

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЧЕРНІВЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ЮРІЯ ФЕДЬКОВИЧА**

На правах рукопису

Русин Володимир Богданович

УДК 621.391.01

**МОДЕЛЮВАННЯ МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ ДИНАМІЧНИМ ХАОСОМ  
ТА ЇХ ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ**

Спеціальність 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Науковий керівник  
кандидат фізико-математичних наук, доцент  
Кушнір Микола Ярославович

Чернівці 2017

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП.....</b>	<b>5</b>
<b>РОЗДІЛ 1. КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ</b>	
<b>ХАОТИЧНИМИ КОЛИВАННЯМИ.....</b>	<b>13</b>
1.1. Основні положення та параметри детермінованого хаосу.....	13
1.1.1. Базові визначення.....	13
1.1.2. Критерії хаосу.....	17
1.2. Основні методи управління хаосом.....	20
1.2.1. Розімкнуте (програмне) керування.....	20
1.2.2. Лінійне й нелінійне керування.....	24
1.2.3. Адаптивне керування.....	29
1.2.4. Метод OGY (Ott-Grebogi-Yorke) для керування хаосом.....	32
1.2.5. Управління хаотичними коливаннями в дво- та тривимірних відображеннях, отриманих перетином Пуанкаре.....	40
Висновки до першого розділу .....	41
<b>РОЗДІЛ 2. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ХАОТИЧНИХ СИСТЕМ З ДОПОМОГОЮ LABVIEW.....</b>	<b>49</b>
2.1. Система LabView в комп'ютерному моделюванні хаотичних систем.....	49
2.2. Моделювання одновимірної хаотичної системи з допомогою програмного середовища LabView.....	50
2.3. Моделювання двовимірної хаотичної системи з допомогою програмного середовища LabView.....	52
2.4. Моделювання хаотичної системи Арнеодо.....	55
2.5. Моделювання та проектування тривимірної хаотичної системи Пехлівана.....	56

2.6. Моделювання і керування хаотичною мульти-витковою системою типу „jerk” .....	60
Висновки до другого розділу .....	68
<b>РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ПЕРЕДАВАННЯ ТА ПРИЙМАННЯ ІНФОРМАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ХАОТИЧНОЇ СИСТЕМИ РЕСЛЕРА НА ОСНОВІ LABVIEW ТА MULTISIM.....</b>	<b>69</b>
3.1. Функціональне проектування інформаційних систем в MultiSim..	69
3.2. Математична модель хаотичної системи Реслера.....	70
3.3. Моделювання схемотехнічного рішення хаотичного генератора Реслера.....	75
3.4. Моделювання системи маскування та розшифрування інформаційного носія хаотичною системою Реслера за допомогою програмного середовища LabView.....	78
3.5. Керування хаотичними коливаннями, що генеруються системою Реслера, з допомогою програмного середовища LabView.....	97
Висновки до третього розділу .....	100
<b>РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УПРАВЛІННЯ ХАОТИЧНИМИ КОЛИВАННЯМИ.....</b>	<b>102</b>
4.1. Комплексне моделювання нелінійних елементів.....	102
4.2. Проектування хаотичного генератора Чуа з кубічною нелінійністю.....	109
4.3. Моделювання та практична реалізація хаотичного генератора Ван-дер-Поля-Дюфінга.....	111
4.4. Дослідження хаотичної системи типу „jerk”.....	118
4.5. Керування хаотичними коливаннями пороговим методом в схемі Чуа.....	122
Висновки до четвертого розділу .....	125

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ.....	126
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	127
Додаток А Акти впровадження результатів дисертаційної роботи	

## ВСТУП

В останні двадцять років з'явилося досить багато досліджень в області нелінійної динаміки. У багатьох фізичних системах і їх детермінованих моделях було підтверджено, що крім типових поведінок, таких як нерухомі точки, періодичні або квазіперіодичні поведінки в деяких випадках траєкторії стають аперіодичними (хаотичними), якщо їх параметри, внутрішні змінні, або зовнішні сигнали вибираються певним чином.

Чутлива залежність від початкових умов має важливі практичні наслідки. У реальному застосуванні ми можемо задати початкові умови тільки з деякою кінцевою точністю  $\varepsilon$ . Якщо дві початкові умови ближчі одна до одної, ніж  $\varepsilon$ , то вони не помітні в вимірах. Траєкторії хаотичної системи, починаючи з таких початкових умов, будуть за кінцевий час розходитися і ставати незалежними. Їх поведінка стає непередбачуваною – рішення виглядають практично випадковими, незважаючи на те, що вони виробляються детермінованою системою. Можна помітити, що дуже малі зміни параметрів можуть мати дуже великий вплив на поведінку системи.

Ці фундаментальні властивості хаотичних систем є основою техніки контролю хаосу.

Будь-яка хаотична система для управління з точки зору інженера є лише довільною іншою нелінійною системою. Можна застосовувати будь-який метод для управління інженерним інструментарієм для вирішення однієї з типових задач управління, таких як стабілізація або відстеження. Найбільш поширеною метою контролю для хаотичних систем є усунення хаотичної поведінки зазвичай розглядом як причини несправності, катастрофи, і таким чином небажаної для більшості застосувань. Конкретні цілі змінюються в залежності від конкретного застосування. Найбільш загальна мета полягає в перетворенні хаотичного руху в стабільний періодичний чи постійний.

У зв'язку з дуже великим числом динамічних явищ, що зустрічаються в типових хаотичних системах, існує велика різноманітність підходів для контролю таких систем.

Хаотичні системи володіють специфічними властивостями, що не зустрічаються в інших нелінійних динамічних системах.

В останні роки актуальним питанням також є створення програмного забезпечення для моделювання, дослідження, контролю та функціонування певного вузла чи цілої системи з метою заміни схемного рішення, яке досить чутливе до різних впливів та невеликої зміни параметрів. Є досить багато різних програмних середовищ, що дозволяють вирішити дане питання (наприклад, LabView, Micro-Cap, та ін.).

Можна зробити висновок, що в напрямку застосування методів керування хаотичними коливаннями існує значна кількість невирішених задач, що вимагають подальших досліджень, тому тема дисертаційної роботи є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалася відповідно до наукового напрямку кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича та в межах науково-дослідної роботи: “Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв та засобів телекомунікацій і інформаційних технологій” (держ. реєстр. № 0111U000183).

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є розроблення та практичне застосування методів математичного моделювання для генерування, дослідження та керування хаотичними коливаннями, а також розвиток програмно-апаратних систем моделювання хаотичних захищених систем зв'язку.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі задачі:

- розробити методи побудови програмних систем для генерування хаотичних коливань різновимірних хаотичних систем та дослідження їх властивостей;
- дослідити поведінку хаотичних атракторів при різних початкових умовах та системних параметрах та експериментально встановити діапазон значень системних параметрів, при яких можливе керування хаотичними коливаннями, тобто виділення окремих орбіт з хаотичного атрактора;
- здійснити комп'ютерне моделювання захищеної хаотичної системи передавання та приймання інформаційного носія;
- розробити апаратну реалізацію генераторів хаотичних коливань;
- практично застосувати методи керування хаотичними коливаннями.

*Об'єктом дослідження є математичні моделі динамічних хаотичних систем.*

*Предметом дослідження є:* атрактори розглянутих динамічних систем, їх фазові портрети, часові розподіли та спектри; керування хаотичними коливаннями та процес моделювання передавально-приймальної інформаційної системи з використанням хаотичного маскуванню сигналів.

**Методи дослідження.** Для керування хаотичними коливаннями були застосовані метод OGY (Ott-Grebogi-Yorke) та пороговий метод. На їх основі був створений програмний комплекс для генерування, дослідження та керування різними хаотичними системами. Для оцінки достовірності отриманих теоретичних і експериментальних даних застосовувалися порівняльні методи математичного моделювання, був поставлений і проведений фізичний експеримент.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Основні результати, що визначають новизну дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Вперше представлено математичну модель хаотичної системи рівнянь типу multi-Jerk, за допомогою якої знайдено коефіцієнти для керування її хаотичною динамікою. Значення коефіцієнтів можуть бути застосовані як ключі для маскуванню та / або відновлення інформації. Значення коефіцієнтів керування знаходяться в діапазоні 0,01 – 0,30.

2. Вперше запропоновано схмотехнічну модифікацію хаотичного генератора Ван-дер-Поля-Дюфінга заміною виду нелінійного елемента з метою стабілізації нестійких періодичних орбіт. Експериментально встановлено діапазон номіналів опору для керування хаосом в межах 2,10 кОм – 2,21 кОм.

3. Модифіковано схмотехнічне рішення заміною котушки індуктивності на гіратор для зменшення впливів навколишнього середовища та покращення чіткості виділення контрольованих орбіт. Експериментально підтверджено пороговий метод для керування хаотичними коливаннями схеми Чуа.

**Практичне значення одержаних результатів.** У ході виконання дисертаційної роботи отримано такі практичні результати:

- розроблено комплекс програм комп'ютерної реалізації генерування, дослідження та керування хаотичними коливаннями;
- проведено комплексне дослідження нелінійних елементів;
- програмно та експериментально реалізовано керування коливаннями хаотичних систем з різновимірними генераторами хаосу;
- отримано керовані атрактори хаотичного генератора Ван-дер-Поля-Дюфінга;
- створено алгоритм для моделювання системи передавання та приймання інформації з використанням хаотичної системи Реслера.

Представлені в дисертаційній роботі наукові та практичні результати використовуються при дослідженні передавання інформації на основі динамічного хаосу з використанням всесвітньої мережі INTERNET



(ПАТ „Укртелеком”, Чернівецька філія), при дослідженні умов виникнення та застосування методів керування та усунення хаотичних коливань в телефонних комунікаторах типу БСКТ-1 і БСКТ-2 (ПП „Артон”). Результати, отримані в дисертаційній роботі, впроваджено в навчальний процес на кафедрі радіотехніки та інформаційної безпеки у Чернівецькому національному університеті імені Юрія Федьковича.

Всі результати впровадження підтверджено відповідними актами.

Достовірність отриманих результатів підтверджується узгодженістю результатів математичного моделювання систем хаотичних коливань та моделювання їх схемотехнічних рішень з результатами експериментальних досліджень робочих зразків та відомими в літературних джерелах даними.

**Особистий внесок здобувача.** Всі результати дисертації, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто.

Результати дисертації опубліковані в 19 наукових працях, з них: статті у фахових журналах – 7, тези доповідей на конференціях – 12.

В одноосібній праці (на англійській мові) [2] автором дисертаційної роботи було представлено програмний інтерфейс, що був розроблений в програмному середовищі LabView. Він дає змогу генерувати та досліджувати хаотичну систему Реслера. Представлено часовий розподіл трьох хаотичних координат та спектральний аналіз. Також приведено значення змінних, при яких генеруються різноперіодні (керовані) хаотичні атрактори системи Реслера. Створений програмний інтерфейс демонструє маскування та розшифрування інформаційного носія хаотичною системою Реслера. За допомогою програмного середовища MultiSim проведено схемотехнічний аналіз генератора, що реалізує хаотичну систему Реслера. Змодельована схема генератора підтверджує відповідність схемотехнічного рішення математичному апарату, що описує хаотичну систему Реслера.

У працях зі співавторами публікацій автором дисертаційної роботи було запропоновано та досліджено: [6, 8] – запропоновано нову модифікацію

генератора Чуа, наведено результати схемотехнічного моделювання; [5] – проведено комп’ютерне моделювання схеми Чуа з використанням нелінійного елемента, що реалізований в двох варіантах: 1) операційний підсилювач в сукупності з діодами, 2) два операційні підсилювачі; [4] – запропоновано модифіковане експериментальне керування хаотичними коливаннями у схемі Чуа методом порогу, подано експериментальну схему для керування хаотичними коливаннями, наведені результати експериментального дослідження; [1] – розроблено програмний пакет у програмному середовищі LabView, що дає змогу моделювати інформаційні властивості гіпер-хаотичної системи Лоренца; [3] – проведено комп’ютерне моделювання генератора Ван дер Поля-Дюфінга, представлено як програмне, так і схемотехнічне керування хаотичною системою Ван дер Поля-Дюфінга, наведений діапазон опору керуючого елемента, при якому може бути здійснене керування хаотичними коливаннями; [7] – розроблено програмний пакет у середовищі LabView, що дає змогу генерувати та досліджувати хаотичну мульти-лишкову Jerk систему, представлено часовий розподіл трьох хаотичних координат та 3D відображення, а також приведено значення коефіцієнтів, при яких генеруються керовані хаотичні мульти-лишкові атрактори Jerk системи; [11 – 14, 16, 18, 19] – створено програмний пакет в середовищі LabView, що дає змогу генерувати та досліджувати різні хаотичні системи, такі як Реслера, Арнеодо, гіперхаотичної системи Лоренца, гістерезисну поведінку, економічні моделі; [9, 15, 17] – проведено комп’ютерне моделювання різних схем нелінійних елементів та генераторів хаосу; [10] – проведено керування хаотичними коливаннями пороговим методом в схемі Чуа.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи обговорювалися, були представлені та доповідалися на: 10<sup>th</sup> International Symposium on Hysteresis Modeling and Micromagnetics (Iasi, Romania, 2015), Iasi IEEE Student Branch Scientific Meeting, 5<sup>th</sup> edition (Iasi, Romania, 2014), Міжнародній конференції TCSET’2014, присвяченій 170-річчю заснування

Національного університету „Львівська політехніка” „Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп’ютерної інженерії” (Львів – Славське, 2014), IV Міжнародній науково-практичній конференції „Обробка сигналів і негаусівських процесів” (Черкаси, 2013), IV-th International Scientific-Practical Conference Physical and Technological Problems of Radiotechnics Devices, Telecommunications, Nano- and Microelectronics (Chernivtsi, 2014), III-й Міжнародній науково-практичній конференції „Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки” (Чернівці, 2013), II-й Міжнародній науково-практичній конференції „Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки” (Чернівці, 2012), XI-й Міжнародній науково-практичній конференції „Сучасні інформаційні і електронні технології” (Одеса, 2011), науково-практичній конференції „Інформаційно-вимірювальні технології та системи” (Київ, 2013), I-й Всеукраїнській науково-практичній конференції „Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки” (Чернівці, 2011), VII Харківській конференції молодих науковців „Радіофізика та електроніка” (YSC) (Харків, 2007), наукових семінарах кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки Чернівецького національного університету імені Ю. Федьковича.

Робота „Маскування інформації з допомогою хаотичної системи Реслера на основі LabView” на конкурсі з проектування та розробки засобів вимірювальної техніки із застосуванням технологій корпорації „National Instruments” отримала 1-ше місце в номінації „Краща науково-дослідна робота” (2013 р.).

**Публікації.** У дисертації узагальнено наукові результати, опубліковані в 19 роботах, у тому числі 7 роботах у наукових фахових виданнях [1-7], 12-ти тезах міжнародних і всеукраїнських наукових конференцій та симпозіумів [8-19].

**Структура та обсяг дисертації.** Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, бібліографічного списку використаних джерел, який нараховує 165 позиції. Загальний обсяг дисертації – 144 сторінки машинописного тексту, що містить 75 рисунків та 3 таблиці.

# РОЗДІЛ 1

## КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ ХАОТИЧНИМИ КОЛИВАННЯМИ

### 1.1. Основні положення та параметри детермінованого хаосу

#### 1.1.1. Базові визначення

##### Динамічні системи

Динамічні системи поділяються на:

а) автономна динамічна система  $n$ -го порядку визначається як  $\dot{x} = f(x)$ , з початковою умовою  $x(t_0) = x_0$ . Відповідним рішенням є  $\phi_t(x_0)$ , і  $\phi_t(x_0)$  називається потоком. Для автономних неперервних систем, векторне поле  $f$  не залежить від часу  $t$ .

б) неавтономна динамічна система  $n$ -го порядку визначається як  $\dot{x} = f(x, t)$ ,  $x(t_0) = x_0$ . Відповідним основним потоком є  $\phi_t(x, t_0)$ . Для неавтономних неперервних систем, векторне поле  $f$  залежить не тільки від стану змінної  $x$ , але і від часу  $t$  [20-25].

##### Дискретні відображення

Орбіта: дискретна система може бути визначена як відображення  $P: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$  з рівнянням стану  $x_{k+1} = P(x_k)$ , де  $x_k \in \mathbb{R}^n$  є станами  $k$ -го ітераційного часу, а відображення  $P$  є станом  $x_k$  до наступного стану  $x_{k+1}$ . Починаючи з початкової умови  $x_0$ , повторне застосування  $P$  генерує послідовність точок  $\{x_k\}_{k=0}^{\infty}$ , яка відома як орбіта [26-38].

Відображення Пуанкаре: є класичною технікою для дискретизації динамічної системи. Воно замінює потік неперервної системи  $n$ -го порядку з дискретним відображенням  $(n-1)$ -го порядку. Відображення Пуанкаре

використовується для зменшення розмірності системи і встановлення більш тісного зв'язку між неперервними і дискретними системами.

Під січенням Пуанкаре розуміється площина (або поверхня) в фазовому просторі, вибрана таким чином, щоб всі траєкторії, що належать атрактору, пересікали її трансверсально (під ненульовим кутом).

#### Граничні множини і атрактори

Якщо існує точка  $y$  за умови, що траєкторія  $\phi_t(x_0)$  неодноразово входить до будь-якого околу  $U$  в  $y$  для  $t \rightarrow \infty$ , то  $y$  є граничною точкою  $x_0$ . Множина таких точок  $y$  визначається як гранична множина  $x_0$ , яка може бути представлена у вигляді функції  $Y(x_0)$ . Якщо існує такий відкритий окіл  $U$  граничної множини  $Y$ , і для всіх  $x_0 \in U$ ,  $Y(x_0) = Y$ , гранична множина  $Y$  є притягаючою. Притягаюча гранична множина також називається атрактором. Об'єднання всіх  $U$  визначається як притягуючий басейн граничної множини  $Y$ .

Точка рівноваги: якщо існує точка  $x_{eq}$ , що задовольняє  $x_{eq} = \phi_t(x_{eq})$  для всіх  $t$ , то така точка  $x_{eq}$  називається точкою рівноваги. Атрактор точки рівноваги є власною точкою рівноваги. Для дискретної системи немає ніякої граничної множини, що відповідає точці рівноваги.

Граничний цикл: якщо існує така траєкторія  $\phi_t(x_0)$ , що задовольняє  $\phi_t(x_0) = \phi_{t+T}(x_0)$  з мінімальним періодом  $T$  для всіх  $t$ , то така траєкторія називається періодичною поведінкою. Атрактор періодичної поведінки є замкнутою траєкторією  $\phi_t(x_0)$  і також називається граничним циклом. Якщо в періодичній неавтономній системі  $n$ -го порядку з вимушеним періодом  $T_f$ , період  $T$  є цілим кратним  $k$  до  $T_f$ , то основний потік відомий як  $k$ -періодна поведінка і як субгармоніка  $k$ -го порядку. Для дискретної системи граничні множини періодичної поведінки є фіксованими точками.

Дивний атрактор: гранична множина називається хаотичною, якщо відповідне рішення траєкторії експоненціально чутливе до початкових умов.

Траєкторія хаосу демонструє змішано випадкову поведінку. Взагалі кажучи, дивний атрактор використовується для опису геометричної притягаючої граничної множини для хаосу. Для дискретної системи гранична множина хаосу є дивною геометрією, яка відрізняється від простої геометрії періодичної і квазіперіодичної поведінки. Це тонка шарувата структура.

Множина точок у фазовому просторі дисипативної системи, відвідуваних в сталому режимі, називається атрактором.

Дивні атрактори є ні кінцевим набором точок, ні гладкою кривою або поверхнею, ні об'ємом, обмеженим кусково-гладкою замкнутою площиною. Тим не менш, хаотичний атрактор може не бути дивним. Наприклад, логістичне відображення при певному параметрі має хаотичний атрактор з позитивним показником Ляпунова, але цей атрактор не є дивним, так як це просто набір значень в інтервалі  $[0,1]$ . Для гамільтонових систем динаміка може бути хаотичною. Тим не менш, це консервативні системи, які взагалі не мають атракторів.

З іншого боку, було встановлено, що дивні нехаотичні атрактори дійсно є типовими в системах, які знаходяться під дією двочастотної квазіперіодичної сили. Ці явища можна спостерігати експериментально досліджуючи показники Ляпунова, інформаційні розмірності, амплітудні спектри Фур'є і фазові портрети. Спектр потужності дивних хаотичних атракторів досить широкий і має набагато більший вміст гармонік, ніж періодичні атрактори і дивні нехаотичні атрактори.

#### Стійкі і нестійкі множини

Якщо обидва власних числа негативні, то збурення з плином часу згасає і прагне до нуля, тобто система наближається до особливої точки. Це стійка особлива точка. Якщо хоча б одне власне число буде більше нуля, то відповідна складова збурення буде наростати, тобто система буде йти від особливої точки. Отже, це нестійка особлива точка.

У таблиці 1.1 представлено зведення типів особливих точок, що класифікуються за власними числами матриці Якобі. Щоб ця класифікація відразу асоціювалася з певними наочними образами - фазовими портретами в околі особливих точок, ми наводимо по периферії рис. 1.1 відповідні діаграми.

Власні числа задовольняють квадратному рівнянню:

$$\lambda^2 - S\lambda + J = 0. \quad (1.1)$$

Його називають характеристичним рівнянням.

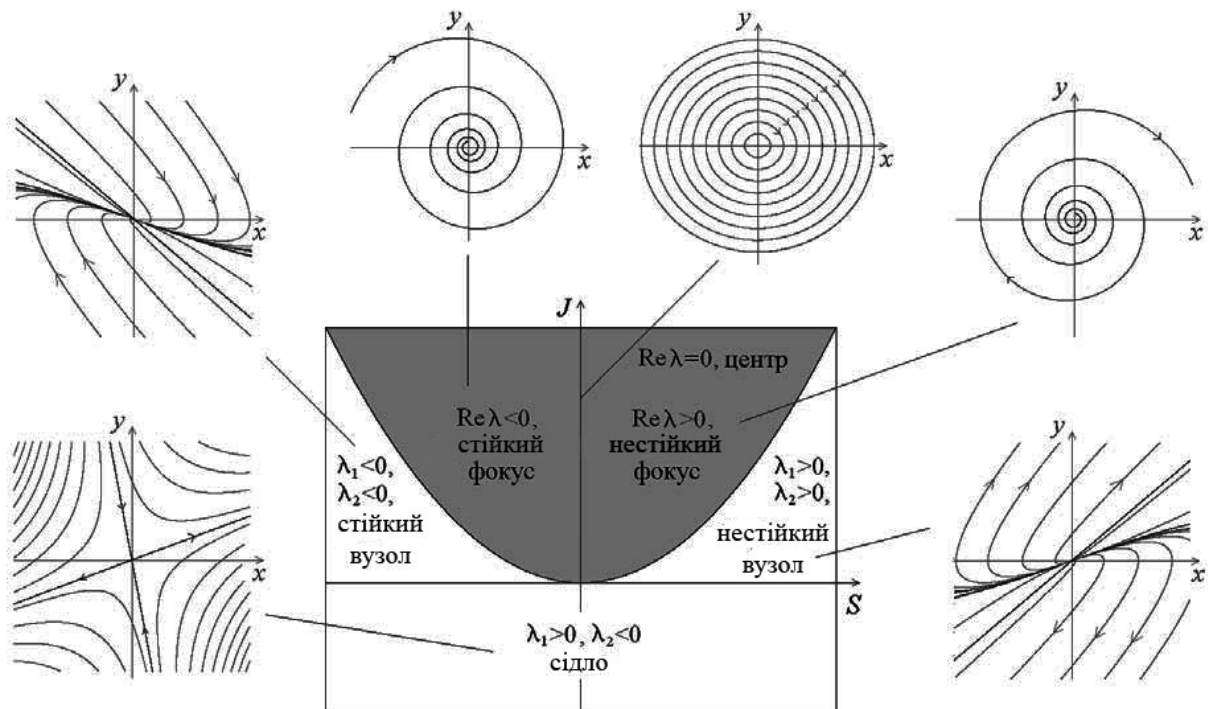


Рис. 1.1. У центрі рисунка представлена діаграма на площині параметрів слід матриці  $S$ – детермінант матриці Якобі  $J$ , на якій показані області, які відповідають різним типам особливих точок. Сірим кольором позначено область, в якій корені характеристичного рівняння є комплексними. По периферії рисунка показаний вид фазових портретів в околі особливих точок.



Таблиця 1.1. Класифікація особливих точок, заснована на властивостях коренів характеристичного рівняння

Умова на власні числа	Тип особливої точки
Дійсні, $\lambda_1 > 0, \lambda_2 > 0$ .	Нестійкий вузол
Дійсні, $\lambda_1 > 0, \lambda_2 < 0$ .	Сідло
Дійсні, $\lambda_1 < 0, \lambda_2 < 0$ .	Стійкий вузол
Чисто уявні, $\lambda_1 = i\omega, \lambda_2 = -i\omega$	Центр (в консервативних системах)
Комплексно спряжені, $\text{Re } \lambda > 0$	Нестійкий фокус
Комплексно спряжені, $\text{Re } \lambda < 0$	Стійкий фокус

### 1.1.2. Критерії хаосу

#### Показники Ляпунова

Показник Ляпунова може бути використаний для визначення стабільності квазіперіодичної і хаотичної поведінки, і також стабільності точок рівноваги і періодичних поведінок. Він дає можливість кількісно оцінити розтягування і стиснення атрактора в просторі станів. Показник Ляпунова є експонентною швидкістю цієї дивергенції та конвергенції. Якщо максимальний показник Ляпунова динамічної системи позитивний, ця система є хаотичною, в іншому випадку – нехаотичною. Хоча показники Ляпунова генеровані власними значеннями, між ними є багато відмінностей: власне значення є локалізованою величиною, в той час як показник Ляпунова є глобальною величиною; власне значення є постійною величиною, в той час як показник Ляпунова є середнім значенням; власне значення є комплексним числом, а показник Ляпунова є дійсним числом, і власні значення зазвичай не ортогональні, у той час як показники Ляпунова взаємно ортогональні.

Показники Ляпунова безпосередньо пов'язані з критеріями хаосу. Тому дуже важливо проводити розрахунки показників Ляпунова. Якщо аналітична модель динамічної системи відома, процес для обчислення показників

Ляпунова полягає в наступному. Розв'язок руху змінних стану системи виражається у вигляді:

$$X(t) = T^t X_0, \quad (1.2)$$

де  $T^t$  є відображенням опису  $t$ -часової еволюції  $X$  і їх відхилення  $\delta X$  визначається за формулою:

$$\delta X(t) = U_{X_0}^t \delta X_0, \quad (1.3)$$

де  $U_{X_0}^t$  – відображення опису  $t$ -часової еволюції  $\delta X$ . Після цього показники Ляпунова  $\lambda_i$   $d$ -вимірної системи можуть бути обчислені як:

$$\lambda_i (i = 1 \sim d) = \lim_{h \rightarrow \infty} \frac{1}{h\Delta t} \sum_{j=0}^{h-1} \log \frac{\|U_{X_j}^{\Delta t} e_i^j\|}{\|e_i^j\|}, \quad (1.4)$$

де  $\Delta t$  – еволюція часу, і  $e_i^j$  є  $i$ -м базисним вектором  $d$ -вимірного простору станів на  $j$ -му кроці. Слід зазначити, що  $e_i^j$  необхідно ортогоналізувати і нормувати на кожному ітераційному кроці. При обмеженнях  $\Delta t \ll 1$  і  $\|e_i^j\| \ll 1$ ,  $\lambda_i$  можна апроксимувати як:

$$\lambda_i (i = 1 \sim d) = \lim_{h \rightarrow \infty} \frac{1}{h\Delta t} \sum_{j=0}^{h-1} \log \frac{\|T^{\Delta t}(X_j + e_i^j) - T^{\Delta t}(X_j)\|}{\|e_i^j\|}. \quad (1.5)$$

Деякі розрахункові підходи були розроблені для спеціальних динамічних систем, таких як розривна динамічна система і кінцевовимірна система з часовою затримкою. Для розривної динамічної системи можна провести доповнення до значень розривів, що дозволяє обчислювати потік  $\delta X$ . Для динамічної системи із часовою затримкою  $X$  на інтервалі  $[t, t - \tau]$  може бути апроксимоване  $N$  прикладами на інтервалах  $\Delta t = \tau / (N - 1)$ . Ці  $N$  приклади можуть еквівалентно вважатися як  $N$  змінні  $N$ -вимірного дискретного відображення. Тоді показники Ляпунова для системи із часовою затримкою можуть бути обчислені з цим апроксимованим відображенням.

## Фрактальні розмірності

Визначення хаосу включає пошук дивного атрактора в просторово-становій динаміці, яка може бути охарактеризована його фрактальною структурою. Розмірність атрактора є мірою кількості активних змінних і складністю рівнянь, необхідних для моделювання динаміки системи. Типові характеристики фрактальної структури: (а) тонка структура і нехарактерний масштаб, (б) занадто нерегулярні, щоб бути описаними звичайною геометрією, обидві локальні і глобальні, і (в) мають деяку ступінь самоподібності, що означає, що окремі складові частини об'єкта нагадують цілий в деяких відносинах. Фрактальні структури можуть бути або детермінованими, де вони точно самоподібні, або випадковими, де вони тільки статистично самоподібні. Самоподібність означає, що структура є масштабно інваріантною.

Геометричні об'єкти з дробовими вимірюваннями розмірності називаються фракталами і саме в динамічних системах було виявлено, що хаотичні атрактори є фрактальними об'єктами. Визначення фрактальної розмірності є одним з параметрів, що характеризують хаотичний атрактор. Вимірювання її є свого роду квантор, який описує атрактор в геометричних аспектах. Розмірність атрактора дає нам оцінку числа активних степеней свободи в системі. Якщо розмірність атрактора не є цілим числом, атрактор є дивним. Ємнісна розмірність  $D_b$  динамічної системи, яка є мірою фрактальної розмірності, визначається як:

$$D_b = \lim_{R \rightarrow 0} \left\{ -\frac{\log N(R)}{\log R} + \frac{\log k}{\log R} \right\}, \quad (1.6)$$

де  $R$  є довжиною сторони побудованого „боксу”,  $N(R)$  є кількістю боксів, що повинні містити всі точки на атракторі, і  $k$  – константа пропорційності.

## Ентропія

Сума позитивних показників Ляпунова є ентропією Колмогорова-Сіная (К-С). Ця ентропія К-С має схожість зі звичайною термодинамічною

ентропією, оскільки вона вимірює розширення близьких траєкторій в нових ділянках простору станів. У той же час, на відміну від термодинамічної ентропії, ентропія К-С має розмірність зворотного часу або зворотних ітерацій для відображень. Це міра середньої швидкості, з якою втрачається передбачуваність. Ця інверсія є грубою оцінкою часу, на якій є очікуваним прийнятний прогноз. Чисто випадкова система має нескінченну ентропію, а періодична система має нульову ентропію, тому ентропія К-С є позитивною константою для хаотичної системи і хаотичним збільшенням ступеня зі значенням ентропії К-С [20-38].

## **1.2. Основні методи управління хаосом**

### **1.2.1 Розімкнуте (програмне) керування**

Використання принципу керування по збурюванню, або „керування програмним сигналом”, тобто формування сигналу керування у вигляді деякої функції часу без обліку значень керованого процесу, засновано на зміні поведінки нелінійної системи під впливом заздалегідь обраного зовнішнього сигналу  $u(t)$ . Цей сигнал може являти собою або певний фізичний вплив на систему, наприклад – зовнішню силу або поле, або представляти зміну („модуляцію”) деякого параметра керованої системи. Такий підхід привабливий простотою реалізації, тому що при цьому не потрібне проведення яких-небудь вимірів і встановлення давачів. Дана обставина має особливе значення при керуванні надшвидкими процесами.

Можливість значної зміни динаміки системи періодичним сигналом збурення відома давно. Наприклад, як показано ще в першій половині ХХ століття [39, 40], високочастотне збурення може стабілізувати маятник у нестійкому стані. Це відкриття поклало початок вібраційній механіці [41]. Аналіз впливу високочастотного збурення на поведінку нелінійних систем загального вигляду ґрунтувався на методі усереднення Крилова-Боголюбова

[42]. У теорії керування високочастотні впливи й параметрична модуляція досліджувалися в рамках вібраційного керування [43, 44] і так званого „тремтячого” керування (dither control) [45], а також у роботах Г.А. Леонова по нестационарній стабілізації [46, 47]. У згаданих роботах, однак, розглядалося тільки завдання стабілізації системи або в заданому стані рівноваги, або щодо заданої („цільової”, „опорної”) траєкторії.

У публікаціях [48, 49] для зміни властивостей системи, представленої у формі Лур’є, запропоновано використовувати віброуюче керування з кусково-постійним вхідним стохастичним сигналом. Це дає можливість впливати на вигляд еквівалентної нелінійності, на положення рівноваги системи та ін. (аналогічно гармонійної й статистичної лінеаризації, див. [50, 51]). Зокрема, у зазначених роботах з використанням евристичного критерію хаосу, запропонованого в [52], досліджена можливість збурення, або придушення в системі хаотичних процесів.

Перші спроби теоретичного осмислення цих явищ зроблені в роботах [53, 54], у яких метод В.К. Мельникова [55] застосований до дослідження так званого „осцилятора Дюфінга-Холмса” (Duffing-Holmes)

$$\ddot{\varphi} - c\varphi + b\varphi^3 = -a\dot{\varphi} + d \cos(\omega t). \quad (1.7)$$

Права частина (1.7) розглядалася як мале збурення, що діє на незбурену гамільтоніанову систему. Аналітично обчислена функція Мельникова, що представляє швидкість зміни відстані між стійкими і нестійкими станами при малих збуреннях. На її основі отримані значення параметрів, при яких поведінка системи стає хаотичною. Далі введено додаткове збурення, що полягає в зміні параметра нелінійності  $b$ , замість якого розглядається функція  $b(1 + \eta \cos \Omega t)$  й знайдена нова функція Мельникова. Чисельні дослідження цієї функції показали, що хаотичну поведінку можна стабілізувати, якщо частоту  $\Omega$  вибрати близькою до частоти вихідного збурення  $\omega$ . Цей ефект був підтверджений експериментально за допомогою установки, що містить два

постійних магніти, електромагнітний вібратор і оптичний давач [56]. Огляд отриманих результатів, а також постановка ряду нових завдань представлені в роботі [57]. Аналогічні результати для більш широкого класу нелінійних осциляторів отримані в [58, 59].

Проведені останніми роками дослідження спрямовані на підвищення якості стабілізації хаосу при зниженні необхідного рівня зовнішнього впливу й забезпечення збіжності траєкторій системи до бажаної періодичної орбіти (граничного циклу). Крім того, були проведені дослідження з керування системами дискретного часу (керуванню відображеннями).

Так, у роботі [60] на основі комп'ютерного моделювання переходу Джозефсона (Josephson), процесів у рідких кристалах, а також на базі експериментів з бістабільною механічною системою показано, що зміна фази, а також частоти параметричного збудження може як підвищити, так і знизити поріг виникнення хаосу.

У роботах [61, 62] вплив квазіперіодичного збудження досліджується шляхом зведення його до періодичного впливу. Метод В.К. Мельникова використаний у роботі [63] для аналізу впливу на систему параметричного збудження, що є випадковим процесом, а в роботі [64] запропоновано вибирати частоту збудження близько до резонансного піку спектральної густини однієї із змінних системи. У роботі [65] робиться спроба досягти резонансу при збудженні із частотою бажаного періодичного процесу. Оскільки в хаотичному аттракторі містяться траєкторії процесів, близьких до періодичних з різними періодами, при належному виборі керування можна істотно зменшити необхідну амплітуду (енергію) збудження. Чисельна ілюстрація цього підходу в застосуванні до системи Лоренца і системі високого порядку, що складається із багатьох дифузійно-зв'язаних систем Лоренца, дана в роботі [65]. У статтях [66, 67] показана можливість стабілізації нестійких періодичних траєкторій при дії періодичного сигналу, частота якого значно нижче характерної частоти системи.

У деяких статтях вибір функції збудження пов'язується з виглядом нелінійності, властивій системі. Розглянемо цей метод докладніше. Нехай модель об'єкта керування має вигляд:

$$\dot{x} = f(x) + Bu, \quad x \in \mathfrak{R}^n, u \in \mathfrak{R}^m \quad (1.8)$$

Припустимо, що  $m = n$  й  $\det B \neq 0$ . Якщо  $x_*(t)$  – бажана траєкторія керованого руху, то інтуїтивно обґрунтований вибір збудження у вигляді [68] (так званий „вплив Хюблера”):

$$u_*(t) = B^{-1} \left( \dot{x}_*(t) - f(x_*(t)) \right), \quad (1.9)$$

тому що при такому виборі функція  $x_*(t)$  задовольняє рівнянням руху збудженої системи. Рівняння похибки  $e = x - x_*(t)$  в цьому випадку має вигляд  $\dot{e} = f(e + x_*(t)) - f(x_*(t))$ . Тому, якщо лінеаризована система з матрицею  $A(t) = \partial f(x_*(t)) / \partial x$  рівномірно стійка в тому розумінні, що для деякого  $\lambda$  й для всіх  $t \geq 0$  виконане  $A(t) + A(t)^T \leq -\lambda I$ , то всі рішення (1.8), (1.9) сходяться до  $x_*(t)$ , тобто досягається мета керування. Більш загальні умови збіжності наведені в монографії [69]. Якщо  $m < n$  й матриця  $B$  – вироджена, то аналогічний результат можна отримати при виконанні наступної умови узгодження: значення вектор-функції  $\dot{x}_*(t) - f(x_*(t))$  повинні лежати в лінійному підпросторі, породженому стовпцями матриці  $B$ . Тоді відповідне керування можна представити у вигляді  $u_*(t) = B^+ \left( \dot{x}_*(t) - f(x_*(t)) \right)$ , де  $B^+$  є псевдообернена до  $B$  матриця. Незважаючи на те, що виконання умови рівномірної стійкості виключає хаотичні (тобто нестійкі) траєкторії  $x_*$ , як відзначено в ряді статей, якщо області з нестійкою поведінкою не є домінуючими, то можлива локальна збіжність до хаотичних траєкторій. У роботі [70] для ряду прикладів зазначений підхід порівнюється з іншими методами. Розглядається система другого порядку, що описує так зване „електричне коло Муралі-Лакшманана-Чуа” (Murali-Lakshmanan-Chua), а також рівняння Фіцхью-Нагумо (FitzHugh-

Nagumo), що описують проходження нервових імпульсів через нейронну мембрану. Результати чисельного дослідження різних методів програмного збудження хаосу при наявності шумів наведені в роботі [71]. У статтях [72, 73] подібні результати отримані для дискретних систем.

У роботі [74] отримані аналітичні частотні умови глобальної збіжності рішень систем Лур'є до сталого режиму при дії неперіодичних сигналів збудження. Ці умови допускають наявність областей нестійкості керованої системи. Вони засновані на отриманих раніше в [75] результатах для періодичних вхідних процесів.

Підбиваючи підсумок, можна сказати, що до теперішнього часу розроблено дуже багато методів керування хаотичними процесами в розімкнутому контурі (керування із програмним впливом). Більшість із цих методів досліджено чисельно і в окремих випадках для модельних завдань.

### 1.2.2 Лінійне й нелінійне керування

Багато статей присвячені можливості застосування традиційних підходів і методів автоматичного керування до завдань керування хаосом. У ряді випадків бажану мету керування можна досягти навіть за допомогою простого пропорційного закону керування й зворотного зв'язку. Наприклад, як показано в роботі [76], метод комбінованого керування, названого „розімкнуто-замкнутим” (open-plus-closed-loop, OPCL) застосуємо до систем виду (1.8) при  $m = n$  й  $\det B \neq 0$ . Закон керування запропонований у вигляді

$$u(t) = B^{-1} \left( \dot{x}_*(t) - f(x_*(t)) - K(x - x_*(t)) \right), \quad (1.10)$$

де  $K$  – квадратна матриця коефіцієнтів підсилення. Чисельні результати по дослідженню даного методу для хаотичних систем наведені в роботах [77, 78]. Нелінійні варіанти методу комбінованого керування запропоновані в роботах [79, 80]. Керування із пропорційною амплітудно-імпульсною модуляцією вивчалось в роботах [81-83]. У роботах [84-88] на основі дослідження



розташування полюсів вивчається зворотний зв'язок у розширеному просторі  $(x, u)$  (тобто динамічний регулятор). При цьому отримуються локальні результати (через неточність лінеаризації).

З погляду сучасної теорії керування випадок  $m = n$ ,  $\det B \neq 0$  тривіальний. Дійсно, для збіжності рішень системи (1.8), (1.10) до бажаної траєкторії  $x_*(t)$  достатньо, щоб  $K$  було обрано у вигляді  $K = kI$ , де  $k > \sup \|A(t)\|$ ,  $A(t) \triangleq \partial f(x_*(t)) / \partial x$ . Такий вибір завжди можливий, якщо вектор-функція  $x_*(t)$  обмежена, зокрема, для періодичних і хаотичних траєкторій  $x_*(t)$ .

Для розв'язку більш складних завдань при частковому керуванні й вимірюванні в теорії нелінійного керування розроблений цілий ряд методів. Один з найбільш розвинених – лінеаризація зворотним зв'язком (feedback linearization) [89-91]. До хаотичних систем він застосовувався в роботах [92-95]. Пояснимо ідею методу для систем, афінних по керуванню

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u, \quad x \in \mathfrak{R}^n, \quad u \in \mathfrak{R}^m \quad (1.11)$$

Система (1.11) називається лінеаризованою зворотним зв'язком в області  $\Omega \subset \mathfrak{R}^n$ , якщо існує гладка обернена заміна координат  $z = \hat{O}(x)$ ,  $x \in \Omega$ , і гладке перетворення зворотного зв'язку

$$u = \alpha(x) + \beta(x)v, \quad x \in \Omega \quad (1.12)$$

де  $v \in \mathfrak{R}^m$  – нове керування, якщо замкнута система лінійна, тобто її рівняння в нових координатах має вигляд

$$\dot{z} = Az + Bv \quad (1.13)$$

для деяких постійних матриць  $A, B$ .

Критерій лінеаризованості зворотним зв'язком має простий вигляд для систем з одним входом ( $m = 1$ ). Саме система (1.11) лінеаризована зворотним зв'язком в околі деякої точки  $x_0 \in \mathfrak{R}^n$  тоді й тільки тоді, коли існує гладка скалярна функція  $h(x)$  така, що система має в точці  $x_0$  відносний ступінь  $n$  стосовно виходу  $y = h(x)$ . Нагадаємо, що відносний ступінь дорівнює  $r$ , якщо

послідовне диференціювання вихідної функції  $y = h(x)$  в силу системи (1.11) дає вираз, що містить вхід точно на  $r$ -му кроці. Більш формально:

$$L_g L_f^k h(x) = 0, \quad k = 0, 1, \dots, r-2, \quad L_g L_f^{r-1} h(x) \neq 0 \quad (1.14)$$

де через  $L_\Psi \Phi(x)$  позначається похідна Лі вектор-функції  $\Phi(x)$  уздовж векторного поля  $\Psi$ :  $L_\Psi \Phi(x) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \Psi_i(x)$ .

Якщо критерій лінеаризованості виконується, то система може бути приведена до так званої канонічної форми Бруновського (ланцюг інтеграторів) наступними перетвореннями:

$$\begin{aligned} z &= \Phi(x) = \text{col}(h(x), L_f h(x), \dots, L_f^{n-1} h(x)), \\ u &= \frac{1}{b(\Phi^{-1}(z))} (-a(\Phi^{-1}(z)) + v) \end{aligned} \quad (1.15)$$

Приклад. Розглянемо систему Лоренца зі скалярним керуванням у третьому рівнянні:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \sigma(x_2 - x_1), \\ \dot{x}_2 = rx_1 - x_2 - x_1x_3, \\ \dot{x}_3 = -\beta x_3 + x_1x_2 + u. \end{cases} \quad (1.16)$$

Виберемо  $y = x_1$ . Тоді  $L_f y = \dot{y} = \dot{x}_1 = \sigma(x_2 - x_1)$ ,

$L_f^2 y = L_f(L_f y) = \ddot{x}_1 = \sigma(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) = \sigma((r+1)x_1 - 2x_2 + x_1x_3)$ . Очевидно, відносний ступінь

$r=3$  усюди, крім площини  $x_1 = 0$ . Заміну координат можна задати співвідношеннями

$$\begin{aligned} x_1 &= z_1, \\ x_2 &= \frac{1}{\sigma} z_2 + z_1, \\ x_3 &= \frac{1}{z_1} \left( \frac{1}{\sigma} z_3 - (r-1)z_1 - \frac{2}{\sigma} z_2 \right), \end{aligned}$$

тобто система лінеаризована зворотним зв'язком при  $x_1 \neq 0$ . Таким чином, система (1.16) еквівалентна лінійній в кожному з півпросторів  $\{x_1 < 0\}$ ,  $\{x_1 > 0\}$ .

Оскільки лінійна система у формі Бруновського цілком керована, за допомогою методів теорії лінійних систем можна забезпечити будь-яку задану динаміку замкнутої системи. До недоліків отриманого рішення відноситься те, що воно не є глобальним. Інший істотний недолік полягає у тому, що подібний підхід повністю ігнорує власну динаміку системи. Довільна бажана динаміка досягається ціною великої потужності керування, необхідної при значних початкових умовах і при спостереженні за швидкозмінним програмним рухом. На жаль, незастосовність до завдань зі слабким (малопотужним) керуванням є типовим недоліком багатьох робіт, що використовують традиційні методи нелінійного й адаптивного керування.

Можливості динамічних зворотних зв'язків можуть бути повніше реалізовані шляхом застосуванням спостерігаючих пристроїв (спостерігачів). Такий підхід дає методичну основу для керування при неповних вимірюваннях системи. Огляд методів побудови нелінійних спостерігачів стосовно до завдань керування хаосом наведений у роботі [96]. Деякі часткові прийоми описані також в [97, 98]. У роботі [99] приводяться результати застосування лінійних спостерігачів з більшим коефіцієнтом підсилення для керування системами з нелінійностями, що задовольняють глобальній умові Ліпшица.

Відмітимо, що для хаотичних моделей глобальна умова Ліпшица найчастіше не виконана через наявність поліноміальних членів, таких як  $x_1x_2, x^2$  і т.д. Обмеженість траєкторій хаотичних систем, що має місце у власному русі, під впливом керування може порушуватися. Отже, при виборі керування особлива увага повинна бути приділена забезпеченню обмеженості рішень. У протилежному випадку рішення може „піти на нескінченність” за кінцевий час – „зірватися”, що робить неадекватним обговорення питань стійкості й збіжності. Можливість зриву траєкторій нелінійних систем часто упускається з розгляду в статтях прикладного характеру.

Ряд методів ґрунтується на зміні поточного значення деякої цільової функції  $Q(x(t), t)$ . Значення  $Q(x(t), t)$  може відповідати відстані між станом

системи в момент часу  $x(t)$  і поточним значенням  $x_*(t)$  на заданій траєкторії, наприклад –  $Q(x,t) = \|x - x_*(t)\|^2$ , де  $\|x\|$  – евклідова норма вектора  $x$ . В якості цільової функції може бути також обрана відстань від поточного положення системи  $x(t)$  до заданої цільової поверхні  $h(x) = 0$ , при цьому  $Q(x) = \|h(x)\|^2$ . Для систем неперервного часу значення  $Q(x)$  не залежить безпосередньо (у той же момент часу) від сигналу керування  $u$ , тому замість  $Q(x)$  можна використовувати нову виникаючу цільову функцію  $\dot{Q}(x) = (\partial Q / \partial x)F(x,u)$ , тобто замість зменшення значень вихідної цільової функції зменшувати швидкість зміни цієї функції за часом. У цьому полягає основна ідея методу швидкісного градієнта (ШГ-методу) [89, 100], при якому зміна керування  $u$  відбувається в напрямку антиградієнта по  $u$  швидкості  $Q(x)$  вихідної цільової функції. Уперше використання даного підходу до керування хаотичними системами запропоноване в [101]. ШГ-алгоритми мають деякі модифікації. Алгоритми в так званій кінцевій формі записуються в загальному виді як

$$u = -\Psi\left(\nabla_u \dot{Q}(x,u)\right), \quad (1.17)$$

де  $\Psi(z)$  – довільна вектор-функція, значення якої спрямоване під гострим кутом до свого аргументу  $z$ . Для афінних об'єктів керування  $\dot{x} = f(x) + g(x)u$  алгоритм (1.18) можна спростити:

$$u = -\Psi\left(g(x)^T \nabla Q(x)\right). \quad (1.18)$$

Окремими випадками (1.17) є пропорційний ШГ-алгоритм

$$u = -\Gamma \nabla_u \dot{Q}(x,u). \quad (1.19)$$

де  $\Gamma$  – довільна позитивно-визначена матриця, а також релейний ШГ-алгоритм

$$u = -\Gamma \text{sign}\left(\nabla_u \dot{Q}(x,u)\right). \quad (1.20)$$

Для завдань адаптації використовується диференціальна форма ШГ-алгоритмів:

$$\dot{u} = -\Gamma \nabla_u \dot{Q}(x, u). \quad (1.21)$$

Метод швидкісного градієнта заснований на використанні функції Ляпунова  $V$ , що убуває вздовж траєкторій замкнутої системи. Кінцева форма ШГ-алгоритмів отримується, якщо як функцію Ляпунова взяти саму цільову функцію:  $V(x) = Q(x)$ . Диференціальна форма ШГ-алгоритмів відповідає вибору  $V(x, u) = Q(x) + 0,5(u - u_*)^T \Gamma^{-1}(u - u_*)$ , де  $u_*$  – бажане („ідеальне”) значення керуючих змінних.

Відмітимо, що в роботах з використанням добре розвинених методів сучасної лінійної й нелінійної теорії керування, найчастіше не приділяється достатньої уваги специфічним властивостям хаотичних процесів. Це звичайно реалізується умовою опускання вимоги малості керування. З іншого боку, потужний інструментарій сучасної теорії керування не повністю використовується в роботах, у яких дана вимога враховується. Крім того, у багатьох публікаціях розглядаються лише приклади систем невисокого порядку й робляться нереалістичні припущення (наприклад, у ряді робіт вважається, що число керуючих впливів дорівнює розмірності вектора стану системи).

### 1.2.3 Адаптивне керування

У багатьох публікаціях розглядається можливість застосування методів адаптації для керування хаотичними процесами, наприклад [102, 103]. Це не дивно, тому що в багатьох фізичних додатках параметри об'єкта керування невідомі, а найчастіше й інформація про структуру моделі (наприклад – про розмірність рівнянь системи або вид нелінійних характеристик) задана не повністю.

У більшості робіт використовуються методи прямого або непрямого (заснованого на ідентифікації) адаптивного параметричного керування. Модель системи, таким чином, параметризується, тобто приводиться до виду

$$\dot{x} = F(x, \theta, u), \quad y = h(x) \quad (1.22)$$

де  $\theta$  – вектор невідомих параметрів. У відповідності з (1.22), закон керування також записується в параметричній формі:

$$u = U(x, \xi), \quad (1.23)$$

де  $\xi = \Phi(\theta)$ , тобто вектор параметрів регулятора визначається через вектор параметрів системи (1.22). Параметри процесів, отримані в результаті вимірювання стану  $\{x(t)\}$  або виходу системи  $\{y(t)\}$ , використовуються (у режимі реального часу, або при наступній обробці накопичених даних) для отримання оцінок  $\hat{\theta}(t)$  невідомих параметрів  $\theta(t)$  або безпосереднього для настроювання параметрів регулятора  $\xi(t)$ .

Для розробки алгоритмів адаптивного керування й параметричної ідентифікації можна використовувати широкий арсенал відомих методів адаптації, таких як методи градієнта й швидкісного градієнта, найменших квадратів, максимальної правдоподібності, і т. д. Для систем неперервного часу різноманітні алгоритми адаптації можна отримати, використовуючи диференціальну форму (1.21) ШГ-алгоритмів. Більшість із наявних результатів отримані при лінійній параметризації моделі (1.22) або регулятора (1.23).

Зазначені методи добре відомі з літератури по теорії керування, див., наприклад [102, 103]. Докази їхньої працездатності звичайно ґрунтуються на функціях Ляпунова, які або вибираються квадратичними в початкових умовах, або приводяться до квадратичних шляхом деякого перетворення змінних. У роботах [104-106], а також у багатьох інших публікаціях, представлені приклади застосування цього підходу для завдань керування типовими хаотичними системами другого й третього порядків (системами Лоренца, Чуа, Дюфінга й т. д.). У ряді статей, таких як [107-111], аналогічні методи використовуються й для систем більш високих порядків. Регулятор (1.24) звичайно будується із застосуванням еталонної моделі, або методів лінеаризації зворотним зв'язком.

Відзначимо, що в літературі по керуванню хаотичними процесами є різні трактування адаптивного підходу. Наприклад, у ряді статей [112-114] адаптивним названий простий лінійний інтегральний закон керування

$$\dot{\xi} = \gamma(y_* - y), \quad (1.24)$$

де  $y_*$  – бажане значення вихідної змінної  $y$ , а  $\gamma$  – коефіцієнт підсилення. Щоб пояснити ситуацію, розглянемо системи (1.22) і (1.23). Підстановкою (1.23) в (1.22) отримаємо наступні рівняння системи з параметрами, що налаштовуються:

$$\dot{x} = F(x, \Phi(\xi), U(x, \xi)), y = h(x). \quad (1.25)$$

Можна показати, що для афінної замкнутої системи  $\dot{x} = f(x) + g(x)\xi$  й квадратичної цільової функції  $Q = (y - y_*)^2$  алгоритм (1.24) є частковим випадком ШГ-алгоритму (1.21), у якому  $u$  замінено на  $\xi$ . Знак параметра  $\gamma$  повинен збігатися зі знаком  $\text{sign } \mu(x)$ , де  $\mu(x) = \nabla h(x)^T g(x)$ . Більш того, необхідною умовою працездатності алгоритму (1.24) є  $\text{sign } \mu(x) = \text{const}$ . Загальна форма ШГ-алгоритму (1.21) у цьому випадку має вигляд

$$\dot{\xi} = \gamma(y_* - y)\mu(x). \quad (1.26)$$

Його збіжність слідує із загальних умов стійкості ШГ-алгоритмів, див. [102]. Аналогічним чином неважко обґрунтувати й так званий закон Хюбермана-Люмера (Huberman-Lumer), що є узагальненням (1.24).

У цілому ряді робіт пропонуються алгоритми керування, засновані на настроюванні всього лише одного параметра. Ще в класичній роботі Е. Лоренца [115] було запропоновано використовувати для аналізу системи так зване обернене відображення послідовності (return map)  $y_k \mapsto y_{k+1}$ , де  $y_k = y(t_k)$  – значення деякої скалярної змінної  $y(t)$  в момент  $t_k$  досягнення чергового локального максимуму. Вважається [116, 117], що в системах із сильною дисипацією з достатньою точністю можна обмежити глибину пам'яті одиницею й вивчати властивості вихідної системи за допомогою аналізу функції

$y_{k+1} = L(y_k)$ . Наприклад, перетворення хаотичного руху в періодичний відповідає стабілізації нестійкої нерухомої точки відображення  $L(\cdot)$ , для досягнення якої, як правило, досить змінювати один керуючий параметр [118].

#### 1.2.4. Метод OGY (Ott-Grebogi-Yorke) для керування хаосом

Метод керування OGY був розроблений Оттом, Гребоджі, і Йорком [119, 120] в 1990 році. Метою управління є стабілізація однієї з нестійких періодичних орбіт збуренням вибраного (доступного) параметру системи у невеликому діапазоні деяких номінальних значень.

Щоб пояснити більш докладно дію методу OGY, припустимо для простоти, що у нас є тривимірна неперервна в часі система першого порядку автономних звичайних диференціальних рівнянь:

$$\frac{dx}{dt} = F(x, p), \quad (1.27)$$

де  $x \in R^3$  – це стан і  $p \in R$  є параметром системи, який ми можемо змінювати. Ми також вважаємо, що параметр  $p$  може бути змінений в межах невеликого інтервалу навколо свого номінального значення  $p_0$  ( $p \in [p_0 - \delta p_{\max}, p_0 + \delta p_{\max}]$ , де  $\delta p_{\max}$  є максимальною допустимою зміною параметра  $p$ ). Ми вибираємо двовимірну поверхню Пуанкаре  $\Sigma$ , яка визначає відображення Пуанкаре  $P$  (для  $\xi \in \Sigma$ , позначимо через  $P(\xi)$  точку, в якій траєкторія, починаючи з  $\xi$ , перетинає  $\Sigma$  перший раз). Так як векторне поле  $F$  залежить від  $p$ , відображення Пуанкаре  $P$  також залежить від параметру  $p$ . Таким чином, ми маємо

$$P: R^2 \times R \ni (\xi, p) \rightarrow P(\xi, p) \in R^2 \quad (1.28)$$

Припустимо, що  $P$  є диференційованою функцією. Нехай ми вибрали одну з нестійких періодичних орбіт, вбудованих в атрактор системи як мету нашого управління, тому що, наприклад, він пропонує підвищену продуктивність системи в порівнянні з початковою хаотичною поведінкою. Це може бути у випадку, наприклад, з хаотичною лазерною інтенсивністю, яка, безсумнівно, є



небажаним явищем і ефективна потужність лазерного променя може бути підвищена за допомогою керування стабілізації або усунення хаотичної поведінки [121]. Ще один приклад небажаної хаотичної поведінки є аритмія, де серце качає кров неефективним чином. У цьому випадку, управління серцевим биттям в майже періодичний режим має першорядне значення [122]. Для простоти, будемо вважати, що це 1-періодна орбіта (фіксована точка відображення  $P$ ).

Позначимо через  $\xi_F$  нестійку фіксовану точку  $P$  для  $p = p_0$  ( $P(\xi_F, p_0) = \xi_F$ ). Нехай перше наближення  $P$  в околі  $(\xi_F, p_0)$  буде мати форму

$$P(\xi, p) \approx P(\xi_F, p_0) + A \cdot (\xi - \xi_F) + w \cdot (p - p_0), \quad (1.29)$$

де  $A$  – матриця Якобі  $P(\cdot, p_0)$  при  $\xi_F$ , і  $w = \frac{\partial P}{\partial p}(\xi_F, p_0)$  є похідною  $P$ .

Стабілізація фіксованої точки досягається за рахунок реалізації зворотного зв'язку виду

$$p(\xi) = p_0 + c^T (\xi - \xi_F). \quad (1.30)$$

В оригінальному описі методу OGY [119], вектор  $c$  обчислюється, використовуючи вираз

$$c = -\frac{\lambda_u}{f_u^T w} f_u^T, \quad (1.31)$$

де  $\lambda_u$  є нестійким власним значенням і  $f_u$  є нестійким контрваріантом, що відповідає лівому власному вектору  $A$ .

Таким чином, OGY метод заснований на локальній лінеаризації відображення Пуанкаре в околі вибраної нестійкої нерухомої точки та локальній лінійній стабілізації зворотнім зв'язком.

Перевагою OGY методу є те, що всі необхідні розрахунки можуть здійснюється автономно на основі вимірювань (наприклад, знаходження нестійких періодичних орбіт, фіксуючи одну з них як мету управління,

розрахунку змінних і параметрів, необхідних для розрахунку керуючого сигналу).

Як тільки мета управління (нестійкі орбіти повинні бути стабілізовані) буде отримана, керуючий сигнал подається тільки тоді, коли траєкторія, що спостерігається, буде проходити близько до фіксованої точки (де діє лінеаризація). Припущення про існування орбіти з високою густиною гарантує, що в підсумку траєкторія ввійде у вікно управління і досягнення управління може бути дуже тривалим.

Слід тут зазначити, що Дресслер і Нітше [123] запропонували варіант OGY методу, в якому тільки одна змінна вимірюється в системі, а інші змінні, необхідні для управління, відновлені з використанням методу затримки координат.

### **Проблеми реалізації OGY методу**

При реалізації OGY методу для реального застосування потрібно виконати такий ряд елементарних операцій:

- збір даних – вимірювання (як правило, скалярні) сигналу розглянутої хаотичної системи. Ця операція повинна бути виконана таким чином, щоб не порушити існуючу динаміку. Для подальшої комп'ютерної обробки, виміряні сигнали повинні бути відібрані і оцифровані (А / Ц перетворення);
- вибір відповідного параметру управління;
- знаходження нестійких періодичних орбіт з використанням експериментальних даних (вимірюються часові серії), і фіксація цілі управління;
- знаходження параметрів і змінних, необхідних для управління (як описано вище);
- застосування сигналу управління системою – цей крок вимагає постійного вимірювання динаміки системи з метою визначення

моменту, в який застосовується сигнал управління, тобто, в той момент, коли фактична траєкторія проходить в малому околі обраної періодичної орбіти, і в такому випадку миттєва реакція контролера (застосування керуючого імпульсу).

У комп'ютерних експериментах було підтверджено, що всі вищезгадані OGY кроки можуть бути успішно проведені в багатьох різноманітних системах досягненням стабілізації довго-періодних орбіт.

Є кілька проблем, що виникають при спробі реалізувати експериментальну установку. Незважаючи на те, що змінні і параметри можуть бути обчислені офлайн, треба враховувати, що вимірні сигнали системи, як правило, спотворені через шум та декілька нелінійних операцій, пов'язаних з А / Ц перетворенням (можливе округлення, усічення, кінцева довжина слова, переповнення корекції і т. д.). Використання спотворених значень сигналу і введення додаткових помилок в комп'ютерних алгоритмах та лінеаризації застосовуються для управління розрахунками, що може спричинити загальний збій методу. Крім того, існує час затримки в контурі зворотного зв'язку (наприклад, в очікуванні реакції комп'ютера, перериванні при передачі та прийомі даних і т. д.).

### **Приблизна процедура для знаходження періодичних орбіт**

Іншим можливим джерелом проблем в процедурі управління є помилки, введені за допомогою алгоритмів, для знаходження періодичних орбіт (мета управління). Використовуючи експериментальні дані, ми можемо знайти тільки наближення до нестійких періодичних орбіт [124-126].

Зазвичай використовується проста техніка, запропонована Лезропом (Lathrop) і Костелічем (Kostelich) [125] для відновлення нестійких періодичних орбіт з експериментальних часових рядів. Ця процедура передбачає, що у нас є ряд послідовних точок  $\{x_i\}$ ,  $i = 0, 1, \dots, N$  на траєкторії системи та при взятті будь-якої з цих точок  $x_m$ , ми знайдемо найменше позитивне число  $k$  таке, що

$\|x_{m+k} - x_m\| < \varepsilon$ , де  $\varepsilon$  є заданою точністю. Крім того, вона стверджує, що орбіта, виявлена таким чином, знаходиться недалеко від нестійких періодичних орбіт, період яких наближено пов'язаний з тим, що й у виявленої послідовності. Деякі нові методи були запропоновані відносно недавно [127], що могли б поліпшити локалізацію процедур для нестабільних періодичних орбіт. Особливо цікавим є інтервальні арифметичні методи [128, 129] на основі інтервального методу Ньютона, який дозволяє точно розрахувати позиції періодичних орбіт для систем з відомими математичними моделями.

У лабораторних експериментах ці орбіти можуть розраховуватися автономно, використовуючи комп'ютерну програму, або вони можуть бути локалізовані з використанням двохпорогового компаратора.

### Узагальнена модель для одновимірних відображень

Основну ідею управління хаосом можна зрозуміти з урахуванням одновимірного логістичного відображення [130], що є однією з найбільш вивчених хаотичних систем:

$$x_{n+1} = f(x_n, r) = rx_n(1 - x_n), \quad (1.32)$$

де  $x$  є обмеженим на одиничному інтервалі  $[0, 1]$ , і  $r$  є керуючим параметром. Відомо, що це відображення реалізує хаос через біфуркації подвоєння періоду траєкторії. Для  $0 < r < 1$ , асимптотичний стан відображення (або атрактор відображення) є  $x = 0$ ; для  $1 < r < 3$  атрактор є ненульовою нерухомою точкою  $x_F = 1 - 1/r$ ; для  $3 < r < 1 + \sqrt{6}$  ця нерухома точка є нестійкою і атрактор є стабільною 2-періодною орбітою. Якщо  $r$  в подальшому збільшувати, відбувається послідовність біфуркацій подвоєння періоду, в якому послідовні орбіти подвоєного періоду стають стабільними. Каскадне подвоєння періоду накопичується до  $r = r_\infty \approx 3,57$ , після чого може виникнути хаос.

Розглянемо випадок  $r = 3,8$ , коли система є хаотичною. Важливою характеристикою хаотичного атрактора є те, що існує нескінченна кількість

нестійких періодичних орбіт всередині нього. Наприклад, існує нерухома точка  $x_F \approx 0,7368$  і 2-періодна орбіта з компонентами  $x(1) \approx 0,3737$  і  $x(2) \approx 0,8894$ , де  $x(1) = f(x(2))$  і  $x(2) = f(x(1))$ .

Тепер припустимо, що ми хочемо уникнути хаосу при  $r = 3,8$ . Зокрема, ми хочемо отримати траєкторії в результаті випадково вибраної початкової умови  $x_0$ , і бути якомога ближче до 2-періодної орбіти, припускаючи, що ця 2-періодна орбіта дає найкращу продуктивність системи. Звичайно, ми можемо вибрати потрібний асимптотичний стан відображення, щоб отримати одну із нескінченного числа нестійких періодичних орбіт. Припустимо, що параметр  $r$  може бути точно налаштований в невеликому діапазоні навколо значення  $r_0 = 3,8$ , тобто  $r$  має право змінюватися в діапазоні  $[r_0 - \delta, r_0 + \delta]$ , де  $\delta \ll 1$ . У зв'язку з характером хаотичного атрактора, траєкторія, що починається з довільного значення  $x_0$ , буде наближатися з імовірністю одиниця, в окіл бажаної 2-періодної орбіти через деякий час. Траєкторія буде віддалятися швидко від 2-періодної орбіти, якщо ми не втручаємося. Наша задача полягає в програмуванні зміни керуючого параметра так, щоб траєкторія залишалася в околі 2-періодної орбіти до тих пір, поки управління присутнє. В цілому, малі збурення параметрів будуть залежати від часу. Підкреслимо, що важливо застосовувати тільки малі збурення параметрів. Якщо використовувати великі збурення параметрів, то, очевидно, ми зможемо усунути хаос, варіюючи  $r$ , наприклад від 3,8 до 2,0. Така велика зміна не реалізує мету управління.

Логістичне відображення в околі періодичної орбіти можна апроксимувати лінійним рівнянням, що узагальнене по всій періодичній орбіті. Позначимо цільову  $m$ -періодну орбіту, якою необхідно управляти, як  $x(i)$ ,  $i = 1, \dots, m$ , де  $x(i+1) = f(x(i))$  і  $x(m+1) = x(1)$ . Припустимо, що в момент часу  $n$ , траєкторія попадає в окіл компоненти  $i$   $m$ -періодної орбіти. Лінеаризована динаміка в околі компоненти  $i+1$  буде, коли:

$$x_{n+1} - x(i+1) = \frac{\partial f}{\partial x} [x_n - x(i)] + \frac{\partial f}{\partial r} \Delta r_n = r_0 [1 - 2x(i)] [x_n - x(i)] + x(i) [1 - x(i)] \Delta r_n, \quad (1.33)$$

де частинні похідні обчислюються при  $x = x(i)$  і  $r = r_0$ . Нам необхідно залишити  $x_{n+1}$  в околі  $x(i+1)$ . Таким чином, ми встановлюємо  $x_{n+1} - x(i+1) = 0$ , що дає

$$\Delta r_n = r_0 \frac{[2x(i) - 1][x_n - x(i)]}{x(i)[1 - x(i)]}. \quad (1.34)$$

Рівняння (1.34) справедливе тільки тоді, коли траєкторія  $x_n$  входить в малий окіл  $m$ -періодної орбіти, тобто коли  $|x_n - x(i)| \ll 1$ , і необхідний параметр збурення  $\Delta r_n$  достатньо малий. Нехай довжина невеликого проміжку визначення околу навколо кожного компонента  $m$ -періодної орбіти буде  $2\varepsilon$ . Загалом, необхідний максимальний параметр збурення  $\delta$  є пропорційний  $\varepsilon$ . Так  $\varepsilon$  може бути вибране як завгодно мале, то і  $\delta$  також може бути отримане як завгодно мале. Як відомо, середній перехідний час, перш ніж траєкторія попадає в окіл цільової періодичної орбіти, залежить від  $\varepsilon$  (або  $\delta$ ). Коли траєкторія знаходиться поза околom цільової періодичної орбіти, ми не застосовуємо будь-який параметр збурення, отже, система еволюціонує при номінальному значенні параметра  $r_0$ . Таким чином, ми встановлюємо  $\Delta r_n = 0$ , коли  $\Delta r_n > \delta$ . Звернемо увагу на параметр збурення  $\Delta r_n$ , що залежить від  $x_n$  і є часозалежним.

Приведена вище стратегія для управління орбіти є дуже гнучкою для стабілізації різних періодичних орбіт в різний час. Припустимо, що ми спочатку стабілізуємо хаотичну траєкторію навколо 2-періодної орбіти. Тоді може виникнути необхідність стабілізувати нерухому точку логістичного відображення, припускаючи, що нерухома точка буде відповідати кращій продуктивності системи у наступні моменти часу. Для досягнення цієї зміни управління, ми просто виключимо параметр управління щодо 2-періодної орбіти. Без управління траєкторія буде відхилятися від 2-періодної орбіти експоненційно. Ми дозволяємо системі змінюватися при значенні параметра  $r_0$ .

Через природу хаосу настає момент, коли хаотичні траєкторії входять в малий окіл фіксованої точки. Тоді в цей момент ми переходимо на новий вибір параметрів збурення, що розраховуються по відношенню до нерухомої точки. Отже, згідно такого алгоритму траєкторія може бути стабілізована навколо нерухомої точки [130].

При наявності зовнішнього шуму, контрольовані траєкторії іноді можуть „відхилятися” від околу періодичної орбіти. Якщо це відбувається, ми виключаємо параметр збурення і дозволяємо системі змінюватися самій по собі. З імовірністю, рівною одиниці, хаотична траєкторія увійде в окіл цільової періодичної орбіти і управлятиметься знову. Важливим є вплив шуму для перетворення контрольованої періодичної траєкторії в таку, в якій хаотичні фази (неконтрольовані траєкторії) перемежуються з ламінарними фазами (контрольовані періодичні траєкторії) [119, 131]. Легко перевірити, що усереднена довжина ламінарної фази збільшується, коли амплітуда шуму знижується [130].

Цікаво дослідити, скільки ітерацій потрібно в середньому для хаотичної траєкторії, що починається з довільно вибраних початкових умов, щоб увійти в окіл  $\varepsilon$  цільової періодичної орбіти. Очевидно, що чим менше значення  $\varepsilon$ , тим більше необхідно ітерацій. Загалом, середній перехідний час  $\langle \tau \rangle$  перед включенням контролюючого масштабування  $\delta$ , буде:

$$\langle \tau \rangle \sim \delta^{-\gamma}, \quad (1.35)$$

де  $\gamma > 0$  є масштабуючою експонентою. Для одновимірних відображень, ймовірність того, що траєкторія попадає в окіл певного компонента (компонент  $i$ ) періодичної орбіти визначається як

$$P(\varepsilon) = \int_{x^{(i)-\varepsilon}^{(i)}}^{x^{(i)+\varepsilon}^{(i)}} \rho[x(i)] dx \approx 2\varepsilon \rho[x(i)], \quad (1.36)$$

де  $\rho$  є частотою, з якою хаотичні траєкторії відвідують малий окіл точки  $x$  на атракторі. Ми маємо  $\langle \tau \rangle = 1/P(\varepsilon) \sim \varepsilon^{-1} \sim \delta^{-1}$ , і тому  $\gamma = 1$ . Для багатовимірних

хаотичних систем, експонента  $\gamma$  може бути пов'язана з власними значеннями періодичної орбіти, що підлягають управлінню.

Основною перевагою ідеї управління хаосом [119, 131] є те, що він може бути застосований до експериментальної системи, в якій апріорне знання системи, як правило, не відоме. Часових рядів шляхом вимірювання однієї з динамічних змінних системи в поєднанні з вкладенням часу затримки методом [132, 133] достатньо, щоб визначити бажані нестійкі періодичні орбіти, що будуть контрольовані та відповідні величини, необхідні для розрахунку параметрів збурення [119, 131].

Ще однією перевагою OGY парадигми управління хаосом є його гнучкість при виборі бажаної періодичної орбіти, що підлягає управлінню [134].

### 1.2.5. Управління хаотичними коливаннями в дво- та тривимірних відображеннях, отриманих перетином Пуанкаре

#### Відображення Пуанкаре

Візуалізація траєкторій для  $d > 3$  неможлива, але можна вдатися до так званої техніки перетину Пуанкаре (або відображення), конструкція якого реалізується наступним чином. Для простоти уявлення, розглянемо тривимірну автономну систему  $\frac{dx}{dt} = f(x)$ , і зосередимося на одній із її траєкторій. Тепер визначимо проекцію (в загальному це  $(d - 1)$ -поверхня) і розглянемо всі точки  $P_n$ , які траєкторія перетинає на площині з одного боку, як показано на рис. 1.2.



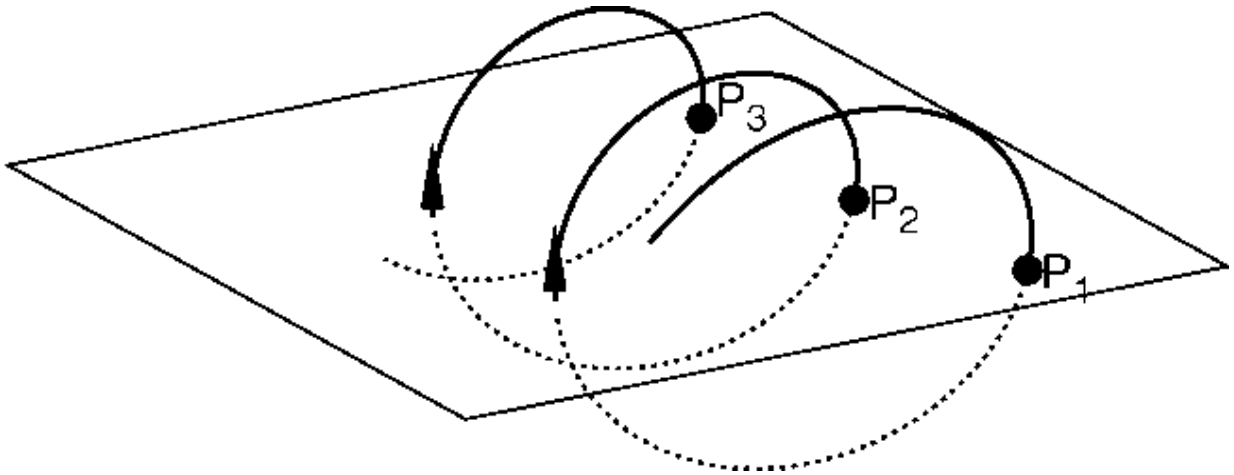


Рис. 1.2. Перетин Пуанкаре для загальної траєкторії та ескіз цієї конструкції протягом перших трьох точок перетину  $P_1, P_2$  і  $P_3$ .

Відображення Пуанкаре потоку  $f$ , таким чином, визначається як відображення  $G$ , що зв'язує дві послідовні точки перетину, тобто

$$P_{n+1} = G(P_n), \quad (1.38)$$

що можуть бути просто отримані шляхом інтегрування загальним методом ODE, і тому він завжди чітко визначений. Насправді ця зворотність  $P_{n-1} = G^{-1}(P_n)$  визначена просто зворотнім інтегруванням ODE, тому відображення (1.37) є зворотним.

Стробоскопічне відображення, що візуалізує динаміку маятника, можна розглядати як відображення Пуанкаре, де час  $t$  змінюється в межах  $[0:2\pi]$ , що можливо, тому що час входить в динаміку через циклічну функцію.

Відображення Пуанкаре дозволяє  $d$ -вимірному фазовому простору зводитися до  $(d-1)$ -вимірного уявлення, яке, як і для маятника, дозволяє визначити періодичність (якщо є) траєкторії при умові, коли його повна поведінка в фазовому просторі дуже складна. Таке відображення також є цінним для більш тонкого аналізу, ніж просто візуалізація, тому що зберігається стабільність властивостей точок і кривих.

Ми прийшли до висновку, що конструкція відповідного відображення Пуанкаре для загальної системи не є простим завданням, щоб вибрати хорошу

проекцію або  $(d - 1)$ -поверхню перетину і вимагає значних дослідницьких зусиль.

### Розрахунок відображень Пуанкаре

Нехай автономна динамічна система задана еволюційним рівнянням

$$\dot{x}_i = F_i(x_1, \dots, x_N, c), \quad i = 1, \dots, N, \quad (1.38)$$

з початковими умовами

$$x_i(0) = x_{i0}, \quad i = 1, \dots, N, \quad (1.39)$$

В  $N$ -вимірному фазовому просторі розглянемо перетин Пуанкаре, задаючи  $(N - 1)$ -вимірну поверхню  $S$  рівнянням

$$S(x_1, \dots, x_N) = 0.$$

Відображення Пуанкаре  $P$  перетворить точки поверхні  $S$  на точки тієї ж поверхні,  $x_{n+1} = P(x_n)$ , де  $x_{n+1}$  і  $x_n$  – точки, що лежать на одній і тій самій фазовій траєкторії (рис. 1.3).

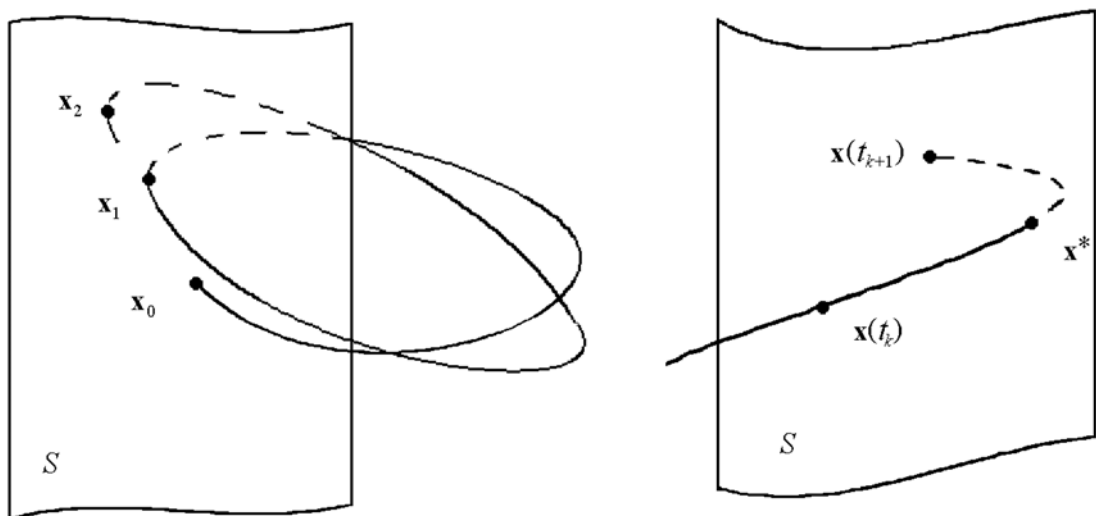


Рис. 1.3. Розрахунок відображення Пуанкаре

Для знаходження відображення Пуанкаре треба розв'язувати диференціальне рівняння (1.38) із заданими початковими умовами й заданими значеннями параметра  $c$  і послідовно знаходити точки перетину фазової траєкторії з поверхнею  $S$ .

Тут є дві різних задачі. Перша полягає в тому, щоб знайти фазову

траєкторію як розв'язок початкової задачі (1.38), (1.39), а друга – у тому, щоб визначити координати точки перетину траєкторії з поверхнею  $S$ . Перша задача сама по собі досить складна, якщо системи (1.38) і (1.39) нестійкі. Для її розв'язку рекомендується використати метод Рунге-Кутта четвертого порядку й контролювати точність розв'язку за допомогою апіорних і апостеріорних оцінок.

Більш докладно розглянемо метод визначення координат точки перетину фазової кривої з поверхнею  $S$ . Для цього обчислюється знак функції  $S$  на кожному кроці інтегрування, і при його зміні, наприклад, з мінуса на плюс ми маємо дві точки траєкторії –  $x(t_k)$  і  $x(t_{k+1})$ , що лежать по різні боки від поверхні  $S$ . Точка перетину траєкторії з  $S$  може бути знайдена тим чи іншим способом інтерполяції траєкторії між точками  $x(t_k)$  й  $x(t_{k+1})$ . Розглянемо економний метод, що дозволяє знайти координати точки перетину шляхом інтегрування системи диференціальних рівнянь типу (1.38), (1.39) за один крок [135].

Додамо формально до системи (1.38) ще одне рівняння відносно додаткової змінної  $x_{N+1} = S(x_1, \dots, x_N)$ :

$$\frac{dx_{N+1}}{dt} = \frac{dS}{dt} = \sum_{i=1}^N \frac{\partial S}{\partial x_i} \frac{dx_i}{dt} = \sum_{i=1}^N \frac{\partial S}{\partial x_i} F_i = F_{N+1}. \quad (1.40)$$

Тепер січна поверхня Пуанкаре визначається рівнянням

$$x_{N+1} = 0.$$

Поділимо формально всі рівняння (1.38) на рівняння (1.40), а останнє зведемо до оберненого, розглядаючи  $t$  як функцію  $x_{N+1}$ , й одержимо систему рівнянь вигляду

$$\begin{aligned} \frac{dx_i}{dx_{N+1}} &= \frac{F_i(x)}{F_{N+1}}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \\ \frac{dt}{dx_{N+1}} &= \frac{1}{F_{N+1}}. \end{aligned} \quad (1.41)$$

Тепер, якщо  $S(t_k) = S_1 < 0$ , а  $S(t_{k+1}) = S_2 > 0$ , то координати точки перетину фазової траєкторії з поверхнею  $S$  можуть бути знайдені із (1.41) на

інтервалі зміни змінної  $x_{N+1}$  від  $S_2$  до нуля, наприклад, за один крок довжиною  $-S_2$ , з початковими умовами

$$\begin{aligned} x_i(x_{N+1})|_{x_{N+1}=S_2} &= x_i(t_{k+1}), \quad i = 1, 2, \dots, N; \\ t(x_{N+1})|_{x_{N+1}=S_2} &= t_{k+1}. \end{aligned}$$

У результаті розв'язку (1.42) на інтервалі зміни  $x_{N+1}$  довжиною  $|S_2|$  ми потрапимо в точку  $x_{N+1} = 0$ , тобто на поверхню  $S$  [136].

### Приклад січення Пуанкаре для хаотичної системи Реслера

Хаотична система Реслера описується трьома диференційними рівняннями:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -y - z, \\ \dot{y} &= x + ay, \\ \dot{z} &= b + z(x - c). \end{aligned} \quad (1.42)$$

На рис. 1.4 наведено хаотичний атрактор Реслера при значеннях параметрів  $a = b = 0,2, c = 5,7$ .

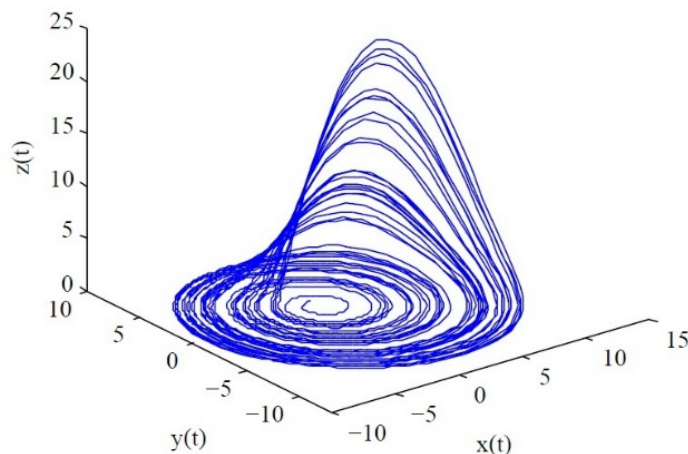


Рис. 1.4. Хаотичний атрактор системи Реслера

Він обертається навколо осі  $z$ , так що хороший вибір для січення Пуанкаре є площина, що проходить через вісь  $z$ .

Послідовність таких січень Пуанкаре розміщена радіально на збільшення кутів по відношенню до осі  $x$ , рис. 1.5, що ілюструє дію розділення і складання потоку Реслера.

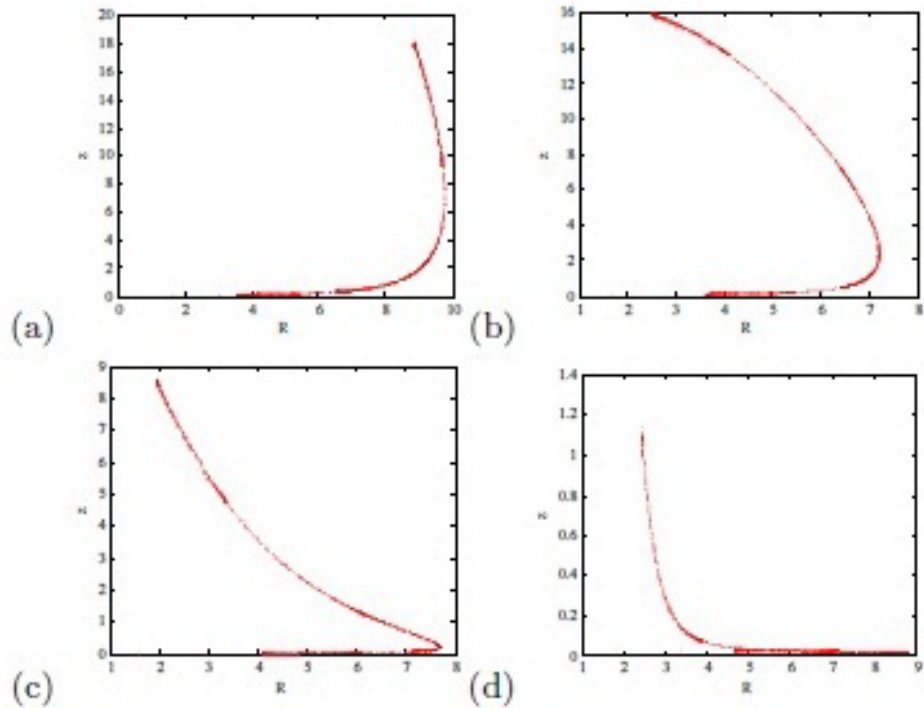


Рис. 1.5. Січення Пуанкаре потоку Реслера при  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  і  $135^\circ$  щодо  $x$ -вісі

Для орієнтування, порівнюємо це з рис. 1.4, і звернемо увагу на різні масштаби  $z$ -вісі. Рисунок 1.5 збирає ці розділення в серію знімків потоку.

Наведений вище приклад ілюструє, що січення Пуанкаре дає більше інформації, ніж повний портрет [137].

### Програмна реалізація січення Пуанкаре

Експериментальна установка для збору даних та обробки сигналів представлена на рис. 1.6. Електричні сигнали, що генеруються аналоговою схемою Чуа, отримуються у розмірі 16000 вибірок/с трьома несиметричними аналоговими входами NI USB-6009, USB на основі даних (DAQ) і пристрою керування виробництва National Instruments. Аналіз даних в режимі реального часу здійснюється в LabVIEW, програмне забезпечення National Instruments широко використовується в якості середовища для збору даних, створення прототипів і тестування. LabVIEW – це мова, яка використовує графічні представлення функцій (блок-схема) для візуального програмування програм, в

тому числі бібліотеки математичних підпрограм, графічних дисплеїв та інших утиліт, надзвичайно корисних для аналізу даних і обробки сигналів.

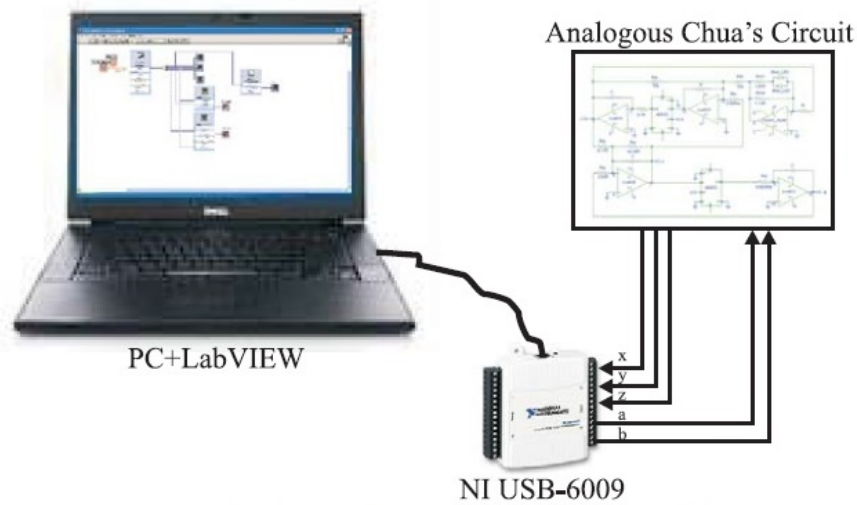


Рис. 1.6. Експериментальна установка для збору даних та обробки сигналів

Для візуалізації січення Пуанкаре за допомогою LabVIEW, блок „XY Chart Buffer” повинен бути використаний для зберігання і друку значень X і Y, як показано на рис. 1.7. Нові точки будуть замінювати попередні точки на графіку, коли кількість збережених даних досягає свого максимального значення, тобто цей параметр повинен бути ретельно підібраний для хорошої візуалізації січення Пуанкаре [138].

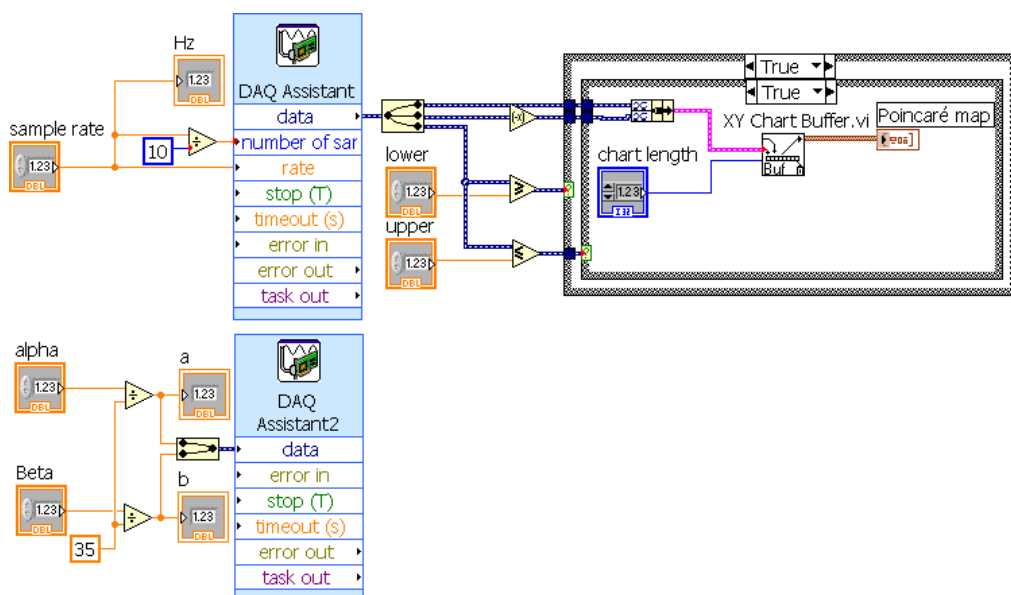


Рис. 1.7. LabVIEW блок-діаграма для січення Пуанкаре

Враховуючи, що площина  $Z = 1$ , січення Пуанкаре для двох конфігурацій параметрів в аналоговій схемі Чуа показане на рис. 1.8. Для  $a = 0,540 V$  ( $\alpha = 18,90$ ) і  $b = 3 V$  ( $\beta = 105$ ), аттрактор завжди попадає в площину  $Z = 1$  у двох точках (маленькі варіації можуть бути пояснені шумами), яка характеризує періодичну поведінку з періодом 1. Поведінка схеми є хаотичною для  $a = 1,057 V$  ( $\alpha = 37,00$ ) і  $b = 3 V$  ( $\beta = 105$ ), так як січення Пуанкаре представляється кількома різними точками, розподіленими нерівномірно в площині  $Z = 1$ . Нормовані безрозмірні параметри  $a = \alpha/35$  і  $b = \beta/35$  представлені як зовнішні рівні напруги постійного струму.

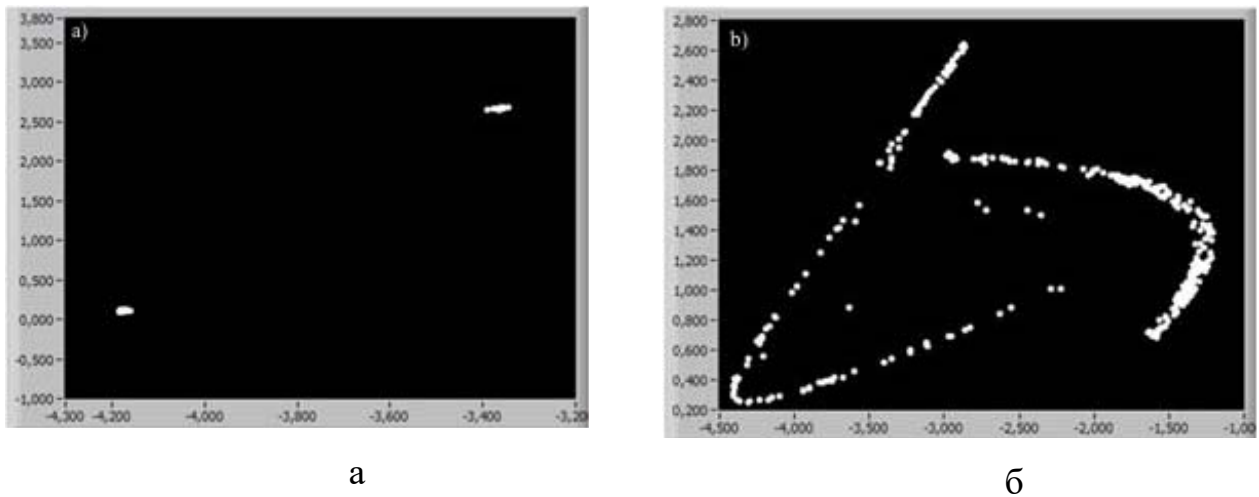


Рис. 1.9. Січення Пуанкаре для площини  $Z = 1$ : а)  $\alpha = 18,90$  і  $\beta = 105$ ;  
б)  $\alpha = 37,00$  і  $\beta = 105$ .

### **Висновки до першого розділу**

З проведеного аналізу науково-технічних публікацій та результатів експериментальних досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Одним із основних методів вивчення нелінійних динамічних систем залишається чисельне дослідження – математичне моделювання та симуляційний аналіз їх властивостей та характеристик.

2. При здійсненні аналізу характеристик хаотичних систем можна встановити різні види коливальних режимів, що реалізуються при зміні значень параметрів управління.

3. Дослідження показують, що існує ряд невирішених проблем при практичній реалізації генераторів хаосу, що пов'язані із вимогою ідентичності їх параметрів та чутливою залежністю від початкових умов.



## РОЗДІЛ 2

### КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ХАОТИЧНИХ СИСТЕМ З ДОПОМОГОЮ СИСТЕМИ LABVIEW

#### 2.1. Система LabView в комп'ютерному моделюванні хаотичної динаміки

Програмне забезпечення для генерування та управління хаотичними коливаннями в одно-, дво- та тривимірних хаотичних системах було розроблене в програмному середовищі LabView.

LabView є платформою для графічного програмування, яка допомагає інженерам реалізовувати всі стадії розробки великих і малих проектів: від створення прототипу до підсумкового тестування. У даному середовищі розробки поєднується найкраща на сьогоднішній день інтеграція програмно-апаратних компонентів з останніми комп'ютерними технологіями. LabView містить всі інструменти для вирішення сучасних та актуальних завдань з величезним потенціалом для інновацій, майбутнього успіху та ефективності.

LabView включає в себе потужні багатofункціональні інструменти для проведення будь-яких типів вимірювань і розробки будь-яких додатків. За допомогою цих інструментів інженери і вчені можуть працювати в самому широкому спектрі додатків і витратити на розробку набагато менше часу. Завдяки цьому LabView є середовищем розробки для вирішення широкого кола досліджень, підвищення продуктивності завдань та інновацій.

## 2.2. Моделювання одновимірної хаотичної системи з допомогою програмного середовища LabView

Найпоширенішою одновимірною хаотичною системою є логістичне відображення, що описується наступним виразом:

$$x_{n+1} = rx_n(1 - x_n), \quad (2.1)$$

де  $n$  – крок,  $r$  – параметр. Початковою може бути будь-яка точка інтервалу  $(0,1)$ . Параметр  $r$  може мати значення від 0 до 4.

На рис. 2.1 приведена програмна реалізація логістичного відображення з допомогою програмного середовища LabView.

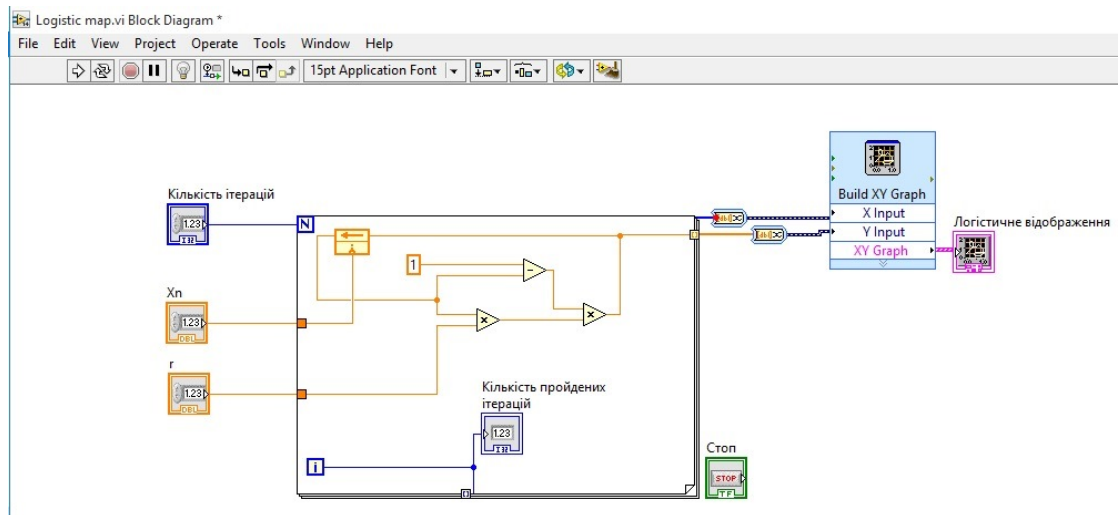


Рис. 2.1. Програмна реалізація логістичного відображення

На рис. 2.2 і рис. 2.3 приведені результати моделювання логістичного відображення.

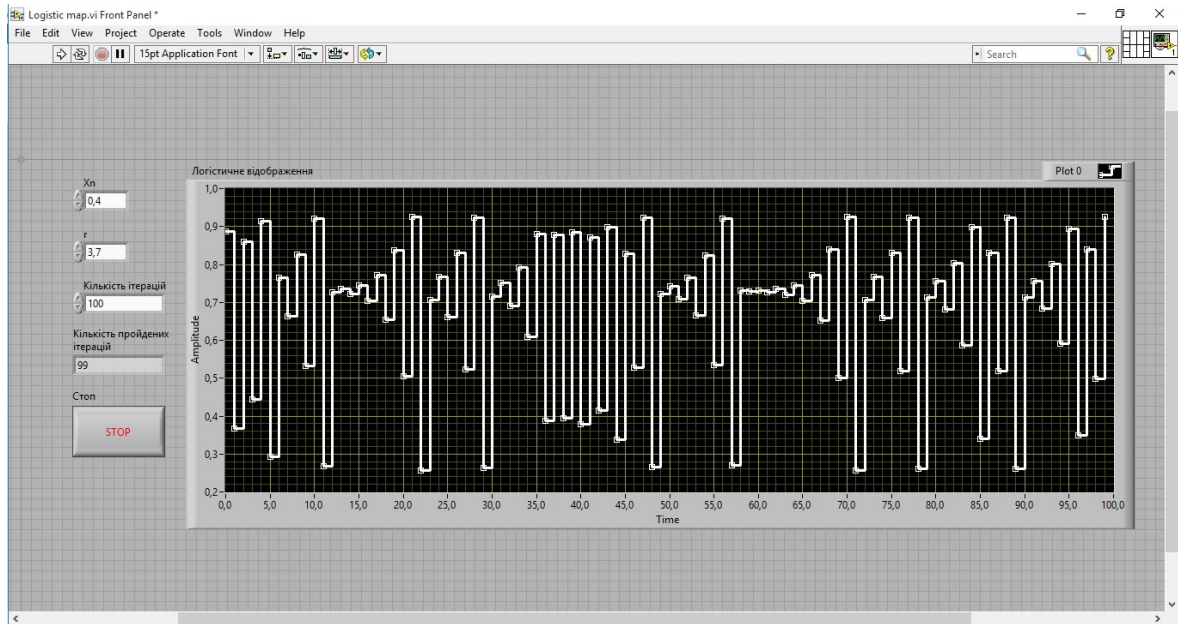


Рис. 2.2. Результат моделювання логістичного відображення при початковій умові  $x_n = 0,4$ , параметрі  $r = 3,7$ , кількості ітерацій 100.

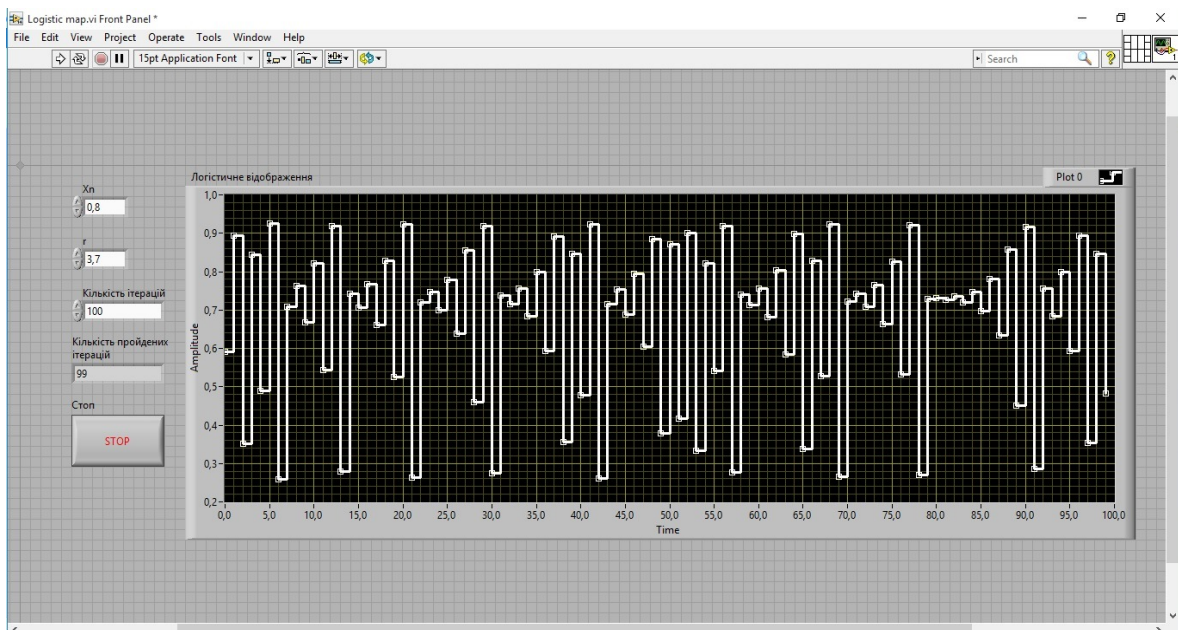


Рис. 2.3. Результат моделювання логістичного відображення при початковій умові  $x_n = 0,8$ , параметрі  $r = 3,7$ , кількості ітерацій 100.

### 2.3. Моделювання двовимірної хаотичної системи з допомогою програмного середовища LabView

Відображення Ено (Henon) описується наступними рівняннями:

$$\begin{aligned}x_{n+1} &= 1 - ax_n^2 + by_n \\ y_{n+1} &= x_n\end{aligned}\quad (2.2)$$

Хаотична поведінка буде спостерігатись при  $a = 1,4$  і  $b = 0,3$  [166, 167].

Дане нелінійне двовимірне відображення може бути описане двокроковим рекурентним співвідношенням

$$x_{n+1} = 1 - ax_n^2 + bx_{n-1}$$

Моделювання відображення Ено проводилось в програмному середовищі LabView. Основним є блок, в який занесені математичні функції, за допомогою яких реалізуються рівняння (2.2). На вхід блоку подаються два системних значення  $a = 1,4$  і  $b = 0,3$ . З виходу блоку є можливість спостерігати графічне відображення. Схема, що реалізує дане відображення, представлена на рис. 2.4.

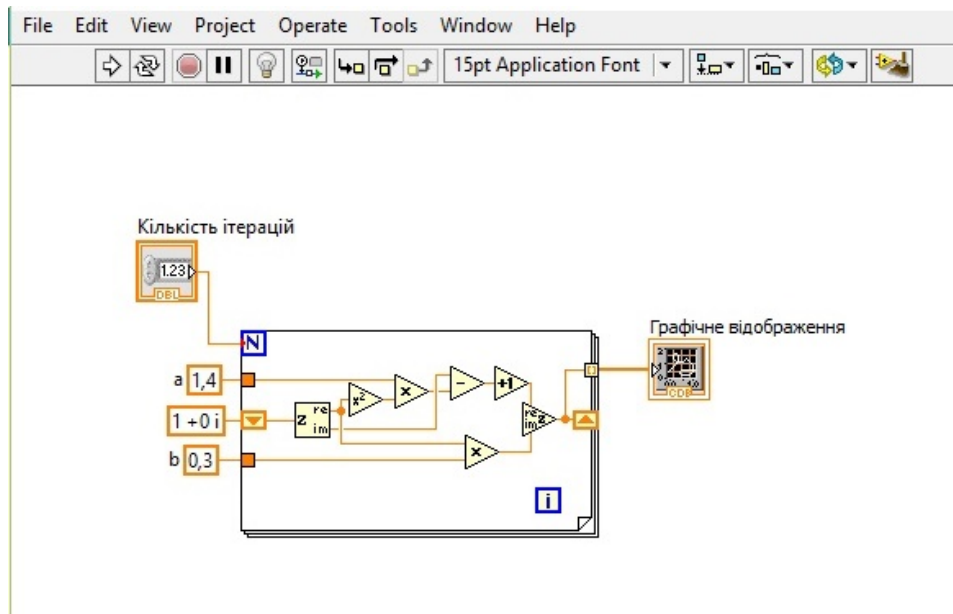


Рис. 2.4. Схема, що реалізує відображення Ено.

При збільшенні кількості ітерацій розв'язок рівнянь (2.2) буде насиченішим. Результати математичного моделювання в залежності від кількості ітерацій приведені на рис. 2.5 – рис. 2.8.

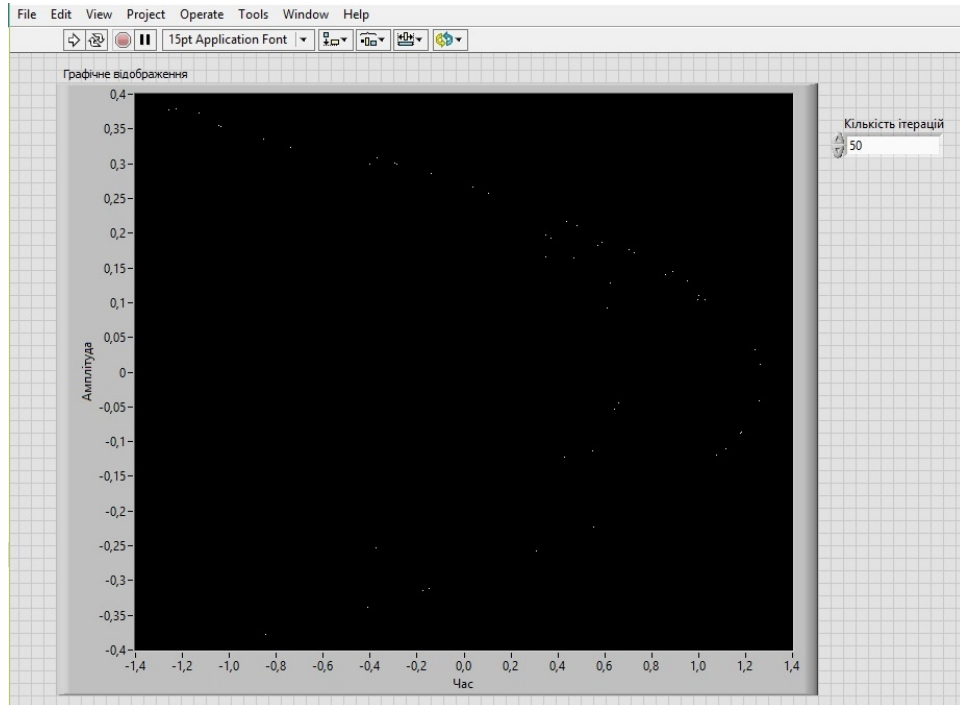


Рис. 2.5. Графічне відображення Ено при кількості ітерацій  $N = 50$ .

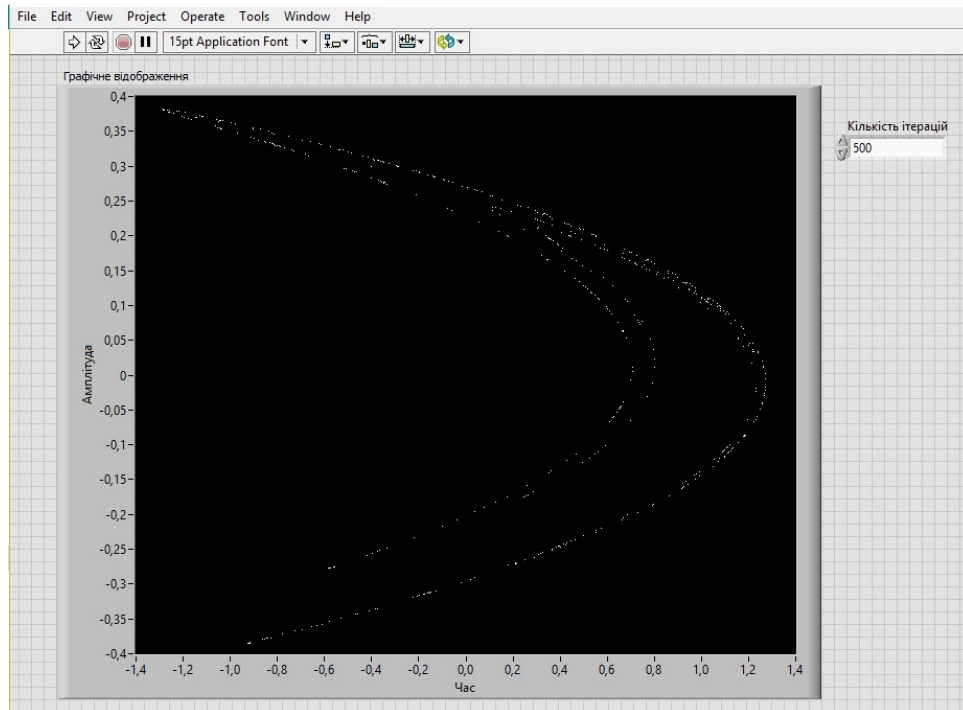


Рис. 2.6. Графічне відображення Ено при кількості ітерацій  $N = 500$ .

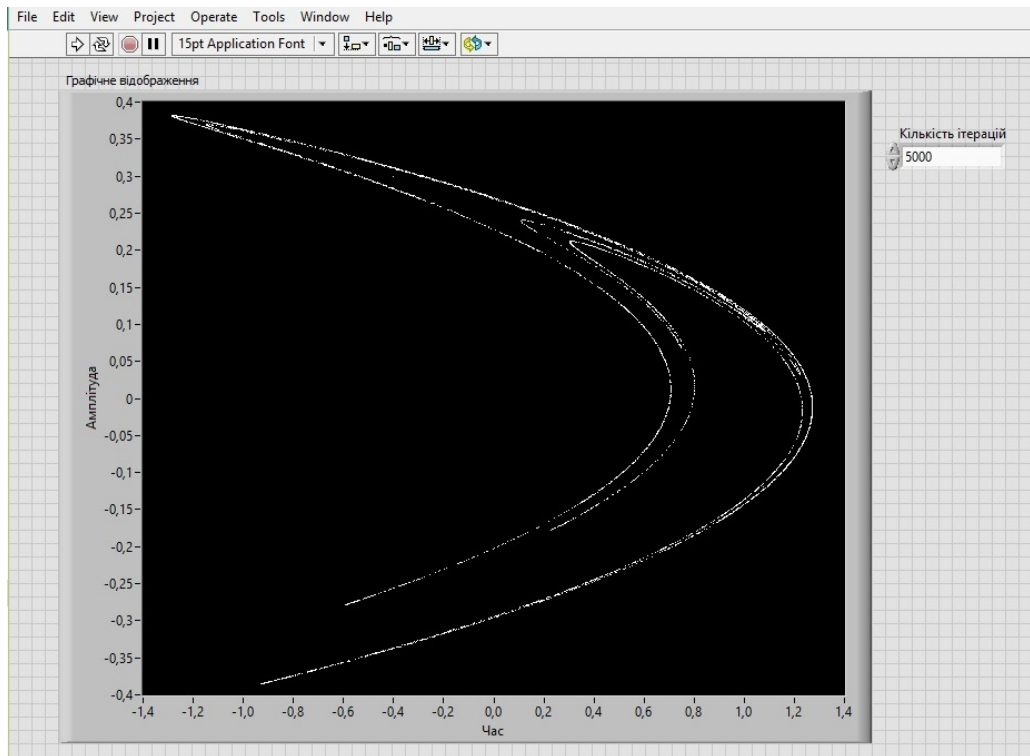


Рис. 2.7. Графічне відображення Ено при кількості ітерацій  $N = 5000$ .

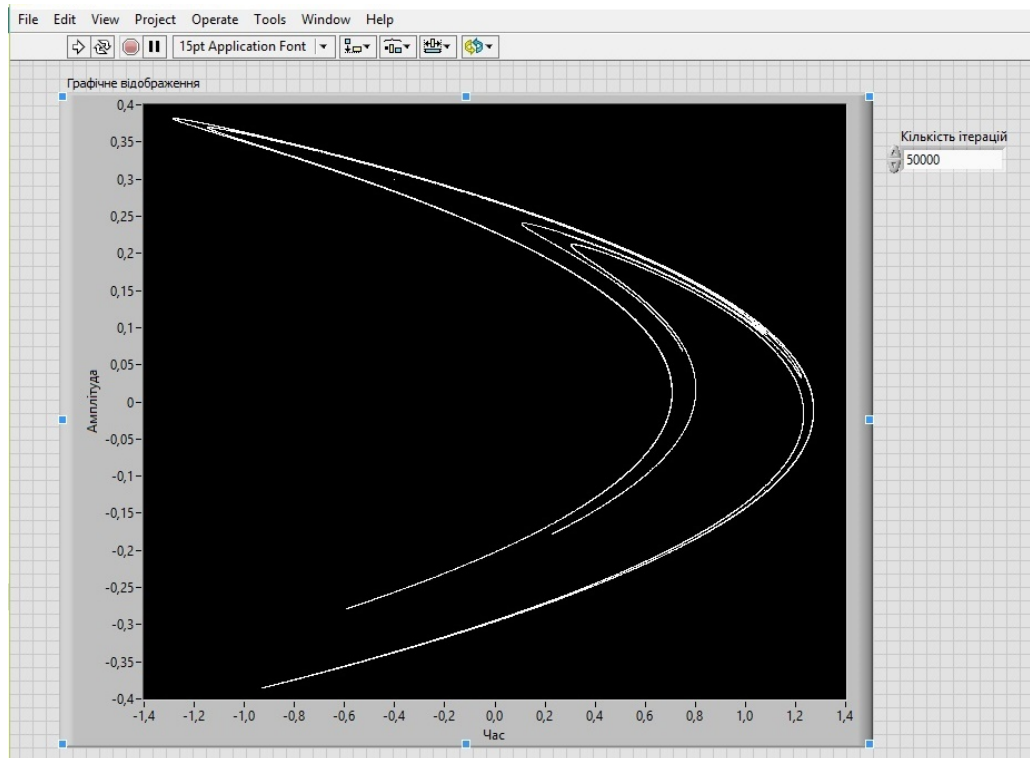


Рис. 2.8. Графічне відображення Ено при кількості ітерацій  $N = 50000$ .

## 2.4. Моделювання хаотичної системи Арнеодо з допомогою програмного середовища LabView

Хаос, що широко зустрічається в нелінійних динамічних системах, може бути описаний як неперіодичні шумоподібні коливання. Він використовується для маскуванню корисної інформації, тобто для захищеності інформаційного носія від викрадення та використання в злочинних цілях.

В останні роки актуальним питанням є створення програмного забезпечення для моделювання та функціонування певного вузла чи цілої системи з метою заміни схемного рішення, яке досить чутливе до різних впливів та невеликої зміни параметрів [139]. Є досить багато різних програмних середовищ, що дозволяють вирішити дане питання (наприклад, Micro-Cap, LabView, MultiSim, VisSim та ін.).

Існує багато різновидів систем, що описують хаотичні коливання. Однією із них є хаотична система Арнеодо, тобто система з трьох нелінійних автономних звичайних диференціальних рівнянь, що має вигляд [140]:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= y, \\ \dot{y} &= z, \\ \dot{z} &= -ax - by - cz + dx^3,\end{aligned}\tag{2.3}$$

де  $x, y, z$  – змінні системи,  $a, b, c, d$  – константи.

Чисельне моделювання системи, що описується диференціальними рівняннями (2.3), було здійснене в програмному середовищі LabView. Результати моделювання при значеннях параметрів  $a = -5,5$ ,  $b = 3,5$ ,  $c = 1$ ,  $d = -1$  приведені на рис. 2.9.

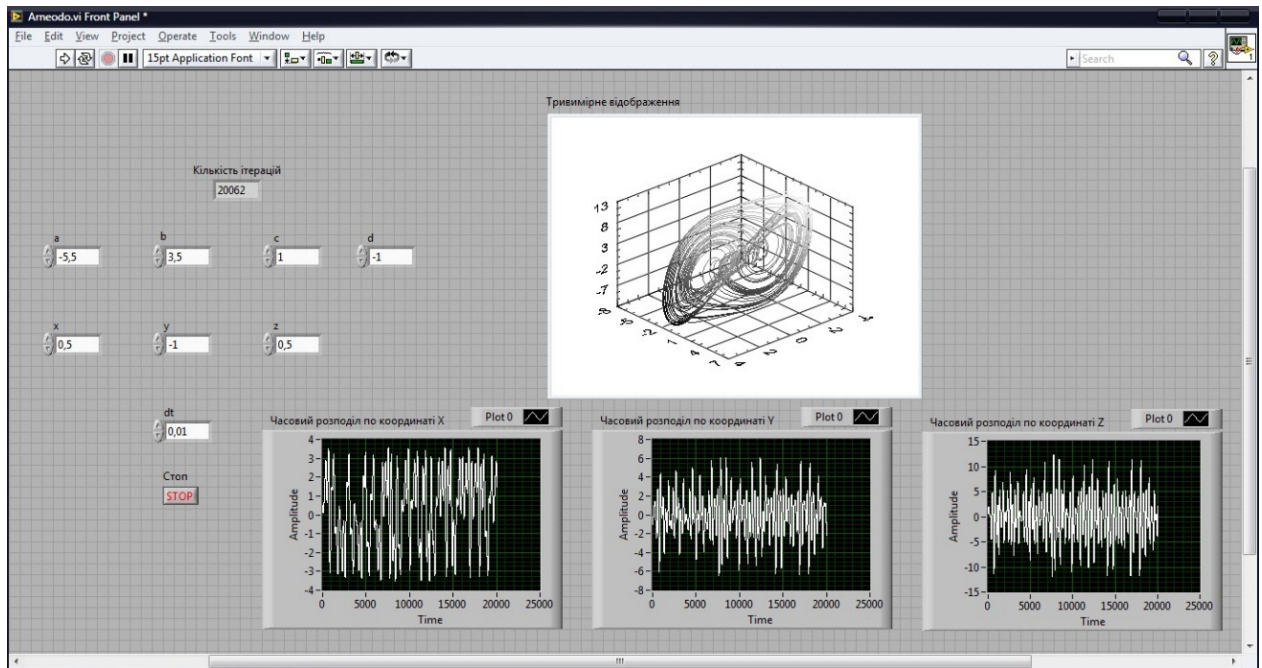


Рис. 2.9. Інтерфейс програмного середовища LabView

## 2.5. Моделювання та проектування тривимірної хаотичної системи

### Пехлівана

Тривимірна хаотична система Пехлівана описується трьома нелінійними автономними звичайними диференціальними рівняннями:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y - x, \\ \dot{y} &= ay - xz, \\ \dot{z} &= xy - b, \end{aligned} \quad (2.4)$$

Дана система має дві квадратичні нелінійності  $(xz, xy)$  і два постійні параметри  $(a, b)$ . Змінні стану системи – це  $x, y$ , і  $z$  при наявності двох рівноважних точок.

Використовуючи модель матлаб-симулятора, як показано на рис. 2.10  $xy, xz$ , і  $yz$  фазовий портрет системи показано на рис 2.11, 2.12, 2.13.



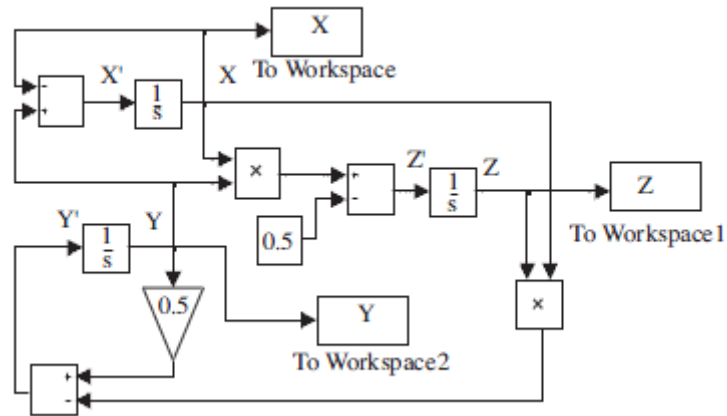


Рис. 2.10. Модель системы в MatLab при  $a = 0,5$  и  $b = 0,5$ .

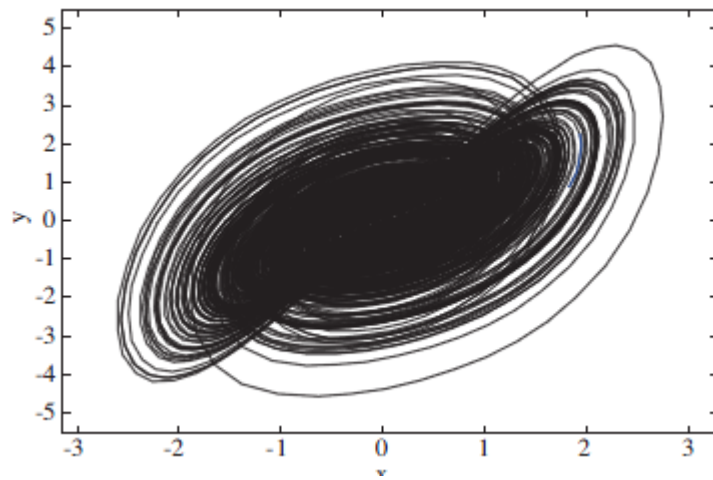


Рис. 2.11. Фазовый портрет системы,  
при  $a = 0,5$ ,  $b = 0,5$ ,  $x_0 = 0,001$ ,  $y_0 = 0,001$ , и  $z_0 = 0$ .

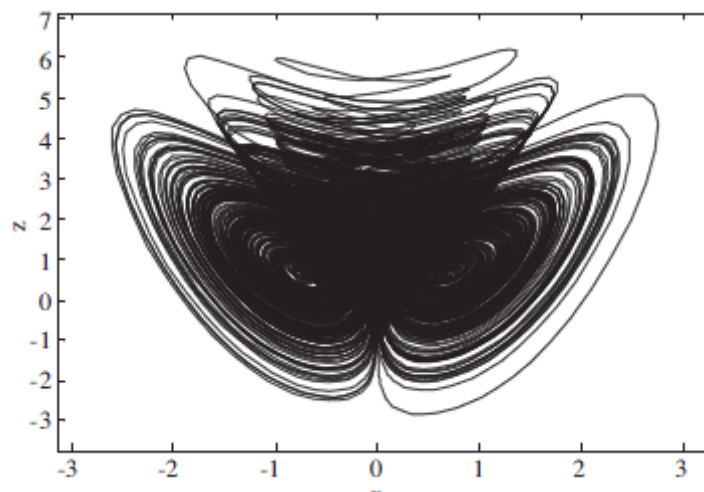


Рис 2.12. Фазовый портрет системы,  
при  $a = 0,5$ ,  $b = 0,5$ ,  $x_0 = 0,001$ , и  $z_0 = 0$ .

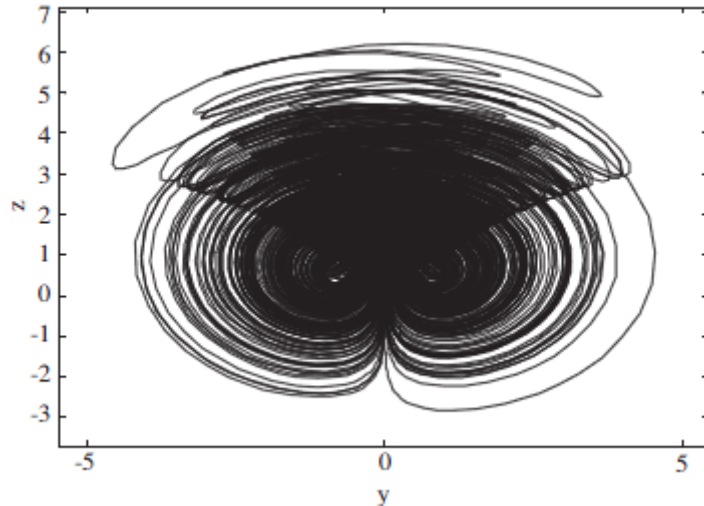
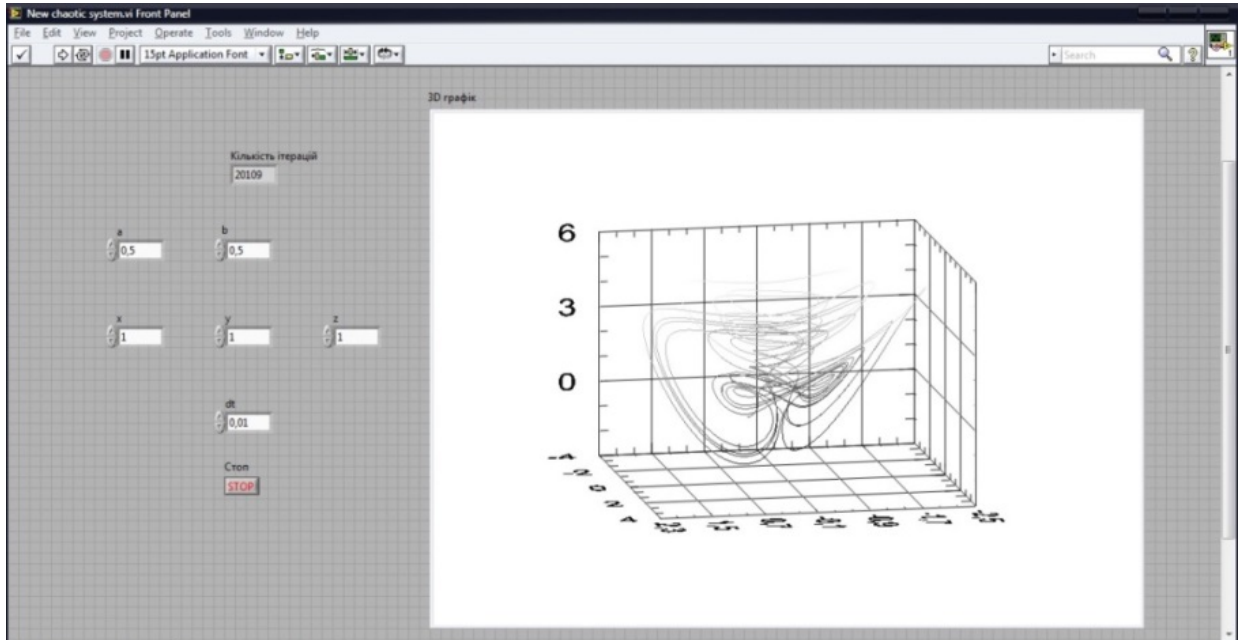


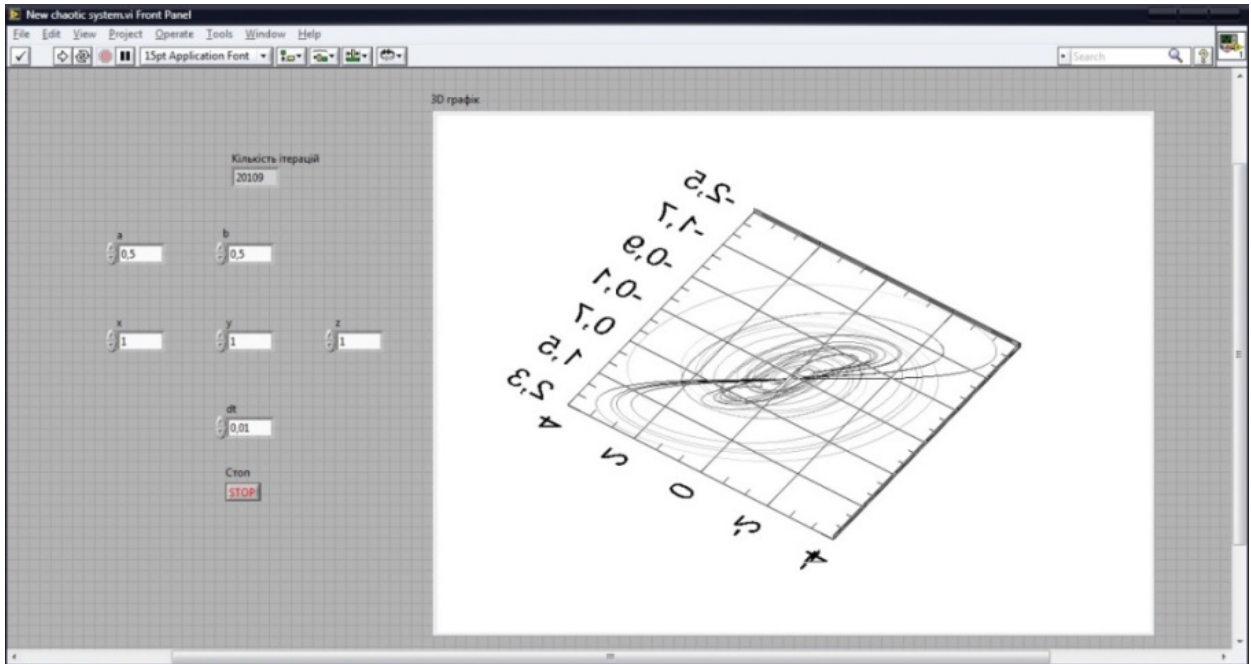
Рис 2.13. Фазовий портрет системи,  
при  $a = 0,5$ ,  $b = 0,5$ ,  $x_0 = 0,001$ , і  $z_0 = 0$ .

Для дослідження генератора було використано програмне забезпечення LabView, що дає змогу оцінити поведінку схеми в різних режимах та оцінити стабільність її роботи.

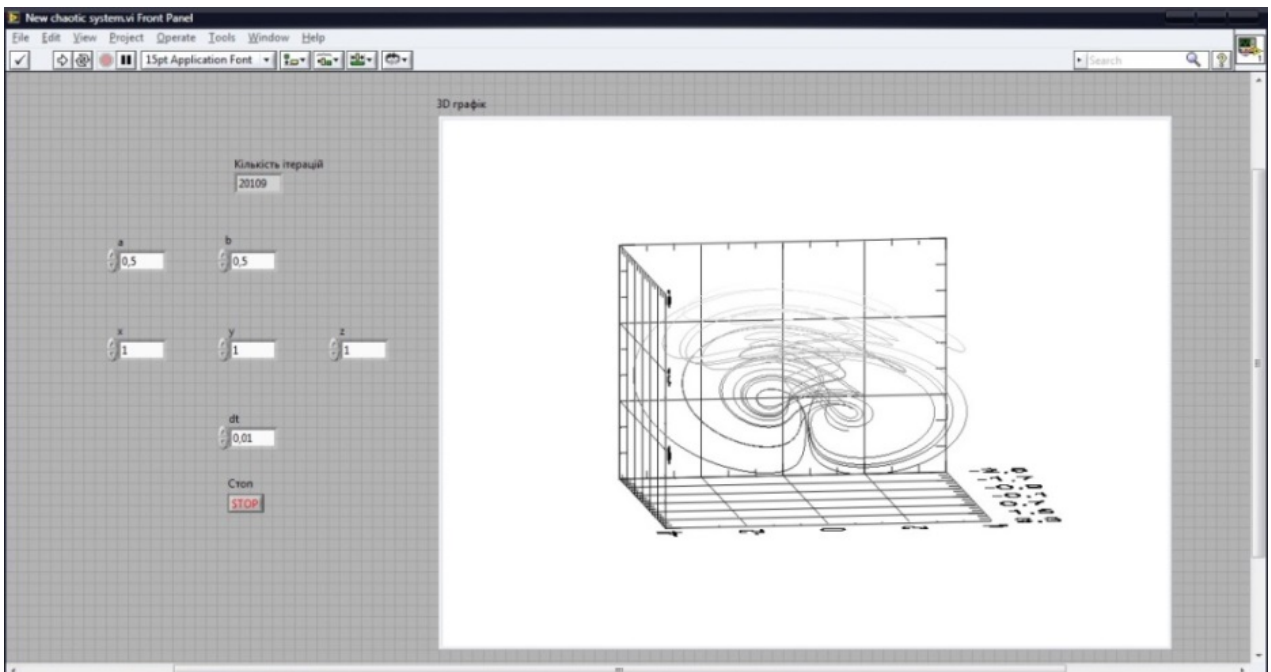
Результати моделювання представлені на рис. 2.14 (а, б, в).



а)



б)



в)

Рис. 2.14. Хаотичні аттрактори нового хаотичного генератора:

де а) площина  $xу$ , б) площина  $уz$  і в) площина  $xz$

Моделювання проводилось з параметрами  $a = 0,5$ ,  $b = 0,5$ , і початковими умовами  $x = y = z = 1$ .

## 2.6. Моделювання і керування хаотичною мульти-витковою системою типу „jerk”

Генерування, керування і застосування мульти-виткових хаотичних атракторів вивчаються із зростаючим інтересом і стали центральною темою дослідження у зв'язку з їх великим потенціалом в хаотичних комунікаційних технологіях [119, 141].

Хаотична мульти-виткова система типу „jerk” є однією із хаотичних систем, що використовується для захисту інформаційного носія [142].

У системах зв'язку, що використовують детермінований хаос, великою проблемою є вибір параметрів схеми генератора, які генерують хаотичний сигнал. Невелике відхилення параметрів на приймальній стороні унеможливило розшифрувати отримане повідомлення.

Вирішенням цієї проблеми є створення програмного забезпечення, що дозволяє створювати і досліджувати хаотичну мульти-виткову систему типу „jerk”. Програмне забезпечення було створено в одній з найсучасніших систем LabView (LabVIEW 2010 (32 біт) для ОС Windows).

### Моделювання хаотичної мульти-виткової системи типу „jerk” в системі LABVIEW

В системі, приведений в [143], синус функція була замінена нелінійною характеристикою схеми Чуа. Результати використання синус функції різних номерів витків (scrolls) можуть бути змодельовані. Аналогічний підхід може бути застосований до схеми Jerk

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= y, \\ \frac{dy}{dt} &= z, \\ \frac{dz}{dt} &= -ay - az + ag(x), \end{aligned} \tag{2.6}$$

де  $g(x) = \sin(2\pi bx)$  – нелінійна функція,  $x, y, z$  – динамічні змінні, що визначають поведінку в фазовій площині,  $a, b$  – системні параметри [144, 145].

Jerk схема складається з лінійної і нелінійної схем (рис. 2.16). Створення і реалізація лінійної схеми є простими завданнями. Тому ця конструкція і реалізація багато в чому залежить від синтезу нелінійності як електричного кола, яка вибирається для отримання синусоїдальної функції [143].

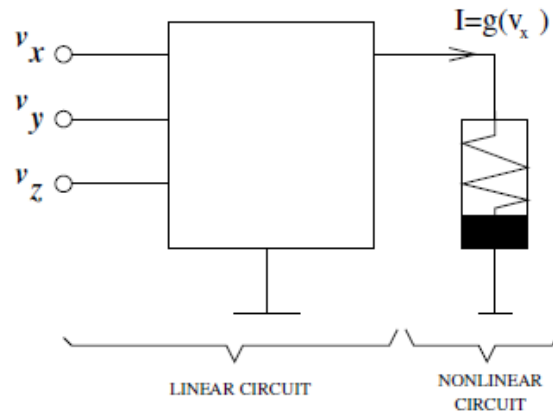


Рис. 2.16. Jerk схема, що складається з лінійної і нелінійної схем.

Напруги  $v_x, v_y, v_z$  відповідають змінним стану  $x, y, z$  в моделі (2.6)

відповідно

Рис. 2.17 демонструє блокову схему, яка реалізує хаотичну мульти-виткову систему типу „jerk”. Основною функціональною частиною блокової схеми є формульний вузол, у якому записано три нелінійні диференціальні рівняння (2.6).

На вхід формульного вузла подаються значення параметрів системи  $(a, b)$  і значення динамічних змінних  $(x, y, z)$ . З виходу блокової схеми є можливість продемонструвати вигляди рішення рівнянь в трьох вимірах і часові розподіли хаотичних координат  $X, Y$  і  $Z$ . Рис. 2.18 демонструє інтерфейс програми, що графічно показує математичний розв’язок хаотичної мульти-виткової системи типу „jerk”, тобто 3D зображення та часові розподіли хаотичних координат  $X, Y, Z$  для системних параметрів  $a = 0.3, b = 0.25$ , початкових умов  $x = y = z = 1$ , числа ітерацій  $N = 5000$ , керуючого коефіцієнта  $k = 0.15$ .

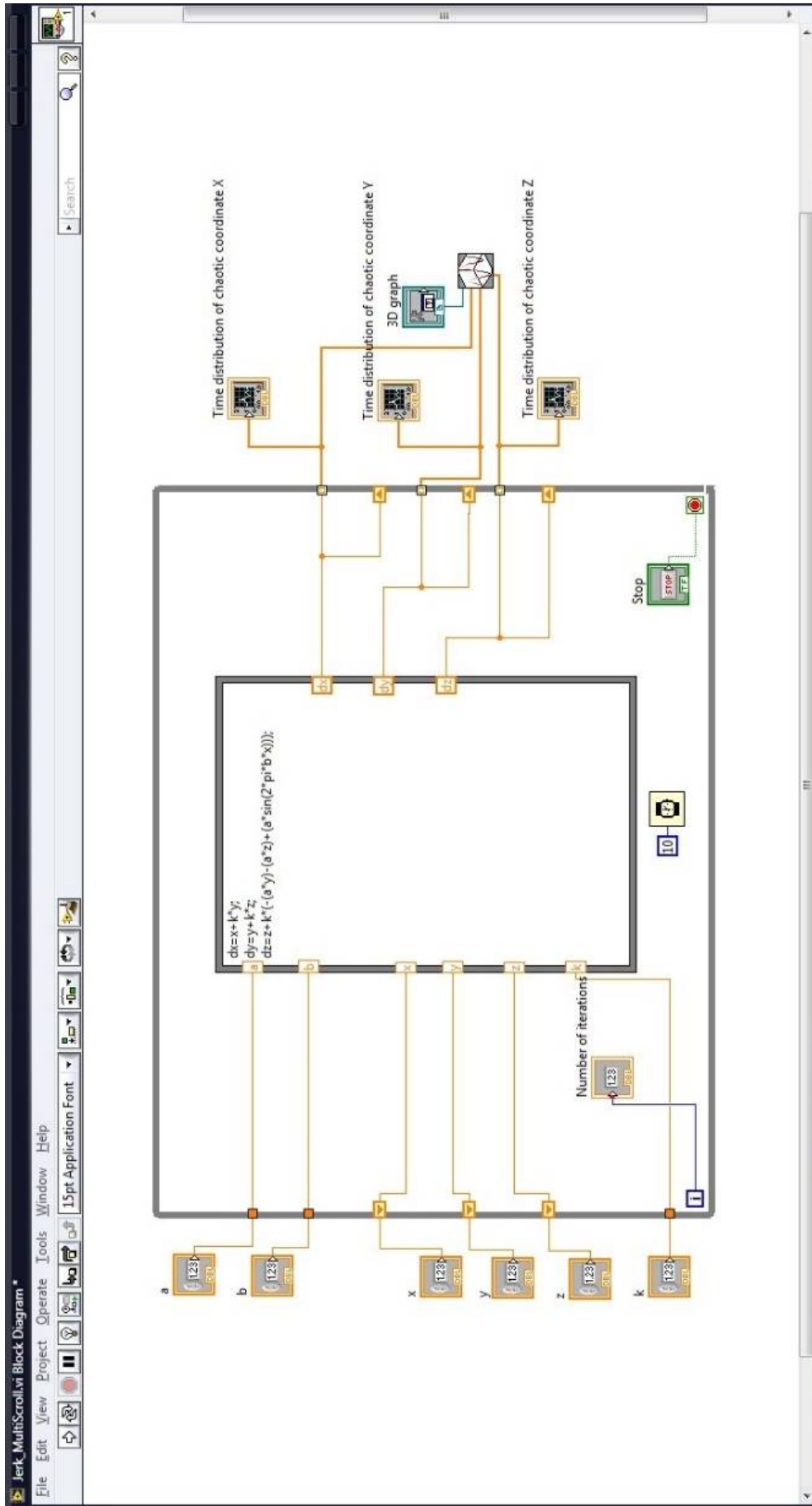


Рис. 2.17. Блокова схема, яка реалізує хаотичну мульти-витткову систему типу „jerk”

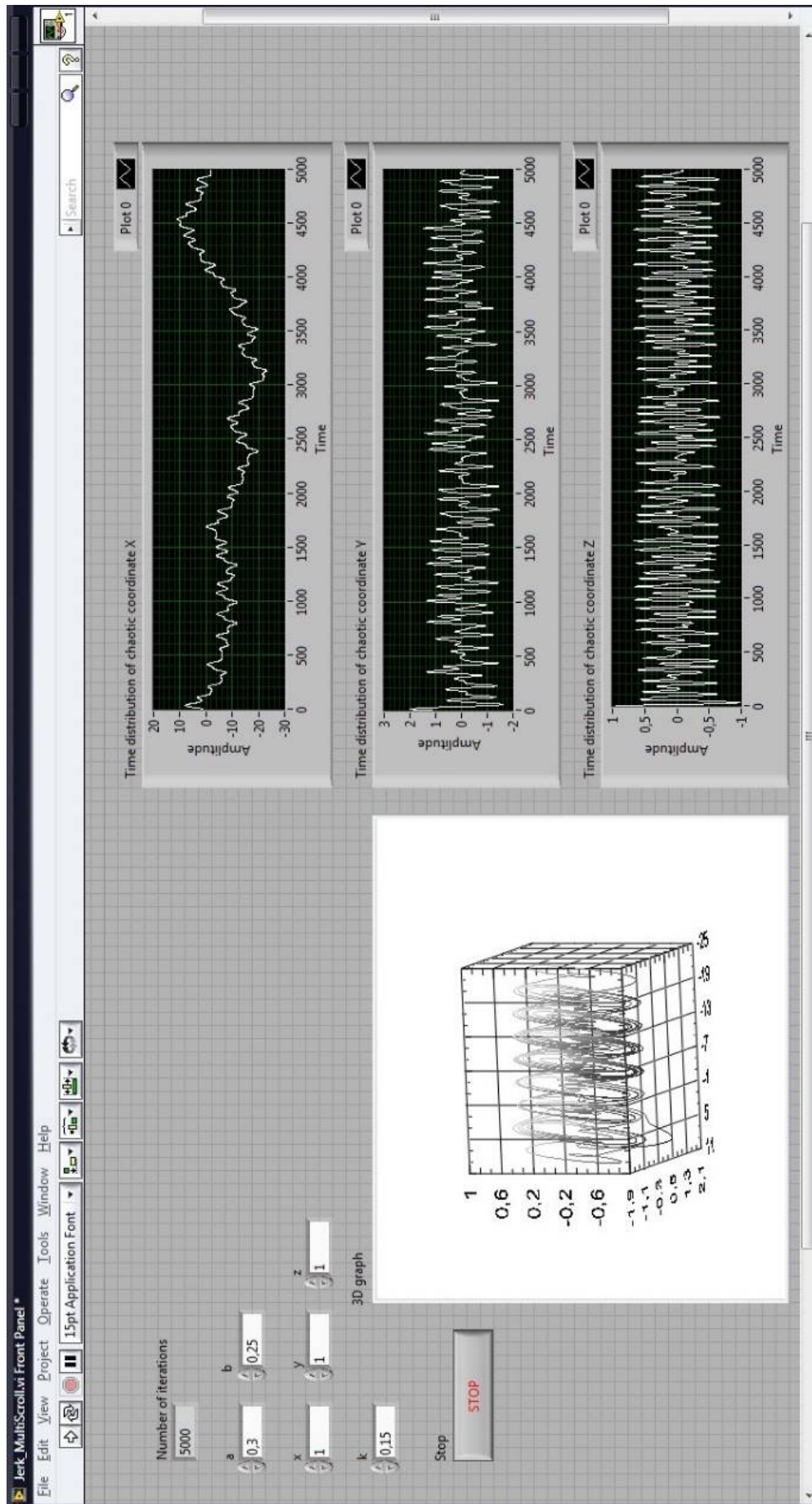


Рис. 2.18. Інтерфейс програми, що графічно показує математичний розв’язок хаотичної мульти-вигткової системи типу „jerk”

### Керування хаотичною мульти-витковою системою типу „jerk”

Для керування хаотичною мульти-витковою системою типу „jerk” ми додамо в кожне рівняння (2.6) керуючий коефіцієнт  $k$ .

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= k \cdot y, \\ \frac{dy}{dt} &= k \cdot z,\end{aligned}\tag{2.7}$$

$$\frac{dz}{dt} = k \cdot (-ay - az + ag(x)).$$

В таблиці 2.1 представлені значення керуючих коефіцієнтів.

Таблиця 2.1

Значення керуючих коефіцієнтів	Число витків хаотичного атрактора
$k = 0.01, k = 0.02$	2
$k = 0.03$	3
$k = 0.04$	4
$k = 0.05$	5
$k = 0.06$	4
$k = 0.07$	5
$k = 0.08$	3
$k = 0.09$	6
$k = 0.1$	5
$k = 0.11$	9
$k = 0.12$	5
$k = 0.13$	11
$k = 0.14$	6
$k = 0.15$	7
$k = 0.16$	8



$k = 0.17$	9
$k = 0.18$	2
$k = 0.19$	7
$k = 0.20$	6
$k = 0.21$	11
$k = 0.22$	12
$k = 0.23$	7
$k = 0.24$	11
$k = 0.25$	16
$k = 0.26$	хаотичний
$k = 0.27$	хаотичний
$k = 0.28$	1
$k = 0.29$	хаотичний
$k > 0.30$	хаотичний

Рис. 2.19 демонструє приклад керування хаотичною мульти-витковою системою типу „jerk” для системних параметрів  $a = 0.3$ ,  $b = 0.25$ , початкових умов  $x = y = z = 1$ , числа ітерацій  $N = 5000$ , керуючого коефіцієнта  $k = 0.1$ .

Результатом керування є 5-витковий атрактор, показаний в 3D відображенні і представлені часові розподіли хаотичних координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ .

Рис. 2.20 демонструє інший приклад керування хаотичною мульти-витковою системою типу „jerk” для системних параметрів  $a = 0.3$ ,  $b = 0.25$ , початкових умов  $x = y = z = 1$ , числа ітерацій  $N = 5000$ , керуючого коефіцієнта  $k = 0.24$ .

Результатом керування є 16-витковий атрактор, показаний в 3D відображенні і представлені часові розподіли хаотичних координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ .

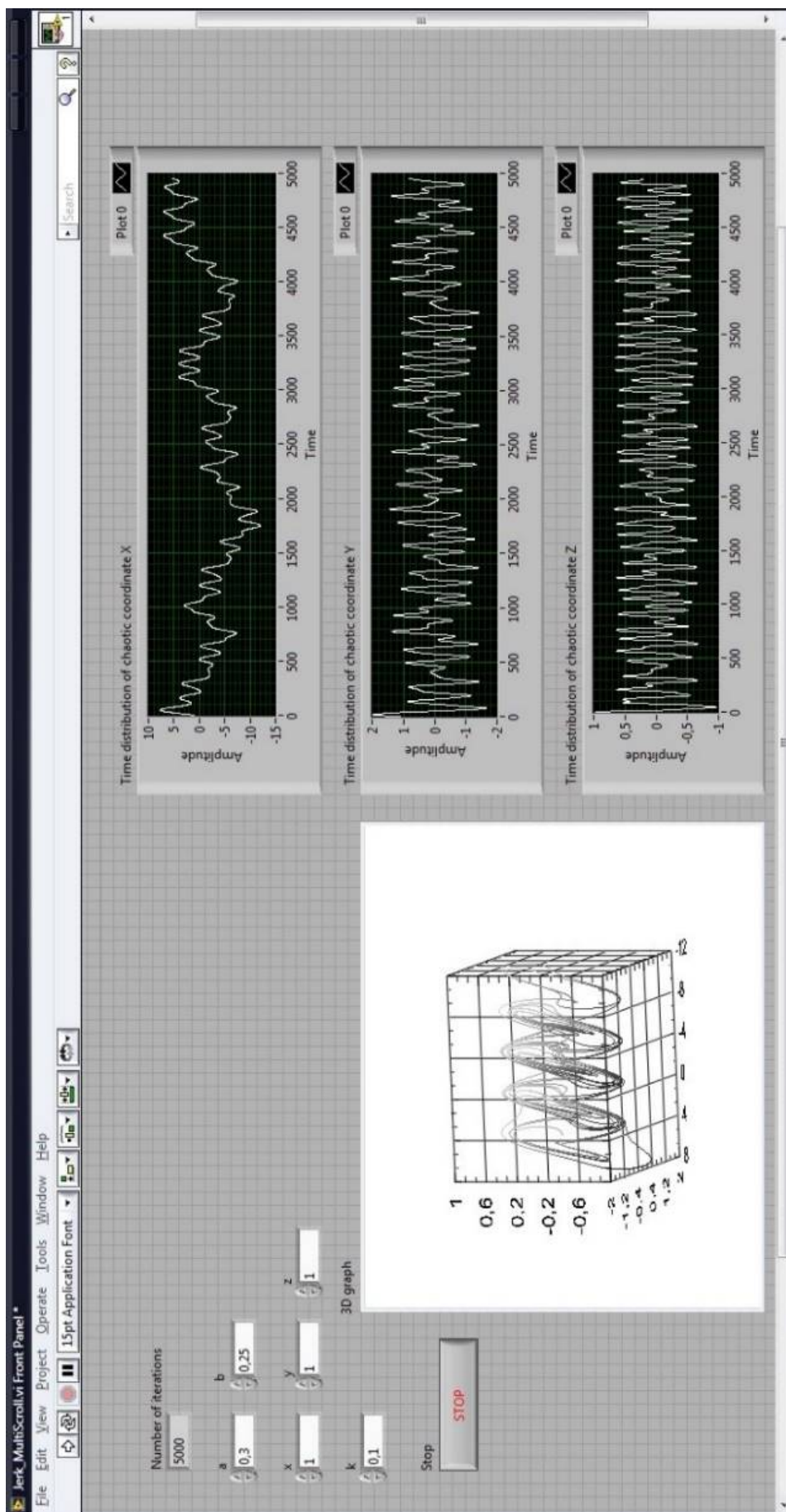


Рис. 2.19. Інтерфейс програми, що демонструє 5-витковий керований аттрактор і часові розподіли хаотичних координат X, Y, Z хаотичної мульти-виткової системи типу „jerk”

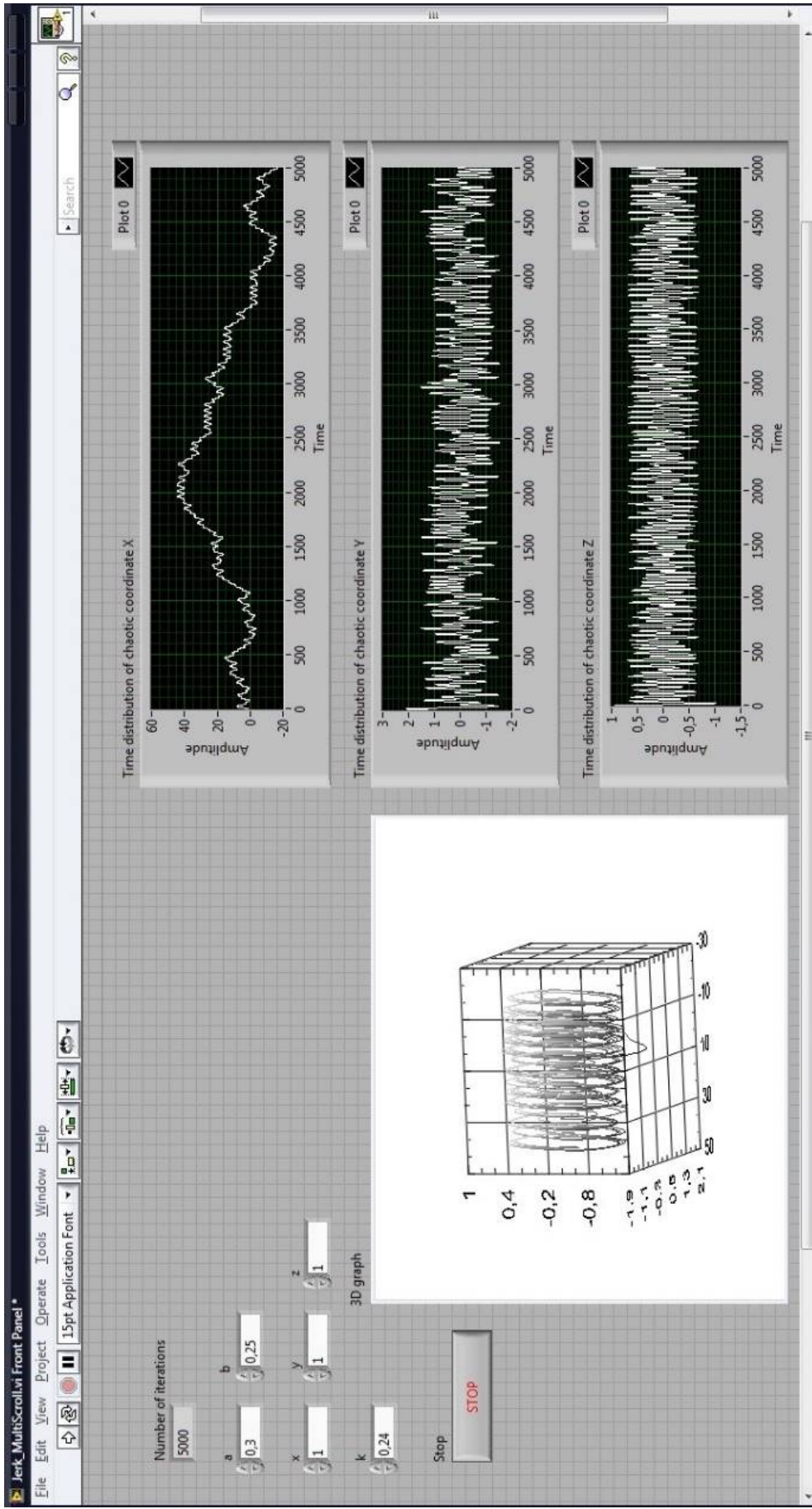


Рис. 2.20. Інтерфейс програми, що демонструє 16-витковий керований атрактор і часові розподіли хаотичних координат X, Y, Z хаотичної мульті-виткової системи типу „jerk”

### **Висновки до другого розділу**

1. Проведено аналіз і моделювання одно-, дво- та тривимірних хаотичних систем з допомогою програмного середовища LabView.
2. Спроектовано тривимірну хаотичну систему Пехлівана та проведено дослідження її характеристик.
3. Вперше представлено значення коефіцієнтів управління для хаотичної мульти-виткової системи типу „jerk”, які можуть бути використані як ключі для маскування та / або розшифрування корисного інформаційного носія.

## РОЗДІЛ 3

### МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ПЕРЕДАВАННЯ ТА ПРИЙМАННЯ ІНФОРМАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ХАОТИЧНОЇ СИСТЕМИ РЕСЛЕРА НА ОСНОВІ LABVIEW ТА MULTISIM

#### 3.1. Функціональне проектування інформаційних систем в MultiSim

Multisim – це унікальна можливість розробки схеми та її тестування / емуляції в одному середовищі розробки. У такого підходу є безліч переваг. Початківцям в Multisim не потрібно турбуватися про складний синтаксис SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis – програма емуляції з вбудованим аналізом схем) і його команди, а у професійних користувачів є можливість налаштування всіх параметрів SPICE додатково.

Завдяки Multisim опис схеми став як ніколи простим і інтуїтивно зрозумілим. Подання у вигляді електронної таблиці дозволяє одночасно змінювати характеристики будь-якої кількості елементів: від схеми друкованої плати до моделі SPICE. Безрежимне редагування – це найбільш ефективний спосіб розміщення і з'єднання компонентів. Працювати з аналоговими і цифровими складовими елементами інтуїтивно просто і зрозуміло.

Крім традиційного аналізу SPICE, Multisim дозволяє користувачам підключати до схеми віртуальні прилади. Концепція віртуальних інструментів – це простий і швидкий спосіб побачити результат за допомогою імітації реальних подій.

Також в Multisim є спеціальні компоненти під назвою „інтерактивні елементи” (interactive parts), ви можете змінювати їх під час емуляції. До інтерактивних елементів відносяться перемикачі, потенціометри, причому найменші зміни елемента відразу відображаються в імітації.

При необхідності більш складного аналізу Multisim пропонує більше 15 різних функцій аналізу. Деякі приклади включають використання змінного струму, Монте-Карло, аналіз найбільш несприятливих умов і Фур'є. У Multisim входить Grapher – потужний засіб перегляду та аналізу даних емуляції.

Функції опису та тестування схеми, представлені в Multisim допоможуть будь-якому розробнику схем, заощадають його час і врятовують від помилок на всьому шляху розробки схеми.

### 3.2. Математична модель хаотичної системи Реслера

Система Реслера – одна із хаотичних систем, що може бути використана для захисту інформаційного носія, і яка описується трьома нелінійними диференціальними рівняннями (3.1).

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= -y - z, \\ \frac{dy}{dt} &= x + ay, \\ \frac{dz}{dt} &= b + z(x - c),\end{aligned}\tag{3.1}$$

де  $x, y, z$  – початкові умови,  $a, b, c$  – параметри системи [146-148].

#### Експериментальні дані і їх обробка

На рисунку 3.1 представлена блочна схема реалізації хаотичної системи Реслера. Основною функціональною частиною є формульний вузол, в який заносяться три нелінійні диференціальні рівняння (3.1). На вхід формульного вузла подаються параметри системи ( $a, b, c$ ) та початкові умови ( $x, y, z$ ). На виході схеми присвоєні рішення диференціальних рівнянь ( $dx, dy, dz$ ). Також на виході є можливість продемонструвати рішення рівнянь в тривимірному просторі.

При зміні параметрів системи та початкових умов можна детально проаналізувати та дослідити поведінку хаотичної системи Реслера, яка в багатьох випадках служить базовим елементом функціональних блоків захищених хаотичних систем зв'язку.

Результат моделювання часових залежностей координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  представлений на рис. 3.2. Моделювання проводилось при кількості ітерацій  $N = 10000$ , системних параметрах  $a = 0,398$ ,  $b = 2$ ,  $c = 4$  і динамічних змінних  $x = y = z = 1$ . Для маскуванню інформаційного носія були використані змінні  $x$  і  $y$  тому, що змінна  $z$  не демонструє хаотичної поведінки системи. Спектральний аналіз Фур'є представлений на рис. 3.3.

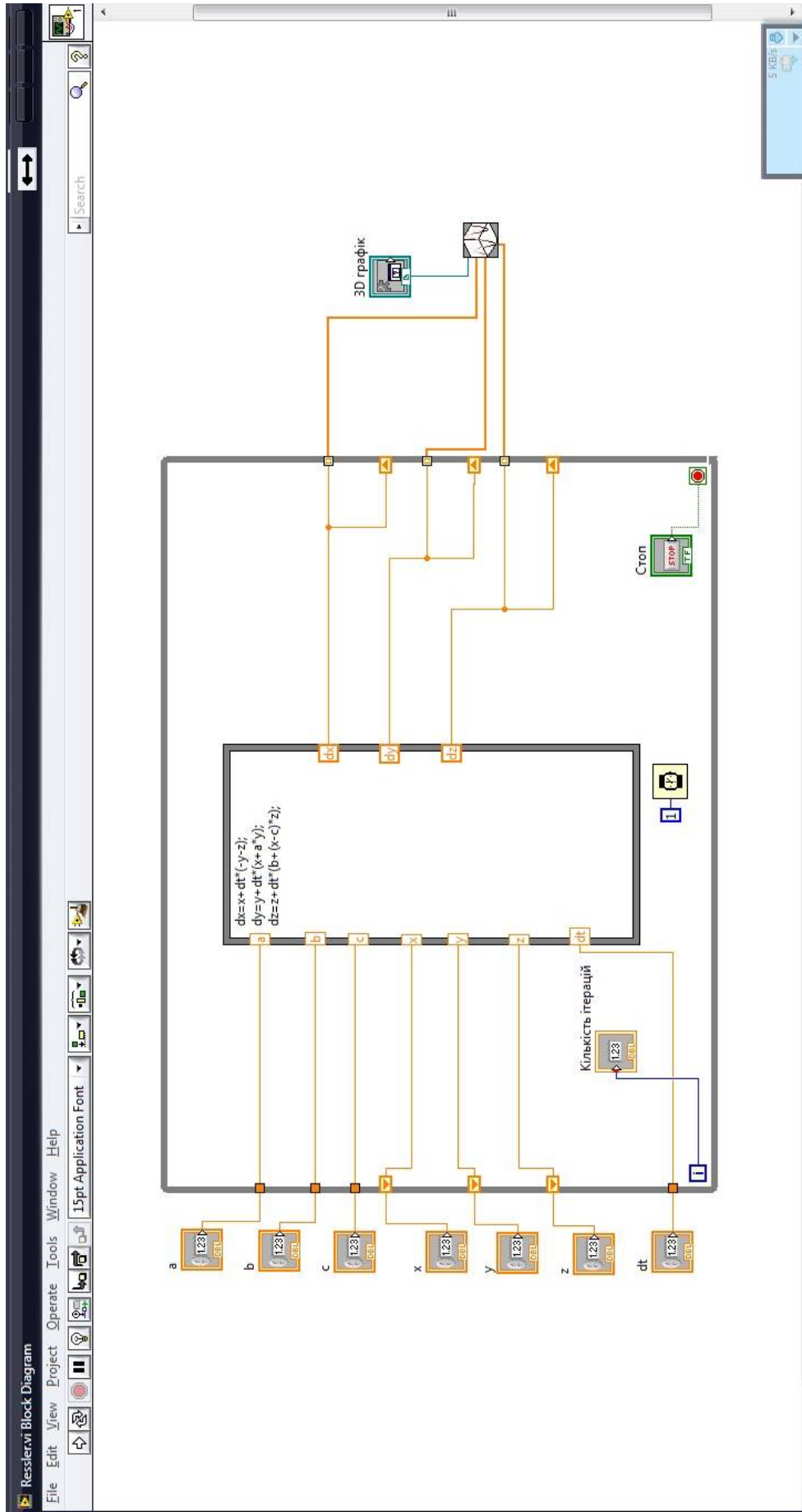


Рис. 3.1. Блочна схема реалізації хаотичної системи Реслера



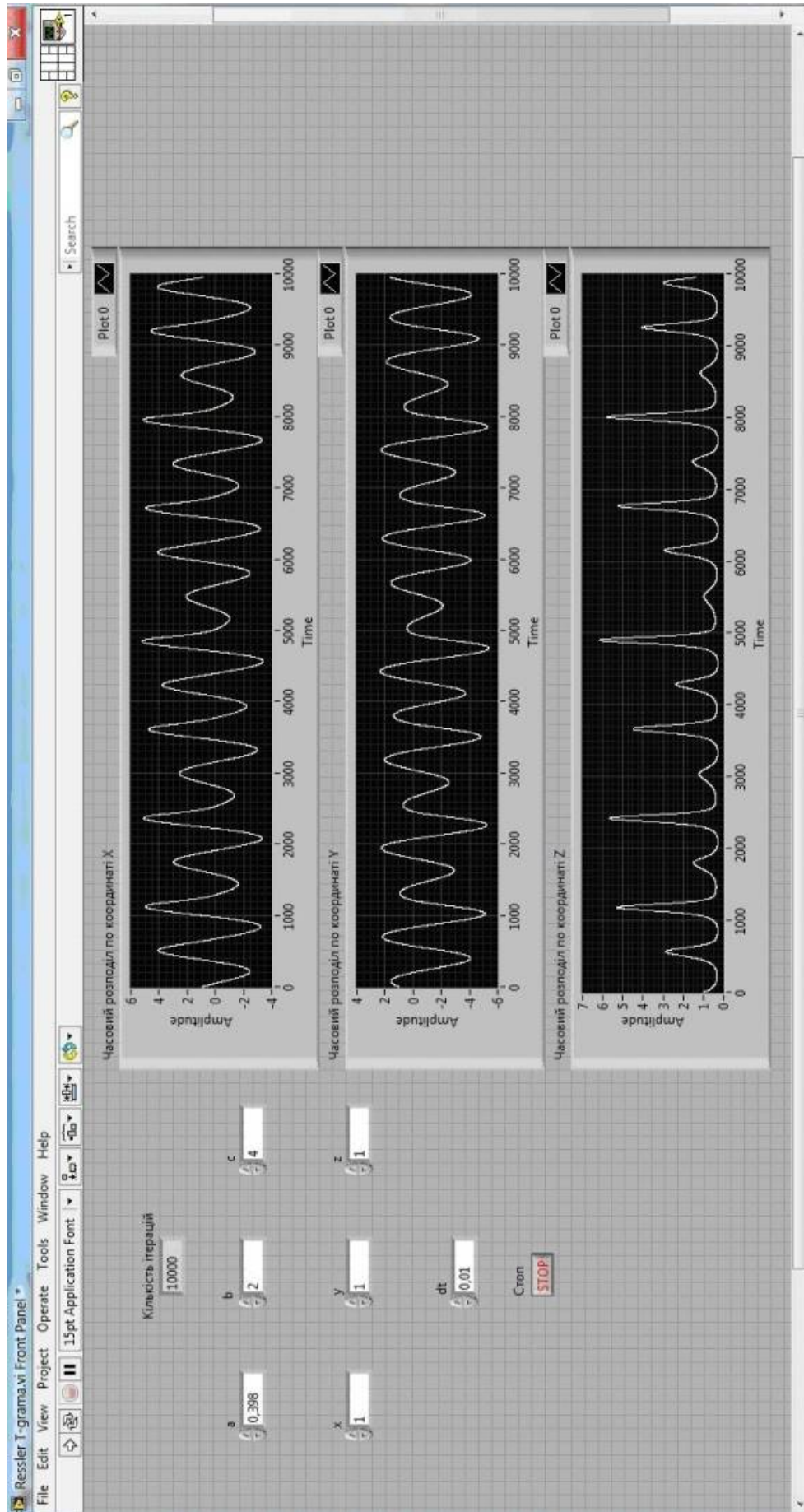


Рис. 3.2. Часові залежності системи Реслера

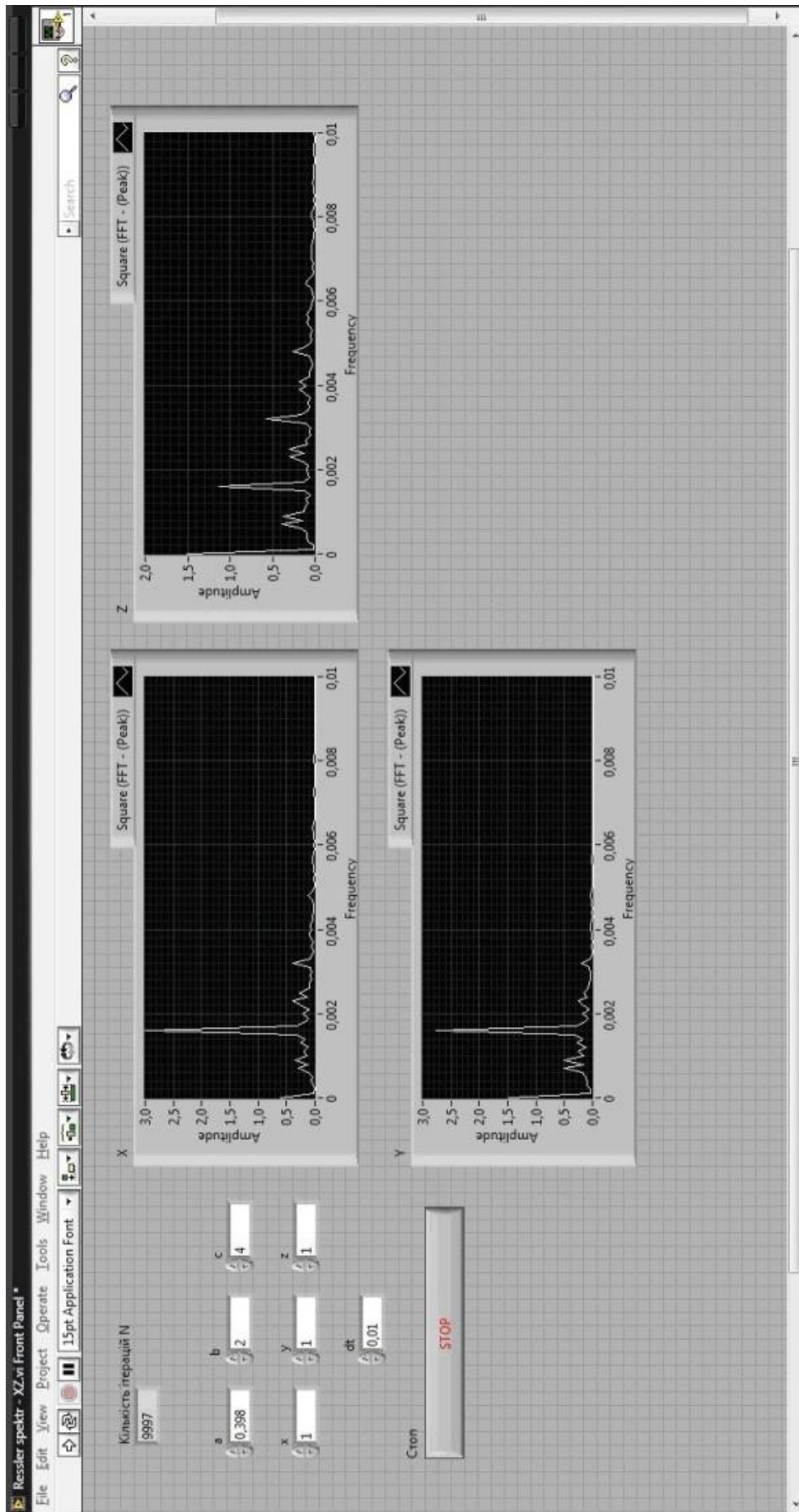


Рис. 3.3. Спектральний аналіз Фур'є для кількості ітерацій  $N=10000$

### 3.3. Моделювання схемотехнічного рішення хаотичного генератора Реслера

Рис. 3.4 демонструє змодельовану схему генератора, що реалізує хаотичну систему Реслера з використанням MultiSim.

На рис. 3.5 представлені результати моделювання. Згенерований хаотичний сигнал в площині XY представлений на віртуальному осцилографі. Координаті X на схемі відповідає вихід операційного підсилювача U1A, координаті Y – вихід операційного підсилювача U2A, координаті Z – вихід операційного підсилювача U5A.



Рис. 3.5. Змодельований хаотичний сигнал системи Реслера

На рис. 3.6 представлені часові залежності координат X, Y і Z відповідно (на екрані осцилографа зверху вниз).



Рис. 3.6. Часові залежності координат X, Y і Z

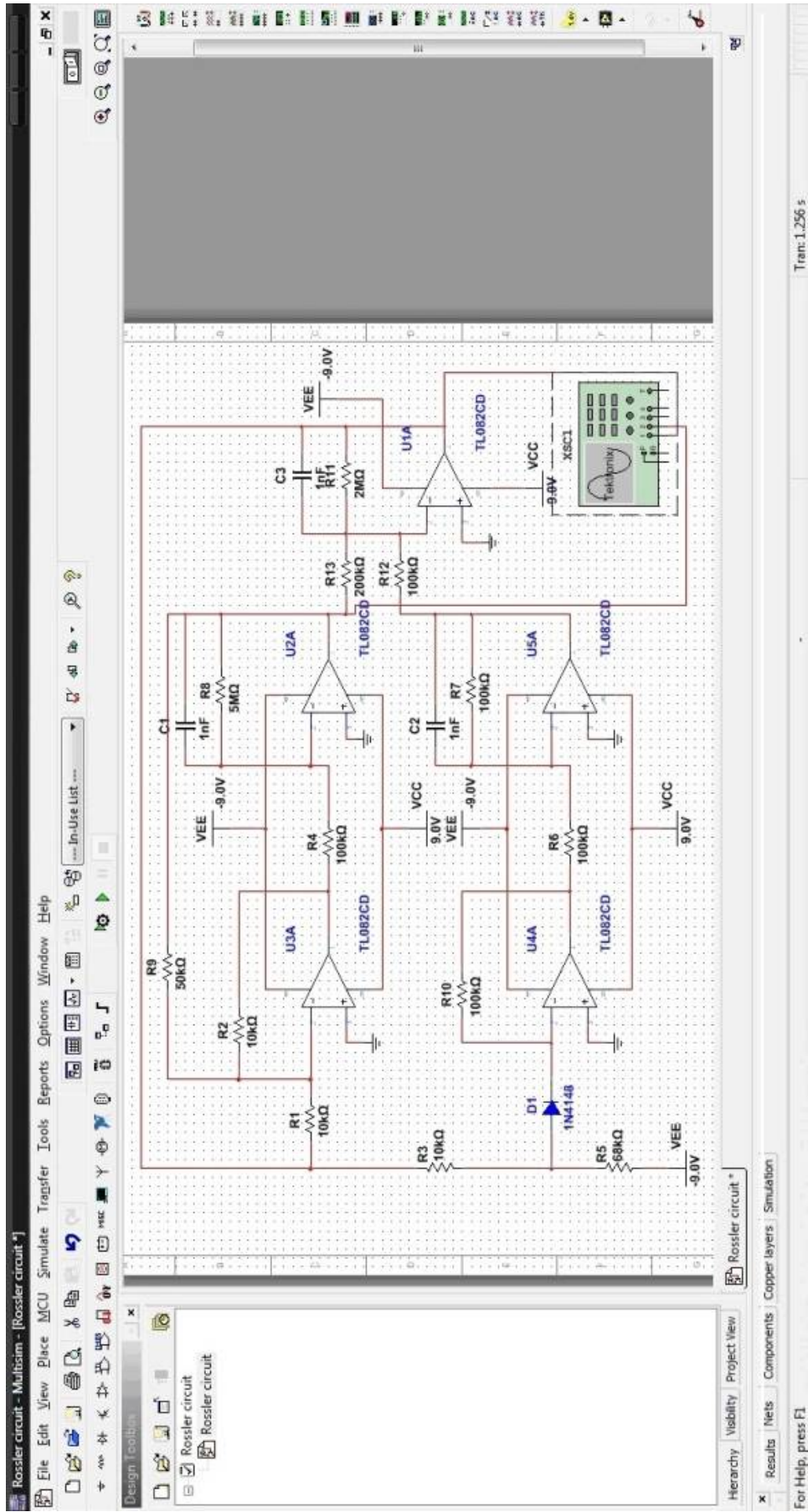


Рис. 3.4. Схема генератора, що реалізує хаотичну систему Реслера

Рис. 3.7 – 3.9 демонструють спектри хаотичної системи Реслера.



Рис 3.7. Спектральний розподіл координати X



Рис. 3.8. Спектральний розподіл координати Y



Рис. 3.9. Спектральний розподіл координати Z

### **3.4. Моделювання системи маскування та розшифрування інформаційного носія хаотичною системою Реслера за допомогою програмного середовища LabView**

Дослідження, проведені в останні роки, показують, що динамічний хаос володіє рядом властивостей, що роблять його привабливим для використання в системах зв'язку в якості несучих або модульованих коливань.

Безумовно, сучасна техніка зв'язку здатна вирішувати і вирішує значну частину виникаючих перед нею проблем традиційними методами, заснованими на регулярних сигналах і, при необхідності розширення спектра частот, на псевдошумових сигналах. Однак притягальним у використанні динамічного хаосу є те, що сукупність висунутих вимог до сучасних і перспективних систем зв'язку, природним чином може бути реалізована в рамках єдиного підходу. Це свідчить на користь потенційної ефективності застосування хаосу в системах зв'язку і налаштовує на наполегливе подолання наявних проблем.

А проблеми досить серйозні: відсутність вузлів і компонент, які використовують властивості хаотичної динаміки; необхідність створення „прецизійних” елементів хаотичних систем і хаотичних систем у цілому, що забезпечують відтворюваність характеристик „від зразка до зразка”; висока чутливість схем передачі інформації на основі хаотичних сигналів до лінійних і нелінійних спотворень у вихідних ланках передавачів і вхідних ланках приймачів, а також безпосередньо в каналі зв'язку; відносно низька завадостійкість (по крайній мірі для більшості запропонованих схем); суттєва відмінність запропонованих рішень від рішень для традиційних систем зв'язку.

Слід зазначити, що більшість з перерахованих проблем виникають і при традиційних підходах, як тільки підвищуються вимоги до якості і швидкості передавання інформації. Дійсно, при необхідності передавання декількох біт замість одного за той самий інтервал часу потрібно або скоротити довжину імпульсів і тим самим розширити спектр переданого сигналу, або вводити

додаткове число градацій амплітуди імпульсів, що не змінює ширину смуги частот, але приводить до зниження стійкості сигналу стосовно шумів.

На сьогодні новою властивістю хаотичних сигналів як носіїв є те, що вони самі містять у собі визначену і, у середньому, фіксовану в одиницю часу інформацію. Наявність цієї інформації вимагає деякої додаткової пропускну здатності від каналу зв'язку. Разом з тим присутність інформаційної складової в хаотичному сигналі і керування нею можуть бути застосовані для додання схемі передачі деяких додаткових корисних властивостей.

Ідея використання хаосу в системах передавання інформації вже перейшла зі стадії суцього фундаментальних досліджень у стадію аналізу і дослідження засобів зв'язку широких класів.

Під „прямохаотичними” схемами зв'язку розуміються схеми, у яких введення інформації здійснюється в хаотичний сигнал, генерований безпосередньо в радіо- і НВЧ-діапазонах. Введення сигналу виконується, наприклад, шляхом модуляції або параметрів передавача, або хаотичного сигналу інформаційним уже після його генерації в джерелі. Відповідно витяг інформаційного сигналу також здійснюється в області високих і надвисоких частот.

### **Основні проблеми. Передавач. Канал. Приймач**

При створенні хаотичних передавачів виникає ряд проблем. Перша група проблем зв'язана зі створенням генераторів (джерел) хаосу. Джерела хаосу повинні задовольняти, як мінімум, наступним вимогам:

- генерувати хаотичні коливання в необхідному діапазоні частот і мати можливо менше побічне випромінювання;
- забезпечувати в смузі частот генерації бажаний або близький до бажаного розподіл спектральної густини сигналу;
- бути керованими в тому розумінні, як цього вимагає використовувана схема введення інформації в хаотичний сигнал (схема модуляції);

- повинно бути забезпечене відтворення основних характеристик генераторів від зразка до зразка;

- для реалізації генератора у виді інтегральної мікросхеми повинна бути розроблена і досліджена досить точна еквівалентна схема, а також адекватна математична модель.

Друга група проблем зв'язана з введенням інформаційного сигналу в хаотичний сигнал. В ідеологічному плані тут не виникає ускладнень з методами введення, що використовують такі стандартні операції, як додавання сигналів, множення сигналів на  $\pm 1$ , перемножування хаотичного й інформаційного сигналів, модуляція інформаційним сигналом параметрів хаотичної системи і т. д.

Однак поряд із традиційними операціями для введення інформаційного сигналу в хаотичний сигнал запропоновано застосовувати і специфічні підходи, засновані на спеціальних властивостях хаотичних систем і, у силу цього, потенційно досить ефективні. Зокрема, таким перспективним підходом є введення інформації за рахунок малих збурень поточного стану хаотичної системи, для реалізації якого ведеться розробка відповідних пристроїв і вузлів.

Третя група проблем зв'язана з формуванням вигляду хаотичного передавача в цілому. Крім генератора і пристрою введення інформації в хаотичний сигнал, передавач може містити в собі цілий ряд елементів і вузлів, що забезпечують підсилення сигналів, фільтрацію позасмугових коливань, перенос частоти, модуляцію несучого періодичного коливання хаотичним коливанням і т. д. Багато цих вузлів добре відпрацьовані і широко застосовуються в стандартних радіотехнічних пристроях. Однак можливість їхнього застосування в передавачах з використанням хаосу може виявитися досить обмеженою. Причина полягає в різниці вимог, що пред'являються до таких елементів у двох типах систем. Наприклад, для багатьох традиційних систем передавання інформації фазові спотворення інформаційного сигналу не



грають істотної ролі. У той же час для систем зв'язку при наявності хаосу такі спотворення у край небажані.

Тепер представимо, що у відповідності зі структурою передавача виконується кілька послідовних операцій. При кожній операції відбувається деяке спотворення сигналу. Якщо зафіксувати допустимі спотворення для передавача в цілому, то вимоги на допустимий рівень спотворень при окремих операціях будуть підсилюватися з ростом числа операцій.

Звідси випливає висновок: потрібно спробувати зменшити число перетворень над хаотичним сигналом і максимально спростити структуру передавача. Граничний випадок такого спрощення структури – прямохаотичні передавачі. У них хаотичний сигнал формується безпосередньо в тому діапазоні частот, де виробляється його випромінювання, а введення інформаційного сигналу в хаотичний відбувається в результаті впливу на формувач хаотичного сигналу або вже на виході з нього. Таким чином, єдиним додатковим вузлом через який повинен пройти хаотичний сигнал, який містить корисну інформацію, є вихідний підсилювач. Він же служить узгоджувальним пристроєм між джерелом хаосу і каналом.

При створенні приймачів виникають наступні проблеми.

Задачами приймача є: сприйняття з каналу високочастотного або НВЧ-сигналу; перетворення цього сигналу до виду, придатного для виділення корисної інформації; безпосередній витяг інформації; приведення її до виду, який потрібен одержувачу. Звідси випливає, що дві групи проблем, зв'язаних з реалізацією приймачів, аналогічні тим, що виникають при реалізації передавачів і також приводять до висновку про бажаність спрощення структури системи. По-перше, та ланка вузлів, що стоїть в передавачі після введення інформаційного сигналу, має свій аналог у приймачі: підсилювачі, фільтри, пристрої, що забезпечують перенесення частоти (тепер уже зверху вниз), демодулятори і т. д. Тому й у приймачі існує проблема спотворення сигналу при послідовному виконанні операцій. По-друге, виникають проблеми з вузлом, побудованим на

елементах, що входять до складу хаотичного генератора передавача. Цей вузол відіграє роль нелінійного узгоджувального фільтра.

Питання, зв'язані з ефективним витягом інформаційного компонента, вимагає окремого обговорення. Справа в тому, що в силу специфічних інформаційних властивостей хаотичних сигналів схеми демодуляції й умови, при яких повинна вироблятися демодуляція, також досить незвичайні.

Нарешті, окрема група проблем зв'язана з проходженням сигналів, випромінюваних хаотичними передавачами через канал, під яким розуміється фізичне середовище поширення. Зокрема, це можуть бути радіо- і НВЧ-кабелі, радіорелейні лінії; поширення через вільний простір, пересічену місцевість, міську забудову і т. д.

Проходження через канал приводить до зміни характеристик сигналу, що позначається на роботі приймача. Оскільки успішний прийом сигналу і витяг з нього інформаційного компонента визначаються всією сукупністю спотворень, внесених у сигнал, вихідні вузли передавачів і вхідні блоки приймачів хаосу можна також віднести до елементів фізичного каналу.

Навіть якщо передавач і приймач хаосу виконані з необхідним ступенем точності і відтворюваності, що дозволяє у випадку „ідеального” каналу одержувати гарні характеристики, то наявність спотворень у каналі може приводити або до істотної деградації характеристик схеми зв'язку, або до її непрацездатності. Різні аспекти проблеми каналу і підходи до її вирішення вже обговорювалися в літературі. Особливості цієї проблеми й аналіз шляхів її вирішення вимагають окремого детального розгляду.

Для моделювання системи маскування та розшифрування інформаційного носія хаотичною системою Реслера було застосоване програмне середовище LabView.

На рис. 3.10 представлено програмне забезпечення, що демонструє маскування інформаційного носія хаотичним, а саме хаотичною системою Реслера.

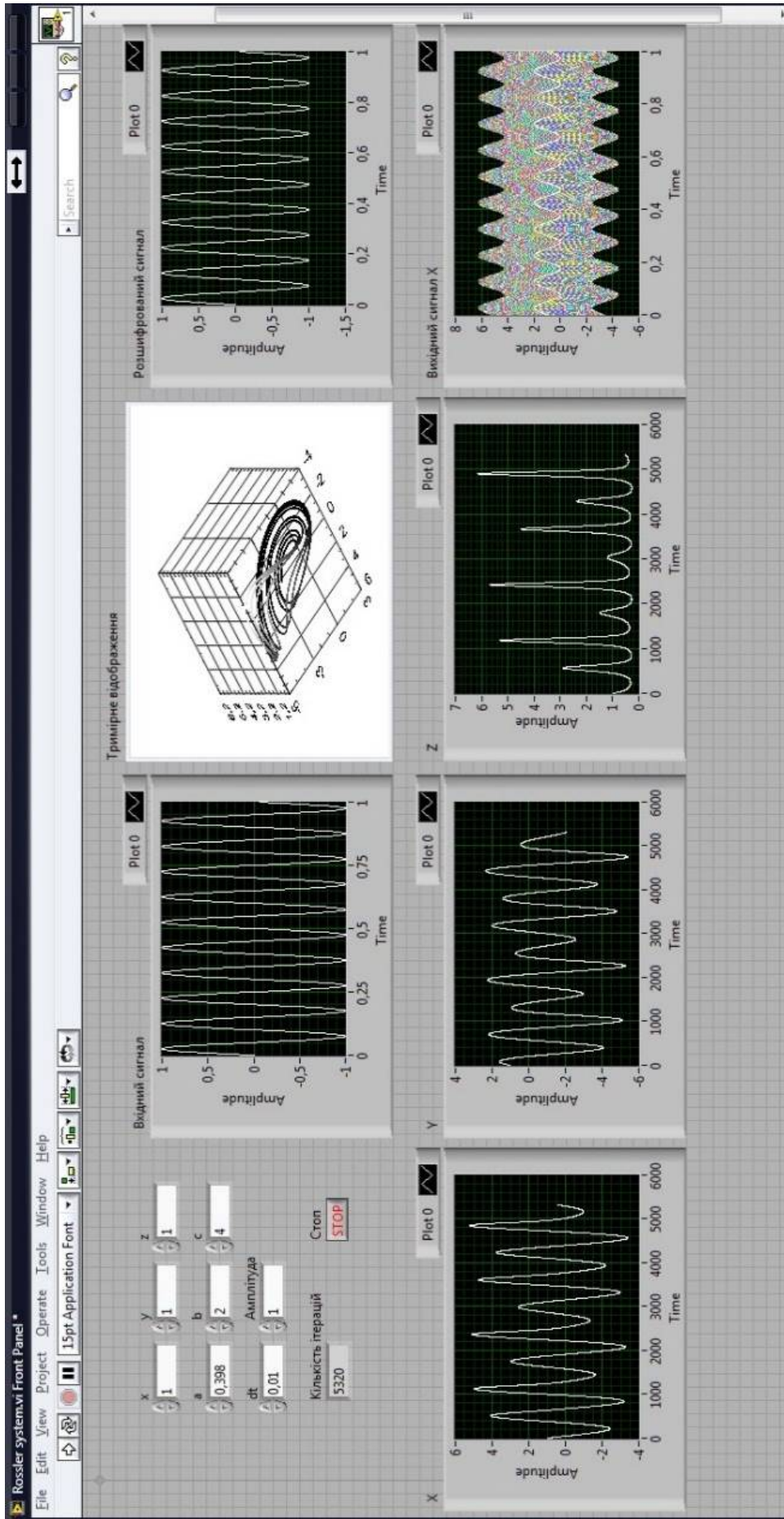


Рис. 3.10. Програмне забезпечення, що демонструє маскування та розшифрування інформаційного носія хаотичною системою Реслера

Алгоритм маскуваннтя наступний: наприклад, як інформаційний сигнал було використано синусоїдальний сигнал (корисний сигнал), який через суматор перемішується з хаотичним. На виході суматора отримується замаскований сигнал та передається одержувачу. Ключем маскуваннтя є початкові умови та параметри системи. Алгоритм розшифруваннтя має зворотну дію, тобто одержувач через віднімач отримує інформаційний сигнал.

Слід зазначити, що ключем маскуваннтя корисного сигналу (інформації) може бути також число періодів орбіт хаотичного атрактора.

На рис. 3.11 і рис. 3.12 приведено передаваннтя замаскованого сигналу та його відновленнтя на основі LabView по протоколу TCP/IP.

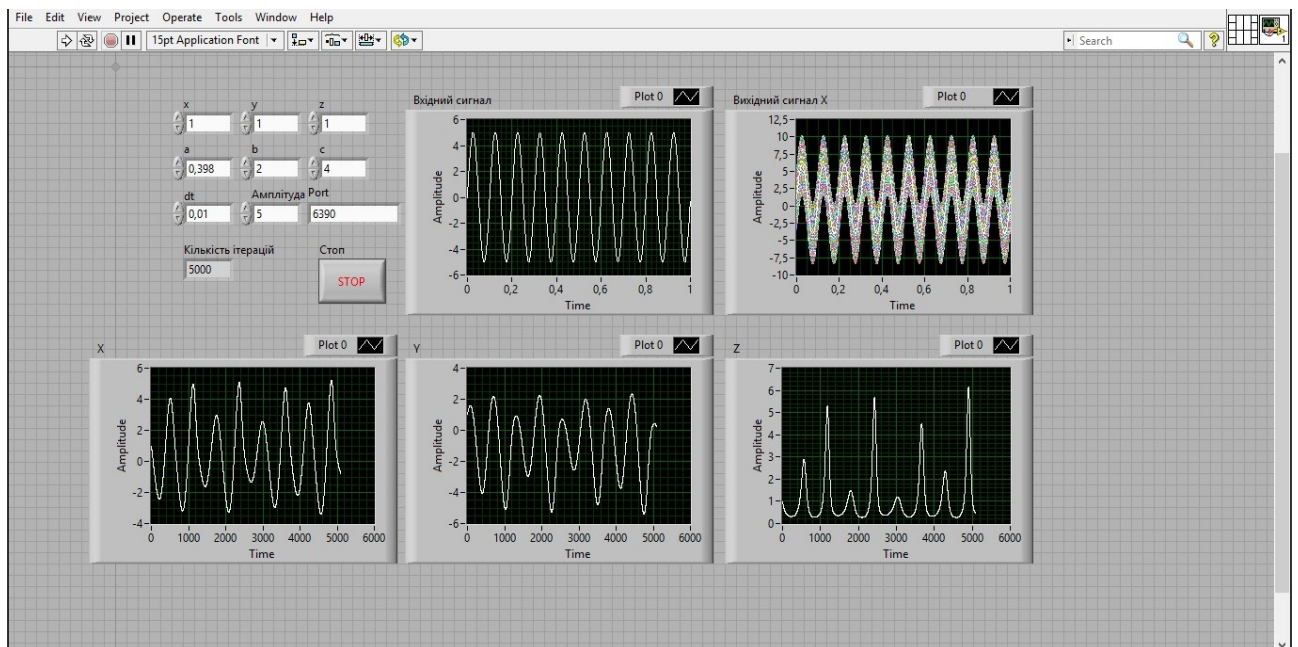


Рис. 3.11. Передавальна частина

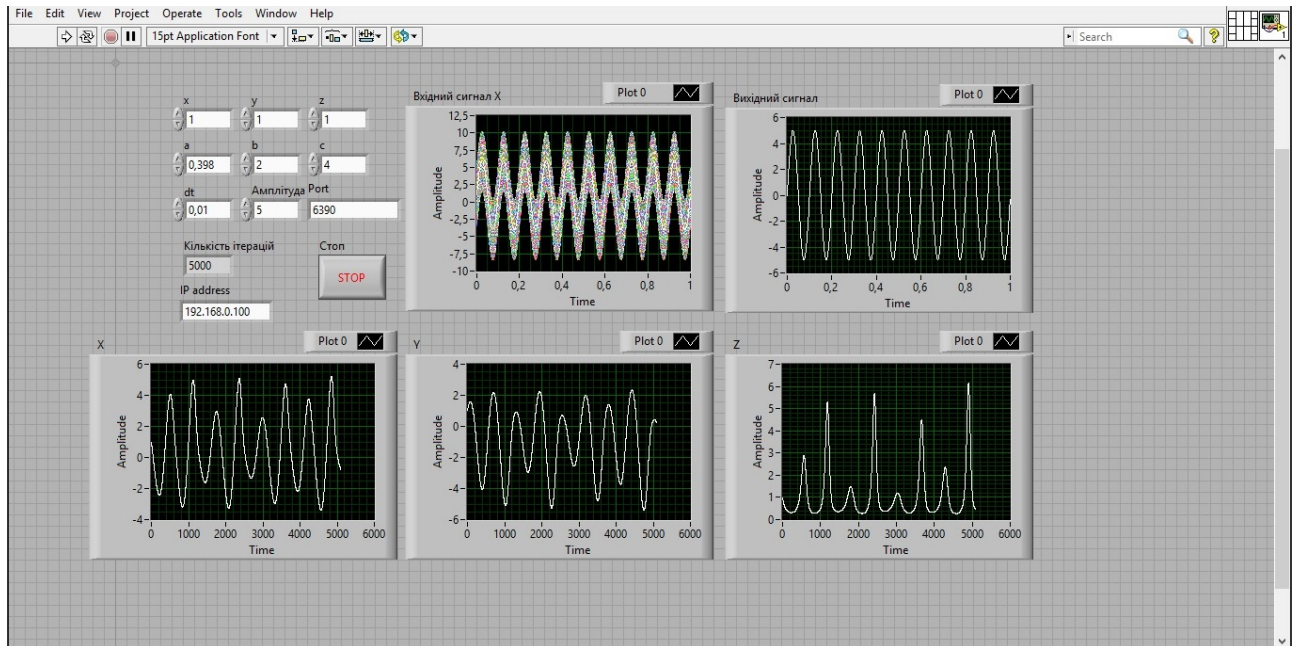


Рис. 3.12. Приймальна частина

Принцип роботи наступний: один комп'ютер служить сервером для передавання замаскованого інформаційного сигналу, де заносяться початкові умови, системні параметри, порт каналу. Інший комп'ютер є клієнтом, тобто для приймання та відновлення інформації, куди заносяться ідентичні початкові умови, системні параметри, та вказується IP адреса сервера.

Багатьом дослідникам сьогодні доводиться працювати не на одному, а на двох або навіть більшій кількості комп'ютерів – на практиці це автоматично означає необхідність синхронізації всіх комп'ютерів. Мобільним співробітникам в цьому плані ще складніше, адже їм, до всього іншого, не обійтися без портативного ПК типу ноутбука, нетбука або іншого різновиду мобільного комп'ютера.

Набагато швидше, та й надійніше вдається до синхронізації даних – скориставшись відповідною утилітою або онлайнним сервісом для синхронізації.

## Основи синхронізації даних

Для синхронізації даних дослідники можуть використовувати як спеціалізовані утиліти, так і веб-сервіси. І ті й інші синхронізують дані відповідно до обраного методу.

Існує багато варіантів синхронізації. Зручніше за все, якщо комп'ютери з'єднані між собою безпосередньо через локальну мережу, інфрачервоний порт або Інтернет. В цьому випадку синхронізація даних проводиться всього за один етап – по суті, натисненням однієї кнопки у вікні відповідної програми. Якщо безпосереднього з'єднання немає, то дані можуть бути синхронізовані з застосуванням пристрою-посередника, який використовується для перенесення інформації між двома комп'ютерами. У цьому випадку дані синхронізуються в кілька етапів: спочатку з одного комп'ютера дані відсилаються на пристрій-посередник, після цього на іншому комп'ютері ці дані приймаються, завдяки чому і здійснюється синхронізація.

## Синхронізація часу

З часу початку використання комп'ютерів (спершу в спеціалізованих системах, а потім і в повсякденному житті) з'явилося завдання підтримувати точність ходу системних годин, тобто мати точно синхронізований час з іншими комп'ютерами і системами. Особливо точність часу критична в розподілених системах, які критичні до порядку обчислення завдань, обробки даних і т. п.

Одним із прикладів такої синхронізації, де вперше був застосований популярний протокол синхронізації часу NTP, може бути диспетчерська служба управління польотами.

## Протоколи DAYTIME і TIME

Першими протоколами точного часу, що використовуються на комп'ютерах, були DAYTIME (RFC 867) і TIME (RFC 868). Перший призначався для повідомлення дати і часу в зрозумілому людині вигляді, другий – в зрозумілому комп'ютеру вигляді. Формат відповіді DAYTIME

суворо не регламентується і не призначений для машинної обробки – передбачається лише, що людині, що прочитала отриманий рядок, стане зрозуміло поточний час.

Протокол TIME, навпаки, призначений для обміну часу між машинами. На комп'ютер, що підключився до TIME-сервера, приходять UDP-пакет, що містить єдине 32-бітове беззнакове число, відповідне числу минулих з 1 січня 1900 р. секунд по UTC. Оскільки таке число переповнюється через 136 років, цей протокол здатний функціонувати тільки до 2036 р.

### Протокол NTP

Зрозуміло, що ні DAYTIME, ні TIME не можуть забезпечити необхідну точність синхронізації часу. У зв'язку з цим, в 1985 р Девідом Л. Міллсом (David L. Mills) з університету Делавера був розроблений мережевий протокол синхронізації часу NTP, точніше його початкова, пізніше названа нульовою (NTPv0) версією, описана в RFC 958. Протокол NTP використовує алгоритм Марзулло (запропонований Кейтом Марзулло (Keith Marzullo) з Університету Каліфорнії, Сан-Дієго), включаючи таку особливість, як облік часу передачі. У версії 4 є можливість досягати точності 10 мс при роботі через Інтернет, і до 0,2 мс усередині локальних мереж.

Відзначимо, що NTP для синхронізації використовує протокол UDP і 123 порт, DAYTIME - 13 порт TCP / UDP, TIME - 37 порт TCP / UDP.

Протокол NTP удосконалювався неодноразово: NTPv1 (1988 р, RFC 1059), NTPv2 (1989 р RFC1119), NTPv3 (1992 р, RFC1305), NTPv4 (1996 р RFC2030).

Для визначення точності або значущості того чи іншого NTP-сервера використовують параметр Stratum (стратум) – ціле число від 1 до 15. Стратум 1 відповідає серверам, які мають безпосередньо зв'язок з еталонним часом, стратум 2 – сервер, який отримує відомості про час від серверів першого стратума і т. д. При побудові ланцюга зв'язків значення стратума збільшується на 1.

### Принцип визначення точного часу

Робота алгоритму NTP досить проста і може бути проілюстрована завданням Реймонда М. Смалліан (1978 р.):

У однієї людини не було наручного годинника, але зате вдома висів точний настінний годинник, який він іноді забував заводити. Одного разу, забувши черговий раз завести годинник, він відправився в гості до свого друга, провів у того вечір, а повернувшись додому, зумів правильно поставити годинник. Яким чином йому вдалося це зробити, якщо час у дорозі заздалегідь відомо не було?

Відповідь така: виходячи з дому, людина заводить годинник і запам'ятовує, в якому становищі перебувають стрілки. Прийшовши і йдучи з гостей, вона відзначає час свого приходу і відходу. Це дозволяє їй дізнатися, скільки вона перебувала в гостях. Повернувшись додому і поглянувши на годинник, людина визначає тривалість своєї відсутності. Віднімаючи з цього часу той час, який вона провела у гостях, людина дізнається час, витрачений на дорогу туди і назад. Додавши до часу виходу з гостей половину часу, витраченого на дорогу, вона отримує можливість дізнатися час приходу додому і перевести відповідним чином стрілки свого годинника.

Таким чином, по чотирьох даних: час відправлення запиту (по годинах клієнта); час отримання запиту сервером (по годинах сервера); час відправлення відповіді сервером (по годинах сервера); час отримання відповіді (по годинах клієнта) можна знайти час пакета в дорозі туди і назад, а потім – відкоригувати локальний час.

При цих розрахунках ми користуємося трьома важливими припущеннями:

1. Пакет проходить шлях від клієнта до сервера і назад за рівний час.
2. Швидкість ходу годинника клієнта і сервера однаковий.
3. На обчислення нового локального часу не йде додатковий час.

Насправді всі ці припущення, строго кажучи, не вірні, і отримати точне значення серверного часу за допомогою одного NTP-запиту неможливо. Тому



для синхронізації годин зазвичай використовується кілька NTP-серверів, на які постійно надсилаються запити. Накопичуючи статистику за тривалий час, математичними методами можна визначити точність показань кожного з серверів, швидкість ходу годинника на кожному з них, і т. п. величини, використовуючи які, можна домогтися математично доказової точності синхронізації.

### Режими роботи NTP сервера

NTP сервер може працювати в трьох режимах:

- одноадресна розсилка;
- розсилка по будь-яких адресах;
- багатоадресна розсилка.

У перших двох режимах користувач передає NTP запит серверу. Сервер відповідає повідомленням, яке користувач використовує для синхронізації часу NTP. У режимі під LGPL повідомлення NTP розсилаються періодично в певні інтервали часу.

### Протокол SNMP

Крім NTP, існує спрощена версія цього протоколу - SNMP (Simple Network Time Protocol). Він реалізований для синхронізації часу кінцевим клієнтом, оскільки всі переваги протоколу NTP проявляються саме в мережі серверів, а для отримання показань кінцевим користувачем NTP складний. Тому для синхронізації часу кінцевими комп'ютерами і серверами був запропонований протокол SNTP (SNTPv3: 1992 р RFC1361 і 1995 року, RFC1769; SNTPv4 включений як підпротокол в NTPv4).

Насправді SNTP – це не новий протокол, а спосіб використання NTP-пакетів і NTP-серверів в додатках, де не потрібно високоточного часу. У цьому випадку клієнт використовує тільки частину інформації UDP-пакета NTP-сервера. SNTP-клієнт може працювати з будь-якими версіями NTP-серверів, і крім них – з особливими SNTP-серверами, які у відгуках заповнюють тільки необхідні дані UDP-пакета.

Таким чином, „полегшений” SNTP утворює не мережу синхронізованих серверів, а пари „клієнт-сервер”. Будь-який NTP-сервер є одночасно SNTP-сервером. Клієнт, що не передає отриманий час далі, може працювати як NTP-або SNTP-клієнт, в залежності від умов. Для SNTP, як і для NTP, зарезервованій 123-й UDP-порт.

### Технологія Data Socket Connection як універсальний засіб мережевого обміну в середовищі LabVIEW

Інтернет стає все більш поширеним явищем в нашому житті, причому не тільки з розважального або пізнавального боку, але і при вирішенні наукових і технічних проблем. Розробники інформаційних систем розглядають Інтернет, як вигідний світовий канал передачі даних. Той, хто використовує програмні продукти LabVIEW або LabWindows / CVI фірми „National Instruments” (США), можуть легко транслювати дані в мережу. Користувач створює додаток, який є частиною лицевої панелі програми у вигляді Інтернет-документа. Передача зображень через Інтернет досить проста, хоча найчастіше необхідно більш інтерактивне рішення, при якому повинна бути можливість управляти ходом процесу через Інтернет. Також користувачі часто хочуть збільшити ефективність, що мається на увазі передачу безпосередньо даних, а не громіздких зображень.

„National Instruments” пропонує DataSocket – нову технологію Інтернет-програмування, яка спрощує обмін даними між комп’ютерами і програмами. Використовуючи DataSocket, програмісти можуть легко передавати необроблені дані через Інтернет / Інтранет, відповідати на запити багатьох користувачів, не вдаючись до системного TSP програмування.

Реалізація обміну даними між програмними компонентами і „залізом” завжди була непростим завданням. Підключення апаратури вимагає розгляду рівнів сигналу, точності і т. п., при цьому програмне забезпечення має свої складності. Деякі додатки просто зберігають дані в файл, інші використовують

стандартну TCP / IP систему зв'язку через локальну мережу, технологію OPC, DDE або ActiveX. Кожен механізм введення / виведення має свої особливості і вимагає певної процедури при реалізації. Застосовувані в цих випадках програмні технології можуть зажадати досить високої кваліфікації і різнобічних навичок розробників, особливо якщо необхідно публікувати дані, зібрані на локальному ресурсі в мережі.

Технологія DataSocket є окремим і простим у використанні інтерфейсом, який забезпечує доступ до кількох механізмів введення / виведення без залучення розробника в дрібні деталі.

### Передавання даних

Як відомо, засоби LabVIEW значно спрощують розробку комп'ютерних систем збору даних і управління. Застосування інструментів DataSocket, які входять в будь-яку з версій середовища розробки LabVIEW, допоможе вирішити завдання обміну даними в мережі. Припустимо, що Вам потрібно передати результати вимірювання декількох комп'ютерів. Застосування в цьому випадку стандартного TCP / IP протоколу є непростим завданням. Слід виконати ряд операцій по створенню та налагодженню сервера і клієнтів. При цьому оновлення даних також є громіздкою процедурою. Якщо ж застосувати в даному випадку технологію DataSocket, процес спрощується до двох операцій:

- створення з'єднання DataSocket, використовуючи ім'я, яким Ви позначаєте дані;
- відправлення по створеному з'єднанню даних при отриманні нових результатів.

Все TCP / IP програмування в цьому випадку робиться за Вас. Ще однією перевагою технології DataSocket є підтримка різних форматів даних. Тобто Вам не потрібно залучати програми, які переводять дані в потік байтів. Дані можуть бути представлені практично будь-яким типом, включаючи числові, логічні, рядки і т. д. і при трансляції вони автоматично переводяться в потік байтів.

Крім того, встановлюючи формат, Ви також можете встановити додаткові властивості даних. Таким чином, технологія DataSocket значно спрощує збір і передачу даних.

### Ім'я ресурсу

Розглянемо, як DataSocket взаємодіє з різними технологіями введення / виведення. Все починається з того, що Ви привласнюєте ім'я пристрою або ресурсу, від якого або якому Ви передаєте дані. Зазвичай бібліотека компонентів введення / виведення має функцію „Відкрити”. У неї Ви вносите ім'я або порядковий номер ресурсу, з яким маєте намір встановити обмін даними. Іменем ресурсу DataSocket є URL (Uniform Resource Locator) – унікальний показник знаходження ресурсу, який багато в чому схожий на адресу сторінки в Інтернеті. У ньому міститься інформація не тільки про те, де знаходяться дані, але і як їх відкрити. Це перша частина URL. Вона називається методом доступу або протоколом. Стандартними методами доступу для DataSocket є HTTP (стандартні ресурси Інтернету, протоколи передачі гіпертексту), FTP (протокол передачі файлів), FILE (для відкриття файлу на локальному комп'ютері) і OPC (технологія обміну даними в системах автоматизації). Крім цього, DataSocket може використовувати власний протокол DSTP (протокол передачі даних через сервера DataSocket). Наприклад, ресурс DataSocket має наступний URL: `dstp://mytestmachine/wavel`. Це означає, що буде створено з'єднання з комп'ютером mytestmachine і відкритий ресурс wavel для обміну даними, використовуючи сервер DataSocket.

### Що ж таке DataSocket Connection?

Отже, DataSocket забезпечує простий в експлуатації високоефективний інтерфейс, розроблений для обміну потоками даних в додатках при вимірах і автоматизації на одному комп'ютері, в локальній мережі або через Інтернет.

DataSocket складається з двох частин: інтерфейсу програмування

DataSocket і сервера DataSocket. Інтерфейс програмування (DataSocket API) являє собою єдиний компонент для обміну різними типами даних із застосуванням різних мов програмування. DataSocket сервер спрощує обмін даними через Інтернет, організовуючи TCP / IP програмування за Вас.

### Єдиний інтерфейс програмування DataSocket

DataSocket API на основі URL може відкрити дані вимірювань і контролю, які знаходяться де завгодно – на комп'ютері користувача, в локальній мережі, Інтернеті. Інтерфейс програмування DataSocket універсальний в плані протоколу, мови програмування і операційної системи. Він представлений як компонент ActiveX, бібліотека компонентів LabWindows / CVI для мови C, набір віртуальних інструментів для LabVIEW, так що Ви можете використовувати його практично в будь-якому середовищі програмування. Інтерфейс автоматично переводить дані користувача в потік байтів для відсилення через мережу.

Додаток DataSocket, який отримує інформацію, автоматично переводить дані до їх первісного вигляду. Цей механізм значно спрощує процес передачі даних. Сам же інтерфейс програмування DataSocket вельми простий.

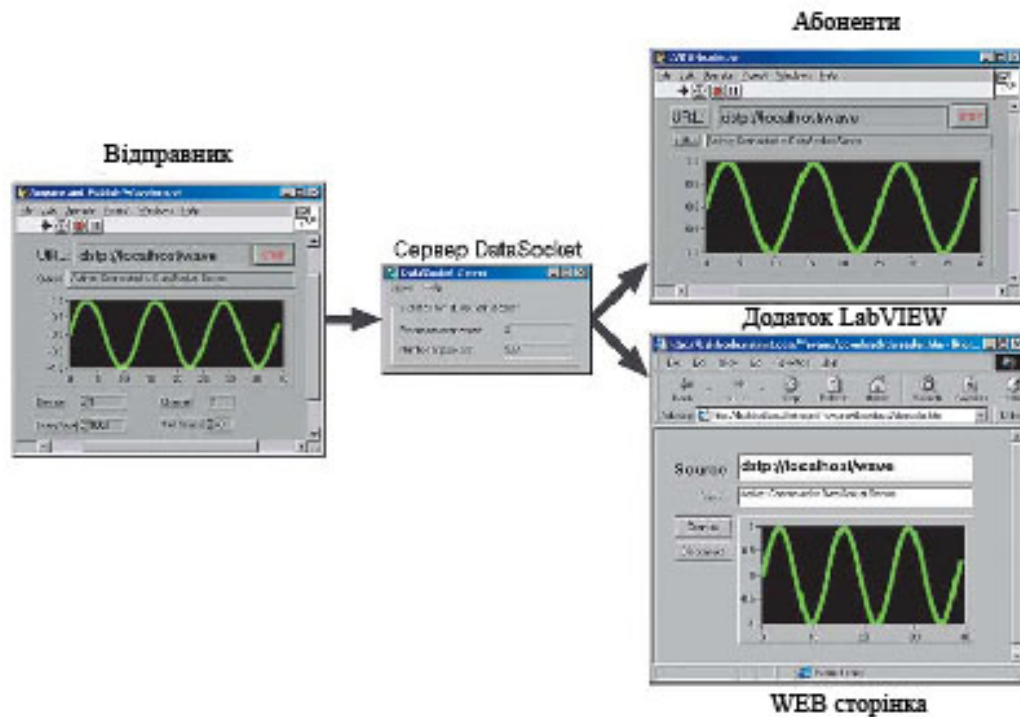
Він, як і більшість пакетів введення / виведення, містить чотири основних процедури: „Відкриття”, „Читання”, „Запис” і „Закриття”.

### Трансляція поточних даних за допомогою сервера DataSocket

DataSocket сервер – це компактний, окремий компонент, за допомогою якого програми, що використовують DataSocket API, можуть передавати поточні дані вимірювань через Інтернет одночасно кільком клієнтам.

Передача даних за допомогою DataSocket вимагає наявності трьох учасників – Відправника, DataSocket сервера і Абонента(ів). Додаток Відправника даних використовує DataSocket API, щоб надати дані серверу. Додаток Абонента використовує DataSocket API, щоб зчитати дані сервера. Як

Відправник, так і Абонент є клієнтами сервера DataSocket. Всі три учасники можуть бути представлені одним комп'ютером, але частіше за все вони представлені різними комп'ютерами. Можливість надання окремого комп'ютера в якості сервера підвищує ефективність і забезпечує безпеку передачі даних, відокремлюючи з'єднання від процесу збору даних.



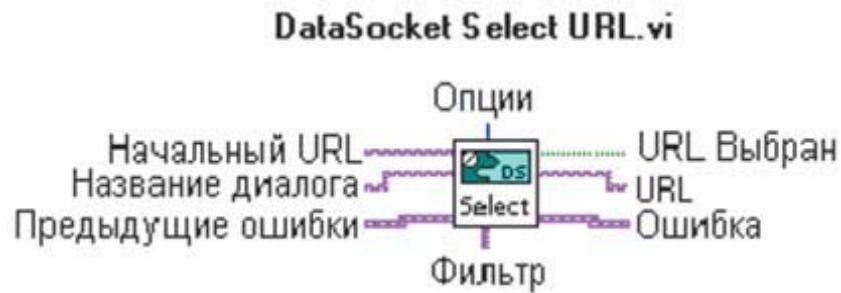
DataSocket сервер може організувати обмеження доступу при передачі конфіденційних даних через Інтернет. При цьому всі нерозпізані користувачі не отримають доступу до даних.

### Набір компонентів DataSocket в середовищі LabVIEW

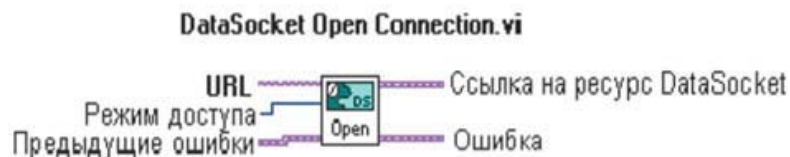
У LabVIEW технологія DataSocket представлена пакетом, який включає набір з більш ніж 30-ти функцій. Найбільш важливі з них наступні.

Виклик діалогу вибору ресурсу. Даний інструмент надає користувачеві можливість вказати джерело даних для DataSocket. Ресурси, де в першу чергу слід зробити пошук, можна вказати в секції „Тайм Початковий URL”, хоча даний параметр можна і не використовувати. Якщо в результаті діалогу був вказаний коректний ресурс, то на виході „URL” обрано буде значення „TRUE”,

а на виході „URL” – його адресу.



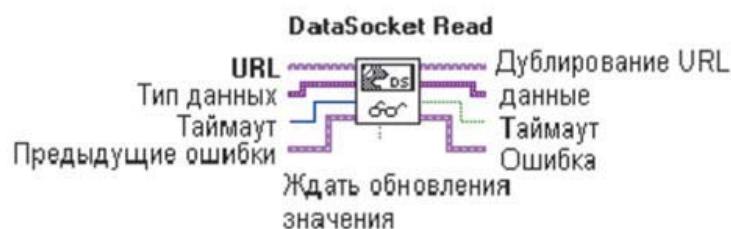
Відкриття ресурсу. Створення з'єднання з ресурсом. Режим доступу вказує, для якої операції – запису або читання, був відкритий ресурс. Якщо в режимі вказати Auto Update, то дані будуть автоматично оновлюватися, якщо ні – то дані оновлюються тільки один раз за з'єднання.



Запис даних. Передача даних по з'єднанню DataSocket, визначеному в URL.



Читання даних. Зчитування даних по заданому з'єднанню. Якщо значення параметра „Чекати поновлення значення” встановлено як TRUE (за замовчуванням), то функція буде чекати, поки значення не оновляться. Якщо дані оновилися після останньої операції зчитування, то вони будуть видані без затримки, якщо ні – то функція буде чекати час в мілісекундах, заданих параметром „Таймаут”. Якщо оновлення не сталося за вказаний період, то на виході „Таймаут” буде значення TRUE.



Закриття ресурсу. Закриття з'єднання з ресурсом DataSocket.



Дані записуються і зчитуються в форматі „Варіант”, тобто можуть мати будь-який формат даних. При зчитуванні слід вказати тип даних, який повинен збігатися з типом записаних даних. В пакеті також є процедури запису і зчитування даних конкретних типів (числових, логічних, строкових і т. д.). Підпрограми для читання / запису даних різних типів, а також для процедур контролю і управління потоком даних з'єднання DataSocket, будуть згруповані в бібліотеці National Instruments \ LabVIEW \ vi.lib \ platform \ dataskt.llb , на Вашому диску після інсталяції LabVIEW.



Припустимо, потрібно записати дані на одному комп'ютері і потім зчитати їх на іншому. Для цього слід створити два додатки: додаток запису і додаток читання. Вони реалізуються дуже просто. При цьому додатки запису і читання можуть перебувати на одному комп'ютері, на різних комп'ютерах, з'єднаних локальною мережею, або ж на комп'ютерах, з'єднаних через Інтернет.



### 3.5. Керування хаотичними коливаннями, що генеруються системою Реслера, з допомогою програмного середовища LabView

Для керування хаотичною системою Реслера ми зафіксуємо системні параметри  $a = 0,1$  і  $b = 0,1$ , а  $c$  буде змінюватись. В залежності від зміни, можна виділити окремі різноперіодні (керовані) атрактори. Таблиця 3.1 показує значення змінних, при яких генеруються різноперіодні (контрольовані) хаотичні атрактори системи Реслера.

Таблиця 3.1

Значення змінних	Число періодів хаотичного атрактора
$a = 0,1, b = 0,1, c = 4$	1
$a = 0,1, b = 0,1, c = 6$	2
$a = 0,1, b = 0,1, c = 8,5$	4
$a = 0,1, b = 0,1, c = 8,7$	8
$a = 0,1, b = 0,1, c = 9$	хаотичний
$a = 0,1, b = 0,1, c = 12$	3
$a = 0,1, b = 0,1, c = 12,6$	6
$a = 0,1, b = 0,1, c = 13$	хаотичний

Рис. 3.13 – 3.20 демонструють результати моделювання керованих хаотичних атракторів.

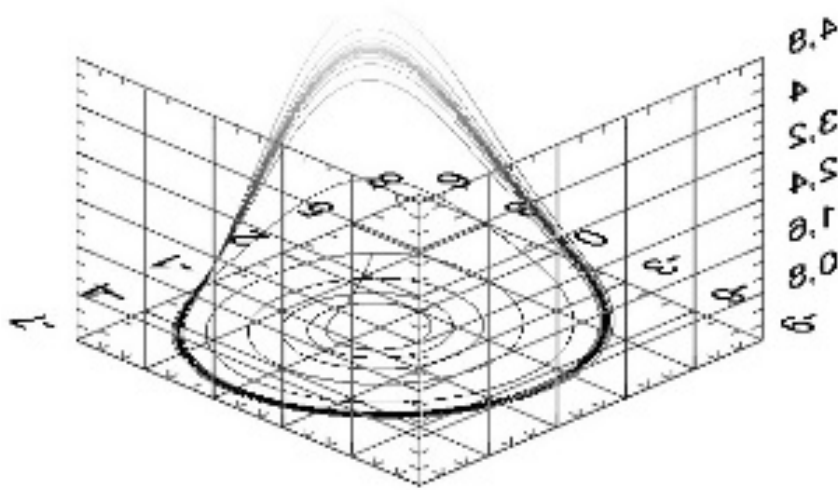


Рис. 3.13. Одно-періодний атрактор

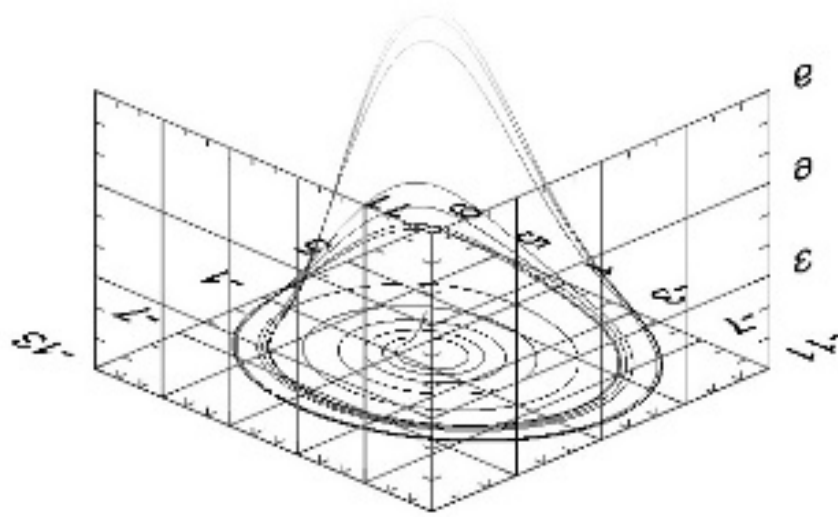


Рис. 3.14. Дво-періодний атрактор

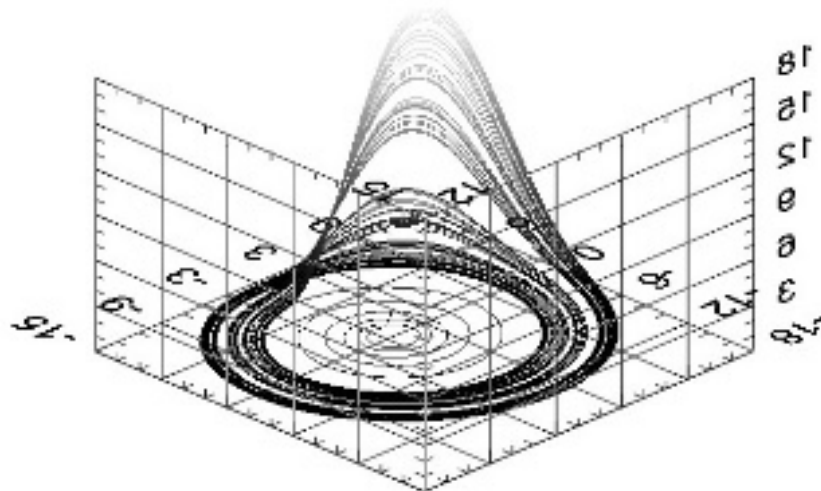


Рис. 3.15. Чотири-періодний атрактор

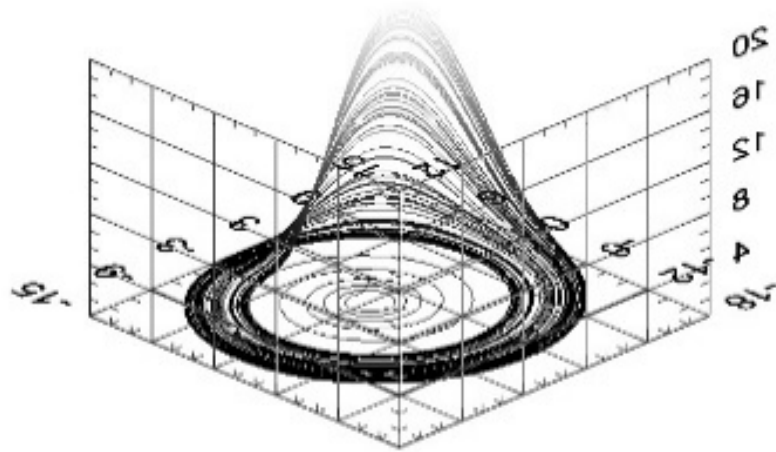


Рис. 3.16. Восьми-періодний аттрактор

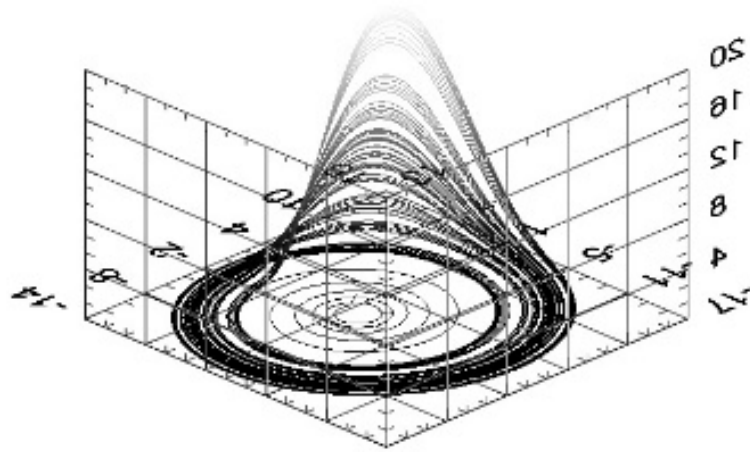


Рис. 3.17. Хаотичний аттрактор

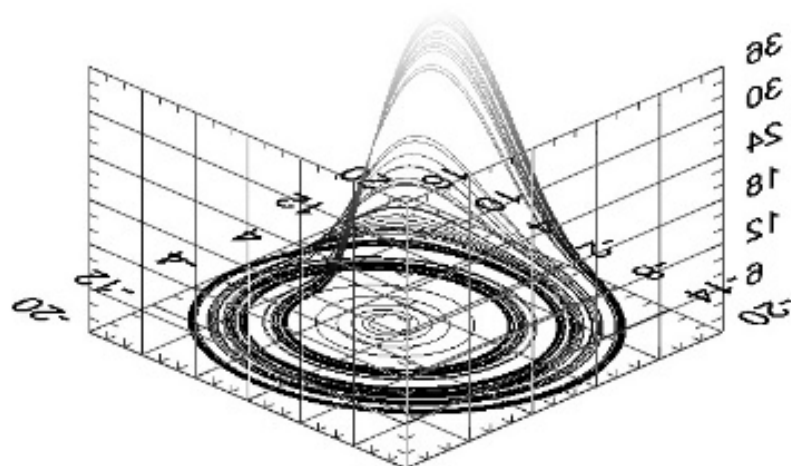


Рис. 3.18. Три-періодний аттрактор

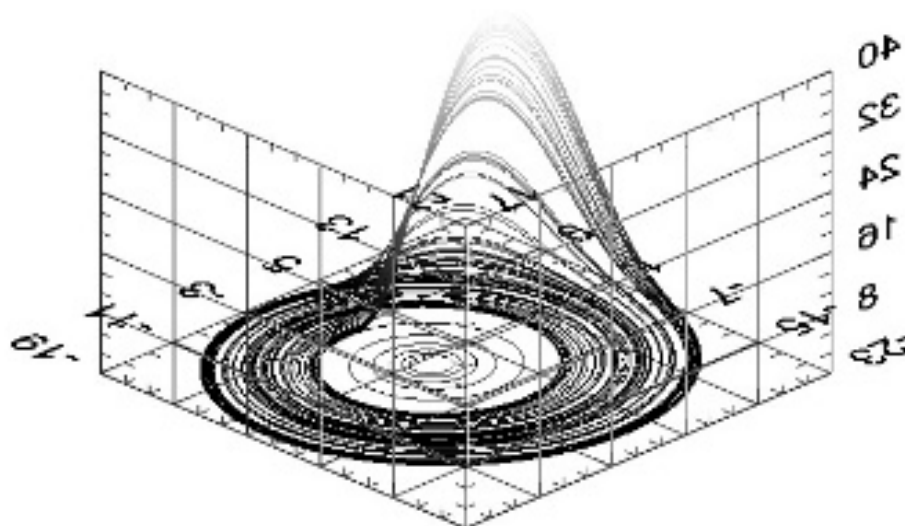


Рис. 3.19. Шести-періодний атрактор

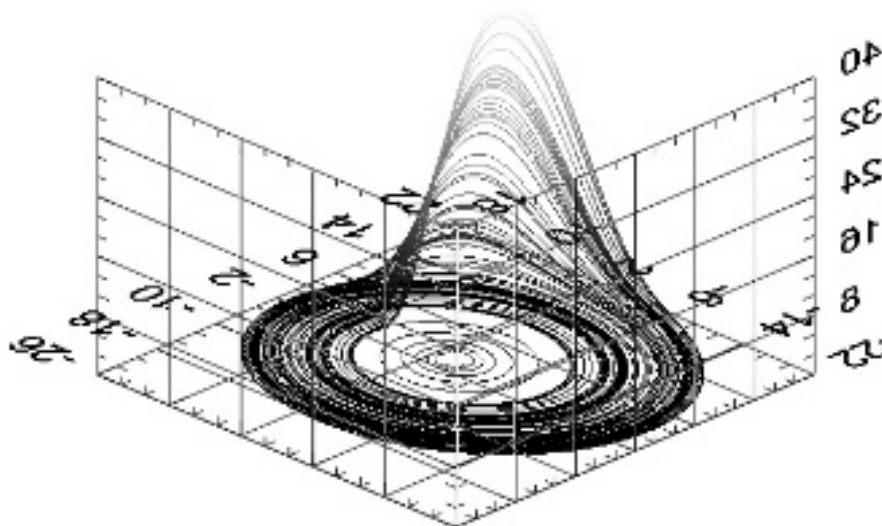


Рис. 3.20. Хаотичний атрактор

### Висновки до третього розділу

1. Створено пакет підпрограм в середовищі LabView, що дає можливість досліджувати часові діаграми, фазові траєкторії, атрактори для хаотичної системи Реслера.

2. Проведено схемотехнічне моделювання хаотичної системи Реслера з допомогою середовища MultiSim. Результати моделювання цілком відповідають аналітичним математичним моделям.

3. Створено алгоритм для моделювання системи передавання та приймання інформації з використанням хаотичної системи Реслера.

4. Вперше представлено значення коефіцієнтів управління для хаотичної системи Реслера, які можуть бути використані як ключі для маскування та / або розшифрування корисного інформаційного носія.

## РОЗДІЛ 4

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УПРАВЛІННЯ ХАОТИЧНИМИ КОЛИВАННЯМИ

### 4.1. Комплексне моделювання нелінійних елементів

#### Аналітична модель хаотичного генератора Чуа

Розглянемо більш детально роботу схеми Чуа, яка є однією із найпростіших систем з хаотичною поведінкою і представляє собою автоколивальну систему с 1,5 степенями свободи [149]. Схема складається з коливного контуру з втратами  $rLC2$ , інерційної ланки  $RC1$  і активного нелінійного елемента, зображеного на схемі в вигляді нелінійної провідності (рис. 4.1).

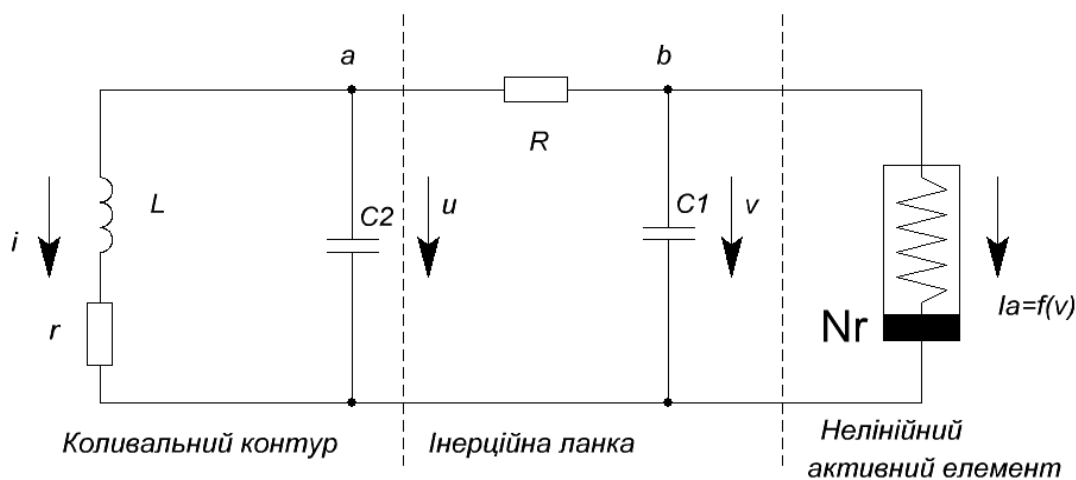


Рис. 4.1. Генератор Чуа

Генеруючий резонансний коливний контур  $rLC2$  зв'язаний з активним нелінійним елементом через інерційну ланку  $RC1$ . Поведінка системи визначається впливом нелінійного елемента, що відіграє роль джерела живлення системи. Нагадаємо, що присутність нелінійності є необхідною, але недостатньою умовою для виникнення хаосу в системі.

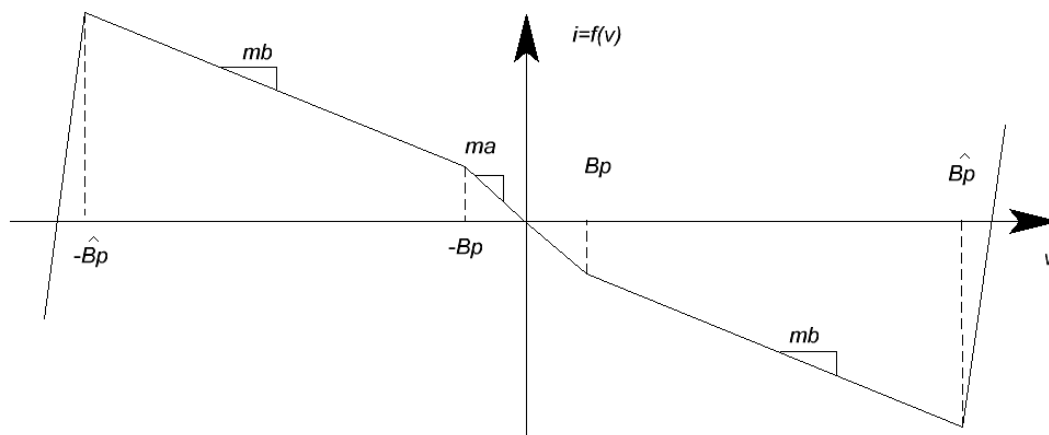


Рисунок 4.2. Вольт-амперна характеристика нелінійного елемента

Обмежений характер хаотичних траєкторій обумовлений розсіюванням енергії в пасивних елементах  $R$  і  $r$ , що стримує її зростання в коливному контурі. Проте баланс енергії виявляється досить нестійким, неперервно змінюється в часі, і ніколи не повторюється як періодичне явище.

Візьмемо в якості складових компонентів вектора стану системи струм  $i$  в контурі, напругу  $u$  на ємності  $C2$  контуру  $rLC2$  і напругу  $v$  на нелінійному елементі. Згідно першого і другого законів Кірхгофа, запишемо систему трьох диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} L \frac{di}{dt} = -ri - u \\ C2 \frac{du}{dt} = i + \frac{v-u}{R} \\ C1 \frac{dv}{dt} = \frac{u-v}{R} - f(v) \end{cases} \quad (4.1)$$

де  $f(v)$  – кусково-лінійна характеристика нелінійного елемента.

$$f(v) = m_b v + 0.5(m_b - m_a)[|v + Bp| - |v - Bp|] \quad (4.2)$$

де  $m_a, m_b$  – розмірні крутизни лінійних ділянок,  $+Bp, -Bp$  – точки перегину нелінійної характеристики (рис. 4.2).

Перше рівняння представляє суму падіння напруги при круговому обході резонансного коливного контуру, а друге і третє дають відповідно суму струмів для вузлових точок  $a$  і  $b$  схеми, представленої на рис. 4.1.

Проведемо нормування змінних  $i, u, v$  в системі відносно напруги  $V_p$ :

$$x = v / V_p, y = u / V_p, z = Ri / V_p \quad (4.3)$$

і перейдемо до безрозмірного часу  $\underline{t}' = t / Rc$ . В безрозмірних величинах система рівнянь (4.1), що описує схему Чуа, приймає наступний вигляд:

$$\begin{cases} dx / d\underline{t} = \alpha[y - x - f(x)]; \\ dy / d\underline{t} = x - y + z; \\ dz / d\underline{t} = -\beta y + (T / T_k)z. \end{cases} \quad (4.4)$$

де  $\alpha = C_2 / C_1$ ,  $\beta = T / \tau$ ,  $\tau = L / R$ ,  $T = RC$  (міра інерційності  $RC$  кола),  $T_k = L / r$ , де  $T = RC$ .

З врахуванням нормування напруги  $v = x \cdot V_p$  можемо замість (4.4) записати безрозмірну характеристику активного елемента в вигляді:

$$f(x) = bx + 0.5(a - b)[|x + 1| - |x - 1|], \quad (4.5)$$

де коефіцієнти  $a = Rm_a$ ,  $b = Rm_b$  – також безрозмірні величини.

Щоб спростити аналіз схеми знехтуємо доданком  $(T / T_k)z$  в третьому рівнянні (4.4). Це значить, що ми нехтуємо втратами в  $rLC2$  контурі, приймаючи що  $r = 0$ . Тоді при вибраних коефіцієнтах  $a, b$  характеристики (4.5) реалізація тих чи інших процесів в схемі Чуа визначається значеннями її двох основних параметрів. Роль першого параметра відіграє відношення ємностей  $\alpha = C / C_1$ , а другого – відношення постійних часу  $\beta = T / \tau$ . Постійна  $T = RC$  є мірою інерційності  $RC$  кола, а постійна часу  $\tau = L / R$  характеризує інерційність ланки, що складається з елементів  $L$  і  $R$ .

### Комп'ютерне моделювання схеми

Моделювання схеми проводилось, вважаючи, що вольт-амперні характеристики (ВАХ) для конденсаторів, резисторів та індуктивності є



лінійними, а ВАХ нелінійного елемента є кусково-лінійною. Головним завданням при дослідженні є коректне моделювання нелінійного елемента. В нашому випадку нелінійність реалізована в двох варіантах – на операційному підсилювачі в сукупності з діодами, та на двох операційних підсилювачах.

### Моделювання схеми Чуа з використанням в якості нелінійного елемента операційного підсилювача в сукупності з діодами

Характеристична часова константа, що використовувалася при моделюванні становила 50 мс.

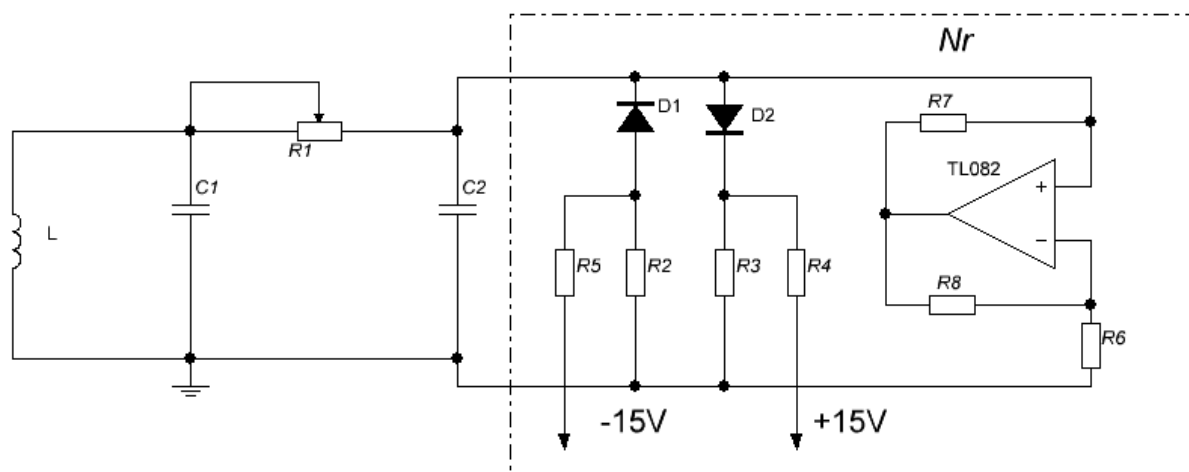


Рис. 4.3. Досліджувана схема генератора Чуа (класичний варіант [2])

Для моделювання схеми генератора Чуа використовувалися компоненти з наступними номіналами:  $C1=100$  нФ,  $C2=10$  нФ,  $L=22$  мГн,  $R1=2$  кОм,  $R2=R3=3,3$  кОм,  $R4=R5=4,62$  кОм,  $R7=R8=300$  Ом,  $R6=1,25$  кОм,  $DA=TL082$ ,  $VD1=VD2=1N914$ .

Результати комп'ютерного моделювання схеми генератора Чуа з використанням нелінійного елемента на операційному підсилювачі та діодах (рис. 4.3) в програмному середовищі Micro-Cap приведені на рис. 4.4 та рис. 4.5.

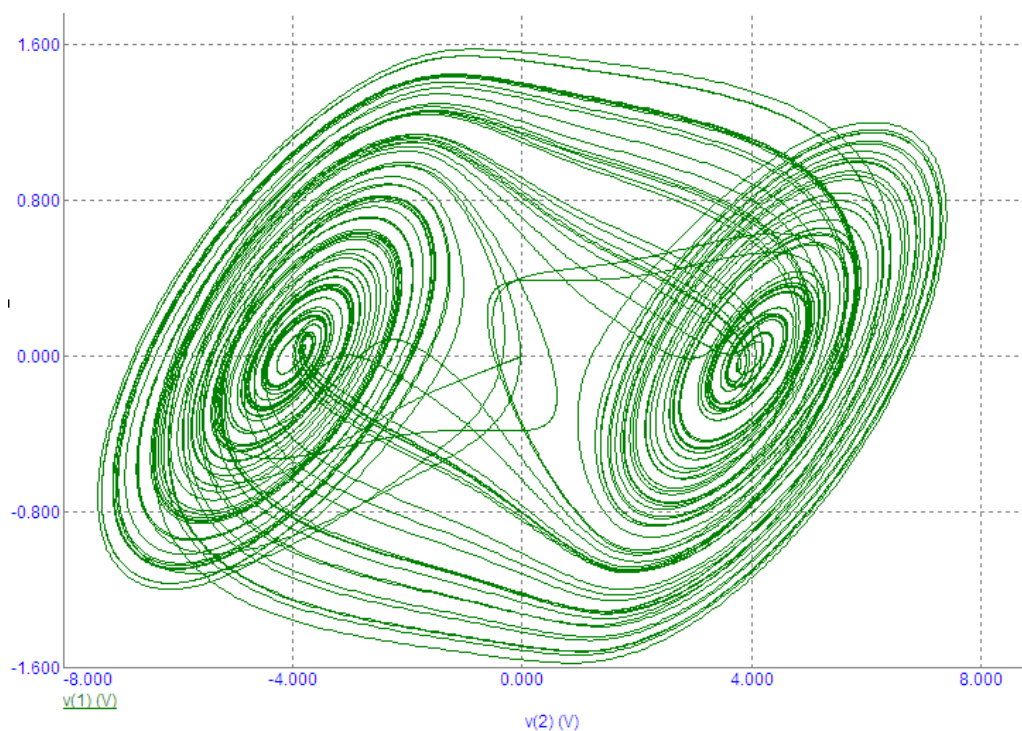


Рис. 4.4. Хаотичний двох-витковий аттрактор схеми генератора Чуа  
(осцилограма фазової траєкторії на площині  $V_{C1}, V_{C2}$ )

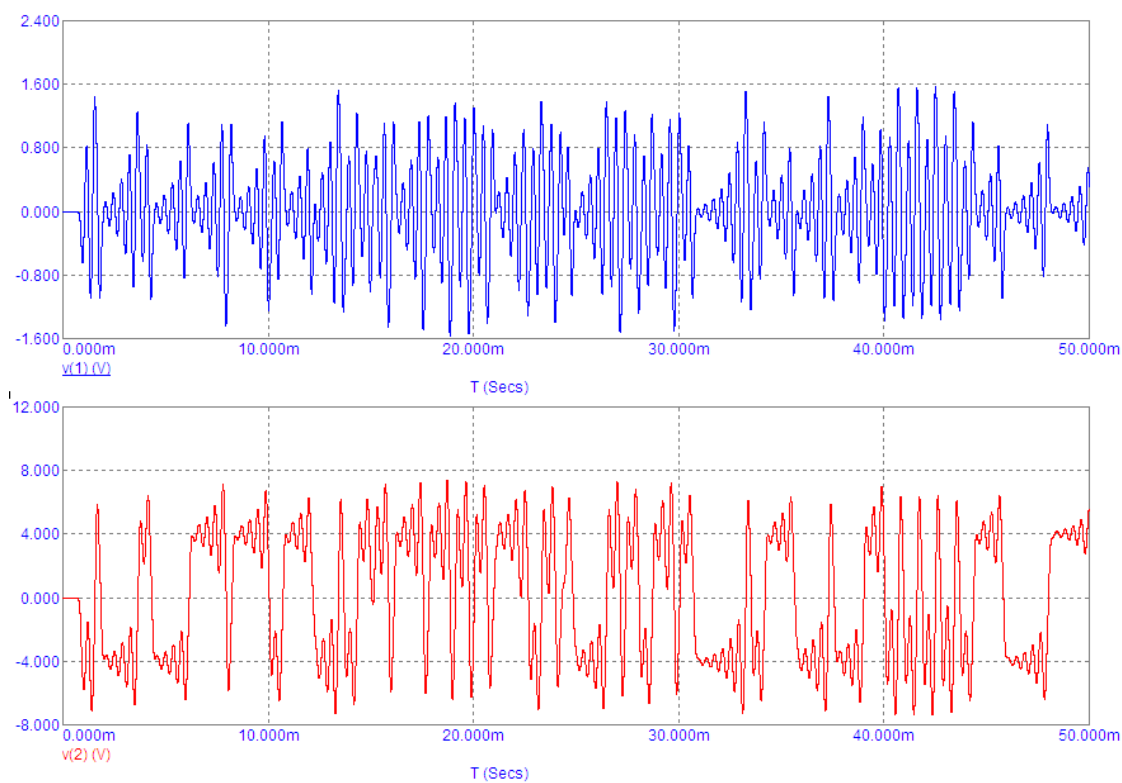


Рис. 4.5. Осцилограма часових залежностей сигналі  $V_{C1}, V_{C2}$  генератора Чуа

Гранична частота генерованих коливань залежить від типу діодів  $VD1$ ,  $VD2$ , що формують кусково-лінійну характеристику нелінійного елемента.

### Моделювання схеми Чуа з використанням нелінійного елемента на операційних підсилювачах

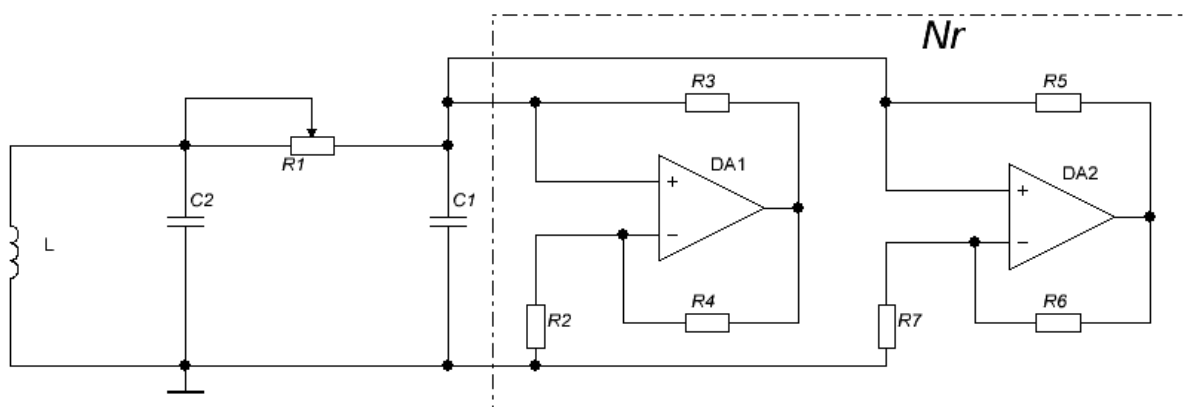


Рис. 4.6. Схема генератора Чуа (нелінійний елемент реалізований на операційних підсилювачах [2])

Для моделювання схеми генератора Чуа використовувалися компоненти з наступними номіналами:  $C1=10$  нФ,  $C2=100$  нФ,  $L=22$  мГн,  $R1=2$  кОм,  $R4=R3=220$  Ом,  $R5=R6=22$  кОм,  $R2=2,2$  кОм,  $R7=3,3$  кОм,  $DA1=DA2=TL082$ .

Результати моделювання приведені на рис. 4.7 та на рис. 4.8.

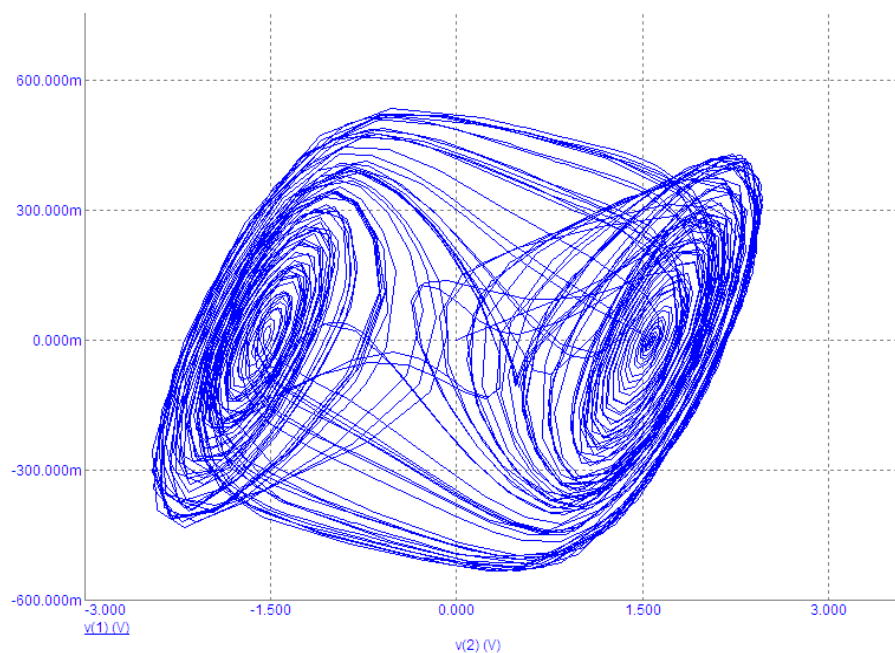


Рис. 4.7. Хаотичний двох-витковий атрактор схеми генератора Чуа з використанням операційних підсилювачів (осцилограма фазової траєкторії на площині  $V_{C1}, V_{C2}$ )

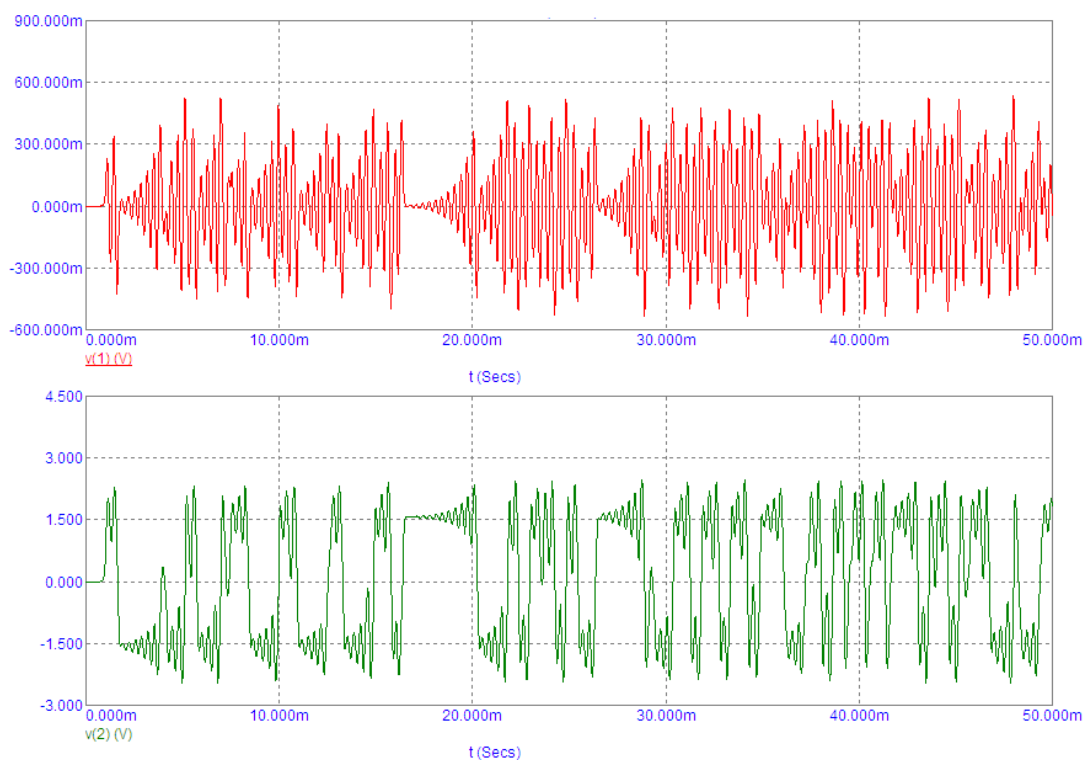


Рис. 4.8. Часова залежність сигналів  $V_{C1}, V_{C2}$  генератора Чуа

## 4.2. Проектування хаотичного генератора Чуа з кубічною нелінійністю

Коливальний контур формує частоту хаотичного сигналу. Нелінійний елемент служить для формування нелінійності. Блок живлення забезпечує роботу нелінійного елемента. За допомогою керуючого елемента можна виходити як на хаотичний сигнал, так і на керований, тобто виділення окремих орбіт з хаотичного набору. Пристрій відображення служить для демонстрації хаотичних та керованих орбіт.

### Схема електрична принципова

Спроектована принципова електрична схема пристрою на рис. 4.9.

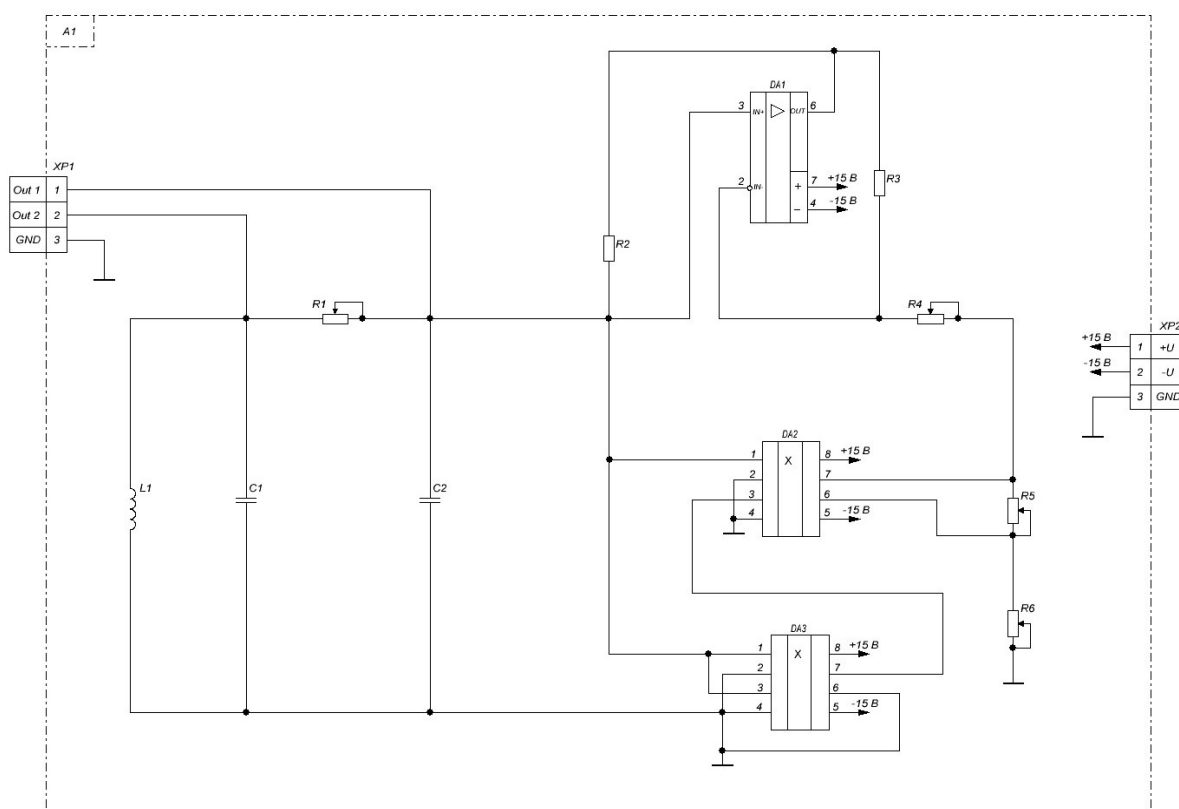


Рис. 4.9. Схема електрична принципова

Оскільки бажана  $v-i$  характеристика нелінійного резистора  $N_R$  в схемі Чуа є непарно-симетричною функцією, тут ми використовуємо кубічний многочлен:

$$i = a_0 + av_1 + bv_1^2 + cv_1^3, \quad (4.6)$$

де  $i = i_1 + i_2$ ,  $a_0 = -\frac{2v_0}{R}$ ,  $a = \frac{2}{R}$ ,  $b = -\frac{1}{R} \frac{1}{10V}$ ,  $c = -\frac{1}{R} \frac{1}{10V}$  з коефіцієнтами  $a_0 = 0$ ,  $a < 0$ ,

$b = 0$ ,  $c > 0$  для нелінійності схеми Чуа, тобто

$$i_R = g(v_R) = av_R + cv_R^3, \quad (4.7)$$

де  $a < 0$  і  $c > 0$ .

Двухполюсний нелінійний резистор  $N_R$  складається з одного операційного підсилювача, двох перемножувачів і п'яти резисторів. В схемі ми застосували два аналогових перемножувачі AD633JN і як операційний підсилювач AD711kN, що були виготовлені корпорацією Analog Devices.

З'єднання операційного підсилювача AD711kN і резисторів  $R_1$ ,  $R_2$  і  $R_3$  утворюють еквівалентний негативний опір  $R_E$ , отже ми маємо  $R_E = -R_3$ , коли  $R_1 = R_2$  та операційний підсилювач працює в цій лінійній області, щоб отримати бажані коефіцієнти  $a < 0$  і  $c > 0$  в (4.7). І навпаки, у випадку, коли  $R_E$  є позитивним опором, ми отримаємо  $a > 0$  і  $c < 0$  в (4.7).

Рушійною точкою  $v-i$  характеристики  $N_R$  є представлення:

$$i_R = g(v_R) = -\frac{1}{R_3} v_R + \frac{R_4 + R_5}{R_3 R_4} \frac{1}{10V} \frac{1}{10V} v_R^3 = av_R + cv_R^3, \quad (4.8)$$

де  $a = -\frac{1}{R_3}$ ,  $c = \frac{R_4 + R_5}{R_3 R_4} \frac{1}{10V} \frac{1}{10V}$ .

Коефіцієнт  $10V$  є невід'ємною напругою масштабування в перемножувачі. Мережа з'єднань з резисторами  $R_4$  і  $R_5$ , збільшує коефіцієнт підсилення системи по співвідношенню  $\frac{R_4 + R_5}{R_4}$ , щоб отримати коефіцієнт змінної масштабування  $\frac{R_4 + R_5}{R_4}$ . Це відношення обмежується 100 в практичних застосуваннях. Як правило, вибирають  $R_4 \geq 1k\Omega$ , і  $R_5 \leq 100k\Omega$  [150-158].

На рис. 4.10 представлено збірне креслення плати друкованої спроектованого пристрою.

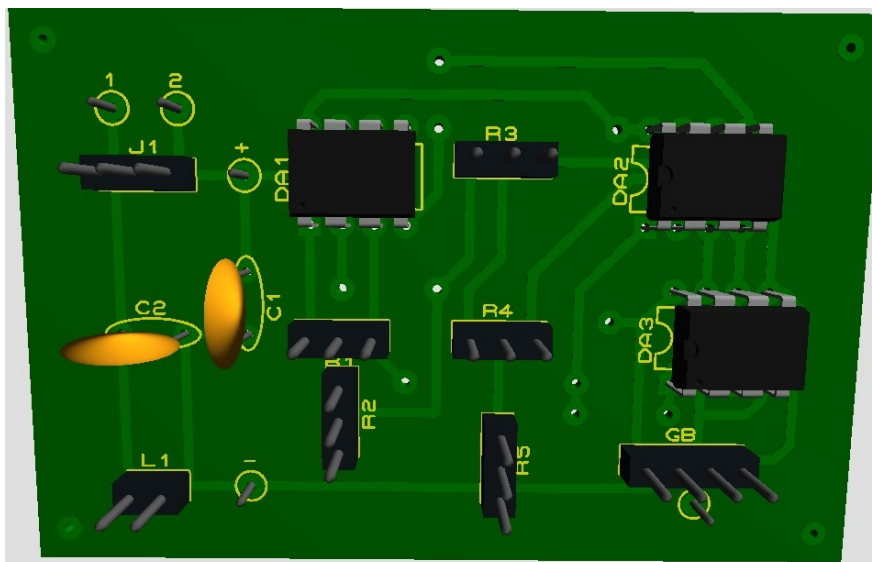


Рис. 4.10. Збірне креслення плати друкованої спроектованого пристрою

### 4.3. Моделювання та практична реалізація хаотичного генератора Ван-дер-Поля-Дюфінга

#### Схема електрична принципова

Спроекована принципова електрична схема пристрою на рис. 4.11.

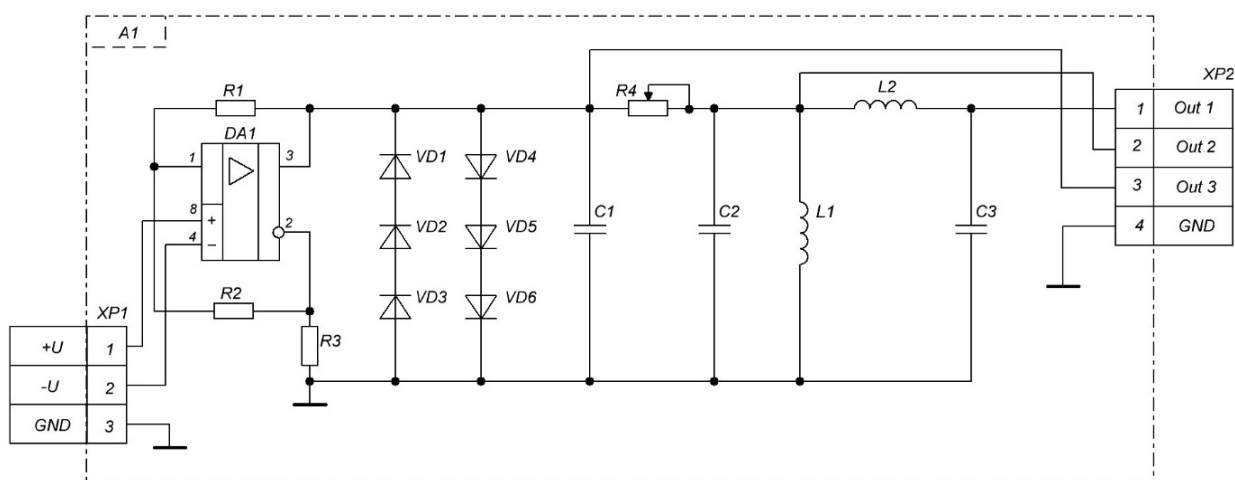


Рис. 4.11. Схема електрична принципова

Схема автономного генератора Ван-дер-Поля-Дюфінга вищого порядку, представлена на рис. 4.11, є однією з найпростіших автономних електронних генераторів гіперхаотичного сигналу п'ятого порядку. Схема містить шість лінійних елементів (три конденсатори,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ , дві котушки індуктивності,  $L_1$ ,

$L_2$  і одного резистора,  $R_4$ ) і один активний елемент (кубічний нелінійний резистор), які можуть бути побудовані з використанням межі зсуву ОП з шістьма діодами. Хаотична поведінка схема була чисельно досліджена, підтверджена математично і експериментально реалізована. Якщо зменшувати опір  $R_4$  при збереженні інших параметрів ланцюга при постійних значеннях, то можна виявити, що схема допускає маршрут подвоєння періоду і перехід до хаосу. Для невеликого діапазону опору  $R$  вона також демонструє індуковану криву гіпер-хаосу. Важливою умовою для гіпер-хаосу є (I) мінімальна розмірність фазового простору, яка повинна бути не менше п'яти, що вимагає мінімальної кількості звичайних диференціальних рівнянь першого порядку теж не менше п'яти, і (II), кількість членів у рівняннях, які призводять до нестабільності, повинна бути принаймні два, один з яких повинен бути нелінійною функцією. Відповідно, для апаратної реалізації:

(I) число елементів зі збереженням енергії (індуктивності або конденсатори) в ланцюзі повинно бути не менше п'яти;

(II) кількість активних елементів, що призводить до нестабільності повинна бути один або два, один з яких обов'язково повинен бути нелінійним пристроєм.

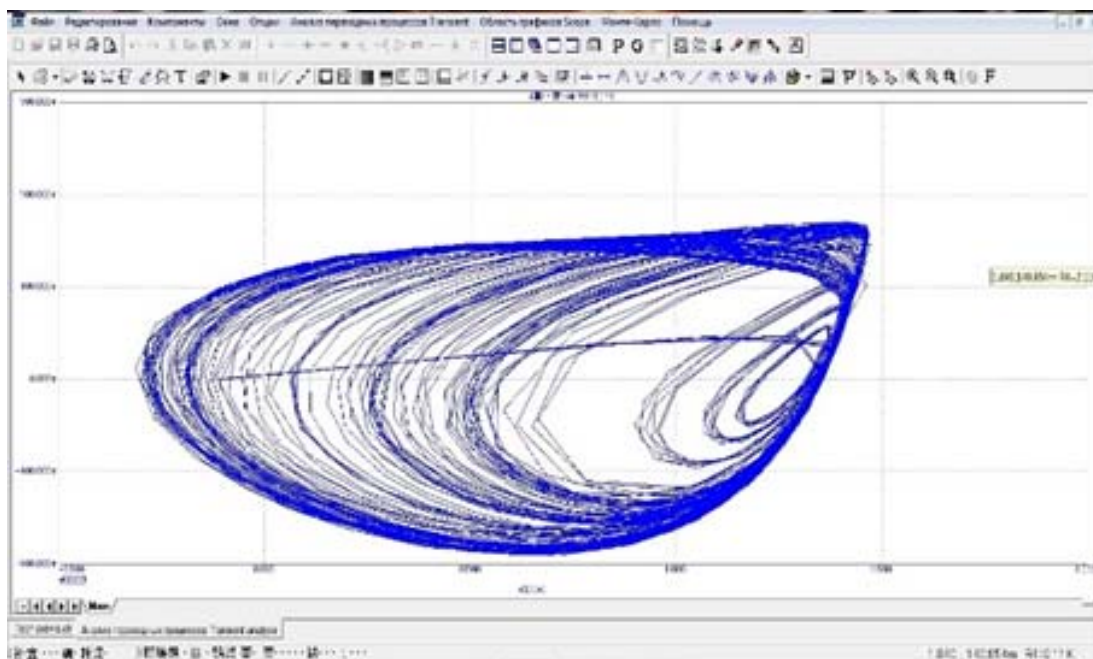
Застосувавши закони Кірхгофа, отримаємо систему з п'яти пов'язаних диференціальних рівнянь першого порядку:

$$\begin{aligned}
 C_1 \frac{dv_1}{dt} &= -\left[ \frac{1}{R}(V_1 - V_2) + f(V_1) \right]; \\
 C_2 \frac{dv_2}{dt} &= \frac{1}{R}(V_1 - V_2) - i_{L_1} - i_{L_2}; \\
 C_3 \frac{dv_3}{dt} &= i_{L_1}; \\
 L_1 \frac{di_{L_1}}{dt} &= V_2 - V_3; \\
 L_2 \frac{di_{L_2}}{dt} &= V_2.
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

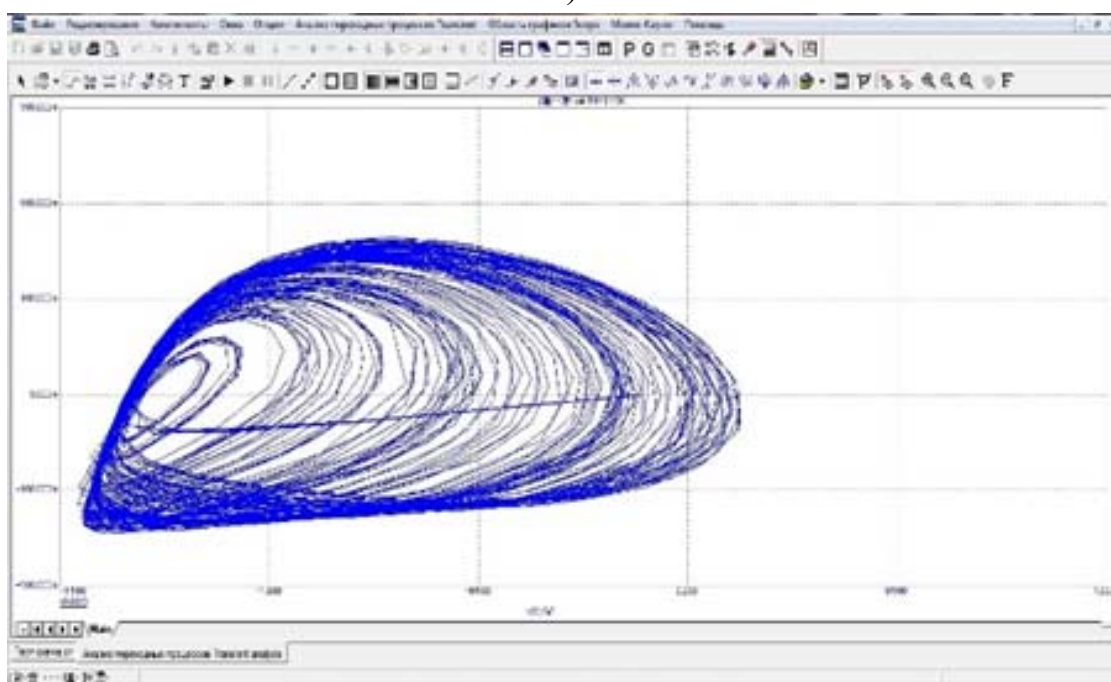


### Схемотехнічне моделювання

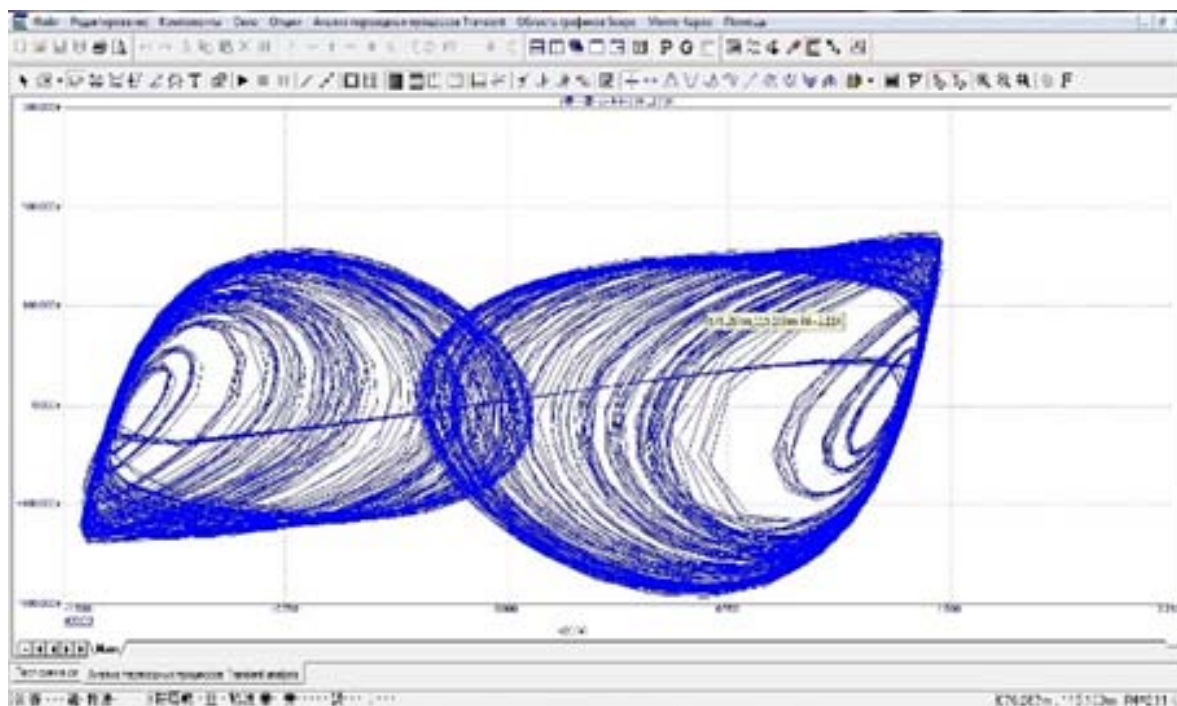
Для дослідження генератора було використано програмне забезпечення Micro-Cap 9, що дає змогу оцінити поведінку схеми в різних режимах, та оцінити стабільність її роботи. Результати моделювання представлені на рис. 4.12, 4.13. Характеристична часова константа, яка використовувалась в комп'ютерному моделюванні, становить 50 мс [159-162].



а)

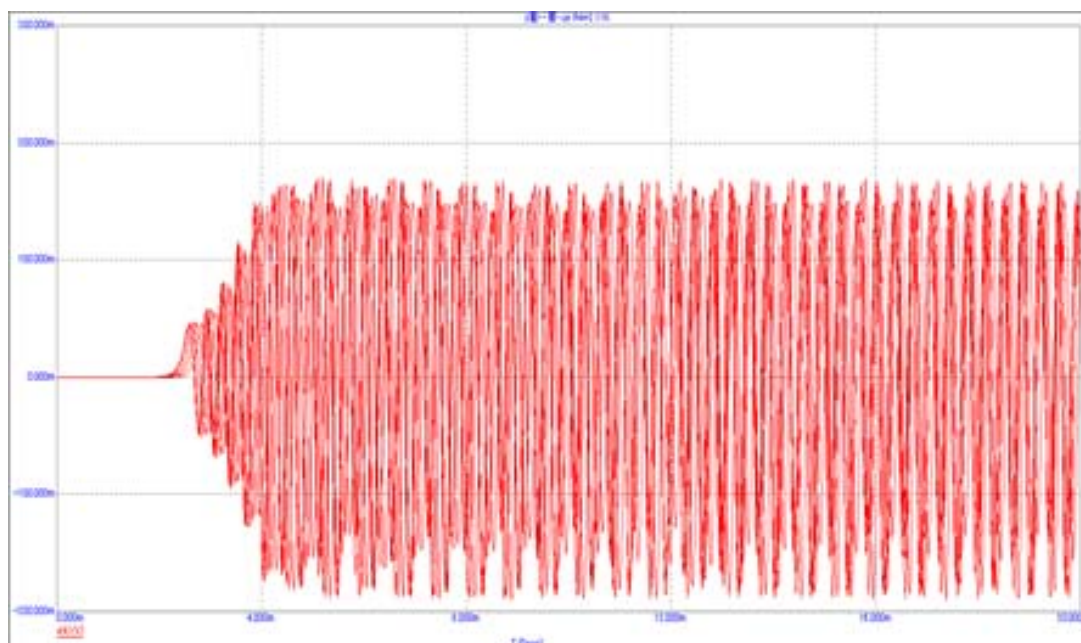


б)

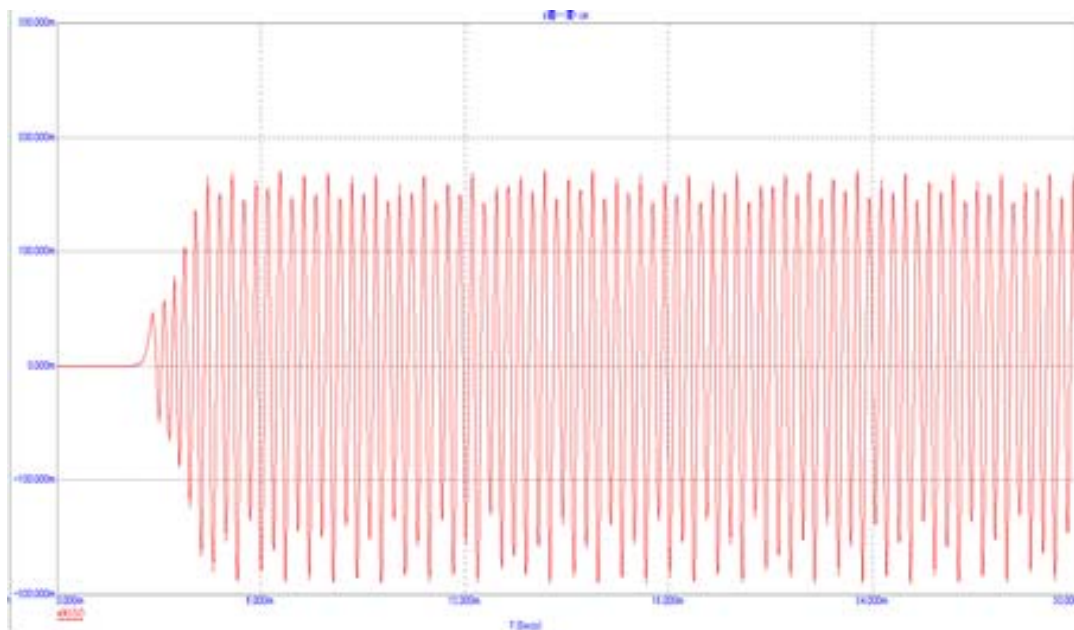


в)

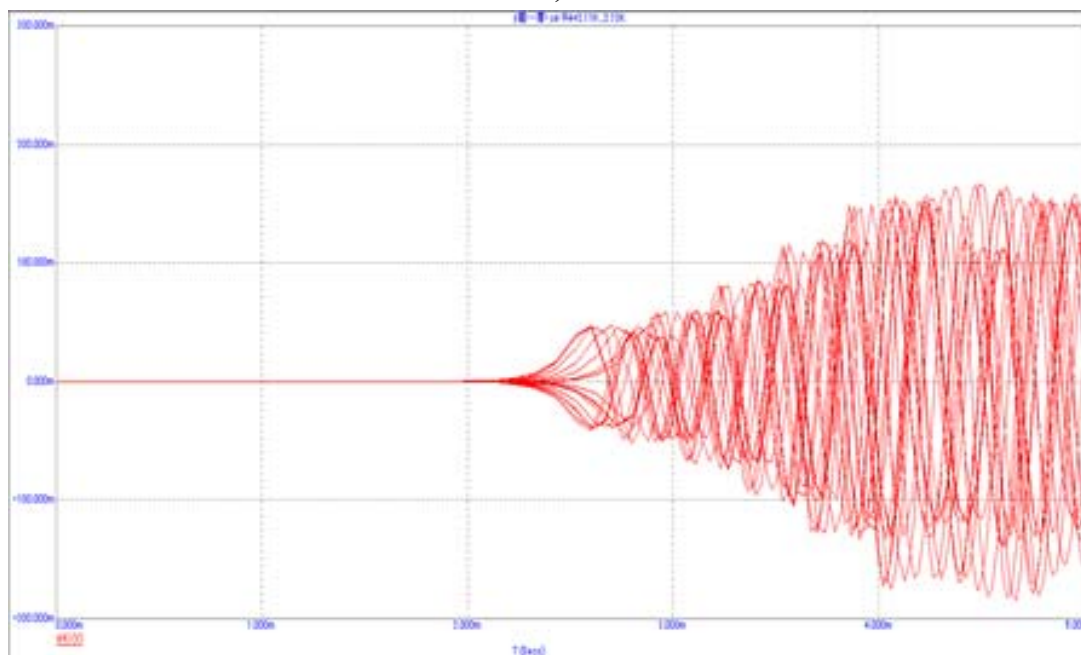
Рис. 4.12. Хаотичні атрактори системи Ван-дер-Поля-Дюфінга отримані при комп'ютерному моделюванні (фазові траєкторії на площині  $U_{C1} - U_{C2}$ ): а – при значенні опору  $R4=2,11$  кОм; б – при значенні опору  $R4=2,13$  кОм; в – при значенні опору  $R4=2,12$  кОм



а)



б)



в)

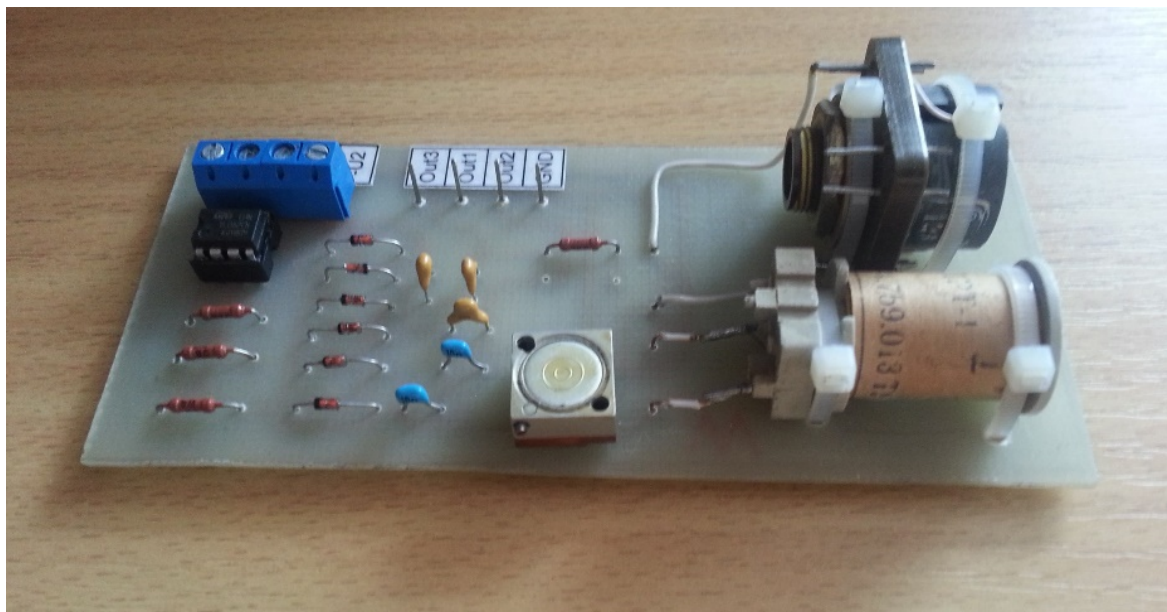
Рис. 4.13. Часові діаграми сигналів генератора (фазові траєкторії на площині  $(U_{C1} - U_{C2})$ ): а – при значенні опору  $R4=2,11$  кОм; б – при значенні опору  $R4=2,13$  кОм; в – при значенні опору  $R4=2,12$  кОм

Для моделювання схеми генератора гіперхаотичних коливань використовувалися компоненти з наступними номіналами:  $C1=C3=5$  нФ,

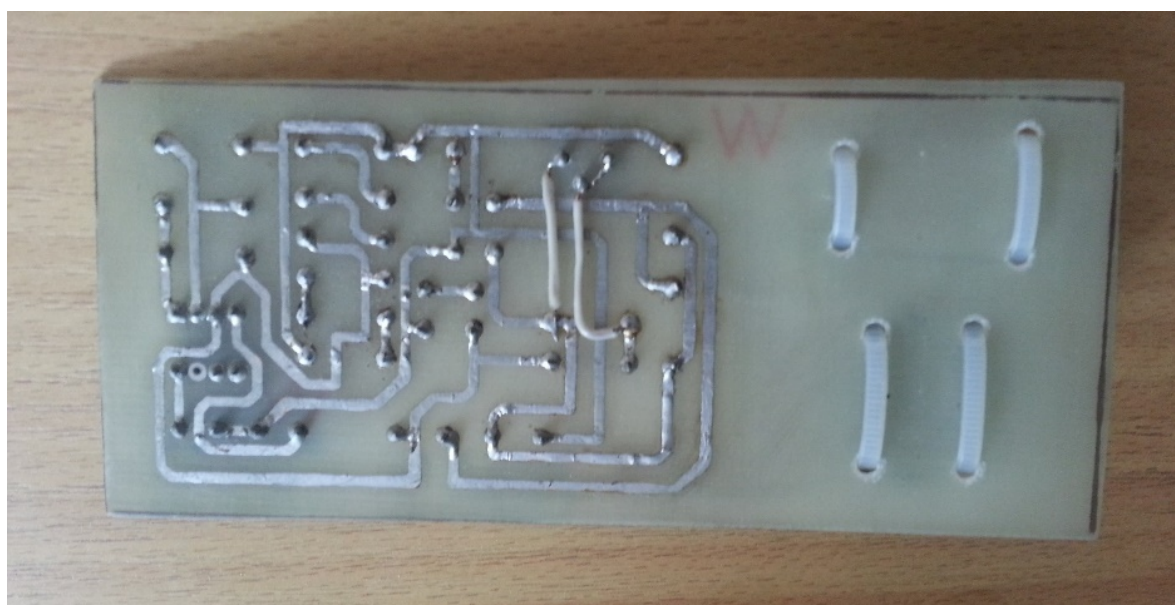
$C2=150 \text{ нФ}$ ,  $L1=11,77 \text{ мГн}$ ,  $L1=62,12 \text{ мГн}$ ,  $R1=R2=R3=2 \text{ кОм}$ , змінний резистор  $R4=5 \text{ кОм}$ ,  $VD1=VD6=1N4148$ ,  $DA=TL082$ .

### Практичні результати

Схема генератора була реалізована в макеті. Вид з елементами і друкованою платою представлені на рис. 4.14.



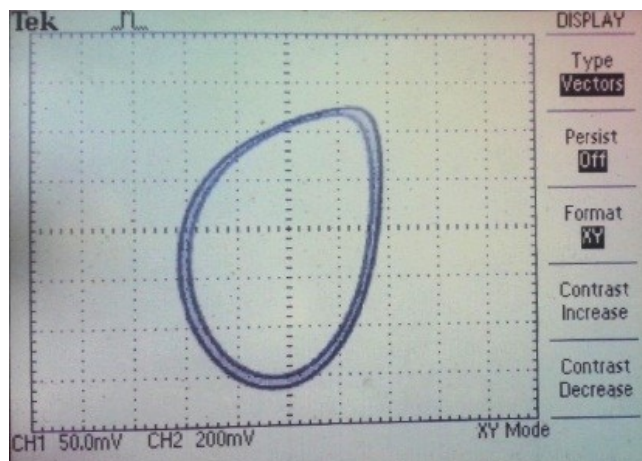
а)



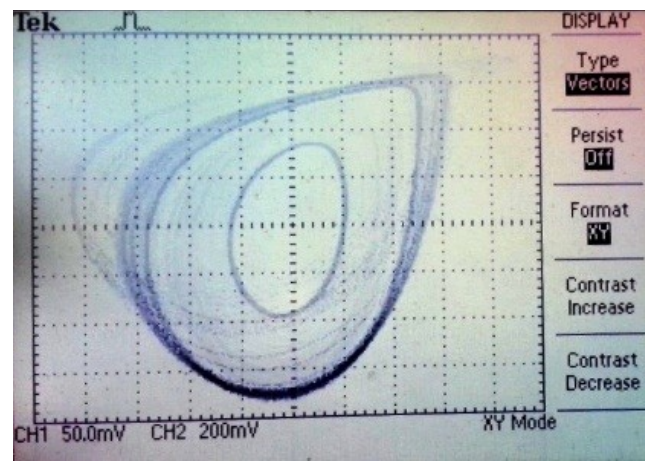
б)

Рис. 4.14. Макет генератора: а) вид з елементами; б) друкована плата

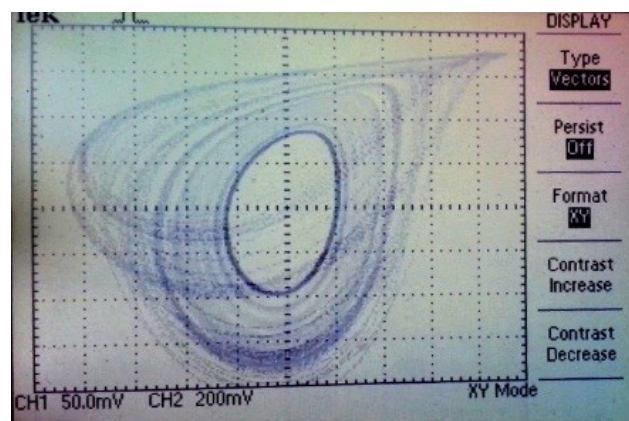
При зменшенні значення  $R_4$  в діапазоні  $0 \div 5000$  Ом проєкції атрактора на  $(U_{C1} - U_{C2})$  площині і  $(U_{C1} - U_{C3})$  площині показані на рис. 4.15 при різних значеннях керуючого параметра  $R_4$ .



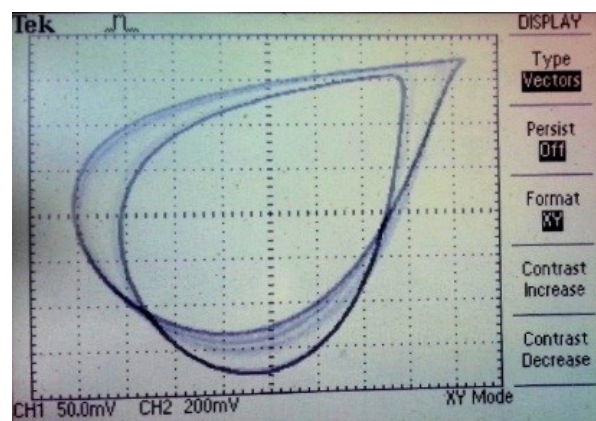
а)



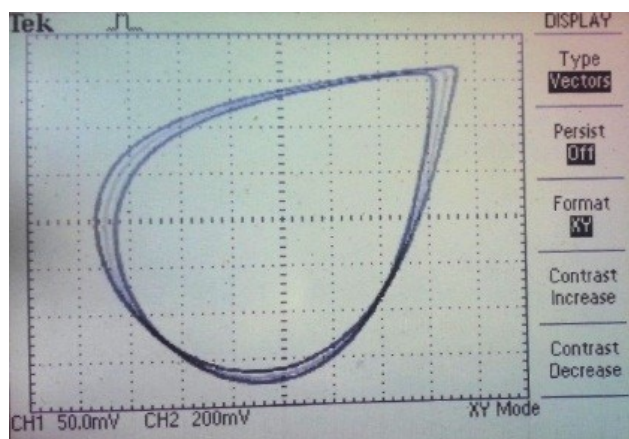
б)



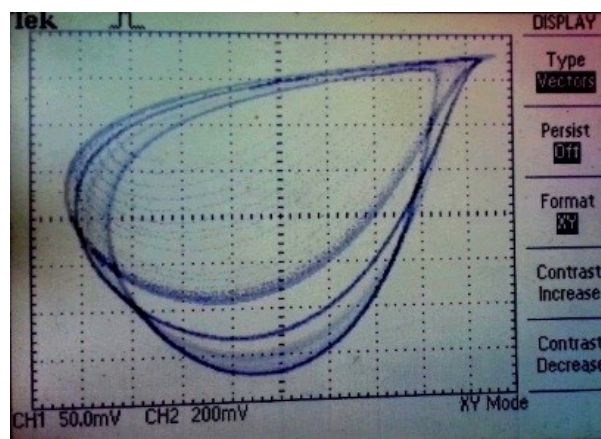
в)



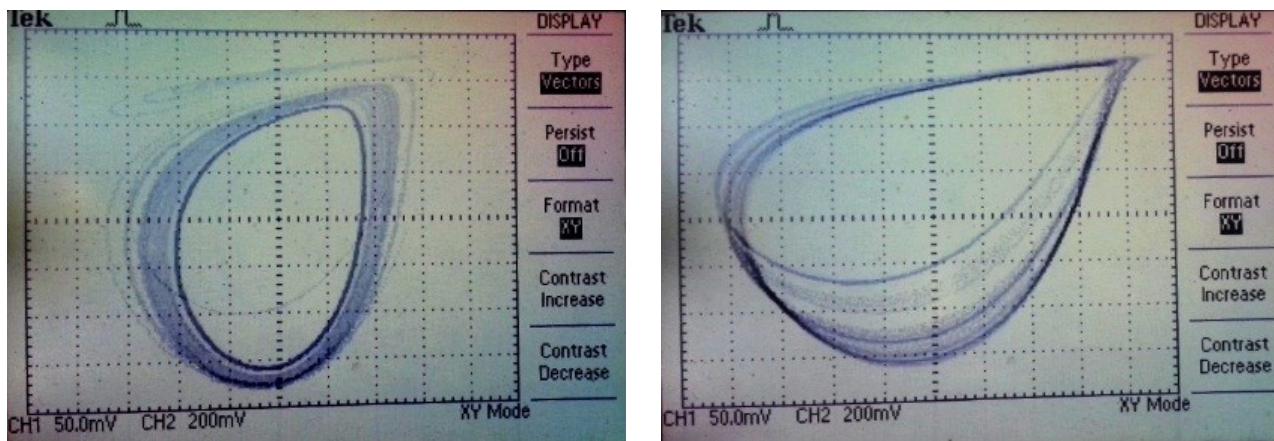
г)



д)



е)



е)

ж)

Рис. 4.15. Хаотичні атрактори системи Ван-дер-Поля-Дюфінга експериментально отримані в  $(U_{C1} - U_{C2})$ : площині автономного генератора вищого порядку *a* – при значенні опору  $R4=2,10 \text{ кОм}$ ; *б* – при значенні опору  $R4=2,11 \text{ кОм}$ ; *в* – при значенні опору  $R4=2,12 \text{ кОм}$ , *г* – при значенні опору  $R4=2,14 \text{ кОм}$ , *д* – при значенні опору  $R4=2,15 \text{ кОм}$ , *е* – при значенні опору  $R4=2,19 \text{ кОм}$ , *є* – при значенні опору  $R4=2,13 \text{ кОм}$ , *ж* – при значенні опору  $R4=2,21 \text{ кОм}$

Практичні результати повністю відповідають результатам математичного апарату. Вперше було досліджено та приведено значення номіналів керуючого елемента (резистор  $R4$ ), за допомогою яких можна керувати хаотичними коливаннями.

#### 4.4. Дослідження хаотичної системи типу „jerk”

На рис. 4.16 представлена змодельована схема генератора, що реалізує хаотичну систему типу „jerk” за допомогою програмного середовища MultiSim. Хаотична система типу „jerk” описується рівнянням (4.10).

$$\ddot{x} + a\dot{x} + b|x| + 1 = 0, \quad (4.10)$$

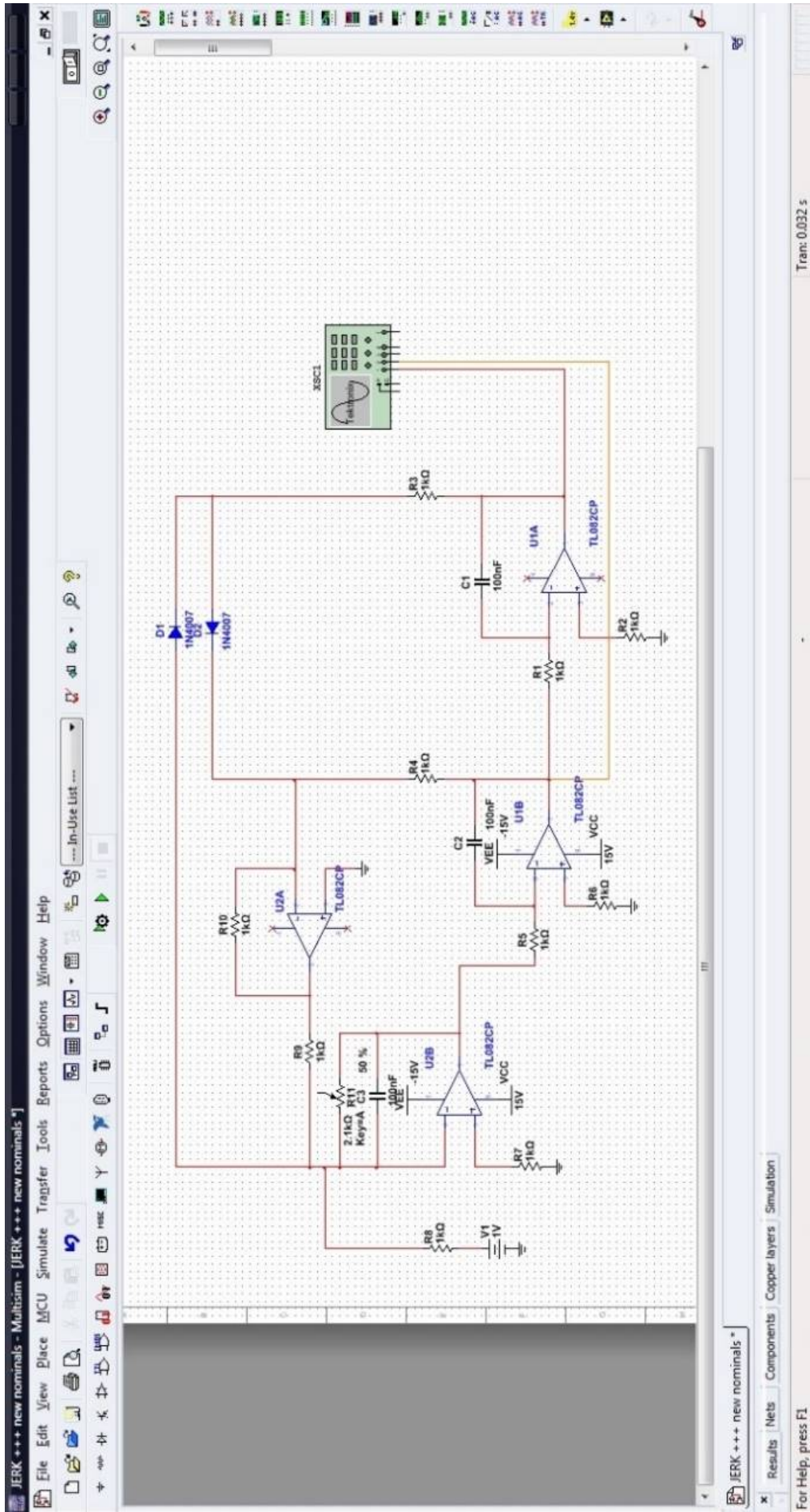


Рис. 4.19. Змодельована схема генератора, що реалізує хаотичну систему типу „jerk”

Рис. 4.17 демонструє результати схемного моделювання. Згенерований хаотичний сигнал в площині XY представлений на віртуальному осцилографі. Координата X на схемі відповідає виходу операційного підсилювача U1A, координата Y – виходу операційного підсилювача U1B, координата Z – виходу операційного підсилювача U2B.



Рис. 4.17. Атрактор хаотичної системи типу „jerk”

На рис. 4.18 представлені часові залежності координат X, Y і Z відповідно (на осцилографі зверху вниз).



Рис. 4.18. Часові залежності координат X, Y і Z



Рис. 4.19 – 4.21 демонструють спектральний аналіз хаотичної системи типу „jerk”.

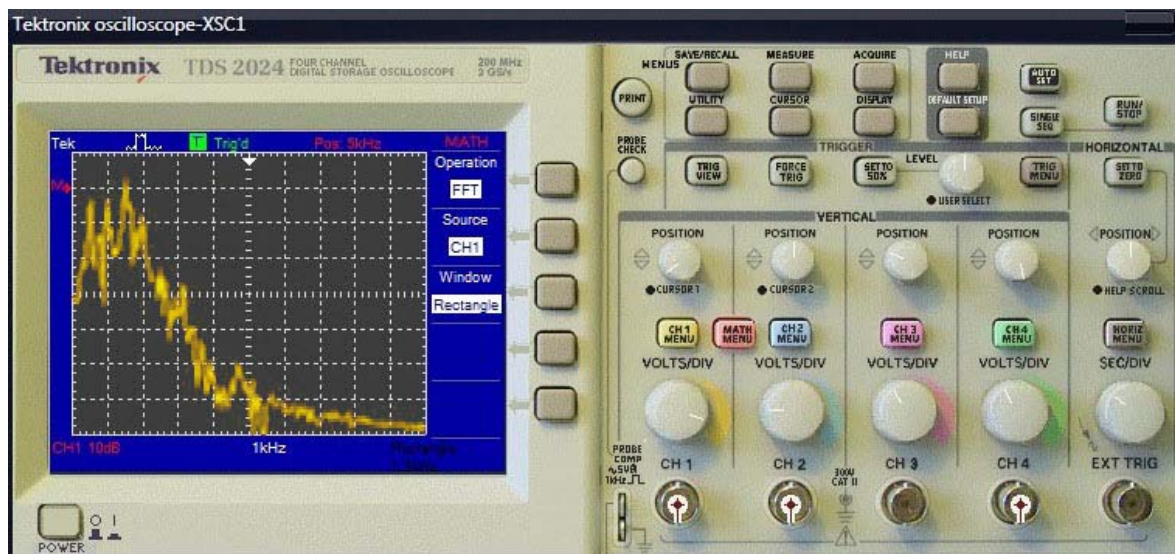


Рис. 4.19. Спектр координати X

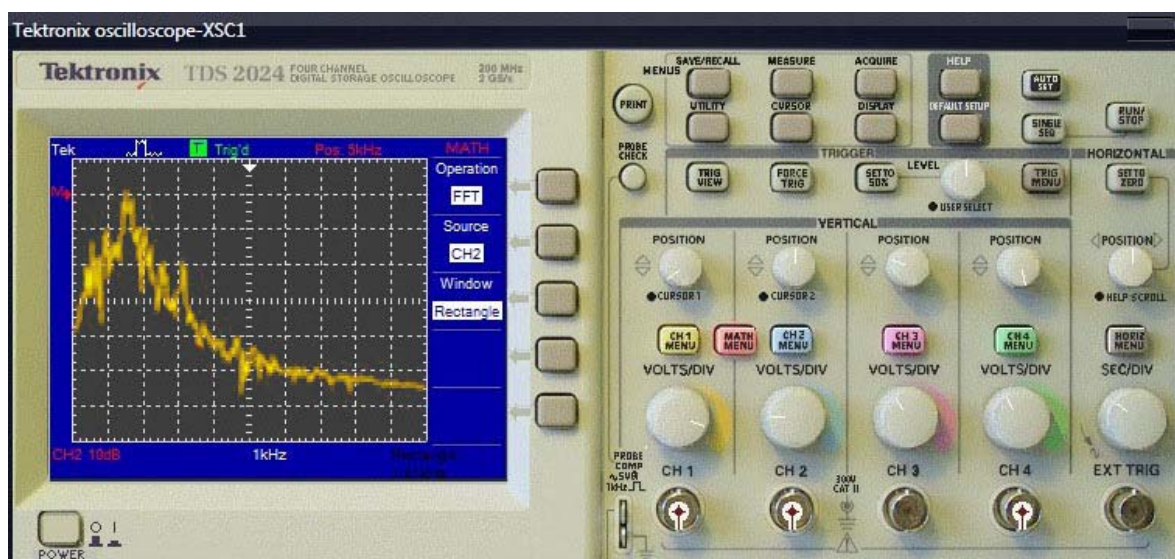


Рис. 4.20. Спектр координати Y



Рис. 4.21. Спектр координати Z

#### 4.5. Керування хаотичними коливаннями пороговим методом в схемі Чуа

Розглянемо загальну  $N$ -мірну динамічну систему, що описується еволюційним рівнянням  $\dot{x} = F(x; t)$ , де  $x \equiv (x_1, x_2, \dots, x_N)$  є змінними стану, і змінна  $x_i$  вибирається для спостереження і порогового керування. Призначення порогового керування в цій системі виглядає наступним чином: контроль буде спрацьовувати всякий раз, коли значення спостережної змінної буде перевищувати критичний поріг  $x^*$  (тобто, коли  $x_i > x^*$ ) і змінна  $x_i$  буде повертатися в  $x^*$  [163-165]. Динаміка триває до наступного випадку перевищення порогу  $x_i$ , коли контроль знову повертає його значення  $x^*$ .

#### Експериментальне дослідження

Розглянемо реалізацію хаотичного атратора Чуа, отриманого набором трьох звичайних диференціальних рівнянь:

$$\dot{x} = \alpha[y - x - g(x)], \quad (4.11)$$

$$\dot{y} = x - y + z, \quad (4.12)$$

$$\dot{z} = -\beta y, \quad (4.13)$$

де  $\alpha = 10$  і  $\beta = 14,87$  і кусково-лінійна функція  $g(x) = bx + 1/2(a - b)(|x + 1| - |x - 1|)$  з  $a = -1,27$  і  $b = -0,68$ .

Замість того, щоб змінна  $x$  поверталася до  $x^*$  у разі перевищення  $x^*$ , ми лише вимагаємо цього в рівнянні (4.12). Це дуже проста реалізація, і це дозволяє уникнути зміни значення  $x$  в нелінійному елементі  $g(x)$ . Після цього ми можемо реалізувати  $\dot{y} = x^* - y + z$  замість рівняння (4.12), коли  $x > x^*$ , і некеровану дію при  $x \leq x^*$ . В схемі, напруга з виходу DA3 відповідає  $x^*$ .

Проведено експериментальне дослідження керування хаотичними коливаннями пороговим методом у схемі Чуа. Досліджувана схема зображена на рис. 4.22.

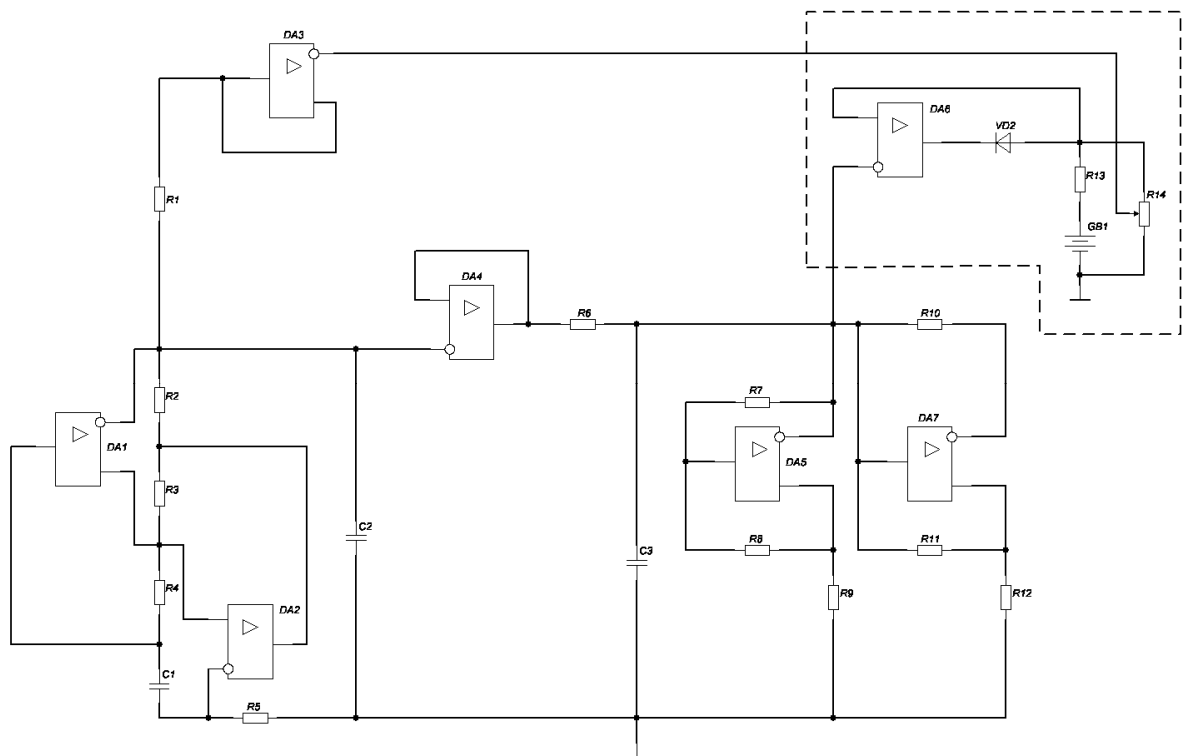
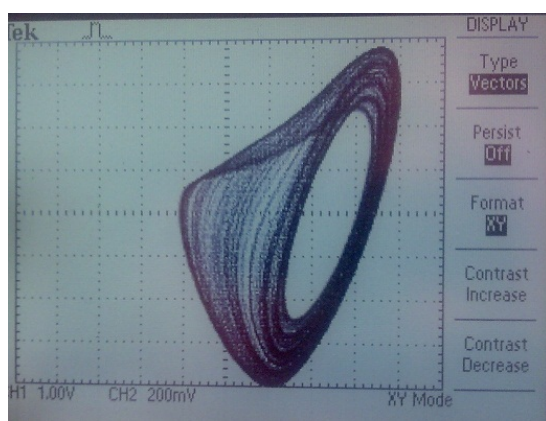


Рис. 4.22. Хаотична схема Чуа з контролюючою схемою порогового рівня (показано пунктиром).

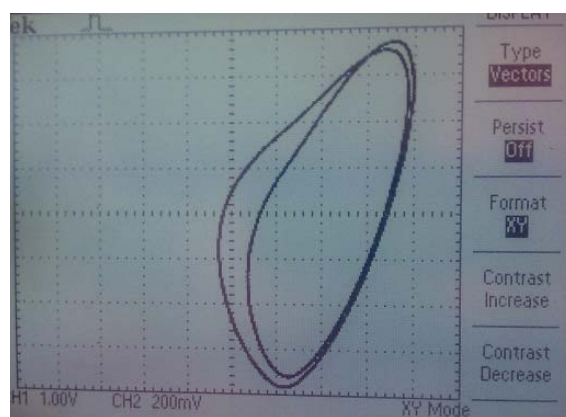
Відповідні значення схемних компонентів:  $C1 = 23,5\mu F$ ,  $C2 = 100nF$ ,  $C3 = 10nF$ ,  $DA1 - DA7$ : операційний підсилювач  $\mu A741$ ,  $R1 - R4 = 1k\Omega$ ,  $R5 = 1,8k\Omega$ ,

$R_6 = 1710\Omega$ ,  $R_7, R_8 = 220\Omega$ ,  $R_9 = 2,2k\Omega$ ,  $R_{10}, R_{11} = 22k\Omega$ ,  $R_{12} = 3,3k\Omega$ ,  $R_{13} = 1k\Omega$ ,  $R_{14} = 100k\Omega$ ,  $VD1 = 1N4148$ . Відмітимо, що схема на рис. 4.22 – конфігурація структури класичної схеми Чуа. В ній була здійснена заміна котушки індуктивності на аналог, що побудований на операційних підсилювачах для зменшення впливу внутрішнього опору на генерування хаотичного атрактора та можливості побудови генератора в інтегральному виконанні.

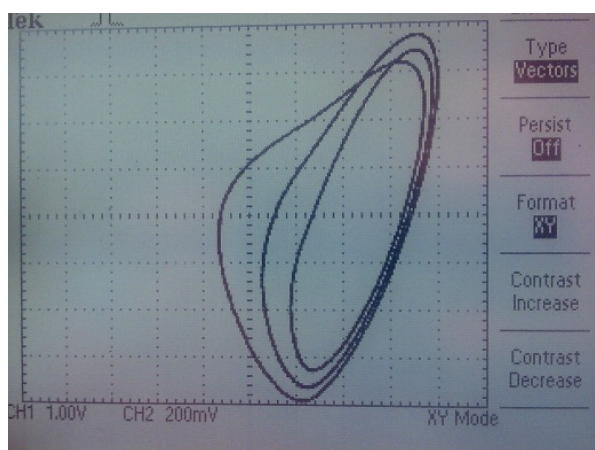
Результати практичного дослідження наведені на рис. 4.23.



а)



б)



в)

Рис. 4.23. Атрактори, реалізовані схемою Чуа (в площині  $U_{C2} - U_{C3}$ ):

а) некерований атрактор; б) 2-періодний цикл, отриманий при рівні порогу 2,7 В; в) 4-періодний цикл, отриманий при рівні порогу 2,71 В.

### Висновки до четвертого розділу

1. Проведено комплексне комп'ютерне моделювання нелінійних елементів.
2. Спроектовано хаотичний генератор Чуа з кубічною нелінійністю.
3. Проведено моделювання та практично реалізовано хаотичний генератор Ван-дер-Поля-Дюфінга. При експериментальному дослідженні генератора встановлено значення номіналів керуючого елемента, що знаходяться в діапазоні 2,10 кОм – 2,21 кОм. Дані значення можуть бути застосовані для управління хаотичними коливаннями.
4. Проведено схемотехнічне моделювання генератора, що реалізує хаотичну систему типу „jerk” за допомогою програмного середовища MultiSim.
5. Експериментально проведено управління хаотичними коливаннями, що генеруються хаотичним генератором Чуа.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання комп'ютерного моделювання, чисельного аналізу та керування коливаннями хаотичних систем та генераторів хаосу, їх практичної реалізації та дослідження можливості використання в системах передавання та приймання інформації. Проведені дослідження дозволили зробити такі основні результати та висновки.

1. Проведено програмне моделювання хаотичних систем за допомогою одного із найсучасніших програмних середовищ LabView.
2. За допомогою програм схемотехнічного моделювання MultiSim і Micro-Cap проведено дослідження хаотичних схем генераторів Чуа, Реслера, Ван дер Поля-Дюфінга.
3. Виявлено та досліджено значення керуючих коефіцієнтів хаотичних систем Чуа, Реслера, Ван-дер-Поля-Дюфінга, мульти-листя Jerk.
4. Експериментально проведено керування хаотичними коливаннями генераторів Чуа та Ван-дер-Поля-Дюфінга.
5. Створено програмний комплекс для генерування коливань хаотичних систем, маскуванню інформації, передавання замаскованої інформації, а також її відновлення.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:**

1. Браїловський В. В. Модифікація генератора Чуа / В. В. Браїловський, М. Я. Кушнір, В. Б. Русин // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2009. – № 1. – С. 39-43.
2. Еліяшів О. М. Дослідження властивостей нелінійного елемента передавача хаотичної системи зв'язку / О. М. Еліяшів, В. Б. Русин, Л. Ф. Політанський М. Я. Кушнір, Р. Л. Політанський // Радиоэлектроника и информатика. – 2011. – № 2 (53). – С. 12-16.
3. Русин В. Б. Керування хаотичними коливаннями пороговим методом в схемі Чуа / В. Б. Русин, О. М. Еліяшів, М. Я. Кушнір // Фізика. Електроніка. Науковий вісник Чернівецького університету. – 2011. – Том 1, випуск 2. – С. 60-63.
4. Kushnir Mykola. Computer modeling of information properties of deterministic chaos / Mykola Kushnir, Sergii Galiuk, Volodymyr Rusyn, Grygorii Kosovan, Dmytro Vovchuk // Chaotic Modeling and Simulation (CMSIM). – 2015. – № 2. – P. 117-128.
5. Rusyn V. B. Modeling and Research of Chaotic Rossler System with LabView and Multisim Software Environments / V. B. Rusyn // Bulletin of National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Series Radiotechnique Radioapparatus Building, Eddition 59. – 2014. – PP. 21-28.
6. Rusyn Volodymyr. Modeling and Research of the Van der Pol-Duffing Generator / Volodymyr Rusyn, Laurentiu Stoleriu // Erasmus Dialog, Alexandru Ioan Cuza University of Iasi. – 2015. – № 1.
7. Rusyn V. Modeling and Control of Chaotic Multi-Scroll Jerk System in LabView / V. Rusyn, A. Stancu, L. Stoleriu // Bulletin of National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Series Radiotechnique Radioapparatus Building, Edition 62. – 2015. – P. 93-99.

8. Модифікація хаотичного генератора Чуа // VII Харківська конференція молодих науковців “Радіофізика та електроніка» (YSC) Харків, Україна, 12-14 грудня 2007, Програма та збірник анотацій, С. 63.
9. Кушнір М. Я. Гібридні хаотичні генератори Чуа / М. Я. Кушнір, В. Б. Русин, О. М. Еліяшів, В. І. Сторощук, Л. Г. Іволга // Двенадцатая международная научно-практическая конференция „Современные информационные и электронные технологии”. – 23 –27 мая 2011: тезисы докл. – Одесса. – 2011, С. 33.
10. Русин В. Б. Керування хаотичними коливаннями пороговим методом в схемі Чуа / В. Б. Русин, О. О. Галамейко, О. О. Невельський, О. В. Сінчук // I-а Всеукраїнська науково-практична конференція „Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки”. – 13-15 жовтня 2011. – Чернівці. – 2012, С. 104-106.
11. Русин В. Б. Формування та дослідження хаотичної системи Реслера в програмному середовищі LabView / В. Б. Русин, М. Я. Кушнір, М. Г. Рождественська // II-а Міжнародна науково-практична конференція „Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки”. – 25-27 жовтня 2012. – Чернівці. – 2012. – С. 93.
12. Русин Моделювання хаотичної системи Арнеодо з допомогою програмного середовища LABVIEW / В. Б. Русин // IV міжнародна науково-практична конференція „Обробка сигналів і негаусівських процесів”. – 22-24 травня 2013.: тези доп. – Черкаси. – 2013. – С. 168-169.
13. Русин Моделювання системи маскуванню та розшифрування інформаційного носія хаотичною системою Реслера за допомогою програмного середовища LABVIEW / В. Б. Русин // Тези науково-практичної конференції «Інформаційно-вимірвальні технології та системи». – 17 жовтня 2013. – Київ. – 2013. – С. 46.



14. Русин В. Б. Моделювання гіперхаотичної системи Лоренца з допомогою програмного середовища LabView / В. Б. Русин, А. І. Скицько // III-я Міжнародна науково-практична конференція „Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки”. – 24-26 жовтня 2013. – Чернівці. – 2013. – С. 86.
15. Rusyn V. Modeling Nonlinear Element of Chaotic Communication Systems / V. Rusyn, M. Kushnir // International Conference TCSET'2014 Dedicated to the 170th anniversary of Lviv Polytechnic National University „Modern Problems Of Radio Engineering, Telecommunications, And Computer Science”. – February 25-March 1. – 2014. – Lviv-Slavske. – 2014. – P. 96.
16. Rusyn V. Modeling of the new three-dimensional chaotic system with LabView / V. Rusyn, L. Stoleriu // IV-th International scientific-practical conference Physical and technological problems of radiotechnics devices, telecommunications, nano- and microelectronics. – 23-25 October 2014. – Chernivtsi. – Ukraine. – 2014, P. 122.
17. Rusyn Volodymyr. Modeling of the hysteretic Chua's diode / V. Rusyn // Book of abstracts, Iasi IEEE Student Branch Scientific Meeting, 5<sup>th</sup> edition. – December 18<sup>th</sup>, 2014. – Iasi. – Romania. – 2014. – P. 4.
18. Kushnir M. Period-Doubling Bifurcation Cascade In A Ferromagnetic Nanoparticle Under The Action Of A Spin-Polarized Current / M. Kushnir, P. Horley, M. Morales-Meza, V. Rusyn, A. Sukhov, S. Galyuk // 10<sup>th</sup> International Symposium on Hysteresis Modeling and Micromagnetics, Alexandru Ioan Cuza University of Iasi, Romania. – 18-20 May, 2015. – P5.
19. Rusyn Volodymyr. Modeling of Chaotic Behavior in the Economic Model / Volodymyr Rusyn, Oleksandr Savko // BOOK OF ABSTRACTS 8<sup>th</sup> CHAOS 2015 Chaotic Modeling and Simulation International Conference, Henri Poincaré Institute, Paris, France. – 26-29 May 2015. – P. 110.

20. Benettin G. Kolmogorov entropy and numerical experiments / G. Benettin, L. Galgani, J. M. Strelcyn // *Physical Review A* 14. – 1976. – PP. 2338-2345.
21. Cellucci C. J., Detecting noise in a time series / C. J. Cellucci, A. M. Albano, P. E. Rapp, et al. // *Chaos*, 7. – 1997. – P. 414-422.
22. Ding M. Z., Evolution of attractors in quasiperiodically forced systems: from quasiperiodic to strange nonchaotic to chaotic/ M. Z. Ding, C. Grebogi, E. Ott // *Physical Review A* 39. – 1989. – P. 2593-2598.
23. Ditto W. L. Experimental observation of a strange nonchaotic attractor / W. L. Ditto, M. L. Spano, H. T. Savage et al. // *Physical Review Letters*, 65. – 1990. – P. 533-536.
24. Eckmann J. P. Ergodic theory of chaos and strange attractors / J. P. Eckmann, D. Ruelle // *Reviews of Modern Physics*, 57. – 1985. – P. 617-656.
25. Farmer J. D. Chaotic attractors of an infinite-dimensional dynamical system / J. D. Farmer // *Physica D*, 4. – 1982. – P. 366-393.
26. Grassberger P. Characterization of strange attractors / P. Grassberger, I. Procaccia // *Physics Review Letters*, 50. – 1983a. – P. 346-349.
27. Grassberger P. Measuring the strangeness of strange attractors / P. Grassberger, I. Procaccia // *Physica D*, 9. – 1983b. – P. 189-208.
28. Grebogi C., Strange attractors that are not chaotic / C. Grebogi, E. Ott, S. Pelikan, J. A. Yorke // *Physica D*, 13. – 1984. – P. 261-268.
29. Müller P. C. Calculation of Lyapunov exponents for dynamic systems with discontinuities/ P. C. Müller // *Chaos, Solitons and Fractals*, 5. – 1995. – P. 1671-1681.
30. Ott E. *Chaos in Dynamical Systems*, Cambridge University Press, Cambridge, 1993.
31. Parker T. *Practical numerical algorithms for chaotic systems* / T. Parker, L. Chua. – New York, 1989. – 348 p. – (Springer Verlag).

32. Pawelzik K. Unstable periodic orbits and prediction / K. Pawelzik, H. G. Schuster // *Physical Review A*, 43. – 1991. – P. 1808-1812.
33. Pesin Ya. B. Characteristic Lyapunov exponents and smooth ergodic theory / Ya. B. Pesin // *Russian Mathematical Surveys*, 32. – 1977. – P. 55-114.
34. Rosenstein M. T. A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets / M. T. Rosenstein, J. J. Collins, C. J. De Luca // *Physica D*, 65. – 1993. – P. 117-134.
35. Shimada I. A numerical approach to ergodic problem of dissipative dynamical systems / I. Shimada, T. Nagashima // *Progress of Theoretical Physics*, 61. – 1979. – P. 1605-1616.
36. Sprott J. C. *Chaos and Time-Series Analysis*, Oxford University Press, Oxford, 2003.
37. Wolf A. Determining Lyapunov exponents from a time series / A. Wolf, J. B. Swift, H. L. Swinney, J. A. Vastano // *Physica D*, 16. – 1985. – P. 285-317.
38. Yang T. Experimental results of strange nonchaotic phenomenon in a second-order quasiperiodically forced electronic circuit / T. Yang, K. Bilimgut // *Physics Letters A* 236. – 1997. – P. 494-499.
39. Капица П. Л. Динамическая устойчивость маятника при колеблющейся точке подвеса / П. Л. Капица // *ЖЭТФ*. – 1951. – Т. 21, Вып. 5. – С. 588-597.
40. Stephenson A. On a new type of dynamical stability / A. Stephenson // *Mem. Proc. Manch. Lit. Phil. Soc.* 52, 1-10; On induced stability, *Phil. Mag.* 15. – 1908. – P. 233-236.
41. Блехман И. И. *Вибрационная механика* / И. И. Блехман // М.: Наука, 1994. – 400 с. – (Физматлит).
42. Боголюбов Н. Н.. *Асимптотические методы в теории нелинейных*

- колебаний / Н. Н. Боголюбов, Ю. А. Митропольский. – Москва, 1958. – 407 с. – (Физматлит).
43. Bellman R., Vibrational control of nonlinear systems / R. Bellman, J. Bentsman, S. Meerkov // IEEE Trans. Aut. Contr. V. AC-31. – 1986. – № 8. – P. 710-724.
44. Meerkov S. M. Principle of vibrational control: theory and applications / S. M. Meerkov // IEEE Trans. Aut. Contr. V. AC-25. – 1980. – P. 755-762.
45. Zanies G. Dither in nonlinear systems / G. Zanies, N. A. Shneydor // IEEE Trans. Autom. Contr. – 1976. – V. 21. – P. 660-667.
46. Леонов Г. А. Алгоритмы линейной нестационарной стабилизации и проблема Брокетта / Г. А. Леонов // ПММ. – 2001. – Т. 65, вып. 5. – С. 801-808.
47. Леонов Г. А. Проблемы стабилизации линейных управляемых систем / Г. А. Леонов, М. М. Шумафов. – СПб. – 2002. – 306 с. – (СПбГУ).
48. Morgul O. On the control of chaotic systems in Lurie form by using dither / O. Morgul // IEEE Trans. Circ. Syst.-I. – 1999. – V. 46. – P. 1301-1305.
49. Morgul O. On the control of some chaotic systems by using dither / O. Morgul // Phys. Let. A. – 1999. – V. 262. – P. 144-151.
50. Первозванский А. А. Курс теории автоматического управления: Учебное пособие / А. А. Первозванский. – М. – 1986. – 308 с. – (Наука).
51. Попов Е. П. Теория нелинейных систем автоматического регулирования и управления: Учеб. пособие / Е. П. Попов. – 2-е изд., стер. – М. – 1988. – 256 с. – (Наука).
52. Genesio R. Harmonic balance methods for the analysis of chaotic dynamics in nonlinear systems / R. Genesio, A. Tesi // Autom. – 1992. – V. 28.

– № 3. – P. 531-548.

53. Lima R. Suppression of chaos by resonant parametric perturbations / R. Lima, M. Pettini // *Phys. Rev. A.* – 1990. – V. 41. – P. 726-733.

54. Pettini M. Controlling chaos through parametric excitations / *Dynamics and Stochastic Processes*, Eds, Lima R., Streit L., and Vilela-Mendes, R.V, Springer-Verlag, N.Y., 1988, P. 242-250.

55. Мельников В. К. Устойчивость центра при периодических по времени возмущениях // *Труды Моск. Матем. Общества.* 1963. Т. 12. – С. 3-52.

56. Fronzoni L. Experimental evidence of suppression of chaos by resonant parametric perturbations / L. Fronzoni, M. Giocondo, M. Pettini // *Phys. Rev. A.* – 1991. – V. 43. – P. 6483-6487.

57. Lima R. Parametric resonant control of chaos / R. Lima, M. Pettini // *Int. J. Bifurcation Chaos.* – 1998. – V. 8. – P. 1675-1684.

58. Chacon R. Maintenance and suppression of chaos by weak harmonic perturbations: A unified view / R. Chacon. // *Phys. Rev. Lett.* – 2001. – V. 86. – P. 1737-1740.

59. Chacon R. Control of Homoclinic Chaos by Weak Periodic Perturbations. World Scientific Series on Nonlinear Science, Series A, Singapore: World Scientific, 2002.

60. Fronzoni L. Controlling chaos with parametric perturbations / L. Fronzoni, M. Giocondo // *Int. J. Bifurcation Chaos.* – 1998. – V. 8. – P. 1693-1698.

61. Жалнин А.Ю. Управление хаосом в неавтономных системах с квазипериодическим возбуждением / А.Ю. Жалнин. // *Письма в ЖТФ.* – 1999. – Т. 25. – Вып. 16. – С. 63-70.

62. Belhaq M. Quasi-periodic oscillations, chaos and suppression of chaos in a nonlinear oscillator driven by parametric and external excitations / M. Belhaq, M. Houssni // *Nonlinear Dynamics*. – 1999. – V. 18. – P. 1-24.
63. Basios V. Controlling the onset of homoclinic chaos due to parametric noise / V. Basios, T. Bountis, G. Nicolis // *Phys. Let. A*. – 1999. – V. 251. – P. 250-258.
64. Tereshko V. Resonant control of the Rössler system / V. Tereshko, E. Shchekinova // *Phys. Rev. E*. – 1998. – V. 58 (1). – P. 423-426.
65. Mirus K.A. Controlling chaos in a high dimensional system with periodic parametric perturbations / K.A. Mirus, J.C. Sprott // *Phys. Let. A*. – 1999. – V. 254. – P. 275-278.
66. Chizhevsky V. N. Experimental switchings in bistability domains induced by resonant perturbations / V. N. Chizhevsky, R. Vilaseca, R. Corbalan // *Int. J. Bifurcation Chaos*. – 1998. – V. 8. – P. 1777-1782.
67. Pisarchik A.N. Parametric nonfeedback resonance in period doubling systems / A.N. Pisarchik, R. Corbalan // *Phys. Rev. E*. – 1999. – V. 59. – P. 1669-1674.
68. Hubler A. Resonant stimulation and control of nonlinear oscillators / A. Hubler, E. Lusher // *Naturwissenschaft*. – 1989. – V. 76. – P. 67-72.
69. Fradkov A.L., Pogromsky A. Yu. Introduction to control of oscillations and chaos, Singapore: World Scientific, 1998.
70. Rajasekar S. Characterization and control of chaotic dynamics in a nerve conduction model equation / S. Rajasekar. // *Pramana-journal of Physics*. – 1997. – V. 48. – P. 249-258.
71. Ramesh M. Chaos control by nonfeedback methods in the presence of noise / M. Ramesh, S. Narayanan // *Chaos, Solitons Fractals*. – 1999. – V. 10. –

P. 1473-1489.

72. Hsu R.R. Conditions to control chaotic dynamics by weak periodic perturbation / R.R. Hsu, H.T. Su, J.L. Chern, et al. // *Phys. Rev. Let.* – 1997. – V. 78. – P. 2936-2939.

73. Mettin R. Control of chaotic maps by optimized periodic inputs / R. Mettin. // *Int. J. Bifurcation Chaos.* – 1998. – V. 8. – P. 1707-1711.

74. Fradkov A.L., Leonov G.A., Nijmeier H. Frequency-domain conditions for global synchronization of nonlinear systems driven by a multiharmonic external signal / *Proc. 5th European Contr. Conf.*, 1999.

75. Леонов Г.А. Частотный критерий стабилизации внешним гармоническим воздействием / Г.А. Леонов // *АиТ.* – 1986. – № 1. – С. 169-174.

76. Jackson E.A. An OPCL control of complex dynamic systems / E.A. Jackson, I. Grosu // *Physica D.* – 1995. – V. 85. – P. 1-9.

77. Aguirre L.A. Control of nonlinear dynamics: Where do models fit in? / L.A. Aguirre, L.A.B. Torres // *Int. J. Bifurcation Chaos.* – 2000. – V. 10. – P. 667-681.

78. Jackson E.A. The OPCL control method for entrainment, model-resonance, and migration actions on multiple-attractor systems / E.A. Jackson. // *Chaos.* – 1997. – V. 7. – P. 550-559.

79. Tian Y.C. Nonlinear open-plus-closed-loop (NOPCL) control of dynamic systems / Y.C. Tian, M.O. Tade, J.Y. Tang // *Chaos Solitons Fractals.* – 2000. – V. 11. – P. 1029-1035.

80. Wang J. A global control of polynomial chaotic systems / J. Wang, X.H. Wang // *Int. J. Control.* – 1999. – V. 72. – № 10. – P. 911-918.

81. Casas F. Control of chaotic impacts / F. Casas, C. Grebogi // *Int. J.*

Bifurcation Chaos. – 1997. – V. 7. – P. 951-955.

82. Chau N.P. Controlling chaos by periodic proportional pulses / N.P. Chau. // *Physics Lett. A.* – 1997. – V. 234. – P. 193-197.

83. Chau N.P. Controlling continuous chaotic dynamics by periodic proportional pulses / N.P. Chau. // *Phys. Rev. E.* – 1998. – V. 57. – P. 378-380.

84. Магницкий Н.А. О стабилизации неподвижных точек хаотических отображений // *ДАН.* 1996. Т. 351. № 2. С. 175-177.

85. Магницкий Н.А. О стабилизации неподвижных точек хаотических динамических систем / Н.А. Магницкий // *ДАН.* – 1997. – Т. 352. – № 5. – С. 610-612.

86. Магницкий Н.А. О стабилизации неустойчивых циклов хаотических отображений / Н.А. Магницкий. // *ДАН.* – 1997. – Т. 355. – № 6. – С. 747-749.

87. Магницкий Н.А. Управление хаосом в нелинейных динамических системах / Н.А. Магницкий, С.В. Сидоров // *Дифференциальные уравнения.* – 1998. – № 11. – С. 1501-1509.

88. Zhao H. Extended pole placement technique and its applications for targeting unstable periodic orbit / H. Zhao, Y.H. Wang, Z.B. Zhang // *Phys. Rev. E.* – 1998. – V. 57. – P. 5358-5365.

89. Мирошник И.В., Никифоров В. О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами, СПб.: Наука, 2000,

90. Isidori A., Bars R., Dion J.-M., et al. IFAC 2002 Milestone report on design methods / Prep, 15th Triennial World Congress IFAC, Plenary papers, Survey papers, Milestones, Barcelona. 2002. P. 207-212.

91. Khalil H. *Nonlinear Systems*, Prentice Hall, New Jersey, 1996,



92. Alvarez-Gallegos J. Nonlinear regulation of a Lorenz system by feedback linearization technique / J. Alvarez-Gallegos // *J. Dynamics and Control.* – 1994. – №4. – P. 277-298.
93. Babloyantz A. Analysis and stabilization of nonlinear chaotic systems / A. Babloyantz, A.P. Krishchenko, A. Nosov // *Computers Mathematics With Applications.* – 1997. – V. 34. – P. 355-368.
94. Chen L. Q. A modified exact linearization control for chaotic oscillators / L. Q. Chen, Y.Z. Liu // *Nonlin. Dynamics.* – 1999. – V. 20. – P. 309-317.
95. Yu X.H. Controlling chaos using input-output linearization approach / X.H. Yu. // *Int. J. Bifurcation Chaos.* – 1997. – V. 7. – P. 1659-1664.
96. Nijmeijer H. An observer looks at synchronization / H. Nijmeijer, I.M. Y. Mareels // *IEEE Trans. Circ. Syst. I.* – 1997. – V. 44. – P. 882-890.
97. Grassi G. Nonlinear observer design to synchronize hyperchaotic systems via a scalar signal / G. Grassi, S. Mascolo // *IEEE Trans, Circ, Syst.-I.* – 1997. – V. 44. – P. 1011-1014.
98. Morgul O. On the synchronization of chaotic systems by using state observers / O. Morgul, E. Solak // *Int. J. Bifurcation Chaos.* – 1997. – V. 7. – P. 1307-1322.
99. Liao T.L. Observer-based approach for controlling chaotic systems / T.L. Liao. // *Phys. Rev. E.* – 1998. – V. 57. – P. 1604-1610.
100. Фрадков А. Л. Схема скоростного градиента и ее применение в задачах адаптивного управления // *Ли Г.* 1979. № 9. С. 90-101.
101. Фрадков А.Л. Адаптивное управление нелинейными колебаниями / Алгоритмическое обеспечение процессов управления в механике и машиностроении: Тез, докл, М,: 1994. С. 29 - 30.
102. Fradkov A.L., Pogromsky A. Yu. Introduction to control of oscillations

and chaos, Singapore: World Scientific, 1998.

103. Krstic M., Kanellakopoulos I., Kokotovich P. Nonlinear and Adaptive Control Design, Wiley, 1995.

104. Cao Y.J. A nonlinear adaptive approach to controlling chaotic oscillators / Y.J. Cao. // *Physics Lett. A.* – 2000. – V. 270. – P. 171-176.

105. Liao T.L. Adaptive control and synchronization of Lorenz systems / T.L. Liao, S.H. Lin // *J. The Franklin Inst. - Engin. Applied Mathem.* – 1999. – V. 336. – P. 925-937.

106. Zeng Y.M. Adaptive control of chaos in Lorenz system / Y.M. Zeng, S.N. Singh // *Dynamics and Control.* – 1997. – V. 7. – P. 143-154.

107. Femat R. Adaptive synchronization of high-order chaotic systems: a feedback with low-order parametrization / R. Femat, J. Alvarez-Ramirez, G. Fernandez-Anaya // *Physica D.* – 2000. – V. 139. – P. 231-246.

108. Maybhate A. Use of synchronization and adaptive control in parameter estimation from a time series / A. Maybhate, R.E. Amritkar // *Phys. Rev. E.* – 1999. – V. 59. – P. 284-293.

109. Maybhate A. Dynamic algorithm for parameter estimation and its applications / A. Maybhate, R.E. Amritkar // *Phys. Rev. E.* – 2000. – V. 61. – P. 6461-6470.

110. Wang J. Parametric adaptive control in nonlinear dynamical systems / J. Wang, X. Wang // *Int. J. Bifurcation Chaos.* – 1998. – V. 8. – P. 2215-2223.

111. Yang T. A detailed study of adaptive control of chaotic systems with unknown parameters / T. Yang, C.M. Yang, L.B. Yang // *Dynamics and Control.* – 1998. – V. 8. – P. 255-267.

112. Hu H. Y. An adaptive control scheme for recovering periodic motion of

- chaotic systems / H. Y. Hu. // *J. Sound Vibration*. – 1997. – V. 199. – P. 269-274.
113. Ramaswamy R. Targeting chaos through adaptive control / R. Ramaswamy, S. Sinha, N. Gupte // *Phys. Rev. E*. – 1998. – V. 57. – P. 2507-2510.
114. Sinha S. Controlling chaos in biology / S. Sinha // *Current Science*. – 1997. – V. 73. – P. 977-983.
115. Lorenz E.N. Deterministic nonperiodic flow / E.N. Lorenz // *J. Atmosferic Sci.* – 1963. – V. 20. – № 2. – P. 130-141.
116. Мун Ф. Хаотические колебания, М.: Мир, 1990,
117. Moon F. *Chaotic and Fractal Dynamics. An Introduction for Applied Scientists and Engineers*. Wiley & Sons. 1992,
118. Б.Р. Андриевский, А.Л. Фрадков. Управление хаосом: методы и приложения. Часть 1. Методы. – 2003, 52 с.
119. E. Ott. Controlling chaos/ E. Ott, C. Grebogi and J.A. Yorke // *Phys. Rev. Lett.* – 1990. – Vol. 64, no. 11. – P. 1196-1199.
120. E. Ott, C. Grebogi and J.A. Yorke, Controlling chaotic dynamical systems. In *Chaos: Soviet-American Perspectives on Nonlinear Science*, ed. D.K. Campbell, AIP, New York, 1990.
121. Roy R. Dynamical control of a chaotic laser: experimental stabilization of a globally coupled system / R. Roy, T. W. Murphy Jr., T. D. Maier Z. Gillis and E. R. Hunt // *Phys. Rev. Lett.* – 1992. – Vol. 68, no. 9. – P. 1259-1262.
122. Garfinkel A. Controlling cardiac chaos / A. Garfinkel, M. L. Spano, W. L. Ditto and J. N. Weiss // *Science*. – 1992. – Vol. 257. – P. 1230-1235.
123. Dressler U. Controlling chaos using time delay coordinates / U. Dressler and G. Nitsche // *Phys. Rev. Lett.* – 1992. – Vol. 68. – P. 1-4.
124. Auerbach D. Exploring chaotic motion through periodic orbits / D.

- Auerbach, P. Cvitanovic, J.-P. Eckmann, G. Gunaratne and I. Procaccia // Phys. Rev. Letters. – 1987. – Vol. 58, no. 23. – P. 2387-2389.
125. Lathrop D. P. Characterization of an experimental strange attractor by periodic orbits / D. P. Lathrop and E. J. Kostelich // Phys. Rev. A. – 1989. – Vol. 40, no. 7. – P. 4028-4032.
126. Schwartz I.B. Estimating regions of existence of unstable periodic orbits using computer-based techniques / I.B. Schwartz. // SIAM J. Numer. Anal. – 1983. – Vol. 20, no. 1. – P. 106-120.
127. So P. Extracting unstable periodic orbits from chaotic time series data / P. So, E. Ott, S.J. Schiff, D.T. Kaplan, T. Sauer and C. Grebogi // Phys. Rev. E. – 1997. – Vol. E55. – P. 5398-5417.
128. Galias Z. Rigorous numerical studies of the existence of periodic orbits for the Henon map / Z. Galias. // J. Univ. Comp. Sci. – 1998. – Vol. 4, no. 2. – P. 114-124.
129. Kearfott R.B. Algorithm 681: INTBIS, a portable interval Newton/bisection package/ R.B. Kearfott and M. Novoa // ACM Trans. Math. Software. – 1990. – Vol. 16, no. 2. – P. 152-157.
130. Lai Y.-C. Controlling chaos / Y.-C. Lai. // Comput. Phys. 8. – 1994. – P. 62.
131. E. Ott, C. Grebogi, J.A. Yorke, in: D. Campbell (Ed.), CHAOS/XAOC, Soviet-American Perspective on Nonlinear Science, American Institute of Physics, New York, 1990, p. 153-172.
132. F. Takens, Detecting strange attractors in turbulence, in: D.A. Rand, L.-S. Young (Eds.), Dynamical Systems and Turbulence, Lecture Notes in Mathematics, Vol. 898, Springer, New York, 1980, p. 366-381.
133. N. Packard, J. Crutchfield, J.D. Farmer, R. Shaw, Phys. Rev. Lett. 45 (1980) 712.
134. S. Boccaletti, C. Grebogi, Y.-C. Lai, H. Mancini, D. Maza. The Control of Chaos: Theory and Applications, Physics Reports 329 (2000) p. 103-197.

135. Анищенко В. С. Сложные колебания в простых системах. — М.: Наука, 1990.
136. Ю. А. Белов, О. С. Бичков, О. І. Чулічков. Математичні моделі, методи й алгоритми теоретичної та прикладної інформатики. Київ-2009, 226 с.
137. Arindam Basu. Construction of Poincare return maps for Rossler flow. School of Electrical and Computer Engineering, August 26, 2007, 10 p.
138. Guilherme L. D. Andrucioli, Ronilson Rocha, Rene O. Medrano-T. Experimental Characterization of Nonlinear Systems Using LabVIEW, 20th International Congress of Mechanical Engineering, November 15-20, 2009, Gramado, RS, Brazil.
139. Кузнецов С.П. Динамический хаос : [Текст] / Сергей Петрович Кузнецов. – Москва.: Изд-во Физматлит, 2001. – 296 с.
140. Pehlivan I. Design and simulations of the arneodo attractor's chaotic oscillator and signal masking circuits : [Текст] / Ihsan Pehlivan, Yilmaz Uyaroglu, M. Ali Yalçin, Selçuk Coskun // 5th International Advanced Technologies Symposium. – 2009. – 6 p.
141. Suykens J. A. K. Generation of n-double scrolls ( $n = 1; 2; 3; 4; \dots$ ) / J. A. K. Suykens and J. Vandewalle // IEEE Trans. Circuits Syst. I, Vol. 40, Nov. 1993. – p. 861-867.
142. Suykens J. A. K. A family of n-scroll attractors from a generalized Chua's circuit / J. A. K. Suykens, A. Huang, and L. O. Chua // Int. J. Electron. Commun., Vol. 51, no. 3, 1997. – p. 131-138.
143. Tang K.S. Generation of n-scroll attractors via sine function / Tang K.S., Zhong G.Q., Chen G. and Man K.F. // IEEE Trans. Circuits and Systems-I, Vol. 48, No. 11, 2001. – p. 1369-1372.
144. Yalçin M.E. Generation of n-scroll attractors by Josephson junctions / Yalçin M.E. and Suykens J.A.K. // Proceedings of the 2005 Int. Symposium on

Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA 2005), Bruges, Belgium, Oct. 18-21, 2005. – p. 501-504.

145. Yalçın M.E. Multi-scroll and hypercube attractors from Josephson junctions / Yalçın M.E., Suykens J.A.K., Vandewalle J. // Proceedings of the 2006 IEEE Int. Symposium on Circuits and Systems, Island of Kos, Greece, May 21-24, 2006. – p. 718-721.

146. Aceng Sambas. Design and analysis bidirectional chaotic synchronization of Rossler circuit and its application for secure communication / Aceng Sambas, Mada Sanjaya, Mustafa Mamat, Halimatussadiyah // Applied Mathematical Sciences, Vol. 7, no. 1, 2013. – p. 11-21.

147. Aceng Sambas. Unidirectional Chaotic Synchronization of Rossler Circuit and Its Application for Secure Communication / Aceng Sambas, Mada Sanjaya WS, Halimatussadiyah // WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS, Issue 9, Volume 11, September 2012, p. 506-515.

148. Rössler O.E. An equation for continuous chaos // Physics Letters A, Vol. 57, No. 5, 1976. – p 397-398.

149. Torresand L. B., Aguirre L. A. PCCHUA – A Laboratory setup for real-time control and synchronization of chaotic oscillations // International Journal of Bifurcation and Chaos. Vol. 15. 2005. № 8. P. 2349-2360.

150. Stavrínides S.G., Anagnostopoulos A.N., Miliou A.N., Valaristos A., Magafas L., Kosmatopoulos K. and Papaioannou S. Digital Chaotic Synchronized Communication System // Journal of Engineering Science and Technology. Review 2 (1). 2009. P. 82-86.

151. Wagemakers A., Buldu J.M. and Sanjun M.A.F. Experimental demonstration of bidirectional chaotic communication by means of isochronal synchronization // EPL. 2008. № 81. P. 40005.

152. Стасєв Ю.В., Васюта К.С., Женжєра С.В. Інформаційні системи на основі динамічного хаосу // Системи озброєння і військова техніка. 2009. №1(17). С. 134-138.

153. Galias Zbigniew. Study of Poincare map associated with the Chua's circuit using interval arithmetic // International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications. Xi'an, PRC. October 7-11, 2002. P. 779-782.
154. Ramírez-Ávila Gonzalo M., Gallas Jason A.C. How similar is the performance of the cubic and the piecewise-linear circuits of Chua? // Physics Letters A 375. 2010. P. 143-148.
155. Хаслер М.Ж. Электрические схемы с хаотическим поведением // ТИИЭР. Хаотические системы (тематический выпуск). 1987. Т. 75. №8. С. 40-54.
156. Сюсань У. Семейство схемы Чжуа // ТИИЭР. Хаотические системы (тематический выпуск). 1987. Т. 75. №8. С. 55-65.
157. Мацумото Т. Хаос в электронных схемах // ТИИЭР. Хаотические системы (тематический выпуск). 1987. Т. 75. №8. С. 66-87.
158. Guo-Qun Zhong. "Implementation of Chua's Circuit with a Cubic Nonlinearity" // IEEE Transactions on circuits and systems – I: Fundamental theories and applications, Vol. 41, No. 12, p. 934-941, December 1994.
159. M. Lakshmanan and K. Murali, Chaos in Nonlinear Oscillators: Controlling and Synchronization, World Scientific, Singapore 1996.
160. A. N. Njah and U. E. Vincent, Chaos, Solitons and Fractals 37, 1356 (2008).
161. J. Yu, W. J. Zhang, and X. M. Gao, Chaos, Solitons and Fractals 33, 1307 (2007).
162. Murali K, Tamasevicius A, Mykolaitis G, Namajunas A & Lindberg E, Hyperchaotic circuits with unstable oscillators, Nonlinear phenomena in complex systems, 2000, p7.
163. Sinha S. and Biswas D., Phys. Rev. Lett. 71, 2010 (1993); Glass L. and Zheng W., Int. J. Bifurcation Chaos Appl. Sci. Eng. 4, 1061 (1994).
164. Sinha S., Phys. Rev. E 49, 4832 (1994); Phys. Lett. A 199, 365 (1995); Int. J. Mod. Phys. B 9, 875 (1995).

165. Sinha S., Phys. Rev. E 63, 036212 (2001); Sinha S. and Ditto W., *ibid.* 63, 056209 (2001); Sinha S., in *Nonlinear Systems*, edited by Sahadevan R. and Lakshmanan M. (Narosa, New Delhi, 2002).
166. J.F. Heagy, "A physical interpretation of the Henon map," Phys. D 57 (1992) 436-446.
167. W. F. H. Al-Shameri, "Dynamical properties of the Henon mapping," Int. Journal of Math. Analysis, Vol.6 49 (2012) 2419-2430.



**Акти впровадження  
результатів дисертаційної роботи**

Публічне акціонерне товариство «Укртелеком»  
Чернівецька філія

вул. Героїв Майдану, 7,  
м. Чернівці, 58001, Україна  
Тел.: +380 372 553102, +380 372 552790  
Факс: +380 372 553709



**Акт**  
використання результатів дисертаційної роботи  
**Русина Володимира Богдановича**  
на тему:  
**„Моделювання методів управління динамічним хаосом  
та їх практичне застосування”**

Даний акт складений в тому, що наукові та практичні результати дисертаційної роботи Русина В.Б. „Моделювання методів управління динамічним хаосом та їх практичне застосування” використані на ПАТ „Укртелеком” (Чернівецька філія, м. Чернівці) при дослідженні передавання інформації на основі динамічного хаосу з використанням всесвітньої мережі INTERNET.

Директор Чернівецької філії  
ПАТ „Укртелеком”



Робулець П. Ф.



**Приватне підприємство  
“АРТОН”**

58029 м.Чернівці, пр. Незалежності,106.

ЗКПО 30150047

р/р 2600001440089 АKB“Правекс-банк”,МФО 321983 м.Київ  
т/ф (0372)584-373, т. (0372)557-498, (0372)584-393 Email:arton

---

**Акт**

використання результатів дисертаційної роботи

**Русина Володимира Богдановича**

на тему:

**„Моделювання методів управління динамічним хаосом  
та їх практичне застосування”**

Даний акт складений в тому, що наукові та практичні результати дисертаційної роботи Русина В.Б. „Моделювання методів управління динамічним хаосом та їх практичне застосування” використані на ПП „Артон” (м. Чернівці) при дослідженні умов виникнення та застосування методів керування та усунення хаотичних коливань в телефонних комунікаторах типу БСКТ-1 і БСКТ-2.

Генеральний директор  
ПП „Артон”



Мисевич І. З.