

ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, професора,
професора кафедри теоретичної радіотехніки та радіовимірювань
Національного університету «Львівська політехніка»
Бондарева Андрія Петровича
на дисертаційну роботу Семенова Андрія Олександровича
на тему: «Методи і пристрої генерування та формування сигналів з
регулярною й хаотичною динамікою для інфокомунікаційних систем», яку
подано на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби
телекомунікацій

Актуальність теми дисертації.

У більшості традиційних систем зв'язку в носієм інформації використовують гармонічні коливання. Однак, подальше застосування цих носіїв інформації обмежене вимогами малої потужності, енергоефективності, а також підвищеними вимогами щодо завадостійкості та швидкості передавання інформації. На сучасному етапі розвитку бездротових інформаційних технологій широкого поширення набули UWB системи передавання інформації, які носійною використовують надширокосмугові сигнали з дуже низькою спектральною густиною потужності. Однак, такі системи ефективні на малих відстанях, граничне значення яких становить десятки або кілька сотень метрів. Альтернативою електричних сигналів з регулярною динамікою коливань як носійних у системах передавання інформації є використання електричних сигналів із хаотичною динамікою. Застосування електричних сигналів із хаотичною динамікою як носійних для систем передавання інформації дає можливість суттєво збільшити відстань впевненого зв'язку, оскільки системи із використанням сигналів детермінованого хаосу мають набагато вищу чутливість до найменших змін їхніх параметрів. Така обставина розширює набір методів і практичних схем введення інформаційного сигналу в хаотичний носій. До того ж хаотичні сигнали мають широкий спектр частот, а тому мають більшу інформаційну місткість у порівнянні із вузькосмуговими носійними коливаннями. Широка смуга частот носійної збільшує швидкість передавання інформації, а також підвищує стійкість системи до збурюючих факторів. Широко- та надшироко-смугові системи зв'язку, принципи роботи яких базовані на використанні сигналів детермінованого хаосу, мають потенційні переваги перед традиційними системами із широким спектром по таким визначальним параметрам, як простота апаратної реалізації, енергетична ефективність, високі завадостійкість і швидкість передачі інформації. Хаотичні сигнали також використовують для маскуванню інформації, яку передають у системах зв'язку без використання розширення спектра, тобто за умови збігу смуги частот інформаційного і переданого сигналів. Сукупність вказаних

факторів зумовлює активні дослідження застосування хаотичних сигналів для інфокомунікаційних систем, а тому тема дисертаційної роботи є **актуальною**.

Дисертаційна робота Семенова Андрія Олександровича “Методи і пристрої генерування та формування сигналів з регулярною й хаотичною динамікою для інфокомунікаційних систем” є завершеною науковою працею, яка виконана за актуальною темою як з точки зору наукового внеску здобувача, так і з точки зору практичного значення отриманих ним результатів. На основі виконаних у роботі досліджень отримані нові наукові результати у створенні теоретичних засад та практичних положень елементів теорії коливальних, теорії радіопередавальних пристроїв, що виявилось у розробленні нових схем і математичних моделей генераторів періодичних, квазіперіодичних і хаотичних електричних сигналів, режими яких оптимізовані за їх інформаційними властивостями, а також таких пристроїв формування сигналів як електрично керовані фільтри та фазообертачі, помножувачі та дільники частоти сигналів тощо для практичного застосування в інфокомунікаційних системах.

За сукупністю отриманих результатів, їх рівнем теоретичної та практичної значущості вважаю, що у роботі вирішена важлива *науково-прикладна* проблема – розроблення нових та вдосконалення відомих методів і пристроїв генерування та формування сигналів, що забезпечують керування регулярною та хаотичною динамікою сигналів із електричним перелаштуванням параметрів автоколивних систем таких пристроїв у широких межах зі збереженням стійкості режимів їх роботи, що оптимізовані за максимумом ентропії й фрактальної розмірності. Це уможливило вдосконалити апаратну частину пристроїв генерування та формування сигналів з урахуванням вибору параметрів автоколивних систем таких пристроїв для забезпечення їх максимальних інформаційних властивостей як джерел повідомлень, а також забезпечити стійкі хаотичні режими при дії адитивного білого шуму.

Отримані Семеновим А.О. у дисертаційній роботі аналітичні вирази, запропоновані нові схемні рішення та математичні моделі пристроїв генерування та формування сигналів із регулярною та хаотичною динамікою, нові результати числових розрахунків і математичного моделювання, комп'ютерного схемотехнічного моделювання та експериментальних досліджень підтверджують новизну та актуальність розв'язаних в дисертаційній роботі задач.

Оцінка змісту та завершеності дисертації.

У дисертаційній роботі викладені наукові положення, висновки та рекомендації в достатній мірі обґрунтовані та в більшості підтверджені експериментально.

У **першому розділі** наведено результати аналізу літературних джерел і патентного огляду таких радіотехнічних пристроїв генерування та формування

сигналів з регулярною та хаотичною динамікою, як генератори періодичних і хаотичних сигналів, помножувачі та подільники частоти, електричні фільтри та фазообертачі. Встановлено, що перспективним підходом до їх побудови є використання нелінійних і реактивних властивостей транзисторних схем і структур із від'ємним диференціальним опором.

У **другому розділі** розроблено генератори електричних сигналів з регулярною динамікою осциляторного, релаксаційного та квазіперіодичного типів. Наведено електричні схеми побудованих генераторів, описано принципи роботи і приведено результати дослідження динамічних процесів у них за допомогою удосконаленої математичної моделі Ван дер Поля, яка, на відміну від відомої, містить квадратичний член нелінійності автоколивної системи генератора на основі транзисторних структур із від'ємним диференціальним опором і враховує координати положення робочої точки на спадній ділянці ВАХ та уможливує електричне керування параметрами генерованих періодичних сигналів.

У роботі запропоновані електричні схеми керованих напругою генераторів УВЧ сигналів з регулярною динамікою, які побудовані за методом Ван дер Поля на основі БТ-МДН і НЕМТ ТСВО. Експериментально встановлено, що при зміні напруги у межах 1,6..2,5 В і 1,3..2,9 В частота генерації перелаштовується в діапазонах 880..930 МГц і 1825..2025 МГц з коефіцієнтами перекриття частоти генерації 5,5% і 10,4 % відповідно.

За методом Ван дер Поля побудовані генератори релаксаційного типу. За рахунок використання нелінійних і реактивних властивостей транзисторних структур із від'ємним диференціальним опором забезпечено електричне керування періодом повторення прямокутних і лінійно-змінних імпульсів генерованої напруги.

Побудовано генератор багаточастотних коливань Ван дер Поля на основі польової транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором та уперше запропоновано його математичну модель, що, на відміну від відомих, забезпечує розрахунок режимів живлення генератора для отримання одно-, три- і багато- частотних коливань. Отримано рівняння амплітуди стаціонарних коливань основної частоти, нижньої і верхньої границі смуги робочих частот і величини критичного перелаштування по частоті та встановлено, що вони залежать від величини від'ємного диференціального опору та геометричної форми спадної ділянки ВАХ транзисторних структур.

У **третьому розділі** наведено результати дослідження сучасних методів і пристроїв генерування сигналів детермінованого хаосу, що побудовані за схемою Колпітца. Удосконалено елементи теорії генераторів детермінованого

хаосу за схемою Колпітца з одностранзисторними та двотранзисторними активними елементами. Запропоновано використати керовані напругою транзисторні еквіваленти ємності на основі біполярних ТСВО як ємнісні елементи коливальних систем генераторів детермінованого хаосу за схемою Колпітца. Досліджено хаотичну динаміку генераторів за схемою Колпітца та їх інформаційні властивості. Максимальна ентропія Колмогорова-Сіная становить $H = 0,1292$ та $H = 0,1642$ для одностранзисторного та двотранзисторного генераторів Колпітца відповідно, а їх фрактальна розмірність становить відповідно $d_F = 2,1123$ і $d_F = 2,6293$. Отримано фазові портрети автоколивних систем генераторів детермінованого хаосу за схемою Колпітца з одностранзисторним та двотранзисторним активними елементами, а також часові та частотні характеристики генерованих ними хаотичних коливань.

Результати дослідження методів керування хаотичною динамікою генератора детермінованого хаосу за схемою Колпітца дозволяють стверджувати, що набув поширення метод параметричної стабілізації режиму роботи активного елемента, зокрема за допомогою струмового дзеркала. Для стабілізації параметрів генерованих хаотичних коливань, підвищення стабільності та зменшення впливу зовнішніх факторів на генератор Колпітца у дисертаційній роботі набув подальшого розвитку балансний метод, суть якого полягає у використанні принципу балансу електричного моста.

Вимірювальними засобами віртуальної лабораторії NI Multisim досліджено генератор Колпітца з диференційним інтегральним елементом у режимі детермінованого хаосу. Побудовано гістрограми розподілу функції ймовірності генерованих імпульсів напруги прямого та інверсного виходів генератора. Амплітудно-частотних спектри хаотичних сигналів прямого та інверсного виходів мають ширину смуги частот 500 МГц.

У **четвертому розділі** розроблено генератори детермінованого хаосу за методом Кияшко-Піковського-Рабіновича на основі польової та біполярної транзисторних структур із від'ємним диференційним опором, що мають нелінійності Λ -типу, на відміну від відомих, що мають нелінійності N -типу, та досліджено динамічні процеси, що мають місце в них за дії адитивного білого шуму.

У роботі автором удосконалені математичні моделі генераторів Кияшко-Піковського-Рабіновича на основі польової та біполярної транзисторних структур із від'ємним диференційним опором. Оцінено вплив адитивного білого гаусового шуму на динамічні процеси, параметри та характеристики хаотичних коливань генератора Кияшко-Піковського-Рабіновича. Встановлено, що вплив адитивного білого шуму на динаміку хаотичних коливань в

генераторі Кияшко-Піковського-Рабіновича на основі польової транзисторної структури з від'ємним диференційним опором спостерігається при інтенсивності шуму починаючи з відносного рівня $D \geq 0,01$.

Здійснено оптимізацію параметрів автоколивної системи генератора Кияшко-Піковського-Рабіновича на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференційним опором за максимумом його інформаційних властивостей, зокрема ентропії Колмогорова-Сіная.

У **п'ятому розділі** за методом Аніщенко-Астахова розроблено генератори детермінованого хаосу на основі біполярної та БТ-МДН транзисторних структур із від'ємним диференційним опором. Для дослідження динамічних процесів, що відбуваються в генераторах, запропоновано нормовані рівняння апроксимації статичних ВАХ транзисторних структур із від'ємним диференційним опором з використанням функції гіперболічного тангенсу. Удосконалено математичну модель генератора Аніщенко-Астахова, в якій на відміну від відомої, використана функція гіперболічного тангенсу для опису впливу нелінійних властивостей ВАХ на динаміку хаотичних коливань. Показана можливість генерації хаотичних коливань генератора Аніщенко-Астахова із нелінійностями N- і Λ - типів.

Розроблено PSpice моделі генератора детермінованого хаосу з інерційною нелінійністю на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференційним опором для використання в програмах схмотехнічного моделювання Orcad 9.2 та Multisim 10.1. Отримано результати комп'ютерного схмотехнічного моделювання хаотичного режиму генераторів. Проведено експериментальні дослідження генераторів детермінованого хаосу з інерційною нелінійністю на основі біполярної та біполярно-польової транзисторних структур із від'ємним диференційним опором. Забезпечено електричне управління режимами і динамікою коливань генераторів. Як практичні результати в роботі отримано фазові портрети, часові та частотні характеристики коливань в осциляторному, релаксаційному, періодичному та хаотичних режимах.

Оцінено статичні та інформаційні параметри сигналів генераторів детермінованого хаосу з інерційною нелінійністю на основі транзисторних структур із від'ємним диференційним опором.

У **шостому розділі** розроблені за методом Чуа та досліджені нові схеми генераторів детермінованого хаосу на основі БТ, МДН і БТ-МДН транзисторних структур із від'ємним диференційним опором, що мають ВАХ із кубічною нелінійністю. Досліджено режими розвиненого хаосу з атрactorами типу «одиначний завиток» і «подвійний завиток».

Вперше виявлено та досліджено явище детермінованого хаосу з керуванням напругою динамікою генерованих коливань в базовій схемі мікроелектронного генератора на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференційним опором із сімейством ВАХ Λ -типу, у якій, на відміну від відомих, забезпечено широкий діапазон зміни параметрів генерованих періодичних і хаотичних коливань, а також режим розвинутого хаосу. Розроблено новий малопотужний генератор детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференційним опором і ВАХ N -типу та отримано результати експериментальних досліджень динаміки електричних коливань у осциляторному, хаотичному і релаксаційному режимах його роботи.

У сьомому розділі удосконалено математичну модель неавтономних пристроїв формування періодичних сигналів на основі нелінійних властивостей транзисторних структур із від'ємним диференційним опором, що, на відміну від існуючих, застосовує узагальнене трансцендентне рівняння для апроксимації статичних ВАХ Λ -типу і враховує режими живлення та зовнішнього збудження для опису процесів підсилення вхідного сигналу, амплітудної модуляції сигналу та ділення частоти сигналу на електрично керований коефіцієнт поділу. Це дозволило отримати фазові портрети і фігури Ліссажу, часові та частотні характеристики сформованих періодичних коливань.

Досліджено принцип формування сигналів із регулярною динамікою, який полягає у компенсації від'ємним диференційним опором активних втрат в автоколивній системі неавтономного радіотехнічного пристрою, що викликає перетворення енергії постійного струму джерела живлення в енергію змінних у часі нелінійних коливань, суперпозиція яких із вхідним сигналом перетворює його спектральний склад. Розроблено нові електричні схеми та конструкції пристроїв формування сигналів на базі транзисторних структур із від'ємним диференційним опором: помножувачів частоти у 2 та 3 рази діапазону 600..900 МГц, одно- і дво-ланкових фільтрів низьких частот з частотою зрізу в діапазоні 0,2...2 МГц і фазообертачів сигналів діапазону 900 МГц, робочі параметри яких керуються напругою. Отримано результати їх теоретичних і експериментальних досліджень.

Виходячи з аналізу основної частини дисертації, можна зробити висновок, що дисертація є завершеною науковою кваліфікаційною роботою.

Достовірність та новизна наукових положень.

Достовірність одержаних у роботі результатів не викликає сумнівів, забезпечена строгістю постановки сформульованих задач і методів їх розв'язку і

підтверджена: відповідністю результатів досліджень даними випробувань; широким застосуванням в роботі сучасних експериментальних методів; представленими у роботі доказами, створеними за допомогою загальнонаукових принципів; достатнім рівнем апробації на науково-практичних конференціях; використанням результатів роботи на чотирьох підприємствах, у шести держбюджетних роботах, а також у навчальному процесі двох університетів України. Науковими результатами роботи є:

1. *Набув подальшого розвитку* метод Ван дер Поля генерування періодичних сигналів осциляторного і релаксаційного типів, удосконалена математична модель якого, на відміну від відомої, містить квадратичний член нелінійності автоколивної системи генератора на основі транзисторних структур із від'ємним диференційним опором і враховує координати положення робочої точки на спадній ділянці ВАХ та уможливорює електричне керування параметрами генерованих періодичних сигналів. Це дало змогу розрахувати часові діаграми та частотні характеристики генерованої напруги за дії адитивного білого шуму.

2. *Уперше запропоновано* математичну модель багаточастотного генератора квазіперіодичних сигналів, побудованого за методом Ван дер Поля, на основі польової транзисторної структури з від'ємним диференційним опором, що, на відміну від відомих, забезпечує розрахунок режимів живлення генератора для отримання одно-, дво-, три- і багато- частотних коливань. Отримані рівняння амплітуди стаціонарних коливань основної частоти, нижньої і верхньої границі смуги робочих частот і величини критичного перелаштування по частоті та встановлено, що вони залежать від величини від'ємного диференційного опору та геометричної форми спадної ділянки ВАХ транзисторних структур.

3. *Уперше запропоновано* узагальнене трансцендентне рівняння апроксимації статичних ВАХ транзисторних структур із від'ємним диференційним опором, що, на відміну від відомих, описує в нормованих змінних нелінійні властивості різних геометричних форм статичних ВАХ Λ -типу.

4. *Уперше встановлено*, теоретично обґрунтовано і досліджено процеси виникнення режимів хаотичних коливань у побудованих за методом Кияшко-Піковського-Рабіновича генераторах на основі транзисторних структур із від'ємним диференційним опором із нелійнностями Λ -типу на відміну від класичного генератора Кияшко-Піковського-Рабіновича, принцип дії та елементи теорії якого базуються на основі приладів з від'ємним диференційним опором із нелійнностями N -типу.

5. *Удосконалено* математичну модель генератора сигналів детермінованого хаосу, побудованого за методом Кияшко-Піковського-Рабіновича, що, на відміну від відомої, враховує вплив нелінійних властивостей підсилювального елемента генератора на динаміку хаотичних коливань і яка базується на апроксимації статичних ВАХ транзисторних структур із від'ємним

диференційним опором узагальненим трансцендентним рівнянням. Це дало змогу визначити умови керованості динамікою генератора в осциляторному, періодичному та хаотичному режимах при електричному перелаштуванні параметрів автоколивної системи генератора.

6. *Уперше запропоновано*, теоретично обґрунтовано та експериментально досліджено схемні варіанти генераторів детермінованого хаосу, принцип функціонування яких, на відміну від відомих, що мають зовнішні кола додатного зворотного зв'язку, полягає у компенсації активних втрат автоколивних систем генераторів від'ємним диференційним опором транзисторних структур, існування спадних ділянок сімейства ВАХ яких зумовлене внутрішнім додатним зворотним зв'язком, що дало змогу забезпечити електричне керування динамікою генерованих коливань у осциляторному, релаксаційному та хаотичному режимах.

7. *Удосконалено* математичну модель генератора детермінованого хаосу типу Аніщенко-Астахова на основі транзисторних структур із від'ємним диференційним опором, що, на відміну від відомої, враховує нелінійність статичних ВАХ Λ -типу транзисторних структур і використовує узагальнене трансцендентне рівняння. Це дало змогу врахувати вплив форми спадних ділянок ВАХ транзисторних структур на режими роботи та умови керованості динамікою сигналів генератора зі збереженням стійкості хаотичних режимів їх роботи.

8. *Удосконалено* математичну модель неавтономних пристроїв формування періодичних сигналів на основі нелінійних властивостей транзисторних структур із від'ємним диференційним опором, яка, на відміну від існуючих, застосовує узагальнене трансцендентне рівняння для апроксимації статичних ВАХ Λ -типу і враховує режими живлення та зовнішнього збудження для опису процесів підсилення вхідного сигналу, амплітудної модуляції сигналу та ділення частоти сигналу на електрично керований коефіцієнт поділу, що дозволило отримати фазові портрети і фігури Ліссажу, часові та частотні характеристики сформованих періодичних коливань.

9. *Уперше виявлено* та досліджено явище детермінованого хаосу з керуванням напругою динамікою генерованих сигналів у базовій схемі мікроелектронного генератора на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференційним опором, у якій, на відміну від відомих, забезпечено широкий діапазон зміни параметрів генерованих періодичних і хаотичних коливань електричних сигналів, а також режим розвинутого хаосу.

Важливість отриманих результатів для науки і практики, можливі шляхи використання результатів дослідження.

Наукові результати, отримані автором, можуть бути використані в як теоретична база для створення нових радіотехнічних пристроїв і засобів телекомунікацій для генерування та формування сигналів із заданими параметрами та характеристиками, режими яких оптимізовані за максимумом інформаційних властивостей, здатних працювати за дії адитивного білого шуму.

Розроблені в дисертації наукові положення, висновки та рекомендації дають можливість більш системно, комплексно й ефективно вирішувати прикладні завдання, які пов'язані із запровадженням нових та таких, що набули подальшого розвитку, моделей, структур і пристроїв генерування й формування сигналів з регулярною та хаотичною динамікою для інфокомунікаційних систем.

Практичне значення одержаних результатів дослідження полягає в наступному:

1. Розроблено та досліджено побудовані за методом Ван дер Поля на БТ-МДН і НЕМТ транзисторних структурах з від'ємним диференційним опором електричні схеми УВЧ генераторів сигналів осциляторного типу з електричним перелаштуванням частоти генерації в діапазонах 880..930 МГц і 1825..2025 МГц з коефіцієнтами перекриття частоти генерації 5,5% і 10,4 % шляхом зміни напруги живлення у межах 1,6..2,5 В і 1,3..2,9 В відповідно.

2. Розроблено та досліджено побудовані за методом Ван дер Поля електричні схеми генераторів релаксаційного типу, період повторення прямокутних і лінійно-змінних імпульсів напруги яких у діапазоні 0,13..1,67 мкс керується напругою живлення 5..30 В при зміні струмів споживання 2,7..18,1 мА. Отримано співвідношення для інженерного розрахунку часових параметрів генерованих імпульсів прямокутної та лінійно-змінної напруги.

3. Оптимізовані параметри автоколивних систем електричних схем одотранзисторного та двотранзисторного генераторів Колпітца за максимумом їх інформаційних властивостей. Встановлено, що ентропія Колмогорова-Сіная $H = 0,1642$ та фрактальна розмірність $d_F = 2,6293$ двотранзисторного генератора Колпітца більші за ентропію Колмогорова-Сіная $H = 0,1292$ та фрактальну розмірність $d_F = 2,1123$ одотранзисторного генератора Колпітца.

4. Запропоновано та досліджено низькочастотну електричну схему генератора Колпітца з електричним керуванням динамікою сигналів детермінованого хаосу з основною частотою 10,3 кГц та шириною спектра 25 кГц. Побудовано гістрограми функції розподілу ймовірності хаотичних сигналів при короткотривалому спостереженні протягом 1,1 с при зміні напруги керування в межах 9..28 В.

5. Встановлено, що ефективним способом керування динамікою сигналів детермінованого хаосу генератора Колпітца діапазону частот УВЧ є зміна режиму роботи активного елемента генератора, а тому набули поширення метод параметричної стабілізації режиму роботи активного елемента генератора Колпітца з використанням струмового дзеркала та балансний метод з використанням диференційного каскаду, що у 1,06 та 1,12 разів підвищують запас стійкості генератора Колпітца відповідно при часі встановлення хаотичних коливань 844..862 мкс.

6. Запропоновано нові електричні схеми генераторів детермінованого хаосу, побудованих за методом Кияшка-Піковського-Рабіновича, на основі польових і біполярних транзисторних структур із від'ємним диференційним опором та досліджено дію адитивного білого гаусового шуму на динаміку

хаотичних сигналів. Встановлено, що вплив адитивного білого гаусового шуму спостерігається при його інтенсивності починаючи з відносного рівня $D > 0,01$.

7. Здійснено оптимізацію параметрів автоколивної системи генератора Кияшка-Піковського-Рабіновича на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференційним опором за максимумом ентропії Колмогорова-Сіная, значення яких становлять $\varepsilon = 0,2$, $h = 0,115$ і $g = 0,775$. Встановлено, що ентропія Колмогорова-Сіная оптимізованого генератора $H = 0,1605$ є більшою за ентропію Колмогорова-Сіная одностранзисторного генератора Колпітца $H = 0,1292$ та є на рівні ентропії Колмогорова-Сіная двотранзисторного генератора Колпітца $H = 0,1642$. У той же час, фрактальна розмірність генератора Кияшка-Піковського-Рабіновича $d_F = 2,004$ менша, ніж у одностранзисторного $d_F = 2,1123$ та двотранзисторного $d_F = 2,6293$ генераторів за схемою Колпітца.

8. Запропоновано нові електричні схеми генераторів детермінованого хаосу, побудованих за методом Аніщенко-Астахова, на основі біполярної та БТ-МДН транзисторних структур із від'ємним диференційним опором. З'ясовано, що використання транзисторної структури з сімейством ВАХ Λ -типу розширює фазовий простір генерованих хаотичних коливань. Для класичної математичної моделі Аніщенко-Астахова при $d = 0,1..0,2$ хаотичний режим забезпечується при значеннях коефіцієнтів $m = 0,72..1,2$ і $g = 0,13..0,9$. Для запропонованих варіантів автоколивних систем при $d = 0,1$ хаотичний режим встановлюється при значеннях коефіцієнтів $m = 0,07..1,7$ і $g = 0,4..3,4$, внаслідок чого максимальна ентропія Колмогорова-Сіная становить $H = 0,0295$ і фрактальна розмірність – $d_F = 2,0391$.

9. Запропоновано нову електричну схему генератора детермінованого хаосу, побудованого за методом Чуа, на основі МДН транзисторної структури з від'ємним диференційним опором, що у режимі розвинутого хаосу має фазовий портрет з атрактором типу «подвійний завиток», що забезпечує кращі його інформаційні властивості (ентропія Колмогорова-Сіная $H = 0,2947$ і фрактальна розмірність $d_F = 2,0973$) за умови кубічної нелінійності ВАХ МДН транзисторної структури та симетричної схеми живлення.

10. Розроблено нові електричні схеми та конструкції помножувачів у 2 та 3 рази частоти УВЧ сигналів діапазону 600..900 МГц з електричним керуванням коефіцієнта множення, що базуються на реактивних властивостях біполярної, польової та БТ-МДН транзисторних структур із від'ємним диференційним опором.

11. На основі реактивних властивостей транзисторних структур із від'ємним диференційним опором розроблено фільтри низьких частот з електричним керуванням частотою зрізу в діапазоні 0,2..2 МГц та величиною згасання поза смугою пропускання $-14,5$ дБ/декада для одноланкових та $-29,1$ дБ/декада для дволанкових фільтрів. Розроблено електрично керовані УВЧ фазообертачі відбивного типу діапазону 900 МГц, зміна фази яких становить $-78^\circ..+75^\circ$ при напрузі керування 2,1..2,8 В і модулі коефіцієнта відбиття 0,12..0,08 на основі БТ-МДН та $-140^\circ..160^\circ$ при напрузі керування

2,9..4,3 В і модулі коефіцієнта відбиття 0,63..0,33 на основі МДН ТСВО. Втрати на частоті 900 МГц для обох схем становлять 1,17 дБ і 2,08 дБ відповідно.

Практична значимість отриманих результатів підтверджується їх використанням і впровадженням у дослідно-конструкторській роботі: ТОВ «ДЖЕМІКЛ» (акт про впровадження №12 від 27.08.2018 р.); АТ «БАНКОМЗВ'ЯЗОК» (акт про випробування № 696/1 від 21.08.2018 р.); ТОВ «ДАЙТЕКС ТЕХНОЛОДЖІС» (акт про використання № 23082018/1 від 23.08.2018 р.); ТОВ «ВЕНБЕСТ» (акт про впровадження від 28.08.2018 р.).

Методи досліджень, які використані в дисертаційній роботі.

Текст і стиль викладу дисертації є фаховим та одночасно доступним для широкого кола дослідників в галузі проектування радіотехнічних пристроїв та засобів телекомунікацій, завдяки вірним застосуванням апарату методів теорії радіотехнічних кіл та сигналів, теорії коливань, елементів математичної теорії нелінійної динаміки, фракталів і хаосу, методів теорії статистичного та кореляційного аналізу для оцінювання параметрів генерованих сигналів з регулярною й хаотичною динамікою, методів математичного моделювання та методів розв'язування нелінійних диференціальних рівнянь; методів комп'ютерного схемотехнічного моделювання електричних схем; методів аналізу нелінійної динаміки хаотичних систем, коректними та зваженими формулюваннями та узагальненнями, що свідчить про високу кваліфікацію автора.

Зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами.

Отримані в дисертаційній роботі результати безпосередньо пов'язані з виконанням низки науково-дослідних робіт в яких автор приймав участь як виконавець, а саме: «Розробка математичних моделей мікроелектронних частотних перетворювачів магнітного поля на основі транзисторних структур з від'ємним опором» номер державної реєстрації 0110U002160, «Розробка радіовимірювальних перетворювачів температури на основі реактивних властивостей напівпровідникових структур» номер державної реєстрації 0113U002287С, «Розробка радіовимірювальних пристроїв на основі транзисторних структур з від'ємним опором» номер державної реєстрації 0113U003133, «Радіовимірювальні сенсори фізичних величин на основі реактивних властивостей і від'ємного опору напівпровідникових структур» номер державної реєстрації 0115U001123, «Розроблення теоретичних засад, методів і приладів вимірювання та контролю газового середовища на військових та цивільних об'єктах» номер державної реєстрації 0117U000573, «Методи та пристрої формування, оброблення й вимірювання сигналів радіоінформаційних систем промислових і військових об'єктів» номер державної реєстрації 0117U007139.

Обґрунтованість і достовірність наукових результатів висновків і рекомендацій.

Достовірність та обґрунтованість наукових положень та висновків, отриманих за результатами теоретичних досліджень, забезпечена:

1. Чіткістю та послідовністю у постановці завдань досліджень.
2. Коректністю використання сучасного математичного апарату теорії коливань, нелінійної динаміки та детермінованого хаосу.
3. Послідовним використанням методів теорії радіотехнічних кіл та сигналів для аналізу динамічних процесів у електричних схемах пристроїв генерування та формування сигналів, а також для дослідження питань керованості режимів роботи таких пристроїв в періодичних і хаотичних режимах.
4. Застосуванням методів комп'ютерного схемотехнічного проектування та моделювання електричних схем і використанням сучасних спеціалізованих програмних продуктів «National Instruments Multisim 10.1», «PSpice Orcad 9.2», «Micro-Cap 9.0» – для дослідження часових і частотних параметрів і характеристик пристроїв генерування та формування періодичних сигналів і сигналів детермінованого хаосу.
5. Застосуванням обчислювальних методів математичного моделювання й розв'язання нелінійних диференційних рівнянь автоколивних систем генераторів, а також теорії статистичного та кореляційного аналізу для оцінювання параметрів генерованих сигналів з регулярною й хаотичною динамікою з використанням сучасних універсальних програмних продуктів «MathCad 15.0» і «MATLAB 7.0.1» та спеціалізованого програмного продукту дослідження нелінійних динамічних систем «DEREK 3.0».
6. Застосуванням теорії планування експерименту та комп'ютерного оброблення результатів досліджень для експериментальної перевірки отриманих теоретичних положень.
7. Коректністю поставлених задач, використанням апробованих сучасних математичних методів по розробленню генераторів детермінованого хаосу за методами Кияшко-Піковського-Рабіновича, Аніщенко-Астахова та Чуа на основі нелінійних властивостей польових, біполярних і біполярно-польових транзисторних структур із від'ємним диференційним опором, збіжністю отриманих результатів математичного та комп'ютерного схемотехнічного моделювання з результатами експериментальних досліджень.

Публікації та апробація результатів дисертаційної роботи.

Аналіз опублікованих автором праць свідчить про те, що основні наукові результати, наведені у дисертації, висвітлені у публікаціях автора.

Основні результати дисертаційної роботи Семенова А.О. опубліковано у 70 наукових працях серед яких 21 праця одноосібно: 2 монографії в співавторстві, 27 статей (з яких 7 одноосібно) у наукових фахових виданнях

України, 2 статті у наукових періодичних виданнях інших держав, що індексовані у науково-метричних базах Scopus та Web of Science, 6 статей (усі 6 одноосібно) у журналах, що включені до міжнародних наукометричних баз даних, 19 публікацій (з яких 8 одноосібно) у матеріалах міжнародних IEEE конференцій з наряду, з якого підготовлено дисертацію, що включені до наукометричних баз даних Scopus, Web of Science. За результатами роботи отримано 3 патенти України на винахід і 11 патентів України на корисну модель.

Відповідність дисертації встановленим вимогам.

Зміст дисертаційної роботи Семенова А.О. на тему: «Методи і пристрої генерування та формування сигналів з регулярною й хаотичною динамікою для інфокомунікаційних систем» відповідає паспорту спеціальності 05.12.13 – «Радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій» з технічних наук, за якою вона подається до захисту, а також профілю спеціалізованої вченої ради Д 35.052.10. Дисертація задовольняє вимогам, які висуваються до робіт на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук та пп. 9, 10 і 12 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника».

Автореферат дисертації в повній мірі розкриває основні наукові результати та положення отримані при виконання роботи. Стил викладення матеріалів дисертаційної роботи доступний та забезпечує без ускладнень доступність сприйняття отриманих практичних і наукових результатів.

Зауваження до дисертаційної роботи.

1. З роботи недостатньо зрозуміло особливості оптимізації розроблених генераторів детермінованого хаосу та за максимумом якої саме ентропії здійснена така оптимізація – ентропії генерованих ними хаотичних сигналів чи ентропії самих генераторів як джерел повідомлень. Не виокремлені зміни, внесені здобувачем до математичних моделей та схемних рішень генераторів.

2. Крім загального огляду відомих методів моделювання і розробки генераторів у Розділі 1, Розділи 2, 3, 4, 5 починаються з підрозділів, присвячених огляду відомих методів стосовно генераторів різних типів, хоча мали би містити виключно розробки здобувача.

3. Кількісна оцінка отриманих здобувачем результатів наведена виключно у частині практичного використання і не містить порівняння із раніше досягнутими результатами інших авторів.

4. З отриманих у роботі результатів не зрозуміло чим підтверджується збереження стійкості режимів роботи розроблених генераторів детермінованого хаосу при електричному перелаштуванні параметрів їх автоколивних систем у широких межах, про що зазначено у науково-прикладній проблемі, вирішенню якої присвячена дана дисертаційна робота.

5. У роботі наведено результати дослідження впливу адитивного білого шуму різної інтенсивності на динаміку генерованих хаотичних коливань розроблених генераторів. На мою думку, більш корисним для практики було б розрахувати та навести в роботі чисельні значення співвідношення сигнал/шум для кожного нового схемного рішення генератора детермінованого хаосу та у висновках зробити їх порівняльний аналіз.

6. В розділі 4 (стор. 229 – стор. 238, стор. 243 – стор. 252) не дано пояснень, чому обрані рівні інтенсивності D джерела нормованого адитивного білого шуму 0,01, 0,05, 0,1 і 0,15 і відносно якої фізичної величини він нормований.

7. У дисертації не зовсім вдало обрано літерні позначення параметрів автоколивних систем в удосконалених математичних моделях генераторів Ван дер Поля (стор. 121), Кияшко-Піковського-Рабіновича (стор. 255), Аніщенко-Астахова (стор. 283), Колпітца (стор. 173) та Чуа (стор. 324). Так, у математичних моделях генераторів Ван дер Поля і Чуа коефіцієнти g і h є параметрами апроксимації статичної ВАХ активного елементу генератора та мають відповідні розмірності – вирази (2.3) на стор. 121 і (6.6) на стор. 324 відповідно. У той же час, у математичних моделях генераторів Кияшко-Піковського-Рабіновича на базі різних транзисторних структур g і h є нормованими параметрами автоколивних систем таких генераторів. Аналогічні зауваження для коефіцієнтів a і b в математичних моделях генераторів Колпітца – вирази (3.5) і (3.7) на стор. 173 та генератора Чуа – (6.7) і (6.8) на стор. 324-325.

8. Немає пояснень, чому запропоновані нові та удосконалені відомі математичні моделі генераторів детермінованого хаосу у Розділах 5 і 6 докторської дисертації не враховують реактивних властивостей транзисторних структур із від'ємним диференціальним опором, в той час, як у Розділі 4 для генератора Кияшко-Піковського-Рабіновича на основі польової транзисторної структури врахована її електрично керована еквівалентна ємність – вираз (4.12) на стор. 222.

9. У роботі зустрічаються не досить вдалі стилістичні речення.

Проте, наведені зауваження не зменшують наукового рівня та цінності дисертаційної роботи в цілому. Роботу написано переконливо, мова викладання проста та логічна.

Висновки

1. Дисертаційна робота Семенова Андрія Олександровича, яка виконана на тему «Методи і пристрої генерування та формування сигналів з регулярною й хаотичною динамікою для інфокомунікаційних систем» за змістом є закінченим науковим дослідженням, у якому автором запропоновані нові та розвинені відомі структури та математичні моделі радіотехнічних пристроїв генерування та формування періодичних і хаотичних сигналів, що в сукупності вирішують

актуальну науково-прикладну проблему розроблення нових та вдосконалення відомих методів і пристроїв генерування та формування сигналів, що забезпечують керування регулярною та хаотичною динамікою сигналів при електричному перелаштуванні параметрів автоколивних систем таких пристроїв у широких межах зі збереженням стійкості режимів їх роботи, що оптимізовані за максимумом ентропії й фрактальної розмірності.

Робота цілком відповідає вимогам „Паспорту” спеціальності 05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій.

2. В роботі не використані положення кандидатської дисертації автора. У публікаціях здобувача й авторефераті повно відбиті основні положення дисертації.

3. Автореферат дисертації повністю відповідає змісту дисертації.

4. Дисертаційна робота за актуальністю, науковою новизною та практичною цінністю відповідає вимогам „Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України, (зокрема пп. 9 та 10), а її автор – Семенов Андрій Олександрович заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій.

Офіційний опонент,
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри теоретичної
радіотехніки та радіовимірювань
Національного університету
«Львівська політехніка»



Бондарев А.П.

Підпис професора Бондарєва А.П.

ЗАСВІДЧУЮ

Вчений секретар
Національного університету
"Львівська політехніка"



Брилинський Р.Б.

“ 13 ” лютого 2019 р.