

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Курський Юрій Сергійович

УДК 530.182:53.087.45



**ТЕОРЕТИЧНА МОДЕЛЬ ВИМІРЮВАНЬ
В НЕЛІНІЙНИХ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМАХ**

01.04.01 — фізика приладів, елементів і систем

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Харків — 2019

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки МОН України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
МАЧЕХІН ЮРІЙ ПАВЛОВИЧ,
Харківський національний університет
радіоелектроніки, завідувач кафедри фізичних
основ електронної техніки.

Захист відбудеться «28» листопада 2019 р.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
ПРОКОПОВ ОЛЕКСАНДР ВАСИЛЬОВИЧ,
Національний науковий центр «Інститут
метрології», заступник генерального директора з
науково-метрологічної роботи.

доктор технічних наук, професор
ПОЛЯРУС ОЛЕКСАНДР ВАСИЛЬОВИЧ,
Харківський національний автомобільно-дорожній
університет, завідувач кафедри метрології та
безпеки життєдіяльності.

доктор фізико-математичних наук, професор
СЬЛОТОВ МИХАЙЛО МИХАЙЛОВИЧ,
Чернівецький національний університет,
професор кафедри оптики і спектроскопії.

Захист відбудеться «28» листопада 2019 р. о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.64.052.04 Харківського національного університету радіоелектроніки.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки, м. Харків, пр. Науки 14.

Автореферат розісланий «28» жовтня 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
к.т.н., доц.



Є.А. Разумов-Фризюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Дослідження нелінійних динамічних систем (НДС) відноситься до ряду актуальних завдань сучасної науки. Такі системи об'єднують велику кількість фізичних і біофізичних об'єктів і процесів: лазери, оптичні системи конфіденційного зв'язку, океан, клімат, біопопуляції та організми. Внаслідок прояву таких властивостей, як дисипативність, нелінійність, хаотизація та самоорганізація, НДС є одними з найскладніших для вивчення, математичного опису та управління об'єктів.

Фізико-математичні основи досліджень НДС закладені в роботах А. Н. Колмогорова, Е. Лоренца, Дж. Йорка, С. Смейла, І. Пригожина, Г. Хакена, Ю. Л. Клімонтовіча та ін. В. Л. Гінзбург у списку «особливо важливих і цікавих проблем» зазначав нелінійну фізику, турбулентність, солітони, хаос, дивні атрактори.

Численні сучасні дослідження хаотизації та самоорганізації НДС свідчать, що розвиток нових теорій, моделей, методів і методик дослідження таких систем має важливе значення для нелінійної оптики, радіофізики, оптоінформатики, телекомунікацій тощо. Спостерігається підвищений інтерес до складної динаміки в лазерній фізиці — досліджуються механізми та процеси, що спричиняють хаотизацію лазерного випромінювання. При цьому виділяють два напрямки досліджень. Перший спрямований на боротьбу з хаотичними режимами, хаотизація веде до зниження стабільності параметрів випромінювання, що є неприйнятним для лазерів, які застосовуються в вимірювальних, медичних та інформаційних технологіях. Другий — на генерацію та управління хаотичним випромінюванням для використання в хаотичних інформаційних системах. У зв'язку з цим є актуальною задача генерації лазерних імпульсів із керованим рівнем стабільності частоти випромінювання, частоти проходження, амплітуди, несівної частоти тощо.

Вивчення клімату, океану та біосистем, як НДС, розглядається як умова забезпечення точності оцінювання їх стану та прогнозу. Дослідження людини, як біофізичної НДС, дозволить розробляти прилади, системи діагностики та лікування, складати індивідуальні програми лікування пацієнтів та тренування спортсменів, раціонально використовувати індивідуальні здібності.

Формулювання проблеми. Успішна реалізація завдань дослідження, просторово-часового моделювання, прогнозування та управління НДС залежить від коректності теорій і методів досліджень. Ключовим методом експериментальних досліджень є вимірювання. Незважаючи на інтерес до досліджень НДС, теорія та практика вимірювань в НДС тривалий час не розвивалися. При цьому класична теорія вимірювань та створені в її рамках моделі вимірювань побудовані на принципах і фізико-математичних основах, які не враховують такі властивості НДС, як інтервальність значень вимірюваних величин, можливість розвитку детермінованих, стохастичних та хаотичних режимів, сильна залежність від початкових умов і шумів, еволюція та самоорганізація. Невідповідність основ класичної теорії вимірювання

процесам в НДС негативно впливає на достовірність досліджень таких систем і можливість управління.

Зазначені обставини дозволяють вважати створення теорії дослідження НДС, заснованої на моделях вимірювань в НДС, актуальною теоретико-прикладною задачею, що має важливе значення для розвитку нових методів та методик експериментальних досліджень у галузі фізики, зокрема, при дослідженні процесів у приладах та системах, процесів самоорганізації та динаміки ієрархічних систем, а також для розроблення та експлуатації лазерів із хаотичними характеристиками випромінювання, медичних приладів і систем вимірювання та діагностики стану організму.

Ступінь дослідження проблеми. Дослідженням і вимірюванням параметрів складних систем присвячені роботи В. А. Грановського, В. В. Лечнева, В. Т. Кондратова, Ю. В. Бакшиєвої, Р. Е. Тайманова, В. П. Фішера, А. Гуєра та ін. Однак, незважаючи на актуальність теми, єдиної універсальної теорії, яка об'єднує теоретичні та експериментальні завдання досліджень і вимірювань в НДС різного походження, до недавнього часу не існувало. Системно до питання вимірювання і дослідження НДС підійшов проф. Ю. П. Мачехін. У роботах із дослідження параметрів лазерного випромінювання він звернув увагу на необхідність створення нової теорії, що об'єднуватиме завдання дослідження та вимірювання в НДС. Ідеї, висловлені проф. Ю. П. Мачехіним, потребували системного розвитку та практичної реалізації.

Таким чином, комплексна задача моделювання, створення, вивчення, прогнозування та управління складними системами вимагає розроблення теорії дослідження НДС на основі принципів і моделей вимірювань в НДС. Вирішенню цього актуального теоретико-прикладного завдання присвячена дисертаційна робота.

Мета та завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення принципів положень теорії дослідження нелінійних динамічних систем на основі моделей вимірювань в нелінійних динамічних системах. Для досягнення мети були поставлені та вирішені такі основні завдання:

1. Систематизувати властивості та процеси в нелінійних динамічних системах, які впливають на процес і результат вимірювань.
2. Розробити фізико-математичні основи вимірювань в нелінійних динамічних системах.
3. Розробити теоретичну модель вимірювань в нелінійних динамічних системах.
4. Розвинути теорію невизначеності вимірювань в нелінійних динамічних системах.
5. Розробити експериментальні моделі дослідження фізичних і біофізичних систем на основі моделі вимірювань в нелінійних динамічних системах.

Об'єкт дослідження. Об'єкт дослідження дисертаційної роботи — процеси в нелінійних динамічних системах.

Предмет дослідження. Предмет дослідження дисертаційної роботи — модель вимірювання величин, що характеризують процеси в нелінійних динамічних системах.

Методи досліджень. У роботі використовуються розрахунково-теоретичні та чисельні методи досліджень, які були адаптовані для вирішення поставлених у дисертаційній роботі завдань.

При систематизації властивостей та характеристик НДС використані кількісні та якісні методи теорії динамічних систем, теорії динамічного хаосу та синергетики. Для розроблення фізико-математичних основ вимірювань в НДС використані методи теорії вимірювань, математичної статистики, теорії відкритих систем. У ході розвитку теоретичної моделі вимірювань використані методи якісної теорії динамічних систем, теорії інформації, фрактального аналізу та математичного моделювання, лінійної та інтервальної алгебри, топології. Принципи оцінювання та методика подання результатів вимірювань розроблені з використанням методів теорії ймовірностей, концепції вираження невизначеності результатів вимірювання та методів теорій динамічних систем. Експериментальні моделі досліджень НДС розроблені з використанням методів комп'ютерного аналізу та моделювання, теорії лазерів, лазерного охолодження, топології, методів синергетичної теорії та інших теорій дослідження складних систем.

Наукова новизна. У дисертаційній роботі вперше отримані перелічені результати, які виносяться на захист:

1. Систематизовані процеси і властивості нелінійних динамічних систем, які впливають на процес і результат вимірювань, для аналізу результатів вимірювань запропоновано використовувати якісні та кількісні методи й інструменти теорій складних систем.

2. Розроблено фізико-математичні основи вимірювань величин із складною, хаотичною динамікою, що характеризують нелінійні динамічні системи з функцією самоорганізації, які еволюціонують.

3. Вперше розроблено адаптивну теоретичну модель, яка забезпечує вимірювання та дослідження нелінійних динамічних систем у випадку детермінованої, стохастичної та хаотичної динаміки.

4. Отримала подальший розвиток теорія невизначеності вимірювань в нелінійних динамічних системах, вперше розроблені принципи оцінювання та подання результатів вимірювань величин із хаотичною динамікою.

5. На основі результатів досліджень вперше розроблено експериментальні моделі дослідження: параметрів випромінювання лазера, процесу лазерного охолодження, стану біофізичної системи, які дозволяють досліджувати нелінійні динамічні системи та керувати процесами в умовах хаотичної динаміки.

Усі наукові результати, що виносяться на захист, отримані або автором особисто, або за його вирішального внеску.

Практична цінність і реалізація результатів досліджень. Результати досліджень роблять значний внесок у розвиток основ теорії дослідження НДС. Вони забезпечують вирішення важливого теоретичного та прикладного

завдання загальнолюдського значення — дослідження, моделювання, прогнозування та управління НДС. Отримані результати цінні для теоретичних, модельних і експериментальних досліджень фізичних явищ у системах, апаратах і приладах, сприяють створенню нових інформаційно-управлінських систем, методів і методик дослідження, створенню нової та вдосконаленню існуючої техніки, розвитку фізики процесів самоорганізації та динаміки ієрархічних систем. Практичне використання принципів, моделей вимірювання і дослідження НДС дозволить підвищити характеристики та ефективність застосування лазерної та оптоелектронної техніки, систем конфіденційного зв'язку, підвищити якість оцінювання екологічного стану планети, виконувати кількісне оцінювання біофізичних систем.

Запропоновані рішення можуть бути універсальною основою для дослідження об'єктів і процесів, що належать до класу НДС. Результати досліджень важливі для розроблення та експлуатації лазерів із хаотичними характеристиками випромінювання, а також для конструювання медичних приладів і систем, призначених для діагностики і вимірювання параметрів організму.

Робота представляє нову методологію наукового знання, пропонує як теоретичні основи, так і практичні приклади використання отриманих результатів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами. Дисертаційні дослідження пов'язані з виконанням держбюджетної науково-дослідної роботи з фундаментальних проблем «Розвиток нових оптичних стандартів частоти з використанням фотонних кристалів» (номер державної реєстрації 0115U002434), відповідальним виконавцем якої був здобувач, держбюджетної науково-дослідної роботи під шифром «Промінь» і роботи за державним замовленням «Розроблення конструкторської документації та дослідного зразка лазерної системи реєстрації оптики у відкритому просторі» (номер державної реєстрації 38-2018). Її результати використовуються під час підготовки магістрів ХНУРЕ таких спеціалізацій: фотоніка та оптоінформатика, лазерна і оптоелектронна техніка.

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні положення і оброблення результатів експериментальних досліджень дисертації виконані здобувачем самостійно. Результати роботи відображені в монографії [1], статтях [2—38] та тезах доповідей [39—56]. У роботах [2], [3], [6], [10] автором розглянуті НДС, процеси із складною динамікою та нелінійні явища, як об'єкти дослідження, та труднощі, які виникають під час досліджень. У роботах [6], [30] систематизовані властивості нелінійних динамічних систем, які впливають на процес вимірювання та аналіз результатів вимірювань: дисипативність, сильна залежність від початкових умов і шумів, еволюція та самоорганізація, короткий час прогнозу, хаотична динаміка, інтервальні значення параметрів. У роботах [4], [7] виконано аналіз відповідності фізичних моделей теорії вимірювання властивостям реальних динамічних систем і доведено необхідність створення принципів, моделей вимірювання та аналізу результатів вимірювання динамічних змінних НДС. У роботах [4], [8],

[9] створена теоретична фізико-математична модель вимірювань і аналізування результатів вимірення параметрів НДС. Модель містить принципи вимірювання, складання рівняння вимірювання та інструменти аналізу результатів вимірювання систем. У роботах [11], [12], [14], [15], [17] розроблено підходи до оцінювання невизначеності вимірювання та подання результатів вимірювання параметрів, засновані на властивостях НДС. Вимірювана величина оцінюється невизначеністю вимірювання, інтервалом значень, фрактальною розмірністю та ентропією Шеннона. Роботу [16] присвячено питанню складання рівняння вимірювання. У роботі [20], як інструмент аналізу, введено «портрет вимірювання». Роботи [13], [18—29], [31]—[38] містять результати розвитку та практичного застосування моделей вимірювання та експериментальних моделей дослідження фізичних та біофізичних НДС. Досліджено питання застосування розробленої моделі для вирішення завдання лазерного охолодження частинок [18], [29], [34]. У роботах [25], [31], [35] отримано результати щодо дослідження та вимірювання в оптичних системах. У роботах [26—28], [32], [33] наведено результати досліджень параметрів лазерного випромінювання волоконних та нано-розмірних лазерів. У роботі [37] здобувачем запропоновано топологічний метод дослідження лазерного випромінювання, а у роботі [38] розроблено комплексну модель дослідження параметрів лазерів з метою отримання заданого рівня стабільності або хаотичності випромінювання. Результатам експериментальних досліджень таких об'єктів, як біофізичні НДС, присвячено роботи [13], [14], [21], [36], в яких автором запропоновано модель дослідження [13], [36], спосіб оцінювання норми ентропії [14] та наведено результати експерименту [21].

У роботі [21] експеримент проведений О. Присич. У роботі [1] Ю. Мачехіним виконано експеримент із дослідження стабільності частоти випромінювання лазера. У роботах [26], [27] О. Гнатенко виконав моделювання процесу поляризації лазерного випромінювання. У цих статтях здобувачем виконано моделювання процесу та розглянуто питання застосування теоретичної моделі вимірювань в НДС.

Апробація роботи. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на наступних конференціях і симпозіумах: III і IV Міжнародні науково-практичні конференції «Якість технологій — якість життя» (Харків, 2011 р.; Судак, 2012 р.); Міжнародна науково-практична конференція «Наука і соціальні проблеми суспільства: інформатизація та інформаційні технології» (Харків, 2011 р.); XI—XV Міжнародні науково-технічні семінари «Невизначеність вимірювань: наукові, законодавчі, методичні та прикладні аспекти» (Москва, Росія, 2014 р.; Софія, Болгарія, 2015 р.; Мінськ, Білорусь, 2016 р.; Созополь, Болгарія, 2017 і 2018 р.); VIII—X Міжнародні конференції «Функціональна база наноелектроніки» (Одеса, 2015, 2017, 2019 р.р.); Міжнародна конференція «Фізика, електроніка і електротехніка» (Суми, 2016 р.); VI Міжнародна науково-практична конференція «Метрологія, інформаційно-вимірювальні технології та системи» (Харків, 2018 р.); XI Міжнародна науково-практична

конференція «Метрологія та вимірювальна техніка» (Харків, 2018 р.), VIII Міжнародна конференція з прикладної оптоелектроніки та лазерів «CAOL 2019» (Созополь, Болгарія, 2019 р.) тощо.

Публікації. Всього за результатами виконаних досліджень опубліковані 56 робіт, враховуючи одну монографію, 37 статей в журналах з Переліку провідних рецензованих наукових видань для опублікування основних результатів дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора і кандидата наук; із них 11 опубліковані у виданнях, що індексуються в базах даних Scopus і Web of Science, 8 опубліковані в закордонних виданнях. 18 публікацій із загальної кількості опубліковано в матеріалах і збірниках праць міжнародних конференцій.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 277 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 299 сторінок, враховуючи 34 рисунка, 2 таблиці та 1 додаток. Нумерація формул, таблиць і рисунків у межах кожного розділу самостійна.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання дослідження, окреслено предмет і об'єкт дослідження, відзначені наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, наведено загальну характеристику роботи.

У **розділі 1 «Нелінійні динамічні системи як об'єкт досліджень»** обґрунтовано необхідність розроблення принципів положень теорії дослідження НДС на основі моделей вимірювань в НДС. Для цього досліджено НДС різної природи та вперше систематизовано процеси та властивості НДС, що впливають на хід і результат вимірень. Виконано класифікацію систем, систематизовано фізико-математичні положення теорій систем, обрано математичні інструменти дослідження та аналізу результатів вимірювань. Основні результати цих досліджень відображено в роботах [1], [2], [30].

Аналіз публікацій показав схожість властивостей НДС різної природи, що дозволяє підходити до їх дослідження з єдиних позицій міждисциплінарних теорій відкритих систем, динамічного хаосу, синергетики та низки інших. Метою досліджень НДС є моделювання та створення систем із заданими властивостями, прогнозування та управління їх динамікою та параметрами. Достовірність результатів досліджень забезпечується відповідністю моделей вимірювання властивостями систем, що впливають на процес та результат вимірювання.

Одним із видатних дослідників НДС є Е. Лоренц, у його роботі «Детермінована неперіодична течія» було досліджено спрощену математичну модель конвекції підігрітого шару рідини:

$$\frac{\partial X_1}{\partial t} = \sigma(X_2 - X_1), \quad \frac{\partial X_2}{\partial t} = rX_1 - X_2 - X_1X_3, \quad \frac{\partial X_3}{\partial t} = -bX_3 + X_1X_2, \quad (1)$$

де: X_1, X_2, X_3 — параметри, що характеризують швидкість обертання конвекційних шарів, розподіл температури за горизонталлю та вертикаллю відповідно; σ, r, b — безрозмірні параметри.

Лоренц встановив наявність сильної залежності моделі (1) від флуктуації початкових умов, а також наявність в її фазовому просторі «дивного атрактора», який описує складну хаотичну динаміку НДС, яка не пов'язана з флуктуаціями або випадковими впливами на систему.

Розвиток квантової техніки сприяв відкриттю складної динаміки в електронних і квантових пристроях. А. З. Грасюк і А. Н. Ораєвський за допомогою ідентичної (1) системи рівнянь встановили принципову можливість режиму з неперіодичною автомодуляцією випромінювання в квантовому генераторі.

Лазер з моменту його створення став розглядатися, як яскравий приклад НДС. На його прикладі вдалося встановити аналогію між фазовими переходами в системах, далеких від теплової рівноваги, та в рівноважних системах. Це дозволило виявити загальні закономірності в процесах, що протікають в фізичних, хімічних, біологічних та гуманітарних системах. Г. Хакен провів математичну аналогію між одномодовим лазером і системою Лоренца (1). Він вказав на наявність несталості, яка призводить до нерегулярного руху у фазовому просторі за високої потужності накачування, таким чином передбачивши можливість появи хаосу в лазерному випромінюванні. Наступні дослідження відкрили можливість виникнення хаотичних режимів за низької потужності накачування лазера, але за модуляційного ефекту, наприклад, часової модуляції втрат резонатора, часової модуляції інверсії, інжекції модульованого когерентного електромагнітного поля. Надалі було запропоновано кілька динамічних моделей лазера, яким притаманні хаотичні пульсації випромінювання (лазерна турбулентність). Подібні режими були передбачені для багатомодових лазерів із насиченим поглиначем і без нього (А. М. Ораєвський, І. І. Маторін, Я. І. Ханін, М. Маяр тощо).

Перші практичні спроби отримання синхронних лазерних імпульсів, як на основі газорозрядних, так і твердотільних лазерів, зіткнулися з проблемою вузької зони синхронізації — $10^{-4} \dots 10^{-6}$ від міжмодової частоти. Однак, механізми руйнування режиму вимушеної синхронізації мод, що призводить до хаотизації амплітуди та тривалості імпульсів, а також їх послідовності, в чисельному та натурному експериментах перебувають на стадії дослідження.

Велику кількість публікацій присвячено дослідженню динаміки газових лазерів. Інтерес до режимів випромінювання He-Ne-лазерів обумовлений використанням цього типу лазерів як оптичних стандартів частоти, до яких висуваються високі вимоги щодо стабільності та відтворюваності значень характеристик випромінювання. У роботах професора Мачехіна Ю. П. експериментально досліджувалися процеси розвитку іонізаційних хвиль у низькотемпературній плазмі в капілярах активних елементів газорозрядних лазерів. Були отримані моделі розвитку хаотичного режиму, показано, що

процес хаотизації іонізаційних хвиль може бути описаний нелінійним параболічним рівнянням.

Опубліковано результати десятків досліджень, спрямованих на управління хаосом у лазерах і в оптичних пристроях. Усуненню хаотичної динаміки лазерів присвячено одну з перших публікацій щодо застосування управління хаотичними системами (R. Roy), в якій описано метод усунення хаосу за допомогою зворотного зв'язку, що дозволяє на порядок підвищити потужність випромінювання за рахунок збільшення потужності накачування. Дослідження останнього часу переважно присвячені методу розімкнутого управління (управління без зворотного зв'язку) та методу запізненого зворотного зв'язку (метод Пірагаса) (Б. Андрієвський). Дослідження впливу запізненого зворотного зв'язку на динаміку лазера з модуляцією втрат проведено в роботі І. Лойко. Експериментальне усунення нестійкості лоренцевського типу (1) зворотним зв'язком із запізненням в амонійних лазерах описано в роботі R. Dykstra. Порівняння методів розімкнутого управління та управління з запізненим зворотним зв'язком для CO₂-лазерів із модуляцією втрат, а також Nd-легованого волоконного лазера виконано в роботі A. Guderian, в якій кількісно передбачено розширення сфери стійкості (зсув біфуркації подвоєння періоду) під час управління на основі моделей з двома ступенями свободи.

Чималий інтерес викликає завдання генерації волоконними лазерами дисипативних оптичних солітонів, їх моделювання з урахуванням шумів і можливою зміною динаміки лазерів (С. Туріцин). Аналіз нелінійної динаміки потужних надкоротких імпульсів та явищ їх формування аналогічний завданням моделювання фізичної дисипативної НДС із кількома мільярдами ступенів свободи (А. Воронін). Дослідження солітонів, як НДС, важливі для практичної реалізації ідеї солітонних систем зв'язку.

У ряді публікацій виникнення хаотичного режиму розглядається, як запланований процес, застосовуваний, наприклад, у хаотичних системах зв'язку, для кодування сигналів. У цьому випадку мова йде про управління хаосом і синхронізацію приймальних та передавальних пристроїв оптичного зв'язку. Вже створено експериментальні установки для передавання інформації на основі двох синхронізованих хаотичних лазерів (Tang S.).

Незважаючи на підвищений інтерес до хаотичних систем, питання вимірювання, як ключового методу досліджень НДС, довгий час залишалось невирішеним. Проф. Мачехінін Ю. П. було висунуто ідею розроблення нової теорії, що об'єднує завдання вимірювання і дослідження НДС.

У розділі виконано аналіз основ теорій складних систем. Введено поняття динамічної системи (ДС) як об'єкта (сукупності об'єктів) або процесу (сукупності процесів), для яких однозначно визначено поняття стану, як сукупності значень деяких величин (динамічних змінних (ДЗ)) $[X_1(t), \dots, X_n(t)]$ у будь-який момент часу t та заданий закон еволюції $F(X_i, t)$ початкового стану з плином часу: $F[X_1(t_0), \dots, X_n(t_0)] \rightarrow [X_1(t), \dots, X_n(t)]$. ДС описується рівнянням виду:

$$\frac{dX_i(t)}{dt} = F[X_1(t), \dots, X_n(t)]. \quad (2)$$

Було виконано класифікацію ДС: детерміновані, стохастичні, хаотичні; лінійні та нелінійні; відкриті та замкнуті; дисипативні та консервативні; безперервні та дискретні; із функцією еволюції та без; однорівневі та багаторівневі (ієрархічні). У роботі розглядаються відкриті дисипативні НДС, що проявляють властивості хаотичності та самоорганізації.

Проаналізовано два підходи до досліджень НДС. Перший заснований на математичному моделюванні системи (2). Другий орієнтований на дослідження функціонального боку НДС, не дозволяє досліджувати всі тонкощі внутрішньої структури, а система інтерпретується як «чорний ящик». Перший метод надає вичерпну інформацію щодо системи, але на практиці практично не здійснений. Другий метод не дозволяє досліджувати всі тонкощі системи, але дозволяє визначити значення ДЗ в окремі моменти часу. При вимірюваннях в НДС пропонується використовувати другий метод, що обумовлено складністю пошуку функції еволюції реальних НДС та дискретністю даних щодо системи, які можна отримати в результаті вимірювання.

У розділі виконано аналіз математичних інструментів дослідження НДС. Ключовим інструментом якісної теорії є фазовий портрет (ФП), трансформації якого є відображенням процесів НДС. У дисертаційній роботі ФП пропонується використовувати як альтернативу класичному рівнянню вимірювання, що позбавляє від необхідності моделювання функції еволюції (2). Дослідження ФП дозволяє визначити: показники Ляпунова, ентропію Шеннона і Колмогорова, час передбачуваності тощо.

Показники Ляпунова λ_i використовують для дослідження НДС в околі довільній траєкторії. Якщо дві близькі траєкторії $x_i(t)$ та $x_{i+1}(t)$ обрати так, що $x_{i+1}(t) = x_i(t) + \xi(t)$, а $\xi(0) = \varepsilon$, $\varepsilon \rightarrow 0$, то функція виду:

$$\Xi[\xi(0)] = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln \left[\frac{\xi(t)}{\xi(0)} \right] \quad (3)$$

приймає кінцевий ряд значень показників Ляпунова $\{\lambda_i\}$, $i = 1, 2, \dots, n$.

Сумарний показник Ляпунова Λ розглядається як показник стійкості динаміки НДС: за $\Lambda = 0$ система має стійку динаміку, процеси розглядаються як детерміновані, об'єм ФП незмінний $\Delta V_A = const$; за $\Lambda > 0$ об'єм ФП зростає $\Delta V_A \uparrow$, динаміка НДС хаотична; за $\Lambda < 0$ об'єм ФП зменшується $\Delta V_A \downarrow$, що характерно для дисипативних систем.

Ентропія Шеннона H — ключове поняття теорії інформації та інформаційного підходу до вимірювань. Для ДС із щільністю розподілу ймовірності ДЗ $p(X_i)$ визначається як:

$$H = - \sum_{i=1}^N p(X_i) \ln p(X_i). \quad (4)$$

Ентропія хаотичної та стохастичної динаміки більше за ентропію упорядкованого руху. Зміна її значень свідчить про зміну динаміки або значень ДЗ. У дисертації пропонується використовувати ентропію Шеннона у ході аналізу результатів вимірювання ДЗ НДС і для оцінювання відхилення системи від стану рівноваги.

Багато з процесів в НДС є самоподібними та характеризуються фрактальною розмірністю D , значення якої використовується для аналізу часових рядів результатів вимірювань ДЗ $x(t_1), \dots, x(t_n)$. D визначається через показник Херста H_R методом нормованого розмаху:

$$D = 2 - H_R. \quad (5)$$

У дисертації фрактальний аналіз (5) пропонується використовувати для класифікації та прогнозу динаміки ДЗ НДС та її тренда.

Час передбачення T_{for} пов'язаний із максимальним показником Ляпунова λ_{max} як:

$$T_{for}(\lambda) \sim \frac{1}{\lambda_{max}} \log \frac{1}{\epsilon}. \quad (6)$$

У дисертації час передбачуваності пропонується використовувати як критерій дискретності часу проведення вимірювання.

У розділі виконано аналіз умов виникнення хаосу та еволюції. Еволюція є одним із проявів динаміки НДС. У фізичних замкнених системах еволюція в часі призводить до рівноважного стану, якому відповідає максимальне значення ентропії та максимальний ступінь хаотичності. У відкритих системах виділяють два класи еволюційних процесів: часова еволюція до нерівноважного стаціонарного стану та еволюція через послідовність нерівноважних стаціонарних станів внаслідок зміни значень керівних параметрів. При цьому еволюція системи може бути самоорганізацією, із появою більш складних станів, а може проявлятися як деградація, яка веде до руйнування системи. Прикладом еволюції відкритих фізичних НДС є встановлення режиму генерації лазерного випромінювання.

Як універсальний критерій оцінювання хаотичної динаміки та еволюції НДС в дисертації пропонується використовувати «S-теорему» Ю. Клімонтовіча. Розглянуто поняття «норми хаотичності», як критерію сталого функціонування системи. Для оцінювання ступеню відхилення НДС від стійкого стану вводиться норма ентропії, що розраховується за допомогою «S-теорему».

У розділі автор систематизував властивості НДС, що впливають на процес вимірювань: стан НДС в момент часу t характеризується n -мірним вектором стану $X [X_1(t), \dots, X_n(t)]$; із плином часу значення ДЗ змінюється, але знаходиться в інтервалі $X_i^{\min} \leq X_i \leq X_i^{\max}$; динаміка ДЗ має складний, нелінійний характер; у систем є нестійкі стани рівноваги; системи обмінюються енергією та інформацією з навколишнім середовищем, піддаються впливу зовнішніх факторів; деякі з ДЗ є керуючими параметрами,

зміна яких до певних значень веде до фазових переходів; в ході яких ДЗ може змінювати динаміку з випадкової на регулярну, хаотичну, і навпаки; ФП НДС в стані хаосу це дивний аттрактор; НДС можуть еволюціонувати, деякі мають функцію самоорганізації.

Таким чином, у розділі обґрунтовано актуальність дисертаційного дослідження. Розв'язана задача систематизації процесів і властивостей НДС, що впливають на процес і результат вимірювання, для аналізу цих результатів запропоновано використовувати якісні й кількісні методи та інструменти теорій складних систем.

У розділі 2 «Фізико-математичні основи вимірювань в нелінійних динамічних системах» вперше розроблено фізико-математичні основи вимірювань величин із складною, хаотичною динамікою, що характеризують нелінійні динамічні системи з функцією самоорганізації, що еволюціонують із часом. Основні результати, що увійшли до розділу, відображено в роботах [1], [6], [8], [16], [19].

Виконано аналіз відповідності властивостям НДС класичної теорії вимірювань, яка постулює умови щодо існування єдиного істинного значення вимірюваної величини, випадковості та ергодичності розкиду результатів вимірювання. Обидві умови теоретично дозволяють уточнювати результати вимірювання у міру уточнення умов проведення експерименту і вдосконалення методів їхнього оброблення. Якщо вимірювана величина X описана рівнянням: $X = f(Z)$ (де Z – вхідна величина) процес визначення її значення можна описати виразом:

$$X = \lim_{m,n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f^{(m)}(Z_i^{(m)}), \quad (7)$$

де $Z_i^{(m)}$ — результат i -го спостереження за m -вих початкових умов.

Обчислення межі (7) передбачає послідовне уточнення початкових умов. У результаті зменшується невизначеність вимірювання величини X . Що точніше задані початкові умови, то точніше може бути визначена величина X . Під час вимірювання інтервальних ДЗ НДС умова щодо існування єдиного істинного значення вимірюваної величини не може бути застосована.

При постулюванні випадкового розкиду результатів вимірювання базовим є ергодичний процес. Рух вважається ергодичним, якщо його траєкторія у фазовому просторі в межі $t \rightarrow \infty$ щільно заповнює обсяг. При цьому відносний час Δt перебування траєкторії в будь-якому кінцевому елементі об'єму ΔV пропорційний об'єму цього елемента:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\Delta t}{t} \approx \frac{\Delta V}{V}. \quad (8)$$

Умова (8) є фізичною передумовою імовірнісних методів аналізу випадкових процесів. Нормальний закон розподілу щільності ймовірності максимально відповідає вимогам ергодичності. Тому усі співвідношення, введені для параметрів нормального закону, впливають із умов ергодичності.

Класична ергодична теорія розглядає також і сильніший механізм стохастизації руху системи — перемішування траєкторій у фазовому просторі. Але у роботах Колмогорова, Арнольда та Мозера було доведено, що за певних обмежень такий стохастичний рух не є ергодичним. Основними механізмами такого перемішування є локальна нестійкість (експоненціальний розбіг траєкторій) та чутливість до початкових умов, які спостерігаються в НДС та призводять до порушення ергодичності.

На постулатах класичної теорії вимірювань побудовані загальноприйняті моделі й методики вимірювань і оцінювання результатів експерименту. У розділі автором вперше виконано аналіз відповідності фізичних основ Керівництва за виразом невизначеності вимірювань (GUM) властивостями НДС. У GUM передбачається, що відповідно до рівняння вимірювання:

$$Y = f(X_1, \dots, X_N) \quad (9)$$

існує спосіб визначення вихідної величини Y за результатами вимірювання вхідних величин X_i і отримане значення Y — єдине. При цьому, у разі НДС результати вимірювань ДЗ можуть складним чином заповнювати інтервал значень $Y_{\min} \leq Y \leq Y_{\max}$.

Вхідні величини X_i у GUM асоціюються із випадковими величинами. Допускається, що вони (всі або частина з них) можуть бути пов'язані між собою, проте GUM переважно розглядає незалежні випадкові величини. Для опису пов'язаних величин керівництво допускає використання спільних розподілів. Вважається, що результати багаторазових вимірювань вхідних величин описуються розподілом Гаусса у ході оцінювання невизначеності за типом А та прямокутним розподілом під час оцінювання невизначеності за типом В. При цьому вхідні величини X_i НДС не завжди можуть бути представлені випадковими величинами. Як правило, вони пов'язані між собою та схильні до впливу ззовні навіть слабких флуктуацій. Динаміка ДЗ НДС має складний характер, тому ап'орі стверджувати, що вхідні величини і результат вимірювання мають гауссове або прямокутне розподілення не можна.

Коли застосування GUM дає некоректні результати, наприклад, внаслідок складності рівняння вимірювання (9), пропонується використовувати метод Монте-Карло, який можна застосовувати для вираження невизначеності вимірювання добре визначеної фізичної величини, що характеризується єдиним значенням. Він дає коректні результати в разі лінійного рівняння вимірювання.

Функція вимірювання $f(X_1, X_2, \dots, X_N)$ повинна мати безперервну похідну за компонентами вхідних величин X_i в межах оцінок x_i . Функція розподілу для вихідної величини Y неперервна і строго зростаюча. Щільність розподілу ймовірностей Y має єдиний максимум тощо. При цьому в разі вимірювань в НДС вимірювана величина поводить ся нелінійним чином, не може бути визначена єдиним значенням, а щільність розподілу може мати більше одного максимуму.

Аналіз основних положень класичної теорії вимірювання призводить до висновку щодо необхідності розроблення основ вимірювань в НДС. Автором

вперше розроблені фізико-математичні основи вимірювань в НДС. Обґрунтовано, що у ході вимірювання в НДС повинні бути враховані такі фактори, як відсутність єдиного істинного (дійсного) значення вимірюваної величини; значення ДЗ $X_i(t)$ перебувають в інтервалі $X_i^{\min} \leq X_i \leq X_i^{\max}$; неергодичність і невиконання центральної граничної теореми; стохастичність та хаотичність динаміки НДС веде до стохастичності та хаотичності результатів вимірювання; часовий ряд результатів вимірювання може представляти немарківський процес, мати гаусдорфівську розмірність, результат вимірювання можна трактувати, як фрактал; «незначна» зміна початкових умов веде до значних змін результатів вимірювання ДЗ; результат вимірювання ДЗ НДС повинен бути оцінений за допомогою невизначеності.

Для класифікації динаміки НДС автором пропонується використовувати фрактальний аналіз рядів результатів вимірювань (5). Наведено результати дослідження динаміки стабільності частоти випромінювання лазера та напруги в електричній мережі. Дослідження показали, що фрактальна розмірність результатів вимірювань стабільності частоти лазера перебувала в інтервалі $D = 1,05—1,1$, з чого випливає, що динаміку частоти стабілізованих лазерів можна розглядати як фрактальну в досить широкому часовому інтервалі. Значення фрактальної розмірності вказує на те, що лазери належать до систем із персистентною динамікою. Система автопідстроювання коригує зміни частоти шляхом накопичення інформації за попередні інтервали часу. Звідси випливає, що фрактальна розмірність може характеризувати якість системи стабілізації частоти лазера, який представляє собою НДС із функцією самоорганізації.

Аналіз результатів вимірювання напруги електричної мережі показав істотну зміну динаміки дослідженої величини: від $D = 1 - 1,04$ (детермінізм) до $D = 1,46$ (стохастичність), процес є персистентним. Досліджувану систему також можна розглядати як НДС із функцією самоорганізації, проте значна кількість зовнішніх впливів і шумів перешкоджає цьому процесу. Отримані результати підтвердили припущення щодо ефективності використання фрактального аналізу для класифікації динаміки НДС.

Таким чином, у розділі вперше розроблено фізико-математичні основи вимірювання в НДС. Обґрунтовано, що теоретична модель вимірювань в НДС повинна враховувати можливість хаотизації, самоорганізації та еволюції.

У розділі 3 «Теоретична модель вимірювання в нелінійних динамічних системах» вперше розроблено адаптивну теоретичну модель, яка забезпечує вимірювання та дослідження НДС в разі детермінованої, стохастичної та хаотичної динаміки. Отримала подальший розвиток теорія невизначеності вимірювань в НДС, вперше розроблено принципи оцінювання та представлення результатів вимірювань величин із хаотичною динамікою. Основні результати розділу відображено в роботах [1], [3—9], [11], [12], [15—17], [19], [20], [22—25], [31], [35].

Теоретична модель вимірювання в НДС (МВ) — фізико-математичне подання процесу вимірювання та аналізу результатів вимірювання величин,

що характеризують НДС. Модель містить фізичні принципи, рекомендації із проведення вимірювань та математичні інструменти аналізу результатів вимірювання. Ключовими елементами МВ є рівняння вимірювання (РВ); порядок виконання вимірювання; спосіб оцінювання необхідної та достатньої кількості інформації; класифікація динаміки ДЗ НДС; методика оцінювання та подання результатів вимірювання.

Питання складання РВ (9) є одним із найскладніших питань класичної теорії вимірювання. Дотепер відсутні єдині принципи та рекомендації щодо складання РВ, яке залишається творчим завданням дослідників. Автором вперше запропоновано принципи складання РВ в НДС, яке розглядається не тільки як інструмент розрахунку невизначеності вимірювання, а й інструмент аналізу стану та динаміки, прогнозу значень ДЗ. Тому РВ має описувати зв'язок вихідних і вхідних величин, як в (9), враховувати константи (Z_1, \dots, Z_n) та процес еволюції НДС. Оскільки НДС чутливі до впливу шумів, то вони, як процес $\psi(t)$, повинні бути включені до РВ. Для вхідних величин повинні бути знайдені функціональні залежності від часу $X_1(t), \dots, X_n(t)$. Сильна залежність НДС від початкових умов вимагає їхнього врахування $[X_1(t_0), \dots, X_n(t_0)]$, $\psi(t_0)$. Хаотична динаміка дозволяє стверджувати, що коректність РВ обмежена часом передбачення T_{for} (6). У результаті РВ набуде вигляду:

$$\left. \begin{aligned} Y(t) &= f \left\{ F \left[X_1(t), \dots, X_n(t), (Z_1, \dots, Z_n), t \right] + \psi(t); \right. \\ &X_1(t), \dots, X_n(t); \\ &[X_1(t_0), \dots, X_n(t_0)], \psi(t_0); \\ &T_{for}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Із виразу (10) найскладнішим завданням є визначення функції еволюції F , знання якої дозволяє прогнозувати значення ДЗ в часі, обмеженим T_{for} (6). За умов детермінованої або стохастичної динаміки вираз (10) спрощується до вигляду класичного РВ (9).

Процес виконання вимірювань виглядає таким чином. У експерименті синхронно, із інтервалом Δt , вимірюють значення усіх ДЗ X_i . Результати вимірювань перебувають в m -площинах перетину Пуанкаре ФП, розміри яких визначаються невизначеністю вимірювання u_i (рис. 1). $U(X)$ містить результати вимірювань усіх станів ДЗ $X_i \in U(X)$ (рис. 2). Сукупність усіх значень результатів вимірювань ДЗ НДС формують ФП. Необхідна для цього мінімальна кількість вимірювань m_{\min} залежить від фрактальної розмірності НДС D (5) та оцінюється як:

$$m_{\min} \geq 10^{2+0,4D}. \quad (11)$$

Вираз (10) дає нижню межу кількості вимірювань. Її можна оцінити зверху, прийнявши D рівною розмірності вектора стану НДС, тобто рівною числу n ДЗ $m_{\min} \geq 10^{2+0,4n}$.

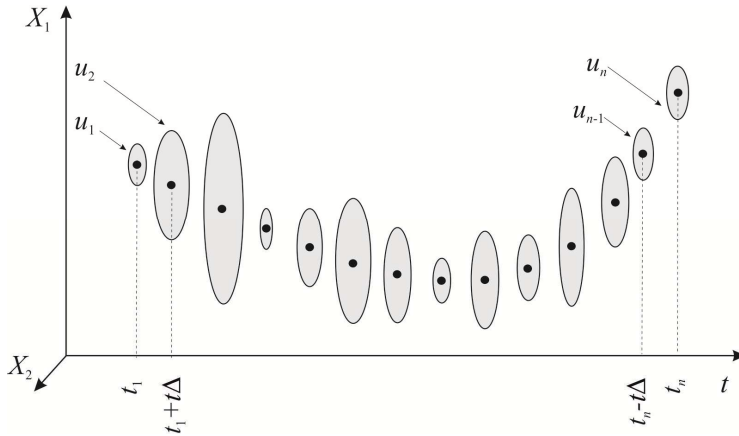


Рис. 1. Відображення результатів вимірювання X у моменти часу t_i

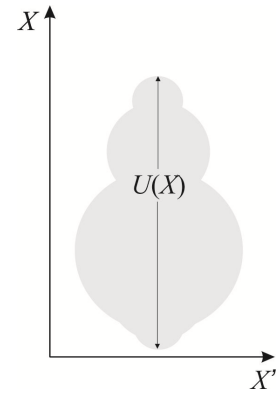


Рис. 2. Відображення усіх результатів вимірювання

У результаті формується n часових рядів результатів вимірювання:

$$x_1(t_1), \dots, x_m(t_m), \quad (12)$$

де $x_j(t_j)$ — результат вимірювання стану ДЗ X_i .

Результати вимірювання наводяться за допомогою оцінювання вимірювання y_i , з поправками на всі відомі систематичні джерела невизначеності, та стандартної невизначеності u_i типу «А» у вигляді:

$$(y_1 - u_1, y_1 + u_1), \dots, (y_m - u_m, y_m + u_m). \quad (13)$$

Для визначення $U(X)$ (рис. 2) із (13) обирають мінімальне $(y_{\min} - u_{\min}, y_{\min} + u_{\min})$ та максимальне $(y_{\max} - u_{\max}, y_{\max} + u_{\max})$ значення, які формують інтервал усіх можливих значень ДЗ.

Вперше, при вимірюваннях в умовах хаотичної динаміки, як інструмент аналізу в МВ запропонований «портрет вимірювання» (ПВ) — графічне та чисельне відображення результатів вимірювання, що представляє собою розширений ФП. При цьому кожне значення відображається з урахуванням невизначеності $u_i(t_i)$. Математично ПВ має вигляд таблиці значень вхідних величин розмірності $n \times m$ та матриці розмірності $1 \times n$ вихідної величини $Y(t)$ із урахуванням розширеної невизначеності вимірювання i -го значення $U_i(t)$:

$$\begin{pmatrix} x_1(t_0) \pm u_1(t_0) & \dots & x_n(t_0) \pm u_n(t_0) \\ \dots & \dots & \dots \\ x_1(t_m) \pm u_1(t_m) & \dots & x_n(t_m) \pm u_n(t_m) \end{pmatrix}, Y(t) = \begin{pmatrix} y_1(t_0) \pm U_1(t_0) \\ \dots \\ y_n(t_n) \pm U_n(t_n) \end{pmatrix}, \quad (14)$$

Аналізування ПВ (14) дозволяє визначити фрактальну розмірність окремої ДЗ X_i (5), характер змін ДЗ X_i і зв'язок їхніх значень без необхідності аналітичних рішень; точки біфуркації; показники Ляпунова λ (3), розмірність аттрактора; час передбачення динаміки ДЗ T_{for} (6); ентропію Шеннона H (4) тощо. Автором вперше отримані вирази для цих характеристик із урахуванням невизначеностей виміру. Для графічного відновлення ФП НДС

автором запропоновано удосконалений метод Таккенса, що враховує невизначеність вимірювання стану $S(u_i, t_i)$ (рис. 3).

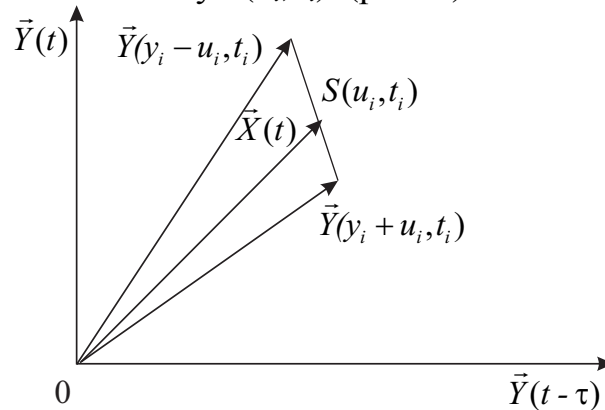


Рис. 3. Фрагмент ПВ стану НДС

Для класифікації динаміки ДЗ у МВ використовуються фрактальні шкали часових рядів (12) із реперними значеннями 1, 1,5 та 2: якщо $D=1$ процес трактується як строго детермінований; за $D=2$ розкид значень дуже великий, що не дозволяє використовувати методи оброблення результатів вимірювання; якщо $D=1,5$ процес є випадковим; за $1 < D < 1,5$ процес персистентний; за $1,5 < D < 2$ — антиперсистентний.

У МВ застосовується ентропійний підхід до оцінювання результатів вимірювання. Автором вперше отримано вираз зв'язку ентропії Шеннона та фрактальної розмірності:

$$H = \ln \left[2kR(n/2)^{D-2} \right] \quad (15)$$

де k — коефіцієнт виду функції розподілу, R — значення розмаху Херста, n — кількість вимірювань ДЗ.

Згідно з виразом (15) у значення ентропії $H = H(k, R, n, D)$ роблять внесок інтервал значень ДЗ (R), характер розподілу (k) та динаміки (D) ДЗ. Вираз (15) дозволяє виконувати аналіз причин, що впливають на значення u невизначеності вимірювань в НДС: $u = (1/2k) \exp H$.

Розроблена МВ є адаптивною, призначена для вимірювань у випадку детермінованої, стохастичної та хаотичної динаміки та дозволяє отримати такі дані щодо НДС: 1) N рядів результатів вимірювання ДЗ X_i $x_i(t_1), \dots, x_i(t_n)$; 2) N рядів оцінки вимірювання $(y_1 - u_1, y_1 + u_1), \dots, (y_n - u_n, y_n + u_n)$; 3) N значень невизначеності вимірювання всіх X_i $U_i(X_i) = (y_{i \min} - u_{i \min}, y_{i \max} + u_{i \max})$; 4) портрет вимірювання; 5) N значень фрактальної розмірності D_i ДЗ X_i ; 6) $N + 1$ значень ентропії Шеннона H_i окремих ДЗ і всієї системи; 7) показники Ляпунова λ ; 8) час передбачення T_{for} . За довгострокового спостереження за системою результат вимірювання доповнюється часовими та ентропійними шкалами.

У розділі набула розвитку теорія невизначеності вимірювання в НДС. За оцінювання та подання результатів вимірювань в НДС (13) необхідно:

1) визначити мінімальне та максимальне значення ДЗ (13), обчислити невизначеність їх вимірювання:

$$Y_i^{\min} = y_i^{\min} \pm U_i^{\min}, Y_i^{\max} = y_i^{\max} \pm U_i^{\max}. \quad (16)$$

2) побудувати гістограми значень Y_i , визначити найбільш Y_i^{oft} і найменш Y_i^{seld} вірогідні значення ДЗ, обчислити невизначеність їх вимірювання U_i^{oft} , U_i^{seld} , та їх ймовірності $P(Y_i^{oft})$, $P(Y_i^{seld})$:

$$Y_i^{oft} = y_i^{oft} \pm U_i^{oft}, P(Y_i^{oft}); Y_i^{seld} = y_i^{seld} \pm U_i^{seld}, P(Y_i^{seld}). \quad (17)$$

Вирази (16), (17) та гістограми значень Y_i є формою надання невизначеності результатів вимірювання ДЗ НДС. Для надання максимально можливого обсягу інформації щодо ДЗ НДС вирази невизначеності результатів вимірювання (17) доповнюються значеннями фрактальної розмірності D , ентропії H та часу передбачення T_{for} у вигляді:

$$D_i = d_i \pm U_i; H_i = h_i \pm U_i; T_{fori} = t_{fori} \pm U_i, \quad (18)$$

де d_i , h_i , t_{fori} — оцінки вимірювань фрактальної розмірності, ентропії та часу передбачення відповідно.

Таким чином у розділі розроблено адаптивну теоретичну модель вимірювань в НДС, а також отримала подальший розвиток теорія невизначеності вимірювань в НДС, вперше запропонована методика оцінювання та представлення результатів вимірювань у НДС.

У розділі 4 «Експериментальні моделі досліджень фізичних нелінійних динамічних систем» на основі результатів досліджень, відображених у попередніх розділах, вперше розроблено експериментальні моделі дослідження параметрів випромінювання лазера, процесу лазерного охолодження та топологічна модель ідентифікації оптичних систем. Застосування моделей дає можливість досліджувати та управляти НДС в умовах хаотичної динаміки. Основні результати досліджень, які увійшли до розділу, відображено в роботах [13], [18 — 29], [31 — 38].

Теоретичні та практичні дослідження підтвердили можливість хаотизації режимів лазерів, що впливає на значення та стабільність параметрів випромінювання. Виділяють два напрямки дослідження хаосу в лазерах: перше спрямоване на його придушення, адже хаотизація веде до погіршення стабільності випромінювання, що неприйнятно для лазерів, які застосовуються в вимірювальних, медичних та інформаційних технологіях; друге охоплює завдання генерації та керування хаотичними режимами для використання в інформаційних хаотичних системах, інформація в яких передається у вигляді подвійного повідомлення, захищеного в хаотичному оптичному носії. У зв'язку з цим становить інтерес можливість генерації лазерних імпульсів із керованим рівнем стабільності частоти випромінювання, частоти проходження, амплітуди, несівної частоти тощо. Для цього необхідно досліджувати механізми та процеси, що спричиняють хаотизацію.

Успіх описаних досліджень залежить від коректності експериментальних моделей. Для цих цілей в дисертації розроблена модель дослідження

параметрів випромінювання лазера як НДС із функцією самоорганізації та можливістю зміни стаціонарної динаміки на хаотичну. Модель розроблено на основі моделі вимірювань в НДС та містить схему експерименту (рис. 4) та процедуру оцінювання результатів вимірювань: 1 — система інжекції, 2 — лазер, 3, 4, 7 — ділильні пластинки, 5 — вимірювач енергії імпульсів, 6 — спектр-аналізатор, 8 — блок вимірювання тривалості імпульсів, 9 — блок вимірювання частоти проходження імпульсів, 10 — система управління, синхронізації та запису результатів вимірювань.

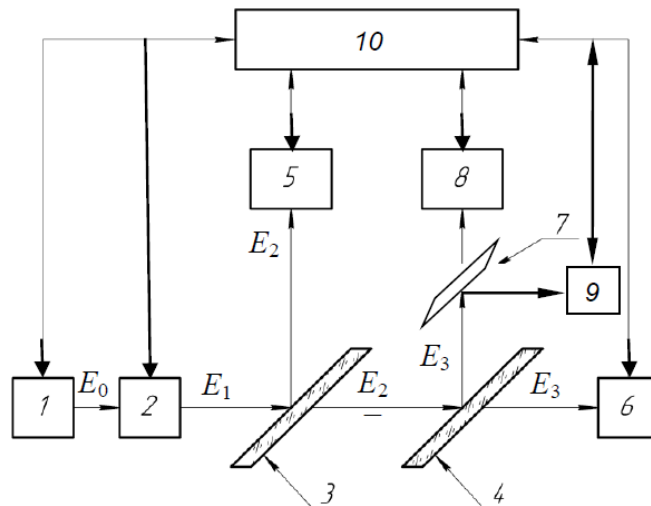


Рис. 4. Схема експерименту

Метою експерименту є вимірювання параметрів випромінювання лазера, дослідження режимів, можливості та умов переходу до хаосу. Вимірювання та оцінювання результатів виконується відповідно до запропонованої автором теоретичної моделі вимірювання в НДС (10)—(18).

У моделі розглянуто задачу фрактальної оцінки (5) стабільності параметрів випромінювання лазерів. Автором вперше отримано вираз для стабільності ДЗ (параметрів випромінювання) як функції фрактальної розмірності $\Delta x(D)$:

$$\Delta x = \pm \frac{2R}{\bar{x} (m/2)^{2-D}}. \quad (19)$$

де \bar{x} — середнє значення результатів вимірювання ДЗ.

Із виразу (19) випливає висновок, що абсолютне значення стабільності $|\Delta x|$ ДЗ (параметрів випромінювання лазера) зменшується зі збільшенням фрактальної розмірності D . За $D=1$ $|\Delta x|$ приймає мінімальне значення — детермінована динаміка забезпечує найкращу стабільність обраного параметра. Збільшення хаотизації призводить до погіршення стабільності. Для випадку, коли фрактальна розмірність перевищує значення, яке характерне для стохастичного процесу $D=1,5$, стабільність прямує до свого мінімального значення, що пояснюється антиперсистентністю процесу, локальною нестійкістю та великим розкидом значень за $D \rightarrow 2$.

Таким чином, фрактальна розмірність у моделі дослідження використана для оцінювання стабільності ДЗ у випадку, коли лазер працює як у стаціонарному, так і у хаотичному режимах. Застосування встановленого виразу (19) дозволяє контролювати хаотичні сигнали із заданою стабільністю. Особливість моделі полягає в системному та комплексному підході (одночасному дослідженні обраних параметрів) та придатності для вимірювання та досліджень, як стаціонарних, так і хаотичних режимів. Модель передбачає вимірювання інтервалів значень параметрів випромінювання (16) у різних режимах, значень їх стабільності (19) та часу прогнозування (6), а також класифікацію динаміки ДЗ (5). Модель призначена для забезпечення заданої стабільності параметрів, генерації та управління хаотичним випромінюванням.

У розділі автором запропоновано **вирішення завдання застосування нанолазерів в інформаційних системах** [27], [33]. Незважаючи на експерименти зі створення нанолазерів різних конструкцій їх практичне застосування в інформаційних технологіях стримується невисокими характеристиками випромінювання: нанолазери мають невисоку добротність резонатора $Q \sim 120$ — за двовимірної локалізації та $Q \sim 15$ — за тривимірної локалізації моди; невирішені питання стабілізації та управління параметрами випромінювання (монохроматичністю, когерентністю, необхідною потужністю, тривалістю імпульсу, фокусуванням пучка); не розроблено механізми спільного випромінювання ансамблю нанолазерів, боротьби з шумами тощо.

Для досягнення потужності випромінювання, прийнятної для використання нанолазерів в інформаційно-вимірювальних процедурах, автором пропонується використання режиму над випромінювання. Виконано розрахунки дальності поширення сигналу в цьому режимі. Для довжини хвилі 1,5 мкм в режимі надвипромінювання пікова потужність випромінювання становить $P = 10,9$ мкВт, що забезпечує дальність передавання сигналу одномодовим волокном із коефіцієнтом втрат $\alpha = 0,5$ дБ/км становить $L \approx 750$ м. Такі параметри дозволять у перспективі використовувати нанолазери у малогабаритних оптоволоконних гіроскопах нового покоління.

Ще однією перешкодою для практичного використання нанолазерів є неможливість управляти частотою випромінювання. На практиці в великогабаритних лазерах ця процедура виконується або керованою зміною довжини резонатора, або зміною показника заломлення активного середовища. Автором у роботі [32] запропонована схема нанолазера зі стабілізацією частоти лінією поглинання йоду в дефекті фотонного кристала. Аналіз параметрів випромінювання та їхньої динаміки виконується за допомогою розробленої автором моделі дослідження параметрів випромінювання лазера як НДС (рис. 4) та адаптивної теоретичної моделі вимірювань в НДС (10)—(18).

У розділі на основі інструментів і підходів теоретичної моделі вимірювання в НДС вперше **розроблено модель дослідження та оцінювання**

параметрів процесу лазерного охолодження частинок [18], [29], [34]. На практиці температуру ансамблю частинок визначають балістичним методом, підсвічуючи частки по завершенні процесу охолодження, що порушує досягнутий охолоджений стан. У дисертації автором пропонується модель, що дозволяє оцінювати температуру в процесі охолодження з використанням ентропії Шеннона (4).

У моделі охолодження представлено, як процес взаємодії двох систем. Перша система — це ансамбль локалізованих частинок — система «атом», характеризується середньою швидкістю руху $\langle v \rangle$ та температурою T . Якщо система «атом» є рівноважною, то розподіл часток за швидкостями виражається законом розподілу $p(v)$ Максвелла. Броунівський рух частинок системи «атом», поглинання та випромінювання фотонів у процесі охолодження дозволяє віднести її до відкритих, хаотичних, дисипативних систем. Значення ентропії (4) ансамблю частинок визначається розподілом Максвелла.

Друга система — лазерний імпульс, який характеризується частотою f_0 і розширенням лінії випромінювання Δf_0 — система «лазер». Розподіл інтенсивності випромінювання за частотами f відповідає закону Гауса. Стабілізоване за частотою одномодове випромінювання характеризується високим ступенем монохроматичності $\Delta f_0 / f_0 \ll 1$. Систему «лазер» можна віднести до квазідетермінованої системи. Ентропія одномодового випромінювання при $\Delta f_0 \rightarrow 0$ мінімальна $H \rightarrow 0$ та визначається розподілом Гауса.

У момент часу t_0 (до взаємодії лазерного імпульсу з частинками) система «атом» характеризується середньою швидкістю руху частинок v_0 , температурою T_0 , та ентропією $H_A(f_0, t_0)$. Система «лазер» характеризується частотою випромінювання $f_0 \pm \Delta f_0$, та ентропією $H_L(f_0, t_0)$ (рис. 5 а). Після припинення взаємодії (поглинання та перевипромінювання фотонів) в момент часу $t = \tau$ параметри систем змінюються. Швидкість руху молекул зменшується, пік функції розподілу інтенсивності лазерного випромінювання зміщується в бік вищих частот і відповідає резонансній частоті переходу для даного типу частинок, а спектральна лінія випромінювання Δf розширюється. Система «атом» набуває характеристики v , T , $H_A(v, t)$, система «лазер» — характеристики $H_L(f, \tau)$ (рис. 5 б).

Вирази для ентропії Шеннона в моменти часу t_0 та τ мають вигляд:

$$H_A(v, t_0) = -p(v_0) \ln p(v_0), \quad H_L(f, t_0) = -p(f_0) \ln p(f_0), \quad (22)$$

$$H_A(v, \tau) = -p(v) \ln p(v), \quad H_L(f, \tau) = -p(f) \ln p(f). \quad (23)$$

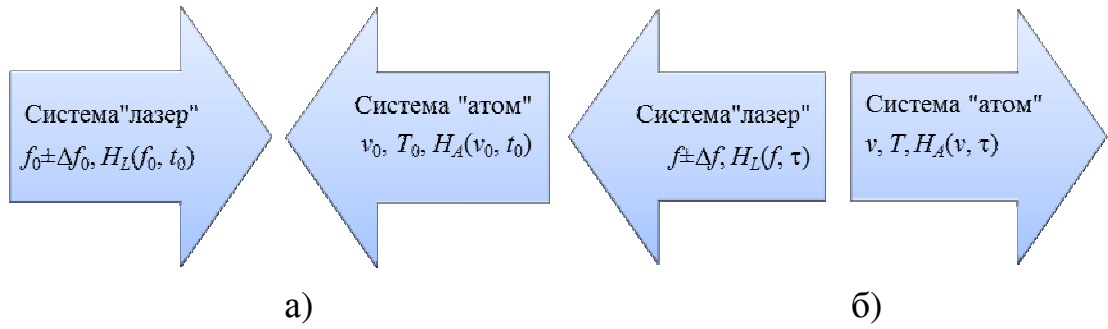


Рис. 5. Схема взаємодії системи «лазер» та системи «атом»:

а) системи в момент початку взаємодії $t = t_0$;

б) системи в момент закінчення взаємодії $t = \tau$

При цьому: $H_A(v, \tau) < H_A(v, t_0)$ система «атом» стає більш впорядкованою; $H_L(f, \tau) > H_L(f, t_0)$ система «лазер» стає більш хаотичною. Зміну стану систем можна виразити через кількість інформації для системи «атом» I_A і системи «лазер» I_L :

$$\left. \begin{aligned} I_A &= H_A(v, t_0) - H_A(v, \tau) = \Delta H_A, \\ I_L &= H_L(f, t_0) - H_L(f, \tau) = \Delta H_L. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Скориставшись законом збереження інформації із (24) отримаємо:

$$|\Delta H_A| = |\Delta H_L|. \quad (25)$$

Вираз (25) дозволяє, аналізуючи зміни параметрів системи «лазер», оцінювати параметри системи «атом». Мінімальне значення ентропія системи «атом» $H_A(v) = 0$ приймає за відсутності теплового руху частинок. Вираз (25) у будь-який момент часу можна представити у вигляді:

$$|\Delta H_A(\Delta T)| = |\Delta H_L(\Delta f)|. \quad (26)$$

Рівність (26) дозволить визначити зв'язок між зміною ентропії системи «лазер», ентропії та температури системи «атом»:

$$\Delta T = \Delta T \left[|\Delta H_L(\Delta f)| \right]. \quad (27)$$

Наведені вирази дозволяють визначити зміни ентропії та температури системи «атом» у моменти часу t_0 і τ , а також отримати вираз для різниці ентропії ΔH_L :

$$H_L(f, t_0) = \ln(\Delta f_0 \sqrt{2\pi e}),$$

$$H_L(f, \tau) = \ln(\Delta f \sqrt{2\pi e}),$$

$$|\Delta H_L(\Delta f)| = H_L(f, t_0) - H_L(f, \tau) = \left| \ln \frac{\Delta f_0}{\Delta f} \right|. \quad (28)$$

Таким чином, вимірюючи частоту спонтанного випромінювання та оцінюючи зміну його ентропії, можна оцінити зміну ентропії та температури системи охолоджених частинок після будь-якої кількості циклів «поглинання — спонтанне випромінювання фотона», що відкриває можливості контролю

процесу охолодження та оцінювання температури з малими дискретними значеннями ΔT . Для реалізації цього завдання пропонується ентропійна шкала оцінювання температури охолоджуваних частинок. Спираючись на вираз щільності розподілу часток за швидкостями $p(v)$ і вираз для ентропії Шеннона $H_A[p(v)]$, складається безперервна двовимірною шкала значень у координатах «температура-ентропія». Реперна точка шкали $H_A = 0$ за $T = 0$. Таким чином, застосування інформаційно-ентропійного підходу та ентропійної шкали, запропоновані в моделі вимірювань в НДС, дозволяє оцінити температуру ансамблю частинок у процесі лазерного охолодження в будь-який момент часу.

У розділі також представлено розроблену автором **топологічну модель ідентифікації оптичних систем** [37]. Модель заснована на гіпотезі щодо фрактальної структури оптичного сигналу, відбитого від просвітленого покриття оптичних приладів, та визначенні фрактальної розмірності розподілу інтенсивності в площині перетину відбитого від цілі лазерного променя. Наближення значення фрактальної розмірності (5) до одиниці $1,1 \leq D \leq 1,3$ є передумовою до ідентифікації цілі, як оптичного приладу спостереження. На думку автора, для класифікації типу оптичного приладу поряд із фрактальною розмірністю повинен бути розроблений ансамбль фрактальних ознак — вид фрактальних сигнатур, вид просторового спектра і значення просторових частот, що характеризують структуру сигналу.

Таким чином, у розділі вперше запропоновані експериментальні моделі досліджень фізичних систем на основі теоретичної моделі вимірювань в НДС. Моделі дозволяють досліджувати системи станів НДС та вимірювати їхні параметри в умовах стійких і нестійких, враховуючи і хаотичні.

У **розділі 5 «Експериментальна модель дослідження біофізичних нелінійних динамічних систем»** вперше, на основі теоретичної моделі вимірювання в НДС, розроблено модель дослідження стану біофізичної НДС з функцією самоорганізації, яка еволюціонує. Застосування моделі дозволяє досліджувати та управляти НДС в умовах хаотичної динаміки. Основні результати досліджень, що містяться у розділі, відображено в роботах [13], [14], [21], [36].

Розроблення експериментальних моделей дослідження біофізичних НДС необхідне для вивчення питання інформаційного впливу на процеси в живих організмах з метою управління ними. Дослідження людини, як НДС, дозволяє розробляти пристрої та системи лікування та діагностики, складати індивідуальні терапевтичні програми і програми підготовки спортсменів, раціонально використовувати індивідуальні здібності особистості.

У розробленій автором моделі розглядаються відкрита бістабільна біофізична НДС із функцією самоорганізації (рис. 6). Система характеризується n -ю кількістю ДЗ $X_i(t)$, що відображають динаміку функцій або органів. Бістабільність моделі означає, що система може перебувати в стійкому і збудженому станах, які характеризуються відповідними

значеннями ДЗ $X_{Stab}(t)$ і $X(t)$, ентропією H_{Stab} і $H(t)$, часом передбачення динаміки T_{for} . Кожна ДЗ визначається своїм інтервалом значень $[X_{Stab}^{\min}(t), X_{Stab}^{\max}(t)]$ та $[X^{\min}(t), X^{\max}(t)]$, вихід за ці рамки говорить про порушення функції, що характеризується даною ДЗ. Зазначимо, що еволюція системи обумовлює можливість зміни цих інтервалів із часом.

Ключовим елементом моделі є T — час повернення системи з порушеної в стійкий стан після припинення нормованого впливу Q і саме значення нормованого впливу. Цей показник пропонується, як кількісний показник «здоров'я» біофізичної НДС. У випадку збою в функціонуванні системи, час повернення T зростає, або ДЗ $X(t)$ не може повернутися в стійкий стан самостійно. Вимірювання стану (здоров'я) розглядається як вимір значень ДЗ та часу повернення в стійкий стан після нормованого впливу. Як інструменти аналізу пропонується ентропійні та часові шкали, запропоновані у МВ в НДС.

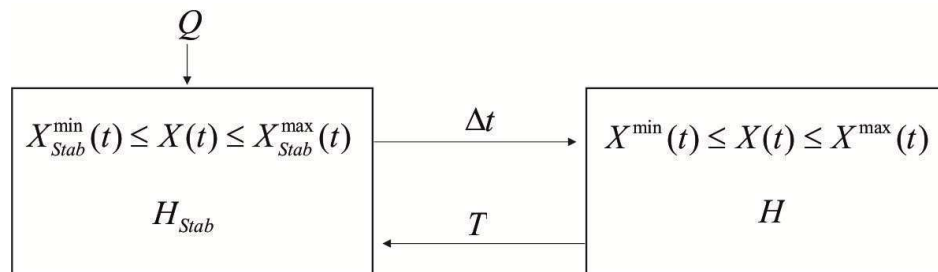


Рис.6. Схема відкритої бістабільної НДС із функцією самоорганізації

Для аналізу стану системи в моделі використовується критерій «S-теорема» Ю. Клімантовіча з нормованою ентропією Шеннона (29), яка приймає значення від 0 (регулярне протікання процесів) до 1 (рівноважний стан). Значення ентропії для стійкого стану H_{Stab} ($0 < \|H_{Stab}\| < 1$) є третьою точкою шкали. Будучи характеристикою стану системи, ентропія біофізичних НДС змінюється з часом внаслідок зовнішніх впливів і еволюції системи. Результат її вимірювання згідно з критерієм «S-теорема» необхідно порівняти із значенням стійкого стану H_{Stab} :

$$\Delta H = H - H_{Stab} . \quad (30)$$

На практиці дослідники біофізичних систем, наприклад людини, значення норми ентропії H_{Stab} визначають як усереднене значення для ряду подібних НДС, що, на думку автора, суперечить завданню індивідуального підходу до складного об'єкта дослідження. Для системи із функцією еволюції значення норми ентропії змінюється.

У дисертації сформульовані умови та принципи визначення норми ентропії біофізичних НДС: 1) норма ентропії H_{Stab} змінюється при еволюційних змінах, тому її значення повинно періодично визначатися заново; 2) за експериментальними даними визначається значення ентропії H

у момент спостереження; 3) за формулою (29) визначаються нормовані значення H та H_{Stab} ; 4) із виразу (30) визначається показник ступеня хаотичності ΔH ; 5) відповідно до ентропійної шкали виконується аналіз зміщення динаміки ДЗ в бік хаотичності або регулярності. Визначена таким чином норма ентропії H_{Stab} є реперною точкою ентропійної шкали оцінювання стану біофізичної НДС.

Внаслідок впливу на систему: $X_i(t) \in [X_i^{\min}(t), X_i^{\max}(t)] \neq [X_{Stabi}^{\min}(t), X_{Stabi}^{\max}(t)]$, $\|H_i(t)\| \neq \|H_{Srabi}\|$. Після припинення дії значення $X_i(t)$ повертаються в стійкий стан за час T_i . У результаті вимірювань з використанням удосконаленого методу Таккенса (рис. 4) відновлюється ФП та складається ПВ виду:

$$\left. \begin{array}{l} [X_{Stabi}^{\min}(t_0), X_{Stabi}^{\max}(t_0)], \|H_{Srabi}\|, T_{forStabi} \\ [X_i^{\min}(t), X_i^{\max}(t)], \|H_i\|, T_{fori} \\ T_i, i = 1, \dots, n. \end{array} \right\} \quad (31)$$

Оцінювання динаміки стану НДС виконується за допомогою запропонованих автором ентропійних і часових шкал:

$$\left. \begin{array}{l} 0 \dots \|H_{Stabi}\| \dots 1, \\ 0 \dots T_{i0} \dots \infty, \\ i = 1, \dots, n. \end{array} \right\} \quad (32)$$

У моделі автором вирішена задача визначення нормованого впливу Q . Значення Q має бути таким, щоб система, вийшовши зі стійкого стану, могла самостійно в нього повернутися. Тобто значення Q не повинно перевищувати якогось критичного значення Q_{\max} , $Q \leq Q_{\max}$. Для визначення Q_{\max} величина зовнішнього впливу Q була пов'язана з показником ступеня хаотичності ΔH (30) $\Delta H = H_I - H_{Stab}$, де H_I — значення ентропії збудженого стану, за якого система не може самостійно повернутися в стійкий стан. При цьому:

$$\left. \begin{array}{l} H_{Stab} = -\sum_i p(X_i, X_{Stab}^{\min}, X_{Stab}^{\max}) \ln p(X_i, X_{Stab}^{\min}, X_{Stab}^{\max}), \\ H_I = -\sum_i p(X_i, X_I^{\min}, X_I^{\max}) \ln p(X_i, X_I^{\min}, X_I^{\max}) \end{array} \right\} \quad (33)$$

Із виразу (33) визначається значення ступеня хаотичності, відповідне зовнішньому впливу Q_{\max} .

Представлена модель дослідження біофізичної НДС призначена для вироблення індивідуальних підходів до діагностики та лікування людини, в тому числі точного індивідуального дозування медичних процедур і фармацевтичних препаратів. Модель може бути використана для конструювання медичних приладів і систем вимірювання величин із можливою хаотичною динамікою.

У розділі наведені результати застосування МВ НДС для дослідження стану та вимірювання характеристик людини, яка регулярно займається фізкультурою. Протягом часу спостереження (21 тиждень) раз на тиждень виконувалися вимірювання параметрів: нижня частина стегна (X_1), верхня частина стегна (X_2), стегна (X_3), нижня частина живота (X_4), талія (X_5), верхня частина живота (X_6), маса (X_7) (таблиця). Таким чином були отримані сім часових рядів результатів вимірювання ДЗ з дискретністю $\Delta t=7$ днів. Був побудований ПВ та отримані інтервальні значення ДЗ, значення фрактальної розмірності (D) та ентропії Шеннона (H).

Таблиця.

Результати вимірювання ДЗ, рівень довіри $p=0,95$.

ДЗ	$Y_i \in [y_i^{\min} \pm U_i(y); y_i^{\max} \pm U_i(y)]$	$D_i \pm U_i(D)$	$H_i \pm U_i(H_i)$
X_1	$[0,430 \pm 0,0041; 0,450 \pm 0,0041]$ м	$[1,47 \pm 0,026]$	$[0,891 \pm 0,016]$
X_2	$[0,615 \pm 0,0041; 0,660 \pm 0,0041]$ м	$[1,2 \pm 0,020]$	$[1,117 \pm 0,019]$
X_3	$[1,010 \pm 0,0041; 1,070 \pm 0,0041]$ м	$[1,2 \pm 0,025]$	$[1,117 \pm 0,018]$
X_4	$[0,840 \pm 0,0041; 0,910 \pm 0,0041]$ м	$[1,02 \pm 0,019]$	$[2,117 \pm 0,039]$
X_5	$[0,735 \pm 0,0041; 0,760 \pm 0,0041]$ м	$[1,2 \pm 0,026]$	$[1,417 \pm 0,030]$
X_6	$[0,755 \pm 0,0041; 0,780 \pm 0,0041]$ м	$[1,00 \pm 0,012]$	$[1,235 \pm 0,015]$
X_7	$[67 \pm 0,0041; 70 \pm 0,0041]$ кг	$[1,1 \pm 0,025]$	$[0,712 \pm 0,016]$

Аналіз результатів вимірювань дозволяє стверджувати, що всі ДЗ демонстрували квазідетерміновану динаміку, що характерно для НДС із функцією самоорганізації. Значення фрактальної розмірності всіх ДЗ знаходяться в інтервалі $1 < D < 1,5$. При цьому для ДЗ $X_2 \dots X_7$ $D \rightarrow 1$, а для X_1 (нижня частина стегна) $D \rightarrow 1,5$. Тобто, динаміка X_1 близька до випадкового процесу. Аналіз значень ентропії Шеннона говорить про те, що найбільш варіабельними є ДЗ X_4 ($H \approx 2$) і X_5 ($H \approx 1,4$), а найменш варіабельні ДЗ X_1 ($H \approx 0,9$) та X_7 ($H \approx 0,7$).

Результати виконаного експерименту підтверджують ефективність розробленої моделі дослідження біофізичної системи на основі моделі вимірювань в НДС та ефективність обраних інструментів аналізу результатів експерименту.

Таким чином у розділі вперше розроблено експериментальну модель дослідження біофізичної системи на основі теоретичної моделі вимірювання в НДС, що дозволяє досліджувати системи з хаотичною динамікою. Модель може бути застосована для проведення медичних досліджень величин із хаотичною динамікою.

ВИСНОВКИ

Дисертаційну роботу присвячено вирішенню актуальної наукової задачі — розроблянню принципів положень теорії дослідження нелінійних динамічних систем (НДС) на основі принципів і моделей вимірювань в НДС із хаотичною динамікою.

Для досягнення поставленої мети автором було вирішено такі основні завдання:

1. Вперше для розроблення моделі вимірювання в нелінійних динамічних системах систематизовано процеси та властивості НДС, що впливають на процес і результат вимірювань.

Як умови створення теоретичної моделі вимірювань в НДС виділено такі: інтервальність значень вимірюваних величин, їх нелінійна, хаотична динаміка, сильна залежність від початкових умов і шумів, еволюція та самоорганізація.

Як математичні інструменти аналізу результатів вимірювання вперше запропоновано використовувати разом фазовий портрет та портрет вимірювання, фрактальну розмірність, ентропію Шеннона, час передбачення.

2. Вперше розроблено фізико-математичні основи вимірювання величин із складною хаотичною динамікою, що характеризують НДС із функцією самоорганізації, які еволюціонують.

Вперше обґрунтовано, що теоретична модель вимірювань в НДС повинна враховувати наступні умови: величина, яка вимірюється, характеризується не єдиним істинним (дійсним) значенням, а інтервалом значень; гіпотеза ергодичності підтверджується не завжди; динаміка вимірюваних величин може мати нелінійний, стохастичний або хаотичний характер, що веде до стохастичності та хаотичності результатів вимірювання; часові ряди результатів вимірювань можуть характеризуватися, як немарківські процеси та мати гаусдорфову розмірність; незначна зміна початкових умов спричиняє суттєві зміни результатів вимірювань; результат вимірювань повинен бути оцінений за допомогою невизначеності.

Наведено результати застосування фрактального аналізу при дослідженні динаміки стабільності частоти лазерного випромінювання та напруги електричного струму. Дослідження показало, що фрактальна розмірність результатів вимірювань стабільності лазера перебувала в інтервалі $D = 1,05 - 1,1$, що вказує на те, що лазери відносяться до систем із функцією самоорганізації і персистентною динамікою. Аналіз результатів вимірювання напруги електричного струму показав зміну фрактальної розмірності від $D = 1 - 1,04$ (процес детермінований), до $D = 1,46$ (процес стохастичний). Досліджувану систему можна розглядати як НДС із функцією самоорганізації, проте велика кількість зовнішніх впливів та шумів перешкоджає процесу стабілізації.

3. Вперше розроблено адаптивну теоретичну модель, яка забезпечує вимірювання та дослідження нелінійних динамічних систем у випадку детермінованої, стохастичної та хаотичної динаміки.

У моделі вимірювання вперше спільно використано: інтервали значень вимірюваних величин, фрактальний та ентропійний аналіз, час передбачення. Вперше для вимірювання в умовах хаосу запропоновано новий інструмент аналізу — портрет вимірювань. Модель дозволяє виконувати вимірювання та оцінювання результатів вимірювання в умовах як стійкої, так і хаотичної динаміки НДС.

Сформульовано принципи складання рівняння вимірювання в НДС. Для випадку, коли математичний опис процесів неможливий, запропоновано використовувати портрет вимірювання. Для відновлення фазового портрету НДС запропоновано удосконалений метод Таккенса, що враховує невизначеності результатів вимірювань.

4. Отримала подальший розвиток теорія невизначеності результатів вимірювання в НДС. Вперше розроблено принципи оцінювання та подання результатів вимірювання величин із хаотичною динамікою. Результат вимірювання в НДС запропоновано представляти в наступній формі. Вимірювана величина представляється інтервалом значень з урахуванням невизначеностей вимірювання їх кордонів. Значення динамічних змінних всередині інтервалу відображаються у вигляді гістограми. Наводяться найбільш і найменш вірогідні значення динамічних змінних з їх невизначеностями та ймовірності появи. Наводяться фрактальна розмірність, ентропія Шеннона і час прогнозування.

Запропоновано використовувати ентропійний підхід до оцінювання невизначеності вимірювання, що дозволяє уникнути необхідності призначати значення довірчої ймовірності. Вперше отримано вираз зв'язку ентропії Шеннона та фрактальної розмірності, яка дозволяє виконувати аналіз причин, що впливають на значення невизначеності вимірювання.

5. На основі результатів досліджень вперше розроблені експериментальні моделі дослідження параметрів фізичних і біофізичних НДС.

Розроблено модель дослідження параметрів випромінювання лазера, модель дослідження процесу лазерного охолодження частинок і модель дослідження стану біофізичної системи. Моделі дозволяють досліджувати системи та вимірювати параметри систем в умовах стійкої та хаотичної динаміки НДС.

Модель дослідження параметрів випромінювання лазера як НДС призначена для вимірювання та дослідження стаціонарних і хаотичних режимів лазерного випромінювання. Модель передбачає вимірювання інтервалів значень параметрів випромінювання в різних режимах, значень їх стабільності та часу передбачення. Класифікація динаміки системи виконується за допомогою фрактальної розмірності. Вперше отримано вираз залежності стабільності параметра випромінювання від фрактальної розмірності, застосування якого дозволяє контролювати ступінь хаотизації динаміки.

Досліджено задачу забезпечення можливості застосування нанолазерів в інформаційно-вимірювальних технологіях. Результати досліджень показали, що для випромінювання на довжині хвилі $\lambda=1,5$ мкм у режимі

надвипромінювання пікова потужність випромінювання становить $P = 10,9$ мкВт, що забезпечує дальність передавання сигналу одномодовим волокном із коефіцієнтом втрат $\alpha = 0,5$ дБ/км $L \approx 750$ м. При цьому стабілізацію частоти пропонується здійснювати по лінії поглинання йоду в дефекті фотонного кристала. Аналіз параметрів випромінювання та їхньої динаміки виконується за допомогою розробленої автором моделі дослідження параметрів випромінювання лазера на основі теоретичної моделі вимірювання в НДС.

Розроблено модель дослідження процесу лазерного охолодження частинок. Застосування інформаційно-ентропійного підходу та ентропійної шкали, розроблених автором, дозволяє контролювати процес та оцінювати температуру ансамблю частинок у процесі лазерного охолодження в будь-який момент часу.

Розроблено топологічну модель ідентифікації оптичних систем. Модель заснована на гіпотезі щодо фрактальної структури оптичного сигналу, відображеного від покриття оптичних приладів. Наближення значення фрактальної розмірності до одиниці $1,1 \leq D \leq 1,3$ є передумовою до ідентифікації цілі, як оптичного приладу спостереження.

Розроблено модель дослідження біофізичної системи як НДС. У рамках моделі проводяться вимірювання динамічних змінних системи в стаціонараному та збудженому станах. Результатом вимірювання є інтервали значень динамічних змінних, фрактальна розмірність, ентропія Шеннона і час прогнозування динаміки. Для оцінювання еволюційних процесів у модель введені ентропійні та часові шкали. Як кількісна характеристика стану системи використовується час її повернення в стаціонарний стан після припинення нормованого зовнішнього впливу. Наведено результати застосування моделі при дослідженні параметрів людини.

Розроблені теоретичні та експериментальні моделі можуть бути застосовані для створення та застосування хаотичних лазерів та медичних систем вимірювання величин з хаотичною динамікою.

До перспективних напрямків подальших досліджень належать: застосування результатів досліджень для розвитку теорії й практики управління параметрами випромінювання нанолазерів, розроблення лазерної та медичної техніки, систем солітонного зв'язку.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографія

1. Мачехин Ю. П., Курской Ю. С. Основы нелинейной метрологии. Новый подход в теории измерений: монография. LAP, 2014. 168 с.

Статті

2. Grechko L. G., Pinchuk A. O., Kurskoy Yu. S., Lesjo A. On a Problem of Anomalous Absorption of Far-Infrared Radiation by Small Metallic Particles. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2000. Vol. 2, № 1. С. 95—99.
3. Мачехин Ю., Курской Ю.. Модель измерения параметров нелинейных динамических систем. *Системи обробки інформації*. 2012. № 1. С. 169—175.
4. Мачехин Ю., Курской Ю. Анализ результатов измерений в нелинейных динамических системах. *Системи обробки інформації*. 2012. № 7. С. 117—122.
5. Мачехин Ю., Курской Ю. Энтропийный анализ динамических переменных. *Системи обробки інформації*. 2013. № 1. С. 100—104.
6. Курской Ю. С. Особенности измерений в реальных динамических системах. *Энергетика, энергосбережение и энергоаудит*. 2013. № 4. С. 64—71.
7. Курской Ю. Энтропийная шкала оценки результата измерений. *Системы обработки информации*. 2013. № 9. С. 169—175.
8. Курской Ю. С. Фрактальный анализ результатов электрических измерений. *Энергетика, энергосбережение и энергоаудит*. 2014. № 1. С. 52—57.
9. Machekhin Yu., Kurskoy Yu. Features of entropy analysis of measurement results in nonlinear dynamical systems. *Метрологія та прилади*. 2013. № 6. С. 17—21.
10. Курской Ю. Здоровье как объект измерения. *Системи обробки інформації*. 2014. № 3. С. 124—126.
11. Мачехин Ю. П., Курской Ю. С. Фрактально-энтропийный анализ результатов измерений в нелинейных динамических системах. *Измерительная техника*. 2014. № 6. С. 18—21.
12. Machekhin Yu., Kurskoy Yu. Fractal-entropy analysis of measurement results in nonlinear dynamical systems. *Measuring technique*. 2014. Vol. 57, № 6. P. 609—704.
13. Мачехин Ю. П., Курской Ю. С. Модель измерения здоровья человека. Метрологический подход. *Метрологія та прилади*. 2014. № 2. С. 40—44.
14. Мачехин Ю., Курской Ю. Норма энтропии как реперная точка шкалы измерения здоровья. *Метрологія та прилади*. 2014. № 6. С. 56—60.
15. Курской Ю. Применение интервального анализа для оценки неопределенности измерений в сложных системах. *Системи обробки інформації*. 2015. № 2. С. 146—148.
16. Мачехин Ю. П., Курской Ю. С. Составление уравнения измерения энтропии Шеннона нелинейных динамических систем с использованием

- методов интервального анализа. *Приборы и методы измерений*. 2015. Т. 6, № 2. С. 257—263.
17. Machekhin Yu., Kurskoy Yu. The Development of Nonlinear Metrology Methods. *Стандартизація, сертифікація, якість*. 2015. № 4. С. 61—65.
 18. Machekhin Yu., Kurskoy Yu. The Evaluation of Cooled Particles Parameters by Instruments of Nonlinear Metrology. *Метрологія та прилади*. 2015. № 6. С. 50—53.
 19. Мачехин Ю. П., Курской Ю. С., Гнатенко А. С. Измерение величин со сложной динамикой как основная задача нелинейной метрологии. *Метрология и приборостроение*. 2016. № 6. С. 18—21.
 20. Machekhin Yu., Kurskoy Yu., Prisch E. The measurement portrait of dynamic variables. *Метрологія та прилади*. 2016. № 5. С. 48—51.
 21. Machekhin Yu., Kurskoy Yu., Prisch E. A human as a research object for metrology of nonlinear dynamic systems. *Метрологія та прилади*. 2017. № 1. С. 63—66.
 22. Мачехин Ю. П., Курской Ю. С. Физические основы метрологии нелинейных динамических систем. *Український метрологічний журнал*. 2017. № 1. С. 8—10.
 23. Machekhin Yu., Kurskoy Yu. Expression of uncertainty in measurement of nonlinear dynamic variables. *Метрологія та прилади*. 2017. № 3. С. 49—51.
 24. Мачехин Ю. П., Курской Ю. С. Составление модели измерения в нелинейных динамических системах. *Метрологія та прилади*. 2018. № 1. С. 58-62.
 25. Мачехин Ю. П., Курской Ю. С., Гнатенко А. С. Физико-математические основы измерений в нелинейных динамических системах. *Радиотехника*. 2018. № 192. С. 102—105.
 26. Gnatenko A. S., Machekhin Yu. P., Kurskoy Yu. S., Obozna V. P, Providing mode locking in fiber ring lasers. *J. Nano-Electron. Phys.* 2018. № 2. P. 02033.
 27. Мачехин Ю. П., Курской Ю. С., Гнатенко А. С., Ткаченко В. А. Сверхизлучение нанолазеров в информационно-измерительных процедурах. *Радіофізика та електроніка*. 2018. Т. 23, № 2. С. 61—68.
 28. Gnatenko A. S., Machekhin Yu. P., Kurskoy Yu. S., Obozna V. P., Vasianovych A. V. Ring fiber lasers for telecommunication systems. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2018. Vol. 77, №. 6. P. 541—548.
 29. Мачехин Ю. П., Курской Ю. С., Гнатенко А. С. Энтропийная оценка процесса лазерного охлаждения. *J. Nano-Electron. Phys.* 2018. № 10. P. 02033.
 30. Kurskoy Yu. S., Machekhin Yu. P., Gnatenko A. S. Topological methods in measurement and research of nonlinear dynamical systems. *Вісник ХНУ. Серія «Фізика»*. 2018. № 29. С. 22—28.

31. Мачехин Ю. П., Курской Ю. С., Гнатенко А. С. Принципы моделирования измерений в оптических нелинейных динамических системах. *Радиотехника*. 2018. № 194. С. 29—33.
32. Machekhin Yu. P., Gnatenko A. S., Kurskoy Yu. S. Photonic Crystal Nanolasers As Optical Frequency Standards. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2018. Vol. 77, № 13. P. 1169—1177.
33. Machekhin Yu. P., Kurskoy Yu. S., Gnatenko A. S., Tkachenko V. A. Nanolaser Superradiation In Information And Measuring Procedures. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2018. ol. 77, № 13. P. 1179—1186
34. Machekhin Yu. P., Gnatenko A. S., Kurskoy Yu. S. Laser Anemometry Method For Particle Velocity Measurement In The Bose-Einstein Condensate. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2018. Vol. 77, № 17. P. 1555—1563.
35. Machekhin Yu. P., Kurskoy Yu. S., Gnatenko A. S. Physical and mathematical foundations of measurements in nonlinear dynamic systems. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2018. Vol. 77, № 18. P. 1631—1637
36. Курской Ю. С. Модель измерения для систем с функцией самоорганизации. *Бионика интеллекта*. 2018. Вып. 91. №2. С. 94—98.
37. Курской Ю. С. Топологическая идентификация оптических систем. *Радиотехника*. 2019. Вып. 196. С. 51—54.
38. Курской Ю. С. Теоретическая модель измерения параметров лазерного излучения. *Радиотехника*. 2019. Вып. 197. С. 86—92.

Тези доповідей на конференціях

39. Kurskoy Yu., Gnatenko O., Neofitnyi M., Machekhin Yu. Topological Model of Laser Emission Parameters Research. *CAOL: 2019* : proceedings of inter. conf., 6—8 Sep. 2019. Sozopol, Bulgaria, 2019. P. 280—283.
40. Kurskoy Yu. S. Usage of the nonlinear metrology instruments for research the laser cooling process. *Functional Basis of Nanoelectronics: 2019* : proceedings of inter. scient. conf, 16—21 Sept. 2019. Kharkov-Odessa, 2019. P. 136—140.
41. Nikolaiev S., Pozhar V., Dzyubenko M., Nikolaiev K., Kurskoy Yu. Laser Emission of Dye Solutions Co-doped with Silver Nanoparticles. *CAOL: 2019* : proceedings of inter. conf., 6-8 Sep. 2019. Sozopol, Bulgaria, 2019. P. 284—287.
42. Gulak S., Cherkashyn A., Balashov I., Zarytskyi V., Kurskoy Yu., Zhdanova Yu. Laser Marking System for Plastic Products. *CAOL: 2019* : proceedings of inter. conf., 6—8 Sep. 2019. Sozopol, Bulgaria, 2019. P. 361—364.
43. Таровский Д. М., Курской Ю. С. Аппаратное обеспечение лазерного охлаждения частиц. *Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: 2015 г.* : матер. 19-го Междунар. Молод. форума, 20—22 апр. 2015 г. Харьков: ХНУРЭ, 2015. С. 187—188.
44. Урсой Е. Ю., Шеруда В. Ю., Курской Ю. С., Применение лазерного излучения для управления движением атомов. *Радиоэлектроника и*

- молодежь в XXI веке: 2015 г.* : матер. 19-го Междунар. Молод. форума., 20—22 апр. 2015 г. Харьков: ХНУРЭ, 2011. С. 189—190.
45. Урсой Е. Ю., Шеруда В. Ю., Курской Ю. С. Перспективы использования охлаждённых молекул йода. *Функциональная база нанoeлектроники: 2015 г.*: матер. VIII межд. науч. конф. 28 сент. – 2 окт. 2015 г. Одесса, 2015. С. 91—94
46. Мачехин Ю. П., Курской Ю. С., Гнатенко А. С. Измерение величин со сложной динамикой как основная задача нелинейной метрологии. *Неопределённость измерений: научные, законодательные, методические и прикладные аспекты: 2016 г.* : матер. XIII межд. науч.-тех. сем. 13—14 апр. 2016 г. Минск, 2016. С. 86—89.
47. Курской Ю. С. Нелинейная метрология как универсальный инструмент исследования сложных систем. *Физика, электроника и электротехника: 2016 г.* : мат. межд. конф. 18—22 апр. 2016 г. Сумы, 2016. С. 23.
48. Мачехин Ю. П., Курской Ю. С. Физические основы метрологии нелинейных динамических систем. *Метрологія та вимірювальна техніка: 2016 р.* : матер. X міжнар. наук.-практ. конфер. 5-7 жовт. 2016 р. Харків: ННЦ «ІМ», 2016 р. С. 22.
49. Курской Ю. С., Гнатенко А. С., Сивни В. Б. Неопределённость измерения величин с нелинейной динамикой. *Неопределённость измерений: научные, законодательные, методические и прикладные аспекты: 2017 р.* : матер. XIV межд. науч.-тех. семин. 8 сент. 2017 г. Созополь, Болгария. 2017 г. С. 86—89.
50. Мачехин Ю. П., Курской Ю. С., Гнатенко А. С. Информационно-измерительные процедуры с использованием сверхизлучения нанoлазеров. *Функциональная база нанoeлектроники: 2017 г.*: матер. X межд. науч. конф. 18—24 сент. 2017 г. Одесса. 2017 г. С. 135—137
51. Мачехин Ю. П., Курський Ю. С., Гнатенко О. С., Пуляев Ю. С. Керування параметрами нанoлазерів. *Функциональная база нанoeлектроники: 2017 г.*: матер. X межд. науч. конф. 18—24 сент. 2017 г. Одесса. 2017 г. С. 128—130
52. Курський Ю. С., Гнатенко О. С., Сівні В. Б., Крапельні лазери *Функциональная база нанoeлектроники: 2017 г.*: матер. X межд. науч. конф. 18—24 сент. 2017 г. Одесса. 2017 г. С. 131—134
53. Мачехин Ю. П., Курской Ю. С., Сивни В. Б., Ткаченко В. В. Принципы построения модели измерения в нелинейных динамических системах. *Метрологія, інформ.-вимір. технології та системи: 2017 р.* : матер. VI міжнар. наук.-техн. конф. 24-25 жовт. 2017 р. Харків: ННЦ «ІМ». 2017. С. 95.
54. Курской Ю. С., Гнатенко А. С., Сивни В. Б. Решение сложных измерительных задач методами нелинейной метрологии. *Неопределённость измерений: научные, законодательные, методические и прикладные аспекты: 2017 р.* : матер. XV междунар. науч.-тех. семин. 10 сент. 2017 г. Созополь, Болгария. 2018 г. С. 24.

55. Курской Ю. С., Гнатенко А. С., Сивни В. Б. Решение сложных измерительных задач методами нелинейной метрологии *Метрологія та вимірювальна техніка: 2018 р.* : матер. XI міжнар. наук.-практ. конфер. 5—7 жовт. 2018 р. Харків: ННЦ «ІМ», 2018 р. С. 187.
56. Ткаченко В. А., Курський Ю. С. Дослідження параметрів лазерного випромінювання. *Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті: 2019 р.* : матер. міжнар. молод. фор. 16-18 квіт 2019 р. Харків: ХНУРЕ. 2019. С. 264—265.

Анотація

Курський Ю. С. Теоретична модель вимірювань в нелінійних динамічних системах. — на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 — фізика приладів, елементів і систем. — Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2019.

Метою дисертаційної роботи є розроблення принципів положень теорії дослідження нелінійних динамічних систем (НДС) на основі моделей вимірювань у НДС. Для досягнення мети була вирішена низка завдань. Вперше систематизовано властивості НДС і динамічних змінних, які впливають на процес та результат вимірювання: інтервальність значень вимірюваних величин із хаотичною динамікою, сильна залежність від початкових умов та шумів, еволюція та самоорганізація. Вперше розроблено фізико-математичні основи вимірювань в НДС із хаотичною динамікою. Вперше розроблено теоретичну модель вимірювання та аналізу результатів вимірювань в НДС. Отримала розвиток теорія невизначеності результатів вимірювання в НДС. Вперше, на основі моделі вимірювань в НДС, розроблено моделі дослідження: параметрів хаотичного випромінювання лазера, параметрів процесу лазерного охолодження частинок, стану біофізичної системи та топологічна модель ідентифікації оптичних систем.

Розроблені теоретичні та експериментальні моделі вимірювань і досліджень НДС з хаотичною динамікою призначені для створення, вивчення, прогнозування та управління складними системами з нелінійною, хаотичною динамікою — лазери з хаотичним випромінюванням та медичні системи вимірювання величин з хаотичною динамікою.

Ключові слова: нелінійна динамічна система, лазер, хаос, модель вимірювань, модель дослідження, ентропія Шеннона, фрактальна розмірність.

Аннотация

Курской Ю. С. Теоретическая модель измерений в нелинейных динамических системах. — на правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 — физика приборов, элементов и систем. — Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2019.

Целью диссертационной работы является разработка принципиальных положений теории исследования нелинейных динамических систем (НДС) на основе моделей измерений в НДС.

Вследствие проявления таких свойств, как диссипативность, нелинейность, хаотизация и самоорганизация НДС являются одними из самых сложных для изучения объектов. К таким системам относятся лазеры с хаотическими характеристиками излучения и медицинские приборы диагностики и измерения параметров организма. Комплексная задача моделирования, создания, изучения, прогнозирования и управления сложными системами требует разработки теории исследования на основе принципов и моделей измерений в НДС.

При достижении цели в работе были получены следующие результаты. Впервые систематизированы процессы и свойства нелинейных динамических систем, влияющие на процесс и результат измерений: интервальность значений измеряемых величин, их нелинейная, хаотическая динамика, сильная зависимость от начальных условий и шумов, эволюция и самоорганизация. В качестве инструментов анализа результатов измерений впервые предложено использовать: фазовый портрет, фрактальную размерность, энтропию Шеннона, время прогнозирования.

Впервые разработаны физико-математические основы измерений величин со сложной, хаотической динамикой, которые характеризуют эволюционирующие НДС с функцией самоорганизации. Установлено, что классическая теория измерений и созданные в её рамках модели измерений построены на принципах и физико-математических основах, не учитывающих свойства НДС, что препятствует корректному проведению исследований.

Обосновано, что теоретическая модель измерений в НДС должна учитывать следующие условия: измеряемая величина характеризуется не единственным истинным (действительным) значением, а интервалом значений; гипотеза о эргодичности подтверждается не всегда; динамика измеряемых величин измерений может иметь нелинейный, стохастичный или хаотичный характер, что ведёт к стохастичности и хаотичности результатов измерения; временной ряд результатов измерений может представлять немарковский процесс, иметь хаусдорфову размерность; незначительное изменение начальных условий ведёт к существенным изменениям результатов измерений; результат измерений должен быть оценён при помощи неопределённости. Для исследования и классификации динамики НДС в теоретической модели предлагается использовать фрактальный анализ рядов результатов измерения.

В диссертации впервые разработана адаптивная теоретическая модель, обеспечивающая измерение и исследование НДС в случае детерминированной, стохастической и хаотической динамики. В модели впервые совместно использованы: интервалы значений измеряемых величин, фрактальный и энтропийный анализ, время прогнозирования и портрет измерений. Модель позволяет выполнять измерения и оценку результатов в условиях устойчивой и хаотической динамики НДС. Сформулированы

принципы создания уравнения измерения: традиционное уравнение дополнено функциональной зависимостью от времени входных величин, шумов и выходной величины, а также начальными значениями входных величин, функциями их эволюции и временем прогнозирования.

Получила дальнейшее развитие теория неопределённости измерений в НДС. Впервые разработаны принципы оценки и представления результатов измерений величин с хаотической динамикой. Результат измерений в НДС предложено представлять в виде: результатов измерений интервалов значений величин и их неопределённостей, портрета измерений, значений фрактальной размерности, энтропии и времени прогнозирования.

Впервые разработаны практические модели исследований физических и биофизических систем на основе теоретической модели измерений в НДС. Разработана модель исследования параметров лазерного излучения, предназначенная для измерений и исследований стационарных и хаотических режимов излучения. Исследована задача обеспечения применения нанолазеров в информационно-измерительных технологиях. Анализ параметров излучения и их динамики выполняется при помощи разработанной модели исследования.

Разработана модель исследования процесса лазерного охлаждения частиц. Применение информационно-энтропийного подхода и энтропийной шкалы позволяет оценить температуру ансамбля частиц в процессе охлаждения в любой момент времени.

Разработана топологическая модель идентификация оптических систем. Модель основана на гипотезе о фрактальной структуре оптического сигнала, отражённой от просветляющего покрытия оптических приборов и определении фрактальной размерности распределения интенсивности в плоскости сечения отражённого от цели лазерного импульса.

Разработана модель исследования биофизической системы в равновесном и возбуждённом состояниях. Применение модели позволит разрабатывать приборы и системы диагностики и лечения, составлять индивидуальные программы лечения пациентов, подготовки спортсменов, рационально использовать индивидуальные способности.

Результаты диссертационного исследования содержат принципиальные положения теории исследования нелинейных динамических систем на основе моделей измерений в НДС. Теоретические и экспериментальные модели измерений и исследований могут быть применены для решения комплексной задачи создания, изучения, прогнозирования и управления сложными системами различной природы с нелинейной, хаотической динамикой.

Ключевые слова: нелинейная динамическая система, лазер, хаос, модель измерений, модель исследования, энтропия Шеннона, фрактальная размерность.

Abstract

Kurskoy Yu. S. Theoretical Model of Measurements in Nonlinear Dynamical Systems. — as a manuscript.

Doctor of Physical and Mathematical Sciences Thesis, discipline 01.04.01 – physics of devices, components and systems. — Kharkov National University of Radio Electronics, Kharkov, 2019.

The task of dissertation is developing of the fundamental principles of nonlinear dynamical systems (NDS) research theory based of NDS measurements model. To achieve this goal the next tasks were solved at the first time. The process and properties of NDS that influence for the measurement process and result were systematized. The interval values of measured quantities with chaotic dynamics, the strong dependence on initial conditions and noise, evolution and self-organization process and other properties were described. The physico-mathematical bases of measurements in NDS with chaotic dynamics were developed. These results allowed develop an adaptive theoretical model for measuring and analyzing of the measurements results in NDS. The measurement model is based on the principles of open systems, dynamic chaos and topology theories, fractal and entropy analysis principals. The measurement uncertainty theory is developed for NDS case. Also the research models, based on the NDS measurement model, are developed. It is the chaotic laser radiation parameters research model, laser cooling process research model, biophysical system state research model and topological model of the hiding optical systems identification.

The results of this work can be considered as the part of fundamental principles of NDS research theory. The approach of the new theoretical and experimental measurement and research models allows to design, study, and control complex systems with nonlinear, chaotic dynamics — lasers with chaotic radiation and medical systems for measuring the human quantities with chaotic dynamics.

Key words: Nonlinear Dynamical System. Laser, Chaos, Measurement Model, Research Model, Shannon Entropy, Fractal Dimension.