаотичного маскування є метод, що дістав назву "нелінійне підмішування"[8] (рис.14).

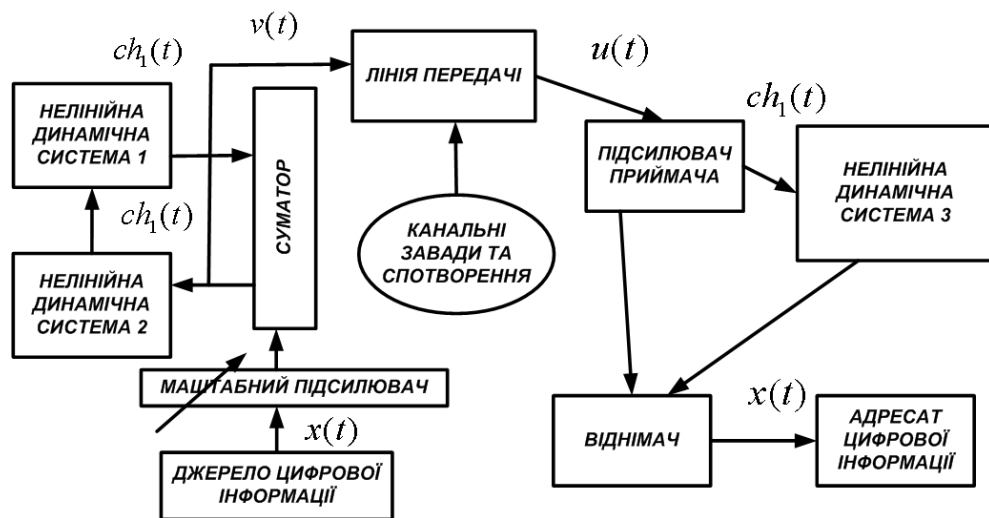


Рисунок 14 – Схема організації модуляції способом нелінійного підмішування інформаційного сигналу в хаотичний

Передавальна частина схеми нелінійного підмішування (рис.14) складається із двох нелінійних динамічних систем, що охоплені колом зворотного зв'язку, до якого підмішується сигнал з боку джерела цифрової інформації. Через те, що обидві системи є нелінійними, то і результат

підмішування також отримаємо нелінійний, що відповідає загальній назві способу.

В даному випадку інформаційний сигнал використовується для керування поведінкою декількох генераторів, що в найбільш тривіальному випадку є ідентичними. (рис.14). Через те, що інформаційний сигнал подається в коло зворотного зв'язку, каналний сигнал суттєво змінюється за деякою нелінійною залежністю.

Приймальна частина системи передачі із нелінійним підмішуванням аналогічна схемі із хаотичним маскування та містить НДС із ідентичним оператором еволюції до передавальних НДС, яка разом із віднімачем працює як нелінійний фільтр і дозволяє виділити корисний бінарний інформаційний сигнал нелінійною фільтрацією - $x(t)$. Приймальна НДС або працює як нелінійний фільтр, що дає можливість отримати лог.1, або не входить в синхронізм, що дає можливість ідентифікувати цей факт як лог.0.

З точки зору загальної нелінійної теорії НДС приймача в схемі нелінійного підмішування по суті - неавтономною нелінійною системою, що зовсім не гарантує появу режиму детермінованого хаосу, що є суттєвим недоліком таких схем модуляції, а от позитивною рисою модуляції нелійними підмішуванням порівняно із хаотичним маскуванням є можливість керування якістю передачі корисної інформації через зміну рівня інформаційного цифрового повідомлення.

3.1.3 Внутрішня цифрова хаотична модуляція хаотичних режимів

Найбільш прогресивним методом модуляції із застосуванням цифрових сигналів є група методів, що дістала назву – перемикання хаотичних режимів (рис.15) [8,9, 19,37,42].

На передавальному боці схеми реалізації методу присутні дві НДС, що працюють в хаотичному режимі та генерують сигнали $ch_1(t)$ і $ch_2(t)$. За допомогою комутатора, що керується бінарним цифровим сигналом

інформаційного повідомлення сигнали $ch_1(t)$ і $ch_2(t)$ спрямовуються в лінію передачі де підлягають впливу завад та спотворень. Один сигнал $ch_1(t)$ кодує логічну одиницю, а інший $ch_2(t)$ - логічний нуль (або навпаки).

Якщо цифровий сигнал має більше рівнів квантування то, слід застосувати більшу кількість НДС на передавальному боці [1], але схема демодуляції в такому випадку суттєво ускладнюється. Всі переваги такого методу реалізується через застосування схеми демодуляції, що дістала назву – демодуляція на основі допоміжної НДС. Процес демодуляції оснований на явищі ХСХ приймального генератора сигналом передавального, для цього в схему введено синхронізатор, який дозволяє об'єднати прийнятий та створений на приймальному боці СДХ в певних пропорціях.

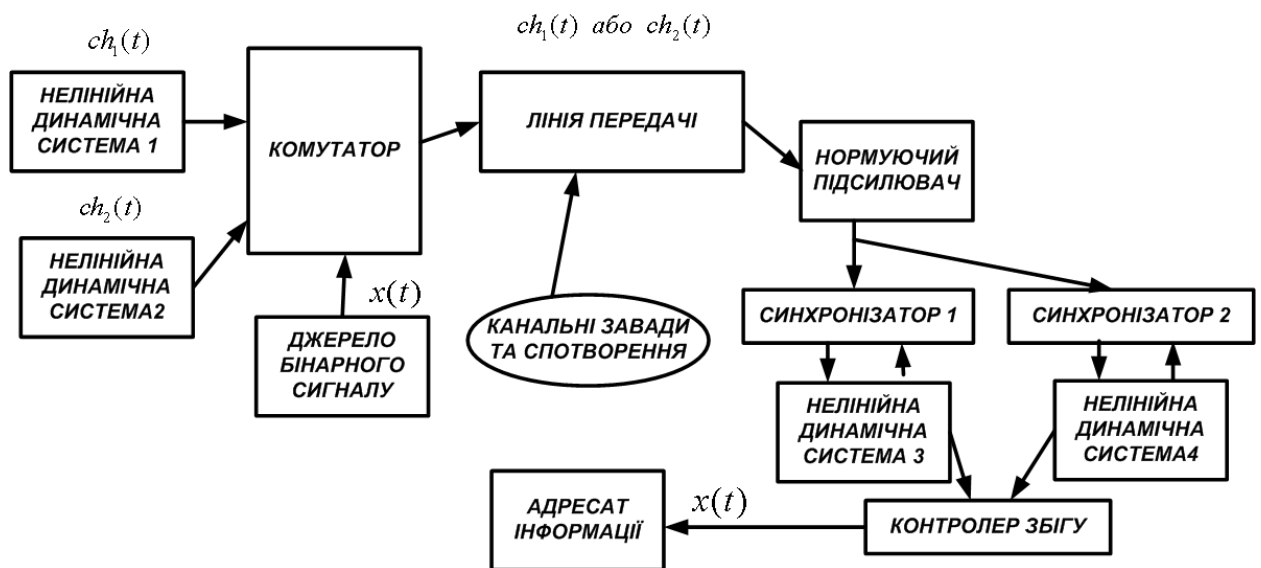


Рисунок 15 – Схема введення та детектування бінарного сигналу в хаотичну систему із перемиканням хаотичних режимів

У випадку бінарного повідомлення на приймальному боці застосовують НДС3, що генерує сигнал $ch_3(t)$, із оператором еволюції, що ідентичний якомусь із застосованих на боці передавача, наприклад, першому. Якщо параметри ХСХ обрані оптимально, то під час дії каналного сигналу $ch_1(t)$ виникатиме повна хаотична синхронізація із НДС3 з сигналом

$ch_3(t)$, і , відповідно, розсинхронізація із НДС4. Фіксуючи факт синхронізації-розсинхронізації, можливо отримати передане бінарне інформаційне цифрове повідомлення через застосування схеми контролера збігу.

В найпростішому випадку керування режимами НДС на передавальному боці можливо здійснити через зміну параметрів біфуркації, в такому випадку маємо один ведучий генератор хаосу на передавальному боці та два ведених (основний та допоміжний) на приймальному.

Розглянута схема введення цифрового інформаційного сигналу в хаотичний є більш стійкою до дії завад в каналі зв'язку за хаотичне маскування та нелінійне підмішування, і крім того забезпечує всі переваги, що забезпечує використання хаотичної піднесівної: широкосмуговість, конфіденційність, прихованість дії, тощо.

Принциповим недоліком таких схем є поява перехідних процесів в момент перемикання, що вимагає застосування певної форми імпульсів для бінарного сигналу та оптимізації вибору застосованих для бінарної передачі значень біфуркаційних параметрів, що може вплинути на швидкість передачі даних. В подальшому для аналізу впливу завад будемо застосовувати саме таку схему для організації хаотичного зв'язку.

3.2 Синтез моделі системних завад

3.2.1 Нелінійна динамічна система Rucklidge

Для застосування в системі зв'язку обрана нелінійна динамічна система Rucklidge. Вибір НДС для роботи обумовлено наступними факторами [19]:

1. НДС Rucklidge є автономною системою де можуть за певних умов утворюватись хаотичні коливання.
2. НДС Rucklidge має геометричну розмірність фазового простору, що дорівнює 3, що відповідає теоремі Пуанкаре – Бендіксона про необхідність

для НДС мати більш як 3 розмірності для можливості формування дивного атрактора за умови аналогової зміни значень фазових змінних.

3. НДС Rucklidge описується відносно простою системою нелінійних диференціальних рівнянь першого порядку, що добре підлягають моделюванню в середовищі Matlab.

4. НДС Rucklidge має досить широкі межі зміни біфуркаційних параметрів для застосування хаотичної модуляції.

5. Кореляційні властивості НДС Rucklidge в режимі генерації хаотичного сигналу мають опосереднені показники що наближаються до оптимальних у порівнянні із аналогічними показниками стохастичних процесів.

6. Численними попередніми дослідженнями підтверджено можливість реалізації ХСХ між НДС Rucklidge на приймальному та передавальному боці телекомунікаційної системи.

7. Структура спектру НДС Rucklidge в хаотичному режимі має високий ступінь рівномірності в широкому діапазоні керуючих параметрів.

8. Габаритний бокс та апертюра дивного атрактора під час суттєвої зміни керуючих параметрів змінюється в незначній мірі, що дає можливість отримувати під час модуляції каналні коливання однакової амплітуди без застосування спеціальних засобів автопідстроювання.

Диференціальна модель НДС Rucklidge запропонована для опису динаміки магнітогідродинамічних процесів ще у 1992р. та має наступний вигляд [37] :

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = ay - yz - kx; \\ \frac{dy}{dt} = x; \\ \frac{dz}{dt} = y^2 - z. \end{cases} \quad (20)$$

де, x, y, z - фазові змінні;

a, k - біфуркаційні параметри (керуючі параметри).

Система (20) є нелінійною через застосування квадратичної функції для однієї із фазових змінних, і саме ця фазова змінна найбільш підходить для використання в якості хаотичної піднесівної та забезпечення ХСХ. Крім того форма сигналу цієї змінної має знаковмінний симетричний характер (рис.16) із нульовим середнім значенням, що відповідає умові генерації радіосигналів піднесівних саме в радіосистемах передачі.

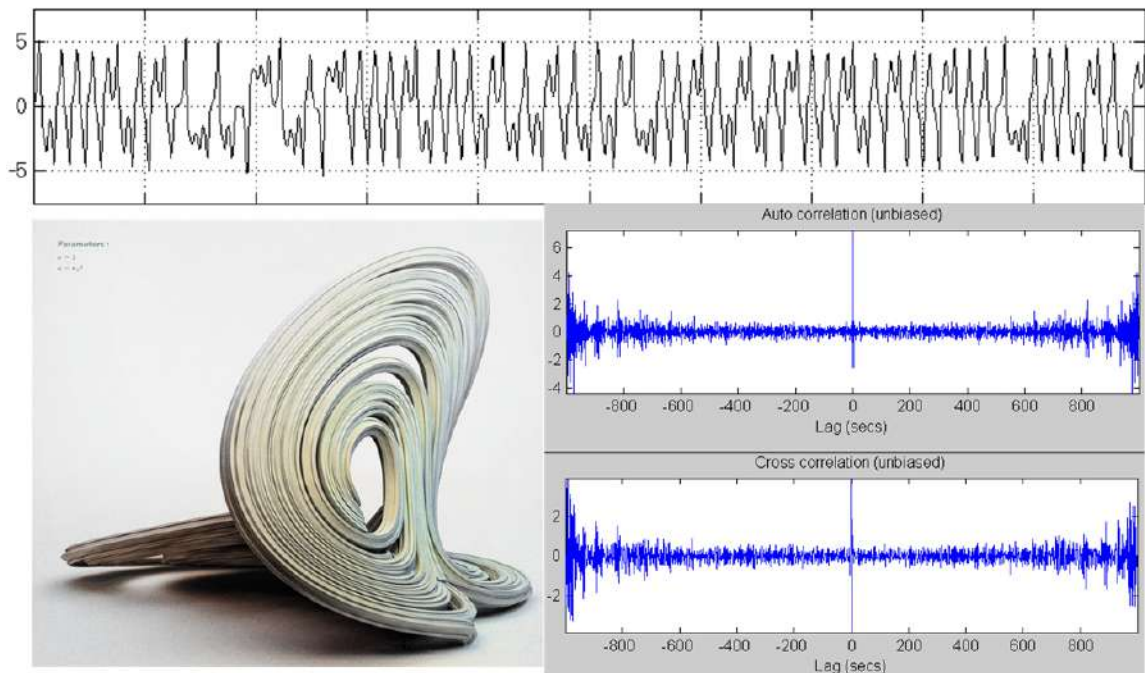


Рисунок 16 – Форма сигналу квадратичної змінної (вверху), візуалізація форми дивного атратора (ліворуч внизу) та автокореляційні та взаємкореляційні функції сигналів НДС Rucklidge в хаотичному режимі із параметрами $a=2$, $k=6,7$

Саме через знаковмінність двох фазових змінних із трьох (x та y) НДС Rucklidge має суттєві перспективи застосування в якості опорних та допоміжних хаотичних генераторів в хаотичних системах зв'язку.

Можливість генерації СДХ в системі Rucklidge підтверджується значеннями показників Ляпунова [8]: -3.193 , 0.193 , 0 . Наявність негативної та позитивної компоненти в спектрі показників Ляпунова підтверджує можливість отримання СДХ та дивного атратора відповідно. Імітаційна

модель НДС (рис.17) в середовищі Matlab із параметрами, що забезпечують хаотичний режим, складається із квадратора, 3-х перемножувачів, 2-х суматорів та 3-х інтеграторів, що легко реалізуються як під час моделювання, так і за допомогою радіоелектронних компонент широкого застосування.

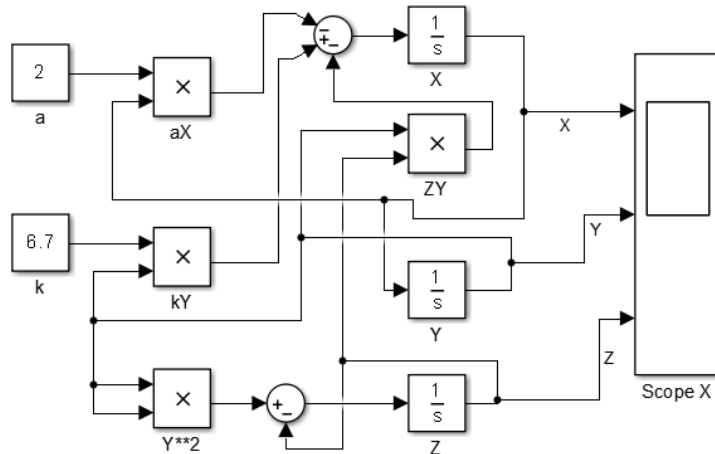


Рисунок 17 – Імітаційна модель Matlab для НДС Rucklidge в хаотичному режимі

Початкові значення під час інтегрування можуть бути довільними (крім нульових), але для більш швидкого виходу на хаотичний режим їх рекомендується обирати в межах діапазону відтворення фазових змінних: від -10 до 10В, якщо фазова змінна розглядається як зміна напруги на виході генератора. Значення біфуркаційних параметрів обирають в дещо вузьких межах, а саме: $a = 1,8...2,2$; $k = 5...8$.

Під час зміни параметрів в межах 20-30 відсотків від середнього значення форма дивного атрактора Rucklidge зберігається із незначною зміною апертури, габаритного боксу та амплітуди сигналів (рис.18), що дає можливість забезпечити модуляцію по керуючим параметрам окремо або одночасно із практичною незмінністю енергії сигналу піднесівної на в лінії передачі.

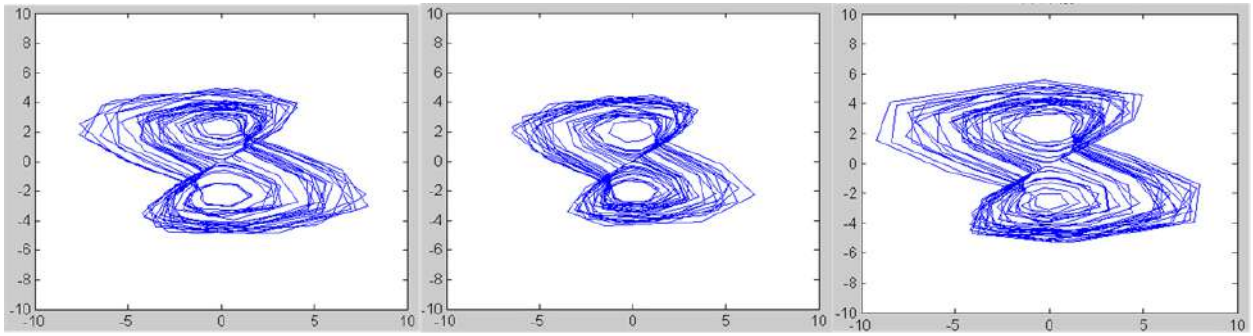


Рисунок 18 – Проекція дивного атрактора Rucklidge на площину XY, для різних пар значень біфуркаційних параметрів: $a = 2; k = 6$ (ліворуч), $a = 1,8; k = 5$ (середина) та $a = 2,2; k = 7$ (праворуч)

Таким чином обґрунтовано застосування НДС Rucklidge для застосування в системі широкопasmового зв'язку на основі хаотичних принципів обробки сигналів. Хаотичні сигнали НДС Rucklidge розглядалися із точки зору подальшої побудови моделей сигналів системних завод.

3.2.2 Імітаційна модель системних завод

В рамках симуляції каналу передачі із хаотичною піднесівною в середовищі Matlab-Simulink слід створити модель системної заводи із урахуванням дискретного представлення сигналу та заводи, а також способу взаємодії із каналом зв'язку.

Основні вимоги щодо побудови моделі системної заводи, виходячи із визначення системної заводи та умов її взаємодії із сигналом, наступні:

1. Спектр системної заводи має розташовуватись в тій самій зоні, що і спектр хаотичних піднесівних.
2. Форма сигналу заводи має мати приблизно однаковий характер із сигналом
3. Статистичний характер заводи має бути максимально близький до статистики гаусівського білого шуму, через передбачувану дію багатьох

сторонніх каналів хаотичного зв'язку на деякий обраний в багатоканальній системі передачі.

4. Характерні точки розриву (зламу) під час взаємодії дискретного та аналогового сигналів мають бути максимально усунуті.

5. Взаємодія із каналним сигналом має передбачувати стабілізацію енергетичного рівня сигналу на вході приймальної частини обраного каналу передачі таким чином, щоб сумарний рівень енергії суміші сигнал-завада не змінювався, а відношення сигнал-завада можливо було регулювати.

Відповідно цим вимогам розроблена допоміжна модель (рис.19) що дозволила провести синтез завади, що відповідає усім вимогам системної завади за формою, спектром, статистикою, тощо.

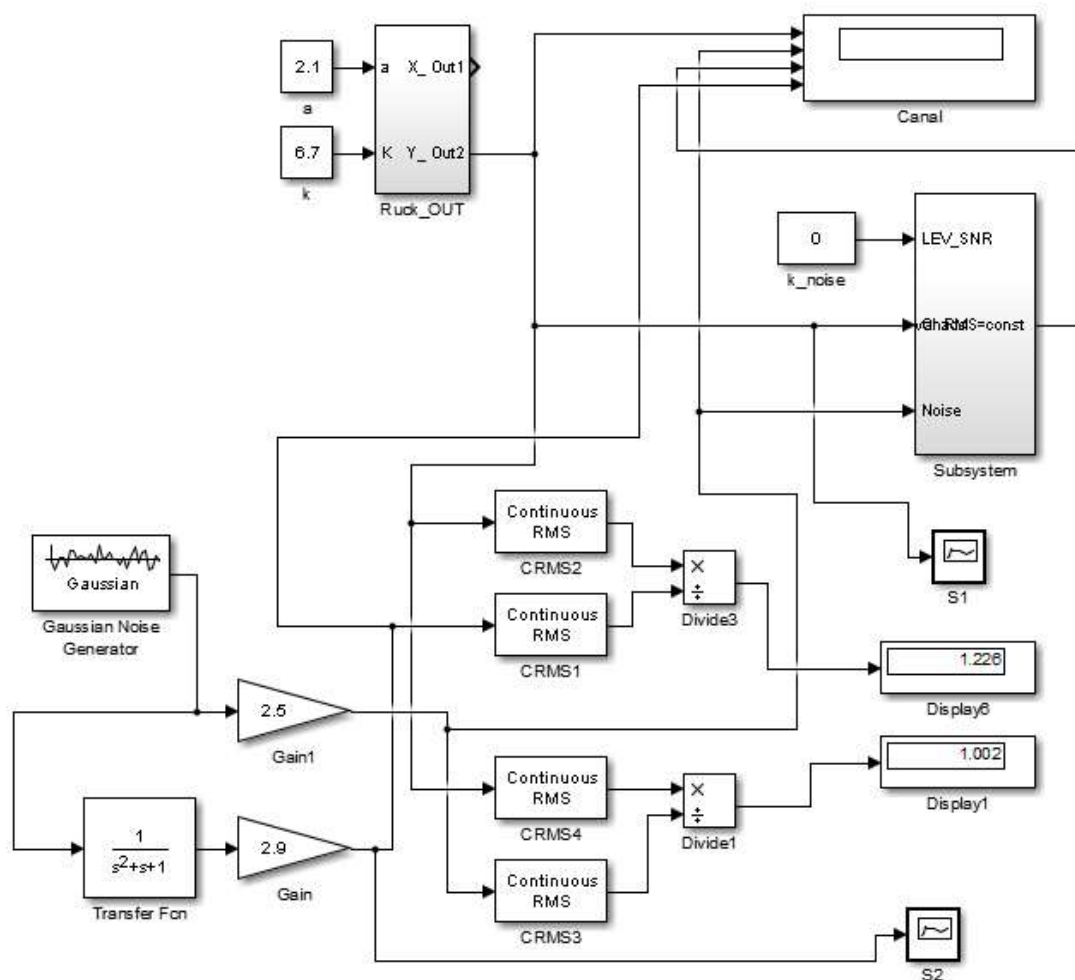


Рисунок 19 – Структурна модель для імітації системних завад хаотичного каналу зв'язку

Модель складається із двох субблоків (виділено сірим кольором), один із яких є моделлю НДС Rucklidge із налаштуваннями параметрами біфуркації, а другий пропорційним суматором каналного сигналу та сигналу системної завади. Первинним джерелом завади є гаусівський генератор випадкових чисел, що створює дискретний потік значень із нормальним розподілом. За допомогою налаштувань швидкості подачі цих значень, можливо регулювати спектральні характеристики. Проблема синтезу саме системної завади і полягає в узгодженні дискретного потоку даних цього генератора із аналоговими результатами генерації СДХ за допомогою вирішення системи нелінійних рівнянь через внутрішні обрахунки атрактору Rucklidge.

Індикаторними елементами моделі (рис.19) є багатоканальний осцилограф та індикатори відношення сигнал-завада, що під час побудови моделі дослідження регулюються таким чином, щоб за середнім рівнем (RMS) завада та сигнал були однаковими (0дБ).

3.2.3 Параметри системної завади хаотичного каналу

Параметри моделі системної завади залежать від параметрів генератора випадкових чисел із нормальним розподілом. В останньому присутня можливість встановлення математичного сподівання та середньоквадратичного відхилення, що є тривіальними параметрами. В нашому випадку математичне сподівання доцільно встановити нульовим, а середньоквадратичне відхилення стандартним, та таким, що дорівнює 1. В подальшому регулювання рівня завади можливо здійснювати через елемент зовнішнього підсилення.

Важливим параметром генератора випадкових чисел із нормальним розподілом є параметр середовища Simulink Sample time, який фактично задає частотний ресурс завади. Моделювання із різними частотними

ресурсами (рис.20...22) дозволило зробити висновок про використання параметру $\text{Sample time}=1$ як такого, що за структурою спектру відповідає спектру хаотичного сигналу генератора Rucklidge (рис.17). Але структура сигналу залишається із наявністю розривів функції другого роду, які слід усунути для адекватного представлення системної задачі.

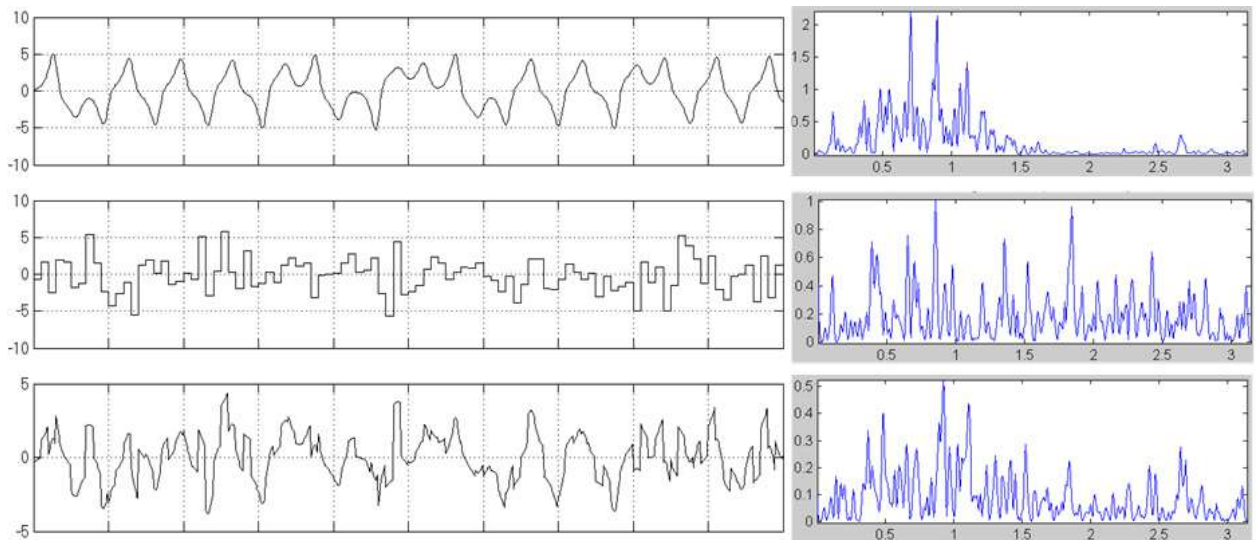


Рисунок 20 – Хаотичний сигнали та спектри: генератора Rucklidge (зверху); сигнал генератора нормального розподілу за умови $\text{Sample time} = 1$ (середина); суміш завади та сигналу для $\text{SNR}=0$

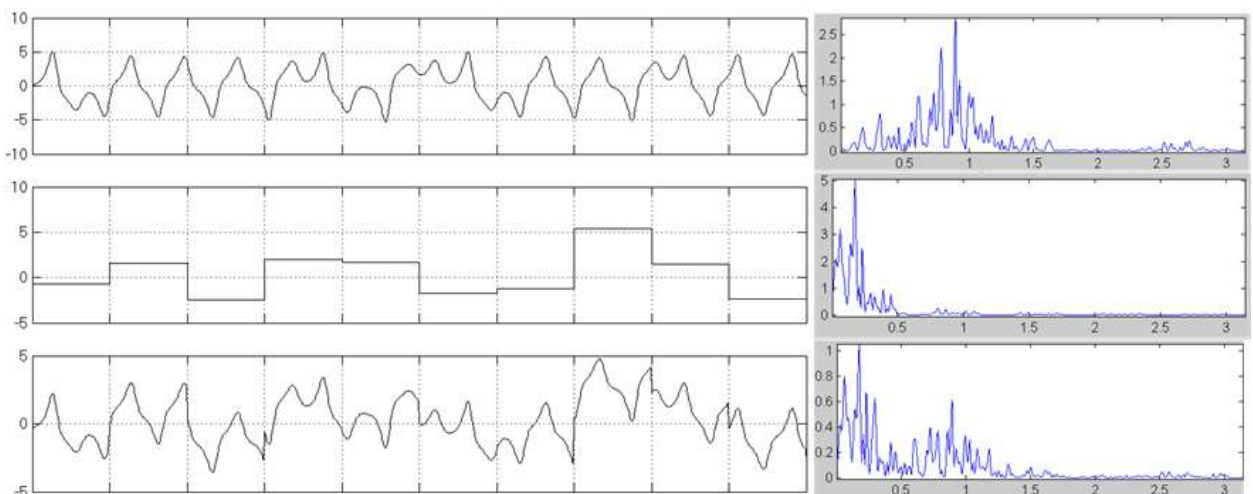


Рисунок 21 – Хаотичний сигнали та спектри: генератора Rucklidge (зверху); сигнал генератора нормального розподілу за умови $\text{Sample time} = 10$ (середина); суміш завади та сигналу для $\text{SNR}=0$

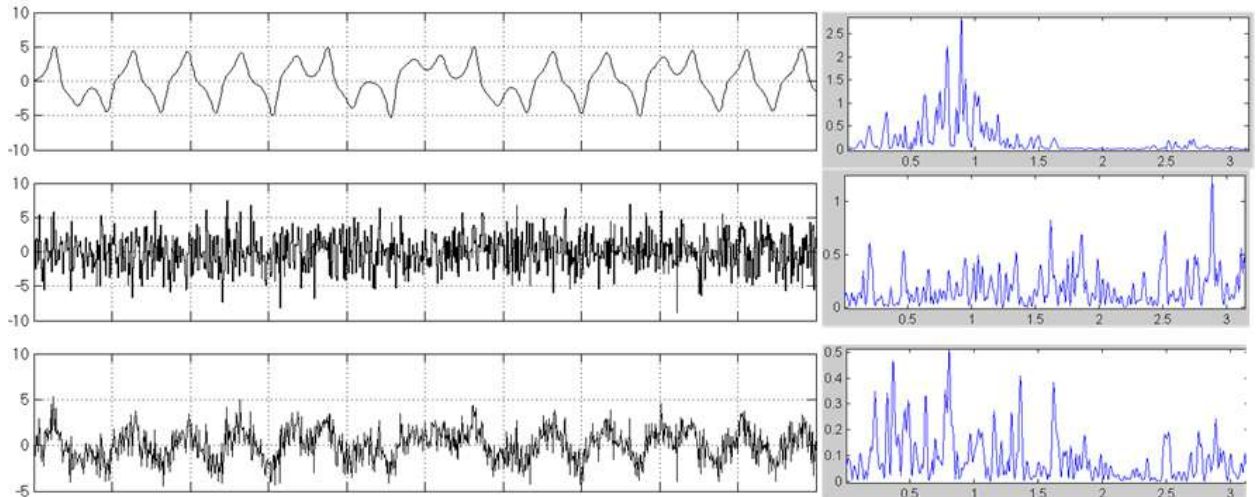


Рисунок 22 – Хаотичний сигнали та спектри: генератора Rucklidge (зверху); сигнал генератора нормального розподілу за умови Sample time = 0.1 (середина); суміш завади та сигналу для SNR=0

Запропоновано для забезпечення плавної зміни сигналу в зоні зміни застосувати інтегруючий елемент у вигляді фільтра низької частоти (ФНЧ) із характеристикою ланки подвійного інтегрування:

$$K(s) = \frac{1}{as^2 + bs + c}, \quad (21)$$

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

Регулюванням параметрів (21) можливо обробити дискретизований та квантований сигнал генератора випадкових чисел (див. рис.20) таким чином, що отримати коливання максимально наближене по формі та структурі із хаотичним коливанням (рис.23,24). Шляхом моделювання (рис.23) встановлено, що найбільш оптимальним ФНЧ є фільтр із параметрами:

$$K(s) = \frac{1}{1s^2 + 1s + 1}, \quad (22)$$

де $a=v=c=1$.

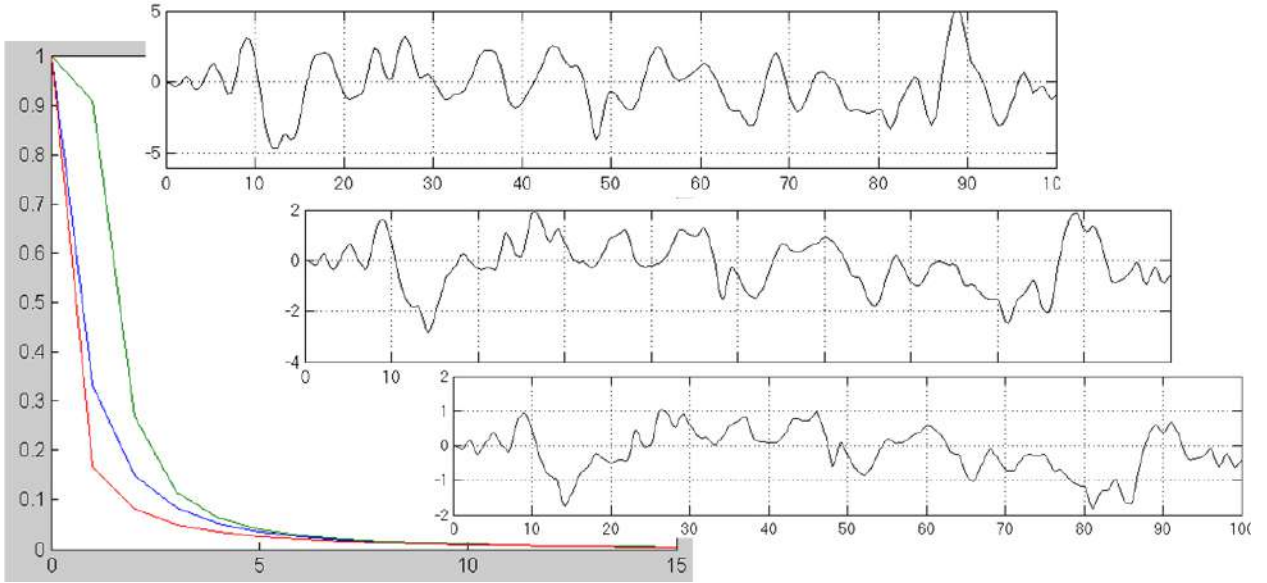


Рисунок 23 – Частотні характеристики ФНЧ та результат обробки сигналу із параметрами $b = 1, 3, 6$ (зверху вниз)

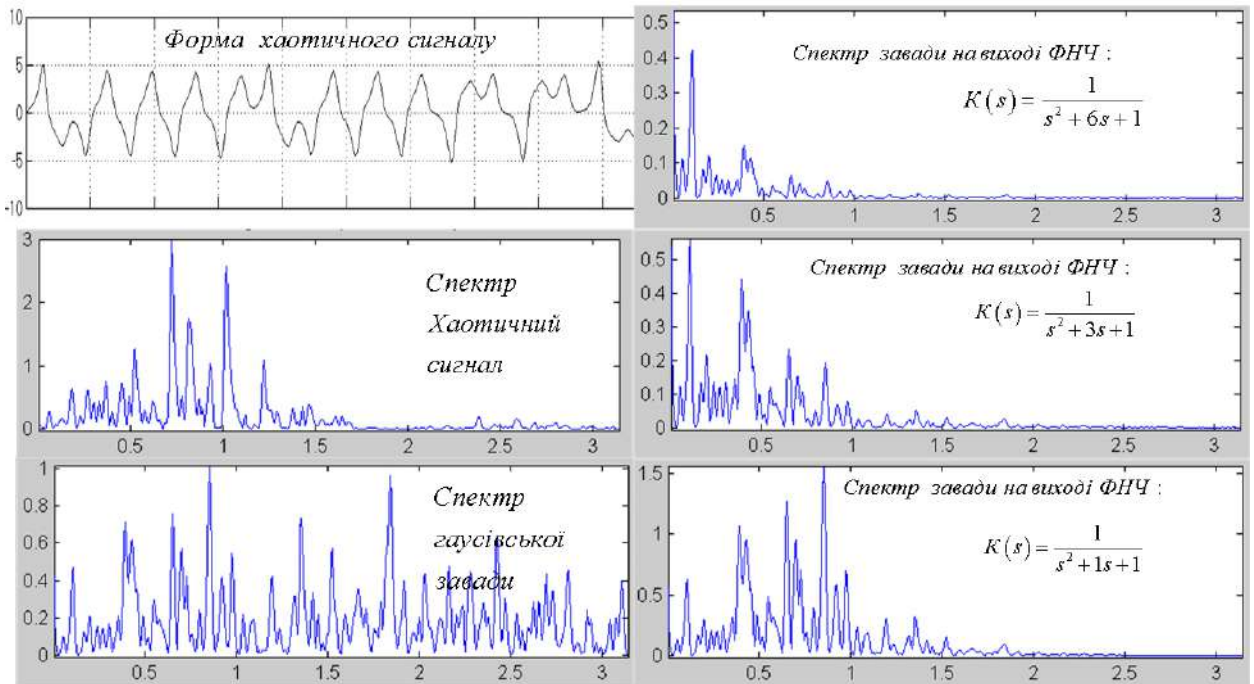


Рисунок 24 – Спектри заводи після обробки ФНЧ для досягнення задекларованих властивостей системної заводи

Таким чином розроблена модель системної заводи, що складається із дискретного генератора потоку чисел із нормальним розподілом та ФНЧ із

встановленими параметрами передавальної функції відповідно темпу видачі випадкових значень у середовищі Simulink.

3.3 Модель взаємодії сигналу та завади в хаотичному каналі зв'язку

3.3.1 Схема та алгоритм пропорційної взаємодії

Модель взаємодії сигналу та системної завади розроблялась із урахуванням наступних вихідних положень:

1. Слід забезпечити стабілізацію рівня адитивної суміші сигнал-завада на рівні сигналу ($RMS = const$).
2. Під час виконання умови 1 слід забезпечити можливість зміни SNR в заданих межах в дБ.

Запропоновано назву для такої моделі взаємодії як пропорційні адитивні завади.

Подібні вимоги виходять із попередніх досліджень [3] та практики автоматичного регулювання рівня сигналу на вході приймального пристрою. Проблема адитивної суміші в хаотичних системах полягає в тому, що під час великих рівнів шуму апертюра атрактора (ААТ) різко збільшується, що під час практичної реалізації схеми передачі призводить до необхідності використання технічних пристроїв із нереально великим динамічним діапазоном.

В протилежному випадку, за результатами моделювання, що представлено в наступному підрозділі, метод пропорційної взаємодії завади та сигналу (в нашому випадку системної завади) не призводить до різкого зростання апертюри атрактора, що підтверджує доцільність його застосування на практиці.

Модель пропорційної адитивної взаємодії (рис.25) сигналу та завади складається із типових математичних блоків Simulink.

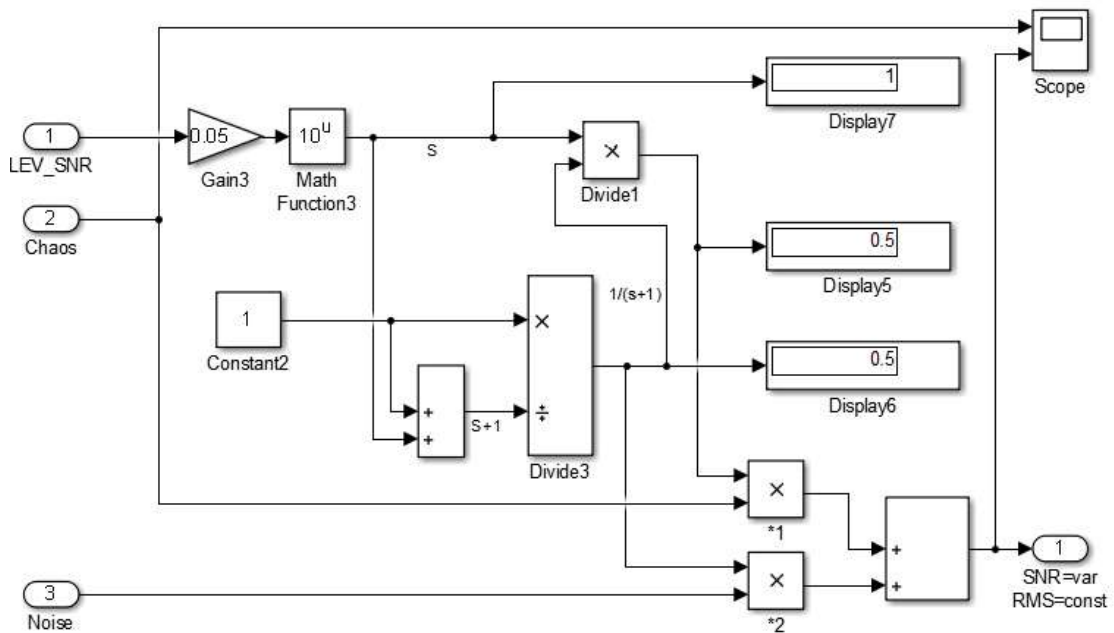


Рисунок 25 – Імітаційна модель Simulink (субблок) взаємодії сигналу та завади із стабілізацією рівня шуму

По першому входу в моделі (рис.25) реалізується обчислення абсолютного рівня відношення сигнал-завада за напругою:

$$s = 10^{\frac{1}{20}U}, \quad (23)$$

де U - SNR, що представлена для вводу в дБ.

Для подання на входи сигналу та завади їх рівні мають бути вирівняні за однаковим значенням RMS. Під час взаємодії хаотичний сигнал масштабується із коефіцієнтом:

$$ch_{out} = \frac{s}{s+1} ch_{in}, \quad (24)$$

де ch_{out}, ch_{in} - хаотичні сигнали на виході та вході першого масштабувача (перемножувача 2 в схемі рис.25).

Під час взаємодії сигнал системної завади масштабується із коефіцієнтом:

$$n_{out} = \frac{1}{s+1} n_{in}, \quad (25)$$

де n_{out}, n_{in} - сигнали системної завади на виході та вході другого масштабувача (перемножувача 2 в схемі рис.1).

Під час адитивної взаємодії реалізується відповідно умовам (25) та (24) реалізується суміш:

$$ch_{out} + n_{out} = \frac{s}{s+1} ch_{in} + \frac{1}{s+1} n_{in}, \quad (26)$$

і якщо виконується умова на вході:

$$RMS\{ch_{in}\} = RMS\{n_{in}\}, \quad (27)$$

то в середньому за (26) та (27) маємо:

$$RMS\{ch_{out} + n_{out}\} = RMS\{ch_{in}\}, \quad (28)$$

що забезпечує виконання вищезгаданої умови №1 для побудови моделі взаємодії із с системною завадою.

Значення SNR в абсолютних одиницях буде становити із (1):

$$\frac{ch_{out}}{n_{out}} = \frac{\frac{s}{s+1} ch_{in}}{\frac{1}{s+1} n_{in}} = s \frac{ch_{in}}{n_{in}}, \quad (29)$$

що і забезпечує рівень відношення сигнал-завада за умови стабілізації середнього рівня сукупного сигналу на вході приймача хаотичної системи обробки.

3.3.2 Моделювання пропорційної взаємодії

Результати роботи моделі взаємодії сигналу та системної завади в часовій зоні (рис.26) для різних значень SNR підтверджують правильність роботи алгоритму (див. попередній пункт), де поточні значення хаотичного сигналу та його суміші із завадою розташовані в межах від -5 до +5(В) для різних значень SNR.

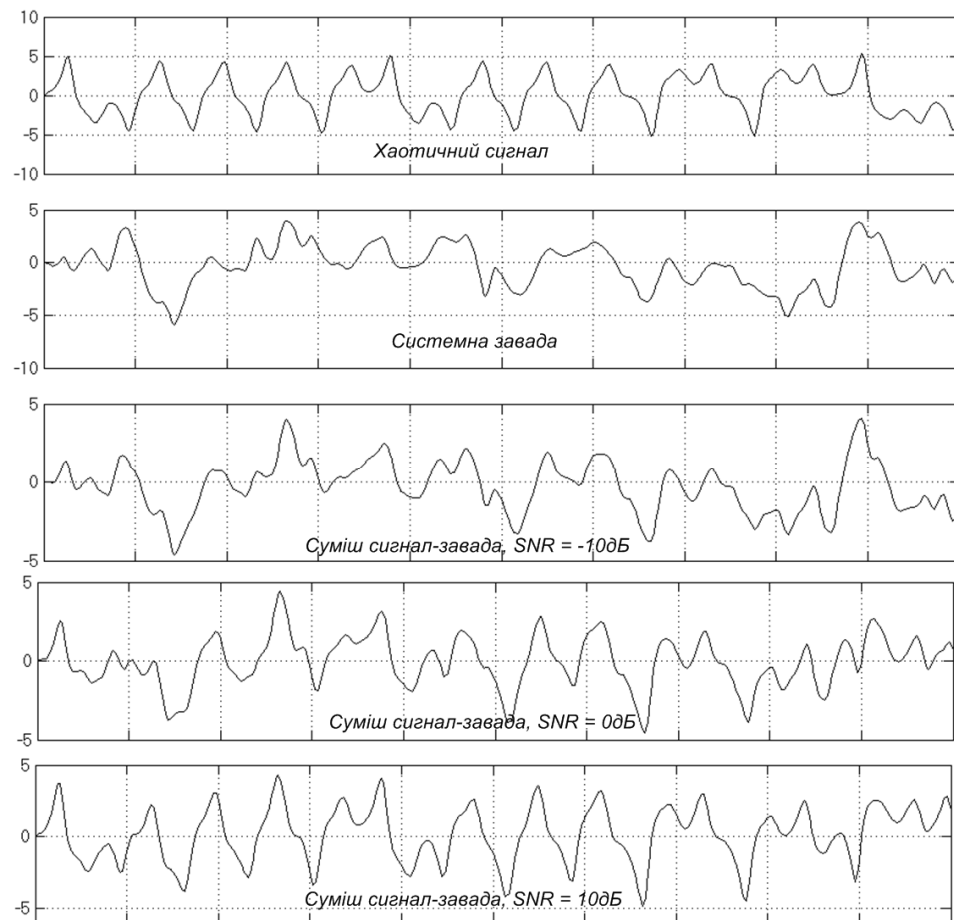


Рисунок 26 – Результат взаємодії хаотичного сигналу із адитивною системною завадою за умови $SNR = -10, 0, +10$ дБ

Детальний аналіз аперттури атракторів на приймальному боці проведений вже після розробки досліджувальної моделі системи передачі в якій паралельно досліджується передача двох бінарних логічних рівнів, по кожному із яких аналізується ААТ. З математичної точки зору це є обчисленням максимуму максимуму за багатьма змінними.

Дослідження аперттури атрактора проводились для типових умов сильного зв'язку між ГДХ на приймальному та передавальному боці в системі за умови дії системних завад (не широкосмугових шумів). В результаті дослідження (рис.27) виявлено, що ААТ в діапазоні від -40 до 40 дБ за SNR змінюється не більше як на ± 5 дБ від середнього значення в 40 дБ, що дозволяє із легкістю реалізовувати подібні моделі на практиці.

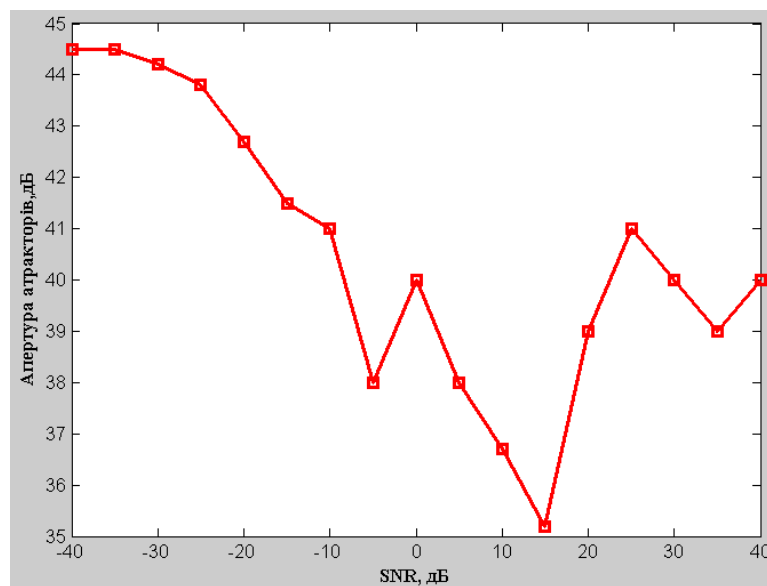


Рисунок 27 – Залежність аперттури атракторів на приймальному боці системи передачі під час використання алгоритму пропорційної адитивної взаємодії

Під час додаткових досліджень аперттури атрактора за допомогою вбудованого графопобудовника Simulink (рис.28) також очевидна стабілізація аперттури атрактора, хоча збільшення пропорційного рівня системних завад також приводить до незначного пропорційного збільшення аперттури атрактора. Це пояснюється механізмом десинхронізації системною

завадою як основного, так і допоміжного приймального хаотичного генератора незалежно від встановлюваних біфуркаційних параметрів передачі логічних рівнів.

Крім того основні значення змінних зосереджені в центральній зоні атракторів, фіксуються тільки незначна кількість відхилень, що може бути критерієм для ідентифікації логічних рівнів на приймальному боці системи із хаотичними піднесівними за принципом порівняння еволюції основного та допоміжного ГДХ на приймальному боці системи.

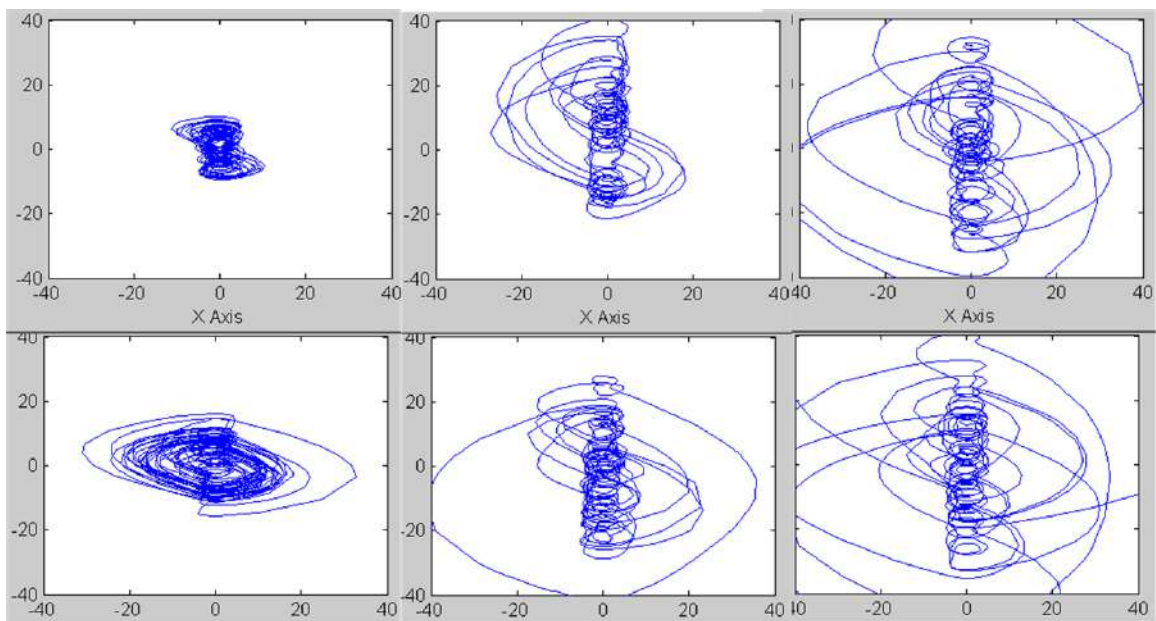


Рисунок 28 – Проекція атракторів основних приймальних генераторів на площину змінних XY під час передачі логічної 1 (вверху) та логічного 0 (внизу) за умови SNR=20дБ (ліворуч), SNR=0дБ (середина) та SNR=-20дБ (ліворуч)

Таким чином запропонована модель пропорційної адитивної взаємодії системних завод із канальними СДХ забезпечує стабілізацію рівня апертури атрактора, що важливо для практичної реалізації моделі системи передачі на основі використання хаотичних піднесівних та бінарної модуляції за біфуркаційними параметрами.

4 ПРАКТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СИСТЕМНИХ ЗАВАД

4.1 Імітаційне моделювання окремих блоків

4.1.1 Декомпозиція моделі Rucklidge для синхронізації

Ключовим елементом приймальної частини є НДС Rucklidge, що перебувають в хаотичному режимі та синхронізуються з боку передавальної НДС Rucklidge із встановленими параметрами біфуркації певним чином. ХСХ реалізується через введення в коло зворотного зв'язку приймальної НДС по одній із фазових змінних сигналу з боку передавальної частини. Для досягнення ідентичної ХСХ сила передавального хаотичного сигналу по відношенню до рівня внутрішнього сигналу має бути значною [19,37].

Попередніми дослідженнями [19] було встановлено, що найбільш доцільним для забезпечення ХСХ є використання фазової змінної «у». Таким чином декомпозиція схеми рис.1 враховує саме такий спосіб ХСХ, що реалізовано в імітаційній моделі (рис.29) по входу 4.

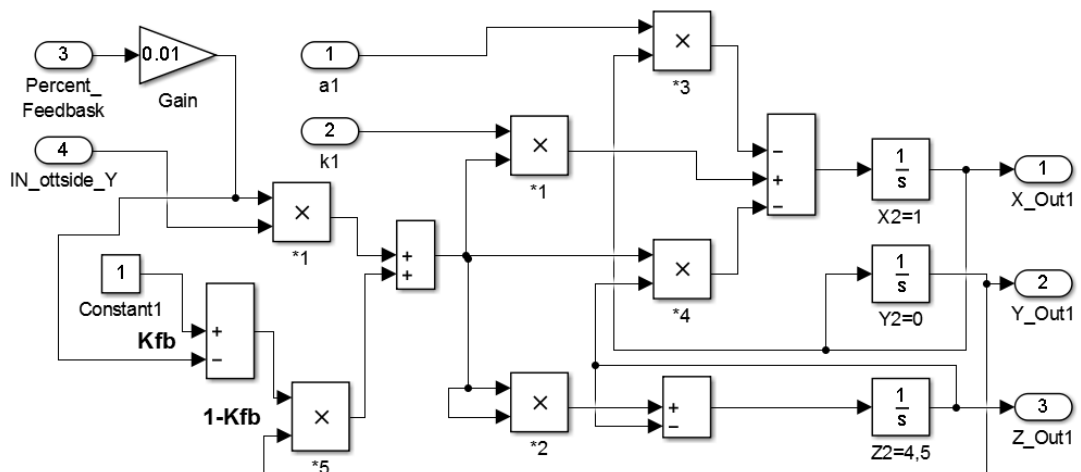


Рисунок 29 – Імітаційна модель НДС Rucklidge із декомпозицією по фазовій змінній «у» для введення сигналу синхронізації

По входу 3 в декомпозиційній моделі генератора Rucklidge встановлюється рівень зовнішнього хаотичного сигналу у відсотках, що надходить з лінії передачі до внутрішньої структури. Вибір цього рівня суттєво впливає як на швидкість так і на можливість забезпечення ХСХ. Під час всиновлення рівня зовнішнього хаотичного сигналу, пропорційно змінюється рівень внутрішнього сигналу для забезпечення балансу рівнів в НДС Rucklidge на приймальному боці.

Хаотичний сигнал в каналі зв'язку набуває спотворень та завад, таким чином, синхронізуюче коливання спроможне забезпечити різні рівні ідентичності повної ХСХ, залежно від рівня завад, що і основним предметом дослідження в цій роботі.

4.1.2 Моделі енергетичних критеріїв збігу

Теоретичні засади та можливості контролю збігу еволюцій НДС в хаотичному режимі докладно наведені в публікації автора цієї магістерської роботи (додаток А), де проаналізовано ряд варіантів, що використовують одну або декілька однойменних фазових змінних (рис.30).

В простих системах хаотичного зв'язку на основі хаотичної синхронізації, де інформаційний сигнал передається по одному окремому каналу та призводить до синхронізації або десинхронізації основного та допоміжного ведених хаотичних генераторів задля високої швидкодії застосовують простий енергетичний критерії, що враховує часовий ряд тільки по одній фазовій змінній, бажано тій, що використовується для передачі синхронізуючого сигналу (змінна Rucklidge – Y)/

Використання двох і більше фазових змінних призводить до необхідності вирішувати питання збігу за рештою фазових змінних певним чином, через використання як амплітудних так і фазових співвідношень між сигналами складної форми – СДХ.

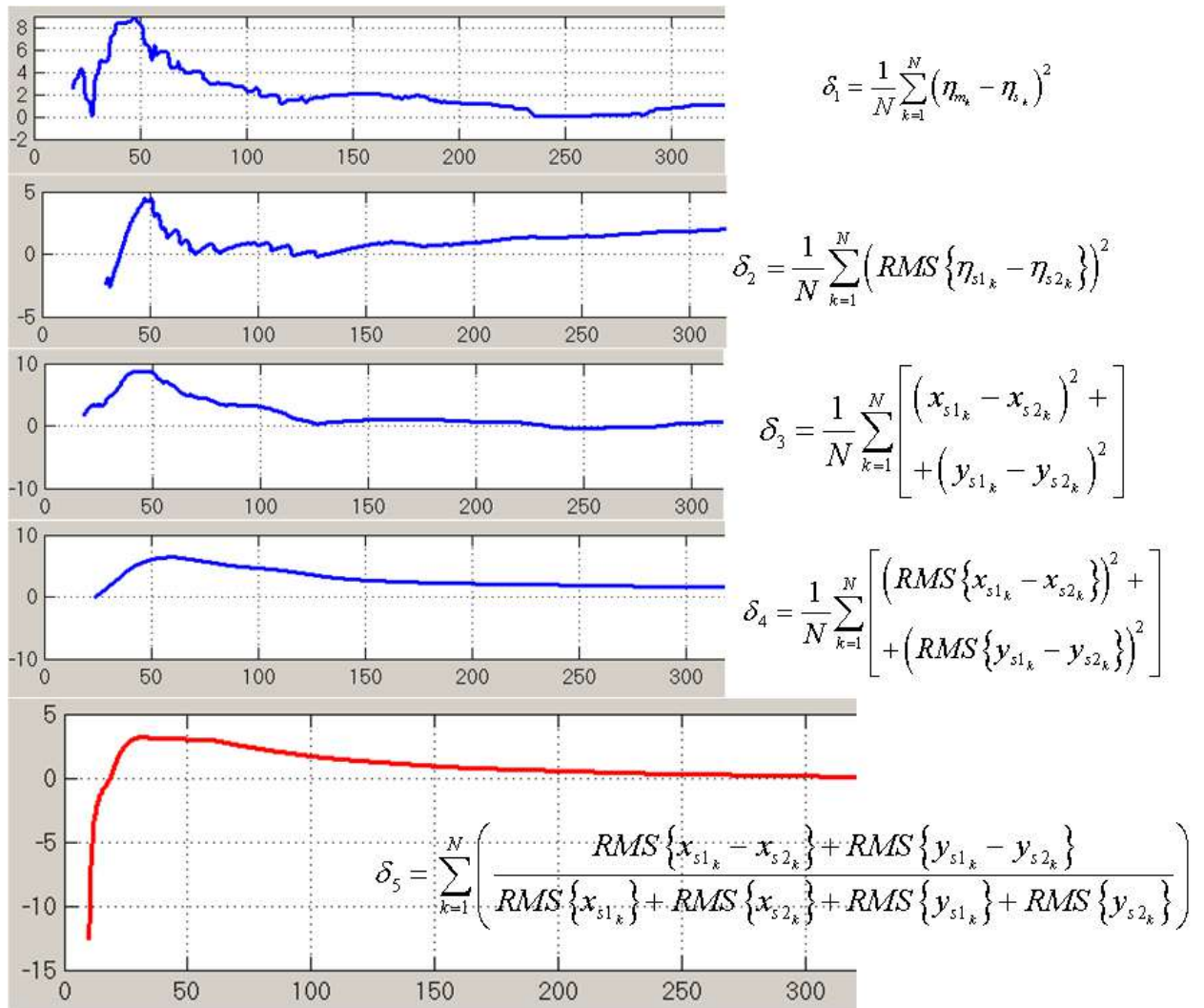


Рисунок 30 – Енергетичні критерії контролю збігу еволюцій основного та допоміжного ведених НДС в хаотичному режимі

Відповідно рис.30, найбільш доцільним для застосування є критерій рівня збігу (КРЗ) із застосуванням порівняння відносних відхилень усіх фазових змінних, що забезпечує максимальну гладкість кривої похибки збігу та наявність одного експериментального глобального максимуму.

Структурна реалізація відносного енергетичного критерію в середовищі Simulink (рис.31) виконана у вигляді окремого блоку, за умови більшої кількості фазових змінних структура легко масштабується.

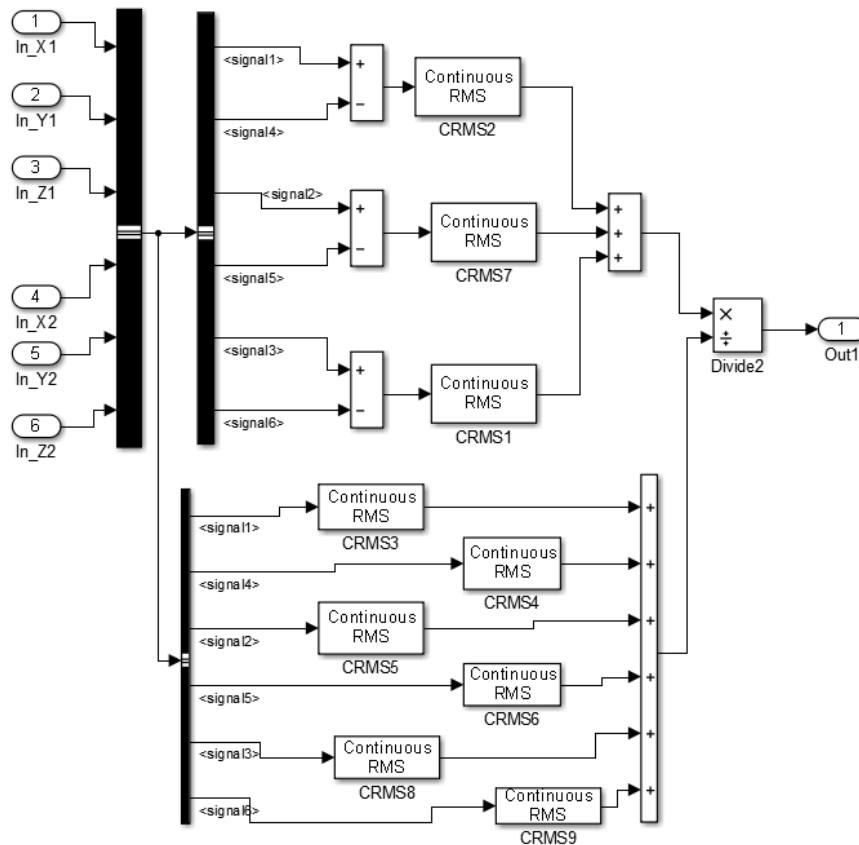


Рисунок 31 – Імітаційна модель Simulink (субблок) для реалізації відносного енергетичного критерію збігу еволюції за 3-ма фазовими змінними

Через властивості графіку (див.рис.30) залежності можливо забезпечити найвищу пропускну спроможність мінімізуючи час аналізу збігу в реальній системі передачі інформації із хаотичними піднесівними.

4.1.3 Моделі фазових критеріїв збігу

Інваріантний для амплітуди КРЗ доцільно застосовувати в випадку різких коливань завад під дією завад. Як шумові так і системні завади спричиняють такий ефект у випадку співмірних значень рівнів сигналу і завади, або коли завада набагато більша за рівнем.

Фазовий КРЗ в класичному вигляді для трифазних генераторів хаосу можливо представити як [25]:

$$\delta_6 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left[\left(\text{sign}(x_{1j}) - \text{sign}(x_{2j}) \right)^2 + \left(\text{sign}(y_{1j}) - \text{sign}(y_{2j}) \right)^2 + \left(\text{sign}(z_{1j}) - \text{sign}(z_{2j}) \right)^2 \right]} \cdot \prod_{i=1}^2 \left\{ \max[x_i(t), y_i(t), z_i(t)] - \min[x_i(t), y_i(t), z_i(t)] \right\}, (30)$$

де $x_i(t), y_i(t), z_i(t)$ - фазові змінні;

$\text{sign}(*)$ - функція ідентифікації знаку аргументу [1,0,-1].

Суть критерію (30) в представленні рівня збігу як відносної суми квадратів різниць сигналів оброблених функцією знаку аргументу. Практична реалізація у вигляді імітаційної моделі Simulink (рис.32) доволі складна та потребує значної кількості апаратних пристроїв обробки, хоча має доволі високу швидкодію.

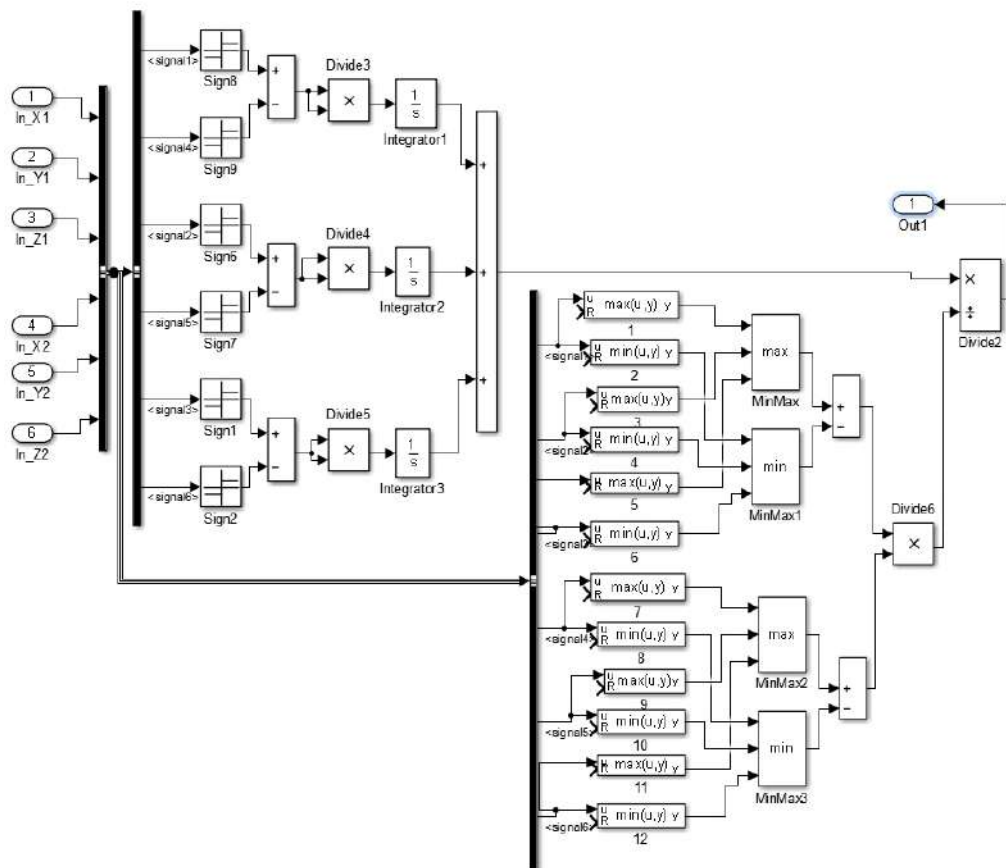


Рисунок 32 – Імітаційна модель Simulink фазового відносного мінімаксного критерію збігу основного і допоміжного генератора

Дещо усунути недоліки імітаційної моделі збігу приймальних хаотичних генераторів можливо застосувавши спрощений алгоритм обчислення збігу на основі функції ідентифікації фази аргументу. Алгоритм ґрунтується на факті знакозмінності сигналів двох із трьох фазових змінних в хаотичному генераторі Rucklidge. Алгоритм може бути представлений у вигляді аналітичної моделі:

$$\delta_7 = \frac{\sum_{j=1}^N [\text{sign}(x_{1j}) \cdot \text{sign}(x_{2j})] + \sum_{j=1}^N [\text{sign}(y_{1j}) \cdot \text{sign}(y_{2j})]}{\sum_{j=1}^2 [RMS(x_j) + RMS(y_j)]}, \quad (31)$$

де N – кількість досліджуваних дискретів аналізу;

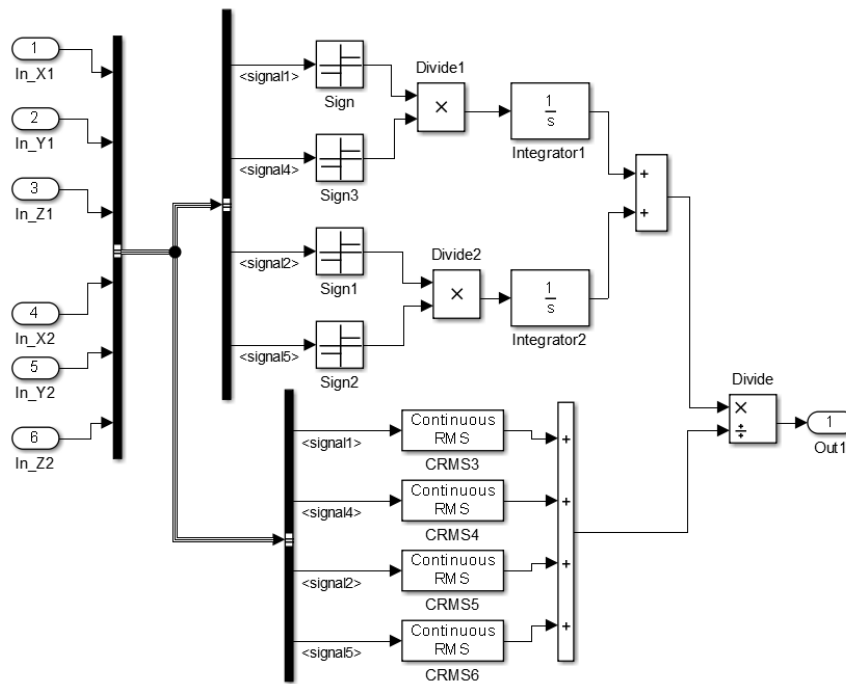


Рисунок 33 – Імітаційна модель Simulink відносного фазового енергетичного критерію збігу основного і допоміжного хаотичного генератора

Суть фазового критерію (31) полягає у дискретизації вихідних сигналів основного і допоміжного генераторів із двома рівнями квантування у точках нуль-перетину (рис.33). Надалі такі бінарні послідовності подаються на

логічний елемент «Виключне АБО» (перемножувач), а результат інтегрується. Чим більший рівень сигналу після інтегрування тим вищий рівень ідентичності хаотичних сигналів приймальних хаотичних генераторів.

Кількість математичних операцій в такому способі аналізу набагато менше за попередній, а апаратна реалізація простіше. Ефективність застосування такого критерію буде досліджено в подальшому розділі.

4.1.4 Моделі мінімаксних критеріїв збігу еволюцій

Мінімаксні критерії використовуються для дослідження зміни апертури атракторів під час ХСХ. Під час застосування такого критерію обчислюються максимальний радіус габаритного боксу в тривимірній площині. Фізичним аналогом цього параметру є визначення динамічного діапазону амплітуд в пристроях визначення збігу приймальних хаотичних генераторів.

Обчислення апертури атрактора проводиться через визначення мінімального та максимального значення по усім фазовим змінним у часі та серед усіх фазових змінних та визначення їх різниці в логарифмічних одиницях.

Абсолютна ААТ для одного із генераторів визначається як:

$$AA_j = \max [x_i(t), y_i(t), z_i(t)] - \min [x_i(t), y_i(t), z_i(t)], \quad (32)$$

де j – номер досліджуваного генератора на приймальному боці системи.

Імітаційна модель Simulink для обчислення апертури атрактора за (32) представлена на рис.34.

На основі схеми визначення апертури атрактора та попередніх досліджень візуального осцилографічного критерію збігу можливо запропонувати мінімаксний КРЗ.

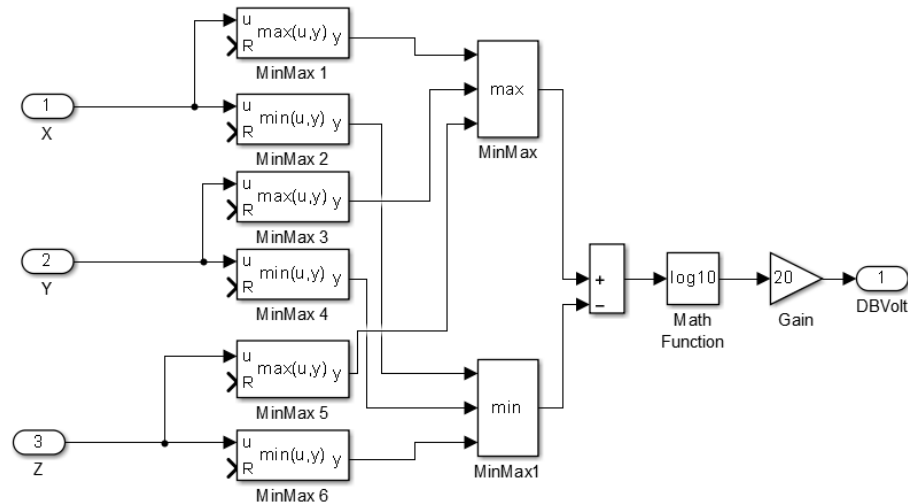


Рисунок 34 – Імітаційна модель Simulink обчислення логарифмічного значення аперттури атрактора хаотичних генераторів по усім фазовим змінним

Ідея застосування такого критерію полягає в тому, що під час високого рівня завад фіксуються поодинокі різкі спотворення в сигналах фазових змінних (рис.36), що формують атрактор. Кількість таких викидів пропорційна рівню десинхронізації, що викликана завадами, тому фіксуючи загальний їх рівень можливо оцінювати і рівень ХСХ.

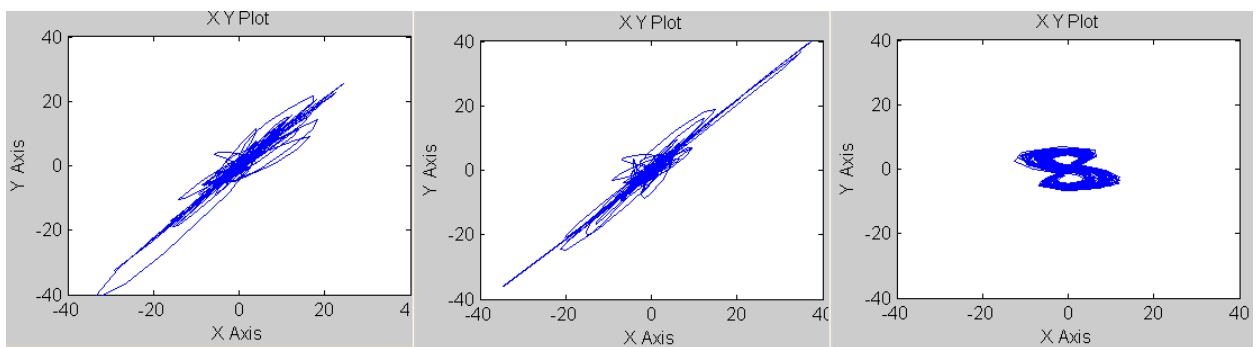


Рисунок 35- Результати осцилографічного порівняння однойменних фазових змінних основного та допоміжного приймального хаотичного генераторів під час передачі логічної 1 (ліворуч) та логічного нуля (середина) за умови наявної форми атрактора на передавальному боці (праворуч)

Аналітично такий КРЗ для можливо записати як :

$$\delta_8 = \max \left[(x_{1i} - x_{2i}), (y_{1i} - y_{2i}), (z_{1i} - z_{2i}) \right] - \min \left[(x_{1i} - x_{2i}), (y_{1i} - y_{2i}), (z_{1i} - z_{2i}) \right], \quad (33)$$

що відповідає фактично апертурі різницевого атрактора, за умови дії завад в системі передачі інформації із використанням допоміжного хаотичного генератора.

В імітаційній моделі (рис.36) застосування критерію (33) відсутні нелінійні блоки та суматори накопичувачі, тому такий запропонований КРЗ має максимальну швидкодію та максимально просту реалізацію.

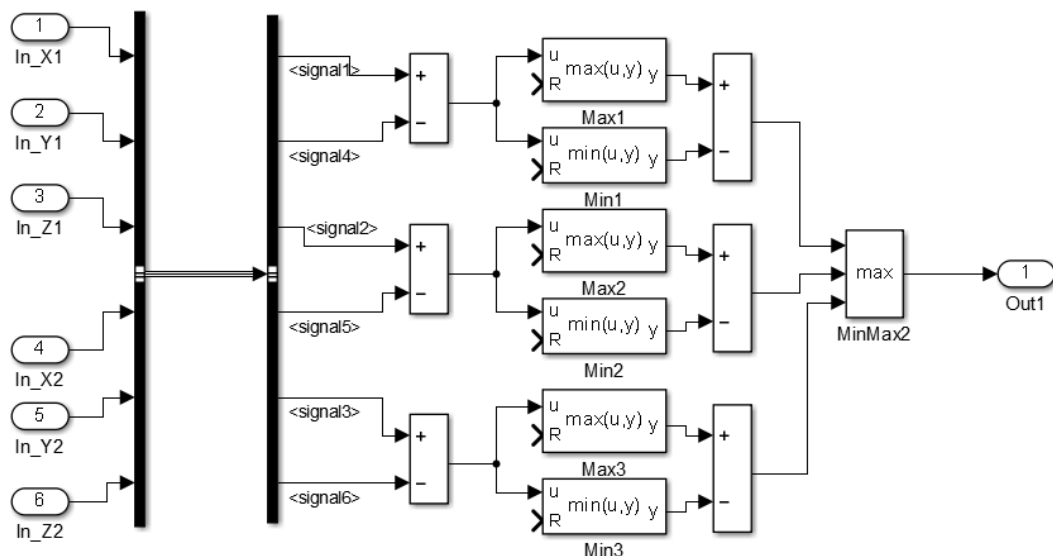


Рисунок 36- Мінімаксний критерій збігу різниці однойменних фазових змінних (аперттури атрактора різниці)

Таким чином, під час розгляду критеріїв збігу еволюції приймальних хаотичних генераторів для подальших досліджень запропоновано виділити 4 критерії із умовними назвами:

1. Відносний енергетичний КРЗ (δ_5).
2. Відносний різницево-фазовий КРЗ (δ_6)
3. Відносний абсолютний фазовий знакозмінних сигналів КРЗ (δ_7).

4. Абсолютний різницевий мінімаксий КРЗ (δ_8).

Використання декількох критеріїв, в тому числі запропонованих автором, в імітаційній моделі системи хаотичного зв'язку із впливом системних завад дозволить підвищити рівень адекватності розробленої моделі на основі перехресного порівняння динаміки результатів.

4.2 Імітаційне моделювання системи передачі

4.2.1 Верифікаційна модель системи

Необхідність побудови верифікаційної моделі (рис.37) обґрунтовується забезпеченням достатнього рівня адекватності подальших результатів під час дослідження. Через велику кількість елементів імітаційна модель побудована на основі ряду субблоків, структура та принцип роботи яких описано в попередньому розділі. Початкові данні для імітаційного моделювання вводяться як константи Simulink.

Структура верифікаційної моделі складається із двох незалежних схем (верхня та нижня частини). Кожна із схем призначена для дослідження передачі логічного рівня в бінарній схемі передачі, залежно від налаштувань передавальних генераторів хаотичного сигналу. Паралельно дослідження передачі логічного нуля та логічної одиниці дозволяє оцінити можливості приймальної структури розрізнити ці логічні рівні.

Критерієм оцінювання є відношення рівня ідентичності або неідентичності (КРЗ) основного та допоміжного генераторів хаотичного коливання під час передачі логічного нуля та логічної одиниці. Чим більше значення критерію оцінювання тим більший запас завадостійкості отримується за умови певного рівня завад. Близькі або нестабільні значення критерію оцінювання говорять або про відсутність ХСХ, або про синхронність синхронізації та відсутність відмінностей, що дозволили б правильно ідентифікувати логічні рівні.

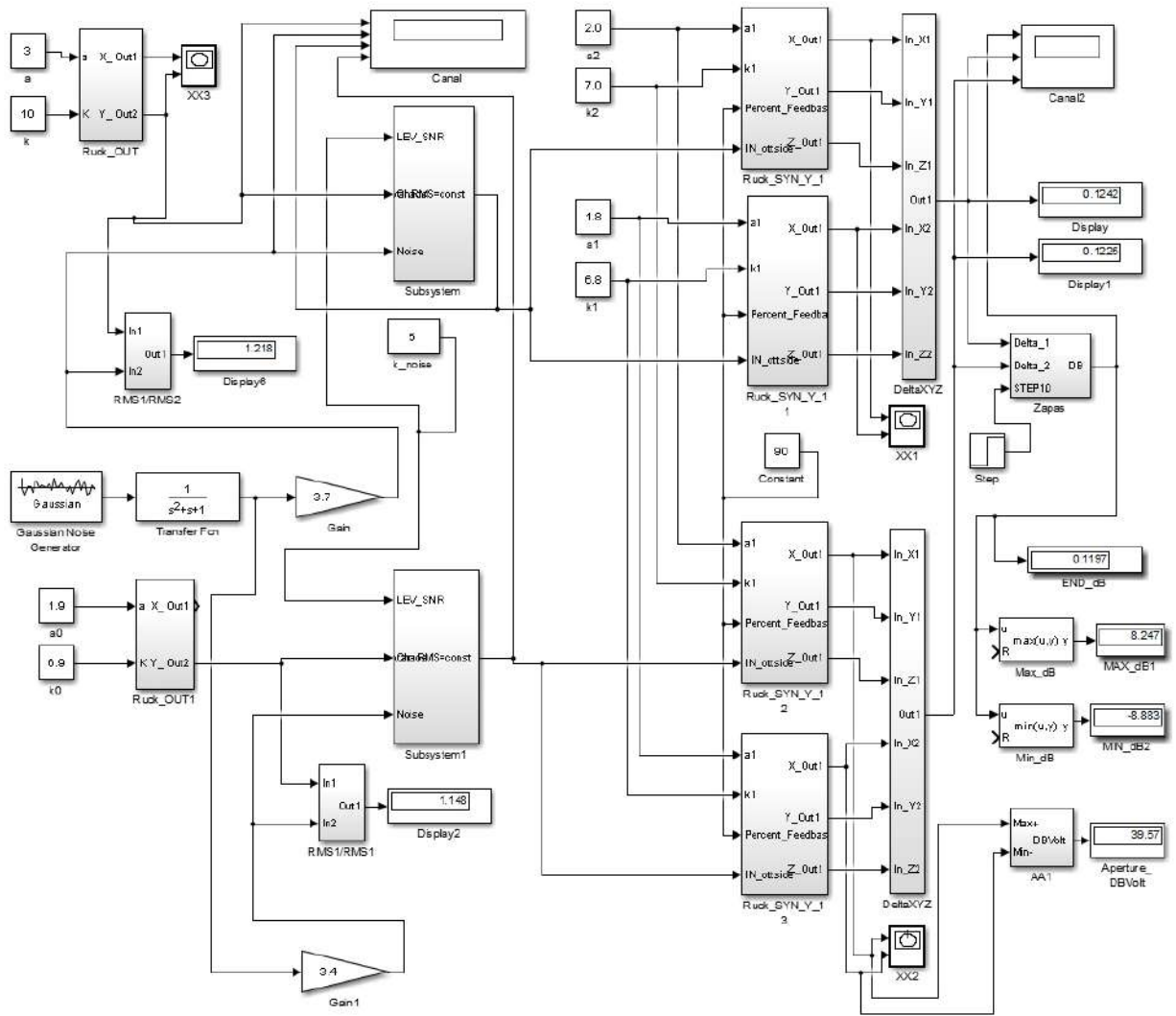


Рисунок 37 – Верифікаційна імітаційна модель Simulink хаотичної системи зв'язку під час дії системних завад

Кожна із схем передачі складається із 3 хаотичних генераторів, таким чином на верифікаційній моделі їх 6. Два генератори на передавальному боці без декомпозиції, а 4 на приймальному із декомпозицією. Таким чином приймальну та передавальну частини схеми поєднує тільки одна лінія зв'язку.

Передавальна частина схеми включає передавальну НДС Rucklidge, що виступає як хаотичний генератор, об'єднаний для двох схем генератор системних завад, пропорційну схему впливу системних завад на передавальних хаотичний сигнал та вимірювач рівня сигнал-завада.

Слід окремо зазначити, що використовуючи регулювання рівня сигналу в окремих підсилювачах передавального хаотичного сигналу та системної завади слід встановити їх рівні однаковими (блоки Gain). Тільки в такому випадку регулювання SNR в блоці адитивного впливу завад відбувається коректно. Потреба в становленні цього рівня виникає тільки під час зміни значень біфуркаційних параметрів передавальних генераторів хаосу, та реалізується під час ітераційної процедури декількох «прогонів» моделі на етапі верифікації.

Крім того в верифікаційну модель передавальної частини додано елементи візуалізації, такі як планшетний графопобудовник, що необхідно для візуалізації проекції атрактора та підтвердження дійсно хаотичного режиму передавальної НДС, а також багатоканальний осцилограф для спостереження форми завад та сигналів у часі.

Приймальна частина схеми зв'язку складається із двох НДС Rucklidge із декомпозицією на які паралельно подається сигнал із приймальної частини із адитивними системними завадам. Біфуркаційні параметри та параметри ініціалізації НДС Rucklidge на приймальному боці для схем передачі логічного нуля та одиниці вибираються однаковими, адже вони представляють одну і ту ж схему обробки тільки в різні моменти часу під час передачі логічного нуля та одиниці відповідно.

Контроль ідентичності еволюції приймальних ГДХ відбувається за одним із запропонованих в попередньому розділі критеріїв, надалі результати критерії порівнюються як їх відношення та подаються в логарифмічній формі (дБ).

Додатковими блоками приймальної частини схеми є осцилографічний візуалізатор критеріїв та їх відношення, що дозволяє оцінити динаміку зміни у часі (швидкодію системи), а також блоки пошуку мінімуму, максимуму та аперттури атрактора для оцінювання необхідного динамічного діапазону.

Результати роботи версифікаційної схеми частково представлені в попередньому розділі, та повністю забезпечують контроль адекватності

результатів. Залежно від кількості кроків дослідження (часових дискретів Simulink) поодиноким запуском версифікаційної моделі вимагав до 10хв комп'ютерного часу персонального комп'ютера. Тому для подальших досліджень вирішено усунути усі додаткові елементи, які суттєво затримують отримання кінцевих результатів.

4.2.2 Імітаційна модель для дослідження

Розробниками Simulink передбачено ситуація переходу від версифікаційної моделі до моделі дослідження через рекомендацію мінімального використання вбудованих субблоків візуалізації, таких як осцилографи, спектроаналізатор, графопобудовники тощо.

Тому основною відмінністю остаточної моделі (рис.38) системи передачі для дослідження є відсутність саме таких блоків, та отримання результатів на дисплеях чисельних значень фактичного запасу завадостійкості під час передачі сигналів логічних рівнів одночасно за 4 критеріями, розглянутими в попередньому розділі.

В результаті оптимізації моделі вхідними параметрами, що задаються як Simulink константи є:

1. Чотири значення біфуркаційних параметрів налаштувань передавальних хаотичних генераторів, по два на кожну схему передачі логічного нуля та логічної одиниці.
2. Чотири значення біфуркаційних параметрів налаштувань приймальних хаотичних генераторів, по два на кожну схему передачі логічного нуля та логічної одиниці.
3. Рівень SNR, в дБ, для регулювання рівня системних завад.
4. Рівень глибини зворотного зв'язку (сили зв'язку) у відсотках, між передавальним та приймальними хаотичними генераторами.
5. Регулятори рівні балансу RMS для сигналу та завади.

6. Параметри ініціалізації інтеграторів задаються однаковими і ненульовими для всіх НДС Rucklidge.

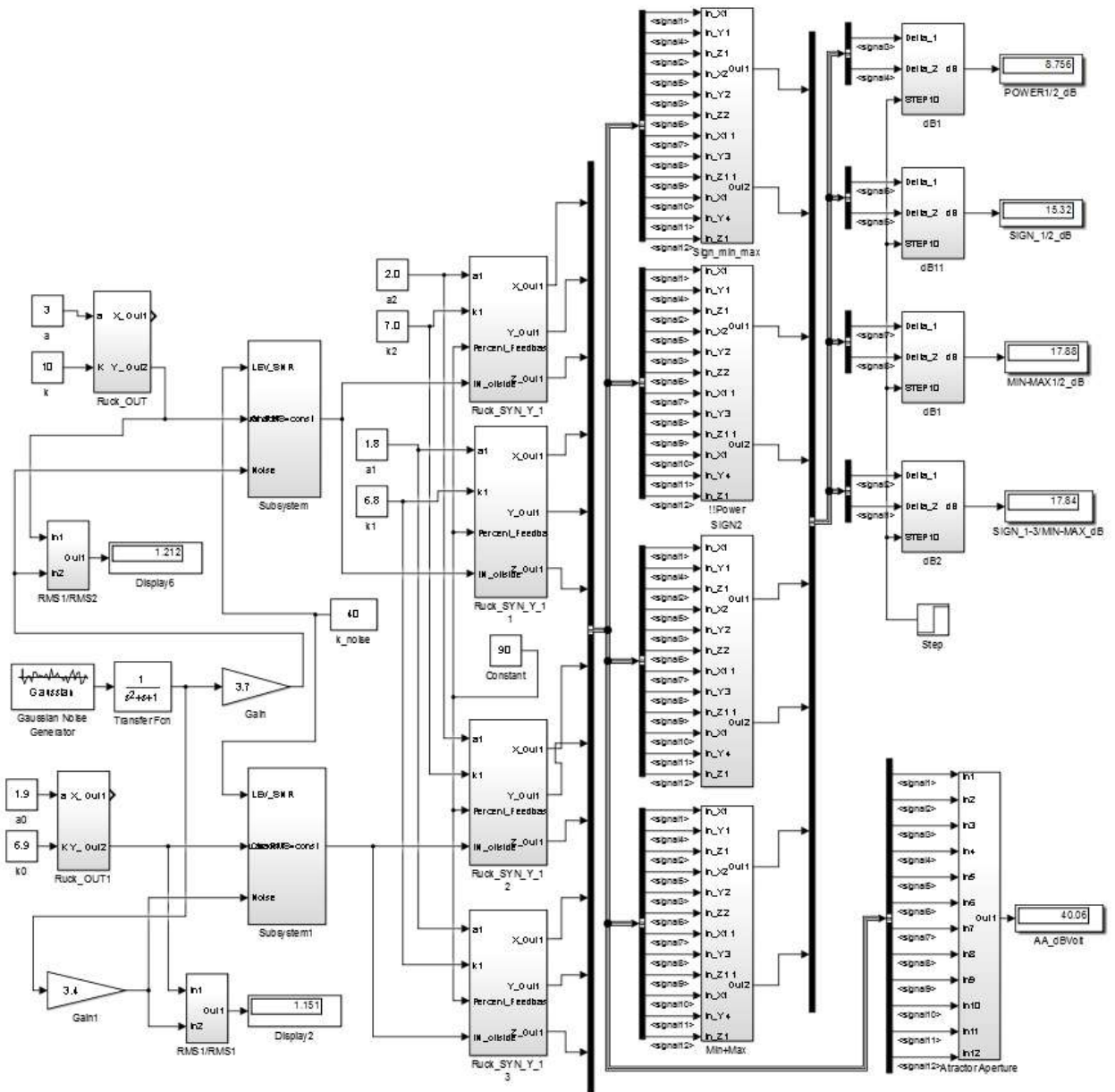


Рисунок 38 – Імітаційна модель Simulink для швидкого дослідження хаотичної системи зв'язку під час дії системних завад за 4-ма критеріями збігу еволюцій під час хаотичної синхронізації

Вихідними (результуючими) параметрами, що отримуються під час дослідження моделі є:

1. Відносні рівня запасу завадостійкості під час передачі різних логічних рівнів за 4-ма критеріями ідентичності ХСХ основного та допоміжного хаотичного генераторів (дБ).
2. Відносні значення апертури атрактора в абсолютних логарифмічних одиницях (дБV).
3. Кількість початкових кроків моделювання, що пропускаються із урахуванням перехідних процесів (Step).

Розробка окремої схеми для дослідження дозволила скоротити час моделювання до 1 хвилини. Результати моделювання надалі обробляються скриптом Matlab для представлення в зручній графічній формі.

4.3 Вихідні дані для проведення досліджень

4.3.1 Параметри хаотичної модуляції

Початкові значення для схеми рис.38 задаються одноразово та в першу чергу забезпечують можливість роботи НДС Rucklidge в хаотичному режимі. Основна увага під час вибору початкових значень має приділятися біфуркаційним параметрам (див. рис.37). Попередні дослідження, окреслені в роботах [37] дозволили встановити межі в яких слід обирати біфуркаційні параметри системи під час передачі бінарних логічних рівнів.

Завдяки тому що НДС Rucklidge має 2 параметра керування доцільно застосовувати одночасну їх зміну під час логічних переходів (рис.38). Слід зауважити, що під час навіть різкої зміни обох біфуркаційних параметрів вихідні хаотичні сигнали фазових змінних не набувають різких змін через використання в моделі ГДХ Rucklidge інтеграторів сигналів i , таким чином, забезпечуючи неперервність фази.

В свою чергу неперервність фази забезпечує підвищений рівень захисту від детектування структури сигналу зловмисником, що збільшує рівень прихованості дії в умовах системних завад.

Біфуркаційні параметри для хаотичної системи передачі мають бути обрані в зоні генерації СДХ. Обчислення цих зон може бути здійснено різними способами, наприклад, через застосування кореляційного аналізу часових послідовностей із обчисленням нормованого значення детермінанту (граміана) матриці Грама [37].

Комп'ютерні дослідження показали, що для біфуркаційних параметрів НДС Rucklidge існує певна зона (зони) де нелінійна динамічна система створює еволюцію у вигляді дивного атрактора, і, відповідно, генерує хаотичні сигнали (рис.39) із високим ступенем ортогональності (декорельованості). Критерієм відбору меж зон в даному випадку є значення граміану, що перевищує 0,9, за умови максимального значення нормованих кореляційних функцій, що дорівнює одиничному значенню.

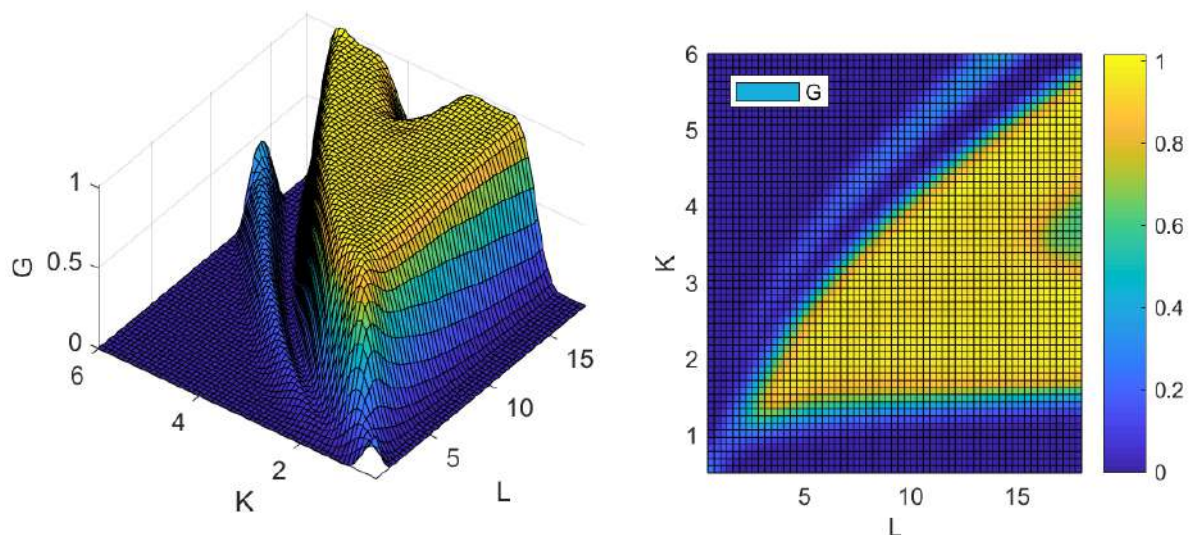


Рисунок 39 – Розподіл значень граміана (G) НДС Rucklidge в полі доступних змін біфуркаційних параметрів

Слід зауважити, що вибір біфуркаційних параметрів для побудови хаотичної системи прихованого зв'язку, слід також робити із врахуванням

максимальної схожості структури сигналу під час передачі бінарних рівнів в каналі зв'язку.

Таким чином висуваються три умови для вибору:

Високий рівень декорельованості, що забезпечується вибором параметрів біфуркації в межах $G > 0.9$.

1. Високий рівень шумоподібності в межах застосованого частотного ресурсу, що забезпечується низьким рівнем спектральної нерівномірності ($\Delta N_s < 11\%$).

2. Близьких діючих значень енергії E бінарних логічних сигналів із хаотичними піднесівними в каналі передачі (рис.40), що забезпечує утруднення детектування повідомлення енергетичними приймачам радіоелектронної розвідки конкурента.

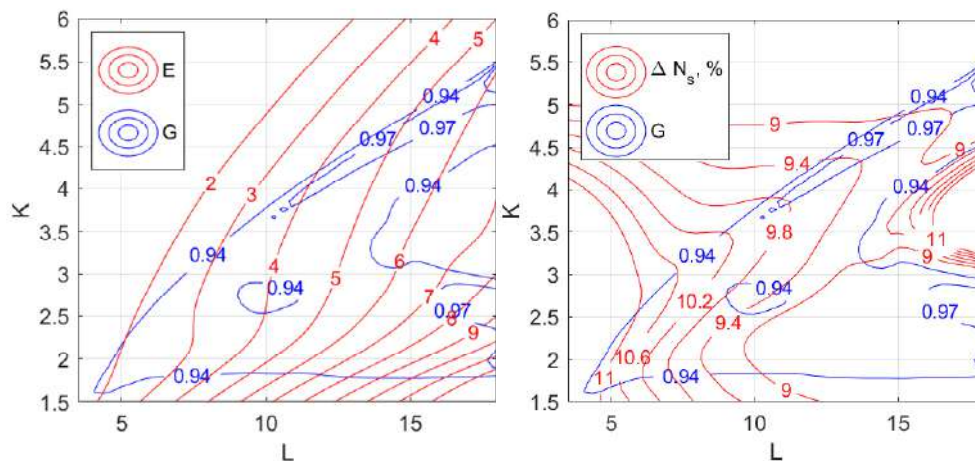


Рисунок 40 - Еквіпотенційні лінії розподілу значень граміана (G), ефективного значення енергії сигналу (E) та рівня спектральної нерівномірності (ΔN_s) під час генерації сигналів детермінованого хаосу в полі біфуркаційних параметрів

Виконання вищезазначених умов можливе через застосування діаграми (рис.40) еквіпотенційних рівнів в полі біфуркаційних параметрів за трьома критеріями одночасно.

4.3.2 Ініціалізація схеми для досліджень

Ініціалізація початкових параметрів схеми для дослідження в середовищі Simulink відбувається переважно через встановлення їх значень у випадючих меню блоків або встановлення значень констант відповідно зауваженням, наведеним в попередніх розділах (табл.1).

Таблиця 1 – Первинні параметри та змінні налаштування імітаційної моделі хаотичного зв'язку

№	Назва	Бінарний рівень	Тип вводу в моделі	Умовне позначення	Рівень
1	Хаотичний модулятори	лог.1	Константа	a1	3
		лог.1	Константа	k1	10
		лог.0	Константа	a2	1,9
		лог.0	Константа	k2	6,9
2	Хаотичний демодулятори	лог.1	Константа	a1	2,0
		лог.1	Константа	k1	6,8
		лог.0	Константа	a2	1,8
		лог.0	Константа	k2	7,0
3	Сила зв'язку під час синхронізації	лог.1 та лог.0	Константа	fb	85,90,95%
4	Час моделювання	лог.1 та лог.0	Параметр запуску симуляції	Ta	500
5	Стартові значення фазових змінних	лог.1 та лог.0	Параметр блоку	X0, Y0, Z0	1,0,0
6	Діапазон аналізу рівнів сигнал –системна завада	лог.1 та лог.0	Константа	SNR (дБ)	-10...+40
7	Початковий пропуск (Step)	лог.1 та лог.0	Параметр блоку	T0	20
8	Баланс RMS	лог.1 та лог.0	Параметр блоку	Kп	Підбір
9	Крок поточної дискретизації моделі завад та сигналів	лог.1 та лог.0	Параметр блоків	T1	1

Верифікація усіх субмоделей та подальша симуляція роботи схеми для досліджень реалізована на базі пакету Matlab vR2014a із використанням 4-ядерного процесора AMD. Графічна візуалізація отриманих залежностей реалізована в однойменному середовищі у вигляді простого скрипта відтворення масиву даних у вигляді графіка.

4.4 Результати досліджень

Критерієм для оцінювання якості роботи бінарної хаотичної системи зв'язку є параметр що в цій роботі названо критерієм ідентифікації, який розраховується як логарифмічне відношення значення одного із запропонованих критеріїв рівня збігу під час передачі різних бінарних логічних рівнів:

$$K_{IDj} = 20 \lg \frac{\delta_{j1}}{\delta_{j0}} \quad (34)$$

δ_{j1} , δ_{j0} - значення критеріїв збігу еволюцій основного та допоміжного приймальних хаотичних генераторів за умови передачі логічного нуля та логічної одиниці.

Слід зазначити, що для деяких критеріїв поняття збігу відповідає більшому значенню критерію, а для деяких меншому. В Simulink моделі досліджень цей факт враховано через пере комутацію виводів таким чином, щоб критерії ідентифікації (34) набували одного знаку.

Метою роботи передбачалась оптимізація роботи схеми ідентифікації логічних рівнів в системі зв'язку із хаотичними піднесівними, що передбачало отримання наступних результатів прикінцевих досліджень:

1. Отримання мінімального рівня відношення сигнал-завада за умови високого рівня ідентифікації логічних рівнів.

2. Вибір із запропонованих критеріїв найбільш оптимального $K_{IDj} = 20 \lg \frac{\delta_{j1}}{\delta_{j0}}$, що забезпечує роботу системи передачі за

умови мінімальних відношень сигнал – системна завада.

3. Глобальний вибір критерію, що забезпечує рівень найвищий ідентифікації за умови зміни сили збуджуючої дії з боку передавального хаотичного генератора (сили однобічного зв'язку).

Для отримання результатів проводилось дослідження для трьох рівнів сили зв'язку у 85, 90 та 95% із використанням 4 різних критеріїв збігу виділених у попередніх розділах як найбільш перспективні для оптимізації:

1. Відносний енергетичний КРЗ (δ_5) – data1 (див. рис.30).
2. Відносний різницево-фазовий КРЗ (δ_6) – data2 (див. рис.33)
3. Відносний абсолютний фазовий знакозмінних сигналів КРЗ (δ_7) – data3 (див. рис.32).
4. Абсолютний різницево-мінімаксний КРЗ (δ_8)- data4 (див. рис.36)..

На сімействах графіків, що візуалізують результати досліджень (рис.41-43) представлено залежності рівня ідентифікації розраховані відповідно зазначеним вище 4-м критеріям від відношення сигнал – системна завада (SHR). Рівень ідентифікації за кожним із критеріїв позначено різним кольором.

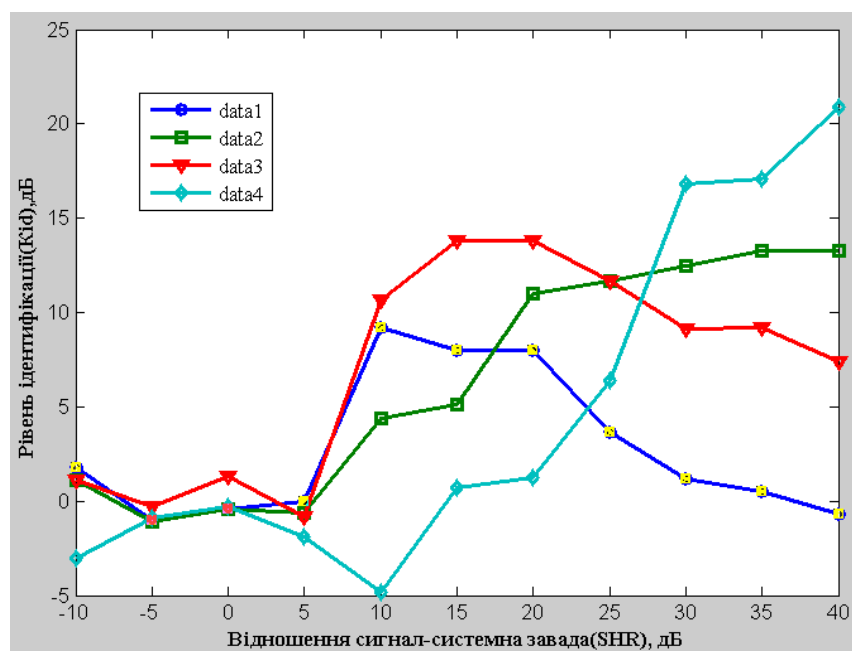


Рисунок 41- Залежності критеріїв рівня збігу від відношення сигнал – системна завада (SHR) за умови сили зв'язку між ведучим та веденим генераторами в хаотичній системі зв'язку – 85%

За результатами досліджень рівнів ідентифікації (рис.41) під час сили зв'язку між генераторами у 85% можливо зробити такі висновки:

1. Для НДС Rucklidge такий рівень зв'язку між ведучим та веденими генераторами є мінімально можливий

2. Усі критерії рівня збігу крім мінімаксного забезпечують рівень ідентифікації більше 5 дБ в діапазоні значень SHR вище 5 дБ.

3. Монотонне зростання рівня ідентифікації із зростанням рівня системних завад реалізують лише два критерії – фазовий та мінімаксний, але для мінімаксного критерію правильна ідентифікація логічних рівнів можлива лише за рівня SHR вище 15 дБ.

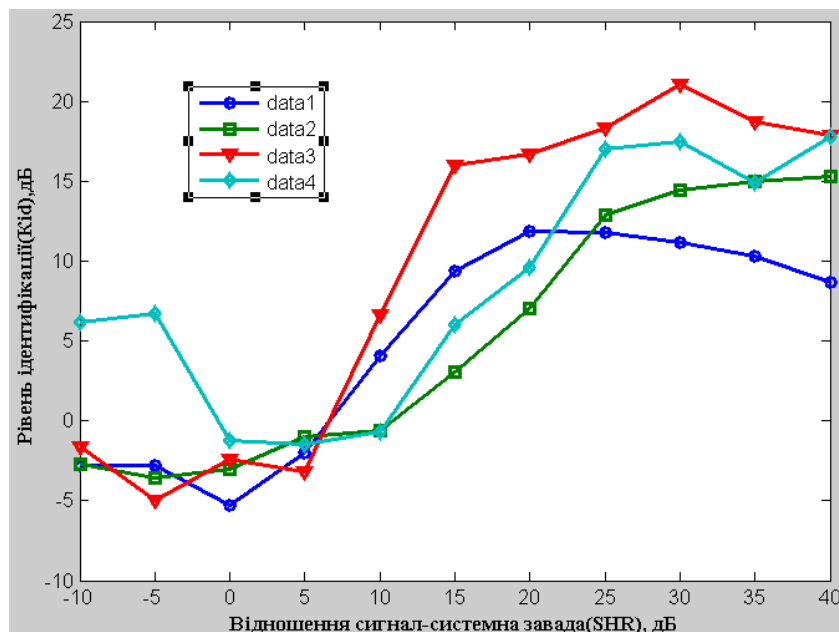


Рисунок 42- Залежності критеріїв рівня збігу від відношення сигнал – системна завада (SHR) за умови сили зв'язку між ведучим та веденим генераторами в хаотичній системі зв'язку – 90%

За результатами досліджень рівнів ідентифікації (рис.42) під час сили зв'язку між генераторами у 90% (оптимальний рівень) можливо зробити такі висновки:

1. Для НДС Rucklidge такий рівень зв'язку між ведучим та веденими генераторами є рекомендованим для застосування.

2. Усі критерії рівня збігу забезпечують позитивний рівень ідентифікації в діапазоні значень SHR від 10 дБ.

3. Найвищий рівень ідентифікації забезпечує різницевий фазовий КРЗ №3.

4. Монотонне зростання рівня ідентифікації із зростанням рівня системних завад реалізують лише два критерії – різницевий фазовий та мінімаксний.

5. Найменшу нерівномірність в зоні позитивних рівнів ідентифікації забезпечує енергетичний КРЗ.

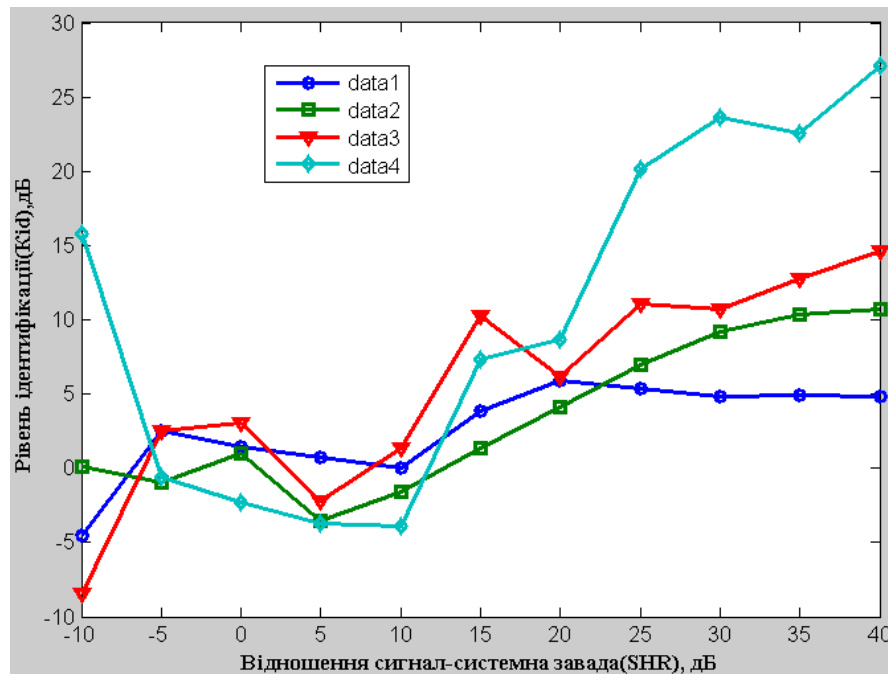


Рисунок 43- Залежності критеріїв рівня збігу від відношення сигнал – системна завада (SHR) за умови сили зв'язку між ведучим та веденим генераторами в хаотичній системі зв'язку – 95%

За результатами досліджень рівнів ідентифікації (рис.43) під час сили зв'язку між генераторами у 95% (максимізований рівень) можливо зробити такі висновки:

1. Для НДС Rucklidge такий рівень зв'язку між ведучим та веденими генераторами є гранично припустимим із точки зору врахування власної

еволюції приймальних генераторів та забезпечення їх розбігання за умови віддалених значень параметрів керування (біфуркаційних параметрів).

2. Усі критерії рівня збігу забезпечують позитивний рівень ідентифікації в діапазоні значень SHR від 15 дБ.

3. Найвищий рівень ідентифікації забезпечують критерії різницево-фазовий КРЗ та мінімаксий КРЗ.

4. Найбільш рівномірне та монотонне зростання рівня ідентифікації із зростанням рівня системних завад реалізуються під час застосування енергетичного та фазового критеріїв.

Сукупні висновки за результатами проведених досліджень можливо сформулювати таким чином:

1. Вплив системних завад на якість зв'язку в хаотичній системі зв'язку набагато перевищує вплив флуктуаційних шумів (близько 20 дБ). Якщо під впливом шумових завад система стабільно працює за умови SNR більше -10, то під впливом системних завад необхідне відношення складає мінімум 10дБ.

2. Найбільш доцільним для застосування за умови оптимальної сили зв'язку між ведучим та веденим хаотичним генераторами є різницево-фазовий КРЗ, що забезпечує різке зростання рівня ідентичності за умови SHR від 5 дБ.

3. За результатами досліджень для рівнів сили зв'язку 85-90% можливо рекомендувати відносний різницево-фазовий КРЗ еволюції між основним та допоміжним генераторами детермінованого хаосу на приймальному боці, що забезпечує стійку роботу схеми ідентифікації логічних рівнів не менш як 5 дБ за умови SHR більше 10 дБ.

ВИСНОВКИ

5. Показано важливість представлення реальних процесів в електронних комунікаціях із застосуванням понять нелінійної динаміки у вигляді диференціальних рівнянь. Запропоновано класифікаційну схему нелінійних динамічних систем на основі понять, що характеризують динаміку фазових змінних.

6. Проаналізовано ряд деструктивних факторів погіршення якості передачі інформації електронними комунікаціями, наведено принципи критеріального оцінювання якості передачі в бінарних каналах та принципи генерації порогу завадостійкості в бінарній системі. Визначено суть системних завад для каналів зв'язку із хаотичними піднесівними та місце в класифікаційній схемі забезпечення електромагнітної сумісності. Обґрунтовано оптимальний вибір типу нелінійної динамічної системи (Rucklidge).

7. Обґрунтовано як і яким чином системи передачі із хаотичними піднесівними можуть забезпечити покращення основних тактичних характеристик систем передачі. Реалізовано оптимальний вибір модулятора хаотичних піднесівних – модулятор хаотичних режимів. Показано, що під час хаотичної модуляції наявність шуму в каналі передачі іноді забезпечують позитивний ефект щодо збільшення ймовірності правильного прийому.

8. Проведено дослідження еволюції нелінійного генератора Rucklidge із метою визначення вимог до побудови моделі системних завад. Запропоновано метод синтезу системних завад в середовищі Simulink для дослідження їх впливу на канал хаотичного зв'язку. Запропонована модель взаємодії системної завади із модульованим сигналом детермінованого хаосу (МХС), що відрізняється стабілізації сукупної енергії сигналу на вході приймача і забезпечує стабілізацію апертури атракторів приймальних хаотичних генераторів.

9. Запропоновано ряд критеріїв та розроблені алгоритми їх застосування під час моделювання в Simulink для забезпечення можливості контролю збігу еволюції основного та допоміжного генераторів детермінованого хаосу в системі передачі із односпрямованою ХСХ ведених генераторів із боку ведучого на передавальному боці.

10. Проведено верифікацію запропонованих методів побудови моделей завод, взаємодії заводи із хаотичним сигналом, алгоритмів реалізації критеріїв збігу на основі застосування блочно-матричного середовища Matlab/ Simulink. Проведено численну кількість симуляцій для різних рівнів сигналів та завод, внутрішніх та зовнішніх параметрів моделей. За результатами порівняння із аналітичними дослідженнями підтверджено високий рівень верифікації моделей.

11. Розроблено верифікаційну модель системи передачі інформації в середовищі Matlab/ Simulink, що забезпечує можливість перевірки адекватності роботи системи в окремих точках спектральної, часової, критеріальної, ймовірнісної, тощо, зони досліджень. На основі окремих запусків моделі вказано на високий рівень адекватності, надано рекомендації щодо вибору параметрів відношення рівня сигналу до рівня системних завод в діапазоні від -40 до +40 дБ, та за умови сили зв'язку між веденими та ведучим хаотичними генераторами в системі від 85% до 95%.

12. Розроблена досліджувана модель хаотичної системи передачі інформації в середовищі Matlab/ Simulink, що відрізняється високою швидкодією та проведено її симуляцію із метою визначення стійкості до системних завод. В результаті досліджень встановлено, мінімальне відношення сигнал – система завада в запропонованій схемі передачі має складати більше як 10дБ, за умови рівня ідентичності більше 5дБ та застосування запропоновано автором, найбільш оптимального різницево-фазового критерію рівня збігу еволюцій нелінійних динамічних систем Rucklidge на приймальному боці хаотичної системи передачі із модуляцією хаотичних режимів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Андреев О.В. Пристрої генерування та формування радіосигналів: навч. посібник [електронне видання] / О.В. Андреев, В.В. Ципоренко, В.Г. Ципоренко, І.І. Полещук – Житомир: ЖДТУ, 2018. – 138 с.
2. Шинкарук О.М. Приймання та оброблення сигналів : навчальний посібник / О.М. Шинкарук, В. І. Правда, Ю. М. Бойко. – Хмельницький : ХНУ, 2013. – 365 с.
3. Гайдук О. В. та ін. Радіотелекомунікаційні технології: Радіопередавальні та радіоприймальні пристрої. - Ніжин: ТОВ “Видавництво “Аспект-Поліграф”, 2007. - 320 с.
4. В. М. Кичак В. М. Телекомунікаційні системи передачі : підручник /В.М. Кичак, О. М. Шинкарук, Г. Г. Бортник, І. І. Чесановський, О. В.Стальченко. – Хмельницький : Видавництво НАДПСУ, 2016. – 424 с.
5. Бондар П. М. Вимірювальні перетворювачі, прилади та системи [Електронний ресурс] : конспект лекцій / П. М. Бондар // Кафедра ПСОН ; НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського». – 2009. – Режим доступу : <http://kafpson.kpi.ua/Arhiv/Bondar/lecture1.pdf>
6. Бондаренко І. М., Електронні системи: Навчальний посібник / І. М. Бондаренко, О. В. Глухов, О. О. Кравчук // Харків: ХНУРЕ. 2019. – 2019с.
7. Бондаренко І. М., Мікроелектроніка НВЧ. Ч. 1. Елементи та пристрої НВЧ-тракту: Навчальний посібник / І.М. Бондаренко // Харків: ХНУРЕ. 2017. – 151с.
8. Прикладне застосування теорії хаотичних систем у телекомунікаціях: монографія / Ю. Я. Бобало, С. Д. Галюк, М.М. Климаш, Р. Л. Політанський; Нац. ун-т «Львів. політехніка».– Львів: Коло, 2015. – 178 с.
9. Abel A , Schwarz W . Chaos communications-principles, schemes, and system analysis. Proc. 0,the IEEE,2002, 90(5): 691-710.
10. Digital Communications Using Chaos and Nonlinear Dynamics / [Editors: Larson L.E., Liu J. – M., Tsimring L.S. – New York : Springer. – 2006. – 382 p.

11. Sprott J C. Simple chaotic systems and circuits. American Journal of Physics, 2000, 68(8): 758-763.
12. Zhuo Chen, Qinye Tong" Guang Li. Study of signal parameters sensitivity of chaotic circuit detection method based on sensor technology[J]. Sinica, 2005, 18 (4)
13. Chen G R, Ueta T. Yet another chaotic attractor. International Journal of Bifurcation and Chaos, 1999, 9(6): 1465-1466.
14. Lii J H, Chen G R. A new chaotic attractor coined. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2002, 12(3): 659-66L
15. Liu C x, Liu T, Liu K, et al. A new chaotic attractor. Chaos, Solitons and Fractals, 2004, 22(5): 1031-1038.
16. Bao B c. Li C B, Xu J P'et al. New robust chaotic system with exponential quadratic term. Chinese Physics, 2008. 17(11): 4022-4026. 64
17. Liu Z, Zhu X H, Hu W, et al. Principles of chaotic signal radar. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2007, 17(5): 1735_1739.
18. Mao Y. A Chip Performing Chaotic Stream Encryption / Y. Mao, W. Liu, Z. Li, W.A. Halang // Contributions to Ubiquitous Computing. Studies in Computational Intelligence. – 2007. – Vol. 42. – P. 307 – 332.
19. 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.
20. Cong Ling, Songgeng Sun. A frequency hopping sequence for chaotic CDMA communication[J]. Acta electronica Sinica, 1999, 27 (1). K. Elissa, "Title of paper if known," unpublished. Chen Gongxing was born in 1981.
21. Політанський Р.Л. Оцінки чисельних характеристик систем детермінованого хаосу / Р.Л. Політанський, П.В. Іванюк // I-а Всеукраїнська науково-практична конференція “Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та

мікроелектроніки”, 13–15 жовтня 2011 р.: тези доп. – Чернівці, 2011. – С. 107 – 110.

22.Голевич О. Б. Впорядкування ансамблів хаотичних сигналів та способи їх використання в надширокосмугових телекомунікаційних системах / О. Б. Голевич, О. С. Пивовар, І. В. Троцишин // Цифрові технології : зб. наук. пр. / Одес. нац. акад. зв'язку ім. О. С. Попова. – Одеса, 2015. – Вип. 17.– С. 181-191.

23.Nunez R. An optimal chaotic bidirectional communicator for hidden information, based on synchronized Lorenz circuits / R. Nunez // Journal of Applied Research and Technology. – Vol. 2, № 1. – P. 5 – 20.

24.Еліяшів О.М. Дослідження властивостей нелінійного елемента передавача хаотичної системи зв'язку / О.М. Еліяшів, В.Б. Русин, Л.Ф.Політанський, М.Я.Кушнір, Р.Л.Політанський // Радиоэлектроника и информатика. – 2011. – №2 (53). – С. 12 –16.

25.Li, S., Shang, Q., Yin, C., Qi, Y., Practical methods to identifying chaotic characters // IEEE International Conference Neural Networks & Signal Processing. Nanjing, China, December 14-17, 2003. pp. 764 – 767.

26.Li, Y., Yang, B., Deng, X-Y., Jin, L., Du, L-Z., Physical mechanism of the detection of the unknown frequency of weak harmonic signal and effects of damping ratio on the detection results // Chinese Physics, Vol. 13, No. 9, September, 2004. pp. 1386 – 1390.

27.Zheng, S., Guo, H., Li, Y., Wang, B., Zhang, P., A new method for detecting line spectrum of ship-radiated noise using Duffing oscillator // Chinese Science Bulletin, Vol. 52, No. 14, July, 2007. pp. 1906 – 1912.

28.Xie, T., Wei, X., Yu, R., Noise immunity analysis in external excitation chaotic oscillator detecting system // International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application, ISDEA 2010. pp.

29.Chapeau-Blondeau, F., Rousseau, D., Constructive action of additive noise in optimal detection // International Journal of Bifurcation and Chaos, Vol. 15, No. 9, 2005. pp. 2985 – 2994.

30. Voss H.U. Real-time anticipation of chaotic states of an electronic circuit/H. U Voss // *Int. J. Bifurcation and Chaos*–2002. – Vol. 12. – No 7.–P. 1619–1625
31. Рентюк В. — Електромагнітна сумісність: проблема, рішення якою не уникнути, *CHIP NEWS Україна*, 2018. № 1.
32. Рентюк В. — Що потрібно знати про випробування на виконання вимог по EMC для виробів комерційного призначення, *CHIP NEWS Україна*, 2018. № 1.
33. Вейт К. — *Troubleshooting Radiated Emission at the EMC Lab*. Technical Services LLC. 2017 ITEM Media. №3.
- 34.. Рентюк В. — Практичні питання застосування ІМС ізольованого інтерфейсу в частині виконання вимоги щодо електромагнітної сумісності, *Компоненти і технології*, 2015. № 3.
35. Бондаренко І.М., Сучасна компонентна база електронних систем: Навчальний посібник / І. М. Бондаренко, О. В. Бородін, В. П. Карнаушенко // Харків: ХНУРЕ. 2020. – 268с.
36. Рябенський В.М. Основи моделювання систем і процесів в електротехніці (Використання пакету прикладних програм MATLAB/Simulink). Навчальний посібник / Під редакцією проф. В.М. Рябенського. – Львів: новий Світ – 2000, 2008. – 385 с.
- 37.1 Golevych.O, Puvovar. 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>.
38. Пивовар О.С. Моделювання методу нелінійної реакції у сегментованих кабельних лініях/О.С. Пивовар, В.Д. Бидюк, Я.В.Вержбицький// *Вісник ХНУ*. - 2019. - №5 – С.147-152.
39. Пивовар О.С. Застосування сигналів детермінованого хаосу для систем ближньої навігації мобільних роботів/О.С. Пивовар, О.О. Михальчук, І.О. Веремійчук// *Вісник ХНУ*. - 2019. - №6 – С.149-154.

40.Пивовар О.С.Варіант структурної будови широкосмугової аналогової системи прихованого зв'язку на основі застосування сигналів детермінованого хаосу/ - Вісник ХНУ, №6, 2017 – С.110-116.

41.Пивовар, О. С. Моделювання генераторів хаосу для використання в UWB системах обробки [Текст] / О. С. Пивовар, С. Р. Павлінський // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2012. – № 6. – С. 207-211.

42.Зернюк І. В. ААТ під час виявлення логічних рівнів в хаотичній системі зв'язку / І. В.Зернюк, С. К. Підченко, О. С. Пивовар // Актуальні проблеми комп'ютерних наук : зб. наук. пр. за матеріалами XIII Всеукр. наук.-практ. конф. «Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2021». – Хмельницький : ХНУ, 2021. – С. 101-103.(<http://elar.khnu.km.ua/jspui/handle/123456789/11057>)

ДОДАТОК А

АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НА КОНФЕРЕНЦІЇ

Військова освіта і наука: сьогодення та майбутнє : зб. тез доповідей XX Міжнародної науково-практичної конференції, м. Київ, 29 листопада 2024 р. Київ : Військовий інститут Київського національного університету імені Тараса Шевченка, 2024. 532 с.

ВІЙСЬКОВИЙ ІНСТИТУТ
КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА



Рекомендовано до друку Вченою радою Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка
(*протокол від 21.11.2024 № 3*).

Редакційна колегія:

Сіроштан О.О., п-к, **Полков Б.О.**, п-к, к.військ.н., с.н.с., **Лойшин А.А.**, п-к, д-р філософії, **Пампуха І.В.**, п-к, к.т.н., доц., **Гончарук Л.М.**, п-к, к.філол.н., **Сафін О.Д.**, прац. ЗСУ, д.психол.н., проф., **Мась Н.М.**, п-к, к.психол.н., **Коропатнік І.М.**, п-к, д.ю.н., проф., **Рижиков В.С.**, прац. ЗСУ, д.пед.н., проф.

У збірнику тез доповідей друкуються матеріали виступів наукових і науково-педагогічних працівників, курсантів (студентів) Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка та інших вищих військових та закладів вищої освіти України.

У публікаціях розглядаються: технічні проблеми озброєння і військової техніки та технології подвійного призначення; актуальні проблеми лінгвістичного забезпечення Збройних Сил України; актуальні питання військової психології та соціальної роботи; інформаційна та психологічна боротьба у військовій сфері; інформаційно-медійне забезпечення МОУ та ЗСУ в умовах правового режиму воєнного стану; фінанси; актуальні проблеми військового права в умовах воєнного стану; актуальні проблеми геополітичної підтримки військ в умовах ведення російсько-української війни; наукові проблеми воєнної політології та морально-психологічного впливу; аналіз бойового застосування частин (підрозділів) Сухопутних військ Збройних Сил України у сучасному загальновійськовому бою (тактичних діях)

© Військовий інститут Київського національного університету імені Тараса Шевченка

ЗБІРНИК ТЕЗ ДОПОВІДЕЙ

XX Міжнародної науково-практичної конференції

**«Військова освіта і наука:
сьогодення та майбутнє»**

29 листопада 2024 року

Захаров В.В., Чешун В.М. Технологія HONEYNET в захисті корпоративної інформації від кіберзагроз.....	44
Камеяр М.Л., Пивовар О.С. Моделювання впливу системних завад на хаотичний канал зв'язку.....	45
Кириленко І.В. Використання інноваційних технологій для покращення логістики у Збройних Силах України під час війни.....	46
Мельник М.М., Чешун В.М., Чешун Д.В. Розподіл задач цифрової криміналістики на основі мережевої моделі OSI.....	47
Мостовий С.В., Жмурик І.М. Основні кіберзагрози в ІОТ та методи їх запобігання.....	48
Муляр І.В., Глюжок В.С., Зацепін К.О., Чернов С.В. Використання моделі GPT для автоматизації тестування ІОТ-пристроїв.....	49
Муляр І.В., Зейлик Р.Ю., Житник Р.Л., Футорний Р.В. Аналіз підходів до побудови системи сканування хостів і портів для аналізу вразливостей мережі з вебінтерфейсом, збереження та обробкою даних.....	50
Муляр І.В., Сиротенко Д.А., Шкробета В.С. Способи захисту від фішингу через QR-коди.....	51
Савельєв С.В., Кириленко І.В. Ефективність управління логістичними процесами у сфері речового забезпечення військових частин України.....	52
Слободянюк А.С., Пивовар О.С., Ленков С.В. Оптимізація взаємодії технологій ІоТ та LoRaWAN.....	53
Стецюк М.В., Панько Р. Кіберетика та право: етичні питання у кіберпросторі, проблеми зламів, кібершингунства, вплив на права і свободи людини.....	54
Хмельовський В.Р., Бойцун Д.О., Кльоц Ю.П. Підвищення рівня захищеності даних користувача при реплікації через NFC.....	55
Toljura S. Koval M. Analysis of cyber threats and cloud security risks.....	56
Гахович С.В. Модель SIEM-системи з підсистемою підтримки прийняття рішення.....	57
Канчуга М.К., Ковба М.В., Дуфанець І.Б. Пікапи у військовому застосуванні.....	59
Коваль М.О., Карленко А.О. Військові операції в сфері електромагнітного спектру (ЕМС).....	60
Кравченко І.О. Адаптивні стеганографічні системи як інструмент підвищення інформаційної безпеки в умовах кіберзагроз.....	61
Кравченко О.І. Заходи безпеки бездротових сенсорних мереж військового призначення, при функціонуванні в умовах завадової обстановки та кібервпливу.....	62
Kulaha Y. TOPic: future threats and challenges for blockchain technologies.....	64
Кулько А.А., Толпопа С.В. Побудова інтелектуальної системи протидії	
Зміст	
СЕКЦІЯ І ТЕХНІЧНІ ПРОБЛЕМИ ОЗБОЄННЯ І ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ПОДВІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.....	26
Banzak H.V., Zherebtsova L.N., Todotov M.F., Lisetskaya M.A., Somikov Y.O. Development and research of methods for optimizing the maintenance processes of military equipment.....	26
Banzak H.V., Chelnokov A.S., Fedotov V.V. Development of a reliability model for a complex technical object of military equipment.....	27
Banzak H.V., Vetrov S.V., Strelchenko K.V. Development of a simulation statistical model of the process of technical maintenance of military equipment.....	28
Banzak O.V., Zherebtsova L.N., Dvogan I.O. Development of a portable digital gamma-ray spectrometer for radiation survey in field conditions.....	29
Banzak O.V., Zherebtsova L.N., Ovchinnikov A.I., Golub M.S. Gamma radiation detection unit based on cdznte sensor for radiation and technological control systems of a nuclear power plant.....	30
Lienkov S.V., Banzak O.V., Kotov S.A. Detector modeling for radiation monitoring systems.....	31
Анікін В.А., Нігловський О.О., Сотніков Є.О., Рикун К.В. Система безпекових настанов малого комерційного офісного приміщення.....	32
Анікін В.А., Розгон І.Д., Федорчук М.І. Система захисту програмного комплексу фінансового документообігу з вебархитектурою.....	33
Анікін В.А., Коцюк М.М., Калій К.В., Селюкова Т.В. Система запобігання інформаційним витокам комп'ютеризованого робочого місця.....	34
Барабаш А.В., Олексюк Д.А., Рагушняк М.В. Збільшення цінності цифрового електронного підпису застосуванням особових агрибутів.....	35
Басистий В.А., Чешун О.В., Чешун В.М. Застосування одноплатних мікрокомп'ютерів для підвищення стійкості інтернету речей до DDOS атак.....	36
Бельська О.А., Черних Ю.О. Цілі використання в САУ управління надмірної розмірності.....	37
Вишньовський Д.П., Гурман І.В., Сотніков Є.О. Штучний інтелект у протидії фішинговим атакам в сфері банківської справи.....	39
Джулій В.М., Ленков С.В., Купчик Н.С., Чорницький С.В. Проблеми інформаційної безпеки в інформаційно-телекомунікаційних мережах.....	40
Джулій В.М., Мірошніченко О.В., Томусяк А.В., Горбатюк Н.І. Протоколи програмного розподілу секретної інформації між абонентами ІР – телефонії.....	41
Джулій В.М., Селюков О.В., Заставна Я.В., Чешун Д.В. Методи та засоби захисту від загрозливих програм.....	42
Жиров Г.Б., Зозуля А.А. Програмний застосунок для розрахунку енергетичного потенціалу радіолінії «Космічний апарат – наземна станція».....	43



ТЕЗИ ДОПОВІДЕЙ

XX Міжнародної науково-практичної конференції

«Військова освіта і наука: сьогодення та майбутнє»

Тексти тез представлено у авторській редакції. Автори несуть повну відповідальність за зміст, добір, точність наведених фактів, цитат, власних імен, дат та інших відомостей.

Збір, технічне редагування та комп'ютерна верстка – Бадрук О.О.
Оригінал-макет та обкладинка – Халіманченко С.М.

Підписано до друку 21.11.2024. Формат 60x84/16.
Гарнітура Times. Папір офсетний. Друк ризограф. Тираж 10.
Умов. друк. аркушів 18. Заказ № 41-16.

Надруковано в навчальному картографічному комплексі ВІКНУ
03189, Київ, вул. Юлії Здановської, 81
521-32-89



Каменяр М.Л. (ХмНУ)
к.т.н., доц. Пивовар О.С. (ХмНУ)

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ СИСТЕМНИХ ЗАВАД НА ХАОТИЧНИЙ КАНАЛ ЗВ'ЯЗКУ

Традиційним рішенням для забезпечення багатокористувачького доступу (БКД) у надширокополосних цифрових системах електронних комунікацій є використання в якості піднесених ортогональних або квазіортогональних сигналів псевдовипадкових послідовностей. Наслідком неортогональності є поява зовнішніх та внутрішніх завад системних завад, рівень яких збільшується пропорційно збільшенню кількості активних абонентів. Боротьба із СЗ полягає в радикальному удосконаленні сигнально-кодової конструкції в напрямку зростання бази піднесеного сигналу.

Одна із практичних особливостей застосування сигналів детерміновано хаосу як хаотичних піднесених у БКД полягає у можливості забезпечення значної потужності ансамблю квазіортогональних функцій, що необхідні для ушліщення-розділення в рамках використання спільного середовища БКД із високим ступенем захисту від несанкціонованого доступу. Теоретично, доцільність такого рішення була підтверджена через аналіз кореляційних характеристик ПВП і СДХ значної кількості типів генераторів у.

Найбільш доцільним варіантом застосування СДХ - є побудова системи електронних комунікацій на основі застосування декількох нелінійних динамічних систем (НДС) в різних режимах роботи, що дозволяє одночасно виконувати умови мінімізації системних завад, мінімізації вхідного відношення сигнал-завада, забезпечувати високий рівень конфіденційності зв'язку та структурної прихованості дії, а також використовувати сторонні впливи як конструктивний фактор забезпечення якості зв'язку, що доступно лише для НДС.

Через відсутність загальної теорії подібних явищ в нелінійних системах, дослідити основні аспекти наслідків впливу системних завад можливо лише за допомогою комп'ютерного моделювання. Основою імітаційної моделі бінарної хаотичної системи передачі із БКД є побудова індивідуального каналу із двопараметричною хаотичною модуляцією та детектуванням СДХ на основі допоміжної НДС. Параметри та характеристики режимів для визначення рівню впливу сторонніх СДХ, ПВП та стохастичних завад в околиці порогового рівнів прийому встановлювались за методом Монте-Карло. Дослідження виявило високий рівень стійкості по відношенню до систем із ПВП та сторонніх стохастичних завад, що відкриває перспективи можливості застосування СДХ в нових системах паралельно із діючими.

ДОДАТОК Б
АБРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ У ФАХОВОМУ ЖУРНАЛІ

Довідка: ВХНУ ТН 14/11/24

Видання: Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки

Категорія фаховості видання: фахове видання України, у якому можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії, категорії «Б» філософії, категорії «Б» (наказ МОН №1643 від 28.12.2019, наказ МОН №409 від 17.03.2020).

Напрямок – технічні науки за спеціальностями – 101, 121, 122, 123, 124, 125, 141, 151, 161, 172, 181, 182 (28.12.2019), спеціальності – 131, 132, 133 (17.03.2020)

Назва статті: СИНТЕЗ КРИТЕРІЮ РІВНЯ СИНХРОНІЗМУ В ХАОТИЧНІЙ СИСТЕМІ ЗВ'ЯЗКУ ІЗ ДОПОМІЖНИМ ГЕНЕРАТОРОМ

Автори: ПИВОВАР ОЛЕГ, ГОЛЕВИЧ ОЛЕГ, КАМЕНЯР МИКОЛА (Хмельницький національний університет)

Номер, у який прийнято статтю: №6 до друку орієнтовно буде рекомендовано до 30 грудня 2024 року.

14.11.2024

Начальник відділу
інтелектуальної власності та трансферу технологій  Ю.В.Кравчик



ПІВОВАР 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

КАМЕНЯР МИКОЛА

Хмельницький національний університет

СИНТЕЗ КРИТЕРІЮ РІВНЯ СИНХРОНІЗМУ В ХАОТИЧНІЙ СИСТЕМІ ЗВ'ЯЗКУ ІЗ ДОПОМІЖНИМ ГЕНЕРАТОРОМ

На даний час використання сигналів детермінованого хаосу в системах передачі інформації є перспективним напрямком наукових та прикладних досліджень завдяки їх властивостям широкосмуговості, шумоподібності, високій інформаційній ємності, можливості протистояти потужним завадам та синхронізації генераторів сигналів на приймальному та передавальному боці. В статті розглянуто ряд поступових кроків, що дозволили сформулювати універсальний критерій для визначення рівня ідентичності еволюції двох нелінійних динамічних систем в хаотичному режимі односпрямованої синхронізації системи передачі бінарного сигналу із застосуванням на приймальному боці для ідентифікації логічних рівнів допоміжної нелінійної динамічної системи.

Ключові слова: детермінований хаос, хаотична синхронізація, хаотична система зв'язку, критерій ідентичності, бінарний сигнал.

PYVOVAR OLEH, GOLEVYCH OLEG, KAMENIAR MYKOLA

Khmelnyskyi National University

SYNTHESIS OF A CHAOTIC COMMUNICATION SYSTEM SYNCHRONIZATION LEVEL CRITERION WITH AN AUXILIARY GENERATOR

Currently, the use of deterministic chaos signals in information transmission systems represents a promising area of scientific and applied research due to their properties, including wide bandwidth, noise-like behavior, high information capacity, resistance to strong interference, and the ability to synchronize signal generators on both the transmitting and receiving sides. This paper presents a simulation model of a binary information transmission system in the Matlab/Simulink environment, based on the Rucklidge nonlinear dynamic system operating in chaotic mode.

During the transmission of binary messages, unidirectional chaotic synchronization of structurally identical Rucklidge systems occurs on the receiving side. Modulation of the chaotic channel oscillations is achieved by altering the bifurcation parameters of the nonlinear transmitter system. The identification of received logical levels and the information message is accomplished by determining the level of chaotic synchronization between the two nonlinear dynamic Rucklidge systems on the receiving side. The applied criterion for the similarity of the evolution of chaotic systems on both the receiving and transmitting sides determines the accuracy of logical level identification.

The selection of the synchronization criterion directly impacts the system's tactical characteristics, including immunity to interference, sensitivity to nonlinear distortions, bandwidth, and more. The evolution of chaotic generators is proposed to be compared by utilizing the energy difference of signals from driven nonlinear dynamic systems. Several

implementations of the energy criterion were considered, and their impact on the parameters of information signal transmission under conditions of additive interference and nonlinear channel distortions was modeled. As a result of this research, a universal criterion for the level of chaotic synchronization is proposed, involving the normalized energy difference of the signals from the main and auxiliary driven chaotic generators across all phase variables.

Research on the system model for various levels of interference and distortions has shown that the proposed criterion is weakly sensitive to additive noise up to -10 dB and nonlinear channel signal distortions, such as bilateral clipping and step changes in the transmission line up to 20%. This finding allows for the application of this method in logical level identification amid strong interference and moderate nonlinear distortions.

Keywords: deterministic chaos, chaotic synchronization, chaotic communication system, identity criterion, binary signal.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Побудова нелінійних моделей транспортування сигналів потребує більш узагальненого підходу та введення в практику передачі сигналів нових понять, таких як атрактор, детермінований хаос, фрактальність, дисипація тощо. Відкриття явища появи хаотичної поведінки в нелінійних динамічних системах та доведення ряду властивостей взаємодії систем із хаотичними режимами створило підґрунтя для побудови неklasичних систем передачі інформації, що мають ряд суттєвих потенційних переваг над існуючими [1].

Як показала практика імітаційного моделювання використання сигналів детермінованого хаосу у багатьох заводових ситуаціях є більш доцільним, а отримані результати відповідають більш комплексному підходу до завдань захисту інформації, забезпечення підвищення інформаційної ємності, збереження енергетичної ефективності, тощо. [3-7].

Зазвичай усі погоджуються, що нелінійний підхід до проектування засобів телекомунікацій є необхідним та доцільним, але недостатність теоретичних знань застосування нелінійних ефектів «відлякують» розробників від практичного застосування подібних технологій через розгляд хаотичної поведінки як деструктивного явища [8].

Головна особливість нелінійних динамічних систем – це явище самоорганізації та чутливість до слабких флуктуацій початкових станів, що дозволяє реалізовувати засоби телекомунікацій, які впевнено працюють із рівнями сигналів набагато меншими за природні завади. Таким чином вирішується головне завдання передачі сигналів – збільшення відношення сигнал-завада під час обробки за допомогою відносно невеликої кількості технічних засобів, що забезпечує перспективність подібних підходів під час побудови сучасних систем електронних комунікацій.

Аналіз досліджень та публікацій

Під час хаотичних режимів роботи фіксують зростання темпів самоорганізації поведінки системи на структурному рівні, що особливо виразно проглядається в зонах біфуркації. Саме наявність хаотичних режимів спонукає до руйнування минулих структур та побудови інших із хаосу, або формування, відокремлення, виділення впорядкованості із структур, що із класичних позицій розглядаються як деструктивні елементи [2].

Крім того важливим елементом хаотичної динаміки є обов'язкова необхідність флуктуацій [5], або з точки зору передачі інформації – шумоподібних завод. Саме так виникають синергетичні процеси самоорганізації, власні дивні атрактори і навіть хаотична синхронізація та нелінійна симетрія, що не може існувати в інших умовах. Отже в нелінійних системах шумоподібні завади є необхідною умовою функціонування та носять конструктивний характер під час обробки телекомунікаційних сигналів [3].

Аналоговий генератор детермінованого хаосу (ГДХ) складається як мінімум із трьох основних компонент: нелінійного елемента, інерційної структури та зворотного зв'язку, а також мати щонайменше три незалежні неперервні фазові змінні та хоча б один біфуркаційний параметр керування встановленням хаотичних режимів [2-4]. Зацікавленість фахівців електронних комунікацій хаотичними системами зв'язку обумовлена відкриттям явища хаотичної синхронізації та хаотичного синхронного відгуку. На даний момент виділено ряд способів як

забезпечення синхронізації ГДХ, так і способів хаотичної модуляції, які не мають аналогів в класичних системах [1-3].

Умовою будь якої синхронізації є двобічний обмін енергією між рознесеними системами. Якщо таким чином взаємодіють нелінійні системи (НС) то утворюється єдиний ГДХ із розподіленими параметрами, що суттєво ускладнює побудову його моделі. Тому в практиці хаотичного зв'язку застосовують однобічну хаотичну синхронізацію однакових за структурою ГДХ. В таких умовах ГДХ на приймальному боці (ведений) із часом повторює еволюцію ГДХ на передавальному боці системи зв'язку. Такий спосіб синхронізації називають повною або ідентичною хаотичною синхронізацією. Однак, навіть за умови ідентичних структур ГДХ, запуск процесу хаотичної синхронізації з загального випадку не гарантується, але численними моделюваннями наявність такого способу синхронізації можливо вважати доведеним [3-8].

Контроль наявності синхронізації між ГДХ можливий декількома способами, найбільш відомими із яких є спосіб обчислення метрики суміжних траєкторій, спосіб обчислення показників Ляпунова та спосіб допоміжного генератора (узагальненої системи) тощо [3]. Способи контролю наявності синхронізації між віддаленими ГДХ можливо використати для детектування передачі інформаційного бінарного сигналу, де наявність/відсутність синхронізації ГДХ говорить про передачу логічних рівнів 1/0. В такому випадку якість контролю синхронізації безпосередньо впливає на якість передачі інформаційного сигналу, тому синтез найбільш оптимального критерію є актуальним завданням в теорії хаотичних систем зв'язку.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: встановлення оптимального критерію для порівняння еволюції хаотичних генераторів що синхронізуються в системі передачі бінарної інформації.

Виклад основного матеріалу

Хаотична система зв'язку (рис.1) для проведених досліджень складається із трьох ГДХ однакової структури, які будемо називати ведучим, основним і допоміжним. Режим ідентичної (повної) синхронізації між ведучим та веденими ГДХ виникає за умови «сильного» зв'язку (більше 50%) [2-4]. На практиці встановити повну 100% ідентичність еволюції всіх ГДХ можливо тільки асимптотично із зростанням часу. Введення інформаційного бінарного сигналу в хаотичний (рис.1) реалізується через маніпуляцію біфуркаційними параметрами ведучого генератора, в результаті чого характер його хаотичної динаміки дещо змінюється але в межах діючого атратора.



Рис.1. Структурна схема цифрової хаотичної системи зв'язку

Такий хаотичний шумоподібний сигнал діє в лінії передачі та є стійким до впливу завад та спотворень за умови певного вибору параметрів ГДХ та параметрів модуляції як на приймальному так і на передавальному боці [3]. Детектування бінарного сигналу ґрунтується на порівнянні динаміки синхронізації основного та допоміжного ГДХ із різними значеннями біфуркаційних параметрів між собою. Найбільш тривіальний та бажаний випадок такої схеми передачі для користувача є ситуація, коли під час передачі одного логічного рівня основний та допоміжний генератор входили в повний синхронізм із ведучим, а під час другого логічного рівня синхронізація ведених генераторів була відсутня.

Для отримання інформаційного повідомлення із більшим рівнем достовірності слід зважати на ряд факторів: реалізувати оптимальний вибір параметрів біфуркації та параметрів ініціалізації усіх ГДХ; врахувати

рівень завад та спотворень в каналі зв'язку; забезпечити режим сильного зв'язку між ведучим та веденими генераторами та його нормування; оптимальним чином обрати критерій ідентичності еволюцій ГДХ на приймальному боці і не тільки обрати але і відслідковувати динаміку його змін із часом [4].

Формальна модель дослідження динаміки синхронізації/десинхронізації (рис.2) в рамках вибору найбільш оптимального критерію ідентичності еволюцій двох рознесених у просторі ГДХ реалізована на базі хаотичних станів НДС Rucklidge [2,3], що має три фазові змінні (3D) та два біфуркаційних параметри. Встановлено [2], що сигнали різних фазових змінних такої НДС можуть із різними ступенями ефективності бути застосовані як каналні сигнали системи (рис.1) в умовах хаотичної ідентичної синхронізації. Крім того для забезпечення синхронізації декомпозиція структури хаотичних генераторів для введення сигналу ведучого генератора має бути реалізована певним чином [2].

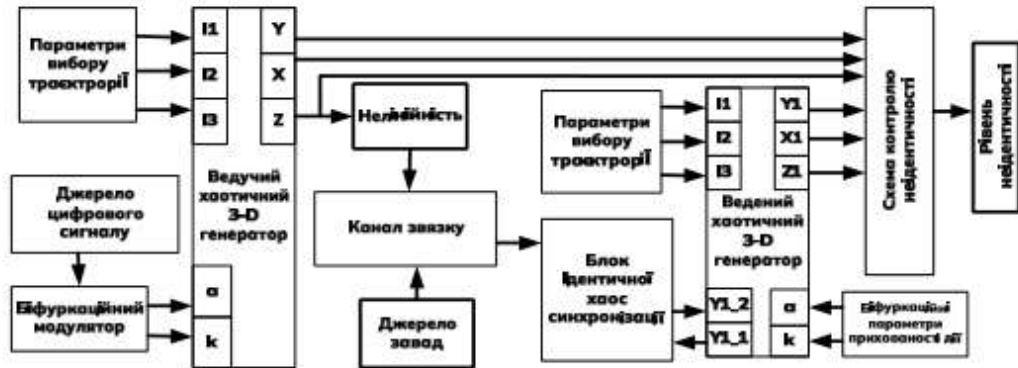


Рис.2. Структурна схема формальної моделі досліджень

Під час синхронізації основного та допоміжного ГДХ на приймальному боці системи (див.рис.1) реалізація порівняння за певним критерієм ідентичності має забезпечувати швидке та надійне виявлення факту входження в синхронізм обох ГДХ. Найбільш простим та інтуїтивно зрозумілим є кореляційний критерій синхронізації, або міра ідентичності сигналів за рівнем різницевої енергії сигналів, що виглядає як:

$$\delta_{\eta\Sigma} = \frac{1}{T_I} \int_0^{T_I} (\eta_m - \eta_s)^2 dt, \quad (1)$$

де T_I - час дослідження рівня синхронізації двох ГДХ, що має бути співмірний із бітовим інтервалом інформаційного повідомлення; $\xi_m; \xi_s$ - сигнали однойменних фазових змінних на виходах ГДХ (ведучого та веденого або основного та допоміжного), що синхронізуються.

В дискретній системі моделювання Matlab/Simulink аналітична реалізація критерію (1) виглядатиме як:

$$\delta_1 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\eta_{m_k} - \eta_{s_k})^2, \quad (2)$$

де N - кількість поточних вибірок, кількість яких еквівалентна часу інтегрування (бітовому інтервалу); $\eta_{m_k} - \eta_{s_k}$ - поточна різниця між вибірками однієї фазової змінної але різних ГДХ, що синхронізуються.

Реалізація блоку Simulink за виразом (2) складається із віднімача двох хаотичних сигналів, наступного квадратора і дискретного інтегратора-накопичувача (рис.3).

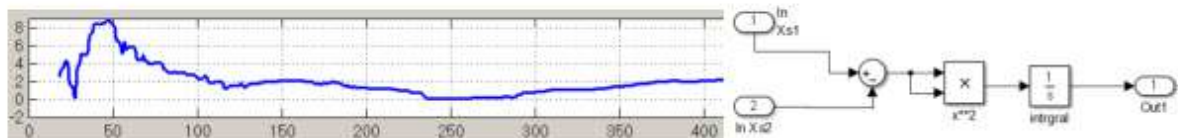


Рис.3. Результат ідентифікації логічних рівнів (ліворуч) під час роботи енергетичного корелятора двох хаотичних сигналів Simulink (праворуч)

Для порівняння результатів визначення ідентичності під час передачі логічного нуля і логічної одиниці паралельно аналізувалась роботи системи із встановленням біфуркаційних параметрів модуляції для різних логічних рівнів (рис.4). Параметри каналу передачі логічної 1 (верхня частина схеми рис.4) відповідають максимальному рівню синхронізації двох ведених генераторів, а каналу передачі логічного нуля – мінімальній синхронізації або десинхронізації взагалі.

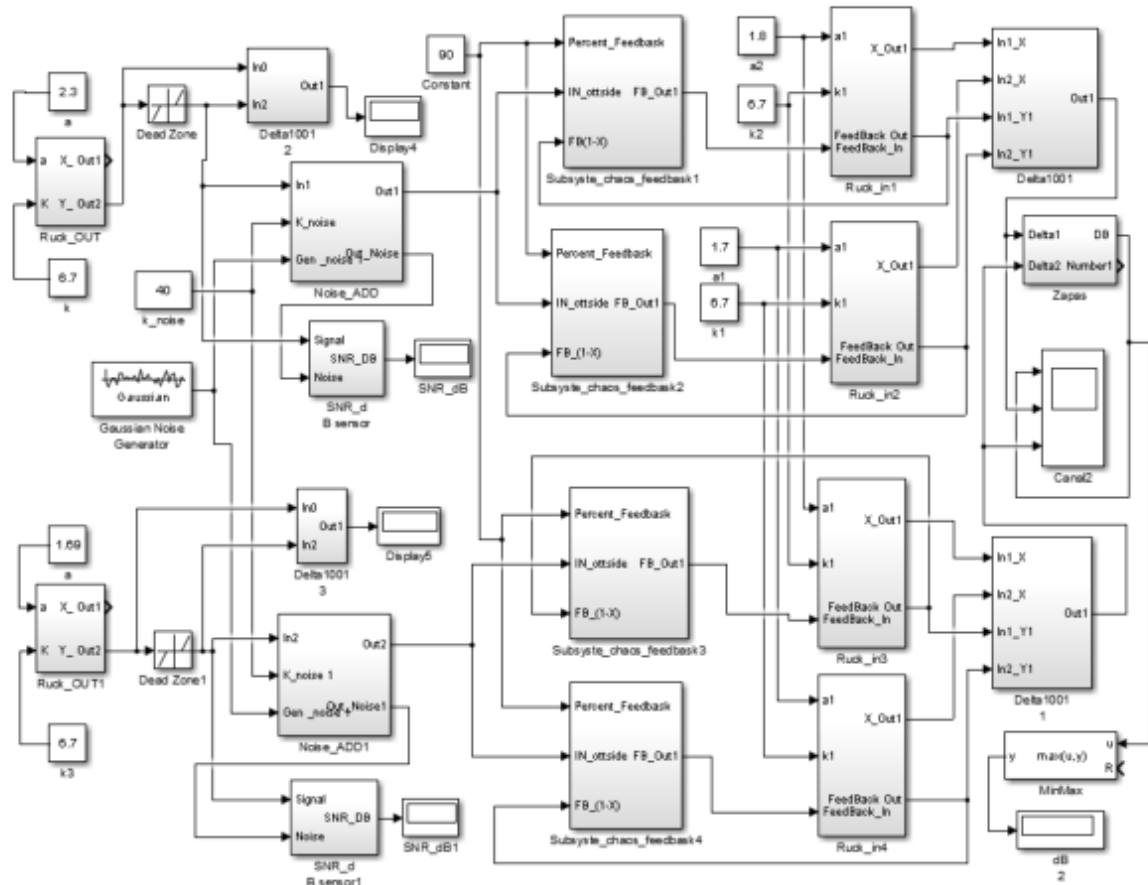


Рис.4. Модель Simulink для оптимізації критерію ідентичності в бінарній хаотичній системі зв'язку

В результаті роботи моделі (рис.4) маємо пару значень рівня неідентичності еволюції для різних логічних рівнів інформаційного сигналу, відношення яких слушно вибрати критерієм правильного або неправильного прийому переданого логічного рівня або критерієм ідентифікації логічних рівнів. За умови використання критерію ідентифікації (3) в логарифмічній формі алгоритм роботи пристрою як оптимального приймача представляється як:

$$10 \lg \left(\frac{\delta(1)}{\delta(0)} \right) \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} \xi(\text{дБ}), \quad (3)$$

лог. "1"
лог. "0"

де $\delta(1), \delta(0)$ - значення критерію синхронізації основного та допоміжного ведених ГДХ під час передачі рівня логічної одиниці та логічного нуля відповідно; $\xi(\text{дБ})$ - значення порогу ідентифікації логічних рівнів, що має значення більше нуля.

Результати досліджень за використанням критерію (3) у схемі (див. рис.4) демонструють асимптотичне входження в синхронізм обох ведених генераторів, але один із робить це швидше за інший в межах початкової ділянки часу (див.рис.3). Поріг ідентифікації для використання критерію синхронізму (2) слід обирати в межах 3-6дБ. Перевагою кореляційного способу ідентифікації за (2) є швидкість подання результатів та простота обчислень, а вагомим недоліком – суттєва залежність значення критерію ідентифікації в межах початкової ділянки, що утруднює вибір бітового інтервалу для інформаційного повідомлення та збільшує кількість можливих помилок ідентифікації, а отже зменшує якість переданого бінарного повідомлення.

Для усунення частини вказаних недоліків під час ідентифікації логічних рівнів в схемі досліджень (див.рис.4) запропоновано скористатись вбудованими в Simulink засобами обрахунку поточного середньоквадратичного значення (RMS), в результаті алгоритм обрахунку рівня ідентичності має аналітичний вигляд:

$$\delta_{2n} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(\text{RMS} \{ \eta_{s1k} - \eta_{s2k} \} \right)^2 \quad (4)$$

де $\eta_{s1k} - \eta_{s2k}$ - поточна різниця між вибірками однієї фазової змінної різних ведених ГДХ, що синхронізуються. Сам алгоритм (4) фактично є процедурою подвійного інтегрування поточних значень вибірок сигналу та еквівалентний сигнальній обробці додатковим фільтром низьких частот (ФНЧ), що призводить до згладжування результатів (рис.5). При цьому поріг ідентифікації слід обирати в межах 2-4дБ.

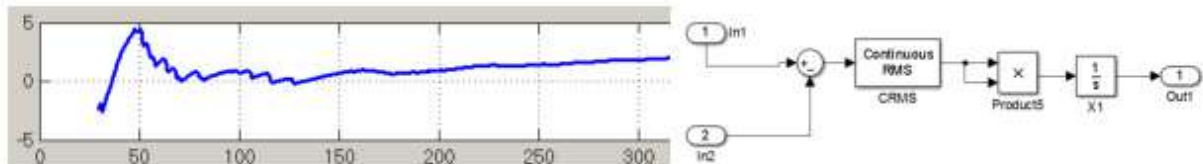


Рис.5. Реалізація обрахунку рівня ідентифікації (ліворуч) за критерієм різницевої енергії із подвійним інтегруванням в системі Simulink (праворуч)

За однакових вихідних умов використання критерію (4) порівняно із критерієм (2) підтверджує припущення про «згладжування» залежності, однак зменшується зона ідентифікації або діапазон можливих бітових інтервалів для інформаційного сигналу на початкових ділянках залежності (рис.5). Із збільшенням часу аналізу значення критерію ідентифікації монотонно зростають, що автоматично покращує якість розпізнавання логічних рівнів але суттєво зменшує інформаційну пропускну спроможність.

Наступним кроком оптимізації значення рівня ідентичності еволюції ГДХ є спроба використання декількох фазових змінних в рамках 3D простору атратора:

$$\delta_{x,y,z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^3 (\xi_{i1} - \xi_{i2})^2, \text{ де } \xi_1 \rightarrow x, \xi_2 \rightarrow y, \xi_3 \rightarrow z, \quad (5)$$

де $\xi_1 \rightarrow x, \xi_2 \rightarrow y, \xi_3 \rightarrow z$, відповідність між узагальненими фазовими змінними та фазовими змінними в 3D ГДХ. Численними дослідженнями встановлено, що різні фазові змінні двох ведених генераторів хаосу синхронізуються приблизно однаково завдяки роботі в межах одного атратора, а використання умови (5) може дати потенційно кращі результати відносно попередніх через опосереднення входження в синхронізм різних фазових змінних. Наприклад, за умови використання лише двох фазових змінних критерій неідентичності має наступний вигляд:

$$\delta_3 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left[(x_{s1k} - x_{s2k})^2 + (y_{s1k} - y_{s2k})^2 \right], \quad (6)$$

де x, y - фазові змінні, сигнали які не мають постійної складової (знакозмінні сигнали).

Симуляція значення критерію (6) для ідентифікації логічних рівнів (рис.6) за умови використання лише двох фазових змінних порівняно із попередніми випадками (див.рис.4,5) дала можливість суттєво зменшити нерівномірність на початковій ділянці роботи та сформулювати ідею ідентифікації в момент максимального значення. Це дозволяє приблизно на 50% скоротити час аналізу рівня синхронізму ГДХ і, таким чином, збільшити продуктивність обробки за інформаційним сигналом. На практиці максимум легко визначається піковим вольтметром і таке схемотехнічне рішення не призводить до невиправданих зайвих апаратних витрат на прийняття рішення про ідентифікацію певного логічного рівня.

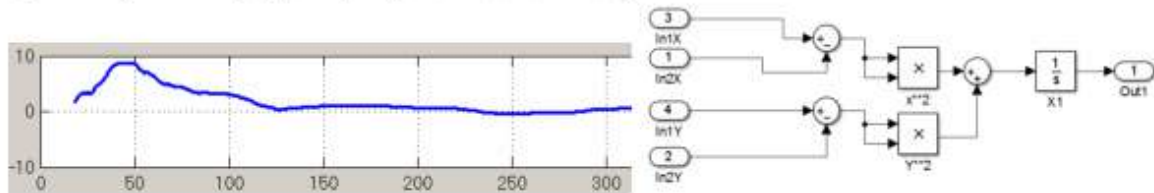


Рис.6. Реалізація обчислення рівня ідентифікації (ліворуч) за критерієм різницевої енергії із використанням декількох фазових змінних в системі Simulink (праворуч)

Об'єднуючи дві останні ідеї щодо визначення рівня збігу еволюції ГДХ, що синхронізуються легко удосконалити критерій (6) через використання вбудованої функції поточного визначення середньоквадратичного значення (RMS) за двома фазовими змінними як:

$$\delta_4 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left[\left(RMS \{x_{s1_k} - x_{s2_k}\} \right)^2 + \left(RMS \{y_{s1_k} - y_{s2_k}\} \right)^2 \right], \quad (7)$$

Застосування алгоритму ідентифікації (8) рівня синхронізації обробки виявився найбільш доцільним серед вищезазначених завдяки відсутності локальних екстремумів, гладкості кривої та стабільному додатному значенню критерію ідентифікації, що дозволяє використовувати бітові інтервали інформаційного сигналу в широких межах за умови порогу ідентифікації 4-6дБ.

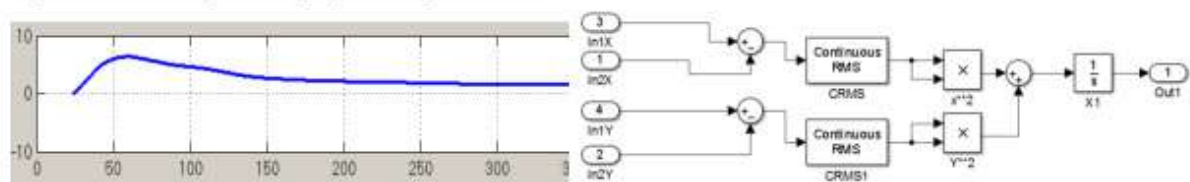


Рис.7. Реалізація обчислення рівня ідентифікації (ліворуч) за критерієм різницевої енергії двох фазових змінних із використанням подвійного інтегрування в системі Simulink (праворуч)

Наступний крок оптимізації критерію ідентичності для 3D ГДХ за (7) можливо отримати через розуміння факту роботи обох ведених генераторів в близьких, але загалом в різних хаотичних режимах. Тому в критерій доцільно ввести обчислення поточного значення енергій хаотичних сигналів різних фазових змінних, що будуть виступати нормуючим фактором такої відмінності. Застосування вказаних особливостей для (7) з аналітичної точки зору виглядатиме як:

$$\delta_5 = \sum_{k=1}^N \left(\frac{RMS \{x_{s1_k} - x_{s2_k}\} + RMS \{y_{s1_k} - y_{s2_k}\}}{RMS \{x_{s1_k}\} + RMS \{x_{s2_k}\} + RMS \{y_{s1_k}\} + RMS \{y_{s2_k}\}} \right), \quad (8)$$

а для випадку аналогових ГДХ із розмірністю D (3,4,5...) вираз критерію ідентичності хаотичної еволюції двох ведених генераторів (8), що синхронізуються виглядатиме як:

$$\delta_{5D} = \sum_{i=1}^D \left(RMS \{ \eta_{is1} - \eta_{is2} \} \right)^2 / \sum_{i=1}^D \sum_{j=1}^2 RMS \{ \eta_{isj}^2 \}, \quad (9)$$

де $\eta_{i,j}$ - поточне значення i -ї фазової змінної для j -го веденого генератора, що синхронізуються одним ведучим генератором. Проведення симуляції для найбільш складним критерієм (8) показало ряд переваг отриманої залежності (рис.8) ідентифікації логічних рівнів, що в першу чергу полягають в однозначності максимуму та мінімізації часу аналізу, що позитивно позначається як на зменшенні коефіцієнту помилок передачі інформаційного сигналу так і на збільшенні його пропускної спроможності.

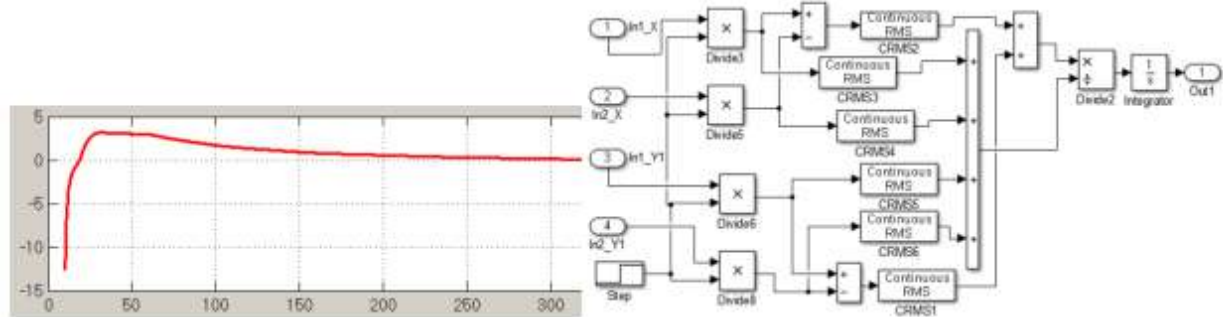


Рис.8. Реалізація обрахунку рівня ідентифікації (ліворуч) за критерієм різницевої енергії двох фазових змінних та нормуванням за енергією фазових змінних в системі Simulink (праворуч)

Часова залежність (рис.8) рівня ідентичності має яскравий максимум, що відповідає декільком десяткам елементарних циклів атрактору НДС Rucklidge, після набуття максимуму поточні значення залежності поступово зменшуються до рівня 0, що означає схожість еволюцій ведених генераторів із зростанням часу через наявність сильного зв'язку із ведучим генератором. Застосування критерію ідентичності (9) легко реалізувати на практиці для побудови діючих систем прихованого хаотичного зв'язку, також застосування нормування за енергією дає можливість використання максимальної кількості незалежних фазових змінних.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Шляхом поступової оптимізації тривіального кореляційного енергетичного критерію різницевої енергії та симуляції його використання в системі цифрового хаотичного зв'язку на базі нелінійної динамічної системи Rucklidge із допоміжним веденим генератором за допомогою імітаційного моделювання в середовищі Matlab/Simulink запропоновано критерій, що дозволяє забезпечити більш високу точність та пропускну спроможність передачі інформаційного повідомлення та забезпечити універсалізм використання в умовах застосування хаотичних генераторів високих розмірностей.

Також запропонований критерій виявився слабко чутливий до адитивних завад на рівні до -10дБ та нелінійних спотворень каналного сигналу типу двобічне обмеження та сходінка в лінії передачі до 20%, що дозволяє застосовувати подібний спосіб ідентифікації логічних рівнів за умови потужних завад та помірних нелінійних спотворень.

У подальших дослідженнях планується сформулювати критерії для вибору біфуркаційних параметрів генераторів детермінованого хаосу в умовах передачі багаторівневих цифрових інформаційних сигналів під час дії системних завад від аналогічних хаотичних систем зв'язку.

Література

1. Digital Communications Using Chaos and Nonlinear Dynamics / [Editors: Larson L.E., Liu J. – M., Tsimring L.S. – New York : Springer. – 2006. – 382 p.
2. Прикладне застосування теорії хаотичних систем у телекомунікаціях: монографія / Ю. Я. Бобало, С. Д. Галюк, М.М. Климаш, Р. Л. Політанський; Нац. ун-т «Львів. політехніка».– Львів: Коло, 2015. – 178 с.
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. 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 Открытый доступ* Volume 55, Issue 3, 1 June 2018, Pages 70-76 DOI: <https://doi.org/10.2478/lpts-2018-0023>.

5. Пивовар О. С. Полігармонічний виявник слабких сфінгометричних сигналів/ О. С.Пивовар, С. К.Підченко, А. А.Таранчук // Вісник ХНУ. - 2022. - №2 – С.133-141.

6. Пивовар О.С. Застосування сигналів детермінованого хаосу для систем ближньої навігації мобільних роботів/О.С. Пивовар, О.О. Михальчук, І.О. Веремійчук// Вісник ХНУ. - 2019. - №6 – С.149-154.

7. Пивовар, О. С. Моделювання генераторів хаосу для використання в UWB системах обробки [Текст] / О. С. Пивовар, С. Р. Павлінський // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2012. – № 6. – С. 207-211.

8. Chapeau-Blondeau, F., Rousseau, D., Constructive action of additive noise in optimal detection // *International Journal of Bifurcation and Chaos*, Vol. 15, No. 9, 2005. pp. 2985 – 2994.

9. Рябенський В.М. Основи моделювання систем і процесів в електротехніці (Використання пакету прикладних програм MATLAB/Simulink). Навчальний посібник / Під редакцією проф. В.М. Рябенського. – Львів: новий Світ – 2000, 2008. – 385 с.

References

1. *Digital Communications Using Chaos and Nonlinear Dynamics* / [Editors: Larson L.E., Liu J. – M., Tsimring L.S. – New York : Springer. – 2006. – 382 p.

2. *Przykładne zastosowania teorii chaoty'chny'x system u telekomunikacjach: monografiya* / Yu. Ya. Bobalo, S. D. Galyuk, M.M. Kly'mash, R. L. Politans'ky'j; Nacz. un-t «L'viv. politexnika». – L'viv: Kolo, 2015. – 178 с.

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. 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 Открытый доступ* Volume 55, Issue 3, 1 June 2018, Pages 70-76 DOI: <https://doi.org/10.2478/lpts-2018-0023>.

5. Py'vovar O. S. Poligarmonichny'j vy'yavny'k slabky'x sfigmometry'chny'x sy'gnaliv/ O. S.Py'vovar, S. K.Pidchenko, A. A.Taranchuk // *Visny'k XNU*. - 2022. - #2 – S.133-141.

6. Py'vovar O.S. Zastosuvannya sy'gnaliv determinovanogo хаосу dlya sy'stem bly'zhn'oyi navigaciyi mobil'ny'x robotiv/O.S. Py'vovar, O.O. My'xal'chuk, I.O. Veremijchuk// *Visny'k XNU*. - 2019. - #6 – S.149-154.

7. Py'vovar, O. S. Modelyuvannya generatoriv хаосу dlya vy'kory'stannya v UWB sy'stemax obrobky' [Tekst] / O. S. Py'vovar, S. R. Pavlins'ky'j // *Visny'k Xmel'ny'cz'kogo nacional'nogo univ'ersy'tetu. Texnichni nauky'*. – 2012. – # 6. – S. 207-211.

8. Chapeau-Blondeau, F., Rousseau, D., Constructive action of additive noise in optimal detection // *International Journal of Bifurcation and Chaos*, Vol. 15, No. 9, 2005. pp. 2985 – 2994.

9. Ryaben'ky'j V.M. Osnovy' modelyuvannya sy'stem i procesiv v elektrotexnici (Vy'kory'stannya paketu pry'kladny'x program MATLAB/Simulink). Navchal'ny'j posibny'k / Pid redakciyeyu prof. V.M. Ryaben'kogo. – L'viv: novy'j Svit – 2000, 2008. – 385 с.



КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

1

172 Електронні комунікації та радіотехніка
ОПП - Електронні інформаційно-комунікаційні системи та мережі

Тема: **МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ В
УМОВАХ СИСТЕМНИХ ЗАВАД**

Студент: **Каменяр Микола Леонідович, ст. гр. ЕКРМ-23**

Керівник: **Пивовар Олег Сергійович, к.т.н., доц. каф. ТМІТ, ФІТ, ХНУ**

Мета роботи: **покращення завадостійкості передачі цифрових повідомлень в каналах зв'язку із застосуванням хаотичної обробки сигналів.**

Об'єкт дослідження: **процес передачі інформації в електронних комунікаціях**

Предмет дослідження: **використання хаотичних режимів роботи для забезпечення завадостійкості електронних комунікацій в умовах системних завад**

Апробація : **1 конференція + 1 стаття**

Хмельницький, 2024 р



ДЕСТРУКТИВНІ ФАКТОРИ В КАНАЛІ ПЕРЕДАЧІ

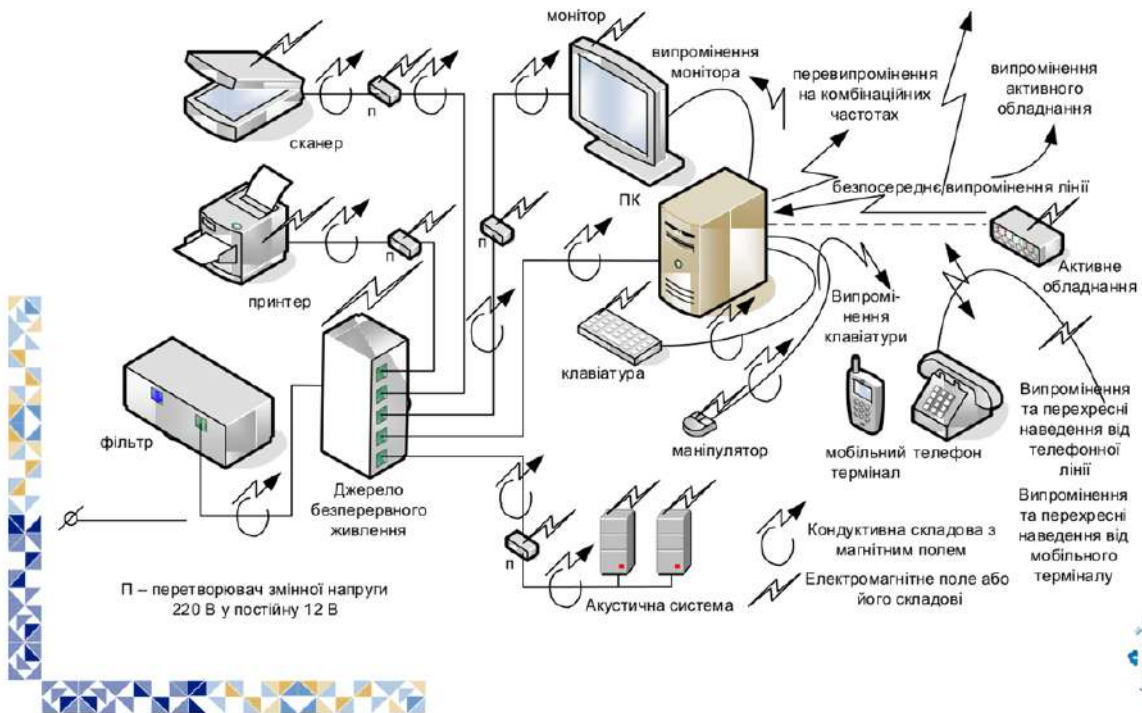
2





ДЖЕРЕЛА ТА АКЦЕПТОРИ ЗАВАД В СУЧАСНИХ ЕЛЕКТРОННИХ КОМУНІКАЦІЯХ

3



СИСТЕМНІ ЗАВАДИ ЯК ЗАВАДИ НЕОРТОГОНАЛЬНОСТІ

4

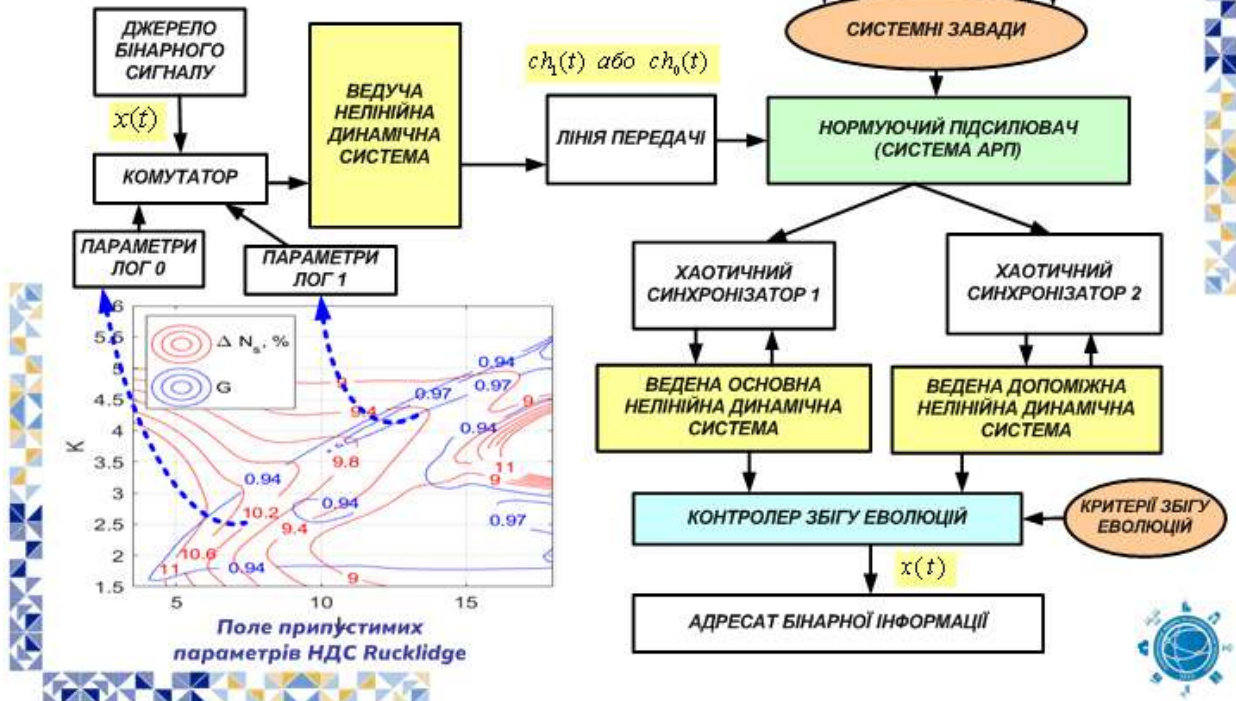




ХАОТИЧНИЙ БІНАРНИЙ КАНАЛ ЗВ'ЯЗКУ ІЗ ПЕРЕМИКАННЯМ ХАОТИЧНИХ РЕЖИМІВ

Від інших хаотичних каналів

5



КРИТЕРІЙ ЗБІГУ ЕВОЛЮЦІЙ ЗА ВСІМА ФАЗОВИМИ ЗМІННИМИ

6

Відносний енергетичний критерій

$$\delta_5 = \frac{\sum_{k=1}^N [RMS\{x_{s1k} - x_{s2k}\} + RMS\{y_{s1k} - y_{s2k}\} + RMS\{z_{s1k} - z_{s2k}\}]}{\sum_{k=1}^N [RMS\{x_{s1k}\} + RMS\{x_{s2k}\} + RMS\{y_{s1k}\} + RMS\{y_{s2k}\} + RMS\{z_{s1k}\} + RMS\{z_{s2k}\}]}$$

Відносний різницево фазовий критерій

$$\delta_6 = \frac{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [(sign(x_{1j}) - sign(x_{2j}))^2 + (sign(y_{1j}) - sign(y_{2j}))^2 + (sign(z_{1j}) - sign(z_{2j}))^2]}{\prod_{i=1}^2 \{\max[x_i(t), y_i(t), z_i(t)] - \min[x_i(t), y_i(t), z_i(t)]\}}}$$

Відносний абсолютний фазовий критерій знакозмінних сигналів

$$\delta_7 = \frac{\sum_{j=1}^N [sign(x_{1j}) \cdot sign(x_{2j})] + \sum_{j=1}^N [sign(y_{1j}) \cdot sign(y_{2j})]}{\sum_{j=1}^2 [RMS(x_j) + RMS(y_j)]}$$

Абсолютний різницево мінімаксний

$$\delta_8 = \max[(x_{1i} - x_{2i}), (y_{1i} - y_{2i}), (z_{1i} - z_{2i})] - \min[(x_{1i} - x_{2i}), (y_{1i} - y_{2i}), (z_{1i} - z_{2i})]$$

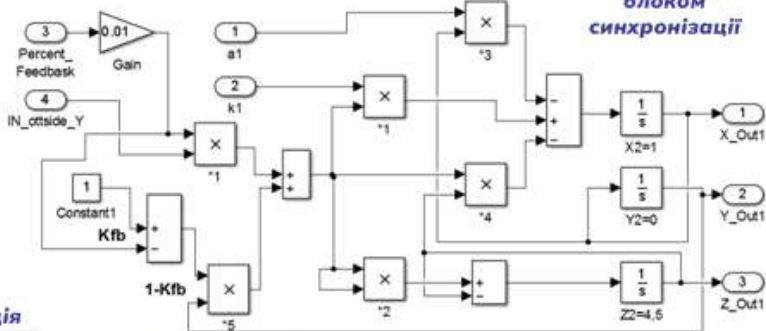


ДЕКОМПОЗИЦІЯ НДС RUCKLIDGE ДЛЯ ХАОТИЧНОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ

7

Аналітична модель:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = ay - yz - kx; \\ \frac{dy}{dt} = x; \\ \frac{dz}{dt} = y^2 - z. \end{cases}$$

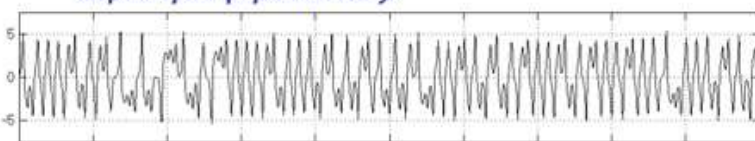


Декомпозиційна модель Simulink з блоком синхронізації

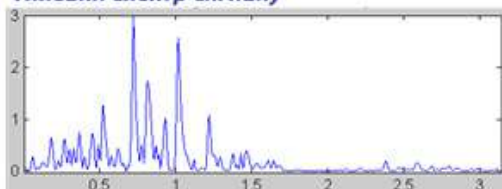
Тривимірна реконструкція дивного атратора



Характерна форма сигналу:



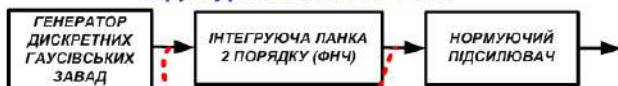
Типовий спектр сигналу



МОДЕЛЬ СИСТЕМОЇ ЗАВАДИ ДЛЯ ХАОТИЧНОГО КАНАЛУ

8

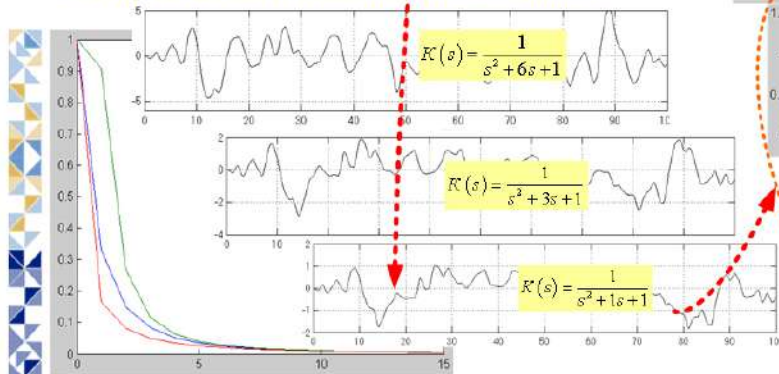
Структурна модель Simulink



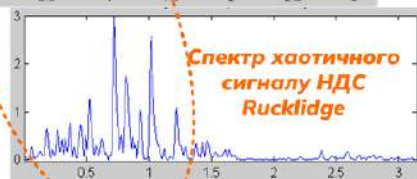
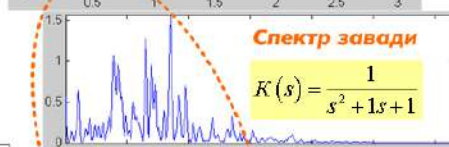
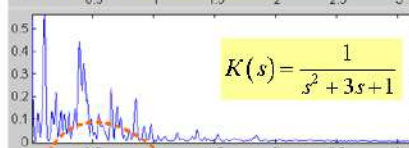
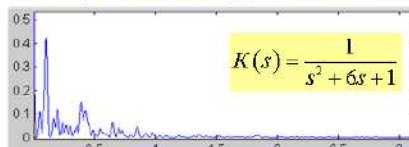
Сигнал генератора гаусівського шуму Simulink



АЧХ та результат обробки інтегруючою ланкою



Спектри системної завади та передавальна функція ФНЧ





МОДЕЛЬ ВЗАЄМОДІЇ СИГНАЛУ ТА СИСТЕМОЇ ЗАВАДИ

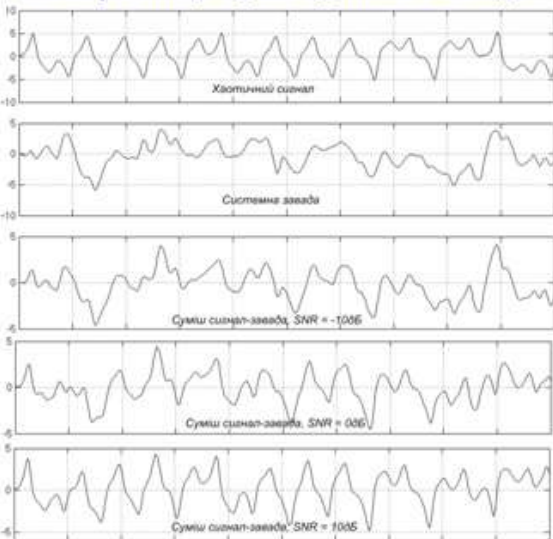
9

Аналітична модель взаємодії

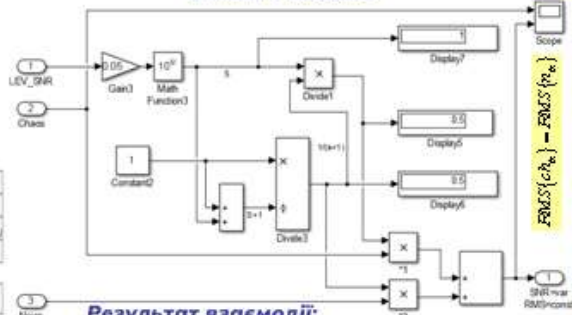
$$S = 10^{\frac{1}{20} SNR}$$

$$ch_{out} + n_{out} = \frac{s}{s+1} ch_{in} + \frac{1}{s+1} n_{in}$$

Часові реалізації під час адитивної взаємодії:

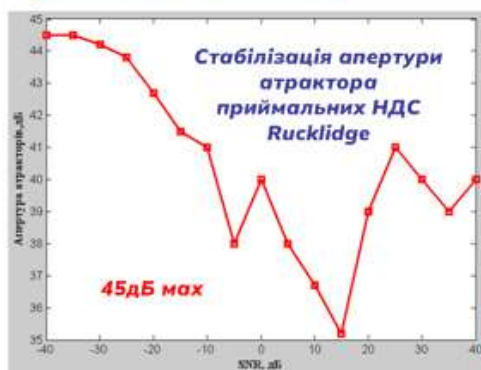


Simulink модель:



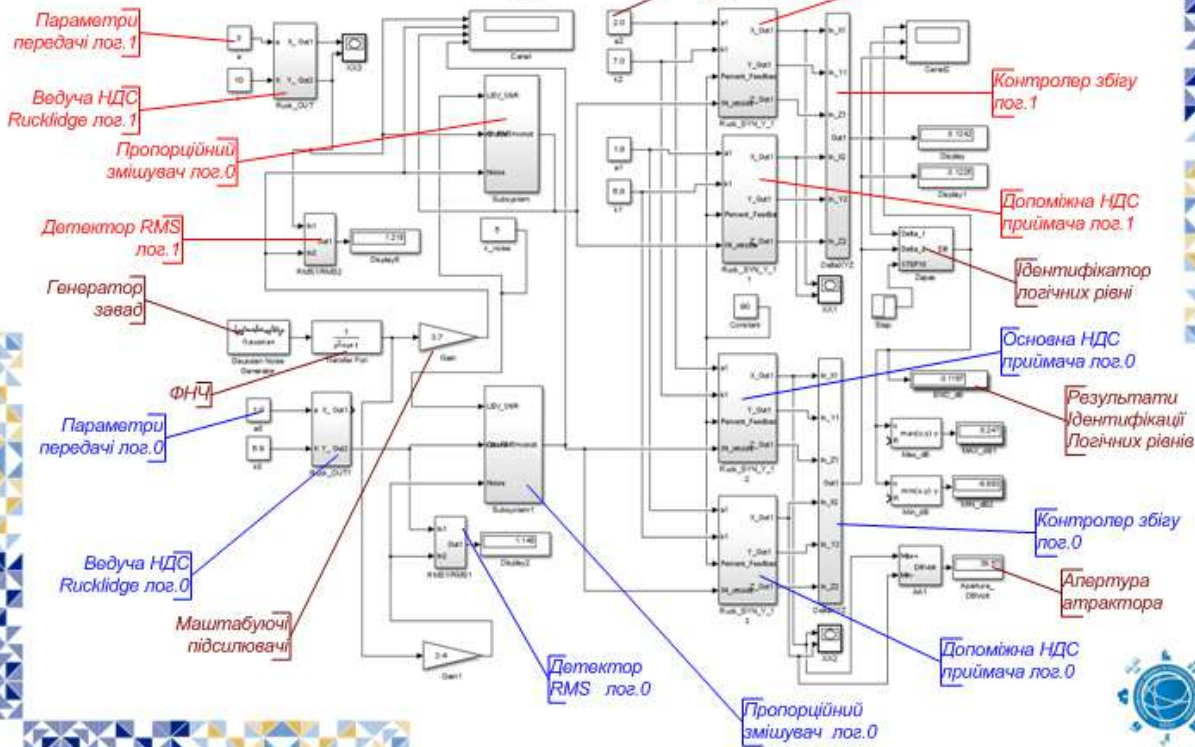
Результат взаємодії:

$$RMS\{ch_{out} + n_{out}\} = RMS\{ch_{in}\}$$



ВЕРИФІКАЦІЙНА SIMULINK МОДЕЛЬ ВПЛИВУ СИСТЕМНИХ ЗАВАД НА ХАОТИЧНИЙ КАНАЛ ПЕРЕДАЧ

10



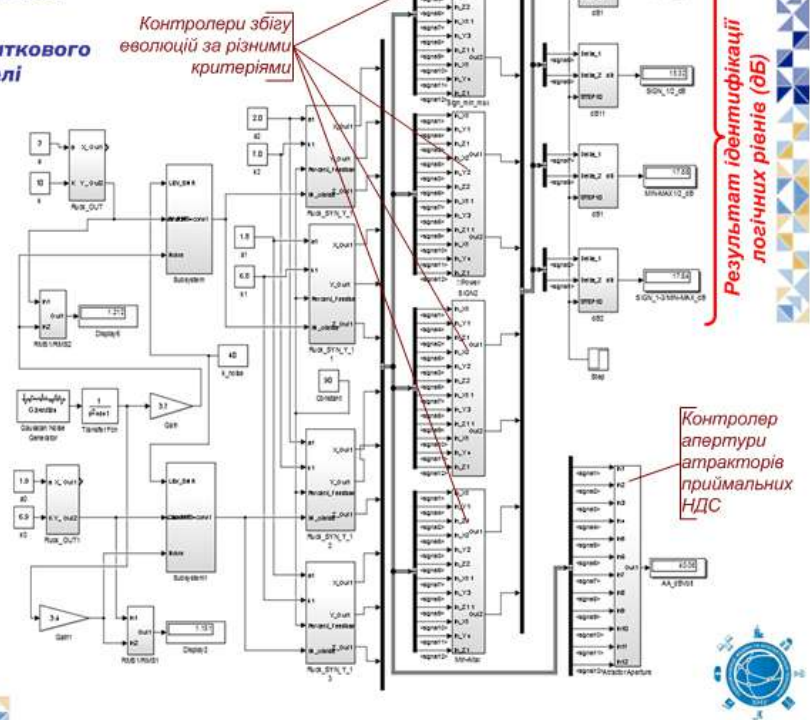


ОПТИМІЗАЦІЙНА SIMULINK МОДЕЛЬ ВПЛИВУ СИСТЕМНИХ ЗАВАД НА ХАОТИЧНИЙ КАНАЛ ПЕРЕДАЧ ЗА РІЗНИМИ КРИТЕРІЯМИ

11

Первинні параметри та змінні початкового налаштування Simulink моделі

№	Назва	Бінарний рівень	Тип вводу в моделі	Умове позн	Рівень
1	Хаотичний модулятор	лог 1	Константа	a1	3
		лог 0	Константа	k1	10
		лог 0	Константа	a2	1.9
2	Хаотичний демодулятор	лог 1	Константа	a1	2.0
		лог 0	Константа	k1	6.8
		лог 0	Константа	a2	1.8
3	Сила зв'язку під час синхронізації	лог 1 та лог 0	Константа	Pb	55% 90% 95%
4	Час моделювання	лог 1 та лог 0	Параметр запуску симуляції	Ta	500
5	Стартові значення фазових змінних	лог 1 та лог 0	Параметр блоку	X0, Y0, Z0	1,0,0
6	Діапазон аналізу рівня сигнал системна завада	лог 1 та лог 0	Константа	SNR (дБ)	-10...+40
7	Початковий пропуск (Step)	лог 1 та лог 0	Параметр блоку	T0	20
8	Баланс RMS	лог 1 та лог 0	Параметр блоку	Kp	Підбір
9	Крок поточної дискретизації моделі завад та сигналів	лог 1 та лог 0	Параметр блоку	T1	1



РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ МОДЕЛІ БІНАРНОЇ ХАОТИЧНОЇ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ ПІД ЧАС ДІЇ СИСТЕМНИХ ЗАВАД

12

Рівень ідентифікації бінарних сигналів:

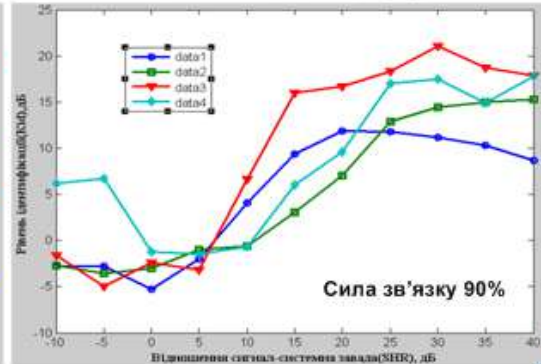
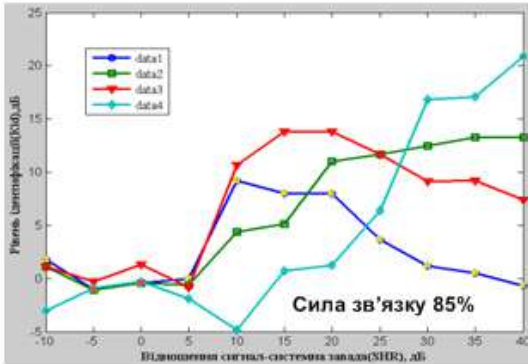
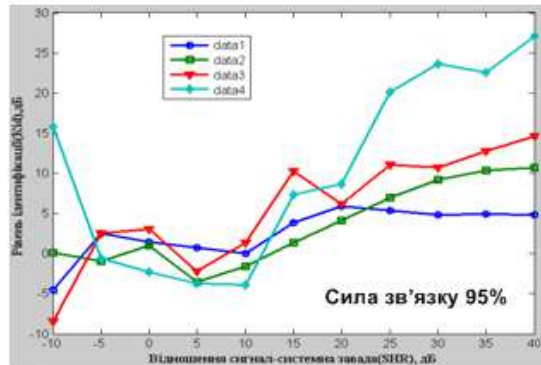
$$K_{IDj} = 20 \lg \frac{\delta_{j1}}{\delta_{j0}}$$

Застосовані критерії збігу еволюцій хаотичних генераторів під час симуляції:
data1 - Відносний енергетичний

data2 - Відносний різницево- фазовий

data3 - Відносний абсолютний фазовий знакозмінних сигналів

data4 - Абсолютний різницевий мінімаксий





ВИСНОВКИ

НАУКОВА НОВИЗНА

1. Запропоновано метод синтезу моделі системних завад для застосування в каналах передачі із хаотичною піднесивною, що полягає у застосуванні обробки сигналу дискретного генератора числових рядів із гаусівським розподілом фільтром подвійного інтегрування який забезпечує співмірність спектрів та схожість структури завади відповідно модульованому хаотичному сигналу.

2. Запропоновано спосіб пропорційної взаємодії системної завади та сигналу в хаотичному каналі передачі, що передбачає стабілізацію сукупного середнього рівня суміші сигнал – системна завада на вході хаотичного детектора, що забезпечує різке зменшення динамічного діапазону пристроїв обробки хаотичного сигналу за умови низьких відношень сигнал-системна завада до 45дБ.

3. Удосконалено ряд критеріїв збігу еволюції нелінійних динамічних систем, що враховують фазові та амплітудні особливості сигналів детермінованого хаосу під час процесу детектування бінарних повідомлень в хаотичних каналах передачі. Із запропонованих критеріїв шляхом імітаційного модулювання найбільш оптимальним для роботи в умовах системних завад виявився відносний різницево-фазовий критерій, під час застосування якого для забезпечення достатнього рівня завадостійкості реалізується найменше відношення сигнал-системна завада у 5дБ.

ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ

1. Розроблені моделі системних завад та їх взаємодії із каналними хаотичними сигналами та проведено їх верифікацію із підтвердженням високого рівня адекватності.

2. Розроблені Simulink моделі для реалізації удосконалених критеріїв збігу еволюції хаотичних генераторів під час однобічної синхронізації. Проведено їх верифікацію із підтвердженням високого рівня адекватності.

3. Розроблено верифікаційну Simulink модель системи передачі бінарної інформації із хаотичними піднесивними, що передбачає паралельну симуляцію передачі логічних станів бінарного сигналу та визначення рівня їх ідентифікації за заданим критерієм збігу еволюції основного та допоміжного генераторів. Верифікаційна модель забезпечує можливість перевірки адекватності роботи системи в окремих точках спектральної, часової, критеріальної, ймовірнісної, тощо, зони досліджень. Рекомендовано діапазон SHR від -40 до +40 дБ, та діапазон «сили зв'язку» 85% до 95%. Вказано, що стійкість до системних завад орієнтовно на 20 дБ слабша порівняно із впливом шумів.

4. Розроблена оптимізаційна модель хаотичної системи передачі інформації в середовищі Matlab/ Simulink, що відрізняється високою швидкістю та проведено її симуляцію із метою визначення стійкості до системних завад. В результаті досліджень цієї моделі встановлено мінімальне мінімальний рівень відношення сигнал – системна завада в хаотичній системі передачі із модуляцією хаотичних режимів, що має складати близько 10дБ, за умови рівня ідентичності більше 5дБ та застосування запропоновано автором, найбільш оптимального різницево-фазового критерію рівня збігу еволюції нелінійних динамічних систем Rucklidge на прийнятному боці хаотичної системи передачі із модуляцією хаотичних режимів.

13



ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!



Факультет інформаційних
технологій

14



Протокол аналізу звіту подібності експертом

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

Автор: Микола КАМЕНЯР

Співавтор:

Назва: Метод оптимізації каналу зв'язку в умовах системних завад

Експерт: Олег ПИВОВАР, к.т.н., доц

Підрозділ: Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

Коефіцієнт подібності 1: 5.9%

Коефіцієнт подібності 2: 2.8%

Мікропробіли: 28

Заміна букв: 25

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2024-12-02 10:16:04.0

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 процедур. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

Дата 2.12.2024р

експерт

 Олег Пивовар
Доц. каф ТМІТ

Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальне співпадіння з одним документом 1.0%

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. Помилки в документах: 10%

ID: 153134 Назва: Метод оптимізації каналу зв'язку в умовах системних завдань Додано в БД: 2024-12-02 Автора: Каменяр Микола Леонідович Керівники: Пивовар Олег Сергійович Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	108972	1680	1890 (2%)	40 (2%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

РІШЕННЯ КАФЕДРИ

ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ, МЕДІЙНИХ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: **Метод оптимізації каналу зв'язку в умовах системних завад**

Автор: **Каменяр Микола Леонідович**

Спеціальність: **172 Електронні комунікації та радіотехніка**

Освітня програма: **Електронні інформаційно-комунікаційні системи та мережі**

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

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту.	<u>Відповідає</u>
2	Виявлені запозичення не є 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. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
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.	
5	Інше:	

Підтвердження: Запозичення у розмірі 5,9 % є випадковими збігами та типовими бланками оформлення, та не є плагіатом.

Відповідальний за перевірку плагіату системою AntiPlagiarism (ХНУ):

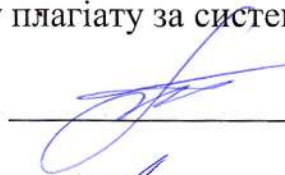
02.12.2024р.



Віктор СТЕЦЮК

Відповідальний за перевірку плагіату за системою StrikePlagiarism:

02.12.2024р.



Олег ПИВОВАР

Зав. каф. ТМІТ

02. .2024р.



Сергій ПІДЧЕНКО

Завідувачу кафедри
телекомунікацій, медійних та
інтелектуальних технологій (ТМІТ)
Підченко С.К.
здобувача вищої студента
2 курсу, гр. ЕКРм-23-1
Каменяра Миколи Леонідовича

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.

28.11.24

дата



підпис

Микола КАМЕНЯР

РЕЦЕНЗІЯ

на кваліфікаційну роботу магістра
студента групи ЕКРм-23-1 Каменяра Миколи Леонідовича
«Метод оптимізації каналу зв'язку в умовах системних завад»

Кваліфікаційна робота магістра присвячена питанням оптимізації системи зв'язку із застосуванням хаотичних принципів обробки сигналів та за умови дії внутрішніх та зовнішніх системних завад.

Робота складається із вступу, 4 розділів, висновків по роботі, переліку із 42 джерел посилання. Обсяг основного змісту роботи складає 88 сторінок і містить 43 рисунків і 1 таблицю на 39 сторінках по тексту та 34 аналітичних залежностей. Обсяг роботи (без додатків)- 104 сторінки.

У вступі підкреслюється актуальність тематики застосування ширококутових хаотичних сигналів як піднесівних коливання в сучасних системах електронних комунікацій. Визначено предмет дослідження, мету, завдання, наукову новизну та практичну цінність роботи.

Перший розділ роботи присвячено фізичним принципам організації каналів зв'язку із хаотичними піднесівними та проблематиці практичного використання хаотичної обробки сигналів.

Другий розділ присвячено розгляду деструктивних факторів в каналі передачі, зокрема механізмам появи та наслідкам впливу внутрішньо системних та зовнішньо системних завад, як найбільш складних із точки зору їх технічного придушення.

В третьому розділі обрано спосіб хаотичної модуляції, тип хаотичного генератора, спосіб детектування інформаційного повідомлення із хаотичної піднесівної, запропонована модель системної завади, та модель взаємодії завади із каналним сигналом, проведено верифікаційне моделювання окремих блоків системи.

Четвертий розділ охоплює оптимізацію вибору критеріїв збігу еволюцій хаотичних генераторів на приймальному боці системи передачі

бінарної інформації через застосування версифікаційної та досліджуваної моделі системи в середовищі Matlab\Simulink. Розроблені додаткові критерії оцінювання роботи хаотичного каналу зв'язку в умовах системних завад, запропоновано методики досліджень, проведено тривале імітаційне моделювання, отримані нові результати та рекомендації до використання в системах прихованого зв'язку.

Процес висвітлення реалізації мети в магістерській роботі щодо завдань досліджень є логічно пов'язаним. Наведені у роботі припущення мають достатнє обґрунтування. Оформлення пояснювальної записки знаходиться на рівні, що відповідає стандарту університету.

Серед позитивних сторін магістерської роботи слід відмітити наступне:

- актуальність тематики в умовах військового стану;
- запропоновані критерії хаотичної обробки є доцільними;
- отримані результати оптимізації є корисними та заздалегідь не передбачуваними;
- запропонована імітаційна модель може використовуватись для подальших досліджень даної галузі.

Серед недоліків слід відмітити:

- деякі пункти тексту 1,2 розділів мають посереднє відношення до тематики досліджень (п.2.2.2);
- результати моделювання отримані лише для однієї групи вхідних параметрів системи, варто було провести ширше моделювання із представленням результатів.

Загалом дипломна робота магістра Каменяра Миколи Леонідовича є актуальною, під час роботи отримані вагомні результати, робота заслуговує на оцінку "відмінно".

Рецензент:

К.Т.Н., Доцент
Чешчи В.М.
КАРЕДРА КІБЕРБЕЗПЕКИ ХНУ