

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інформаційних технологій

Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

## ДИПЛОМНА РОБОТА

Другий ( Магістерський)

Освітній рівень

Галузь знань 17 Електроніка та телекомунікації

Шифр і назва спеціальності

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

Шифр і назва спеціальності

на тему Метод хаотичного виявлення слабких періодичних сигналів

ДРМТР 202102.00.00

Виконав: студент 2 курсу, група ТР<sub>м</sub>-20-1

підпис

І.В. Зернюк

Ініціали, прізвище

Керівник: д-р техн. наук, доц.

підпис

С.К. Підченко

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри: д-р техн. наук, доц.

підпис

С.К. Підченко

Ініціали, прізвище

3 грудня 2021 р.

Хмельницький, 2021

Хмельницький національний університет  
Факультет інформаційних технологій  
Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій (ТМІТ)  
Освітній рівень другий (магістерський)  
Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації  
Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка  
Освітня-професійна програма Телекомунікації та радіотехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою ТМІТ



С.К. Підченко

« 2 » вересня 2021 р.

## ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Зернюку Івану Вікторовичу

1 Тема роботи: Метод хаотичного виявлення слабких періодичних сигналів

Керівник роботи Підченко Сергій Костянтинович, д.т.н, доцент.

Затверджено наказом по університету від «25» серпня 2021р. № 102

2 Строк подання студентом роботи на кафедру: 01.12.2021р.

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

Мета роботи: вдосконалення методів побудови та принципів обробки під час виявлення сигналів за допомогою генераторів детермінованого хаосу.

Об'єктом дослідження є процеси виявлення слабких сигналів на тлі потужних завад.

Предметом дослідження є неавтономні нелінійні виявники слабких періодичних сигналів біологічної природи.

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

1. Аналіз недосконалостей класичних виявників періодичних сигналів. 2. Способи використання нелінійної обробки сигналів. 3. Розробка або суттєве покращення характеристик хаотичних виявників біологічних сигналів із застосуванням нелінійним методів обробки. 4. Імітаційне моделювання запропонованих технічних та наукових рішень, критичний аналіз запропонованих досягнень та приклади практичного застосування.

Завдання отримав  І.В. Зернюк

Науковий керівник  С.К. Підченко

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів (розділів) дипломної роботи	Строк виконання етапів дипломної роботи	Примітка
1	<i>Вибір тематики роботи</i>	<i>до 25.08.21</i>	<i>обрано</i>
2	<i>Оформлення вступної частини до роботи</i>	<i>до 7.09. 21</i>	<i>оформлено</i>
3	<i>Розробка 1-го розділу</i>	<i>до 14.09. 21</i>	<i>розроблено</i>
4	<i>Розробка 2-го розділу</i>	<i>до 24.09. 21</i>	<i>розроблено</i>
5	<i>Розробка 3-го розділу</i>	<i>до 10.10. 21</i>	<i>розроблено</i>
6	<i>Імітаційне моделювання, обробка результатів</i>	<i>до 1.11. 21</i>	<i>проведено</i>
7	<i>Подання публікації за темою роботи</i>	<i>до 5. 11. 21</i>	<i>подано</i>
8	<i>Розробка 4-го розділу</i>	<i>до 10.11. 21</i>	<i>розроблено</i>
9	<i>Оформлення текстової частини</i>	<i>до 15.11. 21</i>	<i>оформлено</i>
10	<i>Оформлення графічної частини</i>	<i>до 20.11. 21</i>	<i>оформлено</i>
11	<i>Корекція роботи за зауваженнями керівника</i>	<i>до 25.11. 21</i>	<i>враховано</i>
12	<i>Прикінцева правка та перевірка</i>	<i>до 30.11. 21</i>	<i>виконано</i>
13	<i>Подання готового проекту</i>	<i>1.12. 21</i>	<i>виконано</i>

Студент



Підпис

І.В. Зернюк

Ініціали, прізвище

Керівник роботи



Підпис

С.К. Підченко

Ініціали, прізвище

## РЕФЕРАТ

Дипломна робота магістра 2-го курсу гр. ТРм-20-1 Зернюка Івана Вікторовича на тему «Метод хаотичного виявлення слабких періодичних сигналів» виконана на кафедрі «Телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій» Хмельницького національного університету у 2021р. Керівник роботи зав. каф. Підченко Сергій Костянтинович.

Робота складається із вступу, 4 розділів, висновків по роботі, переліку із 36 джерел посилання та 5 додатків (14 сторінок). Загальний обсяг роботи в якому викладено основний зміст складає 75 сторінок і містить 37 рисунків на 33 сторінках по тексту та 15 аналітичних залежностей. Повний обсяг роботи - 104 сторінок.

Дипломна робота присвячена розробці методу виявлення слабких біомедичних сигналів та тлі потужних флуктуаційних завад за допомогою використання нелінійних динамічних систем в критичному режимі роботи під час переходу від генерування періодичного сигналу до отримання сигналу детермінованого хаосу. Проведений критичний аналіз існуючих методів обробки слабких сигналів, показано доцільність застосування нелінійного виявлення для біомедичних сигналів пульсової хвилі людини. Запропоновано структуру хаотичного виявника полігармончного сигналу пульсової хвилі людини, складено імітаційну модель, проведено імітаційні дослідження виявлення сигналів запропонованим хаотичним виявником. Подано пропозиції щодо удосконалення схеми хаотичного виявлення.

**Ключові слова:** оптимальна обробка, хаотичний виявник, біомедичних сигнал, детермінований хаос.

## ABSTRACT

Master's thesis proposal «The method for chaotic detection of weak periodic signals » written by Zerniuk Ivan Viktorovych, a 2nd year student of group ТРМ-20-1 at the Department of Telecommunications, Media and Intellectual Technologies of Khmelnytsky National University, in 2021. Academic advisor – Pidchenko Sergiy Kostyantynovych, Head of the Department.

The thesis proposal consists of an introduction, 4 sections, main scientific findings, a list of works cited (36 bibliographic references) and 5 additional materials (14 pages). The total volume of the thesis in which the main content is stated is 75 pages; it contains 37 figures on 33 pages of text and 15 analytic dependences. The full volume of the thesis is 104 pages.

The thesis deals with the development of a method for detecting weak biomedical signals against the background of powerful fluctuation noise using nonlinear dynamical systems in the critical mode of operation during the transition from generating a periodic signal to a deterministic chaos signal. A critical analysis of existing methods of processing weak signals is performed; the feasibility of using nonlinear detection for biomedical signals of the human pulse wave is demonstrated. The structure of the chaotic detector of the polyharmonic signal of a human pulse wave is offered, the simulation model is made, and the simulation research of detection of signals by the offered chaotic detector is carried out. Suggestions for improving the scheme of chaotic detection are given.

**Keywords:** optimal processing, chaotic detector, biomedical signal, deterministic chaos.

## ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ .....	8
ВСТУП .....	9
1 КЛАСИЧНІ МЕТОДИ ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ .....	15
1.1 Оптимальне виявлення сигналів.....	15
1.1.1 Поняття виявлення.....	15
1.1.2 Різновиди оптимальної обробки.....	17
1.2 Енергетичні методи та критерії оптимальної обробки .....	21
1.2.1 Обробка слабких сигналів за допомогою накопичування.....	21
1.2.2 Статистичні критерії оптимального виявлення слабких сигналів .....	23
2 ХАОТИЧНІ ВИЯВНИКИ ПЕРІОДИЧНИХ СИГНАЛІВ.....	33
2.1 Некласичні методи обробки сигналів .....	33
2.1.1 Прогресивні методи оптимального виявлення .....	33
2.1.2 Методи дискримінації хаотичних мод.....	37
2.2 Засоби хаотичного виявлення.....	40
2.2.1 Генератор хаосу для хаотичних виявників.....	40
2.2.2 Засіб хаотичного виявлення слабких амплітуд.....	44
3 ВИЯВЛЕННЯ БІОЛОГІЧНИХ СИГНАЛІВ ХАОТИЧНИМИ ВИЯВНИКАМИ .....	47
3.1 Виявлення сигналів біологічної природи .....	47
3.1.1 Біологічні сигнали для виявлення .....	47
3.1.2 Обробка біологічних сигналів .....	48
3.1.3 Порядок обробки біомедичних сигналів .....	50
3.2 Біологічні сигнали та їх параметри .....	52
3.2.1 Сигнали серцево-судинної системи людини.....	52
3.2.2 Біологічні сигнали нейронів .....	55
3.3 Методи хаотичного виявлення біологічних сигналів .....	57
3.3.1 Виявлення полігармонічних сигналів.....	57

3.3.2	Хаотичний виявник із керованими біфуркаційними параметрами.....	59
4	ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ХАОТИЧНОГО ВІЯВНИКА.....	62
4.1	Характеристика середовища моделювання MatLab/Simulink.....	62
4.2	Конструювання моделей біологічних сигналів.....	63
4.2.1	Фільтрація хаотичних складових спектру.....	65
4.2.2	Проектування фільтру хаотичного виявника.....	68
4.3	Імітаційне моделювання полігармонічного виявника.....	72
4.3.1	Імітаційна модель полігармонічного виявника.....	72
4.3.2	Частотний ресурс хаотичного виявника.....	74
4.3.3	Результати хаотичного виявлення сигналів пульсової хвилі.....	77
	ВИСНОВКИ.....	80
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	82
	ДОДАТОК А.....	86
	ДОДАТОК Б.....	88
	ДОДАТОК В.....	91
	ДОДАТОК Г.....	93
	ДОДАТОК Д.....	100

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

- АЧХ – амплітудно-частотна характеристика (фільтру)  
БГШ – білий гаусівський шум  
ГДХ – генератор детермінованого хаосу  
КО – кореляційна обробка  
НДС – нелінійна динамічна система  
ООС – оптимальна обробка сигналів  
ОФ – оптимальний фільтр  
ПРР – періодичний режим роботи виявника  
ПС – періодичний сигнал  
ПХР – перехідний (критичний) режим роботи виявника  
СКВ – середньоквадратичне відхилення  
СПС – слабкий періодичний сигнал  
ФНЧ – фільтр низьких частот  
ФТР – фазова траєкторія  
ФПР – фазовий простір  
ХД – хаотичний дискримінатор (режимів генератора)  
ХВК – хаотичний виявник  
ХРР – хаотичний режим роботи виявника  
ШПЗ – шумоподібні завада  
SNR – відношення сигнал шум

## ВСТУП

Виявленням сигналів називають процес прийняття рішення про наявність або відсутність конкретного сигналу у вхідному потоці або суміші сигналів. Завдання виявлення сигналів в телекомунікації та радіотехніці вирішується під час оптимально прийому, під час встановлення певного критерію оптимальності (найкращості). Зазвичай критерієм оптимальності є максимізація відношення сигнал-завада (сигнал\шум), хоча можуть вживатися інші критерії, наприклад ймовірнісні критерій, що максимізують ймовірність правильного прийняття рішення, або мінімізують невірний результат [1-4].

Особливістю виявлення сигналів у телекомунікаціях та особливо радіотехніці, що на вхід оптимального приймача сигнали потрапляють відносно слабкі за енергетикою і енергетика (динамічний діапазон) вхідних кіл приймача значно перевищує динамічний діапазон потужностей вхідних сигналів. Це відбувається через ослаблення сигналів під час поширення в середовищі або за рахунок ефектів поглинання, або за рахунок ефектів охоплення все більших та більших ділянок простору[2].

Однак під час розгляду дії слабких сигналів слід пам'ятати, що одночасно із сигналом на вході приймача діють завади як природні так і штучні, що збільшують динамічний діапазон вхідних сигналів більш як на порядок, однак в переважній більшості випадків цей діапазон в сотні та тисячі разів менший за припустимий діапазон вхідних сигналів приймача. Тому слід вважати, що приймачі, в тому числі оптимальні приймачі, що призначено для роботи із слабкими сигналами (приймачі радіолокаторів) під час процесу прийому працюють в лінійному режимі[5-6].

Лінійний режим оптимальної роботи приймача за критерієм максимізації відношення сигнал-шум може бути реалізовано двома шляхами, через застосування на вході оптимального фільтру, або через кореляційний

прийом. Обидва вказаних шляхи теорією оптимальної обробки відносяться до лінійної обробки, або лінійної фільтрації[7-9].

Розроблено багато способів та методів оптимальної, а особливо квазіоптимальної обробки слабких сигналів, що враховують додаткові критерії прийому, такі як: мінімізація апаратних витрат, врахування існуючої елементної бази, врахування типу діючих завод або умов прийому, тощо, але головним чинником, що забезпечує ефективність цих методів це можливість отримання максимального відношення сигнал-завада.

Лінійні оптимальні фільтри можуть реалізовуватись за усіма параметрами прийнятого сигналу, найбільш поширеними із яких є часова, частотна та просторова оптимальна фільтрація. Комплексне вирішення завдання виявлення слабких сигналів в багато параметричній фільтрації одночасно за усіма параметрами неможливе, тому приходиться використовувати компромісні методи та способи оптимального прийому, які стали вже класичними[9].

Швидкий розвиток елементної бази та побудова адекватних моделей електронних компонент дозволила побудувати і реалізувати нові способи оптимального прийому через застосування нелінійної обробки. Теорія нелінійної обробки в таких умовах розвивається паралельно появі стабільних та точних компонент, в першу чергу[10-14].

Поява потужних комп'ютерів та прогресивних математичних методів вирішення нелінійних диференціальних рівнянь та систем рівнянь високого порядку в деяких випадках дозволили показати, що класичні методи оптимальної обробки сигналів не дозволяють досягати необхідних показників під час пошуку та вимірювання слабких сигналів і, таким чином, не забезпечують достатню чутливість приладів.

Вирішення проблем роботи із слабкими сигналами в деяких випадках можливо на базі застосування нелінійних принципів обробки під час взаємодії неавтономних систем. Сигналами в таких системах є сигнали

детермінованого хаосу (СДХ), а принцип обробки – фіксація різкого переходу між режимами роботи генераторів СДХ[15-20].

Основою застосування СДХ під час виявлення слабких сигналів є надвисока чутливість станів неавтономного генератора детермінованого хаосу (ГДХ) до змін його керуючого параметра, де нелінійна динамічна система (НДС) діє як чутливий елемент, що знаходиться у стані нестійкої рівноваги. Під дією чітко визначеного зовнішнього сигналу, який корельований із сигналом, що виявляється неавтономний хаотичний генератор потрапляє у стан різкого фазового переходу [15-17]. Залишається тільки зафіксувати цей перехід достатньо швидко, щоб узагальнені характеристики оптимального виявлення були краще, за класичні.

Основні принципи роботи нелінійних динамічних виявників послідовно висвітлено в [21-23], де за результатами моделювання адитивної суміші періодичного слабкого сигналу і білого гаусівського шуму (БГШ) на ГДХ що запропоновано Дуфінгом, із осцилографічною фіксацією режиму роботи ГДХ дослідники показали можливість виявлення слабких періодичних сигналів (СПС) в умовах відношення сигнал-шум (СШ) менш як -70дБ.

Натепер, ще чітко не доведена комплексна ефективність побудови нелінійних динамічних виявників слабких сигналів, але за окремими параметрами, такими, як чутливість до слабких періодичних сигналів за результатами імітаційного моделювання хаотичні виявники значно покращують результати, що можливо отримати класичними методами обробки[24-29].

Слід зазначити, що практична реалізація нелінійного виявника набагато більш простіша за побудову оптимального лінійного фільтра за класичними методами, крім того нелінійна схема може одночасно виконувати спряжені функції, які в класичному пристрої зазвичай виконуються окремо, наприклад, забезпечення прихованості дії та захисту від несанкціонованого доступу. Але всі ці переваги спряжені із рядом труднощів конструкторсько-технологічного

характеру, що поступово вирішуються через застосування швидкісних сигнальних процесорів із високою розрядністю та покращенням технологічних процесів виготовлення в першу чергу мікросхем.

Таким чином, завдяки широкому спектру питань, щодо визначення слабких періодичних сигналів, на фоні потужних завад, для практичних застосувань в телекомунікаційній і інших галузях проблематику побудови нелінійних хаотичних виявників слабких періодичних сигналів слід вважати актуальним завданням.

**Метою роботи:** вдосконалення методів побудови та принципів обробки під час виявлення сигналів за допомогою генераторів детермінованого хаосу.

Для досягнення вказаної мети в слід розв'язати наступні **завдання:**

1. Провести критичний оптимального виявлення сигналів в умовах завад різної природи, окремо розглянути підходи та методики виявлення слабких сигналів на базі статистичних критеріїв та енергетичних виявників.

2. Провести аналіз можливостей застосування нелінійних способів обробки для вирішення завдань виявлення слабких сигналів.

3. Розробити метод виявлення слабких сигналів на основі нелінійних способів обробки для завдань обробки біомедичних сигналів людського організму. Запропонувати можливі удосконалення та модифікації хаотичного виявника.

4. Розробити структуру засобу хаотичного виявника та імітаційну модель виявлення на основі застосування критичних режимі роботи нелінійної динамічної системи. Провести імітаційне моделювання для підтвердження адекватності прийнятих рішень.

**Об'єктом дослідження** є процеси виявлення слабких сигналів на тлі потужних завад.

**Предметом дослідження** є неавтономні нелінійні виявники слабких періодичних сигналів біологічної природи.

**Наукова новизна** одержаних результатів:

1. Запропоновано метод виявлення слабких періодичних сигналів біологічної природи, що полягає у застосуванні різких переходів між основними модами нелінійної динамічної системи та фіксації цього факту за допомогою виявлення збільшення аперттури атрактора енергетичним шляхом, що дозволяє виявляти слабкі біологічні сигнали на рівні флуктуаційних завад до -35дБ за допомогою простих схемних рішень .

2. Запропоновано удосконалення методу виявлення слабких періодичних сигналів біологічної природи, що полягає у застосуванні декількох хаотичних виявників із керованими параметрами нелінійної динамічної системи, що дозволяє проводити нелінійну фільтрацію спектральних складових біологічних сигналів із метою виявлення та діагностики патологій спектральним методом в умовах потужних флуктуаційних завад.

***Практичне значення*** одержаних результатів:

1. Встановлено, що найбільш перспективним способом застосування НДС для виявлення слабких сигналів є застосування неавтономних систем, що мають різкий характер переходу між хаотичним та періодичним режимом роботи, що характеризується різкою зміною в енергетичних показниках сигналу, що генерується.

2. Встановлено, що засіб хаотичного виявлення слабких сигналів має три принципових елементи: систему введення слабого сигналу в неавтономну НДС, НДС та дискримінатор субгармонік. Така структура характеризується схемотехнічною простотою та забезпечує виявлення сигналів під рівнем шуму від -40 дБ і менше.

3. Проведено дослідження структури, форми та спектру сигналів біологічної природи: пульсової хвилі та нейросигналів, показано яким чином спектральні дослідження на базі хаотичних виявників дозволяють виявляти патології в організмі людини.

4. Запропонована імітаційна модель хаотичного виявника та методики генерації моделей вхідних полігармонічних біологічних сигналів в

середовищі Matlab\Simulink. Розроблена методика досліджень на основі критерію повної енергетики процесу, проведені імітаційні моделювання, що підтвердили працездатність запропонованих методів на базі застосування НДС Дафінга та системи фільтрації субгармонік.

*Апробація результатів досліджень.* Результати, та технічні ідеї щодо проведених досліджень обговорювались на науково-практичній конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН2021», яка відбулась у м. Хмельницький (ХНУ), 15-16 жовтня 2021р. Участь у конференції підтверджено сертифікатом (див. додаток Д) та статтею у збірнику.

# 1 КЛАСИЧНІ МЕТОДИ ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ

## 1.1 Оптимальне виявлення сигналів

### 1.1.1 Поняття виявлення

Галузь телекомунікації та радіотехніка активно взаємодіє із інфокомунікаційними системами, призначеними для передачі, вилучення або знищення інформації в інтересах кінцевих споживачів з використанням радіосигналів як носіїв інформації. Відмінною особливістю умов функціонування саме радіоелектронних систем телекомунікацій є наявність радіоканалу, під яким розуміють сукупність передавачів радіосигналу, середовища його поширення та приймачів[4].

Основна вимога до радіо телекомунікаційних систем - це достовірне і своєчасне отримання необхідної інформації споживачем. Однак достовірному прийому і вилученню інформації заважають реальні фізичні властивості приймально-передавальних пристроїв та середовища поширення радіосигналів.

Універсальна суть фізичних властивостей впливів на радіоканал полягає, по-перше, в випадкових змінах параметрів апаратури, а, по-друге, у появі завад, що також мають випадкову природу. Наприклад, під час поширення радіосигналів через турбулентну атмосферу і іоносферу, які мають випадкові коефіцієнти поглинання і заломлення, відбувається випадкова паразитна модуляція радіосигналу по амплітуді, частоті і фазі [6].

Зовнішні природні завади генеруються різними електромагнітними процесами, що відбуваються в атмосфері, іоносфері і космічному просторі, які теж мають випадковий характер. У приймальних пристроях виникають випадкові процеси (шуми), обумовлені тепловим рухом атомів, електронів, тощо.

Отже, завдання виявлення інформації вирішується в умовах спотворень радіосигналів, що завжди мають випадковий характер. Очевидно, що такі спотворення зменшують достовірність доставки інформації, і тому треба вживати усіх можливих заходів щодо ослаблення впливу цих факторів, тобто, по суті, вирішувати завдання оптимізації відносно впливу завад. Є два напрямки вирішення завдання виявлення, якщо спочатку визначити всі параметри та характеристики сигналу та завади, то можливо вважати їх детермінованими процесами, а далі застосовувати традиційний математичний апарат, щоб прийняти рішення про обробку. Другий шлях – вважати все випадковим, і розглядати з точки зору опосереднення результатів різними методами[5].

Математичним апаратом роботи з моделями, що дозволяє оперувати випадковими величинами і випадковими процесами є теорія ймовірностей та математична статистика. На можливість і доцільність ефективного застосування статистичних методів в радіотехніці першими вказали російський вчений А.Н. Колмогоров (1939) і американець Н. Вінер (1942) в своїх роботах , що описали можливість синтезу оптимальних лінійних фільтрів для сигналів заданої форми [9].

Найбільш фундаментальною роботою, що була присвячена систематичному застосування методів математичної статистики в задачах радіокомунікацій є теорія В.А. Котельникова щодо потенційної завадостійкості. За минулі після цього більш ніж 70 років статистичні методи обробки сигналів настільки тісно увійшли в теорію обробки сигналів, що жодна нова технологія телекомунікацій не починається без детального розгляду функціонування проектованої системи телекомунікацій в умовах впливу випадкових процесів різної природи, параметрів та характеристик, що необхідні для синтезу структури обробки окремих пристроїв і систем статистичними методами.

Всі найбільш досконалі системи телекомунікацій із радіосигналами, такі, наприклад, як системи стільникового зв'язку, супутникової глобальної

радіонавігації, супутникового телемовлення, радіолокатори дистанційного зондування Землі, Сонця, та інших мешканців Сонячної системи, базуються на висновках, що отримано в теорії зв'язку на основі статистичної обробки сигналів.

### 1.1.2 Різновиди оптимальної обробки

Особливість радіоприйому полягає в тому, що поряд з корисними сигналами через антену до приймача надходять різноманітні завади. Завади спотворюють сигнал і перешкоджають отриманню користувачем достовірної інформації. Здатність телекомунікаційної системи зберігати свої функції незмінними або змінюються в заданому діапазоні під час дії завад називають завадостійкістю[6,7].

Кількісно завадостійкість оцінюється за допомогою групи параметрів і показників, які використовують статистичні характеристики завад та сигналів. Наприклад, часто застосовуються такі параметри, як відношення сигнал/шум на вході і виході деякого блоку або приймача загалом, ймовірність правильного виявлення сигналу, середньоквадратичне відхилення помилки вимірювання певного параметра сигналу, тощо.

Конкретний показник завадостійкості вибирається із зручності рішення завдання оптимальної обробки за певних умов та обставин. В теорії оптимальної обробки, як і в більшості технічних завдань різнять завдання аналізу та завдання синтезу. Або пряма та обернена задачі.

Процес аналізу присвячений отриманню чисельних значень показників завадостійкості існуючих і вперше розроблених телекомунікаційних систем[3]. В цьому випадку, створюють адекватну модель, де вважають відомими статистичні розподіли усіх сигналів та завад (рис.1.1) на вході і визначають імовірнісні характеристики після процесу обробки в приймачі. Надалі за показниками ймовірності визначають і показники завадостійкості.



У науково-технічній літературі завдання оптимального радіоприйому поділяють на чотири частинні завдання:

1. Виявлення сигналу та тлі завад.
2. Розділення двох або декількох сигналів (рис.1.2).
3. Оцінювання параметрів сигналу спотворених завадами.
4. Фільтрації сигналу або повідомлень в каналі зв'язку.

Кількісним чином такі завдання можна описати наступним чином [3, 5, 9]. Під час виявлення сигналу слід найкращим чином за заданим критерієм на підставі спостереження процесу на вході приймача відповісти на одне просте запитання; «Чи містить вхідний процес сигнал у суміші сигнал-завада, або діє тільки завада?».

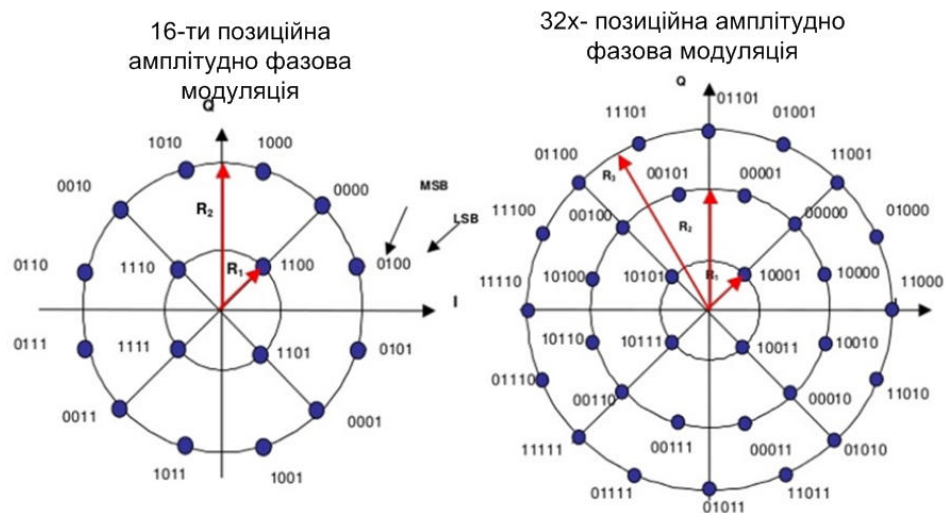


Рисунок 1.2 – Задача розділення сигналів під час передачі цифрових повідомлень амплітудно-фазовою дискретною модуляцією

Під час розділення сигналів спостережуваний процес на вході може разом із завадою містити один з двох взаємно виключних сигналів, але який саме сигнал діє - невідомо. Надалі також потрібно за заданим критерієм найкращим чином відповісти на питання: «Який саме сигнал разом з завадою присутній в спостережуваному процесі, перший чи другий?». Подібним чином задачу можливо поширити і на більшу кількість сигналів (рис.1.2)

У задачі вимірювання та оцінювання параметрів сигналу вважається, що у вхідному спостережуваному процесі разом із завадою існує деякий корисний сигнал із одним або більше невідомими параметрами. Необхідно потрібно оптимальним чином за заданим критерієм оцінити всі невідомі параметри, зробивши припущення про довірчий інтервал їх значень і це є базовим завданням метрології фізичних величин (рис.1.3) [24].

З останнім завданням тісно корелюється завдання розрізнення сигналів, коли вважається, що разом із завадою у вхідному процесі можуть існувати або один або більше сигналів, невідомі параметри яких близькі за значеннями між собою. Однак скільки цих сигналів - один або два - заздалегідь невідомо. В цьому випадку потрібно, збільшуючи рівень відмінності сигналів за значеннями однойменних параметрів, визначити той найменший розбіг параметрів, за умови якого ми можемо визначити кількість сигналів на вході.

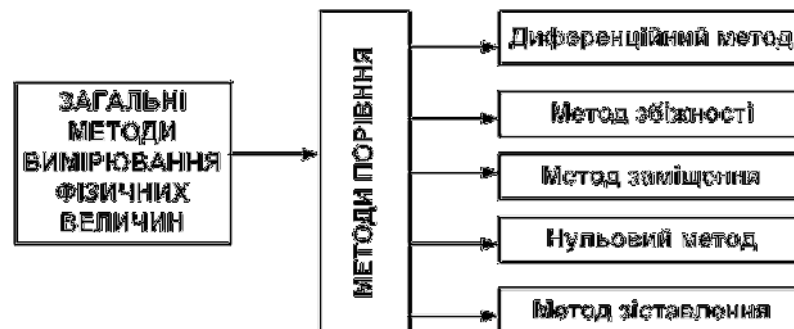


Рисунок 1.3 – Методи вимірювання фізичних величин

Під час вирішення завдань оптимальної фільтрації вважається, що в спостережуваному процесі діє сигнал разом із завадою, у якого деякий параметр змінюється у часі випадковим чином, наприклад, під час модуляції [9]. В цьому випадку необхідно в кожен момент часу дати оптимальну оцінку значень параметру, що змінюється за заданим критерієм оптимальності. Відмінність від завдань оцінювання параметра сигналу для цієї задачі фільтрації полягає в тому, що один або декілька параметрів сигналу є випадковою функцією, в той час як в попередній задачі параметр сигналу є випадкова величина, але постійна на інтервалі спостереження.

## 1.2 Енергетичні методи та критерії оптимальної обробки

### 1.2.1 Обробка слабких сигналів за допомогою накопичування

Метод накопичування використовується для збільшення відношення сигнал шум для повністю або частково відомих (детермінованих) сигналів і флюктуаційних завод. Суть методу полягає у тому, що за певний час в пристрої обробки окремі складові сигналу об'єднуються синхронно, а флюктуаційні складові заводи в середньому через свою випадковість[2-9].

Метод накопичування являє собою узагальнений випадок узгодженої фільтрації, під час якого забезпечується максимізація потужностей корисного сигналу і флюктуаційної заводи, в ідеальному випадку білого шуму.

Незалежно від типу та форми корисного сигналу метод накопичення реалізується за допомогою об'єднуючого пристрою: суматора або інтегратора, що називають накопичувачем. Глибинна суть методу накопичення під час застосування суматора полягає в тому, що за заданий час накопичування  $T_n$  в суміші напруги  $U_{ex}(t)$  сигналу і заводи фіксується і запам'ятовується заздалегідь встановлена кількість відліків. Вибірки додаються і в точці відліку наприкінці процедури підсумовування вхідні значення  $U_{vx}(t)$ . Надалі на підставі отриманого сумарного сигналу пороговий пристрій із певним порогом спрацьовування формує відповідь про наявність або відсутність сигналу.

Якщо накопичувач-суматор реагує на  $n$  вибірок, то вихідний сигнал  $U_{вих}(t)$  суматора складає:

$$U_{вих}(t) = \sum_{i=1}^n [U_c + U_i] = nU_c + \sum_{i=1}^n U_i \quad (1.1)$$

де  $U_c$  - значення сигналу для різних моментів часу у вибірках.

$U_i$  - значення завади для різних моментів часу, де обрані вибірки вхідного сигналу.

Якщо накопичувач неперервний, то він реалізується як інтегратор і значення на виході на момент закінчення інтегрування становить:

$$U_{вих}(t) = \frac{1}{T_n} \int_0^{T_n} U_{вх}(t) dt . \quad (1.2)$$

Якщо завада має флуктуаційну складову шуму то випадкові величини на вході суматор  $U_1, U_2, \dots, U_n$  взаємно не корелюються, то за умови нульового математичного сподівання функції  $U_i(t)$  дисперсія завади зростає у  $n$  разів

$$\sigma_U^2 = n\sigma_{U_n}^2 , \quad (1.3)$$

де  $\sigma_{U_n}^2$  - дисперсія випадкової функції  $U(t)$ .

Для детермінованої складової вхідного сигналу суматора значення квадрата амплітуди буде визначати потужність або енергію що накопичувалась під час підсумовування, а відношення її до дисперсії вихідного шуму і складатиме відношення сигнал-шум , що отримаємо наприкінці підсумовування:

$$q_n = \frac{n^2 U_c^2}{n \sigma_{U_n}^2} = n \frac{U_c^2}{\sigma_{U_n}^2} = n q_{вх} \quad (1.4)$$

За (1.4) отримуємо збільшення відношення сигнал завада за потужностями в  $n$  разів на виході накопичувача відносно його входу.

Аналогічна ситуація буде якщо замість суматора буде використовуватись інтегратор. Інтегратор і суматор є лінійними пристроями

і розгляд проходження сигналу і шуму можливо розглядати окремо, що призведе до результату, аналогічного з (1.4).

Таким чином збільшення відношення сигнал-завада під час застосування методу накопичування для обробки детермінованих сигналів на тлі флуктуаційних завад завжди можливо досягти збільшенням обробки сигналу в накопичувачі, що особливо важливо для виявлення слабких періодичних сигналів, для яких цей метод часто і використовується.

### 1.2.2 Статистичні критерії оптимального виявлення слабких сигналів

Під час розв'язання завдань виявлення слабких сигналів, застосування критерію отримання максимального значення відношення сигнал - завада, не є з математичної точки зору коректним через опосереднені параметрів енергії та потужності сигналу та шуму відповідно, де втрачена інформація про статистичні властивості характеру розподілу обох процесів: корисного – сигналу і несприятливого – завади.

Отже, виникає потреба використовувати більш розширені та глибокі статистичні властивості випадкових процесів, які дають можливість отримати кількісні значення достовірності виявлення слабких сигналів на фоні завад різного роду[5,9].

Будь які реальні завади, що взаємодіють із сигналом завжди мають суттєву випадкову складову і повне пригнічення таких завад під час прийому технічними засобами принципово неможливо тобто неможливо реалізувати їх повне усунення їх негативного впливу. Навіть використання узгоджених до сигналу лінійних фільтрів, які обраховують максимум енергії сигналу не вирішує питання боротьби із випадковістю в завадах: лінійний фільтр змінює параметри випадкових завадових процесів, але залишає незмінним саму «випадковість».

Таким чином, оптимальною фільтрацією або кореляційною обробкою можливо знизити ймовірність помилок тільки до певного ненульового рівня. [5]. Для розуміння статистичної теорії виявлення надалі розглянемо класичну задачу виявлення слабких сигналів за умови дії флуктуаційних завад для найпростішого випадку – адитивних завад, при чому сигнал та завади випадкові процеси із деяким законом розподілу. Вплив адитивних завад реалізується в великій кількості випадків, наприклад, для спотворення радіосигналів системними завадами, для аналізу дії теплових шумів, тощо.

Під час дії адитивних завад на вхід виявника слабких сигналів надходить доданок, що представимо в наступному вигляді:

$$U(t) = V(t) + \zeta(t). \quad (1.5)$$

На вхід деякого виявника може приходити або тільки сигнал разом із завадою  $U(t)$  або тільки завада -  $\zeta(t)$ , що відповідає двом різним випадковим подіям: наявності або відсутності сигналу (рис.1.4). Виявник має вирішити, чи був сигнал у вхідній адитивній суміші і для , в найпростішому випадку, він має порівняти вхідний сигнал із порогом, який позначимо –  $E$ .

Якщо слабкий у вхідній суміші присутній, то  $U(t) > E$ , тобто значення суміші перевищує  $E$ , і навпаки, сигнал відсутній для  $U(t) < E$ . Але в суміші може бути або не бути вхідний сигнал, звідки виявник, особливо для слабких сигналів може генерувати помилкову відповідь. Помилка може статись для двох несумісних між собою випадків[5]:

1) Якщо сигнал у вхідній суміші відсутній ( $V(t)=0$ ), але рівень завади перевищує пороговий рівень  $E$ . Таку подію, що позначимо умовно «А», називають подією хибної тривоги.

2) Буває так, коли слабкий сигнал у суміші наявний, але значення доданку  $U(t)$  є недостатнім для перетину порогу, в такому випадку реалізується подія «Б» - пропуск сигналу.

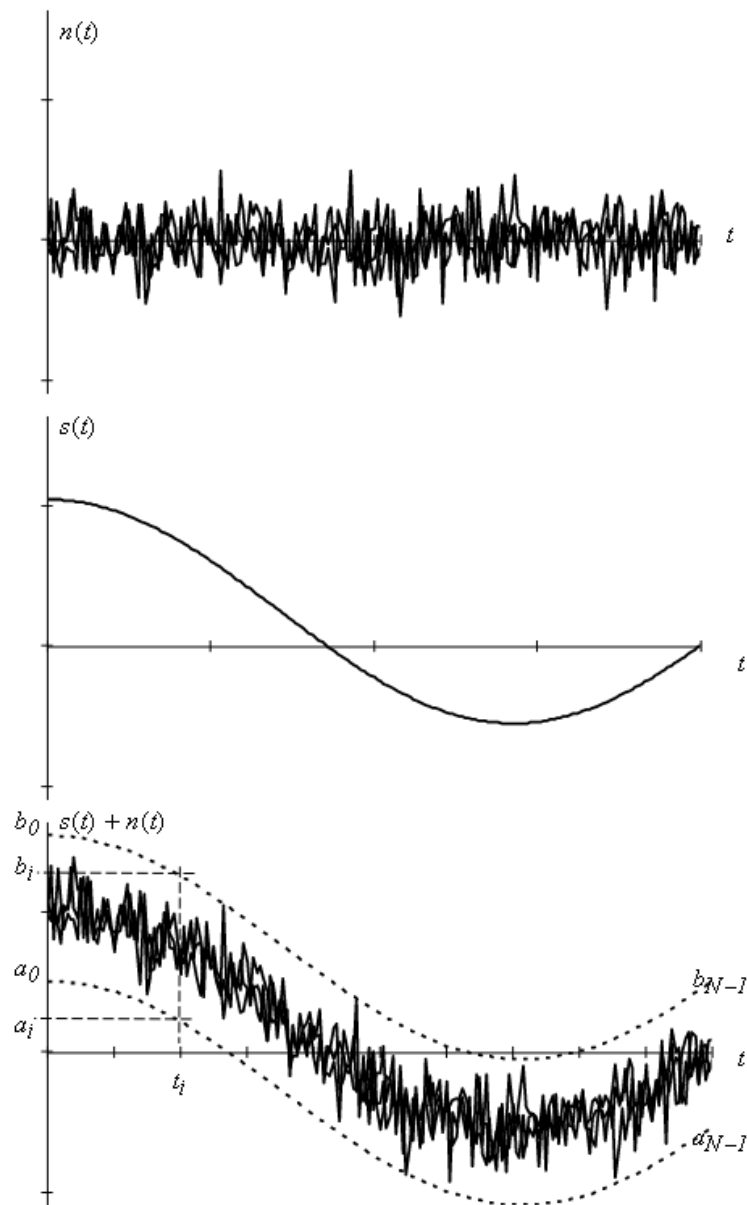


Рисунок 1.4 – Механізм адитивного впливу завади на сигнал

Якщо введено поняття події, то слід згадати поняття апіорності та апостеріорності, що надалі будуть застосовуватись для аналізу ймовірностей як чисельних значень характеристики виявлення. Апіорність – це визначення деяких параметрів та характеристик до події, або до передавання повідомлення, або до появи сигналу, тощо. Апостеріорність, теж саме але після деякої події, після повідомлення, після передачі сигналу, тощо.

Таким чином, ймовірність хибної тривоги (в нашому випадку подія А), складається із ймовірності сполучення двох подій – події відсутності сигналу та події можливості перевищення порогового рівня шумом на приймальному

кінці каналу зв'язку. Або вказана ймовірність дорівнює добутку апіорної ймовірності відсутності сигналу на вході і апостеріорної ймовірності перетинання рівня  $E$  завадою під час відсутності сигналу.

Апіорною ймовірністю[9] відсутності сигналу ( $q$ ) задаються під час роботи кодека передавача, що для цього і призначений, а другу апостеріорну складову добутку просто отримати якщо відома густина розподілу значень завади як випадкового процесу  $W(\zeta)$ :

$$P[U > E] = \int_E^{\infty} W(\zeta) d\zeta, \text{ то } P(A) = q \int_E^{\infty} W(\zeta) d\zeta \quad (1.6)$$

Таким чином можливо визначити за (1.6) ймовірність хибної тривоги, що вже є чисельним показником роботи виявника, в тому числі виявника слабких сигналів.

В події Б необхідно врахувати факт суміщення двох незалежних подій: рівень діючого сигналу на вході разом із рівнем завади не перевищує поріг і власне наявність сигналу на вході. В результаті суміщення ймовірність пропуску сигналу обраховується як добуток апіорної ймовірності присутності сигналу та апостеріорної ймовірності неперевикнення порогового рівня  $E$  за умови вже наявності сигналу в суміші.

Через те, що наявність або відсутність сигналу це взаємодоповнюючі події, апіорна ймовірність наявності сигналу на вході виявника складає:

$$p = 1 - q. \quad (1.7)$$

Для отримання апостеріорної ймовірності дії адитивної суміші сигналу та шуму необхідно знати густину розподілу такої суміші  $W(\zeta, V)$  і в такому випадку отримаємо пошукувань рішення:

$$P[U \leq E] = \int_{-\infty}^E W_1(\zeta, V) d\zeta, \text{ то } P(B) = p \int_E^{\infty} W_1(\zeta, V) d\zeta. \quad (1.8)$$

Події  $A$  і  $B$  не можуть реалізовуватись одночасно, виникає або тільки перша, або тільки друга, звідки ймовірність помилок ( $A$  чи  $B$ ) дорівнює сумі ймовірностей кожної із подій окремо:

$$\begin{aligned} P(A \text{ або } B) &= P(A) + P(B) = q \int_E^{\infty} W(\zeta) d\zeta + p \int_E^{\infty} W_1(\zeta, V) d\zeta = \\ &= 1 - \left\{ p \int_E^{\infty} W_1(\zeta, V) d\zeta + q \int_{-\infty}^E W(\zeta) d\zeta \right\}. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Події правильного та неправильного виявлення складуть повну групу подій і ймовірність, що слабкий сигнал буде правильно виявлено або правильно пропущено становить:

$$P_0(E, V) = 1 - P(A \text{ або } B) = p \int_E^{\infty} W_1(\zeta, V) d\zeta + q \int_{-\infty}^E W(\zeta) d\zeta. \quad (1.10)$$

Крім попереднього аналізу статистичних функцій розподілу для виявлення особливо слабких сигналів слід визначитись із вибором порогу, який і задає всі вищезгадані у виразах ймовірності. Із (1.8-1.10) очевидно, що в глобальному сенсі якщо вибрати високе значення порогу, то ймовірність події «А» ( $P(A)$ ) буде набувати малих значень і це є позитивним моментом, але ймовірність події «Б» буде зростати і це є для виявлення негативним аспектом.

Схожа до вищезначеної ситуації буде реалізовуватись ситуація за умови низького значення порогу  $E$ , в цьому випадку мінімізуватись буде ймовірність пропуску сигналу, але ймовірність помилкової тривоги буде

зростати. Звідки під час виявлення можливо зробити висновок, що кількісні співвідношення залежать від конкретного завдання виявлення конкретного сигналу і в різних галузях радіотехніки реалізуються у вигляді різних критеріїв оптимального виявлення.

В переважній більшості випадків для завдань телекомунікації та радіотехніки ставиться завдання пошуку такого оптимального значення порогу [2,6,7], для якого сукупна ймовірність правильного прийняття рішення (1.9), за умови наперед відомих функцій густини розподілу сигналу і завади та просто завади є максимальною. Це зводиться до визначення максимуму функції, де аргумент є порогом –  $E$ .

Для визначення максимуму обчислюють похідну виразу (1.10) за аргументом  $E$  і прирівнюють її до нуля. В результаті рівняння для визначення найбільш придатного значення порогу наступне:

$$\frac{dP(E)}{dE} = 0; \text{ звідки } qW(E) = pW_1(E, V). \quad (1.11)$$

Рівняння (1.11) дає деякий статистичний критерій, виконання якого забезпечує максимізацію ймовірності правильної відповіді що, називається критерієм «ідеального спостерігача». Такий критерій є універсальним і в даному випадку рівень визначається функціями густини розподілу, що мають бути відомі наперед. Якщо функції невідомі, то і критерій можливо встановити лише із певним рівнем ймовірності.

Найпростіше рішення для встановлення порогу можливо отримати якщо розглянути сигнал у вигляді прямокутного імпульсу заданої амплітуди. Такі сигнали застосовуються в цифровому зв'язку або для забезпечення передачі телеграфних повідомлень струмовими посиланнями. Також слід визначитись із різновидом завади. Припустимо, що в каналі зв'язку діють лише шумові завади у вигляді теплового шуму, який досить точно можливо

промоделювати через застосування гаусівського (нормального) закону розподілу, з дисперсією  $D = \sigma^2$ .

Для умов прямокутного імпульсу[1,2] наявність або відсутність сигналу на вході виявника відіб'ється тільки на середньому значенні адитивної суміші і в густині розподілу зміниться лише значення аргументу експоненти, а сам закон під дією сигналу в суміші не зміниться, отже обидві густини розподілу в аналітичному вигляді набудатимуть виразів:

$$W(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\left(-\frac{U^2}{2\sigma^2}\right)}; W(U,V) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\left(-\frac{(U-V)^2}{2\sigma^2}\right)}. \quad (1.12)$$

Для ілюстрації процесу зміни масштабів функцій густини розподілу через зміну параметрів розподілу побудуємо діаграми (рис.1.12). Найбільш оптимальне значення порогу визначається точкою перетину графіка густини розподілу шумової завади із графіком сумісної густини розподілу сигналу та шуму із урахуванням діючих масштабних коефіцієнтів ймовірностей появи сигналу:  $p$  та  $q$ .

Аналізуючи рис. 1.5 можна зробити висновок, що за умови потужного сигналу значення порогового рівня має обиратися високим, і за умови слабого сигналу рівень має наближатися до середньоквадратичного значення або діючого значення шумової напруги.

Якщо в телекомунікаційних системах передбачено правильне кодування сигналів логічних рівнів таким чином, що вони з'являються із одноковою ймовірністю, що дорівнює 0,5 через застосування ефективного кодування або примусового балансування логічних рівнів, що трапляється майже завжди, то під час передачі із активною паузою рівноймовірні як наявність, так і відсутність сигналу  $p=q=1/2$ , то і величина порогу становитиме половину значення від рівня діючого сталого сигналу  $E = V/2$ .

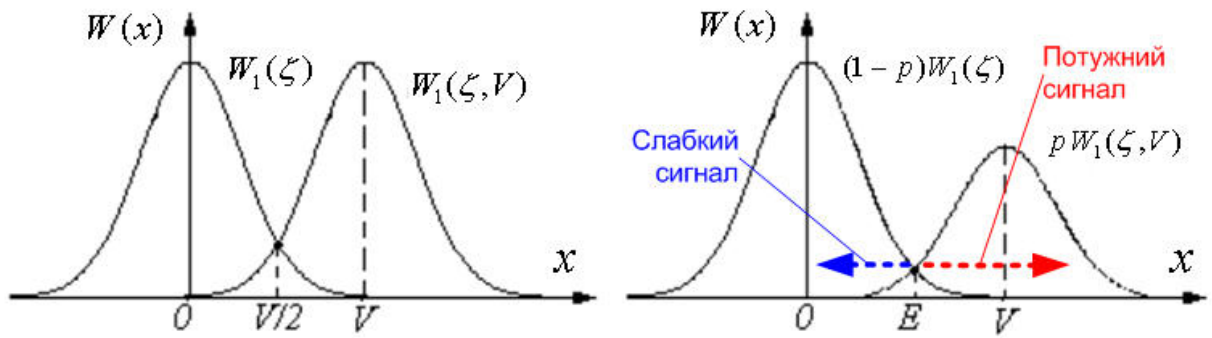


Рисунок 1.5- Густини розподілу завади та суміші завади та сигналу (ліворуч) та напрямок зміни оптимального порогу виявника під час дії слабких та потужних сигналів (праворуч)

В такому випадку рівень порогу оптимальним чином і для ймовірностей подій  $A$  та  $B$  на основі (1.1) і (1.1), отримаємо:

$$P_{XT} = q \left[ 1 - \Phi \left( \frac{E}{\sigma} \right) \right]; \quad P_{PB} = p \left[ 1 - \Phi \left( \frac{U - E}{\sigma} \right) \right], \quad (1.13)$$

де,

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx,$$

функція Крампа або інтеграл ймовірності для математичного сподівання, що дорівнює нулю та дисперсією, що дорівнює 1.

Якщо більш зручно застосовувати для практичної мети не ймовірність пропуску сигналу, а ймовірність його правильного виявлення ( $D$ ) за умови перевищення рівня порогу  $E$ ., то аналітичний вираз виглядатиме як:

$$D = 1 - P_{PB} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \Phi \left( \frac{U - E}{\sigma} \right) \right], \text{ під час } p = q = \frac{1}{2}. \quad (1.14)$$

Крім критерію ідеального спостерігача, що природно властивий цифровим телекомунікаційним системам, у системах вилучення інформації (радіолокації, радіонавігації) користуються дещо іншим критерієм - Неймана-Пірсона. Застосування цього критерію пов'язано із введенням функції наслідків щодо ймовірностей хибної тривоги та помилкового виявлення, наприклад, під час радіолокаційних спостережень ймовірність хибного виявлення цілі має бути дуже малою, завдяки тому, що воно має значні наслідки негативного характеру. Зрозуміло, що отримання малих значень хибного виявлення автоматично зменшує ймовірність правильного виявлення сигналу -  $D$ .

Отже, за критерієм Неймана-Пірсона ймовірність хибної тривоги фіксується наперед, а значить і поріг виявлення  $E$  виявляється вже заданим. Під час реалізації виявників за цим критерієм намагаються одночасно дотриматись двох умов[2,5]:

1. Забезпечити ймовірність  $P(B)$  пропуску сигналу таку, щоб її значення не перевищувало деякої величини;
2. Забезпечити щоб ймовірність хибної тривоги не перевищувала задану.

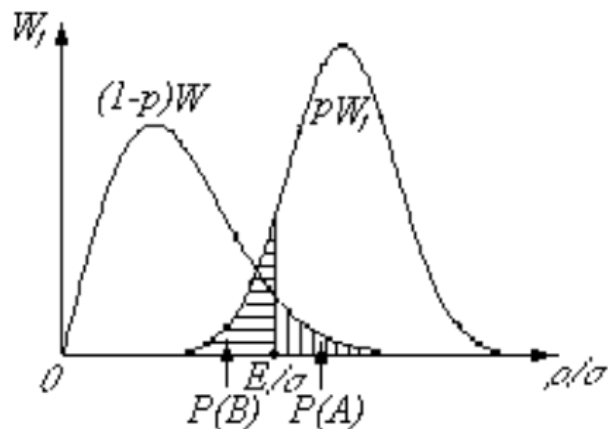


Рисунок 1.6 – Графічне представлення ймовірностей як площ під кривими густин розподілу завади і суміші сигналу із завадою де аргумент нормованого значення рівня сигналу та завади

Вертикальна пряма (рис.1.6), відновлена із точки встановленого відносного порогу ( $E/\sigma$ ), спільно з графіками густин розподілу обмежує площі, що чисельно дорівнюють ймовірностям  $P(A)$  і  $P(B)$  і показані штриховкою. Це дозволяє наглядно якісно проаналізувати різні ситуації під час виявлення за різними критеріями.

Так під час збільшення відношення сигнал/шум графік густини сумісного розподілу густини сигналу та завади буде зміщуватися праворуч по вісі абсцис і для збереження наперед заданої величини ймовірності пропуску сигналу слід збільшити значення відносного порогу  $E/\sigma$ . За таких умов площа, що чисельно дорівнює ймовірності хибної тривоги зменшиться.

Справедливий є і зворотний варіант під час зменшення відношення сигнал-шум. Отже, єдиною можливістю покращення ймовірності правильного виявлення залишається збільшення відношення сигнал/шум в момент роботи оптимального виявника, тобто за допомогою будь-якої обробки, що покращує це відношення[9].

Таким чином чим більше наперед ми знаємо про сигнал, завади та особливості застосування для конкретних випадків, тим із більшою надійністю за класичними методами ми можемо говорити про його виявлення.

## 2 ХАОТИЧНІ ВИЯВНИКИ ПЕРІОДИЧНИХ СИГНАЛІВ

### 2.1 Некласичні методи обробки сигналів

#### 2.1.1 Прогресивні методи оптимального виявлення

Після появи наукових праць Н.Вінера що до виявлення сигналів на тлі шумів більшість фахівців вважали найкращим методом обробки слабких сигналів на тлі БГШ кореляційну обробку. Так обробка зводиться до встановлення статистичних характеристик оброблювальної суміші та правильного вибору порогу прийняття рішення [5,9].

Максимізація SNR під час класичної обробки на тлі БГШ лінійними методами (рис.2.1) реалізується або кореляторами, що складаються із перемножувача та інтегратора або узгодженими фільтрами. Пристрої, що реалізують такі варіанти обробки переважно працюють або із поодинокими сигналами фіксованої форми, або із пачками сигналів однакової форми обвідної (рис.2.1).

Рівень технічної реалізації класичної лінійної оптимальної обробки набув настільки високого рівня реалізації, що в інтегральному виконанні та під час цифрової обробки вдається реалізувати трансверсальний фільтр для більшості із типових використовуваних сигналів: радіоімпульсів, блоків телекомунікаційних даних, вимірювальних сигналів, тощо [2,3].

Але пошук побудови нових способів виявлення продовжується і вже в цьому тисячоріччі виділено додатково декілька напрямків, що суперечать фундаментальним енергетичним обмеженням теорії Вінера [9]:

1. Нейромережева обробка [10-12], що полягає у застосуванні штучних програмних або апаратних нейронних мереж, попередньо навчених виявляти заданий тип сигналу на тлі заданого типу завад. Так обробка характеризується складністю попереднього налаштування та тривалістю

навчання нейронної мережі, але надалі дозволяє швидко отримувати результати високого ступеня достовірності.

2. Стохастичний резонанс [14]– підсилення деякого періодичного сигналу під дією білого гаусівського шуму певної потужності. Хоча відкрите явище у 1981р., але воно є універсальним, що властиве багатьом НДС, що знаходяться під сукупним зовнішнім впливом сигналів детермінованого хаосу та деякого слабкого періодичного впливу.

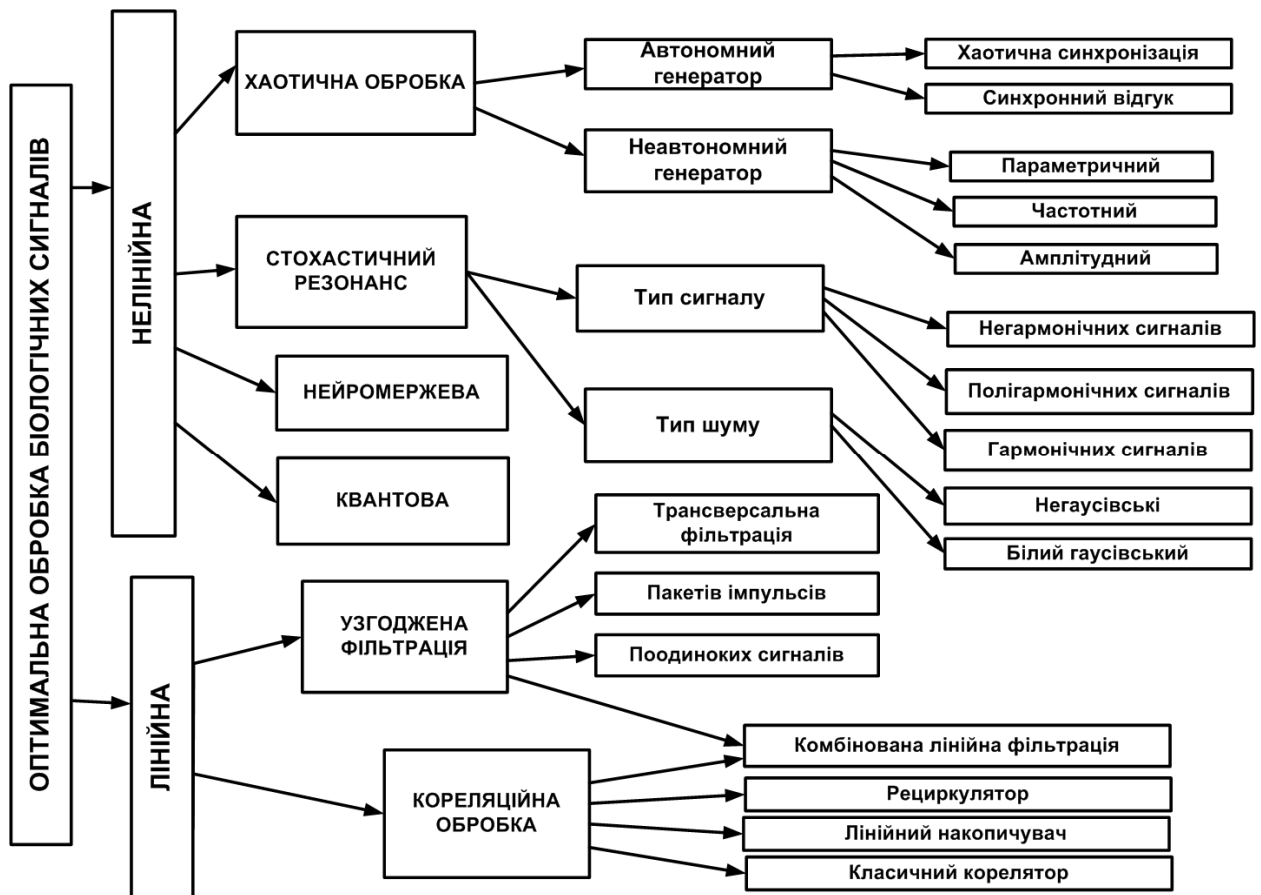


Рисунок 2.1 – Класифікація способів виявлення слабких сигналів

3. Квантова обробка [11] поєднує фізичний і інформаційний погляд на процеси, які відбуваються в цифрових каналах передачі інформації, якщо для носія інформації суттєвими є відмінності квантових законів руху від класичних. Відмінностями квантових носіїв інформації є неможливість копіювання станів або клонування, що відкриває можливість створення систем передачі інформації повністю захищені від несанкціонованого

доступу. В аспекті виявлення сигналів для нас цікава можливість генерації інформації через властивості переплутаних квантових станів квантових носіїв.

4. Хаотична обробка[14], що останнім часом активно досліджується різноманітними авторами робіт та винахідниками. Хоча хаотична обробка близька до явища стохастичного резонансу, але має більше можливостей щодо побудови виявників на тлі надзвичайно низьких відношень сигнал-завада та застосовується на принципах, що властиві лише хаотичним системам: біфуркація; хаотичний синхронний відгук, хаотична синхронізація, дивний атрактор, тощо.

Щодо практичного втілення, то для побудови детекторів слабких біологічних сигналів, що пригнічуються зовнішніми завадами розумно застосувати хаотичну обробку, для якої можливо провести математичне моделювання підтвердження працездатності та використати велику кількість вже відпрацьованих моделей.

Узагальнена концепція роботи хаотичного виявника (ХВК) полягає у значній чутливості спеціально побудованих і налагоджених хаотичних систем до впливу слабких ПС. Для цього ХВК має перебувати в критичному стані, що характеризується можливістю зрушення в один із двох стійких станів за допомогою слабкої періодичної дії [23].

В хаотичній динаміці такі критичні стани відповідають параметрам ГХС та їх початковим даним, за умови яких фазовий портрет знаходиться на межі формування атракторів двох різних типів. Переважно це перехід від атрактора типу «тор» до «дивного атрактора». Хоча можливо і інші комбінації переходів. Такими НДС із хаотичною поведінкою та атракторами різних типів залежно від вибору параметра можуть виступати ГДХ Rucklidge, Лоренца, Реслера, Мураї- Лакамара – Чуа, Дуфінга, Ван-дер-Поля, тощо. [15-20].

Принцип роботи ХВК слабких сигналів [21-22] полягає у наступному (рис.2.1). Деяка нелінійна система обрана для ХВК має мати можливість

введення зовнішнього періодичного сигналу через можливість декомпозиції (розриву або додавання зовнішнього сигналу до внутрішніх зв'язків). Зовнішній сигнал може вводиться як адитивним так і нелінійним чином.

Без дії зовнішнього ПС вихідні коливання подібних ГДХ налаштовано таким чином, щоб у фазовій площині реалізовувався дивний атрактор в критичному стані. Це визначається як оператором еволюції, так і біфуркаційними параметрами та початковими умовами ініціалізації.

У випадку зовнішньої дії на таку НДС шуму хаотичний характер вихідного сигналу зберігається і форма атрактора залишається «дивною». Дія адитивної суміші навіть слабкого ПС із потужним шумом ініціює швидкий фазовий перехід (біфуркацію). В результаті генерується лавиноподібний фазовий перехід до простого атрактора із вихідним сигналом близьким до гармонічного.



Рисунок 2.2 – Узагальнена структура хаотичного виявлення періодичних сигналів

Виходячи із сказаного, узагальнена схема ХВК (рис.2.2) має генератор детермінованого хаосу (аналог перемножувача в класичному кореляторі), генератор опорного сигналу (аналог копії сигналу в класичному кореляторі), дискримінатор режиму роботи (аналог інтегратора в класичному кореляторі) із встановленим критерієм дискримінації режимів.

Отже в ХВК є два вагомих моменти, що надають перевагу над класичною обробкою: теоретична можливість виявлення ПС із надзвичайно малою амплітудою та сигналів різної форми; теоретично однакова реакція

НДС на дію шумових завад із різноманітними законами розподілу, але це потребує окремих досліджень.

### 2.1.2 Методи дискримінації хаотичних мод

Крім НДС до складу ХВК входить дискримінатор [1,7], основне завдання якого якомога швидше визначити тип атрактора, що характеризує поведінку системи під час зовнішнього впливу. На даний момент усі способи дискримінації режимів (рис.2.3) запропоновано поділити на:



Рисунок 2.3 – Класифікація способів дискримінації режимів роботи нелінійних динамічних систем

Візуальні, що потребує побудови фазового портрету та порівнянні із відомими фазовими портретами для даного хаотичного генератора.

Обчислювальні, що ґрунтуються на проведенні складаних обчислень на основі математичної моделі генератора.

Автоматичні, що найбільш придатні для практичного втілення, що використовують відомі класичні пристрої та алгоритми для обробки сигналів детермінованого хаосу.

Візуальні методи потребують або оператора, або системи розпізнавання образів в багатомірному просторі тому в ХВК не застосовуються.

Спосіб обчислення старшого показника Ляпунова [14] ґрунтується на факті, що для отримання «дивного атрактора» в НДС, старший показник Ляпунова має мати від'ємне значення (рис.2.4). Суть обчислень способу є визначення «рівня розбігання» між двома спільними ФТР на малих ділянках часу та опосередненні значень по аттрактору. Крім того важливо вибрати зону, де реалізується найбільш різкий перехід між режимами через зміну біфуркаційного параметру (рис.2.4).

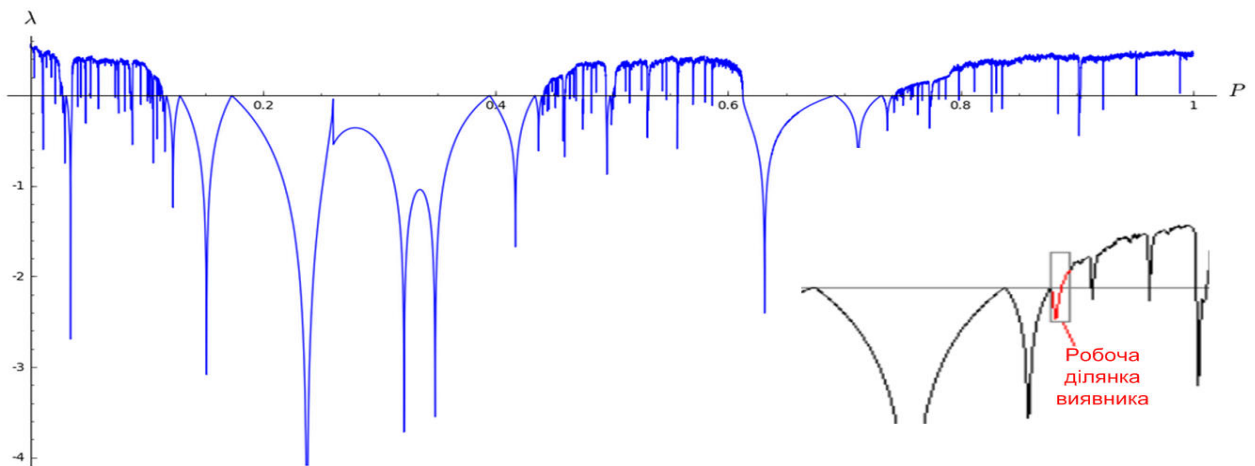


Рисунок 2.4— Залежність старшого показника Ляпунова, що визначає режим роботи хаотичного виявника

Обчислення числа Ейлера фазового портрету[14] ґрунтується топологічному аналізі вільних зон від фазових траєкторій на фазовому портреті. Чим більше зон, тим ближче сигнал до хаотичного (рис.2.5). Для періодичного сигналу кількість зон дорівнює одиниці.

Обчислювальні методи можуть застосовуватись у дискримінаторах ХВК, але їх застосування спряжене із значною математичною обробкою великої кількості інформації, що призводить до затримки видачі кінцевого результату.

Спектральні методи дискримінації[18,19,30] полягають в дослідженні спектральної структури, що може бути зроблено на основі або цифрових методів швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) або за допомогою простої лінійної фільтрації для визначення появи або відсутності спектральних складових. Саме технічна простота та можливість симуляції обумовила широке застосування саме спектральних методів у ХВК.

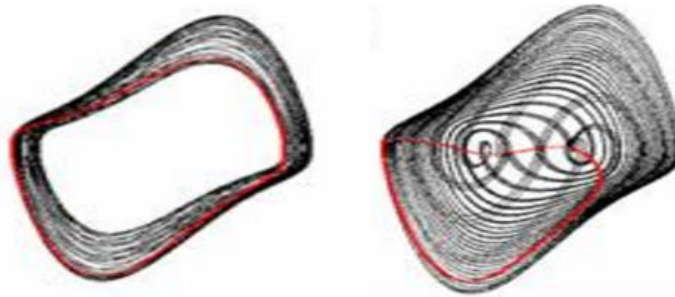


Рисунок 2.5 – Поява вільних зон на фазовому портреті під час переходу до від квазіперіодичного до хаотичного режиму генератора

Кореляційно - статистичні методи полягають в аналізі часової форми сигналів на виході генератора хаосу в дискретні моменти часу[27-31]. Якщо період вибірок взяти із періодом сигналу, що детектуються то поточне значення опосереднених відхилень для періодичного та хаотичного сигналів буде різнитись. Квазіперіодичний сигнал буде давати низьке значення енергії флуктуації, хаотичний - велике. Такий аналіз можливо проводити як в часовій зоні, так і в амплітудній, можливе також одночасний аналіз відмінностей. Головним недоліком такого методу є необхідність встановлення певної фази дискретних моментів для здійснення вибірок та невизначеності в оцінці необхідної кількості вибірок для досягнення надійних результатів.

На основі якісного розгляду роботи хаотичних дискримінаторів встановлено, що найбільш придатним для застосування під час детектування слабких періодичних сигналів є спектральні методи, найбільш простим із

яких є спосіб фільтрації складових спектру вихідного сигналу ГДХ, що розташовано нижче частоти періодичного сигналу опорного генератора. Тобто саме поява низькочастотних складових є ознакою хаотичного режиму.

## 2.2 Засоби хаотичного виявлення

### 2.2.1 Генератор хаосу для хаотичних виявників

ГДХ для потреб виявлення сигналів відрізняються типом нелінійності для однієї або декількох фазових змінних в диференційному рівнянні опису, а також способом впливу зовнішнього сигналу в схему генератора із декомпозицією – повним або параметричним. Одним із самих відомих ГДХ, що застосовується для виявлення періодичних сигналів є НДС Дафінга [17]:

$$d^2x/dt^2 + k dx/dt - x + x^3 = \eta(\omega_1, t) + \gamma_c \cos(\omega_0 t), \quad (2.1)$$

де  $x$  – фазова змінна;

$k$  – біфуркаційний параметр, відомий як коефіцієнт дисипації;

$\eta(t)$  – узагальнена функція сигналу на вході, що в загальному випадку відповідає деякій суміші зовнішнього сигналу і флуктуаційного процесу.

$\gamma_c$  – амплітуда сигналу для досягнення критичного режиму виявника;

$\omega_1$  – основна частота зовнішнього збудження, що може і не дорівнювати частоті у складі неавтономного генератора;

$\omega_0$  – основна частота опорного генератора у складі неавтономного хаотичного генератора.

НДС Дафінга можливо охарактеризувати як диференційну схему другого порядку із однією фазовою змінною та кубічною нелінійністю та вбудованим генератором опорного сигналу. Генератор Дафінга має декілька

модифікацій, що торкаються ступеня нелінійності фазової змінної, наприклад [17]:

$$d^2x/dt^2 + k dx/dt - x^3 + x^5 = \eta(\omega_1, t) + \gamma_c \cos(\omega_0 t). \quad (2.2)$$

Під час застосування параметричного збудження в декомпозиції ГДХ Дафінга рівняння (2.2) перетворюється у:

$$d^2x/dt^2 + k dx/dt - x^3 + [1 + \eta(\omega_1, t)]x^5 = \gamma_c \cos(\omega_0 t) \quad (2.3)$$

Зручною особливістю НДС Дафінга є те, що хаотична поведінка системи зберігається під час переходу від опорної одиничної частоти сигналу синусоїдальних генераторів до інших значень, тобто система має властивість масштабування. За умов довільної частоти диференціальне рівняння Дафінга виглядає як [14,17]:

$$\frac{1}{\omega_1^2} d^2x/dt^2 + \frac{k}{\omega_1} dx/dt - x + x^3 = [a \cos(\omega_1 t) + n(t)] + \gamma_c \cos(\omega_0 t), \quad (2.4)$$

де, параметр  $a$  - амплітуда гармонічного сигналу збудження із частотою  $\omega_1$ ;

$n(t)$  - часова реалізація БГШ.

Генератор Дафінга має одну фазову змінні, але його фазовий портрет (рис.2.6) можливо розглядати як просторову функцію змінної та їх похідних. Результати чисельного моделювання фазових портретів за таких умов підтверджують узагальнені принципи роботи ХВК, де хаотична мода поглиблюється під час подачі шумового сигналу, а під час наявності у вхідній суміші синусоїдального коливання із частотою, близькою до опорної та певною амплітудою переходить у змішано, а потім до простого

колоподібного атрактора в періодичній моді. Швидкість переходу і характеризує чутливість до впливу зовнішнього збудження.

За умови дії на вході суміші гармонічного сигналу із БГШ із відношенням сигнал-завада до -100дБ динаміка поведінки ГДХ зберігається не зважаючи на деформацію атрактора шумовою складовою.

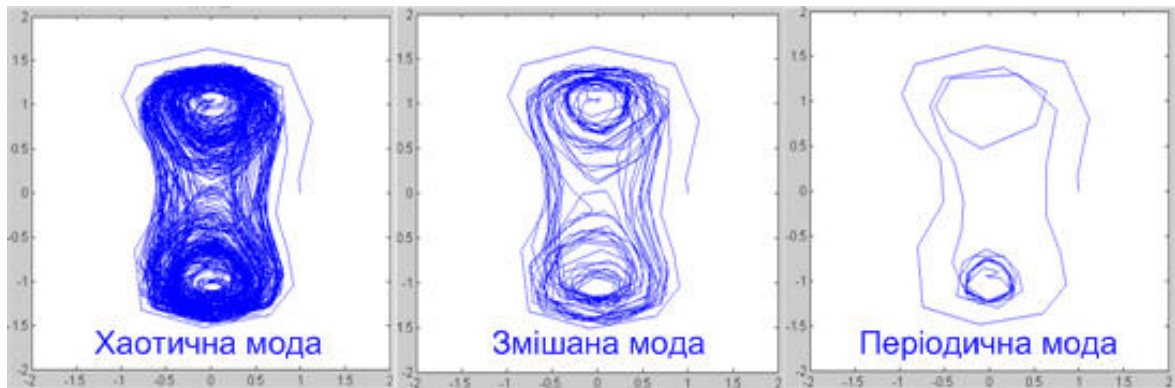


Рисунок 2.6 – Форми атракторів для різних режимів роботи нелінійної динамічної системи Дафінга

Умовою надзвичайно високої чутливості НДС Дафінга (2.4) до дії зовнішнього синусоїдального впливу є його сильна когерентність із опорним коливанням генератора. За таких умов зовнішній сигнал розглядається як частковий приріст опорного сигналу. Він і виводить таку НДС із режиму змішаної моди в хаотичний або періодичний. Сумарну амплітуду об'єднаного сигналу можливо представити як:

$$A(t) = \gamma(t) \cos[\omega t + \theta(t)], \quad (2.5)$$

де  $\gamma(t) = \sqrt{\gamma_c^2 + 2\gamma_c a \cdot \cos(\Delta\omega t + \phi) + a^2}$  змінна амплітуда об'єднаного сигналу;

$(\Delta\omega t + \phi)$  - різницева частота зовнішнього та внутрішнього сигналів та початковий фазовий зсув;

$$\theta(t) = \operatorname{arctg} \left[ \frac{a \cdot \sin(\Delta\omega t + \phi)}{\gamma_c + a \cdot \cos(\Delta\omega t + \phi)} \right] - \text{діючий фазовий зсув об'єднання}$$

зовнішнього та внутрішнього сигналів, якщо фазовий зсув розташовано у межах  $\pi - \operatorname{arctg} \left[ \frac{a}{2\gamma_c} \right] \leq \phi \leq \pi + \operatorname{arctg} \left[ \frac{a}{2\gamma_c} \right]$  амплітуда об'єднаного сигналу в НДС завжди буде менше критичної та буде реалізовано тільки хаотична мода, в іншому випадку із періодом  $T = 2\pi/\Delta\omega$  реалізується режим перемежування мод: квазіперіодичної та хаотичної. Фіксуючи цей період, можливо вимірювати відхилення частот або девіацію частоти, але значні відхилення частот зменшує період перемежування і призводить до неможливості відокремлення режимів. Тому відмінності частот мають бути невеликими.

Критичне значення амплітуди сигналу опорного сигналу для встановлення режиму генератора, що перемикає НДС Дафінга в стан нестійкої рівноваги і визначає надвисоку його чутливість до дії зовнішнього періодичного сигналу. Розрахунок зон значень критичних амплітуд  $\gamma_c$  можливо реалізувати за виразом [22]:

$$\gamma_c = \frac{4 \cosh(\pi \omega_1/2)}{3\sqrt{2}\pi\omega_1} \quad (2.6)$$

Для генераторів Дафінга теоретично можливо забезпечити необмежену чутливість до слабких гармонічних сигналів, а практично точність обмежується стабільністю компонент апаратури під час моделювання цей параметр залежить від розрядності представлення чисел в САПР, а у реальних приладах – точністю підтримання параметрів радіоелектронних компонент [24].

### 2.2.2 Засіб хаотичного виявлення слабких амплітуд

Як вже згадувалось, виявлення слабких періодичних сигналів можливе через застосування впливу зовнішньої дії фактично на схему опорного генератора в складі ХДХ або безпосередньо на параметри неавтономного ГДХ. Більшого поширення щодо практичної реалізації набула схема амплітудного ХВК (рис.2.7), яку розглянемо і надалі.

Амплітудний ХВК має у складі неавтономний ГДХ та дискримінатор режимів роботи [14]. Зовнішній сигнал, що підлягає виявленню ХВК об'єднується (найчастіше адитивно) із шумовою реалізацією як  $[B \sin \omega_1 t + \sigma \cdot n(t)]$ , де  $\sigma$  - СКВ шуму. Надалі ушумлене періодичне коливання синфазно та адитивно об'єднується із сигналом внутрішнього опорного генератора гармонічного сигналу  $A \sin(\omega_0 \tau)$  (рис.2.7) у суматорі та надходить до аналогової НДС Дафінга. Режим роботи залежить від співвідношення амплітуд зовнішнього періодичного сигналу та сигналу внутрішнього опорного генератора, не зважаючи на високий рівень флуктуаційних завад.

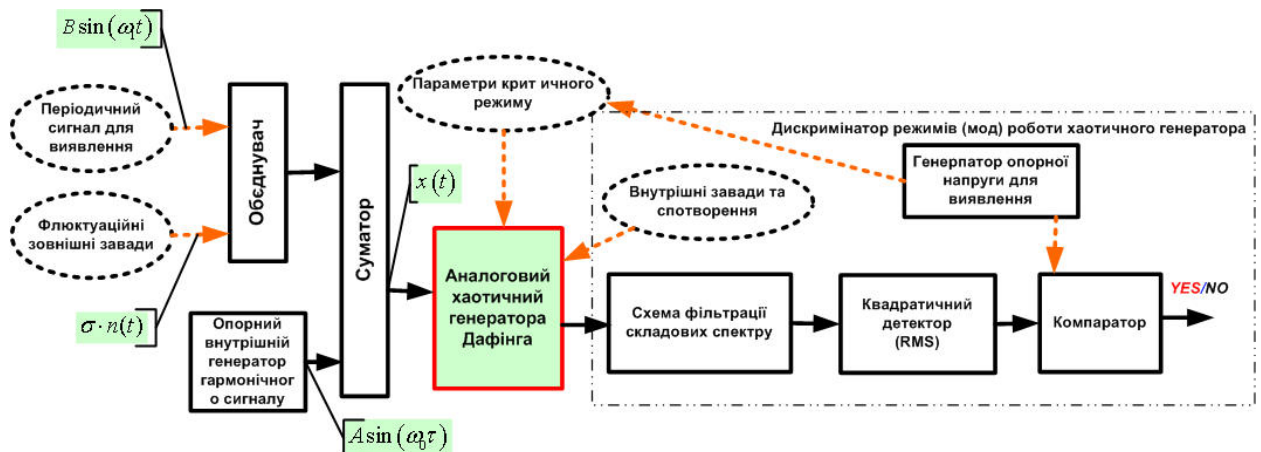


Рисунок 2.7 – До пояснення принципу дії хаотичного виявника

Дискримінація слабких періодичних сигналів на фоні потужних завад типу БГШ у ХВК найбільш практично реалізувати на базі застосування схеми фільтрації складових спектру, у простішому випадку за допомогою

ФНЧ, що виділяє появу субгармонічних складових у вихідному спектрі фазової змінної  $x(t)$  під час появи в НДС хаотичної моди.

Спектр періодичної моди (рис.2.8) НДС близький до дискретного та складається із гармонік сигналу опорного генератора. Спектр хаотичної моди НДС Дафінга також має гармоніки опорного генератора і, крім того, в ньому присутній неперервний ряд субгармонічних коливань що створює субгармонійну флуктуційну складову.

Шляхом імітаційного моделювання встановлено, що амплітуда субгармонічних складових хаотичної моди генератора Дафінга зосереджена нижче половинного значення частоти опорного генератора (рис.2.8), в такому випадку частота зрізу ФНЧ у складі дискримінатора має складати близько.  $[0,3..0,5]\omega_0$  і забезпечувати максимальне придушення гармонік періодичного сигналу, які можуть суттєво впливати на результат дискримінації.

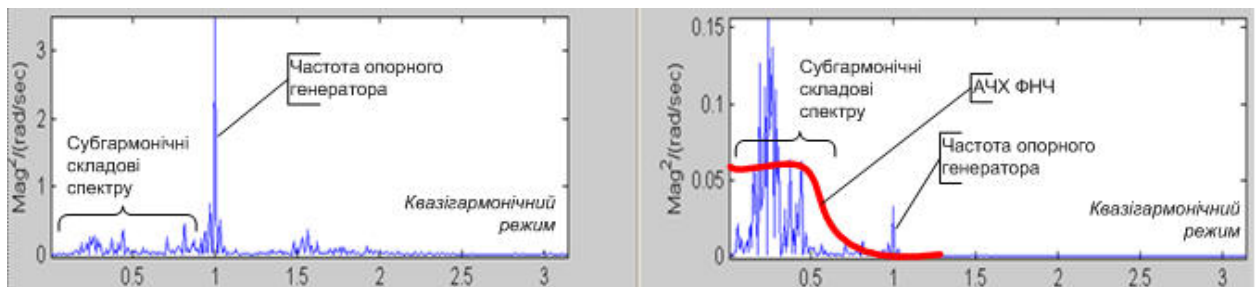


Рисунок 2.8 – До пояснення принципу дискримінації мод хаотичного виявника за допомогою ФНЧ

Виділені ФНЧ низькочастотні коливання надходять на квадратичний детектор[1], де фактично визначається RMS а, квадратичного детектування порівнюється із пороговим значенням, що встановлюється у генераторі опорної напруги. Останній також керує параметрами виявлення в НДС Дафінга.

Таким чином, фактично в амплітудному ХВК на базі НДС Дафінга та із застосуванням ФНЧ реалізується контроль поточного енергетичного стану НДС загалом. Хаотичний енергетичний стан характеризується більшим

перерозподілом спектральних складових, а в періодичний стан концентрує енергію тільки в гармоніках частоти опорного генератора.

Якщо амплітуда періодичного сигналу на вході хаотичного виявника буде змінюватись, то поведінка НДС також буде змінюватись (рис.2.9) при цьому формується аж 5 характерних режимів, за малих значень вхідної амплітуди внутрішнім генератором система перебуває у режимі слабкої періодичної моди, надалі вплив зовнішнього сигналу призводить до появи широкої перехідної зони, що характеризується слабкою чутливістю але широким діапазоном встановлення порогового значення під час виявлення.

Певний діапазон співвідношень амплітуд зовнішнього та внутрішнього гармонічних сигналів викликає появу хаотичної моди, а подальше збільшення амплітуди зовнішнього сигналу знов переводить НДС у режим із генерацією простого атрактора, формуючи вузьку перехідну зону. Саме робота у вузькій перехідній зоні забезпечує найвищу чутливість амплітудного ХВК.

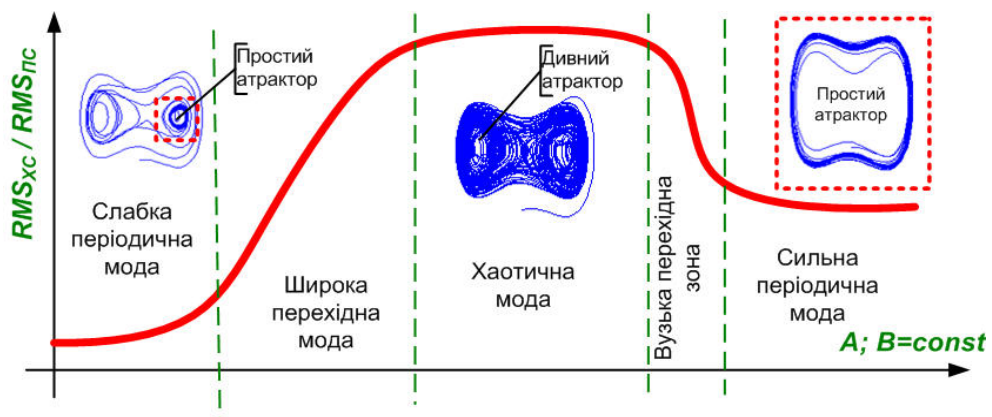


Рисунок 2.9 – Поява перехідних зон між модами під час зміни відносної амплітуди зовнішнього сигналу до внутрішнього

Перевагами такої схеми є простота реалізації дискримінатора і надвисока чутливість до переходу із моди в моду, а недоліком є необхідність дуже точного встановлення та тривалого подальшого підтримання параметрів та характеристик НДС, а також опорного генератора в його складі.

### 3 ВИЯВЛЕННЯ БІОЛОГІЧНИХ СИГНАЛІВ ХАОТИЧНИМИ ВИЯВНИКАМИ

#### 3.1 Виявлення сигналів біологічної природи

##### 3.1.1 Біологічні сигнали для виявлення

Узагальнений термін «сигнал» для технічних галузей (*signum* – знак) часто використовується в широкому сенсі, без дотримання конкретизованої термінології. Наприклад, часто так називають деяку матеріальну форму або навіть засіб для вилучення, обміну і практичного використання інформації: електричний, гравітаційний, оптичний сигнал, тощо. Нерідко під словом «сигнал» також розуміють і деякий фізичний процес, що є матеріальним втіленням повідомлення через зміну одного або декількох параметрів підносівного колювання: амплітуди, миттєвої частоти, інтегральної потужності, кольору світла, тощо) у часі та просторі [1].

Також за терміном «сигнал» приховується певний внутрішній зміст фізичного стану об'єкту або процесу, наприклад, сигнал світлофора, аварійний сигнал, попереджувальний сигнал, тощо. Вказана змістовна суть поняття «сигнал» і об'єднує кінцеве їх призначення в результаті якого можна сформулювати масштабне філософське визначення сигналу як: *корисні для кінцевого споживача повідомлення, про об'єкти, стани, процеси, фізичні величини що представлено у формі, зручній для використання.*

Задля гарної мови часто термін «сигнал» ототожнюють із термінами «інформація» або «дані», але хоча ці поняття дуже тісно пов'язані і всі відносяться до філософських категорій, що не існують одне без одного, але однак і мають суттєві відмінності у розумінні, що підкреслює механізм побудови моделей сигналів. Модель сигналу [1] являє собою залежність однієї або декількох величин від однієї або незалежних змінних, тобто наявна повна або часткова кореляція між фізичними величинами. Така

функціональна залежність обов'язково несе користь для споживача повідомлення про властивості, стани, динаміку зміни, тощо, фізичної системи, об'єкту або середовища (табл.3.1) [24].

Таблиця 3.1 – Деякі різновиди біологічних рецепторів сигналів людини

№	Різновид	Подразник	Приклад для людини
1	Больові	Комплексна дія	Рецептори больових відчуттів у людини
2	Фоторецептор	Світло	Рецептори видимого світла у сітківці
3	Терморецептор	Навколишня температура	Холодові та теплові рецептори шкіри
4	Осморецептор	Осмотичний тиск	Рецептори внутрішніх органів та систем організму людини
5	Механорецептори	Механічний тиск, вібрації, дотик	Рецептори дотику, барологічні рецептори
6	Хеморецептори	Молекули та їх варіанти для певних речовин	Рецептори смаку та нюху

Виходячи із визначення сигналів в тому числі біологічних сигналів метою обробки цих сигналів можна вважати добування оцих саме корисних відомостей, які явно або приховано відбиті в сигналах. А також перетворення сигнальних відомостей у форму, зручну для сприйняття і подальшого використання кінцевим споживачем: людиною із медичної освітою для прийняття рішень щодо лікування.

Оптимальна обробка в такому сенсі це добування найбільшої кількості інформації. Аналогічним чином із математичної точки зору можливо охарактеризувати і поняття «аналізу» сигналів: специфічні перетворення із метою виділення особливих рис, що підкреслюють саме те, що «приховано» для споживача.

### 3.1.2 Обробка біологічних сигналів

Класичний підхід обробки біосигналів охоплює методи математичної статистики та спектрально-кореляційні методи. Ці методи ґрунтуються на

припущенні стаціонарності сигналу за час дослідження, але на практиці, такий факт для біологічних сигналів є хибним, особливо під час проведення досліджень на організмах із змінним функціональним навантаженням на системи та органи. Тому для аналізу сигналів біомедичних давачів актуальним завданням є застосування вторинної обробки сигналів за допомогою різноманітних математичних методів, що працюють із нестаціонарними сигналами.

Останнім часом сигнали біологічної природи, що мають квазіперіодичний характер намагаються аналізувати із використанням методів нелінійної динаміки, які зокрема дозволяють не тільки проаналізувати характер та виявити патологію за показниками, але виявити та оцінити процеси самоорганізації біосистем.

Процес генерації серцевого ритму в організмі людини визначається активною співпрацею системи кровообігу із численними регуляторними механізмами організму в цілому, що залежать від стану нервової системи, гормональних та рефлекторних процесів, тощо. Таким чином система є складною та багатоконтурною, де кожен раз домінує якась ланка процесу, що визначається потребами метаболізму на даний момент.

Складність біологічних взаємодій, процеси самоорганізації та багатоконтурний зв'язок говорить про прояву властивих для нелінійної динаміки поведінкових механізмів та проявах динамічного хаосу в процесі еволюції організму. В таких умовах «хаос» розглядається як багатогранний кінцевий фактор обробки, який є не тільки узагальненим руйнівником систем і процесів, але й володіє «творчою силою», що сприяє творчу силу, появі нових зв'язків, кластерів, взаємодій, об'єктів та явищ в організмах.

Таким чином застосування способів обробки біосигналів на основі нелінійної динаміки є органічним під час опису процесів складної взаємодії між системами організму людини, забезпечуючи максимальну правдоподібне відтворення біологічних образів сигналів, а будь які нові ідеї щодо обробки із

застосування СДХ завжди залишатимуться гідними для можливості впровадження у практику обробки біологічних сигналів.

### 3.1.3 Порядок обробки біомедичних сигналів

Біосигнали несуть інформацію про фізіологічні процеси та події систем живого організму, яка може бути виміряна системою чутливих поверхневи або внутрішніх сенсорів і надалі представлена у вигляді, зручному для аналогової або цифрової обробки шляхом імітаційного моделювання. Це може бути функціонування серця, сигнали нервової системи, м'язів, тощо.

Інформативними параметрами сигналів біологічної природи можуть бути амплітуда, частота (період), часові затримки, (тимчасове зрушення), а також форма спектру та його характеристики. Відповідно теорії інформації Шенона, інформація для дослідника зосереджена в їх випадковості, детермінованість сигналу ніякої інформації для дослідника не несе

Висновок про випадковість або детермінованість, робиться на підставі результатів його відтворення під час вимірювання і визначається похибками вимірювання, а похибки залежать від типу обробки. Чим досконаліша обробка тим висновок про інформативність достовірніший. Таким чином, обробка біосигналів проводиться із метою встановлення в них інформативної ознаки для генерації діагностичних показників кінцевого результату.

Важливим і першим кроком дослідження біологічних систем є розробка біосенсорів та апаратури перетворення сигналів, що підлягають вимірюванню і медичному аналізу.

Наступний крок – багато параметрична фільтрація та усування спотворень і завад сигналів, що викликані недосконалістю процесу вимірювання та зовнішніми впливами. Наприклад, спотворення сигналів пульсової хвилі викликаються рухами тіла, недосконалістю джерел живлення, зовнішніми наведеннями, дією інших електричних сигналів в тілі організму,

тощо. Окремим кроком досліджень біосистеми є виявлення та аналіз подій та параметрів із аналізом впливу їх значень [1]. На останньому етапі також важливу роль відіграє імітаційне моделювання роботи та порівняння із дослідженнями попередніх кроків, а для цього слід створювати адекватні моделі роботи систем.

Слід відмітити, що всі біологічні сигнали, що відображають характер процесів в організмі, зокрема в головному мозку, серці, органах відчуття та моторики неперервними і вони мають розглядатись як аналогові сигнали і обробляться відповідним чином. Це саме торкається і підходів до їх імітаційного моделювання. Але через відносно малий період більшості біологічних сигналів, вони легко можуть перетворюватись в часові ряди значень на останніх кроках досліджень і обробляються із застосуванням теорії та методів оптимальної цифрової обробки сигналів, в тому числі і під час імітаційного моделювання.

Цифрові системи обробки містять технічні засоби первинної обробки сигналів та вторинної обробки. Засоби первинної обробки призначені для обробки вихідних сигналів чутливих біосенсорів та функціонують на тлі випадкових шумів і різноманітних завад різної фізичної природи. Обробляючи дані такі засоби проводять селекцію корисного сигналу та виявляють їх характеристики та параметри.

Засоби вторинної обробки займаються класифікацією, архівуванням, структурним аналізом, тощо [13]. Така вторинна обробка натепер виконується в цифровому вигляді, за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, що має необхідну апаратну підтримку. Останнім часом для проведення обробки та аналізу біомедичних сигналів дослідники застосовують систему MATLAB & SIMULINK (продукт компанії MathWorks), що має розвинене програмне середовище, та весь час доповнюється спеціалізованими модулями та функціями із застосуванням розроблених теорій та методів.

## 3.2 Біологічні сигнали та їх параметри

### 3.2.1 Сигнали серцево-судинної системи людини

Рух крові в судинах людського організму обумовлений роботою серця. Під час скорочення міокарда шлуночків кров під тиском спрямовується із серця в аорту і легеневу артерію [33,34]. Періодичні скорочення міокарда утворюють періодичні розширення судинної стінки або пульс (рис.3.1). Ці ритми під впливом поширення хвиль тиску від початку аорти до артеріол і надалі капілярів викликають поширення пульсових хвиль вздовж кровоносної системи.

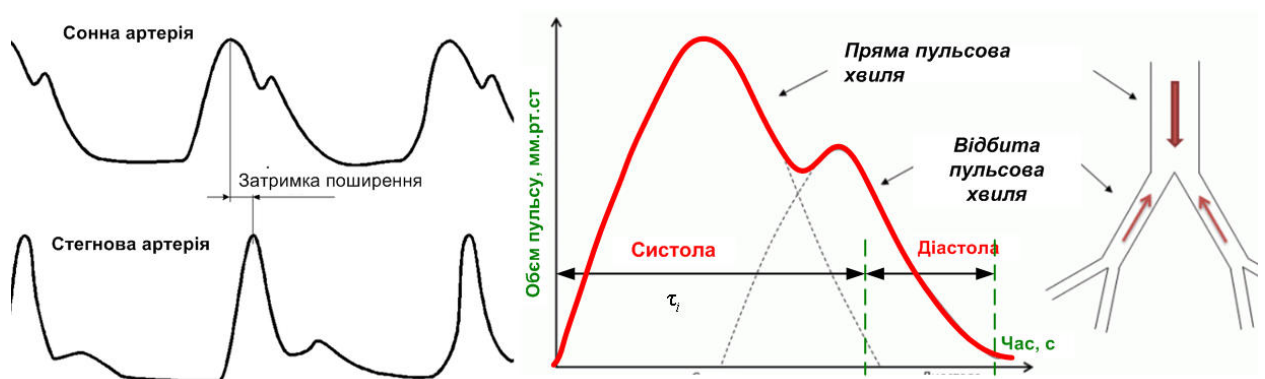


Рисунок 3.1 – Форма сигналу пульсової хвилі людини під час руху крові в серцево-судинній системі

Артеріальне дерево судинної системи являє собою з точки зору ліній передачі найскладнішу гілку довгої лінії, на вході якої поширюється хвиля артеріального тиску, за якою рухається і весь кровоток, але із меншою швидкістю. Якщо швидкість пульсової хвилі становить від 5 до 20 м/с то середня швидкість кровотоку всього 0,2 м/с. Імпульсна дія серця на судинне навантаження та присутність точок розгалуження судин є головною специфікою гемодинаміки кровотоку людини. У точках розгалуження стрибкоподібно змінюється судинний опір та формуються відбиті від

неоднорідності розгалуження пульсові хвилі, що надалі накладаються на пряму хвилю систоли (рис.3.1).

Швидкість поширення пульсових ритмів по судинах визначається: швидкістю течії крові; еластичністю судини, товщиною стінки системи кровообігу, діаметром капілярів, а також щільністю крові. Швидкість пульсової хвилі в аорті складає 4-6 м/с, в м'язових артеріях 8-12 м/с, тощо.

Лінійна швидкість течії крові поза межами артерій не перевищує 0,5 м/сек. З віком еластичність судин людини знижується, а жорсткість зростає. Із збільшенням жорсткості судин швидкість поширення пульсової хвилі зростає. Значення швидкості визначається також тиском крові, і навіть функціональним станом судинного епітелію.

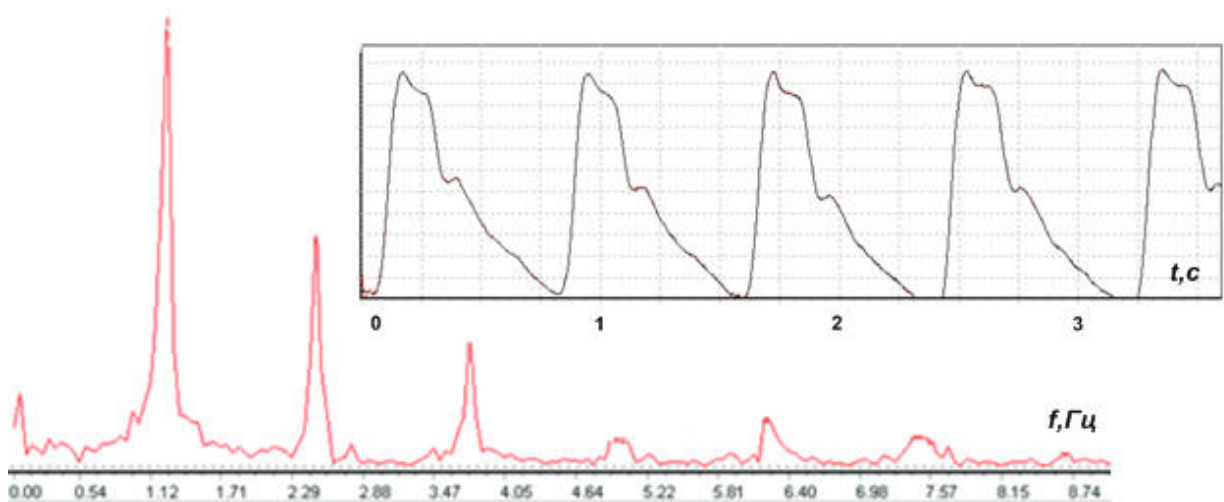


Рисунок 3.2 – Типова форма зап'ястної пульсової хвилі та її спектр здорової людини

Для оцінювання швидкості поширення пульсової хвилі вимірюють часову затримку поширення (рис.3.2) між ритмами пульсації крові в сонній артерії та стегновій артерії. Для реєстрації пульсації застосовують сфїгмографічні сенсори. Крім того, доволі просто оцінка швидкості пульсової хвилі в судинах відбувається із використанням пальцевої фотоплетизмографії – оптичному вимірюванню пульсації крові.

Для оцінювання стану серцево-судинної системи людини застосовують такі методи, як електрокардіографія, луна-кардіографія, кінетокардіографія, сфігмографія, реографія тощо. Найбільш поширений науковий метод для вивчення характеристик форми, спектру, поширення і т.п. пульсової хвилі – сфігмографія. Сфігмографія ґрунтується на графічній фіксації пульсових вібрацій стінок великої кровоносної судини – найчастіше артерії.

Часто для обробки та дослідження патології на основі сфігмограм застосовують гармонічний спектральний аналіз, що може бути здійснено на базі аналогового спектроаналізатора, або в цифровому вигляді, дискретним або швидким перетворенням Фур'є (рис.3.2).

Під час аналізу досліджується співвідношення між складовими спектру для здорової та хворої людини, що яскраво видно через появу або відсутність спектральних складових (рис.3.3).

Аналогічні дослідження шляхом перетворення часового сигналу в іншу робочу зону можливо провести іншими математичними методами, наприклад: перетворення Гільберта-Хуанга, вейвлет-аналізу, [5–8] тощо.

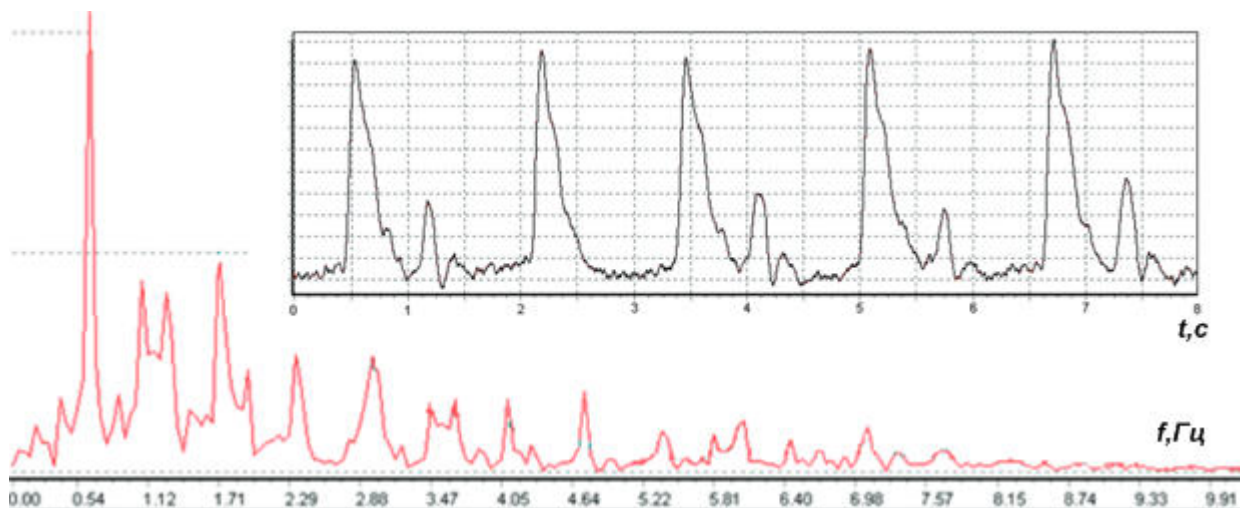


Рисунок 3.3 – Типова форма зап'ястної пульсової хвилі та її спектр хворої людини

Слід згадати, що даним міжнародної організації здоров'я (МОЗ) Серцево-судинні захворювання є основою причиною летальних випадків у

всьому світі. Жодна інша причина щороку не викликає стільки смертей, скільки від серцево-судинних захворювань, тому генерація методик та вивчення та вдосконалення методів діагностики серцево-судинних захворювань актуальні натеper і будуть залишатись актуальними надалі.

Таким чином, досліджуючи спектр через виявлення значень спектральних складових можливо провести оцінку патологій серцево-судинної системи людини.

### 3.2.2 Біологічні сигнали нейронів

Нервова система є головним керуючим елементом вищих істот. Нервова тканина будується із функціональних клітин – нейронів та клітин нейроглії, а також містить клітини - рецептори. Особливістю нейронів є те, що вони можуть збуджуватися та передавати електричні імпульси до інших нейронів та клітин організму.

Біологічні нейрони [10-12] складаються з тіла діаметром від 3 до 100 мкм, що як і інші клітини містить ядро, органели та цитоплазматичні відростки. Короткі відростки називаються дендритами (рис.3.1), а довші і тонші, довжиною до декількох метрів призначені для передачі нейроімпульсів від тіла нейрону до інших клітин, називають аксонами. Аксони з'єднуються із дендритами суміжних нейронів у розгалуженнях на кінцівках, що мають назву синапси.

Нейрони, що передають сигнали до органів, які відповідають на подразнення, називають моторними. Нейрони, які доставляють імпульси до мозку, називають сенсорними. Іноді сенсорні та моторні нейрони взаємодіють через вставні нейрони.

Клітини нейроглії, що забезпечують роботу нейронів зосереджені у центральній нервовій системі, де їх кількість набагато перевищує кількість

власне нейронів. Вони заповнюють простір між нейронами і забезпечують їх живлення та безпеку, наприклад, захист від вірусів та бактерій.

Сигнали у нервовій клітині передаються електричними імпульсами (рис.3.4). Біологічні ретельні дослідження довели, що мембрана аксона з внутрішнього боку заряджена негативно відносно зовнішньої і різниця потенціалів складає близько  $-65$  мВ. Цей потенціал називають потенціалом спокою він визначається градієнтом концентрації іонів калію та натрію.

Під час стимуляції аксона електричним струмом потенціал на внутрішньому боці мембрани підвищується до  $40$  мВ. Потенціал дії виникає через короткочасне збільшення проникності мембрани для іонів натрію та входу останніх до аксону. Надалі, приблизно через  $0,5$ мс зростає проникність мембрани для іонів калію і вони потрапляють назовні аксона, відновлюючи вихідний потенціал.

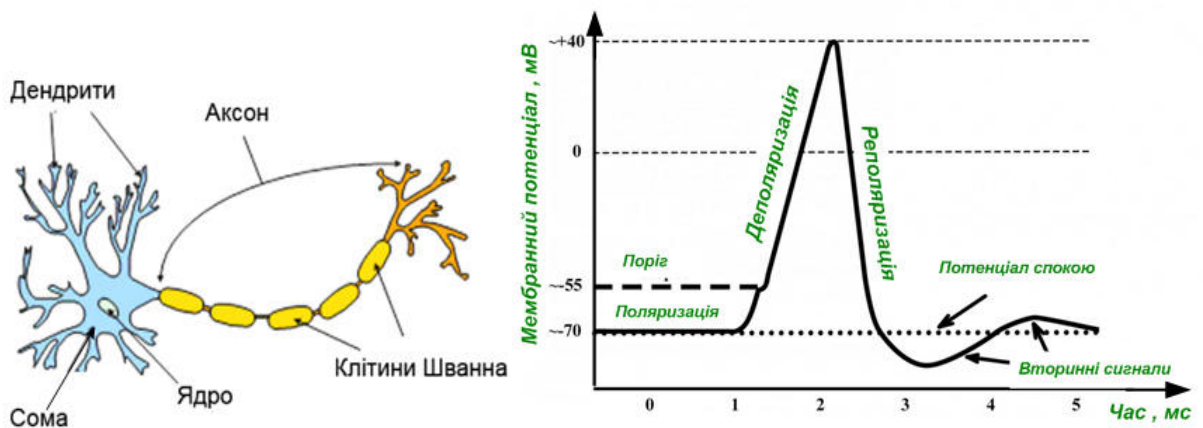


Рисунок 3.4 – Структура нейрону та форма типового нейронного імпульсу

Нервові сигнали рухаються по аксонам у вигляді хвилі деполіризації. Через  $1$ мс після збудження аксон повертається у початковий стан і знову здатний передавати імпульси, але на інтервалі часу  $5-10$  мс аксон може транслювати лише сильні імпульси. Швидкість поширення нейросигналу сильно залежить від товщини аксона. У аксонах до  $0,1$  мм вона складає  $0,5$  м/с, але у гігантських аксонах кальмарів із розміром  $1$  мм може досягати і  $100$  м/с!

У хребетних тварин один за одним збуджуються не суміжні ділянки аксона, а зони перехоплення Ранв'є, тобто імпульс ніби перескакує від одного перехоплення до іншого, а загалом рухається до 120 м/с. Цікаво, що підвищення температури тіла підвищує швидкість проходження нервових імпульсів.

Важливо, що через хімічні потенціали амплітуда нервових імпульсів не змінюється, а для кодування передачі інформації між клітинами застосовується лише їх частота, тобто чим більше збудження, тим частіше тим більше імпульсів за одиницю часу передається.

Передача інформації від одного нейрона до іншого відбувається у синапсах електрохімічним шляхом від розгалужень аксону на кінцівці до дендритів іншого нейрону. Нервові закінчення аксонів та дендритів розділені між собою щілиною шириною близько 20 нм.

Цитоплазма синапсів містить велику кількість синаптичних бульбашок із діаметром близько 50 нм із наповненнями нейромедіаторами. Надходження нервового імпульсу запускає злиття синаптичної бульбашки із мембраною та вихід нейромедіатора назовні. Через близько 0,5 мс молекули нейромедіатора потрапляють на мембрану суміжної нервової клітини, де вступають в хімічну взаємодію із молекулами рецептора та передають сигнал вздовж наступного нейрону далі. Від цього хімічного процесу і залежить форма нейроімпульсу.

### 3.3 Методи хаотичного виявлення біологічних сигналів

#### 3.3.1 Виявлення полігармонічних сигналів

Концепція методу хаотичного виявлення полягає у нелінійній фільтрації сигналу за допомогою хаотичного генератора (рис.3.5). Принцип роботи такого ХВК полягає у зрушенні стійкого режиму генератора через подачу на нього полі гармонічного біологічного сигналу та переходу

нелінійної динамічної системи із режиму генерації періодичного сигналу в режим генерації хаотичного сигналу із появою субгармонік відносно основної частоти сигналу збурення.

Основою схеми, що ілюструє роботу методу є нелінійна динамічна система (ХГ Дафінга), що амплітудно або параметрично керується зашумленим сигналом біологічної природи. Завдання виявника виявити наявність або відсутність такого сигналу на тлі потужних внутрішніх та зовнішніх флуктуаційних завад із максимально можливою достовірністю.

Загалом схема нагадує оптимальний виявник на базі узгодженого фільтру в класичній техніці обробки сигналів із максимізацією відношення сигнал-завада, але відрізняється більшою ступенем універсальності, щодо сигналів біологічної природи.

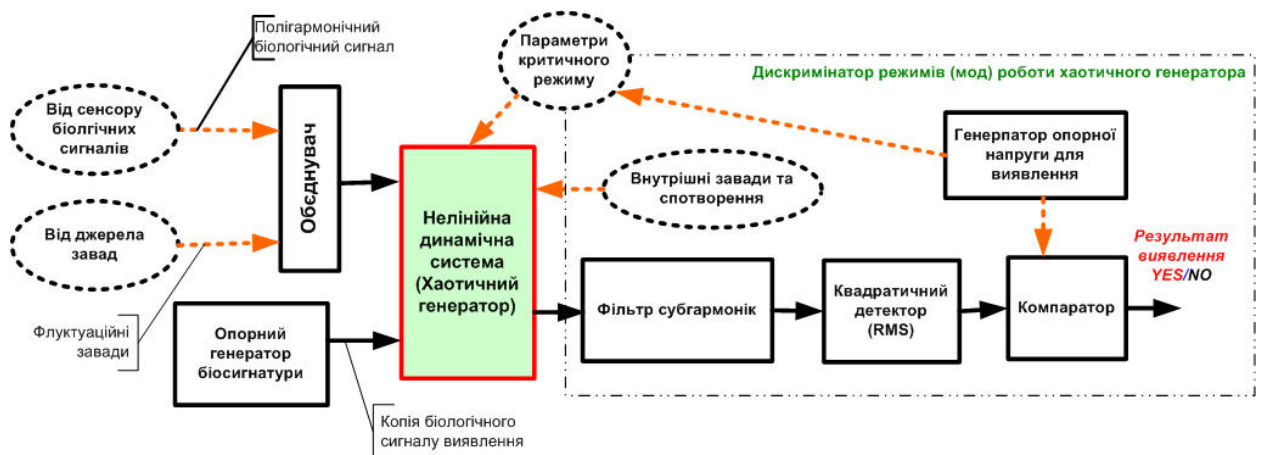


Рисунок 3.5 – Схема методу нелінійного виявлення сигналів біологічної природи

Схема хаотичного виявника біологічних сигналів подібна до схеми виявлення гармонічних сигналів, що включає опорний генератор біосигнатури, нелінійну динамічну систему та дискримінатор мод хаотичного генератора.

Математична модель роботи НДС Дафінга у складі ХВК біологічних сигналів визначається як:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\omega_1^2} d^2 x / dt^2 + \frac{k}{\omega_1} dx/dt - x + x^3 = \\ & = a \left[ \sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_{1_i} t + \varphi_i) + n(t) \right] + \gamma_c \left[ \sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_{0_i} t + \varphi_i) + n(t) \right], \end{aligned} \quad (3.1)$$

де  $\sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_{1_i} t + \varphi_i)$  - модель сигналу із полігармонічним спектром.

Слід вказати, що ХВК, побудовані на основі запропонованого принципу мають обмежений діапазон частот. Надто великі значення частот сигналів «не встигають» впливати на еволюцію неавтономної динамічної системи, а надто повільна зміна значень призводить до порушення умов чутливості критичного режиму ХВК.

Тому діапазон змін швидкостей наростання сигналу або частотний ресурс та ширина спектру мають обиратись оптимально і якщо цього не відбувається слід застосовувати схеми перенесення спектру в «зону дії» квазічастот ГДХ.

Подальші імітаційні дослідження підтвердили правильність запропонованого підходу застосування хаотичних виявників подібного типу для виявлення слабких біологічних сигналів.

### 3.3.2 Хаотичний виявник із керованими біфуркаційними параметрами

Під час численних досліджень еволюції НДС в різних режимах роботи, що встановлюються через подання значень біфуркаційних параметрів виявлена залежність критичних режимів роботи від їх значень та від параметрів сигналів, що надходять на вхід хаотичного виявника.

Отже через цей факт можливе використання НДС як нелінійного фільтру, що реагує на даний сигнал в цілому, як це робиться в попередній

запропонованій схемі, так і на спектральні ділянки (рис.3.6). Тобто хаотичний виявник, за певних значень параметрів може встановлювати факт наявності або відсутності спектральних складових в сигналі.

Для цього доцільно застосувати паралельну схему обробки (рис.3.6), що складається з декількох ХВК, кожен із яких керується за наступними каналами окремим блоком:

1. Синтезатор опорних сигналів створює сигнали, що без завад надходять на неавтономну нелінійну динамічну схему (структуру) та встановлюють критичний режим роботи, що чутливий до переходів із хаотичного в періодичний режим.

2. Блок керування значеннями біфуркаційних параметрів забезпечує встановлення такого режиму роботи ХГ, що забезпечує фільтрацію вхідного сигналу виявника у заданій смузі частот. Для роботи цього блоку необхідно попередньо провести дослідження фільтруючих властивостей за умови зміни біфуркаційних параметрів. Попередній точковий аналіз ситуації підтвердив таку можливість.

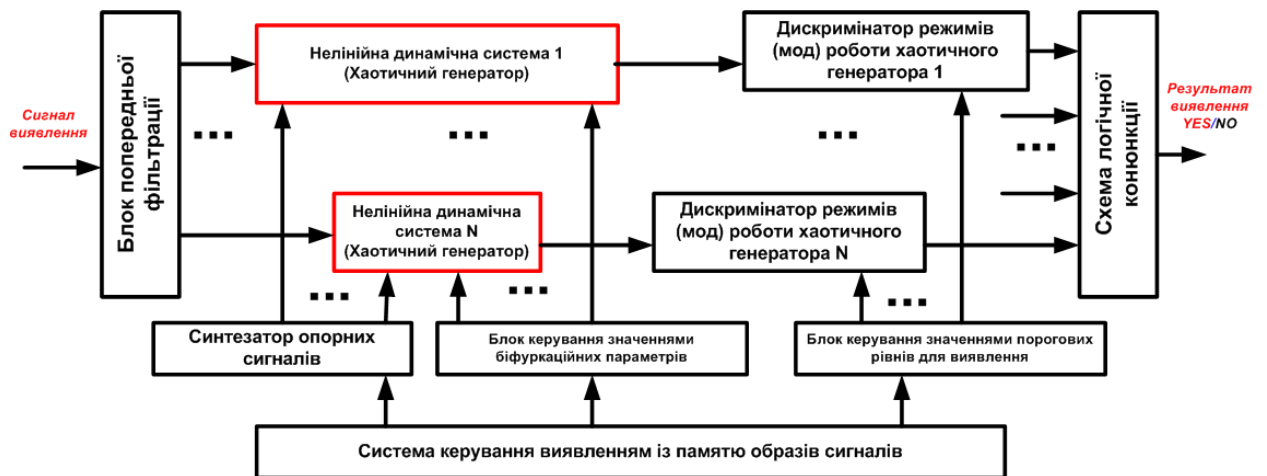


Рисунок 3.6 – Структура хаотичного виявника із керуванням біфуркаційними параметрами

3. Блок керування значеннями порогових рівнів забезпечує таке встановлення рівнів хаотичного дискримінатора, яке гарантує виявлення

спектральних складових слабкого вхідного сигналу за умови значень шуму або завади, що перевищують рівень сигналу.

Всі блоки керування парціальними параметрами хаотичного виявника знаходяться у складі системи керування виявленням із пам'яттю образів сигналів, що виявляються, що може бути легко реалізована в локальній або навіть глобальній цифровій мережевій архітектурі.

На вході будь-якого складного виявника сигналів має бути встановлено обмежувальний універсальний фільтр, наприклад, смуговий частотний фільтр, часове вікно, поляризаційний фільтр, тощо. Тип та структура фільтру визначаються параметра сигналу та припустимими аргументами його зміни, наприклад, антена теж просторовий фільтр для аргументу «напрямок приходу сигналу». Блок попередньої фільтрації реалізує тільки деяке збільшення відношення сигнал-завада по флуктуаційним завадам та має усувати вузькосмугові, або прицільні завади.

Під час виявлення на виході хаотичного дискримінатора з'являються логічні повідомлення про наявність або відсутність складової спектру. Цю інформацію можливо використати, за умови виявлення біологічних сигналів, як поле діагностичних відомостей для визначення патології органів та систем людини. Наприклад, зміна форми пульсової хвилі призводить до зміни спектру, виявляючи певні рівні спектральних складових ХВК дозволяє допомогти прийняти рішення медичному фахівцеві про подальші дії щодо пацієнта.

Для проведення подальшого імітаційного моделювання слід визначитись із принциповою працездатністю запропонованих ХВК, їх частотними властивостями, можливістю функціонування за умови високого рівня завад, тощо.

## 4 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ХАОТИЧНОГО ВИЯВНИКА

### 4.1 Характеристика середовища моделювання MatLab/Simulink

Імітаційне моделювання передачі аналогових телефонних повідомлень реалізовано у середовищі MatLab/Simulink, що працює під керуванням операційних систем Linux, Mac OS і Microsoft Windows, та спроможна реалізовувати розподілені обчислення, що є цінним для обчислення рішень диференціальних рівнянь, що забирає багато комп'ютерних ресурсів [5].

Спектр вирішуваних завдань середовища MatLab переважно наступний: математична фізика, обробка радіосигналів, авіоніка, матричний та системний аналіз, оптимізаційні задачі, керування нейронними мережами, тощо. Крім загальних завдань середовище MatLab припускає застосування пакету ToolBox, що налаштований на виконання більш конкретних обчислювальних завдань та завдань імітаційного моделювання.

Середовище MatLab із легкістю взаємодіє із офісними пакетами Microsoft Word і Excel за допомогою інтерактивних шаблонів М-книг. Найбільш зручним для імітаційного моделювання хаотичних систем у MatLab розширення – Simulink (MatLab/Simulink). У розширенні Simulink за допомогою готових стандартних функціональних блоків легко створюються та розраховуються складні нелінійні структури та системи.

MatLab/Simulink підтримує технологію візуального програмування на основі спеціалізованих бібліотек, що весь час поповнюються. В таких умовах користувачеві необхідно зосередитись лише на загальних засадах використаної імітаційної моделі нелінійної системи і не вивчати окрему мову програмування, що суттєво пришвидшує дослідження.

Крім того, підсистема MatLab/Simulink є автономним модулем Matlab, хоча і взаємодія із основним середовищем MatLab припускається та передбачена. Під час імітаційних досліджень в MatLab/Simulink користувач

може також удосконалювати блоки в бібліотеці або створювати створити власні ієрархічні структури та запам'ятовувати їх як блоки. Для досвідчених користувачів є можливість написання функціоналу блоків на мовах високого рівня.

Під час моделювання MatLab/Simulink можливо обирати метод розв'язання нелінійних рівнянь, час, крок, тощо. Візуалізація результатів імітаційного моделювання можлива за допомогою, багатоканальних, дисплеїв, осцилографів, спектроаналізаторів, плотерів, тощо. Крім того можлива взаємодія із базовим середовищем MATLAB через спільну систему змінних [35,36].

#### 4.2 Конструювання моделей біологічних сигналів

Проведення подальшого моделювання хаотичного виявника біологічних сигналів необхідно побудувати модель сигналу. Для цього в середовищі Matlab \ Simulink існує можливість створення форми сигналів за зразком. Для конструювання застосуємо нормовані моделі як по частоті так і амплітуді, надалі, для імітаційного моделювання легко провести деформування, через застосування масштабних коефіцієнтів по координатам зміни.

Первинна модель сигналу будується в Signal Builder підсистеми Simulink, а результат представлено на рис. 4.1. Для проведення моделювання сигнал оцінюватиметься за 32 дискретними відліками, що формуються після створення форми сигналу (рис.4.1). Результат експортується в головний модуль Matlab, де проводяться обчислення значень спектральних складових. Кількість значень спектральних складових не має бути великим, завдяки тому, що із зростанням номеру гармоніки амплітуда гармонічної складової різко зменшується. Але і кількість гармонік не має бути надто малою, для правильної оцінки наявності або відсутності сигналів біологічної природи.

Загалом кількість гармонік має бути від 5 до 10, на що вказується в суто медичних дослідженнях під час аналізу пульсової хвилі [32].

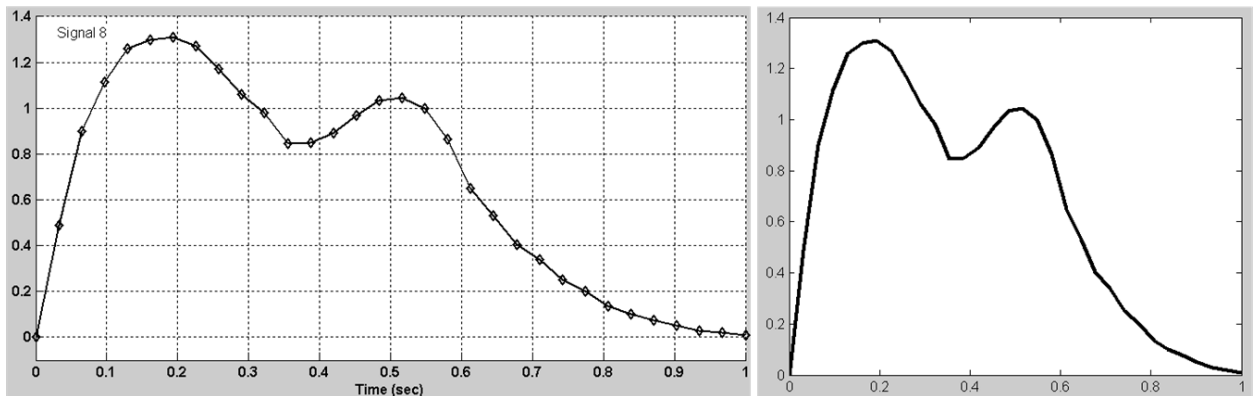


Рисунок 4.1 – Результат конструювання сигналу пульсової хвилі (ліворуч) у Simulink та його відтворення через трансляцію даних у Matlab

Як вже зазначалось, хаотичні виявники виявляють періодичні (гармонічні сигнали) і для побудови моделі періодизації сигналу застосовується модуль Simulink Repeating Sequence Interpolated (рис.4.2), в базу даних якого транслуються дискретні вибірки сигналу. Перевагою вказаного блоку є можливість часової інтерполяції під час налаштування обробки в Simulink потоком вибірок.

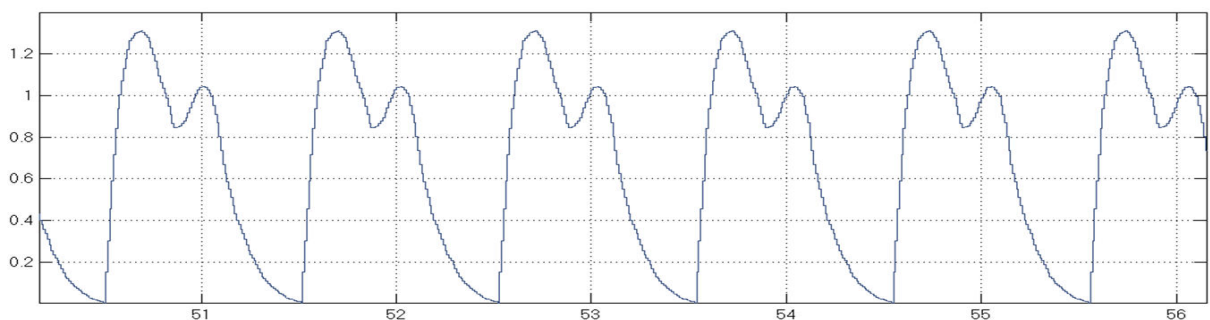


Рисунок 4.2 – Результат періодизації сигналу пульсової хвилі в Simulink

Робота ХВК полягає у виявленні наявності або відсутності окремих складових спектру сигналу пульсової хвилі, тому для медичної мети важливо знати співвідношення між цими складовими, які можливо обрахувати через

наявність форми сигналу і застосування швидкого або дискретного перетворення Фур'є за дискретизованим вибірками у часі.

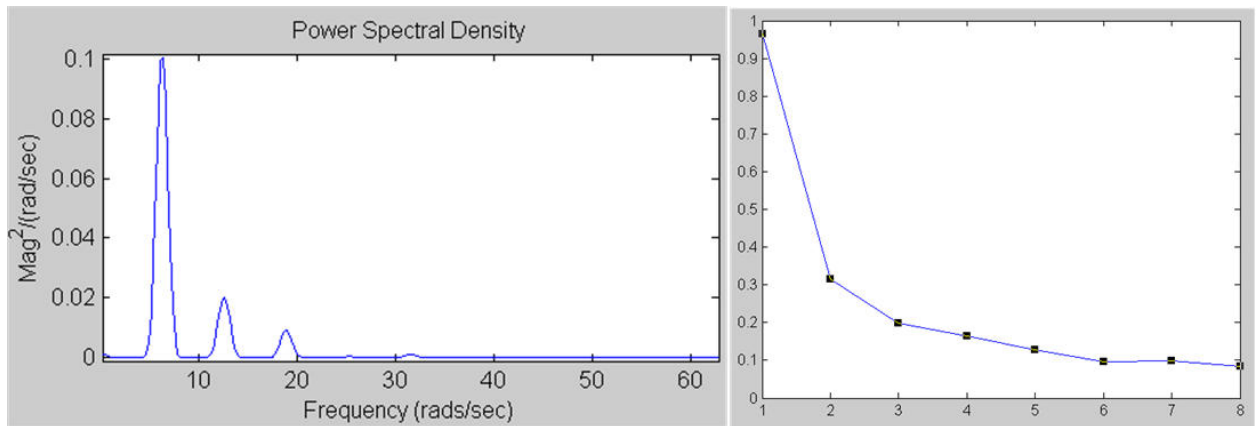


Рисунок 4.3 – Результат обчислення енергетичного спектру сигналу пульсової хвилі у Simulink(ліворуч) та його розрахунок через застосування швидкого перетворення Фур'є у Matlab

Результати обробки надходять у систему вимірювання амплітуд складових спектру для налаштування кожного хаотичного виявника системи комплексного виявлення окремо. Крім того можливо також застосування інформації про фазові співвідношення між складовими спектру для більш чутливого виявлення наявності спектральних складових під час роботи парціальних хаотичних виявників.

Аналогічним чином можливо провести конструювання і нейронного сигналу, а також інших характерних біологічних сигналів, що дозволять ввести в блок керування ХВК дані про виявлення спектральних складових слабких біологічних сигналів (див. додаток Г).

#### 4.2.1 Фільтрація хаотичних складових спектру

Для проектування фільтрів найбільш часто застосовують системи ортогональних поліномів і їх фільтруючі властивості наряду залежать від

того, якими саме поліномами моделюються їх передавальні функції. Дробно-раціональні поліноми мають нулі та полюси, і характер передавальної функції залежить від їх розташування на комплексній площині. На практиці широко використовуються фільтри, що відрізняються характерними рисами поліномів передавальних функцій. Це фільтри Баттерворта, Чебишева, Бесселя (Томсона), тощо (рис.4.4).

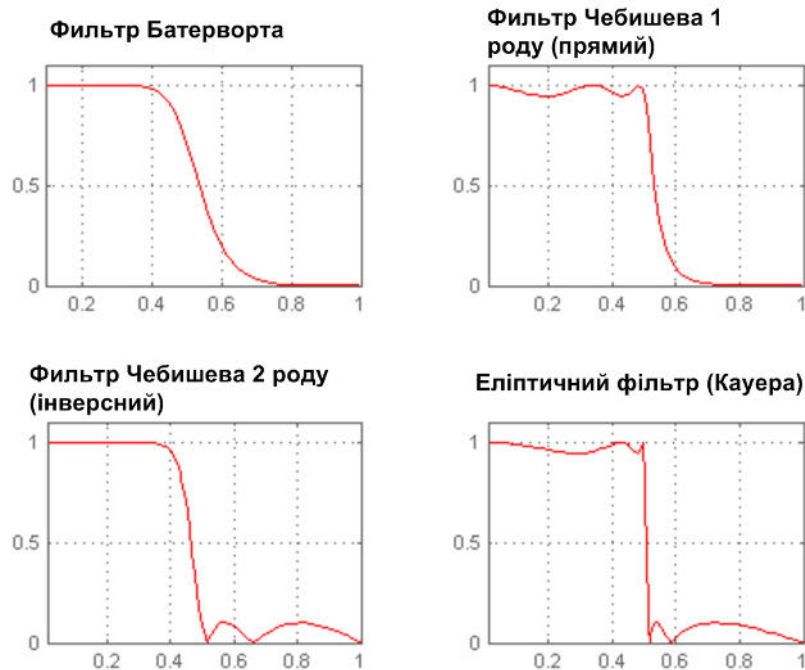


Рисунок 4.4 - Класифікація фільтрів за формою АЧХ під час поліноміального синтезу

Для ХВК потрібен ФНЧ і різким переходом до смуги придушення в зоні близько половини частоти опорного гененатора. Нахил АЧХ в смузі затримування визначається як  $6n$  дБ/октава, де  $n$  - кількість полюсів поліноміального опису передавальної функції. Маючи певний нахил АЧХ ФНЧ в перехідній зоні можна оптимізувати схему фільтра в напрямку максимально плоскої характеристики смуги пропускання за рахунок погіршення швидкості переходу АЧХ від смуги пропускання до смуги пригнічення і навпаки. Для побудови ХВК також може виявитися суттєвим

здатність фільтра у смузі прозорості пропускати без спотворень їх форми, що викликаються фазовими зсувами між спектральними складовими.

Під час вибору фільтра спочатку задаються необхідною рівномірністю АЧХ смуги прозорості і необхідне згасання на частоті поза смугою прозорості, а після цього вибирається тип фільтру із необхідною кількістю полюсів для задоволення цих вимог. Під час поліноміального опису, всі типи фільтрів підходять для побудови і фільтрів нижніх і верхніх частот і смугових фільтрів, тощо. Найбільш популярні типи фільтрів: фільтр Батерворта, фільтр Чебишева та фільтр Бесселя.

ФНЧ Батерворта забезпечує найбільш пласку характеристику смузі прозорості, що досягається за рахунок похилої характеристики в перехідній зоні і нелінійності ФЧХ, тобто через рівномірність АЧХ в такому фільтрі всі решта характеристики погіршуються. Його характеристика йде горизонтально і монотонно спадає до частоти зрізу (див. рис.4.4) на рівні -3 дБ.

ФНЧ Чебишева припускає деяку нерівномірність АЧХ у всій смузі пропускання, але при цьому сильно збільшується крутість її зламу в перехідній зоні. Для ФНЧ Чебишева наперед задають число полюсів та нерівномірність у смузі прозорості. АЧХ такого фільтра визначається як:

$$K(f) = \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{1}{\left[1 + \varepsilon^2 C_n^2\left(\frac{f}{f_3}\right)\right]^{0,5}} \quad (3.2)$$

де  $C_n^2$  - поліном Чебишева першого роду ступеня  $n$ ,

$\varepsilon^2$  - константа, що визначає нерівномірність характеристики в смузі пропускання.

Фільтри Чебишева і Батерворта мають фазочастотні характеристики, вельми далекі від ідеальних. Крім того, аналогові фільтри побудовані з реальних компонентів із допусками часто відрізняються від розрахункових, наприклад, фільтр Батерворта буде мати пульсації.

Раціональним вибором серед більшості вимог є рівно хвильовий фільтр Чебишева в смузі прозорості АЧХ якого розподілено кілька рівновеликих пульсацій, що визначаються порядком фільтра. Навіть за умови наявності малих пульсацій фільтр Чебишева забезпечує набагато кращу крутість спадання АЧХ в перехідній зоні за фільтр Батерворта за умови одного порядку.

Якщо із пульсаціями АЧХ під час застосування можливо знехтувати або змиритися, то застосовують еліптичний фільтр Кауера, в якому пульсації АЧХ допускаються присутні і у смузі пропускання, і у смузі пригнічення. За рахунок цього крутість перехідної ділянки АЧХ навіть більше за фільтр Чебишева.

У системах передачі сигналів збереження форми сигналу має першорядне значення, що передбачає рівномірну АЧХ та рівномірний груповий час затримки (ГЧЗ) в зоні прозорості. Наближається до таких вимог фільтр Бесея, але за рахунок найгіршої крутості перехідної характеристики. Існує і решта фільтрів для покращення передачі форми сигналу, але для хаотичних коливань форма не є важлива, важливий результат фільтрації, так як надалі за схемою розташований інтегратор значень, що реалізує обчислення енергії відфільтрованих складових.

Виходячи із того що фільтрації підлягає псевдовипадковий сигнал, наявність пульсацій АЧХ фільтра не є важлива, більш важливим є пригнічення в зоні затухання та крутість перехідної зони, звідки найбільш придатним для застосування в хаотичному виявнику є фільтр Чебишева із нерівномірністю у 3дБ і порядком 5-7 із точки зору простоти реалізації із дотриманням типових допусків компонентів схеми.

#### 4.2.2 Проектування фільтру хаотичного виявника

Для ХВК біологічних сигналів фільтр має бути налаштований на відповідні сигнали та їх спектри. Взнявши за основу вимоги, що накладаються

під час проектування фільтрів у середовищі Matlab (рис.4.5) та симуляції у Simulink синтез аналогового фільтру відбувається через розрахунок або коефіцієнтів поліному або значень нулів і полюсів передавальної функції. через це для проведення імітаційного моделювання синтезувати фільтр Simulink можливо декількома шляхами:

1. Цифровий синтез фільтру за допомогою додатку FDATool, та трансляція даних в середовище Simulink.

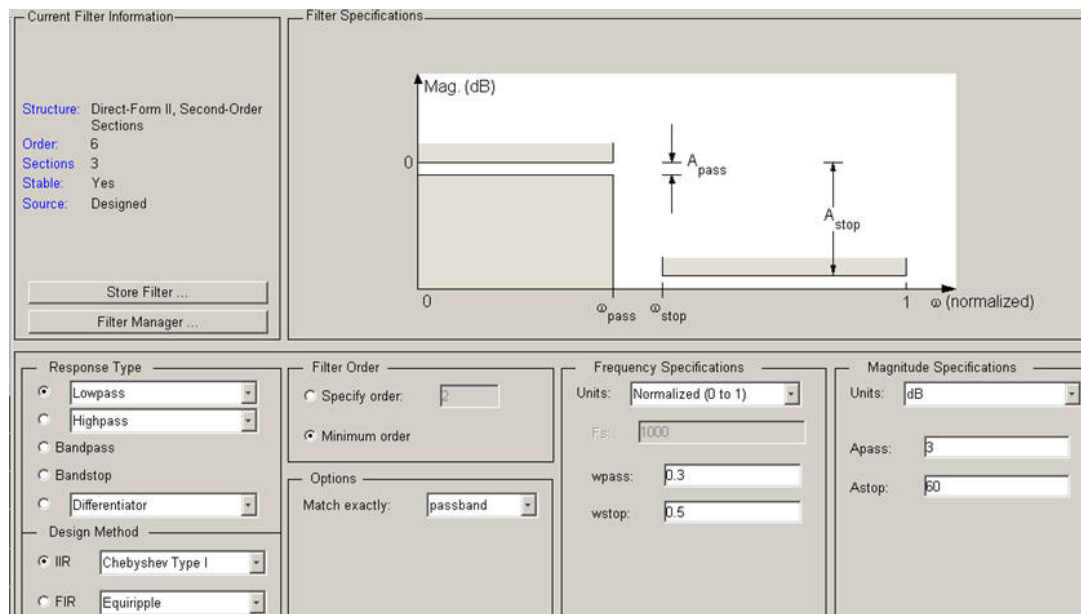


Рисунок 4.5 – Вихідні дані та порядок фільтру хаотичного виявника сигналів пульсової хвилі

2. Аналоговий синтез за допомогою спеціалізованих функцій синтезу фільтрів в основному середовищі Matlab та передачі даних у Simulink через поліноміальні коефіцієнти фільтру.

3. Аналоговий синтез за допомогою спеціалізованих функцій синтезу фільтрів основного модуля Matlab та передачі даних у Simulink через комплексні значення нулів та полюсів аналогового фільтру.

4. Індивідуальний синтез на базі власноруч розробленої програми Matlab, що генерує поліноміальні коефіцієнти (рис.4.6) або комплексні значення

нулів та полюсів, які надалі транслюються в Simulink для реалізації аналогового моделювання.

Найбільш обґрунтований варіант це використання вбудованих, добре відпрацьованих аналогових функцій розрахунку фільтру у середовищі інтерпретатора Matlab.

Раніш визначено і обґрунтовано тип фільтру – Чебишева 1 роду, що передбачаю наявність пульсацій АЧХ в зоні прозорості та монотонність її спадання із зростанням частоти в зоні придушення.

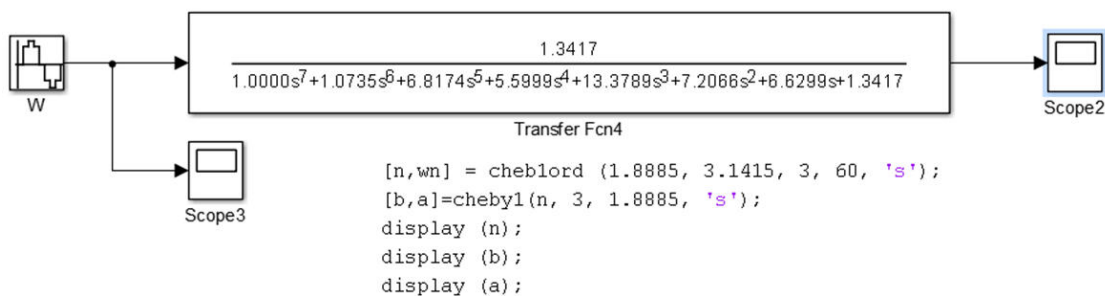


Рисунок 4.6 – Перевірочна модель Simulink та програма для розрахунку фільтру 7-го порядку хаотичного виявника сигналів пульсової хвилі

Щодо рівня пульсацій АЧХ в зоні прозорості  $A_{pass}$ , (див. рис.4.5) то для забезпечення значного пригнічення ( $A_{stop}$ ) за допомогою фільтра Чебишева необхідно збільшити їх рівень, але збільшення рівню може призвести до хибного пропуску субгармонічних складових спектру хаотичного сигналу, тому вибір глибини пульсацій оберемо компромісно, зважаючи на близький до рівномірного спектр субгармонік СДХ – 3дБ (за енергетикою – вдвічі).

Для будь-якого фільтру слід добиватись максимального значення  $A_{stop}$  для певних частот. В нашому випадку такою частотою є значення частоти першої гармоніки (близько 1Гц), що в неавтономному генераторі Дафінга складає близько 20дБ (рис.2.1) відносно складових спектру хаосу. Отже пригнічення ФНЧ ХВК має бути значно більшим, але не набагато більшим з

точки зору отримання реального фільтру для реалізації і пришвидшення імітаційного моделювання. Встановимо це значення рівним 60 дБ для пригнічення на половинній частоті від значення першої гармоніки. Якщо пригнічення на частоті гармоніки буде більше 60дБ, то пригнічення решти гармонік комплексного сигналу ХВК буде ще більшим.

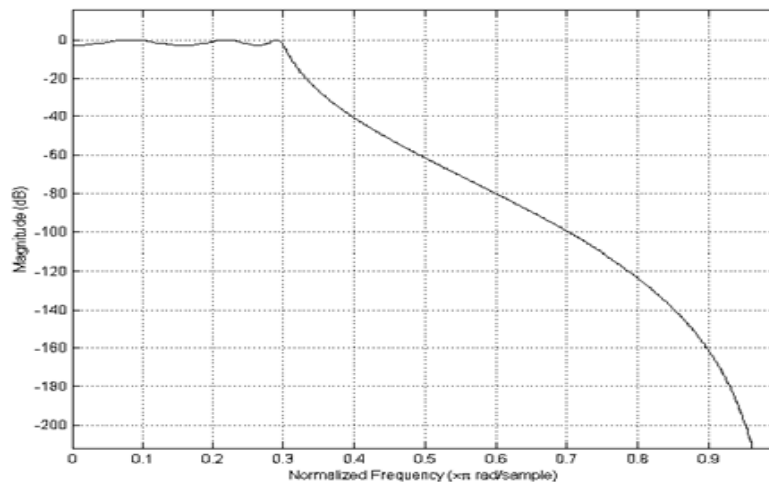


Рисунок 4.7 – Нормована АЧХ фільтру хаотичного виявника сигналів пульсової хвилі

Із визначенням всіх необхідних вхідних даних для розрахунку ФНЧ ХВК складемо програму Matlab для отримання поліноміальних коефіцієнтів фільтру Чебишева першого роду (рис. 4.7). Під час розрахунку отримаємо, що необхідний порядок фільтру складає – 7, а всі коефіцієнти поліному є додатними, що говорить про правильність синтезу та стабільність синтезованої фільтруючої схеми. Для отримання моделі Simulink транслюємо коефіцієнти в блок фільтрації (див. рис.4.6), що дає структуру фільтру. Точкові перевіірочні розрахунки підтверджують адекватність синтезу вбудованими функціями Matlab.

Перевірку форми АЧХ (рис.4.7) реалізуємо в додатку FDATool через використання зони нормованих частот (див. рис.4.5), яка чисельно приблизно співпадає із частотою повторення пульсової хвилі людини.

Слід зазначити що із збільшенням порядку фільтру під час використання в середовищі Simulink збільшується час розрахунків, тому під час імітаційного моделювання системи можливе затягування отримання результатів та виникає потреба в потужних комп'ютерах, або кластерному аналізі даних.

### 4.3 Імітаційне моделювання полігармонічного виявника

#### 4.3.1 Імітаційна модель полігармонічного виявника

Імітаційна модель виявника розроблена та промодельована в середовищі Simulink (рис.4.8) сигналів із складним спектром використовує вже сконструйований сигнал пульсової хвилі як вхідний сигнал, та розроблені раніше фільтри субгармонік, для визначення різких переходів ГДХ із хаотичного режиму в періодичний та навпаки.

Основою імітаційної моделі є субмодуль неавтономного генератора Дафінга із кубічною нелінійністю та амплітудним керуванням режимами. Дослідження сигналів в моделі можливо проводити через подання різних типів періодичних сигналів на фоні флуктуаційних завад із різноманітними розподілами миттєвих значень.

Визначення значення режимів відбувається після його встановлення через 50...100 елементарних циклів розрахунків, що викликає в роботі виявника принципову затримку видачі результату виявлення. Час входження в синхронізм яскраво видно на фазових портретах (фазових діаграмах) паралельної роботи ідентичних за схемою генераторів, що введено в різні режими.

Під час побудови виявника було перевірено велику кількість критерії фіксації переходу із режиму в режим, що ґрунтуються на низькочастотній фільтрації спектральних складових хаотичного сигналу. Під час таких

перевірок сформувався остаточних енергетичний критерій виявлення, що полягає у визначення енергії флуктуацій у відфільтрованому періодичному або хаотичному коливанні неавтономної НДС. Відношення показників під час переходу із режиму в режим для такого критерію поряд рештою, наприклад, критерію середньо випрямлених значень є найбільшим.

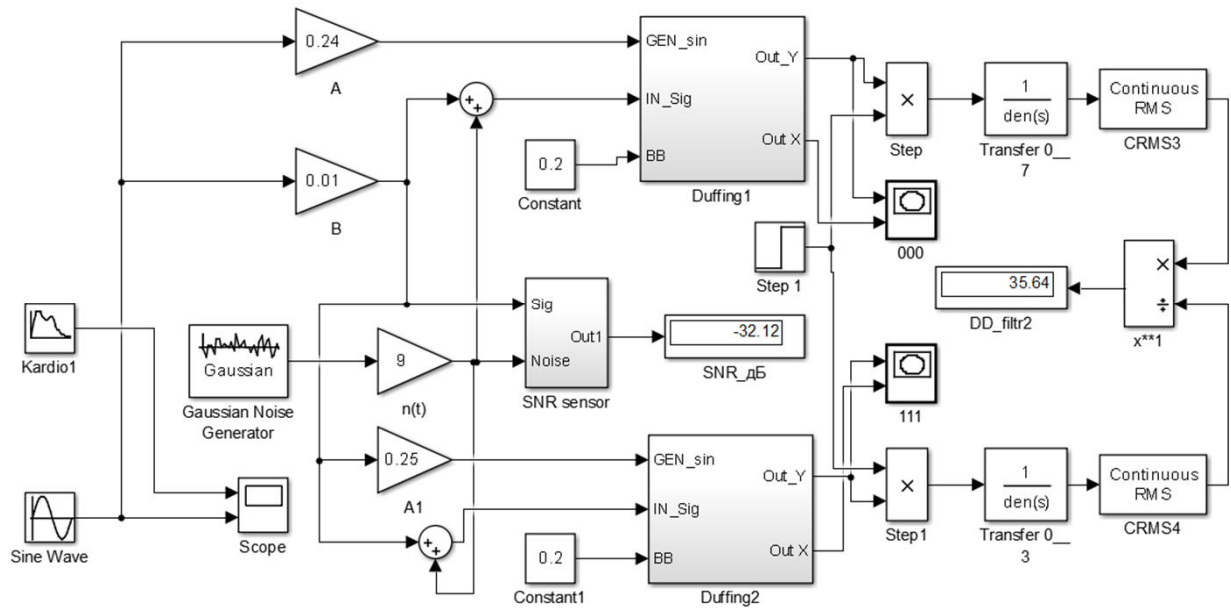


Рисунок 4.8 – Імітаційна модель дослідження полі гармонічного виявника слабких сигналів (-32дБ)

Для реалізації обчислення енергії або середньої потужності сигналів в системі Simulink присутній спеціалізований блок CRMS, що дозволяє легко це зробити. Аналогічні результати генерують і субмодулі визначення середньоквадратичного значення, що представлені в додатку В. Також в цьому додатку до дипломної роботи магістра представлена структура субмодуль, що реалізує вимірювання відношення потужності завади до потужності шуму – SNR.

Середній час отримання поодинокого результату для середнього класу персональної обчислювальної техніки складає до 5 хв. Середній час отримання фазових портретів може сягати до 30 хв. Значення всіх сигналів під час попереднього аналізу роботи виявника не знаходяться в амплітудних

межах до 10В. Регулювання значень біфуркаційних параметрів та параметрів генераторів сигналів реалізовано за допомогою лінійних підсилювачів та спеціалізованих блоків – констант.

Таким чином, створена імітаційна модель дозволяє проводити симуляцію одночасно двох НДС, що відбивають два режиму роботи, тобто досліджувати перехід системи із одного режиму роботи в інший за певних умов, обставин, значень біфуркаційних параметрів, тощо.

#### 4.3.2 Частотний ресурс хаотичного виявника

Поняття частотного ресурсу передбачає отримання деякої частотної залежності, що припускає визначення ширини робочої зони виявника. Хаотичний виявник через встановлення критичного режиму роботи може переходити або у хаотичний режим або у періодичний режим. Головна відмінність між режимами полягає у формі сигналу, але не тільки, важливий також спектральний склад та загальна енергетика, що визначається апертурою та формою отриманого атратора (рис.4.9).

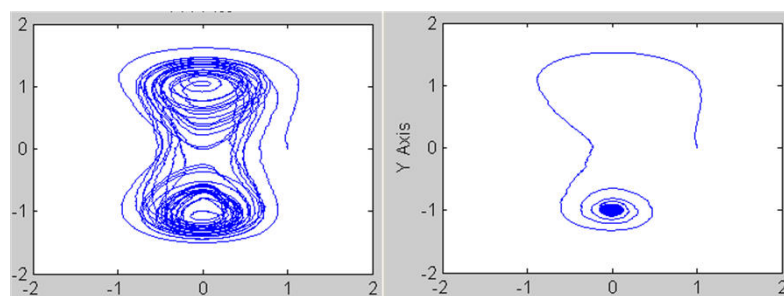


Рисунок 4.9 – Фазові портрети виявлення слабких сигналів у хаотичному та періодичному режимах для слабких сигналів (-32дБ)

Найбільш часто зустрічається форма дивного атратора типу «подвійний завиток», де фазова змінна, проходячи по фазовій траєкторії витрачає більше часу на переміщення, ніж під час руху по простому

атрактору типу замкнене коло або тор, не кажучи вже про спіральні атрактори, що прямують до деякої точки та зупиняють надалі свій рух.

Велика перевага НДС і полягає, що під час руху фазовою площиною система зберігає свій характер поведінки навіть за умови потужних флуктуаційних завад, а за умови дії періодичного сигналу може змінити характер поведінки, що і дозволяє будувати хаотичні виявники слабких сигналів.

Більш чітке виявлення періодичних сигналів хаотичним виявником на базі НДС Дафінга можливе у першій перехідній зоні, де дія періодичного сигналу обумовлює перехід системи із періодичного режиму до хаотичної моди із суттєвим збільшенням аперттури атрактора по всім фазовим змінним.

Під час досліджень встановлено, що не всі фазові змінні мають високу чутливість до змін енергії низькочастотних складових. Для схеми на рис.3.1. такою змінною є змінна «у», крім того, в сигналі на такому виході НДС відсутня постійна складова, що обумовлює еквівалентність значень повної енергії сигналу та енергії флуктуацій.

Під час досліджень встановлено, що не всі фазові змінні мають високу чутливість до змін енергії низькочастотних складових. Для схеми на рис.4.8. такою змінною є змінна «у», крім того, в сигналі на такому виході НДС відсутня постійна складова, що обумовлює еквівалентність значень повної енергії сигналу та енергії флуктуацій.

Можливо було б використання комплексного критерію на основі аперттури атрактора [14], але практика показала відмінні результати на базі простого енергетичного критерію за умови суттєвих значень постійних складових в сигналах, крім того застосування простого критерію відношення енергій сигналів субгармонік дозволяє різко пришвидшити отримання кінцевого результату симуляції.

Перевірка частотних властивостей залежності критеріального відношення енергій сигналів проводилась за умов відношення сигнал шум близько -30дБ , тобто сигнал, по відношенню до завади за енергетикою був

меншим більш як в 1000 разів і тим не менше призводив до зміни моди режиму генератора Дафінга в певному діапазоні частот.

Значення ширини цього діапазону обумовлюється характером частотної залежності (рис.4.10), яка і досліджувалась. В результаті досліджень було виявлено, що:

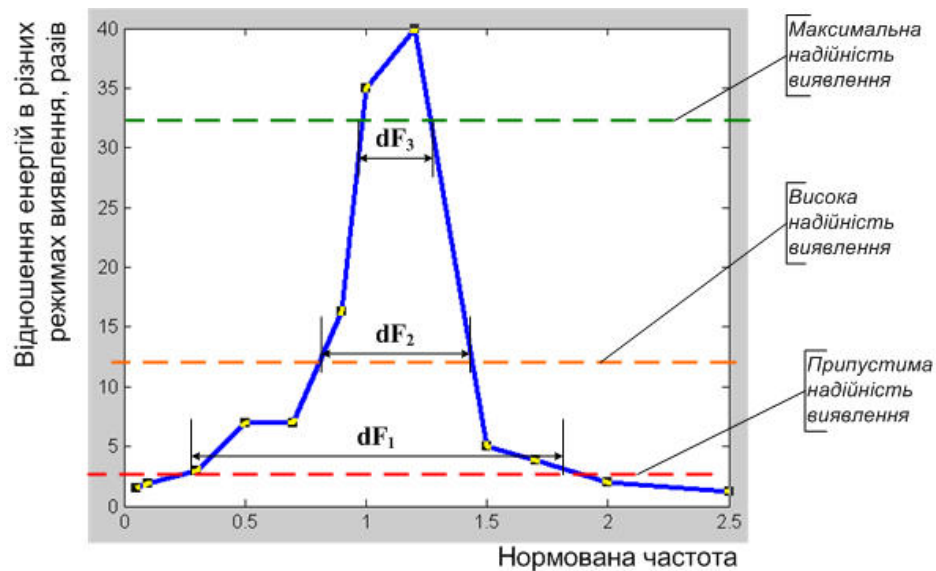


Рисунок 4.10 – Частотна залежність порогу виявлення для слабких гармонічних сигналів (SNR=-32дБ)

1. Характер частотної залежності порогу виявлення за енергетичним критерієм має дзвоноподібний характер, що говорить про найбільшу оптимальність виявлення гармонічних сигналів, але не заперечує виявлення полігармонічних сигналів, які частково або повністю попадають в ширину смуги частотної залежності.

2. Надійність виявлення, або ймовірність правильного виявлення сигналу із широким спектром залежить від встановленого рівня порогу обробки. Зазвичай рівень встановлюють більше 2, тобто якщо енергія сигналу субгармонік збільшилась вдвічі, відносно значення під час періодичного режиму і навпаки, то приймається рішення що сигнал наявний у суміші, або відсутній.

3. На графіку залежності умовно можливо виділити три робочі зони із різною шириною смуг. Зона припустимої надійності виявлення має значення порогів від 2 до 5...7 і дозволяє працювати і полі гармонічними сигналами у діапазоні частот до декади. Зона високої надійності виявлення має поріг від 5..7 до 14..15 і дозволяє обробляти сигнали в діапазоні декілька октав. І максимальну надійність виявлення та діапазон менше октави забезпечує зона де пороги більше 17...20, саме в цій зоні стає можливість виявляти гармонічні сигнали із значним від'ємним відношенням сигнал-завада.

За даними результатів досліджень наукових медичних фахівців для аналізу стану серцево-судинної системи необхідно застосовувати перші декілька гармонік, тобто ширина робочої смуги ХВК, за даними проведених досліджень дозволяє це робити.

#### 4.3.3 Результати хаотичного виявлення сигналів пульсової хвилі

Головною перевагою ХВК, що недосяжна для інших виявників, є можливість роботи із сигналами, що за енергією набагато менше завад, тобто «під рівнем» шуму (рис.4.11).

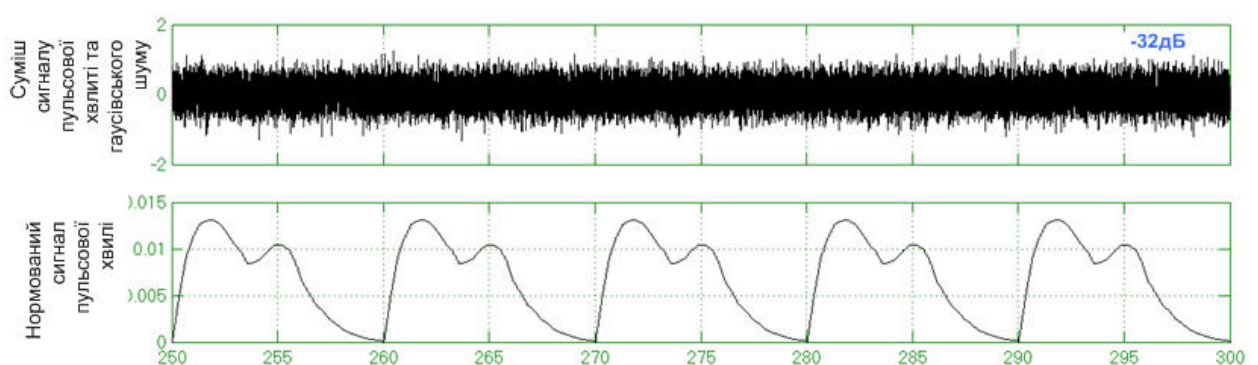


Рисунок 4.11 – Форма сигналу пульсової хвилі під дією гаусівського шуму на рівні -32 дБ, що придатний для виявлення у хаотичному виявнику

В такому випадку, застосовуючи навіть класичні оптимальні виявники навіть визначити факт наявності сигналу у суміші утруднено, але це

дозволяють зробити нелінійні методи обробки. Наприклад, якщо пульсову хвилю людини вимірювати безконтактним віддаленим методом (радіозондом) то такі проблеми можуть виникнути і першим завданням перед вторинною обробкою є надійне виявлення факту наявності сигналу, що дозволяє зробити хаотичний виявник.

Під час симуляції схеми для імітаційних досліджень параметри генерованого сигналу пульсової хвилі обирались відповідно припустимій та високій надійності виявлення. В результаті симуляції отримано залежність критеріального порогу виявлення від відношення сигнал-завада, що можливо інтерпретувати як характеристику виявлення.

Попереднє оцінювання ситуації проводилось через використання фазових портретів (рис.4.12) для яких було виявлено наступні особливості:

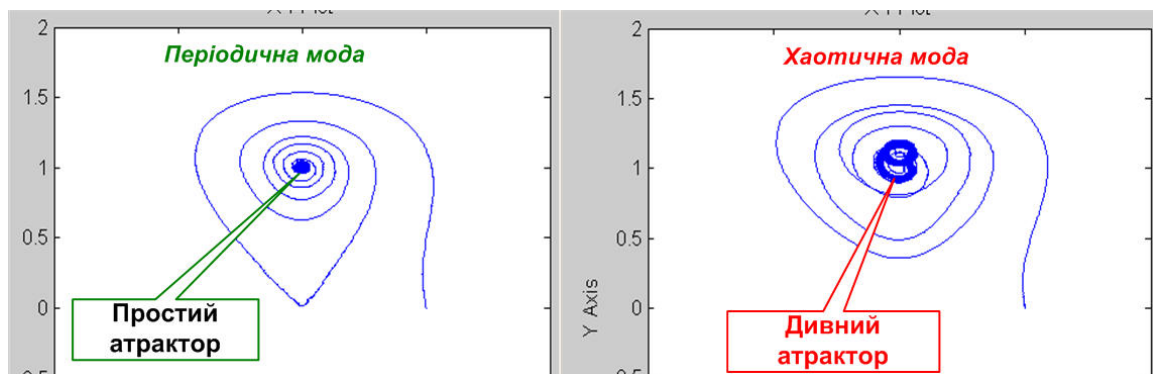


Рисунок 4.12 – Фазовий портрет виявлення сигналів пульсової хвилі за умови відношення сигнал-завада для  $SNR = -32$  дБ

1. Тип входження в синхронізм із зовнішнім сигналом або його гармоніками спіралеподібний або репелерний.
2. Дивний атрактор, як і в випадку класичного атрактора Дафінга має характер «подвійний завиток».
3. Значення аперттури атрактора складають близько 1В для хаотичної моди і періодичної моди.

Таким чином, характер нелінійної поведінки системи під час дії полі гармонічного сигналу не змінюється і його можливо використати для

виявлення біомедичних сигналів та наступного аналізу із метою діагностики стану організму людини.

Для підтвердження таких висновків було проведена симуляція дії полігармонічного сигналу пульсової хвилі на хаотичний виявник за умови різної потужності БГШ. Також проводився аналіз дії шуму із рівномірним розподілом, але він не виявив особливих розбіжностей результатів, тому наводяться результати тільки для БГШ (рис.3.1).

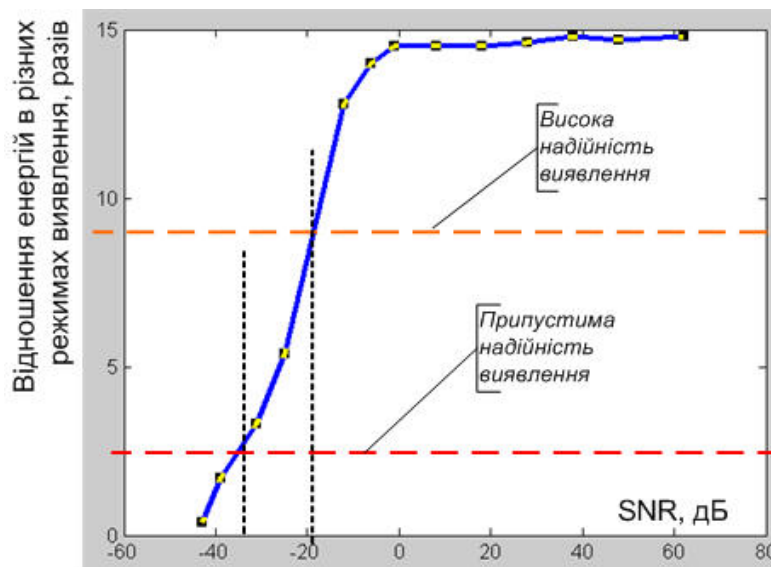


Рисунок 4.13 – Залежність порогу виявлення для слабких зашумлених сигналів пульсової хвилі від відношення сигнал-шум

За результатами проведених імітаційних досліджень виявлення біологічного сигналу можливе із високим рівнем надійності до  $SNR = -20$  дБ, а із припустимим рівнем надійності до  $-37$  дБ.

Запропонований метод можливо використати для безконтактного виявлення сигналів пульсової хвилі за допомогою радіо сенсорів, що особливо актуально в умовах пандемії пов'язаною із хворобою COVID19. Рекомендується продовжити дослідження запропонованих методів виявлення слабких періодичних сигналів за запропонованими методиками досліджень із застосуванням більш потужних обчислювальних засобів.

## ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз класичних методів виявлення слабких сигналів, розглянуто основні поняття виявлення та різновиди оптимальної обробки сигналів з метою виділення факту їх наявності в умовах завад, що набагато перевищують рівень сигналу. Показано, що всі класичні методи обробки слабких сигналів відповідають лінійній обробці за допомогою накопичення, а їх виявлення ґрунтується на застосуванні статистичних критеріїв.

2. Розглянуто застосування некласичних методів обробки сигналів, що полягають у застосуванні нелінійних динамічних систем із можливістю перебування у різних модах генерації сигналів детермінованого хаосу або генерації періодичних сигналів, що характеризуються різними типами атракторів фазового портрету, а саме дивним та простим (кільцевим) атрактором. Показано яким чином наявність різних мод НДС можливо застосувати для завдань виявлення слабких сигналів на тлі флуктуаційних завад та якими засобами забезпечують детектування режимів НДС із найвищим ступенем надійності.

3. Проведено розгляд можливостей оптимальної обробки біологічних сигналів, серед яких найбільш важливими виділено сигнали серцево-судинної систем людини та нейросигнали головного мозку, що є найбільш актуальними для виявлення на тлі завад, що набагато перевищують за рівнем досліджувані сигнали, запропоновано для виявлення цих сигналів в умовах дистанційних досліджень використовувати нелінійні способи обробки із застосуванням нелінійної схеми Дафінга та аналізу субгармонік сигналу детермінованого хаосу, що характеризує стан (моду) такої нелінійної динамічної системи. Показано можливості виявлення сигналів запропонованими методам на рівні сигнал – завада до -40дБ.

4. Запропоновано розглядати хаотичний виявник як систему із частото-залежним виходом і на базі такого припущення запропоновано схему хаотичного виявника, що складається і декількох неавтономних нелінійних

динамічних систем із переналаштовуваними біфуркаційними параметрами, які дозволяють керувати частотною залежністю нелінійної фільтрації біологічних сигналів, що дозволяє проводити діагностичні дослідження ще під час виявлення слабких періодичних сигналів.

5. Обрано середовище моделювання (Matlab) та проведений синтез моделей біологічних сигналів, синтез фільтрів дискримінаторів нелінійних мод (Matlab+Simulink) та синтез імітаційних моделей хаотичних виявників (Simulink ) які дозволяють підтвердити працездатність запропонованих методів нелінійного хаотичного виявлення слабких періодичних біологічних сигналів на високому рівні надійності отриманих результатів.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Основи теорії кіл: Підручник для студентів вищих навчальних закладів. Ч.2. / Ю.О. Коваль, Л.В. Гринченко, І.О. Милютченко, О.І. Рибін / За загальною редакцією В.М. Шокала та В.І. Правди.— Харків, ТОВ «Компанія СМІТ», 2008, 560с.
2. Бакулев П. А. Радиолокационные системы: учебн. для вузов. – М.: Радиотехника, 2004. – 320 с.
3. Фалькович С.Е. Основы статистической теории радиотехнических систем / С.Е. Фалькович, П.Ю. Костенко. – Х.: ХАИ, 2005. – 389 с.
4. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория: справ. // Я. Д. Ширман [и др.]; под ред. Я. Д. Ширмана. – М.: ЗАО «Маквис», 1998. – 828 с.
5. Вентцель Е. С. Теория вероятностей и её инженерные приложения: учеб. пособие для втузов / Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. – 2-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2000. – 480 с.
6. Радиоприемные устройства: Учебник для вузов/ Н.Н. Фомин, Н.Н. Буга, О.В. Головин, В.С. Плаксиенко и др.; Под ред. Н.Н. Фомина. М.: Радио и связь, 2003. - 520 с. 2-е изд., испр. и доп.
7. Радиоприемные устройства: Учебник для вузов/ Н.Н. Фомин, Н.Н. Буга, О.В. Головин и др.; Под ред. Н.Н. Фомина. М.: Радио и связь, 1996. 512 с.
8. Певцов Г.В., Яцуценко А.Я., Карлов Д.В., Трофименко Ю.В., Клімішен О.О., Остапова А.М. Основи енергетичного виявлення-оцінювання параметрів радіосигналів / Г. В. Певцов [та ін.] // Сб. науч. трудов 4-го Международного радиоэлектронного форума (МРФ 2011). – Харьков, 2011. – С. 192–195.
9. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т. 3. М.: Сов. радио, 1977.

10. Ф. Уоссермен, Нейрокомпьютерная техника, М., Мир, 1992. 2. Artificial Neural Networks: Concepts and Theory, IEEE Computer Society Press, 1992.
11. Наука и обучение. Информация по нейронным сетям. URL: <http://www.91.ru/Education/>
12. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. /Пер. с польского – М: Финансы и статистика, 2004. – 344с.
13. Шахарин Б.И. и др. Генераторы хаотических колебаний: Учебн. пособие / Б.И. Шахарин, П.И. Кобылкина, Ю.А. Сидоркина, А.В. Кондратьев. – М.: Гелиос АРВ, 2007 – 248 с.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. Martynyuk, V., Fedula, M., Balov, O., Periodic signal detection with using Duffing system Poincare map analysis // Advances in Science and Technology Research Journal. Vol. 8, No. 22, June 2014. pp. 26 – 30.

20. 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.

21. Патрушева, Т. В. Синтез возможных путей построения измерительных преобразователей на основе генераторов хаоса [Текст] / Т. В. Патрушева // *Ползуновский альманах*. – Барнаул, 2012. – № 2. – С. 96–98.

22. Патрушева, Т.В., Выбор оптимальных режимов работы амплитудного измерительного преобразователя на основе генератора хаоса // *Ползуновский альманах*. № 2. 2012. С. 104 – 107.

23. Патрушева, Т. В. Качественный анализ динамики измерительного преобразователя на основе неавтономного генератора хаоса / Т. В. Патрушева, Е. М. Патрушев // *Ползуновский альманах*. – 2011. – № 1. – С. 10-13.

24. 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>

25. Мачехин Ю. П. Физические основы метрологии нелинейных динамических систем / Ю. П. Мачехин, Ю. С. Курской // *Украинский метрологический журнал* - 2017 - N 1 - с. 8-10.

26. 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

27. 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>.

28. 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.

29.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.

30.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.

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

32.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.

33.Бороноев, В.В., Павлов А. Е., Омпоков В. Д. Оценка уровня тренированности организма человека на основе спектрального анализа пульсовых сигналов // Биомедицинская радиоэлектроника. 2013. No 2. с. 13–16.

34.Бороноев, В.В., Гармаев Б. З., Цыдыпова Е. Д. Спектральные характеристики пульсового сигнала при нарушении гемодинамики // Журнал радиоэлектроники: электрон. журн. No 10. 2010. URL: [http://jre.cplire.ru/jre/library/Ulan-Ude-2010/pdf/files/s2\\_34](http://jre.cplire.ru/jre/library/Ulan-Ude-2010/pdf/files/s2_34).

35.Дьяконов, В. П. MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров / В.П. Дьяконов. - М.: ДМК Пресс, 2016. - 976 с.

36.Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. - М.: ДМК Пресс, 2011. - 288 с.

ДОДАТОК А

КЛАСИЧНІ СХЕМИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ

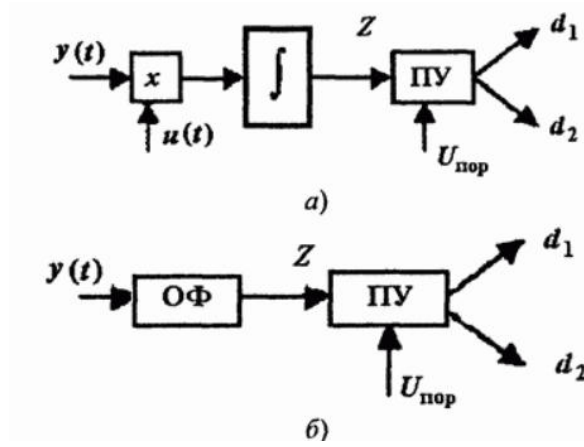


Рисунок А.1 – Структурні схеми когерентних виявників сигналів:

а) кореляційна схема; б) схема на базі узгодженого фільтра

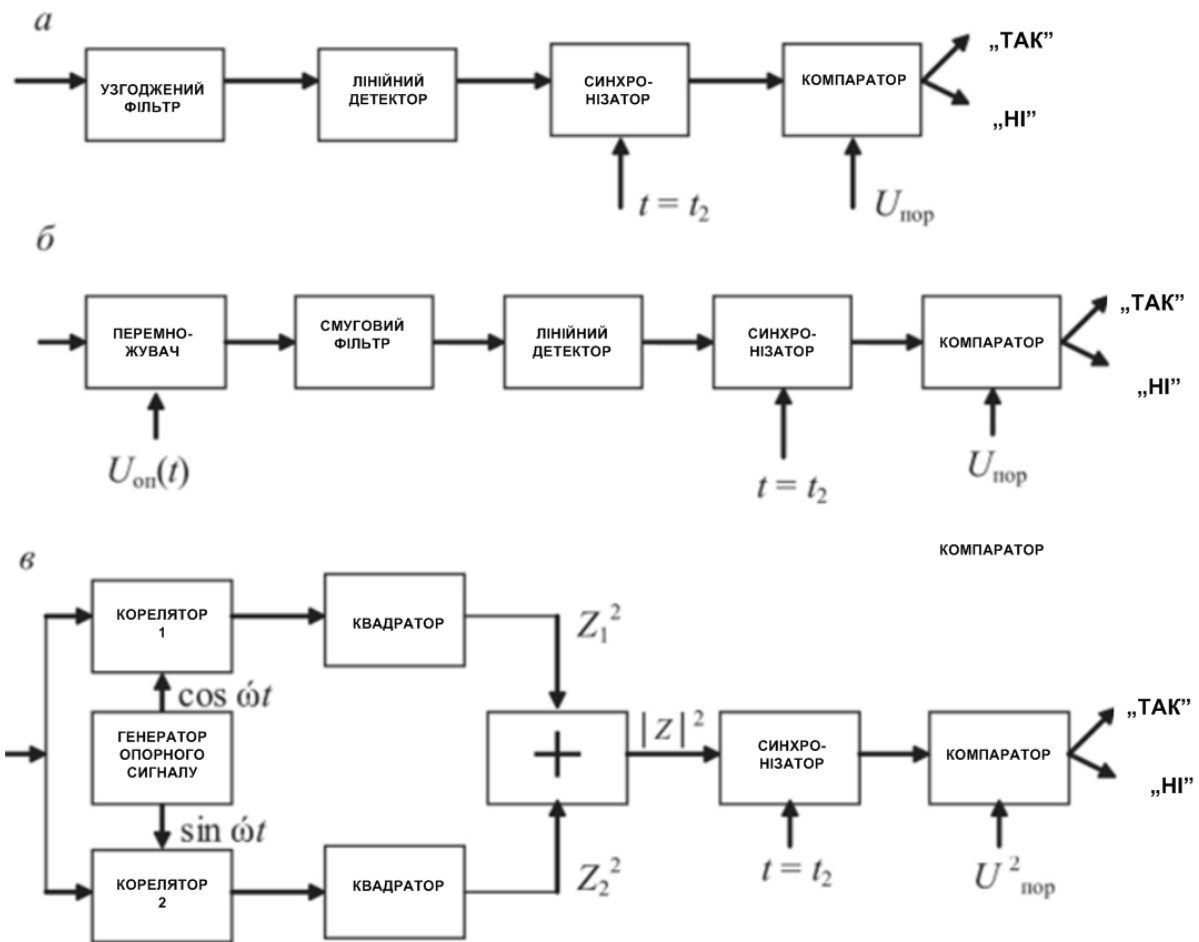


Рисунок А.1 – Структурні схеми некогерентних виявників поодиноких імпульсів:

а) фільтрова схема; б) кореляційно – фільтрова схема; в)

квадратурна схема

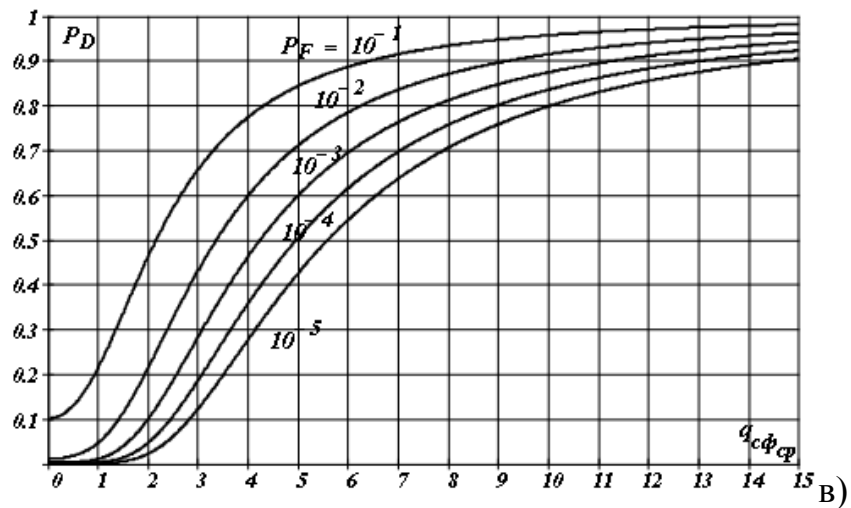
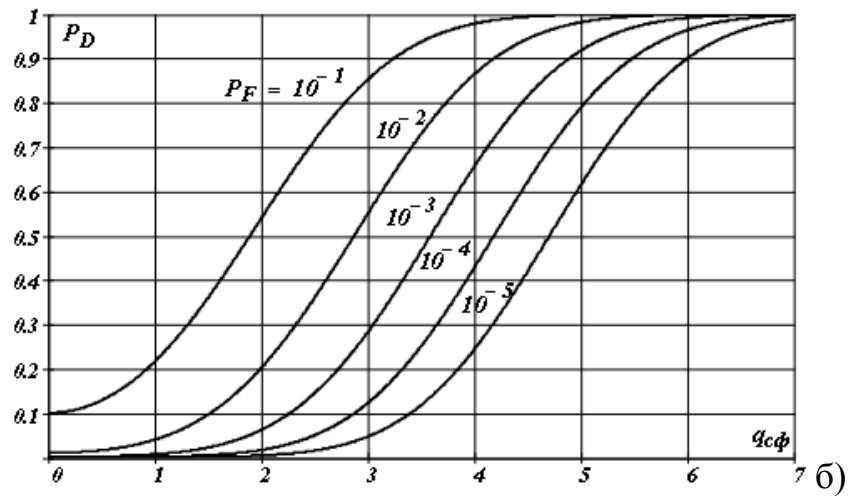
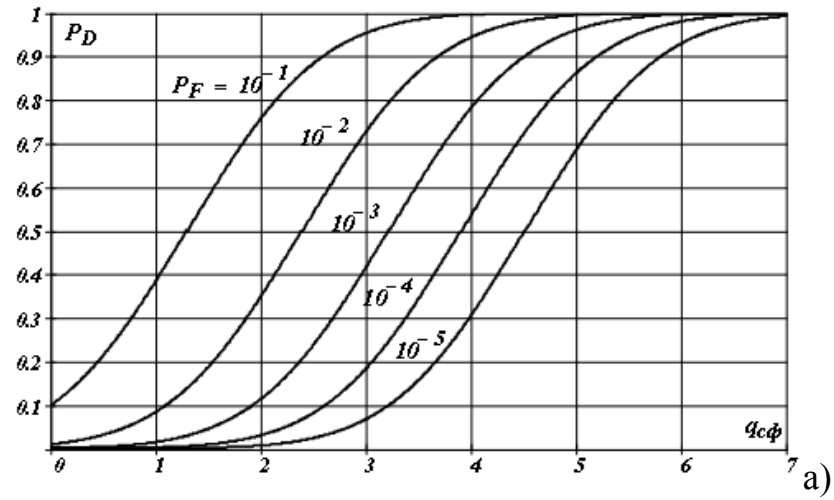


Рисунок А.2 – Характеристики виявлення:

- а) повністю відомого сигналу; б) сигналу із невідомою початковою фазою; в) сигналу із невідомою початковою азєю і невідомою амплітудою

ДОДАТОК Б

НЕЛІНІЙНІ ДИНАМІЧНІ СИСТЕМИ ІЗ ХАОТИЧНИМИ МОДАМИ

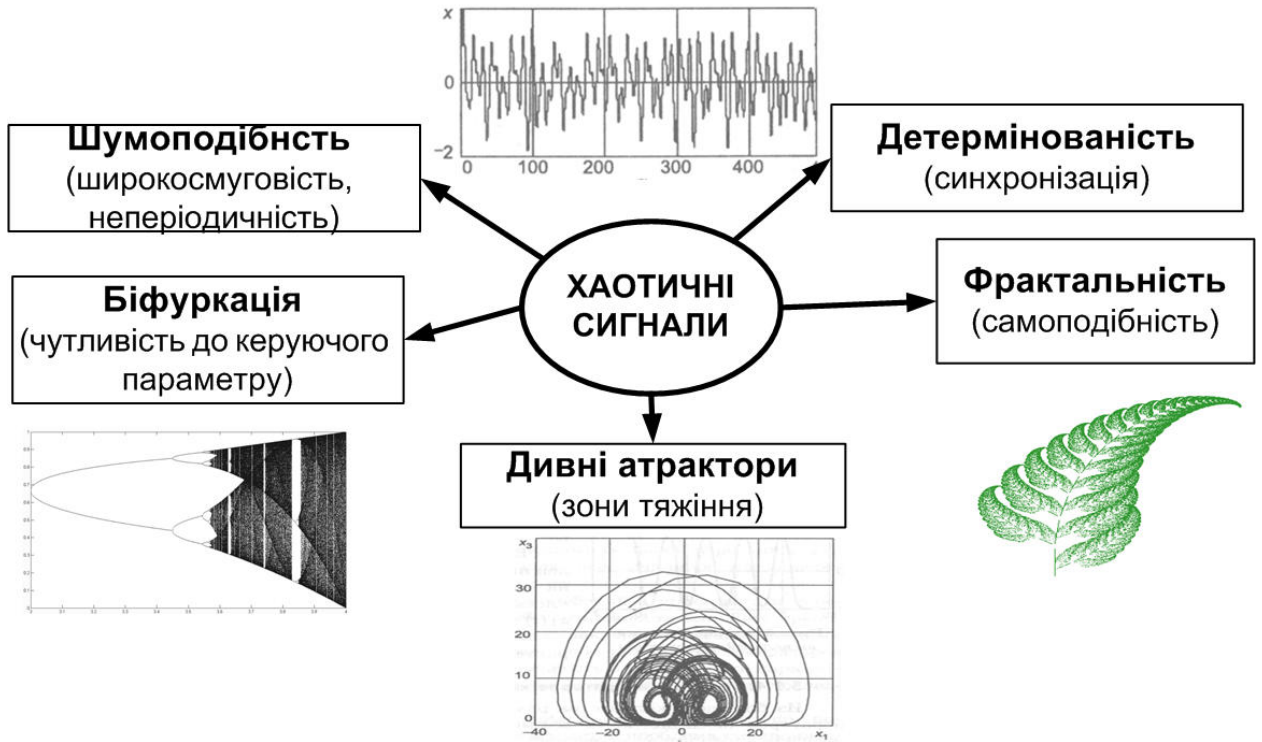


Рисунок Б.1 – Візуалізація особливостей хаотичних сигналів та систем



Рисунок Б.2 – Класифікація досліджуваних параметрів хаотичних сигналів

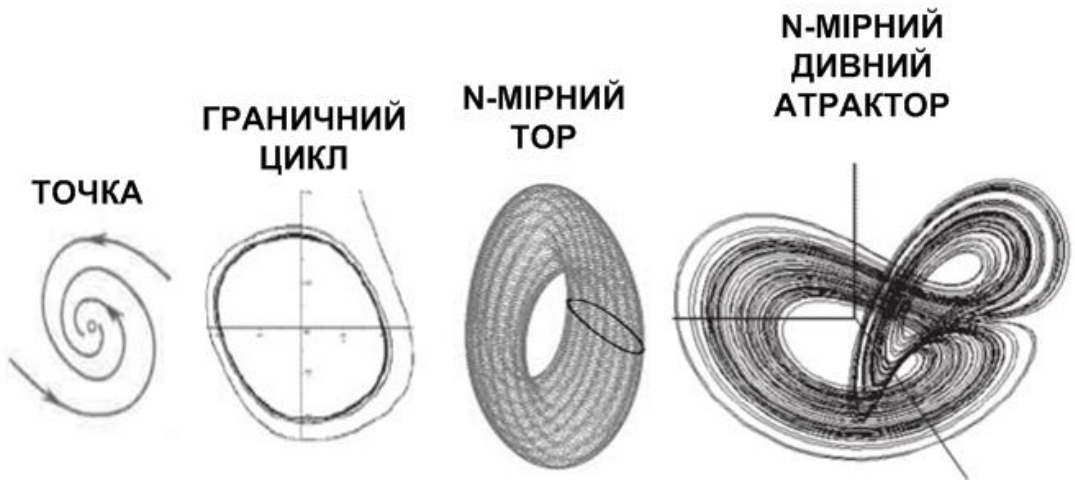


Рисунок Б.3 – Всі типи атракторів, що характеризуються стійкі стани нелінійних динамічних систем

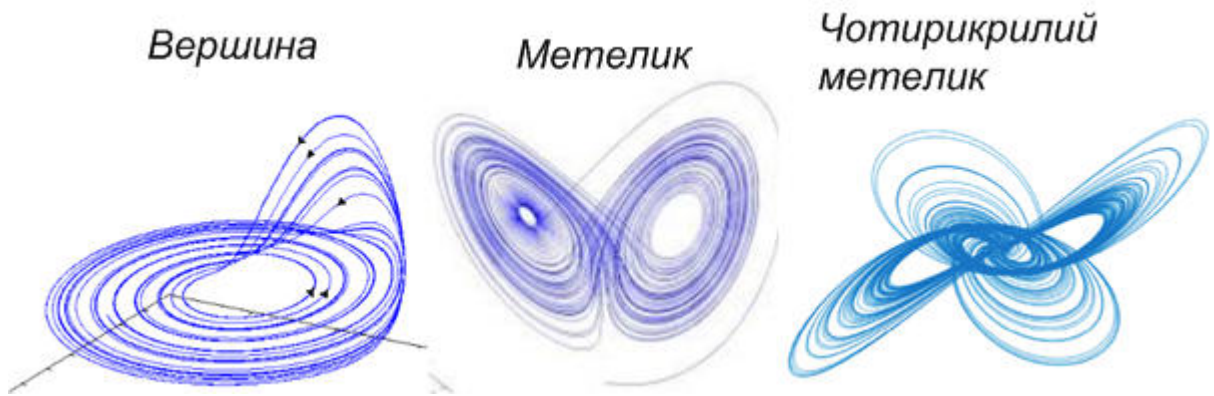


Рисунок Б.3 – Найбільш поширені форми дивних атракторів

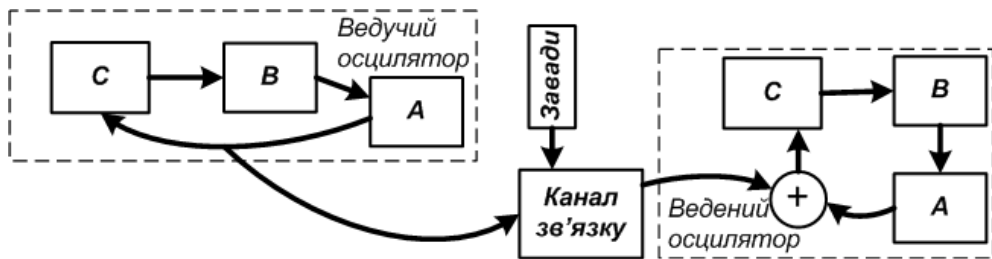


Рисунок Б.3 – До пояснення принципу декомпозиції під час забезпечення хаотичної синхронізації нелінійних динамічних систем

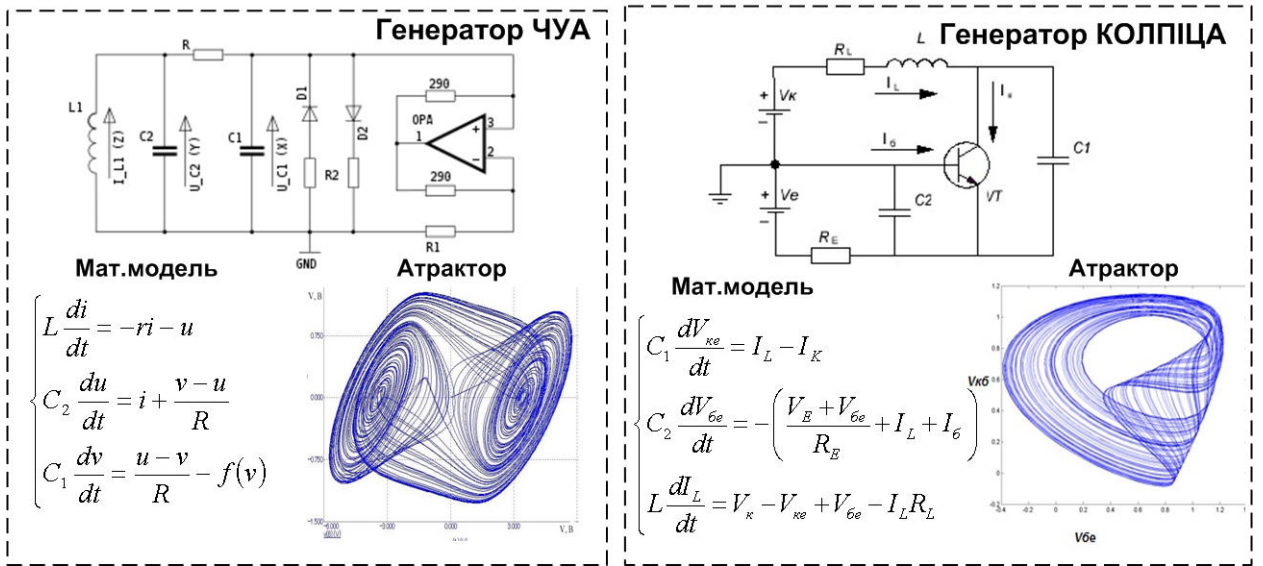


Рисунок Б.3 – Приклади моделей базових хаотичних генераторів та візуалізація форми їх дивних атракторів

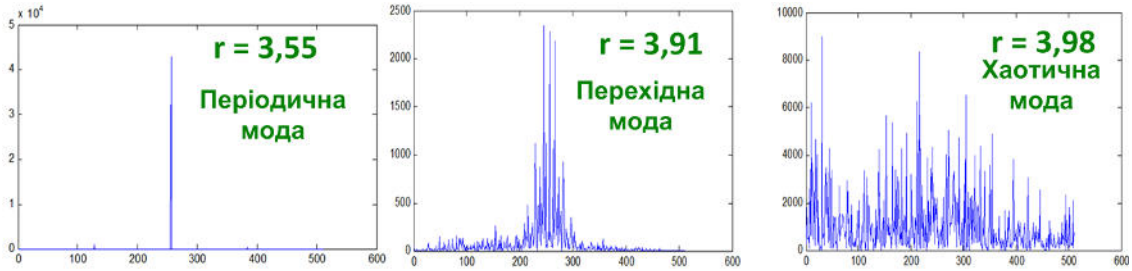


Рисунок Б.4 – Спектри хаотичних сигналів дискретного логістичного генератора із різними модами під час різних керуючих параметрів



Рисунок Б.5 – Класифікація способів ідентифікації хаосу в нелінійній динамічній системі

## ДОДАТОК В

### МОДЕЛІ MATLAB\ SIMULINK

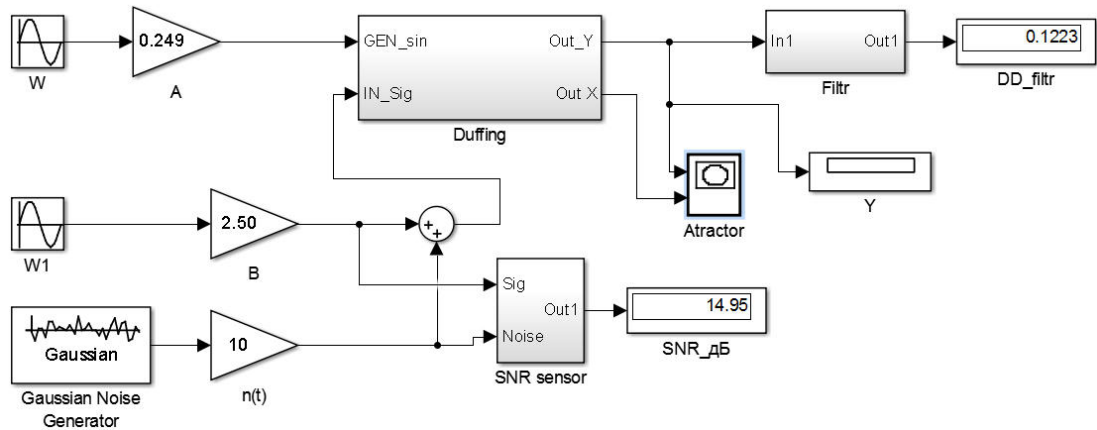


Рисунок В.1 – Імітаційна модель виявника на основі НДС Дафінга для дослідження із урахуванням зовнішнього сигналу та завад

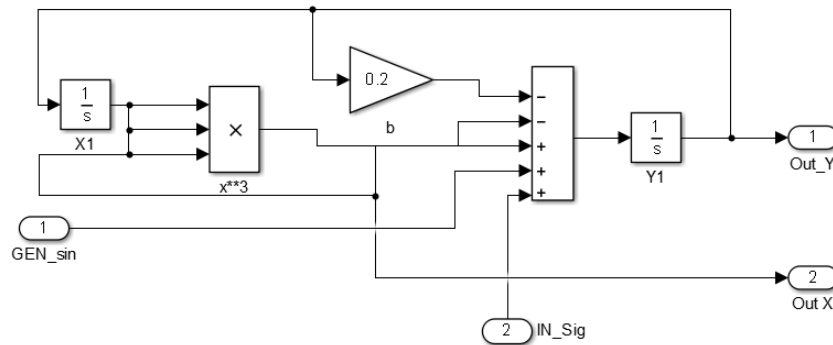


Рисунок В.2 – Імітаційна субмодель НДС Дафінга (Duffing)

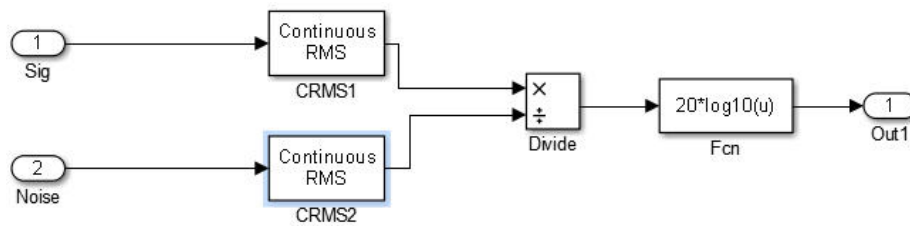


Рисунок В.3 – Імітаційна субмодель вимірювача SNR

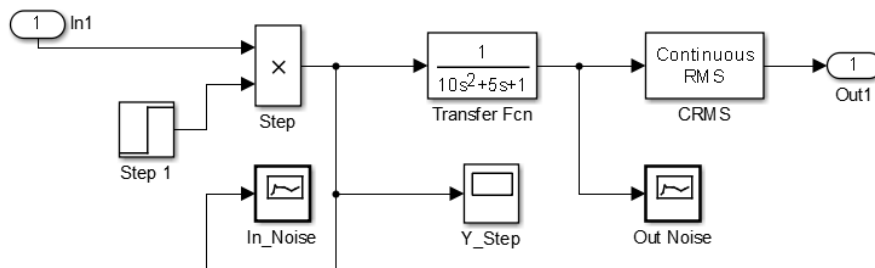


Рисунок В.4 – – Імітаційна субмодель вимірювання RMS на виході ФНЧ в дискримінаторі хаотичного виявника

```

Fd=32;% Кількість виборок
FftL2= Fd/16;
T2 =[0 0.0322580645161290 0.0645161290322581 0.0967741935483871
0.129032258064516 0.161290322580645 0.193548387096774
0.225806451612903 0.258064516129032 0.290322580645161
0.322580645161290 0.354838709677419 0.387096774193548
0.419354838709677 0.451612903225806 0.483870967741936
0.516129032258065 0.548387096774194 0.580645161290323
0.612903225806452 0.645161290322581 0.677419354838710
0.709677419354839 0.741935483870968 0.774193548387097
0.806451612903226 0.838709677419355 0.870967741935484
0.903225806451613 0.935483870967742 0.967741935483871 1]
S2 =[0 0.490000000000000 0.900000000000000 1.115000000000000
1.260000000000000 1.300000000000000 1.310000000000000 1.270000000000000
1.170000000000000 1.060000000000000 0.980000000000000 0.845000000000000
0.850000000000000 0.890000000000000 0.970000000000000 1.035000000000000
1.045000000000000 1 0.865000000000000 0.650000000000000
0.530000000000000 0.405000000000000 0.340000000000000
0.250000000000000 0.200000000000000 0.135000000000000
0.100000000000000 0.075000000000000 0.050000000000000
0.030000000000000 0.020000000000000 0.010000000000000]
FftS2=abs(fft(S2,FftL2));% Амплітудний спектр
FftS2=2*FftS./FftL2;% Нормування за амплітудою
FftS2(1)=FftS(1)/2;% Нормування пост. складової
plot(FftS(1:FftL2/2));

```

Рисунок В.5 – Дані та програма обчислення спектрів сигналу пульсової хвилі

## ДОДАТОК Г

### ПЛАКАТИ ДЛЯ ДОПОВІДІ

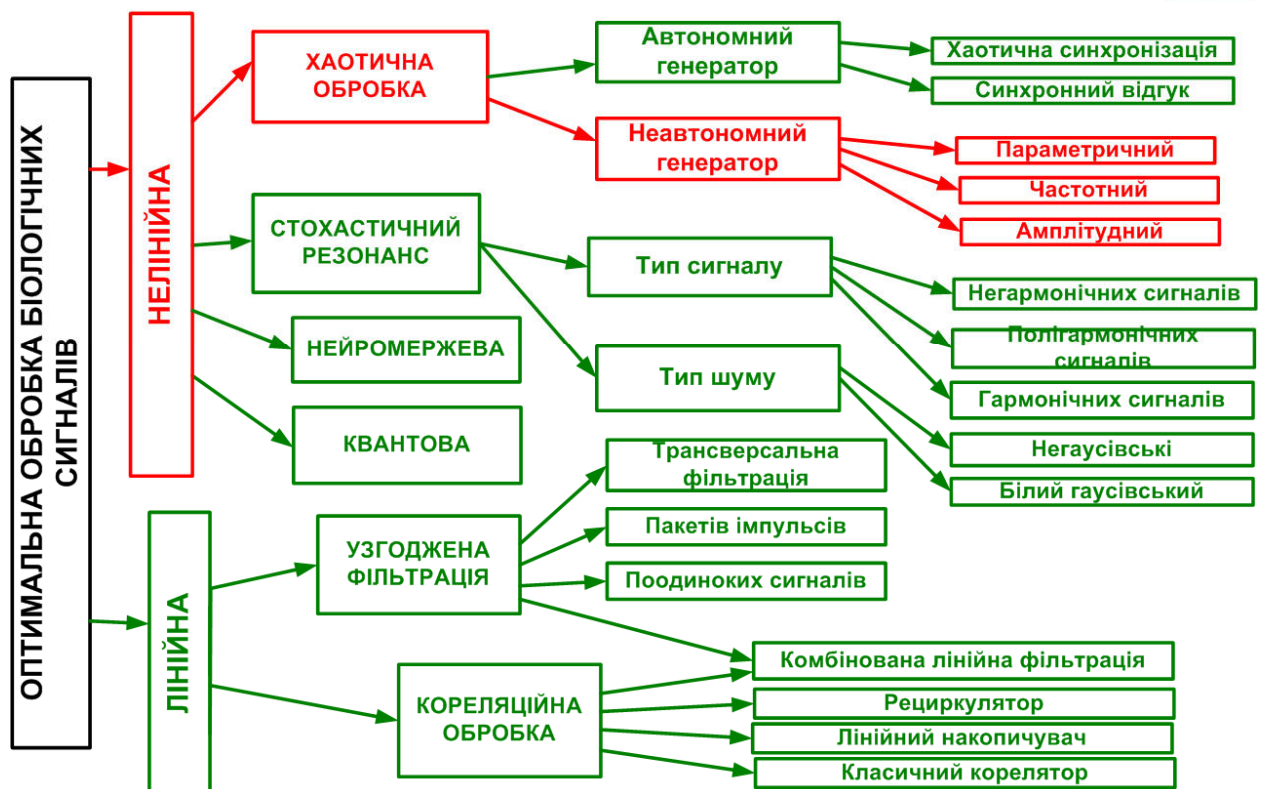
**Дипломна робота магістра**  
зі спеціальності 172 "Телекомунікації та радіотехніка"

**1**

- Тема:** **Метод хаотичного виявлення слабких періодичних сигналів**
- Магістр:** Зернюк Іван Вікторович, студент гр. ТРм-20-1
- Керівник:** Підченко Сергій Костянтинович, зав. каф. ТМІТ, д.т.н.,
- Об'єкт дослідження:** процеси виявлення слабких сигналів на тлі потужних завад
- Предмет дослідження:** неавтономні нелінійні виявники слабких періодичних сигналів біологічної природи
- Мета роботи:** вдосконалення методів побудови та принципів обробки під час виявлення сигналів за допомогою генераторів детермінованого хаосу

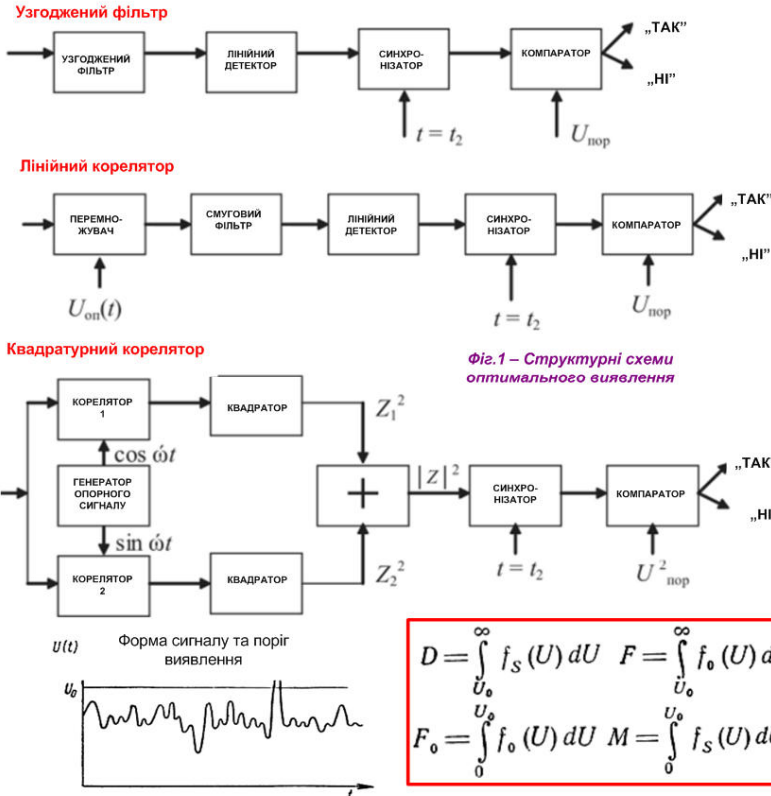
## КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ ОПТИМАЛЬНОЇ ОБРОБКИ

**2**



# СКЛАДОВІ КЛАСИЧНОЇ ОПТИМАЛЬНОЇ ОБРОБКИ

3



**Імпульсна характеристика узгодженого фільтра:**

$$h_{y\phi}(t) = C y_{BX}(t_0 - t)$$

Константа, Тривалість сигналу, Інверсія часу

**Передавальна характеристика узгодженого фільтра:**

$$K_{y\phi}(j\omega) = C \int_{BX}^*(j\omega) e^{-j\omega t_0}$$

Константа, Фазовий множник, Час дії сигналу, Комплексно спряжений спектр сигналу

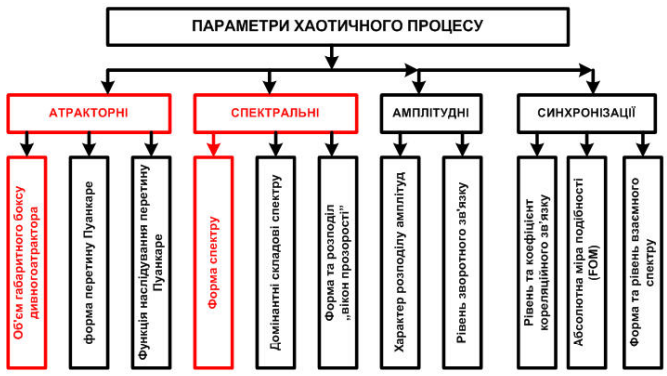
**Густина розподілу та ймовірності виявлення і невиявлення**

Фіг.2 – Суміш слабого сигналу та флуктуаційної завади та параметри виявлення

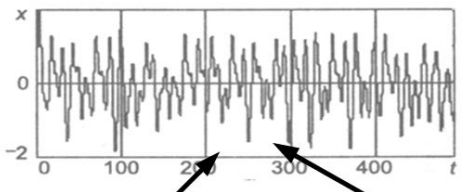
Фіг.3 – Визначення параметрів виявлення

# ПАРАМЕТРИ ТА ВЛАСТИВОСТІ ХАОТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ

4

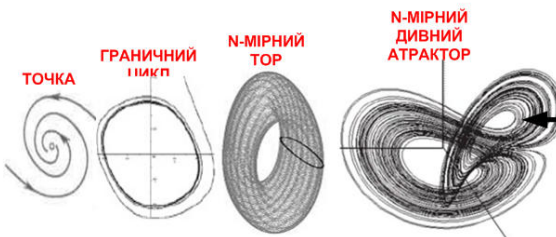


Фіг.2 – Класифікація параметрів хаотичних процесів

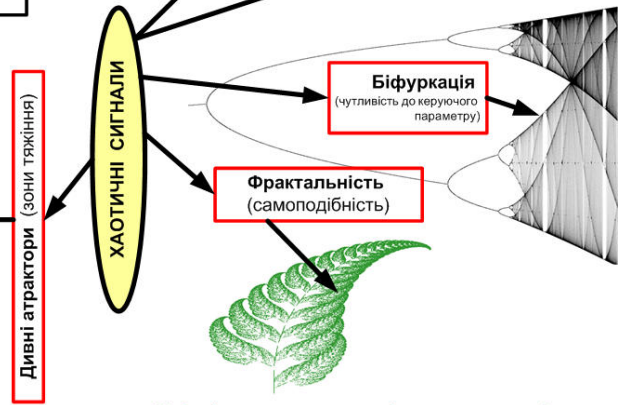


**Шумоподібність** (широкосмуговість, неперіодичність)

**Детермінованість** (можливість синхронізації)



Фіг.2 – Відомі форми атракторів фазових площин для нелінійних динамічних систем



Фіг.3 – Форма та властивості хаотичних сигналів

# МЕТОД ХАОТИЧНОГО ВИЯВЛЕННЯ

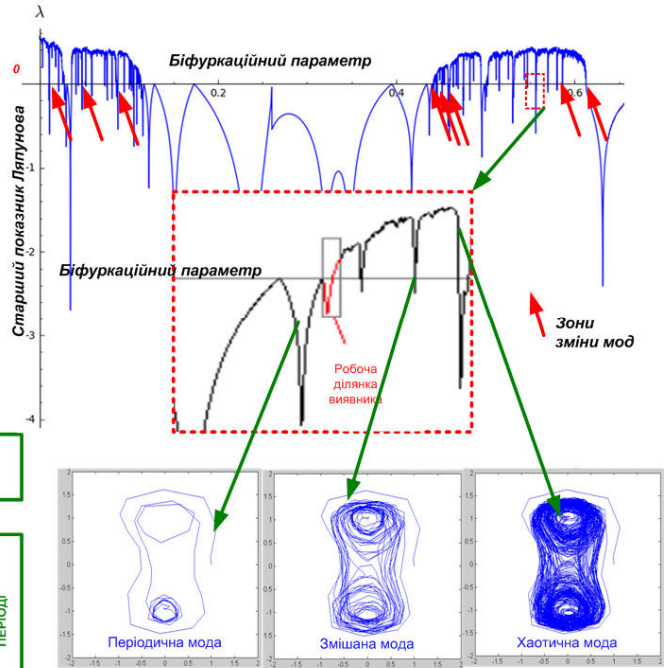
5



Фіг. 1 – Узагальнена схема роботи хаотичного виявника



Фіг. 2 – Класифікація способів дискримінації режимів хаотичного генератора



Фіг. 3 – Поява різних хаотичних мод залежно від значення старшого показника Ляпунова

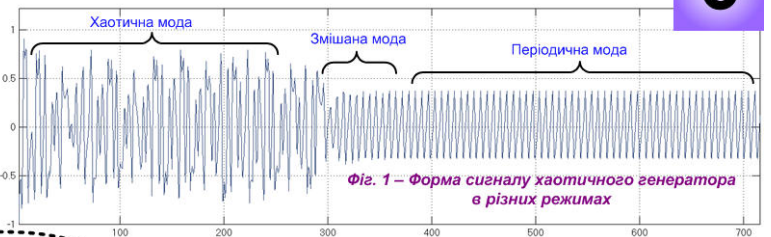
# ЗАСІБ ХАОТИЧНОГО ВИЯВЛЕННЯ

6

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИЯВЛЕННЯ

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = y - h(x); \\ \frac{dy}{dt} = \beta y - \beta x + A \sin(\omega_0 \tau) + [B \sin(\omega_0 t) + \sigma \cdot n(t)] \end{cases}$$

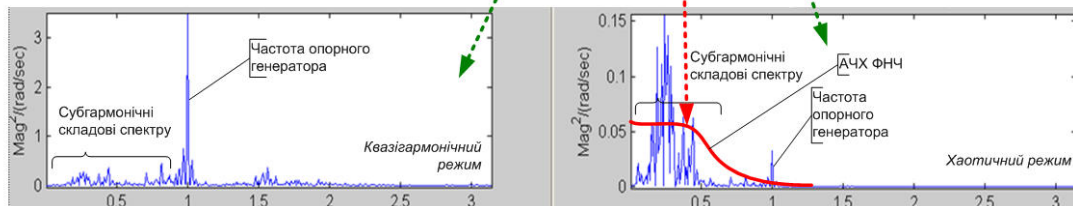
Якщо  $B < B_{\text{пор}}$  (хаос),  
якщо  $B > B_{\text{пор}}$ , (періодичний режим)



Фіг. 1 – Форма сигналу хаотичного генератора в різних режимах



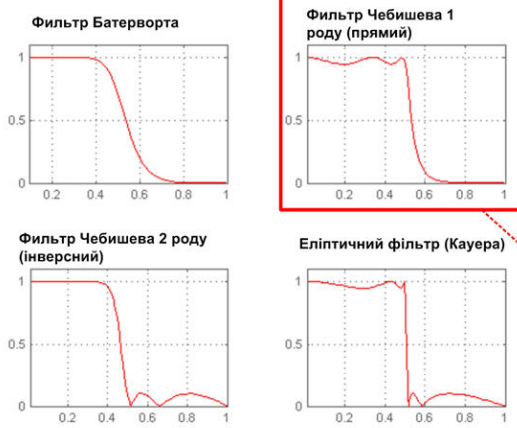
Фіг. 2 – Хаотичний амплітудний виявник слабких гармонічних сигналів



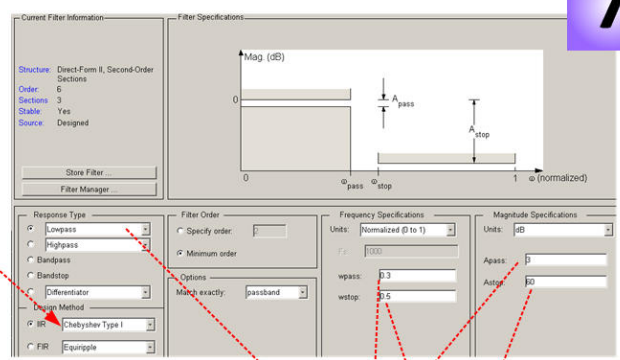
Фіг. 3 – Спектральні діаграми під час роботи хаотичного дискримінатора

## СИНТЕЗ ФІЛЬТРУ СУБГАРМОНІК ХАОТИЧНОГО ВИЯВНИКА

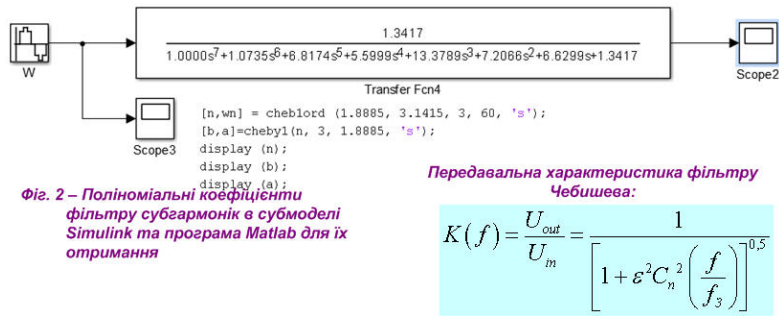
7



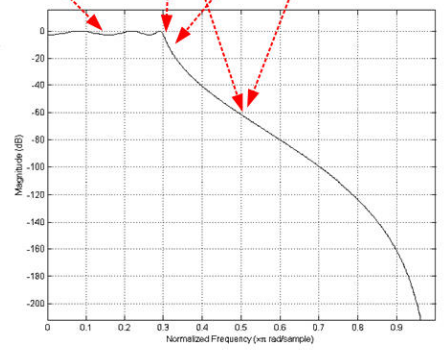
Фіг. 1 – Основні типи форм АЧХ фільтрів для синтезу



Фіг. 3 – Початкові дані для синтезу фільтру субгармонік в Simulink

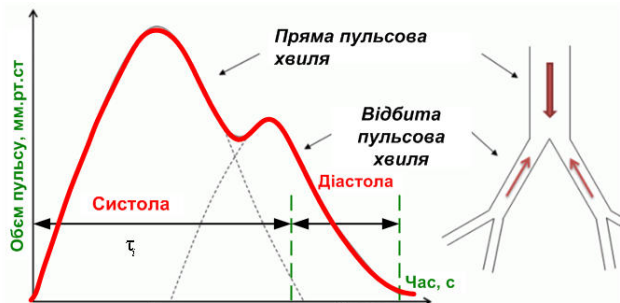


Фіг. 2 – Поліноміальні коефіцієнти фільтру субгармонік в субмоделі Simulink та програма Matlab для їх отримання

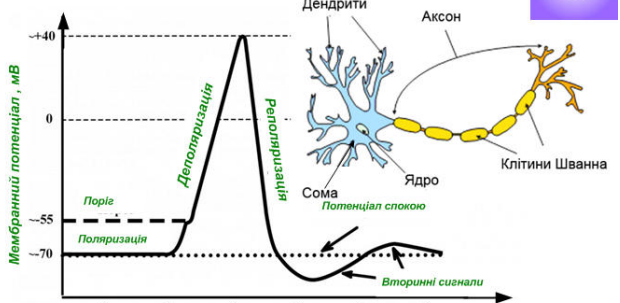


## БІОЛОГІЧНІ СИГНАЛИ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ТА ЇХ МОДЕЛІ

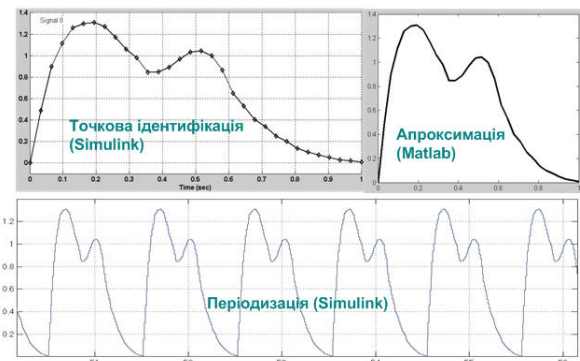
8



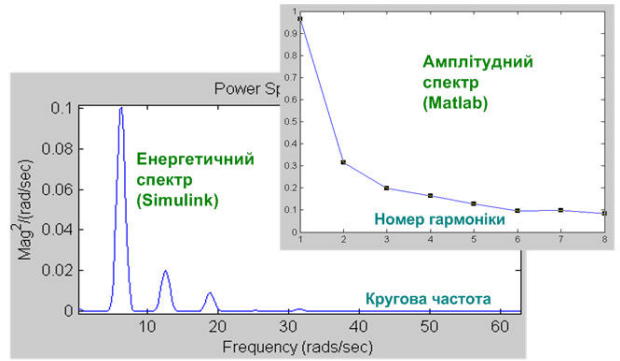
Фіг. 1 – Форма сигналу пульсової хвилі та механізм отримання відбитої хвилі кров'яного тиску



Фіг. 3 – Форма сигналу нейроімпульсу та основні частини біологічного нейрону



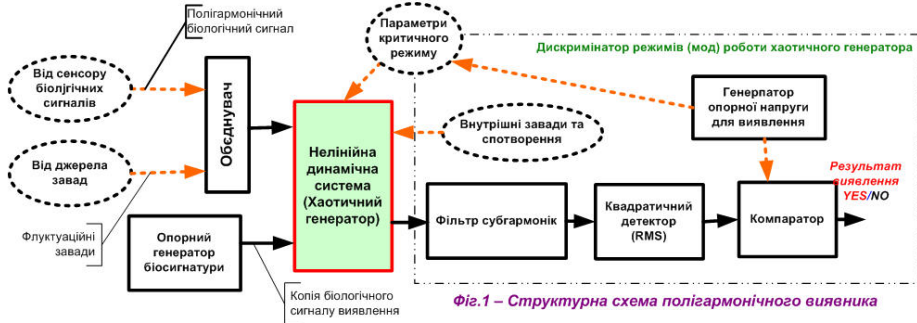
Фіг. 2 – Моделі форми сигналів пульсової хвилі



Фіг. 4 – Спектри сигналів пульсової хвилі

# ПОЛІГАРМОНІЧНИЙ ХАОТИЧНИЙ ВІЯВНИК ТА ЙОГО МОДЕЛЬ

9

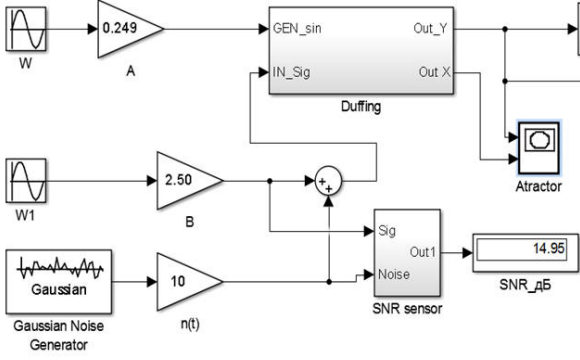


Фіг.1 – Структурна схема полігармонічного виявника

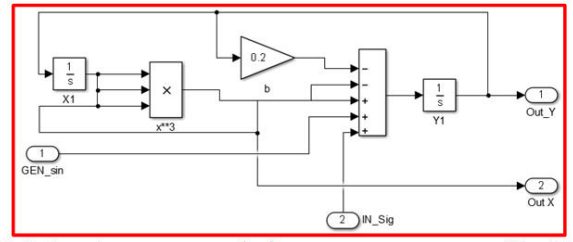
**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВІЯВЛЕННЯ**

$$\frac{1}{\omega_1^2} d^2 x / dt^2 + \frac{k}{\omega_1} dx/dt - x + x^3 = a \left[ \sum_{i=1}^M A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) + n(t) \right] + \gamma_c \left[ \sum_{i=1}^M A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) \right];$$

Якщо  $a > a_{пор}$  (хаос),  
якщо  $a < a_{пор}$  (періодичний режим)



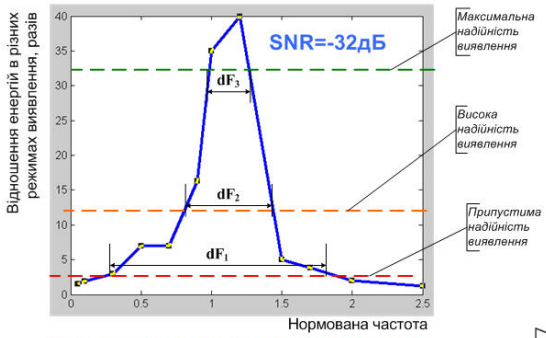
Фіг.3 – Імітаційна модель полігармонічного виявника (Simulink)



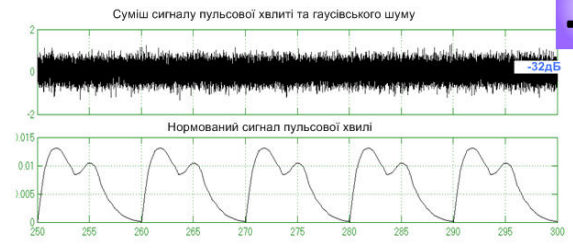
Фіг.2 – Функціональна схема субмодуля хаотичного генератора (Simulink)

# ЧАСТОТНИЙ РЕСУРС ХАОТИЧНОГО ВІЯВНИКА

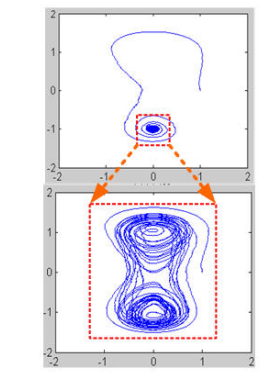
10



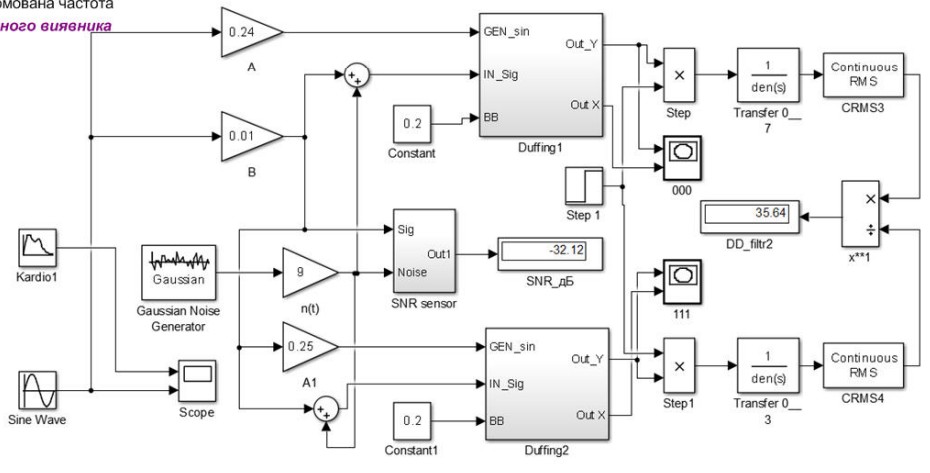
Фіг.1 – Частотний ресурс хаотичного виявника



Фіг.3 – Слабкий сигнал пульсової хвилі в гаусієвських шумах та без дії шуму



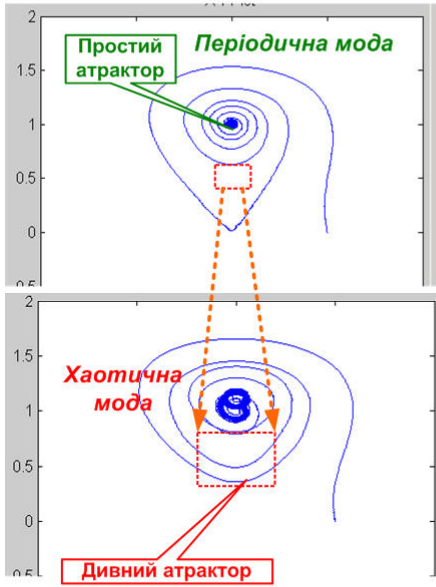
Фіг.2 – Збільшення аперттури аттрактора під час переходу в хаотичний режим



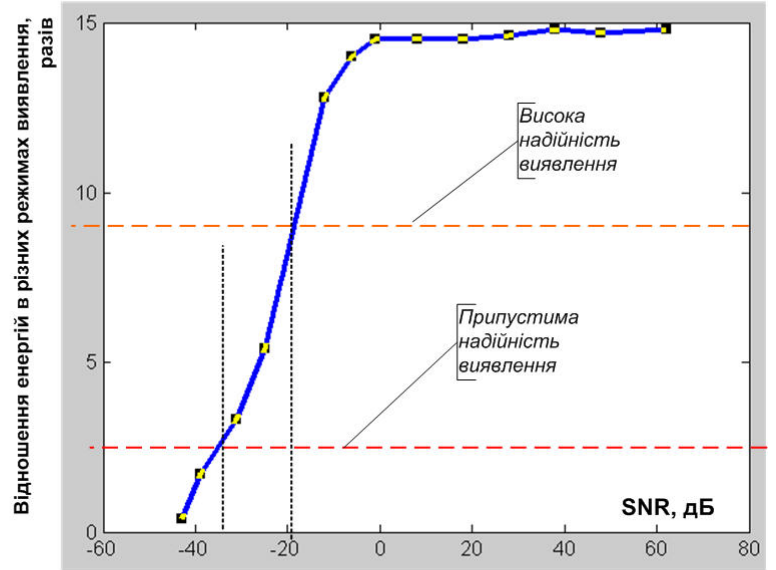
Фіг.4 – Схема для дослідження хаотичного виявника в різних режимах одночасно (Simulink)

# ВИЯВЛЕННЯ СЛАБКИХ СИГНАЛІВ ПУЛЬСОВОЇ ХВИЛІ ПОЛІГАРМОНІЧНИМ ВИЯВНИКОМ

11



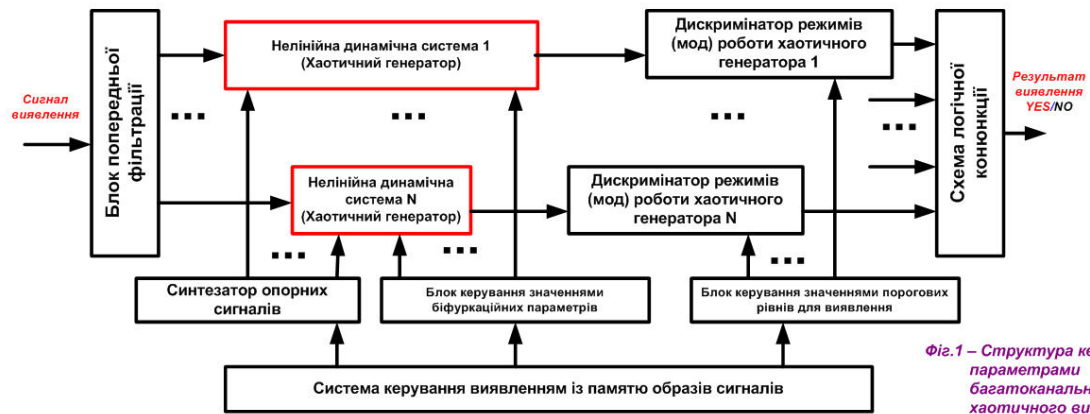
Фіг.1 – Збільшення аперттури аттрактора під час переходу від періодичного режиму в хаотичний під дією *слабкого* полігармонічного сигналу



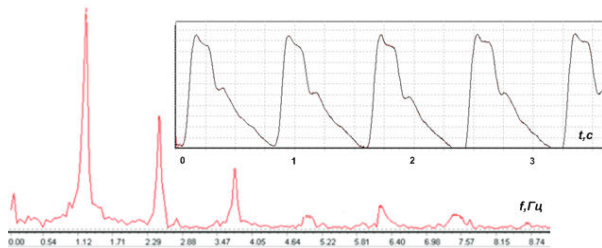
Фіг.2 – Залежність відношення енергії сигналу під час переходу від періодичного в хаотичний режим роботи хаотичного генератора Дафінга під дією *слабкого* полігармонічного сигналу від відношення сигнал/шум для гаусівських, а також рівномірних шумів

# БАГАТОКАНАЛЬНИЙ ПОЛІГАРМОНІЧНИЙ ВИЯВНИК ІЗ КЕРУВАННЯМ БІФУРКАЦІЙНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

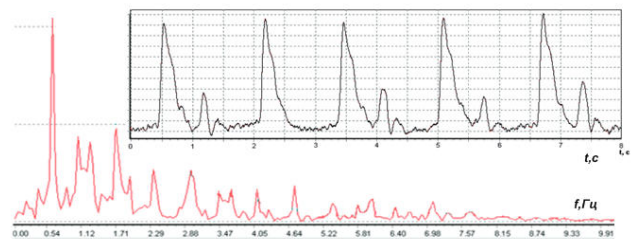
12



Фіг.1 – Структура керування параметрами багатоканального хаотичного виявника



Фіг.2 – Спектр та форма сигналу пульсової хвилі здорової людини



Фіг.3 – Спектр та форма сигналу пульсової хвилі хворої людини

## ВИСНОВКИ З МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

# 13

### Наукова новизна одержаних результатів:

1. Запропоновано метод виявлення слабких періодичних сигналів біологічної природи, що полягає у застосуванні різких переходів між основними модами нелінійної динамічної системи та фіксації цього факту за допомогою виявлення збільшення апертури атрактора енергетичним шляхом, що дозволяє виявляти слабкі біологічні сигнали на рівні флуктуаційних завад до -35дБ за допомогою простих схемних рішень .

2. Запропоновано удосконалення методу виявлення слабких періодичних сигналів біологічної природи, що полягає у застосуванні декількох хаотичних виявників із керованими параметрами нелінійної динамічної системи, що дозволяє проводити нелінійну фільтрацію спектральних складових біологічних сигналів із метою виявлення та діагностики патологій спектральним методом в умовах потужних флуктуаційних завад.

### Практичне значення одержаних результатів:

1. Встановлено, що найбільш перспективним способом застосування НДС для виявлення слабких сигналів є застосування неавтономних систем, що мають різкий характер переходу між хаотичним та періодичним режимом роботи, що характеризується різкою зміною в енергетичних показниках сигналу, що генерується.

2. Встановлено, що засіб хаотичного виявлення слабких сигналів має мати три принципових елементи: систему введення слабого сигналу в неавтономну НДС, НДС та дискримінатор субгармонік. Така структура характеризується схемотехнічною простотою та забезпечує виявлення сигналів під рівнем шуму від -40 дБ і менше.

3. Проведено дослідження структури, форми та спектру сигналів біологічної природи: пульсової хвилі та нейросигналів, показано яким чином спектральні дослідження на базі хаотичних виявників дозволяють виявляти патології в організмі людини.

4. Запропонована імітаційна модель хаотичного виявника та методики генерації моделей вхідних полігармонічних біологічних сигналів в середовищі Matlab\Simulink. Розроблена методика досліджень на основі критерію повної енергетики процесу, проведені імітаційні моделювання, що підтвердили працездатність запропонованих методів на базі застосування НДС Дафінга та системи фільтрації субгармонік.

ДОДАТОК Д  
ПУБЛІКАЦІЇ ПО ТЕМІ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ



Міністерство освіти і науки України  
Хмельницький національний університет

## СЕРТИФІКАТ



**Зернюк Іван Вікторович**

учасник XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції  
«Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2021»

Голова оргкомітету АПКН-2021

**СИНЮК Олег Миколайович**  
проректор Хмельницького національного  
університету з наукової роботи,  
доктор технічних наук, професор

м. Хмельницький  
15-16 жовтня 2021

E-mail: [apkt.khnu@gmail.com](mailto:apkt.khnu@gmail.com)

Міністерство освіти і науки України  
Хмельницький національний університет



ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ  
за матеріалами XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції  
«Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2021»

15-16 жовтня 2021

Хмельницький 2021

**АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ КОМП'ЮТЕРНИХ НАУК - 2021**

*XIII Всеукраїнська науково-просвітницька конференція*

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

**СЕКЦІЇ КОНФЕРЕНЦІЇ:**

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

Робочі мови конференції: українська, англійська

**ОРГКОМІТЕТ:**

**СИНЮК О. М.** голова оргкомітету, проректор Хмельницького національного університету з наукової роботи, доктор технічних наук, професор  
**САВЕНКО О. С.** заступник голови оргкомітету, декан факультету Інформаційних технологій ХНУ, доктор технічних наук, професор  
**БАРМАК О. В.** заступник голови оргкомітету, завідувач кафедри Комп'ютерних наук ХНУ, доктор технічних наук, професор  
**ГОВОРУЩЕНКО Т. О.** завідувач кафедри Комп'ютерної інженерії та інформаційних систем ХНУ, доктор технічних наук, професор  
**ВИСОЦЬКА О. В.** доктор технічних наук, завідувач кафедри Радіоелектронних та біомедичних комп'ютеризованих засобів і технологій Національного аерокосмічного університету ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», професор

**ДАВРОВ Є. А.** доктор технічних наук, професор (Сумський державний університет)

**ПІМОФЄЄВА Л. В.** відповідальна за студентську науково-дослідну роботу ХНУ

**МАЗУРЕЦЬ О. В.** секретар конференції, к.т.н, доцент кафедри Комп'ютерних наук ХНУ

**МОЛЧАНОВА М. О.** секретар конференції, викладач кафедри Комп'ютерних наук ХНУ

**КОНТАКТНА ІНФОРМАЦІЯ:**

е-пошта для листування: [arka.khlyk@gmail.com](mailto:arka.khlyk@gmail.com)

УДК 004.37.001.62

Збірник наукових праць за матеріалами XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук АІТКС-2021». Хмельницький – 2021. – 281с.

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

УДК 004.37.001.62

Матеріали конференції відтворені з авторських оригіналів. При макетуванні можливі незначні зміни компоновки контенту авторських оригіналів.

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

З питань проведення конференції та подальшого обміну інформацією звертатись на е-пошту конференції: [arka.khlyk@gmail.com](mailto:arka.khlyk@gmail.com)

УДК 623.519

**Зернюк** І. В., Підченко С. К., Пивовар О. С.

Хмельницький національний університет

**АПЕРТУРА АТРАКТОРА ПІД ЧАС ВИЯВЛЕННЯ ЛОГІЧНИХ РІВНІВ В  
ХАОТИЧНІЙ СИСТЕМІ ЗВ'ЯЗКУ**

*Розглянуто можливість та показано доцільність застосування поняття апертури дивного атрактора в хаотичних цифрових системах зв'язку для оптимального виявлення хаотичних режимів, що відповідають логічним рівням інформаційного сигналу.*

*Possibilities and expediency of application of the concept of aperture of a strange attractor in chaotic digital communication systems for optimum detection of chaotic modes corresponding to logical levels of an information signal are considered.*

Особливу роль під час дослідження систем зв'язку відіграють діючі на систему стохастичні завади. В класичних системах такі завади обумовлюють спотворення і втрату інформації, а от в хаотичних системах зв'язку (ХСЗ) шум може виступати і як конструктивний фактор, що обумовлює, наприклад, збільшення рівня синхронізації ведучого та веденого хаотичних генераторів (ХГ) [1].

Режим хаотичної синхронізації (ХС) обумовлює встановлення певного функціонального зв'язку, виявити який є складним завданням. Діагностувати наявність синхронізації ХГ на приймальному та передавальному боці систем зв'язку можливо способом допоміжної хаотичної системи [2].

Під час динамічного розвитку процесу ХС на практиці ми маємо ситуацію неможливості забезпечення однаковості функціонального опису та початкових параметрів ХГ і під час відсутності сигналу синхронізації фазові траєкторії основного та допоміжного ведених ХГ розбігаються, що призводить до декореляції їх часових залежностей. Для фіксації рівня ХС застосовують такі міри: абсолютної відстані, фазового збігу, показники Ляпунова модифікованої ХСЗ[3].

Метою роботи є визначення особливостей використання введеного поняття апертури дивного атрактора під час процесу виявлення логічних рівнів в хаотичній системі зв'язку.

Особливістю ХГ є наявність дивного атрактора, або N-мірного тіла, для якого можливо ввести поняття апертури, як максимального лінійного просторового розміру. Якщо в критерії збігу під час ХС є апертура атрактора (АА) то для пришвидшення прийняття рішення під час виявлення логічних рівнів поняття

**Земляний О. Д., Антоненко С. В., Ізмайлова М. К.**  
Інформаційна технологія в задачах гідрологічного моніторингу..... 97

**Зернюк І. В., Підченко С. К., Пивовар О. С.**  
Апертура атрактора під час виявлення логічних рівнів в хаотичній системі зв'язку ..... 101

**Капуста Д. Ю.**  
Інформаційна технологія прогнозування епідемічного процесу COVID-19 в Україні на засадах машинного навчання ..... 104

**Кислий О. І.**  
Розробка інтерактивного графічного редактора для створення схеми залу закладу харчування..... 107

**Коваль П. О., Ендрес В. С., Волосяк Ю. В.**  
Теоретичні основи підходу Human-centered design ..... 110

**Ковальчук О. В., Корецька Л. О.**  
Метод побудови та архітектура кіберфізичних систем діагностики зору людини. 114

**Ковальчук П. С., Лисенко С. М.**  
Метод керування групою безпілотних літальних апаратів на основі нечіткого мурашиного алгоритму ..... 117

**Котвицький А. Т., Дудко М. А.**  
Використання комп'ютерних технологій у фізиці..... 120

**Кравчук С. С., Кузьбачиний В. В.**  
Інформаційна система візуалізації громадських місць та закладів з можливостями для інклюзивного доступу ..... 123

**Кравчук Я. О., Магурець О. В.**  
Експертна система автоматизованого підбору комбінацій матеріалів у косплеї.... 126

**Кривенко С. О., Пищичний В. В.**  
Інформаційна технологія виявлення захворювань легень за акустичними шумами ..... 133

**Кривоносов Ю. А., Боровик О. В.**  
Щодо актуальності задачі визначення оптимальних характеристик компілятора . 139

**Кучеренко Р. Ю.**  
Модель системи IoT рішення для процесу сироваріння..... 143

$$\Delta M_{MS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [(\varphi_{Mj} - \varphi_{Sj})^2]} / \prod_{i=1}^N \{A_{ci}\}, \quad (3)$$

де  $N$  – кількість вибірок хаотичних сигналів;

$\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [(\varphi_{Mj} - \varphi_{Sj})^2]$  – середньогеометрична похибка по усім фазовим змінним між основним та допоміжним ХГ.

Запропонований модифікований критерій визначення відносної похибки в умовах ХСЗ на базі методу допоміжного ХГ було перевірено імітаційним моделюванням в середовищі Matlab/Simulink для ХГ із кількістю фазових змінних до 4 та різними типами нелінійностей в операторі еволюції.

Отже, обчислення значення інформаційного параметру розузгодження основного та допоміжного генератора на базі критерію (3) показало приблизно однаковий результат впливу гаусівського шуму на рівень синхронізації до відношення сигнал-шум, що складає до 50дБ, що говорить про доцільність застосування запропонованого критерію хаотичної синхронізації практично для усіх натеper знайдених різновидів хаотичної модуляції, а також для методів її детектування.

### Перелік посилань

1. Прикладне застосування теорії хаотичних систем у телекомунікаціях : монографія / Ю. Я. Бобало, С. Д. Галюк, М. М. Климан, Р. Л. Політанський; Міністерство освіти і науки України, Національний університет "Львівська політехніка". – Львів; Дрогобич : Коло, 2015. – 184 с.
2. Golevych, O., Ruvovar, O. Dumenko, P. "Synchronization of non-linear dynamic systems under the conditions of noise action in the channel", Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. Volume 55, Issue 3, 1 June 2018, Pages 70-76. DOI: <https://doi.org/10.2478/lpts-2018-0023>
3. Boccaletti S. The synchronization of chaotic systems / S. Boccaletti, J. Kurths, G. Osipov, D. L. Valladares, and C. S. Zhou // Physics Report. – 2002. – Vol. 366. – № 1-2. – P. 1-101.

апертури введемо як різницю між граничними значеннями всіх фазових траєкторій, а саме:

$$A_d = \max[x_{\max}(t), y_{\max}(t), \dots] - \min[x_{\min}(t), y_{\min}(t), \dots]. \quad (1)$$

З точки зору техніки зв'язку АА має фізичний зміст динамічного ресурсу лінійного тракту, що входить до складу ХСЗ. Введене поняття АА зручне для можливості порівняння різних ХСЗ з точки зору якості ХС: всі складні форми атракторів обмежених об'ємів приводяться до одного багатомірного габаритного боку і контроль збігу під час ХС реалізується співставно, а процедура виявлення логічних рівнів пришивається та спрощується.

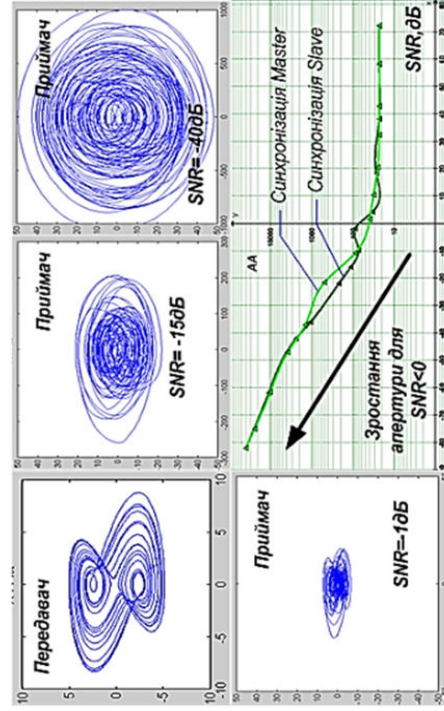


Рисунок 1 – Зміна апертури атрактора в хаотичній системі зв'язку із застосуванням допоміжного хаотичного генератора

Під час встановлення значення апертури слід зауважити, що під час дії завад АА може суттєво змінюватися (рисунк 1). У випадку застосування поняття апертури для  $N$  генераторів в системі ХС, має сенс ввести поняття середньої апертури:

$$A_{ci} = \sqrt{\prod_{i=1}^N \{A_{ci}\}}. \quad (2)$$

Для покращення ідентифікації логічних рівнів в ХСЗ у виявнику із цифровим інформаційним сигналом за умови високого рівня завад запропоновано похибку синхронізації, що є інформаційним параметром виявлення логічних рівнів обраховувати як:



## АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ КОМП'ЮТЕРНИХ НАУК 2021

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

Комп'ютерна верстка: **Маурець О.В.**

Підписано до друку 14.10.2021.  
Версія друку «АРКН-2021 CorpusPaper v3mod5».

Е-мал: [apkn.khnu@gmail.com](mailto:apkn.khnu@gmail.com)  
ХНУ м. Хмельницький, вул. Інститутська 11.

## Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальное совпадение с одним документом 0.0%

Словари проверки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. Ошибок в документах: 9%

ID: 97760 Название: Метод хаотичного виявлення слабких періодичних сигналів Добавлено в БД: 2021-12-01 Авторы: Зернюк Іван Вікторович Руководители: Підченко Сергій Костянтинович Консультанты: Опоненты:	Документ		Суммарное совпадение по Базе Данных	
	Символы	Лексемы	Символы	Лексемы
	93073	1432	486 (1%)	9 (1%)

### Источник плагиата

ID	Описание	Наличие плагиата в документе	
		Символы	Лексемы



Имя пользователя:  
Kafedra TMIT KhNU

ID проверки:  
1009465922

Дата проверки:  
02.12.2021 09:32:02 EET

Тип проверки:  
Doc vs Internet

Дата отчета:  
02.12.2021 09:37:14 EET

ID пользователя:  
100005657

Название файла: Зернюк\_ТрМ20-1

Количество страниц: 81 Количество слов: 14271 Количество символов: 112274 Размер файла: 1.19 MB ID файла: 1009473084

## 0.18% Совпадения

Наибольшее совпадение: 0.06% с Интернет-источником (<https://openarchive.nure.ua/bitstream/document/11600/1/201>).

0.18% Источники из Интернета

4

Страница 83

Поиск совпадений с Библиотекой не производился

## 0.09% Цитат

Цитаты

1

Страница 84

Не найдено ни одной ссылки

## 0% Исключений

Нет исключенных источников

## Модификации

Обнаружены модификации текста. Подробная информация доступна в онлайн-отчете.

Замененные символы

11

## РЕЦЕНЗІЯ

на дипломну роботу студента групи ТРМ-20-1

Зернюка Івана Вікторовича

«Метод хаотичного виявлення слабких періодичних сигналів»

Дипломна робота присвячена розгляду питань використання нелінійних способів обробки для забезпечення покращення виявлення слабких періодичних сигналів біологічної природи.

Робота складається із вступу, 4 розділів, висновків по роботі, переліку із 36 джерел посилання та 5 додатків (14 сторінок). Загальний обсяг роботи в якому викладено основний зміст складає 75 сторінок і містить 37 рисунків на 33 сторінках по тексту та 15 аналітичних залежностей. Повний обсяг роботи - 104 сторінок.

У вступі підкреслюється актуальність тематики роботи особливо в умовах пандемії COVID19 та погіршення здоров'я людей по всьому світу.

Перший розділ роботи присвячено аналізу класичних методів оптимальної обробки, розглядаються питання застосування енергетичних методів під час виявлення сигналів.

Другий розділ присвячено розгляду неklasичних методів обробки і виділенню найбільш перспективного напрямку з них – обробка за допомогою хаотичних режимів в нелінійних динамічних системах.

Третій розділ розглядає проблеми виявлення слабких біосигналів організму людини та в цьому розділі запропоновано метод та його удосконалення, що нелінійним шляхом дозволяє виявляти сигнали, що на декілька порядків за рівнем менше рівня флуктуаційних завад із можливістю одночасного експрес-діагностування проблем із здоров'ям.

Четвертий розділ повністю присвячено імітаційному моделюванню сигналів та запропонованих методів. Отримані результати під час симуляції

підтверджують працездатність засобів, що розроблено на базі запропонованих методів виявлення слабких сигналів.

Дипломна робота містить загалом більше 100 сторінок тексту з численними ілюстраціями, наукова новизна та практичне значення має заперечень не викликає. Процес висвітлення основних позицій щодо тематики 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:

- запропоновано методи побудови виявників періодичних біологічних сигналів, що дозволяють виявляти слабкі сигнали на тлі завод до мінус 40дБ;
- розроблена імітаційна модель процесу виявлення, підтверджена можливість селекції за допомогою керування біфуркаційними параметрами.

Серед недоліків слід відмітити:

- присутнє вживання різних термінів для позначення одних і тих самих понять, наприклад, «хаотичний сигнал», «сигнал детермінованого хаосу», «хаос-сигнал», або «керуючий параметр», «біфуркаційний параметр», «параметр біфуркації».
- недостатньо розкрита робота неамплітудних хаотичних виявників та методів ідентифікації їх режимів;
- присутня незначна кількість описок пов'язаних із автозаміною тексту.

Загалом дипломна робота магістра Зернюка Івана Вікторовича дипломна робота заслуговує на оцінку “відмінно”,

Рецензент:

д.т.н., проф., зав.каф. АКІТ



Мартинюк В. В.

Завідувачу кафедри  
телекомунікацій, медійних та  
інтелектуальних технологій (ТМІТ)  
Підченко С.К.  
здобувача вищої студента  
2 курсу, гр. ТРМ-20-1  
Зернюка Івана Вікторовича

### 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 (Unicheck 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.

2.12.21

дата



підпис

Зернюк І.В.

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 хаотичного виявлення слабких періодичних сигналів

Автор: **Зернюк Іван Вікторович**

Спеціальність: **172 Телекомунікації та радіотехніка**

Освітня програма: Телекомунікації та радіотехніка

Науковий керівник: **д.т.н., доц. Підченко Сергій Костянтинович**

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.	<b><u>Відповідає</u></b>
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 укріплення запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
5	Інше:	

Підтвердження: Запозичення у розмірі 0,18% є випадковими збігами та не є плагіатом.

3.12.2021р.

Відповідальний за контроль

плагіату за системою Unicheck:



Олег ПИВОВАР

Зав. каф. ТМІТ



Сергій ПІДЧЕНКО