

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет «Львівська політехніка»

**Русин Володимир Богданович**



УДК 621.391.01

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

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів – 2017

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Чернівецькому національному університеті імені Юрія Федьковича Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** кандидат фізико-математичних наук, доцент  
**Кушнір Микола Ярославович**,  
Чернівецький національний університет  
імені Юрія Федьковича,  
доцент кафедри радіотехніки  
та інформаційної безпеки

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Матвійчук Ярослав Миколайович**,  
Національний університет  
«Львівська політехніка»,  
професор кафедри телекомунікацій

доктор технічних наук, професор  
**Кіріченко Людмила Олегівна**,  
Харківський національний  
університет радіоелектроніки,  
професор кафедри прикладної математики

Захист відбудеться 12 травня 2017 р. о 16 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.05 у Національному університеті «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, корп. XI, ауд. 218).

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розіслано “ 12 ” квітня 2017 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
доктор технічних наук, професор



Р.А. Бунь

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** 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 маскування 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 маскування та / або відновлення інформації. Значення коефіцієнтів керування знаходяться в діапазоні 0,01 – 0,30.

2. Вперше запропоновано схемотехнічну 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 схемотехнічне 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 схмотехнічних 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 схмотехнічний аналіз генератора, що реалізує хаотичну систему Реслера. Змодельована схема генератора підтверджує відповідність схмотехнічного 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 схмотехнічного 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 схмотехнічне 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-листяві 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 167 позиції. Загальний обсяг дисертації – 144 сторінки машинописного тексту, що містить 75 рисунків та 3 таблиці.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі проведених досліджень, визначено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, представлені методи, об'єкт і предмет досліджень, зазначено особистий внесок здобувача, наведено дані щодо апробації результатів дисертації.

**У першому розділі** здійснено аналіз літературних джерел, присвячених дослідженню теоретичних та прикладних аспектів використання детермінованого хаосу, висвітлено основні положення та параметри детермінованого хаосу. Розглянуто та проаналізовано основні методи управління хаосом. Приведено приклад розрахунку перетину Пуанкаре для хаотичної системи Реслера та його програмна реалізація. На основі аналізу літературних джерел сформульовані завдання дисертаційних досліджень.

**У другому розділі** представлено результати моделювання на основі програмного середовища LabView хаотичних систем Арнеодо, Пехлівана, мульти-виткової системи типу Jerk. Для останньої вперше знайдено та приведено коефіцієнти для керування хаотичними коливаннями. Значення коефіцієнтів можуть бути застосовані як ключі для маскуванню та / або відновлення інформації. Значення коефіцієнтів керування знаходяться в діапазоні 0,01 – 0,30.

Мульти-виткова хаотична системи типу „jerk” описується наступними рівняннями:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= y, \\ \frac{dy}{dt} &= z, \\ \frac{dz}{dt} &= -ay - az + ag(x), \end{aligned} \tag{1}$$

де  $g(x) = \sin(2\pi bx)$  – нелінійна функція,  $x, y, z$  – динамічні змінні, що визначають фазову площину,  $a, b$  – системні параметри.

Для керування хаотичною мульти-витковою системою типу „jerk” ми додаємо в кожне рівняння (1) коефіцієнт керування  $k$ :



$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= k \cdot y, \\ \frac{dy}{dt} &= k \cdot z, \\ \frac{dz}{dt} &= k \cdot (-ay - az + ag(x)).\end{aligned}\tag{2}$$

В табл. 1 наведено значення коефіцієнтів керування.

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів керування	Кількість витків хаотичного атратора
$k = 0.01, k = 0.02$	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
$k \geq 0.26$	хаос

Рисунок 1 демонструє блокову схему, що реалізує хаотичну мульти-виткову систему типу „jerk”.

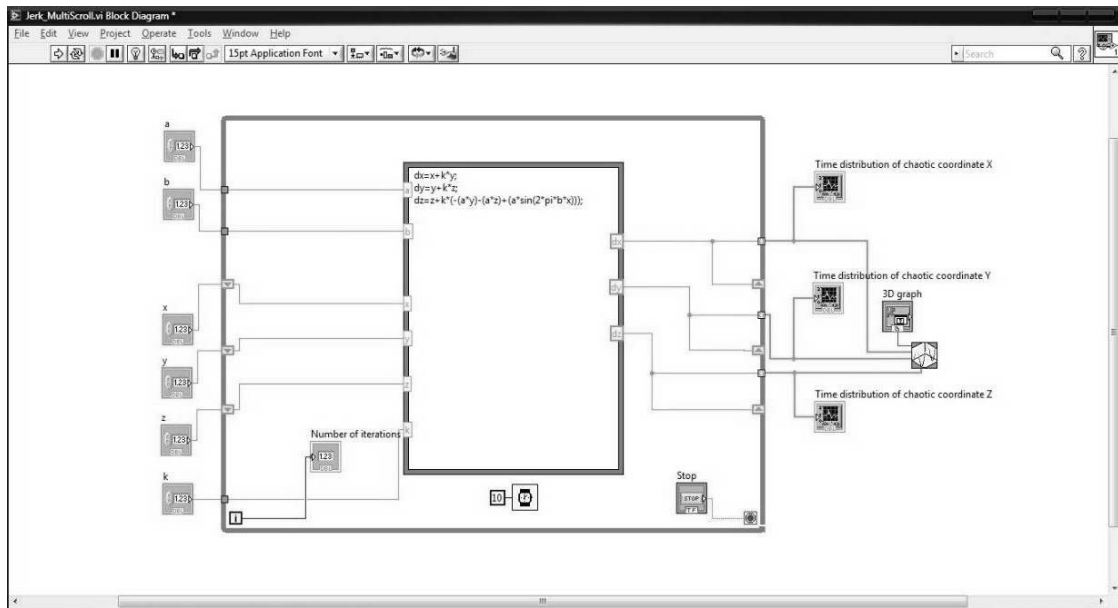


Рис. 1. Блокова схема, яка реалізує хаотичну мульти-виткову систему типу „jerk”

Рисунок 2 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  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ .

Рисунок 3 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  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ .

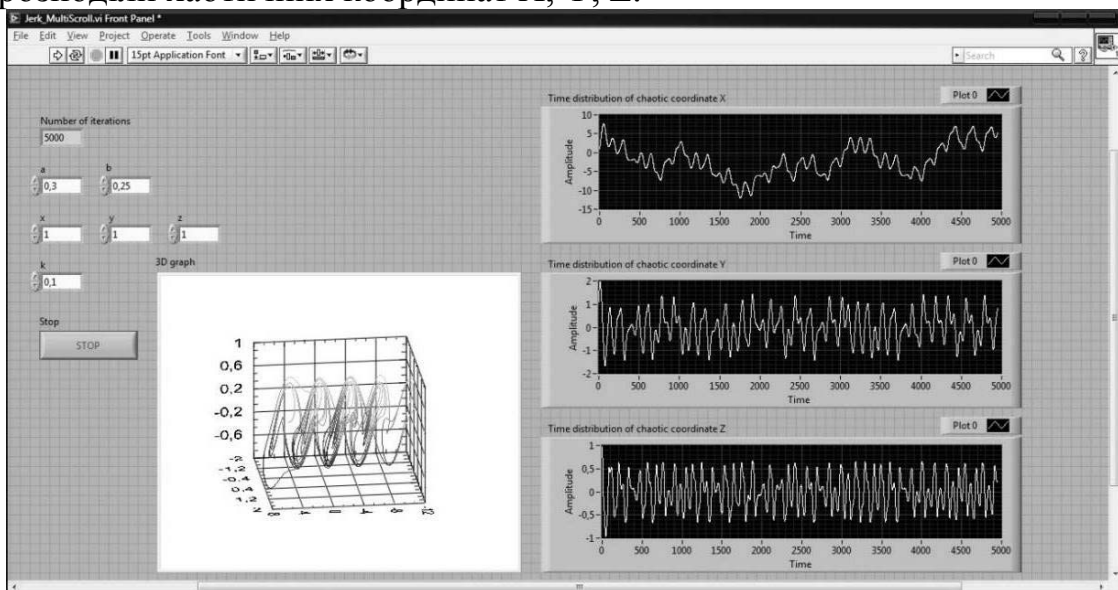


Рис. 2. Інтерфейс програми, що демонструє 5-витковий керований атрактор і часові розподіли хаотичних координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  хаотичної мульти-виткової системи типу „jerk”

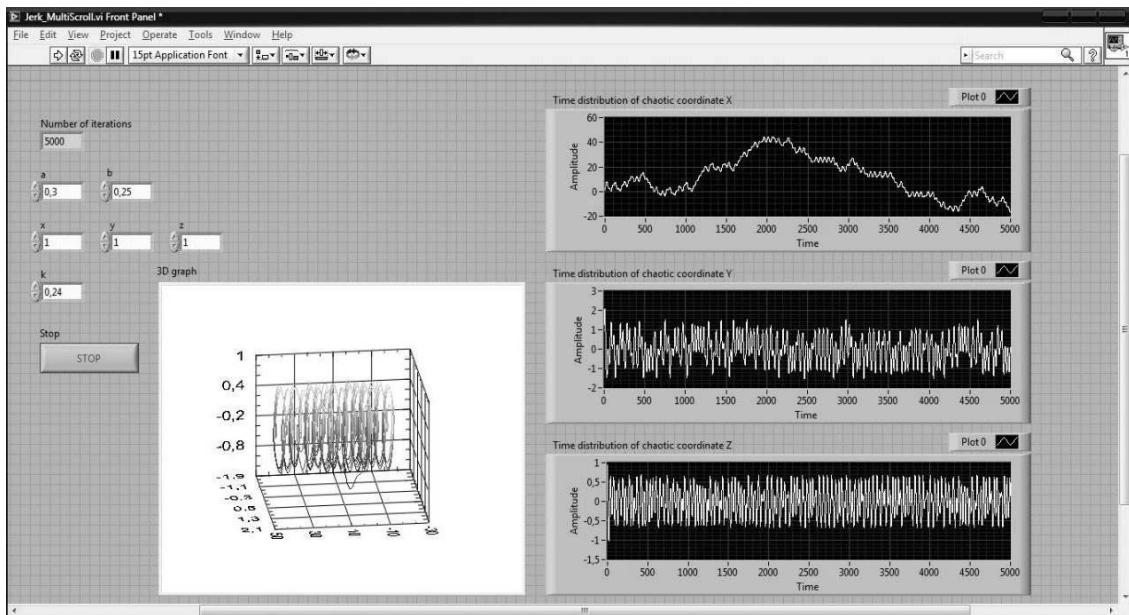


Рис. 3. Інтерфейс програми, що демонструє 16-витковий керований аттрактор і часові розподіли хаотичних координат X, Y, Z хаотичної мультилистової системи типу „jerk”

У третьому розділі представлено математичну модель хаотичної системи Реслера. За допомогою програми для схемотехнічного моделювання MultiSim проведено дослідження схеми генератора, що реалізує хаотичну систему Реслера. Представлено змодельовану систему маскування та відновлення інформаційного носія хаотичною системою Реслера за допомогою програмного середовища LabView. Також проведено керування хаотичними коливаннями, що генеруються системою Реслера.

На рис. 4 представлено блочну схему реалізації хаотичної системи Реслера.

Основною функціональною частиною є формульний вузол, в який заносяться три нелінійні диференціальні рівняння (3). 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 у 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.

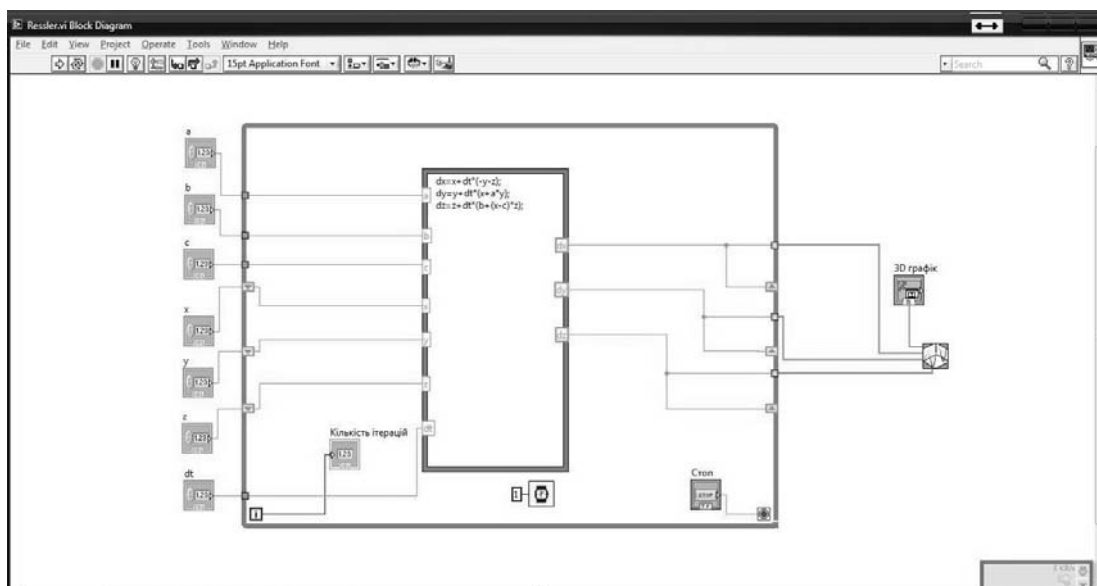


Рис. 4. Блочна схема реалізації хаотичної системи Реслера

На рис. 5 представлено результати моделювання з допомогою MultiSim. Згенерований хаотичний сигнал у площині XY представлений на віртуальному осцилографі. Координати X на схемі відповідає вихід операційного підсилювача U1A, координати Y – вихід операційного підсилювача U2A, координати Z – вихід операційного підсилювача U5A.

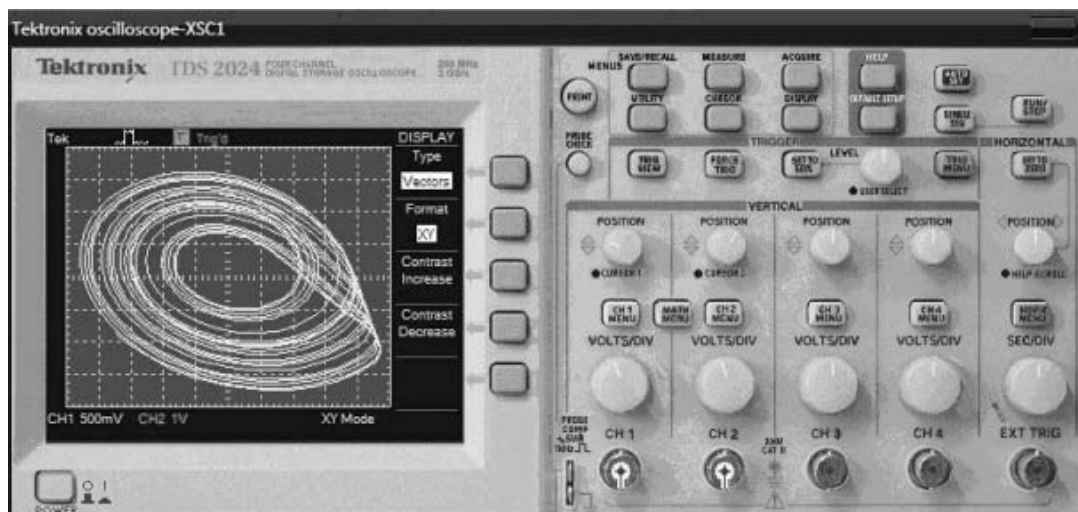


Рис. 5. Змодельований хаотичний сигнал системи Реслера

На рис. 6 представлено програмне забезпечення, що демонструє маскування інформаційного носія хаотичним, а саме хаотичною системою Реслера.

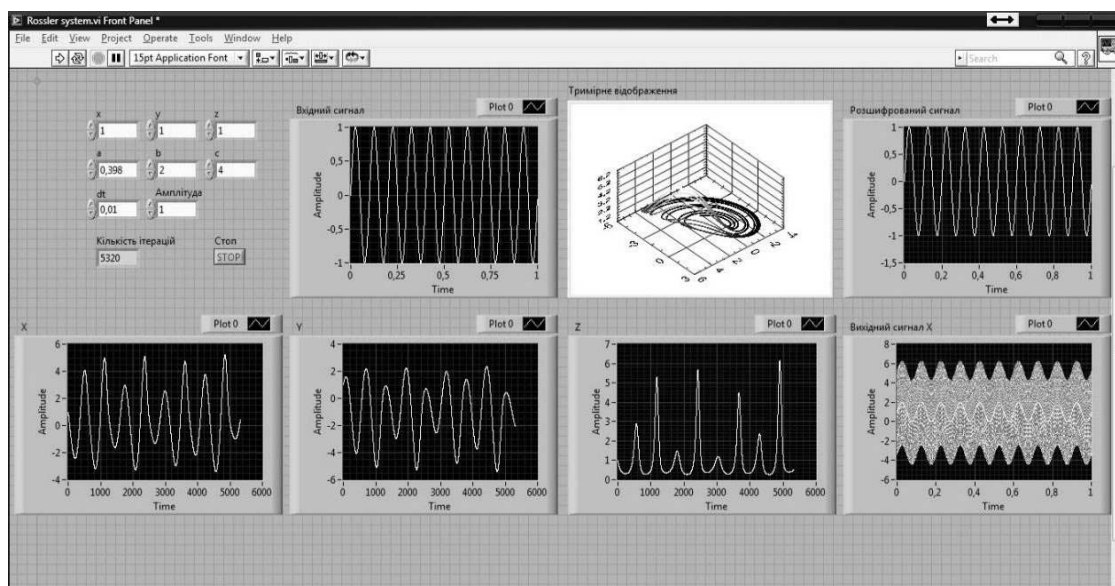


Рис. 6. Інтерфейс програми, що демонструє маскувannya та відновлення інформаційного носія хаотичною системою Реслера

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

Слід зазначити, що ключем маскувannya корисного сигналу (інформації) може бути також число періодів орбіт хаотичного атратора. Для керування хаотичною системою Реслера ми зафіксуємо системні параметри  $a = 0,1$  і  $b = 0,1$ , а  $c$  буде змінюватись. В залежності від зміни  $c$ , можна виділити окремі різноперіодні (керовані) атратори.

У **четвертому розділі** представлено комплексне моделювання нелінійних елементів, спроектовано хаотичний генератор Чуа з кубічною нелінійністю. Змодельовано та практично реалізовано хаотичний генератор Ван-дер-Поля-Дюфінга. Досліджено хаотичну системи типу „jerk”. Здійснено керування хаотичними коливаннями пороговим методом в схемі Чуа.

#### **Дослідження хаотичного генератора Ван-дер-Поля-Дюфінга**

Спроектовану принципову електричну схему пристрою наведено на рис. 7.

Дана схема 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 операційного підсилювача з шістьма діодами.

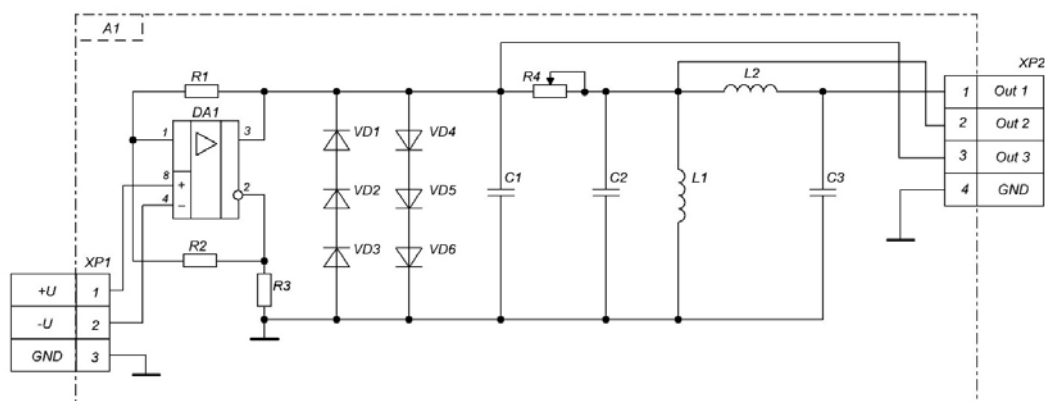


Рис. 7. Схема електрична принципова

Хаотична поведінка схеми була чисельно досліджена, підтверджена математично і експериментально реалізована. Зміна номіналу опору керуючого елемента  $R4$  в діапазоні 2,10 кОм – 2,21 кОм дозволяє отримувати керовану хаотичну систему Ван-дер-Поля-Дюфінга.

Для дослідження генератора було використано програмне забезпечення Мікро-Сар 9, результати моделювання якого представлено на рис. 8.

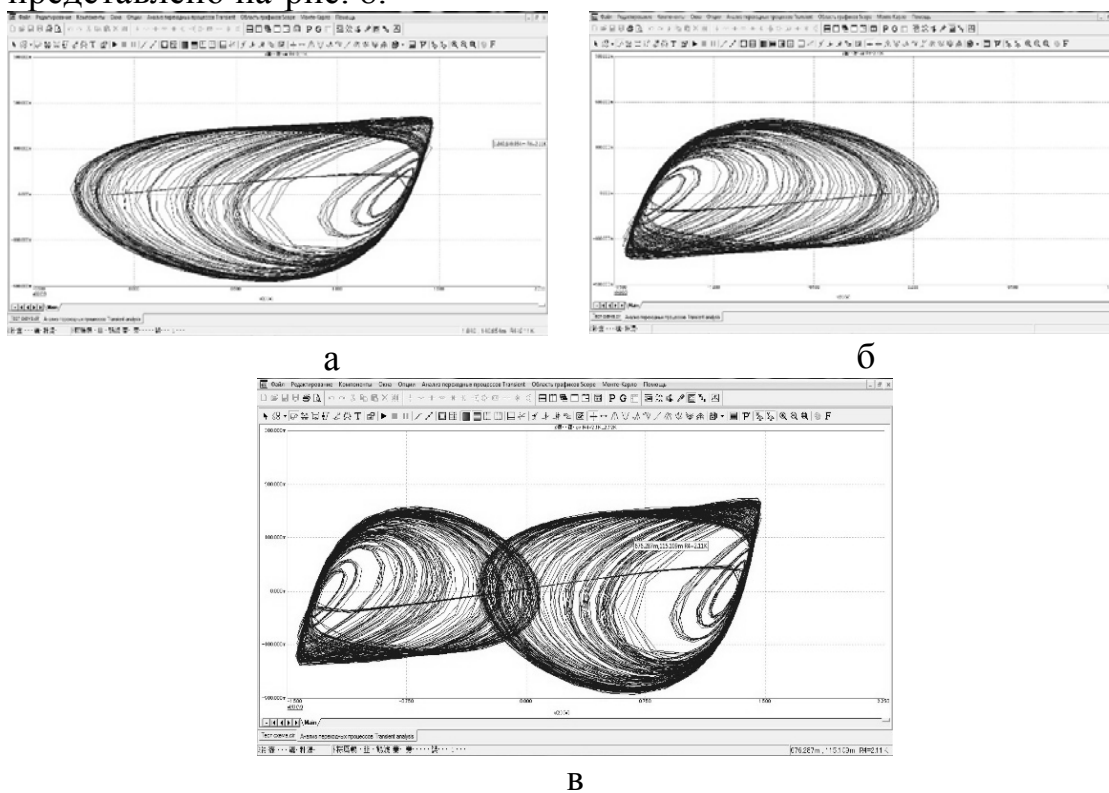


Рис. 8. Хаотичні атрактори системи Ван-дер-Поля-Дюфінга отримані при комп'ютерному моделюванні (фазові траєкторії на площині  $U_{C1} - U_{C2}$ ): а – при значенні опору  $R4=2,11$  кОм; б – при значенні опору  $R4=2,13$  кОм; в – при значенні опору  $R4=2,12$  кОм

Практичні результати керування хаотичною схемою генератора Ван-дер-Поля-Дюффінга наведено на рис. 9.

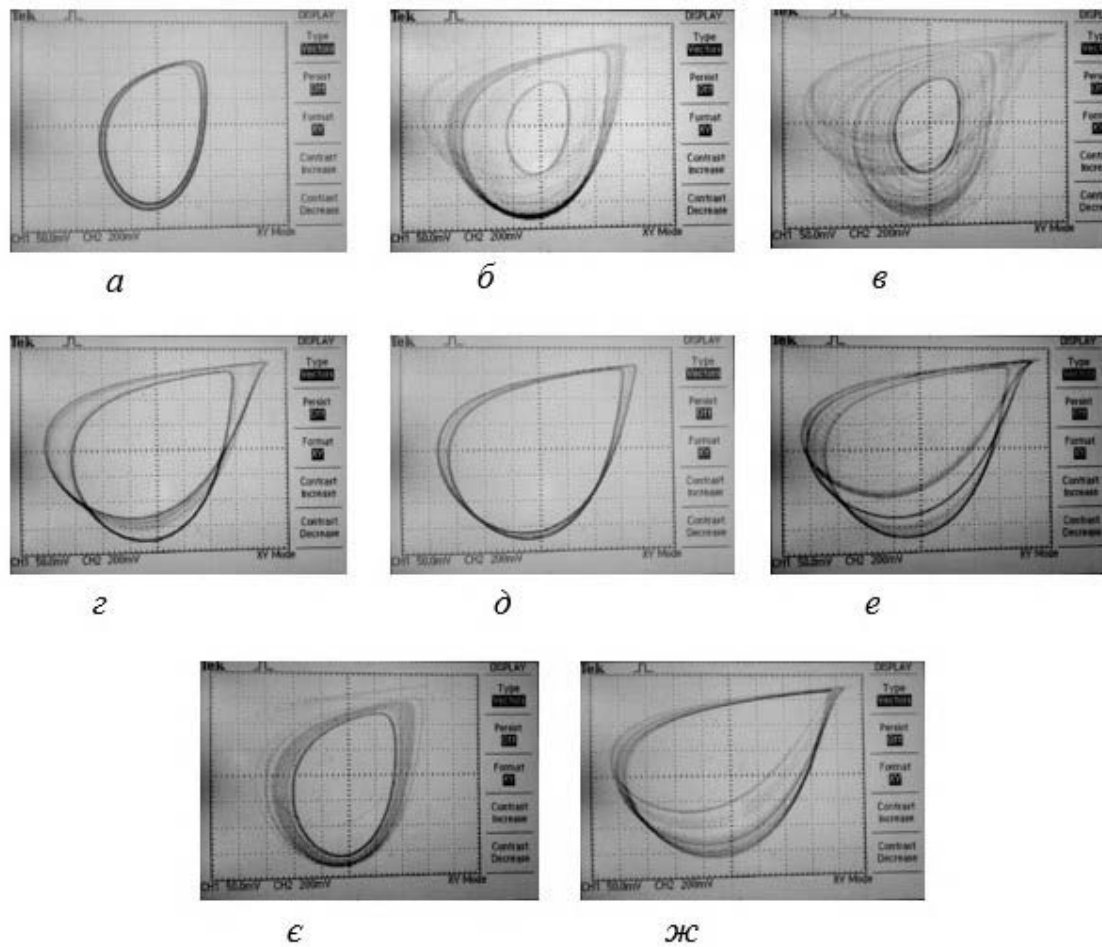


Рис. 9. Хаотичні аттрактори системи Ван-дер-Поля-Дюффінга експериментально отримані в площині автономного генератора вищого порядку ( $U_{C1} - U_{C2}$ ): *a* – при значенні опору  $R4=2,10$  кОм; *б* – при значенні опору  $R4=2,11$  кОм; *в* – при значенні опору  $R4=2,12$  кОм, *г* – при значенні опору  $R4=2,14$  кОм, *д* – при значенні опору  $R4=2,15$  кОм, *е* – при значенні опору  $R4=2,19$  кОм, *є* – при значенні опору  $R4=2,13$  кОм, *ж* – при значенні опору  $R4=2,21$  кОм

На рис. 10 представлена змодельована схема генератора, що реалізує хаотичну систему типу „jerk” за допомогою програмного середовища MultiSim. Хаотична система типу „jerk” описується рівнянням

$$\ddot{x} + a\dot{x} + b|x| + 1 = 0. \quad (3)$$

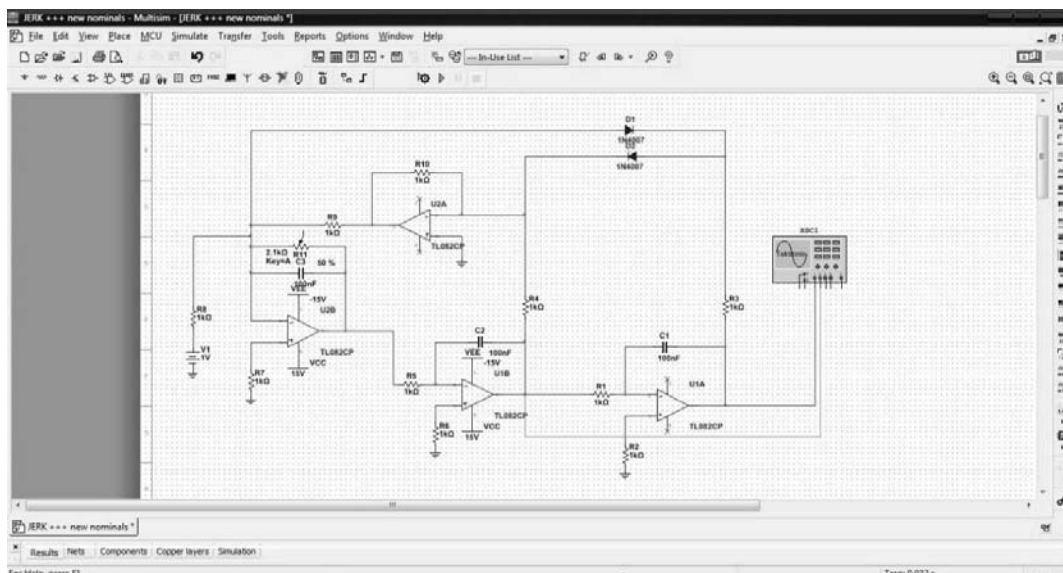


Рис. 10. Змодельована схема генератора, що реалізує хаотичну систему типу „jerk” за допомогою програмного середовища MultiSim

Рисунок 11 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.

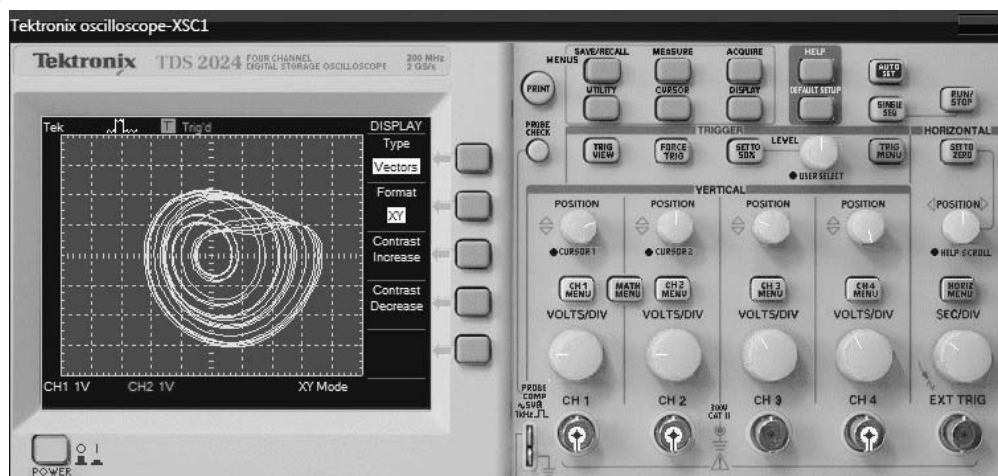


Рис. 11. Атрактор хаотичної системи типу „jerk”

### Керування хаотичними коливаннями пороговим методом у схемі Чуа

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  $x^*$ . Динаміка триває до наступного випадку перевищення порогу  $x_i$ , коли контроль знову повертає його значення  $x^*$ .

Схема для експериментального дослідження керування хаотичними коливаннями пороговим методом у схемі Чуа представлена на рис. 12.



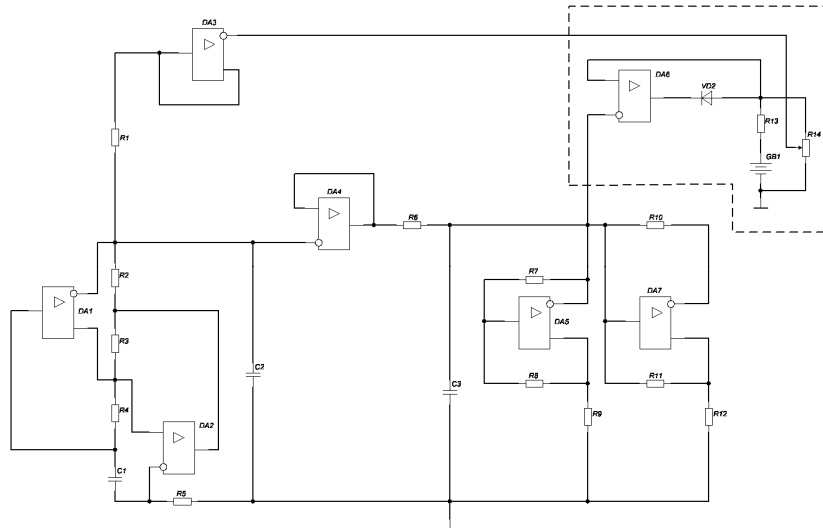


Рис. 12. Хаотична схема Чуа з контролюючою схемою порогового рівня (показано пунктиром)

Проведено практичне дослідження, результати якого наведено на рис. 13.

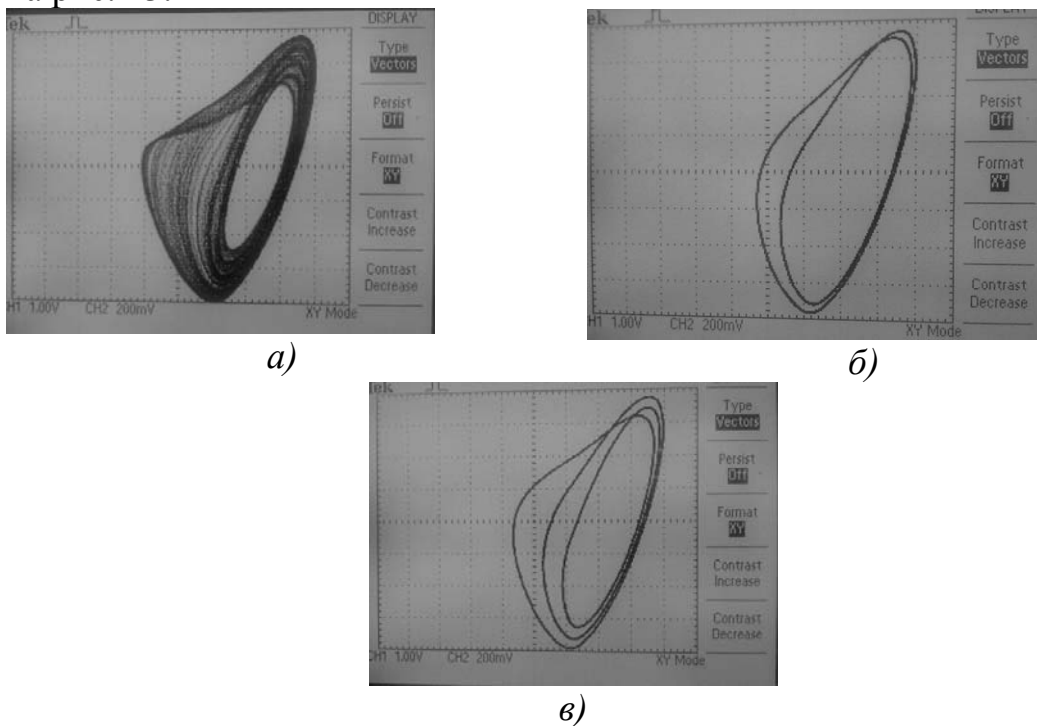


Рис. 13. Атрактори, реалізовані схемою Чуа (в площині  $U_{C2} - U_{C3}$ ):  
*a* – некерований атрактор; *б* – 2-періодний цикл, отриманий при рівні порогу 2,7 В; *в* – 4-періодний цикл, отриманий при рівні порогу 2,71 В.

Відповідні значення схемних компонентів:  $C1 = 23,5 \mu F$ ,  $C2 = 100 nF$ ,  $C3 = 10 nF$ ,  $DA1 - DA7$ : операційний підсилювач  $\mu A741$ ,  $R1 - R4 = 1 k\Omega$ ,  $R5 = 1,8 k\Omega$ ,  $R6 = 1710 \Omega$ ,  $R7, R8 = 220 \Omega$ ,  $R9 = 2,2 k\Omega$ ,  $R10, R11 = 22 k\Omega$ ,  $R12 = 3,3 k\Omega$ ,  $R13 = 1 k\Omega$ ,  $R14 = 100 k\Omega$ ,  $VD1 = 1N4148$ .

## 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, мультилистової Jerk.
4. Експериментально проведено керування хаотичними коливаннями генераторів Чуа та Ван-дер-Поля-Дюфінга.
5. Створено програмний комплекс для генерування коливачів хаотичних систем, маскуванню інформації, передавання замаскованої інформації, а також її відновлення.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Kushnir M. 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.
2. Rusyn V. B. Modeling and research of chaotic Rossler System with LabView and Multisim software environments / Rusyn V. B. // Bulletin of National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Series Radiotechnique Radioapparatus Building. – Edition 59. – 2014. – P. 21-28.
3. Rusyn V. Modeling and research of the Van der Pol-Duffing generator / Volodymyr Rusyn, Laurentiu Stoleriu // Erasmus Dialog, Alexandru Ioan Cuza University of Iasi. – 2015. – № 1. – P. 55-63.
4. 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. – Т. 1, вип. 2. – С. 60-63.
5. 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 // Радиоелектроника и информатика. – 2011. – № 2 (53). – С. 12-16.

6. 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.
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. 94-99.
8. Кушнір М. Я. Двоконтурна модифікація хаотичного генератора Чуа / М. Я. Кушнір, В. Б. Русин. // VII Харківська конференція молодих науковців “Радіофізика та електроніка» (YSC), 12-14 грудня 2007. – Харків, 2007. – 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 // Дванадцята міжнародна науково-практична конференція „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 / Русин В. Б., Галамейко О. О., Невельський О. О., Сінчук О. В. // 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 / Русин В. Б., Кушнір М. Я., Рождественська М. Г. // 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 В. Б. 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 В. Б. Моделювання системи маскування та розшифрування інформаційного носія хаотичною системою Реслера за допомогою програмного середовища LABVIEW / Русин В. Б. // Тези науково-практичної конференції «Інформаційно-вимірювальні 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

- ція „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. – 2014. – P. 122.
  17. Rusyn V. Modeling of the hysteretic Chua's diode / Rusyn V. // 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. – Iasi, Romania, 2015. – P. 5.
  19. Rusyn V. 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. – Paris, France, 2015. – P. 110.

### Анотації

**Русин В. Б. Моделювання методів управління динамічним хаосом та їх практичне застосування.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Національний університет “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України, Львів, 2017.

Робота присвячена вирішенню задач комп'ютерного моделювання, чисельного аналізу та керування коливаннями хаотичних систем та генераторів хаосу, їх практичної реалізації та дослідження можливості використання у системах передавання та приймання інформації.

Практично застосовано методи управління хаосом. Приведено практичні результати керування схемою Чуа пороговим методом, генератором Ван дер Поля-Дюфінга.

*Ключові слова:* хаос, управління, генератор хаотичних сигналів, математичне моделювання, LabView.

**Русын В. Б. Моделирование методов управления динамическим хаосом и их практическое применение.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. – Национальный университет “Львівська політехніка” Министерство науки и образования Украины, Львов, 2017.

Работа посвящена решению задач компьютерного моделирования, численного анализа и управления колебаниями хаотических систем и генераторов хаоса, их практической реализации и исследования возможности использования в системах передачи и приема информации.

Практически применены методы управления хаосом. Приведены практические результаты управления схемой Чуа пороговым методом, генератором Ван дер Поля-Дюффинга.

*Ключевые слова:* хаос, управление, генератор хаотических сигналов, математическое моделирование, LabView.

**Rusyn V. B. Modeling of control methods of dynamic chaos and their practical application.** – On the right of manuscript.

Ph.D. thesis in Engineering Science, specialty 01.05.02 – Mathematical Modeling and Computational Methods. – Lviv Polytechnic National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2017.

The work is devoted to solving problems of computer modeling, numerical analysis and control of fluctuations in chaotic systems and generators of chaos, their practical implementation and research for use to transmitting and receiving information.

The developed software suite in LabVIEW for investigation of continuous time dynamic systems that enable to graph phase trajectories, timing diagrams and chaotic attractors.

Main results of which determine the novelty of the dissertation work are as follows:

- For the first time developed a set of programs based on LabView programming environment to study the processes of chaotic oscillations of nonlinear dynamics.

- The first time offered system using LabView programming environment for transmission, masking and recovery chaotic signals.

- The first time offered mathematical model by which found coefficients for control of chaotic multi-Jerk system. The coefficients can

be used as keys for masking and / or recovery of information. The coefficients of control in the range 0.01 – 0.30.

- Modified chaotic system Van der Pol-Duffing. Experimentally installed resistance range to control the chaos within 2.10 kOhms – 2.21 kOhms.

- Modified and experimentally verified threshold method to control chaotic oscillations of Chua circuit.

*Key words:* chaos, control, generator of chaotic signals, mathematical modelling, LabView.

Підписано до друку 10.04.2017. Формат 60x 84/16  
Папір офсетний. Друк різнографічний. Ум.-друк. арк. 0,9.  
Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100. Зам. А-006п.  
Видавництво та друкарня Чернівецького національного університету  
58002, Чернівці, вул. Коцюбинського, 2  
*e-mail: ruta@chnu.edu.ua*

*Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №891 від 08.04.2002 р.*