

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

СЕМЕНОВ АНДРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 621.396.6:621.373.5+517.938

**МЕТОДИ І ПРИСТРОЇ ГЕНЕРУВАННЯ ТА ФОРМУВАННЯ СИГНАЛІВ
З РЕГУЛЯРНОЮ Й ХАОТИЧНОЮ ДИНАМІКОЮ
ДЛЯ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ**

05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора технічних наук

Львів – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Осадчук Олександр Володимирович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри радіотехніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Бондарєв Андрій Петрович,
Національний університет
«Львівська політехніка»,
професор кафедри теоретичної радіотехніки
та радіовимірювань;

доктор технічних наук, професор
Дружинін Володимир Анатолійович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»,
завідувач кафедри радіоприймання
та оброблення сигналів;

доктор технічних наук, професор
Політанський Леонід Францович,
Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича,
завідувач кафедри радіотехніки
та інформаційної безпеки.

Захист дисертації відбудеться “01” березня 2019 р. о 12⁰⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.10 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Степана Бандери, 12, аудиторія 226 головного навчального корпусу.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий “29” січня 2019 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



І.В. Демидов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Перспективним напрямком приладобудування є розроблення та дослідження пристроїв генерування та формування сигналів з регулярною та хаотичною динамікою для інфокомунікаційних систем на основі транзисторних схем і структур із від'ємним диференційним опором, сумісних з мікроелектронною технологією. Розроблення й застосування пристроїв генерування, формування, обробки та вимірювання сигналів на основі транзисторних схем і структур із від'ємним диференційним опором у світі ведеться з початку 1980-х років. Розроблено теоретичні та практичні аспекти застосування у телекомунікаціях таких пристроїв з регулярною динамікою сигналів.

Новим напрямком розвитку інфокомунікаційних технологій є застосування практичних результатів теорії фракталів і хаосу, що зумовлено такими причинами: 1) простота реалізації пристроїв детермінованого хаосу при широкому наборі режимів роботи; 2) висока чутливість пристроїв детермінованого хаосу; 3) малі габарити, вага та вартість. Хаотичним коливанням притаманні такі основні властивості: 1) неперіодичність і широка смуга частот спектра; 2) слабка корельованість та ортогональність; 3) значно більша завадостійкість ніж у періодичних коливань; 4) висока інформаційна ємність. Хаотичні сигнали застосовують як носій інформації у надширокопasmових засобах зв'язку. Вони рекомендовані стандартом IEEE 802.15.4a для застосування у надширокопasmових бездротових персональних мережах зв'язку UWB WPAN (Ultra Wide Band Wireless Personal Area Networks), а також UWB WMAN (Ultra Wide Band Wireless Metropolitan Area Networks). Тому розробка пристроїв генерування та формування сигналів детермінованого хаосу є актуальним науково-технічним завданням.

На сьогоднішній день відома низка методів і способів передавання інформації за допомогою сигналів детермінованого хаосу. У той же час питання інтегральної оцінки інформаційних параметрів і властивостей генераторів детермінованого хаосу не розглянуто. Вітчизняні публікації в напрямку дослідження інформаційних параметрів і характеристик хаотичних сигналів мало відомі. Ще менше уваги приділено питанням розвитку теорії синтезу та оптимізації пристроїв генерування та формування сигналів детермінованого хаосу за критерієм їх максимальної інформаційної ємності. Усе це зумовлює актуальні науково-технічні завдання створення нових і удосконалення відомих методів побудови та оптимізації існуючих пристроїв генерування і формування сигналів детермінованого хаосу по максимуму їх інформаційних властивостей.

Але, у той же час, існує низка нерозв'язаних конкретних практичних задач та недосліджених фундаментальних питань з теорії генераторів електричних коливань. Сучасним напрямом побудови радіотехнічних пристроїв і засобів телекомунікацій за інтегральною технологією є застосування на практиці методів інтегральної схемотехніки. Із аналізу публікацій стосовно дослідження проблеми можна зробити висновок, що існують завдання, розв'язання яких можливе шляхом застосування нелінійних і реактивних властивостей транзисторних схем і структур із від'ємним диференційним опором.

Таким чином, виникає *протиріччя*, зумовлене тим, що класичні методи побудови пристроїв генерування та формування сигналів з регулярною та хаотичною динамікою з електричним перелаштуванням їхніх параметрів не відповідають сучасному рівню вимог інфокомунікаційних систем, а існуючі математичні моделі не забезпечують оптимізацію режимів їх роботи за ентропійним підходом, а також не дають змоги оцінити вплив адитивного білого шуму на динамічні процеси в них.

Науково-прикладна проблема полягає у необхідності 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.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційні дослідження виконувались у відповідності до наукового напрямку кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету, в межах низки держбюджетних науково-дослідних робіт: «Розробка математичних моделей мікроелектронних частотних перетворювачів магнітного поля на основі транзисторних структур з від'ємним опором» (2010-2012 рр., № держреєстрації 0110U002160), «Розробка радіовимірювальних перетворювачів температури на основі реактивних властивостей напівпровідникових структур» (2013-2014 рр., № держреєстрації 0113U002287С), «Розробка радіовимірювальних пристроїв на основі транзисторних структур з від'ємним опором» (2013-2014 рр., № держреєстрації 0113U003133), «Радіовимірювальні сенсори фізичних величин на основі реактивних властивостей і від'ємного опору напівпровідникових структур» (2015-2016 рр., № держреєстрації 0115U001123), «Розроблення теоретичних засад, методів і приладів вимірювання та контролю газового середовища на військових та цивільних об'єктах» (2017-2018 рр., № держреєстрації 0117U000573) у яких здобувач брав участь як виконавець, а також «Методи та пристрої формування, оброблення й вимірювання сигналів радіоінформаційних систем промислових і військових об'єктів» (2017-2019 рр., № держреєстрації 0117U007139) у виконанні якої здобувач був керівником.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розвиток наявних методів генерування та формування сигналів із регулярною та хаотичною динамікою, шляхом вдосконалення відомих і розроблення нових математичних моделей та електричних схем пристроїв, режими роботи яких оптимізовані за максимумом ентропії Колмогорова-Сіная, що уможливають їх роботу при електричному перелаштуванні параметрів автоколивної системи у широких межах за дії адитивного білого шуму.

Для досягнення поставленої мети необхідно було розв'язати наступні завдання:

1. Здійснити аналіз сучасного стану теорії та практики генерування і формування сигналів на основі приладів із від'ємним диференційним опором, систематизувати відомі принципи, методи, структури та математичні моделі, що покладено в основу їх побудови.

2. Удосконалити математичні моделі генераторів Ван дер Поля періодичних і квазіперіодичних електричних коливань на основі транзисторних схем і структур із від'ємним диференційним опором та дослідити динамічні процеси в них при електричному перелаштуванні параметрів їх автоколивних систем у широких межах.

3. Дослідити динамічні процеси в автоколивних системах генераторів Колпітца з однострижковим і двострижковим активним елементом із застосуванням керування напруженням транзисторних еквівалентів ємності та оптимізувати параметри таких автоколивних систем по максимуму ентропії Колмогорова-Сіная.

4. За методами Кияшко-Піковського-Рабіновича та Аніщенко-Астахова розробити нові схеми генераторів детермінованого хаосу на основі біполярних, польових і біполярно-польових транзисторних структур із від'ємним диференційним опором. Дослідити нелінійні та хаотичні режими роботи у розроблених схемах генераторів електричних коливань на основі транзисторних структур із від'ємним диференційним опором із електричним керуванням динамікою періодичних і хаотичних сигналів.

5. Удосконалити математичні моделі генераторів детермінованого хаосу типів Кияшко-Піковського-Рабіновича та Аніщенко-Астахова на основі транзисторних структур із від'ємним диференційним опором зі статичною ВАХ Λ -типу. Основну увагу при цьому приділити питанням керуваності режимами роботи генераторів та стійкості їх роботи в хаотичних режимах.

6. Розробити нові та удосконалити відомі схеми генераторів з електричним керуванням динамікою регулярних і хаотичних коливань, принцип роботи яких заснований на використанні нелінійних і реактивних властивостей транзисторних структур із від'ємним диференційним опором.

7. Удосконалити математичну модель пристроїв формування періодичних сигналів на основі транзисторних структур із від'ємним диференційним опором зі статичною ВАХ Λ -типу, що працюють у режимах підсилення вхідних сигналів, ділення частоти та амплітудної модуляції тощо, і дослідити динамічні процеси, що мають місце в них.

8. Розробити нові та удосконалити відомі схеми електрично керуванням помножувачів частоти, електричних фільтрів та фазообертачів сигналів з регулярною динамікою, принцип роботи яких заснований на використанні нелінійних і реактивних властивостей транзисторних структур із від'ємним диференційним опором.

Об'єктом дослідження є процеси генерування та формування сигналів з регулярною й хаотичною динамікою в радіотехнічних пристроях на основі біполярних, польових та біполярно-польових транзисторних схем і структур із від'ємним диференційним опором.

Предметом дослідження є фазові портрети і спектри показників Ляпунова пристроїв генерування й формування сигналів на основі біполярних, польових та біполярно-польових транзисторних схем і структур із від'ємним диференційним опором, а також часові, частотні та статистичні параметри й характеристики генерованих і сформованих електричних сигналів.

Методи дослідження. Під час проведення теоретичних досліджень були використані методи 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; елементи математичної теорії нелінійної динаміки, фракталів і хаосу; теорії статистичного та кореляційного аналізу для оцінювання параметрів генерованих сигналів з регулярною й хаотичною динамікою; методи математичного моделювання й розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь; методи комп'ютерного схемотехнічного моделювання електричних схем; методи аналізу нелінійної динаміки хаотичних систем для дослідження властивостей пристроїв генерування сигналів детермінованого хаосу на основі транзисторних схем і структур із від'ємним диференціальним опором.

Наукова новизна одержаних результатів. У ході виконання дисертаційної роботи отримано такі результати, що визначають наукову новизну дисертаційної роботи:

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 диференціальним 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 диференціальним 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 диференціального опору та геометричної форми спадної ділянки ВАХ транзисторних структур.

3. Уперше запропоновано узагальнене трансцендентне рівняння апроксимації статичних ВАХ транзисторних структур із від'ємним диференціальним 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 диференціальним 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 диференціальним 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 стати-

чних 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.

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

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 жи-

влення 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 однострижорного та двострижорного генераторів Колпітца за максимумом їх інформаційних властивостей. Встановлено, що ентропія Колмогорова-Сіная (КС) $H = 0,1642$ та фрактальна розмірність $d_F = 2,6293$ двострижорного генератора Колпітца більші за ентропію КС $H = 0,1292$ та фрактальну розмірність $d_F = 2,1123$ однострижорного 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 (ТСВО) 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 ТСВО за максимумом ентропії КС, значення яких становлять $\varepsilon = 0,2$, $h = 0,115$ і $g = 0,775$. Встановлено, що ентропія КС оптимізованого генератора $H = 0,1605$ є більшою за ентропію КС однострижорного генератора Колпітца $H = 0,1292$ та є на рівні ентропії КС двострижорного генератора Колпітца $H = 0,1642$. У той же час, фрактальна розмірність генератора КПП $d_F = 2,004$ менша, ніж у однострижорного $d_F = 2,1123$ та двострижорного $d_F = 2,6293$ генераторів за схемою Колпітца.

8. Запропоновано нові електричні схеми генераторів детермінованого хаосу, побудованих за методом Аніщенко-Астахова, на основі біполярної ТСВО та БТ-МДН ТСВО. 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 КС 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 КС $H = 0,2947$ 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.

Реалізація та впровадження результатів роботи. Результати дисертаційної роботи отримали такі впровадження: нові схемотехнічні та конструктивні рішення генераторів детермінованого хаосу на основі нелінійних і реактивних властивостей транзисторних схем і структур із від'ємним диференційним опором у ТОВ «ДЖЕМІКЛ» (м. Вінниця), пристрої генерування та формування зв'язкових сигналів діапазону частот 1,8..2,1 ГГц з підвищеною завадостійкістю та запасом стійкості роботи на стандартне хвильове навантаження 50 Ом у АТ «БАНКОМ-ЗВ'ЯЗОК» (м. Київ), пристрої формування сигналів прямохаотичної системи службового зв'язку у ТОВ «ДАЙТЕКС ТЕХНОЛОДЖІС» (м. Вінниця), при розробленні модулів передавання і приймання UWB сигналів обладнання для інформаційних і телекомунікаційних систем за технологією WMAN (Wireless Metropolitan Area Networks) у Вінницькій філії ТОВ «ВЕНБЕСТ», а також у навчальних процесах Вінницького національного технічного університету та у Вінницькому навчально-науковому виробничому центрі Одеської національної академії зв'язку ім. О.С. Попова для модернізації лекційного курсу та лабораторного практикуму з дисциплін «Генерування та формування сигналів», «Аналогові електронні пристрої», «Кодування та обробка сигналів», «Основи схемотехніки» і «Схемотехніка та конструювання пристроїв зв'язку та МП», а також при виконанні курсових та дипломних робіт студентами спеціальності 172 – телекомунікації та радіотехніка.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно. У працях, опублікованих у співавторстві, авторові належать такі результати: розроблено нові та удосконалено відомі квазілінійні математичні моделі генераторів електричних коливань з регулярною динамікою, які працюють у осциляторному та релаксаційному режимах [1]; розроблено

нові та удосконалено відомі квазілінійні математичні моделі пристроїв генерування та формування синусоїдальних та імпульсних сигналів з електричним керуванням режимами роботи таких пристроїв і параметрами їхніх сигналів [2]; аналіз сучасного стану методів і пристроїв формування сигналів інформаційних і телекомунікаційних систем [3, 4]; запропоновано рівняння апроксимації вольт-фарадної характеристики та отримано результати теоретичних і експериментальних досліджень електрично керованої ємності на біполярно-польовій [15] та МДН [24] транзисторних структурах з від'ємним диференціальним опором (ТСВО); запропоновано квазілінійну математичну модель активного елемента генератора з електрично керованою ємнісною складовою повного опору на основі біполярної транзисторної ТСВО [38]; запропоновано математичні моделі помножувачів частоти аналогових сигналів на основі польової [14], біполярно-польової [16] і біполярної [20] ТСВО і отримано результати теоретичних досліджень; запропоновані малосигнальні математичні моделі оптично керованого НВЧ [13] і електрично керованих УВЧ [42] генераторів, в основу яких покладено рівняння апроксимації струмів стоку НЕМТ з використанням функцій гіперболічних тангенсу та косинусу; удосконалено математичну модель оптичного генераторного перетворювача та отримано результати теоретичних досліджень [18]; отримано результати експериментальних досліджень потужного НВЧ генератора з електричним керуванням на основі статично індукованої ТСВО [39]; запропоновано математичну модель багаточастотного генератора та отримано результати математичного моделювання [23]; запропоновано математичні моделі генераторів прямокутних імпульсів [17] і лінійно-змінної напруги [19] на основі польової та біполярної ТСВО відповідно і отримано результати математичного моделювання; запропоновано еквівалентні схеми та отримано результати аналітичних досліджень з використанням методу змінних стану автогенераторних перетворювача температури [22] і засобу для визначення фазових перетворень твердих матеріалів [25] на основі ТСВО; запропоновано автогенераторний прилад з лінійною функцією перетворення [26] на основі реактивних властивостей ТСВО та визначено величину методичної похибки; досліджено залежність реактивних властивостей транзисторних структур із від'ємним диференціальним опором від радіаційної температури, що підвищує точність відновлення сигналів на скінченій дискретній вибірці [28] та запропоновано математичну модель автогенераторного вимірювального перетворювача [30], яка враховує вплив температури на активну та реактивну компоненти малосигнального імпедансу біполярного транзистора; запропоновано схему автогенераторного перетворювача температури для безконтактного інфрачервоного термометра та визначена його частотна нестабільність [40]; розраховано параметри елементів схемної реалізації смугопропускального фільтра за методом Тоу з придушенням завади понад 40 дБ [31] та отримано результати дослідження його амплітудо-частотних характеристик залежно від розкиду розрахованих параметрів елементів схеми [32]; отримано розрахункові співвідношення для визначення точності вимірювання параметрів резонансних контурів автоколивних систем за амплітудо-фазовим методом [29]; запропоновано нові схеми [57, 68] та експериментально показано можливість розширення діапазону зміни фази НВЧ сигналу за рахунок використання ємнісного ефекту транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором для

побудови НВЧ фазообертачів відбивного типу з малою величиною помилки фазового зсуву і малим рівнем внесених втрат [41]; запропоновано нову електричну схему [70] і математичну модель [45] генератора детермінованого хаосу з інерційною нелінійністю на основі біполярної ТСВО та отримано результати експериментальних досліджень [33] і комп'ютерного схемотехнічного моделювання [51]; запропоновано нову електричну схему [69] та отримано результати експериментальних досліджень [50] електрично-керованого генератора хаотичних коливань на основі біполярної ТСВО; запропоновано схемні рішення варіантів генераторних радіовимірювальних перетворювачів [52]; отримано результати математичного [55] та комп'ютерного схемотехнічного [56] моделювання варіантів генератора детермінованого хаосу за схемою Колпітца; запропоновано нові схеми вимірювальних автогенераторних перетворювачів концентрації газу на основі ТСВО для розширення діапазону [58], підвищення чутливості [59] та точності вимірювань; запропоновано практичне застосування генераторів радіосигналів з регулярною динамікою коливань на основі ТСВО у складі системи вхідного контролю [27]; запропоновано електричні схеми дволанкових активних фільтрів НЧ [60] і ВЧ [61] на транзисторах зустрічної провідності, що зменшує температурну залежність параметрів активних фільтрів; запропоновано нову схему оптичного генераторного перетворювача [83] з включеним в коло локального зворотного зв'язку фотодіодом; запропоновано нові схемні рішення генераторів релаксаційного типу на основі ТСВО – польовій, з динамічним навантаженням [63], і біполярній, з локальним [64] і глобальним [66] зворотними зв'язками; нові схеми помножувачів частоти радіосигналів на основі БТ-МДН [65] і біполярних [67] ТСВО.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати і положення дисертації представлені, доповідались та обговорені на таких міжнародних науково-технічних конференціях: Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunication and Computer Science (TCSET) у 2008, 2016 і 2018 pp.; International Crimean Conference on Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo) у 2010 і 2013 pp.; International Conference on Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo), 2016, 2017 і 2018 pp.; International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 2016 і 2017 pp.; International Scientific-Practical Conference «Problems of Infocommunications, Science and Technology» (PICS'T), 2017 і 2018 pp.; IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2017 p.; XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT), 2017 p.; 9-th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS-2018), 2018 p.; Фізико-технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах (PREDT), 2016, 2017 і 2018 pp.; VI Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2017), 2017 p.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи висвітлено в 70 наукових працях, з яких 21 одноосібна. Серед опублікованих праць 2 монографії; 27 статей у наукових фахових виданнях України; 2 статті у наукових періодичних виданнях інших держав з напрямом, з якого підготовлено дисертацію; 6 статей у журналах, що включені до міжнародних наукометричних баз даних; 3 патенти на

винахід, 11 патентів на корисну модель; 19 публікацій у матеріалах конференцій, що включені до міжнародних наукометричних баз даних. Загалом публікації, що відображають основні результати дисертаційної роботи мають таку кількість індексаций у наукометричних базах: Scopus, Web of Science – 21; EBSCO, WorldCat – 1; Ulrich's Web Global Serials Directory – 1; Index Copernicus – 8; РИНЦ – 8; Google scholar - 19.

Структура та загальний обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, семи розділів, висновків по роботі, списку використаної літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 463 сторінки. Основний зміст викладено на 340 сторінках, робота містить 276 рисунків та 3 таблиці. Список використаних джерел становить 311 найменувань на 37 сторінках. Додатки містять результати досліджень статистичних характеристик функції розподілу хаотичних сигналів одностороннього генератора детермінованого хаосу за схемою Колпітца з електричним керуванням динамікою коливань, акти впровадження результатів дисертаційної роботи та список публікацій здобувача за темою дисертації й відомості про апробацію результатів дисертації.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведена загальна характеристика роботи, обґрунтовано актуальність теми досліджень, сформульовані мета та завдання досліджень, розкритий зв'язок роботи з науковими планами та програмами, вказана новизна та практична цінність отриманих результатів, відзначений особистий внесок автора, наведені дані про апробацію та практичне впровадження, публікації та структуру роботи.

У **першому розділі** – «Аналіз сучасного стану методів і пристроїв генерування та формування сигналів на основі транзисторних схем і структур із від'ємним диференційним опором» – наведено результати аналізу літературних джерел і патентного огляду, які дали можливість сформулювати вимоги до таких радіотехнічних пристроїв генерування та формування сигналів з регулярною та хаотичною динамікою, як генератори аналогових сигналів, помножувачі та подільники частоти, електричні фільтри та фазообертачі. Було встановлено, що для побудови пристроїв генерування та формування періодичних і хаотичних сигналів на практиці широкого поширення отримали автоколивні системи 3-го і 4-го порядку. Проте, використання класичних підходів до побудови електричних схем і забезпечення режимів роботи таких радіотехнічних пристроїв звужує їхні функціональні можливості. Одним з перспективних підходів є використання нелінійних і реактивних властивостей транзисторних схем і структур із від'ємним диференційним опором.

Практична реалізація, побудова і промислове освоєння радіотехнічних пристроїв на основі транзисторних схем і структур із від'ємним диференційним опором можливі лише при розвитку теоретичних основ побудови таких пристроїв з урахуванням динамічних процесів, що в них відбуваються, а також методів побудови, експериментальної перевірки і апробації нових технічних рішень.

У другому розділі «Пристрої генерування електричних сигналів з регулярною динамікою, побудовані за методом Ван дер Поля, на основі транзисторних схем і структур із від'ємним диференціальним опором» побудовано генератори сигналів з регулярною динамікою осциляторного, релаксаційного та квазіперіодичного типів. Наведено електричні схеми побудованих генераторів, описано принципи роботи і приведено результати аналізу динамічних процесів у них за допомогою удосконаленої математичної моделі у нормованому часі $\tau = \omega_0 t$ відносно абсолютної генерованої напруги

$$\frac{d^2 u}{d\tau^2} + \sqrt{\frac{L}{C}} \left(\frac{1}{R} - \frac{di_T(u)}{du} \right) \frac{du}{d\tau} + u = 0, \quad (1) \quad \begin{cases} \frac{dx_1}{d\tau} = x_2, \\ \frac{dx_2}{d\tau} = \mu(1 - bx_1 - qx_1^2)x_2 - x_1 + \sqrt{2D}n(t), \end{cases} \quad (3)$$

$$i_T(u) = I_s - g(u - U_s) + h(u - U_s)^3, \quad (2)$$

де $x_1 = u$, $x_2 = \frac{du}{d\tau}$ – генерована напруга та її похідна, параметри автоколивної системи $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, $\mu = \sqrt{\frac{L}{C}} \left(g - 3hU_s^2 - \frac{1}{R} \right)$, $b = -\sqrt{\frac{L}{C}} \frac{6hU_s}{\mu}$, $q = \frac{3h}{\mu} \sqrt{\frac{L}{C}}$; I_s і U_s – координати середини спадної ділянки ВАХ, q і h – параметри апроксимації ВАХ ТСВО (2), $n(t)$ – нормоване джерело білого гаусового шуму, параметрами якого є $\langle n(t) \rangle = 0$, $\langle n(t)n(t - \tau) \rangle = \delta(\tau)$, D – рівень інтенсивності шуму.

Результати математичного моделювання наведені на рис. 1. У роботі показано, що квадратична нелінійність bx_1x_2 у системі (3) має вплив на амплітудне та фазове рівняння стаціонарних коливань, але у той же час не змінює динамічного режиму генераторів Ван дер Поля та не зумовлює виникнення нових біфуркацій на фазовій площині. Встановлено, що адитивний білий гаусовий шум має подвійну дію на власні автоколивання генераторів Ван дер Поля на основі ТСВО – він здійснює паразитну амплітудну модуляцію коливань і сприяє випадковим змінам фазового зсуву.

Побудовано генератор багаточастотних коливань Ван дер Поля, схема якого наведена на рис. 2. Його математична модель у нормованих змінних розроблена на основі (3) і має вигляд (4). Результати математичного моделювання наведені на рис. 3, а експериментальних досліджень – на рис. 4.

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{d\tau} = x_2, \\ \frac{dx_2}{d\tau} = \mu(1 - bx_1 - gx_1^2)x_2 - x_1 + \sin \Omega t + \sum_{k=2}^n U_k \left[\cos(k\Omega t) + \cos\left(\frac{\Omega t}{k}\right) \right], \end{cases} \quad (4)$$

де k – номер гармоніки з амплітудою U_k , Ω – частота збудження нормована до середньої частоти робочого діапазону ω_0 .

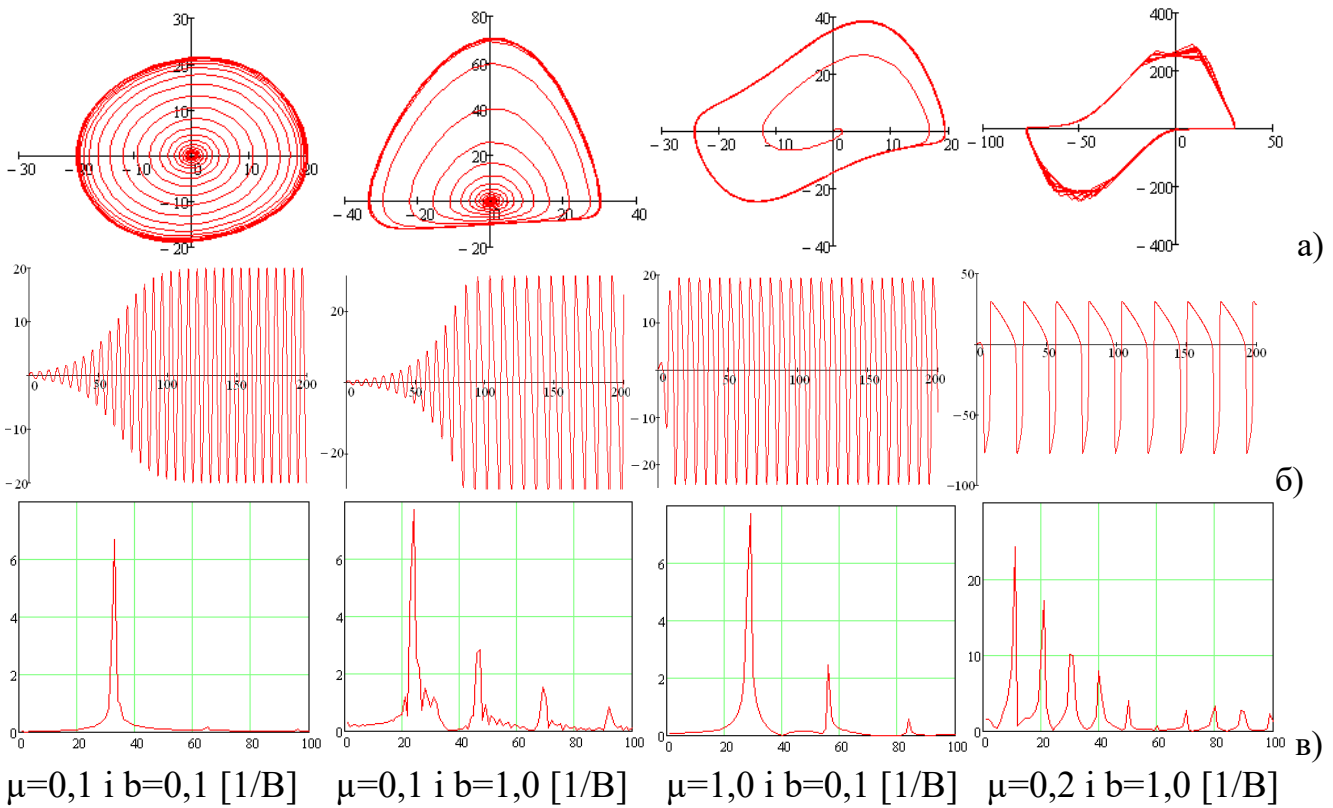


Рис. 1. Результати модельного дослідження генераторів Ван дер Поля при $q = 0,01$ 1/В² і різних значеннях параметрів автоколивної системи за умови $D = 0$ Вт/Гц: фазові портрети генераторів у площині динамічних змінних x_1-x_2 (а), діаграми коливань генерованої напруги відносно нормованого часу $\tau = \omega_0 t$ (б) та її амплітудо-частотні спектри (в)

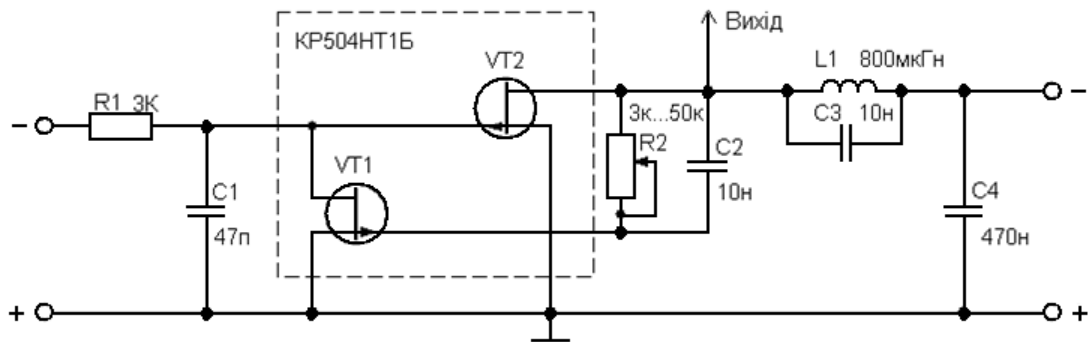


Рис. 2. Електрична схема багаточастотного генератора Ван дер Поля на польовій ТСВО

Амплітуда стаціонарних коливань генератора в одночастотному режимі визначається рівнянням (5), а амплітуда в режимі виникнення багаточастотних коливань при відхиленні від основної частоти описується рівнянням (6).

$$U_{CT} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{g - 3hU_s^2}{h} + \frac{1}{hQ\rho \cos \varphi_\beta}}, \quad (5) \quad U_m = -\frac{\rho E_m \left[3hU_s^2 - g + \frac{3}{4} hU_{CT}^2 \right]}{\nu} \sin \varphi. \quad (6)$$

Величина критичного розстроєння при електричному перелаштуванні від одночастотного до багаточастотного режиму

$$v_{кр} = \frac{E_{m\rho} \left[3hU_s^2 - g + \frac{3}{4}hU_{CT}^2 \right]}{U_{CT}}. \quad (7)$$

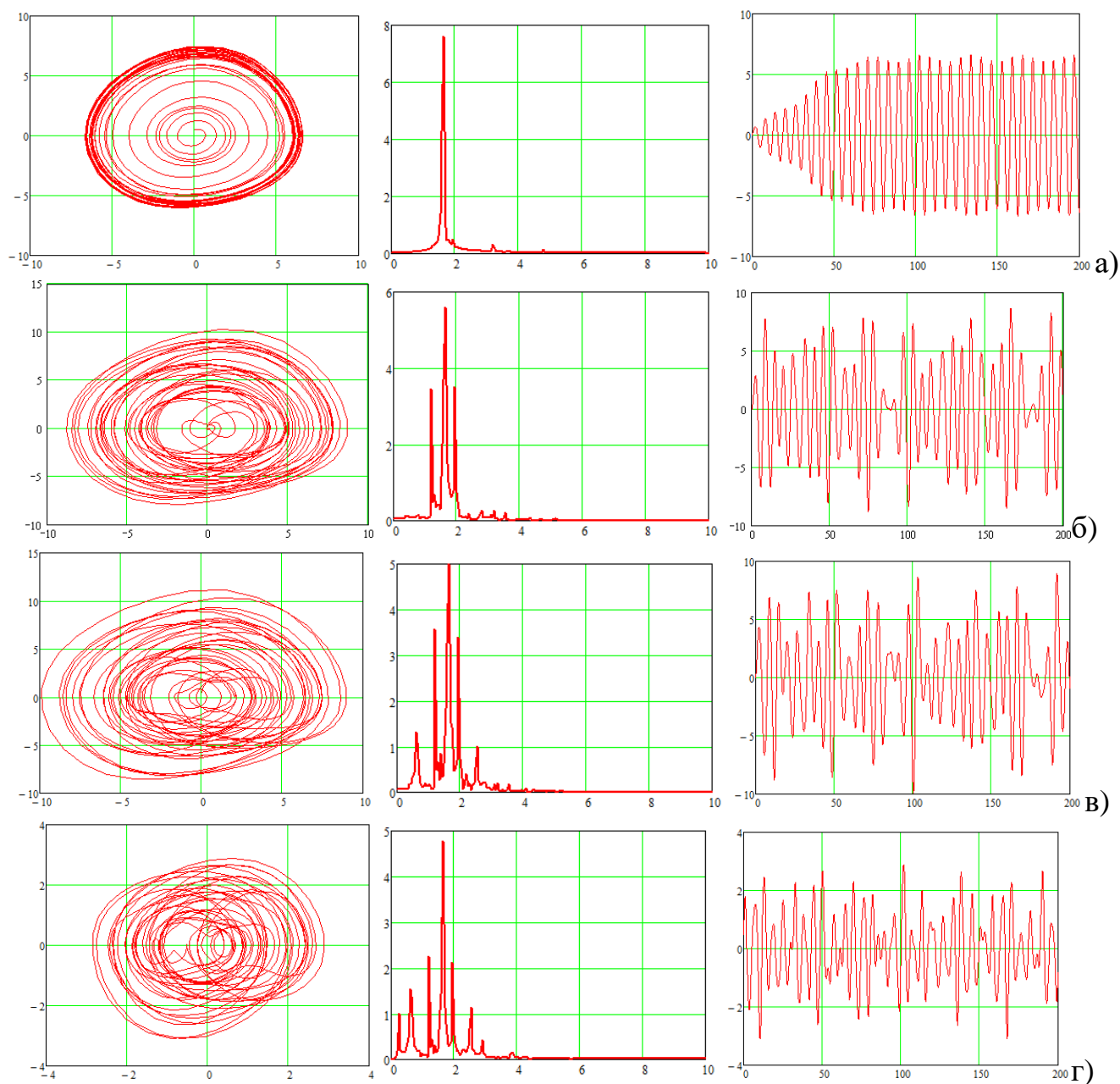


Рис. 3. Фазові портрети, амплітудо-частотні спектри та часові діаграми генерованих коливань напруги в одно- (а), три- (б), п'яти- (в) і семи- (г) частотних режимах

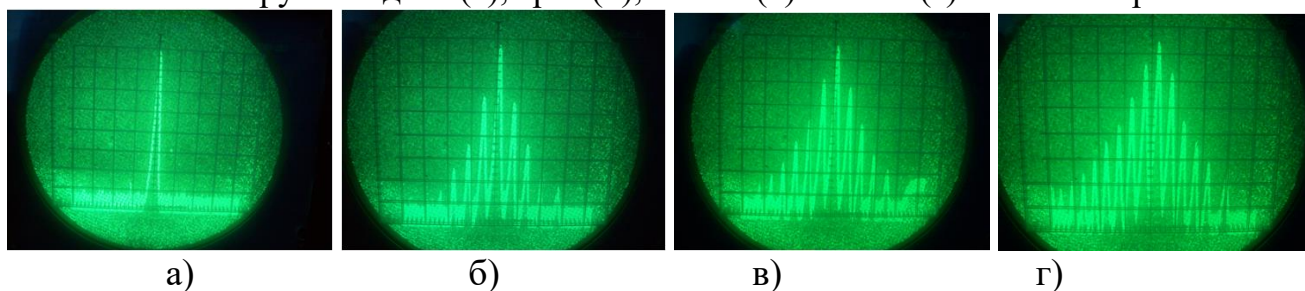


Рис. 4. Експериментальні амплітудо-частотні спектри генерованих коливань напруги в одночастотному (а), семичастотному (б) та багаточастотних режимах (в)- (г)

Нижня і верхня граничні частоти робочої смуги

$$\omega_H = \omega_0 \left(1 - \frac{E_m}{2QU_{CT}} \right), \quad (8)$$

$$\omega_B = \omega_0 \left(1 + \frac{E_m}{2QU_{CT}} \right). \quad (9).$$

У роботі запропоновані електричні схеми електрично керованих генераторів УВЧ сигналів з регулярною динамікою, які побудовані за методом Ван дер Поля на основі БТ-МДН і НЕМТ ТСВО (рис. 5,а). 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, електричні схеми яких наведені на рис. 5. За рахунок використання нелінійних і реактивних властивостей транзисторних структур із від'ємним диференціальним опором забезпечено електричне керування періодом повторення прямокутних (рис. 5,б) і лінійно-змінних (рис. 5,в-г) імпульсів генерованої напруги. Використання від'ємного зворотного зв'язку у схемі на рис. 5,г приводить до підвищення стабільності періоду повторення генерованих імпульсів лінійно змінної напруги у діапазоні 0,13..1,67 мкс.

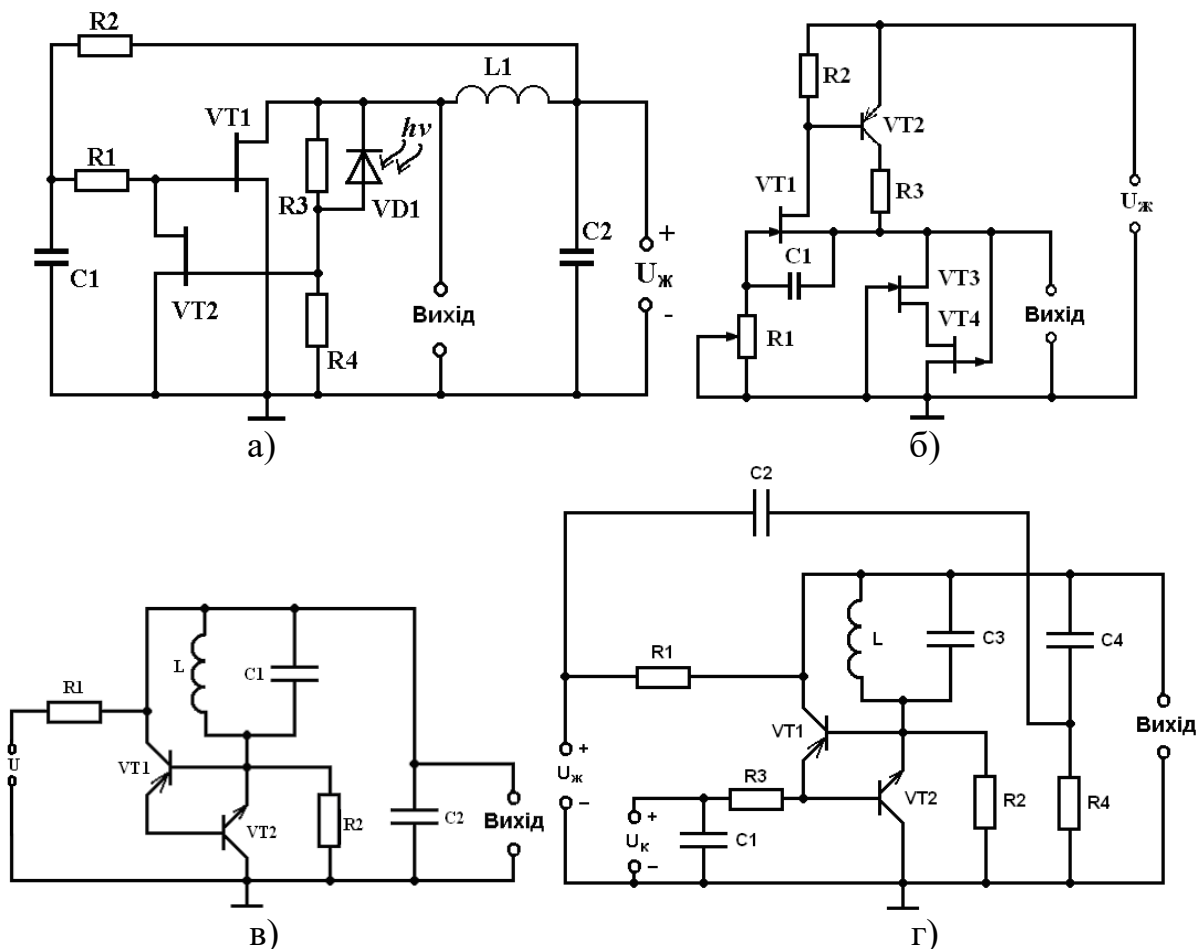


Рис. 5. Електричні схеми генераторів Ван дер Поля: осциляторного типу на основі НЕМТ ТСВО (а) та релаксаційного типу сигналів прямокутної (б) та лінійно-змінної напруги (в-г) з локальним (в) і глобальним (г) зворотним зв'язком

У третьому розділі «Оптимізація генераторів Колпітца сигналів детермінованого хаосу на основі транзисторних схем із від'ємним диференціальним опором та дослідження динамічних процесів у них» 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 (рис. 6) 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 (КС) становить $H = 0,1292$ та $H = 0,1642$ для одностранзисторного та двотранзисторного генераторів Колпітца відповідно, а їх фрактальна розмірність становить $d_F = 2,1123$ і $d_F = 2,6293$. Фазові портрети автоколивної системи генератора детермінованого хаосу за схемою Колпітца з одностранзисторним активним елементом наведені на рис. 7, а з двотранзисторним активним елементом наведені на рис. 8 – рис. 9.

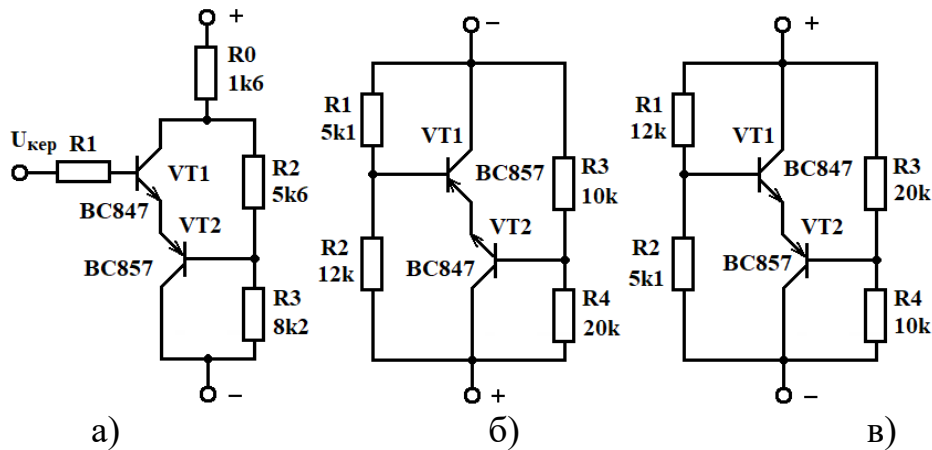


Рис. 6. Електричні схеми керованих напругою транзисторних еквівалентів ємності на основі біполярних ТСВО: з додатковим джерелом напруги керування (а), з керуванням напругою живлення від'ємної (б) і додатної (в) полярності

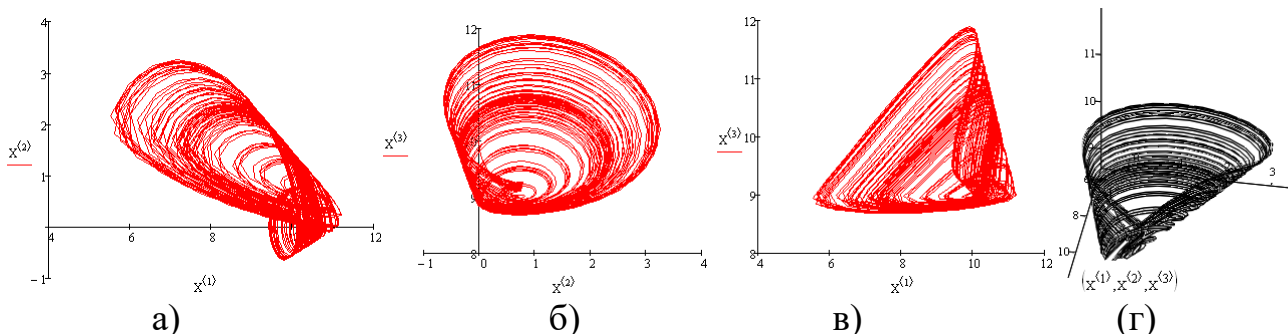


Рис. 7. Фазові портрети генератора Колпітца з одностранзисторним активним елементом у площинах динамічних змінних x_1-x_2 (а), x_2-x_3 (б), x_1-x_3 (в), і в просторі динамічних змінних $x_1-x_2-x_3$ (г)

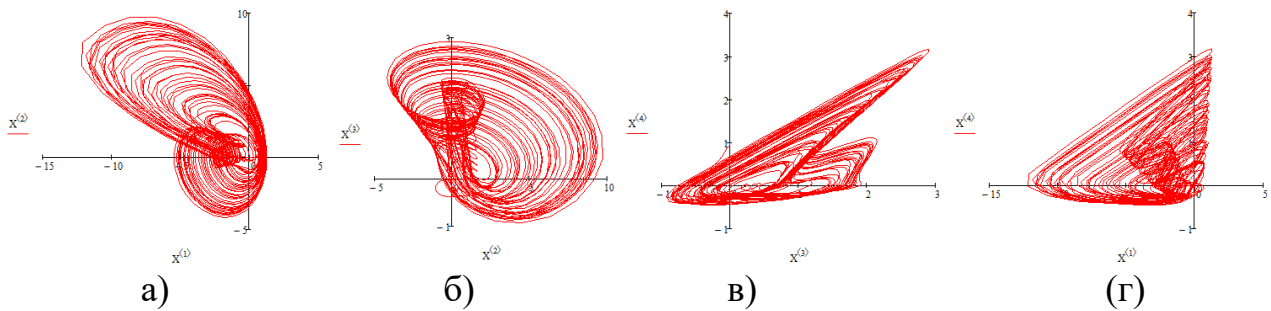


Рис. 8. Фазові портрети генератора Колпітца з двотранзисторним активним елементом у площинах динамічних змінних: а) x_1-x_2 , б) x_2-x_3 , в) x_3-x_4 , г) x_1-x_4

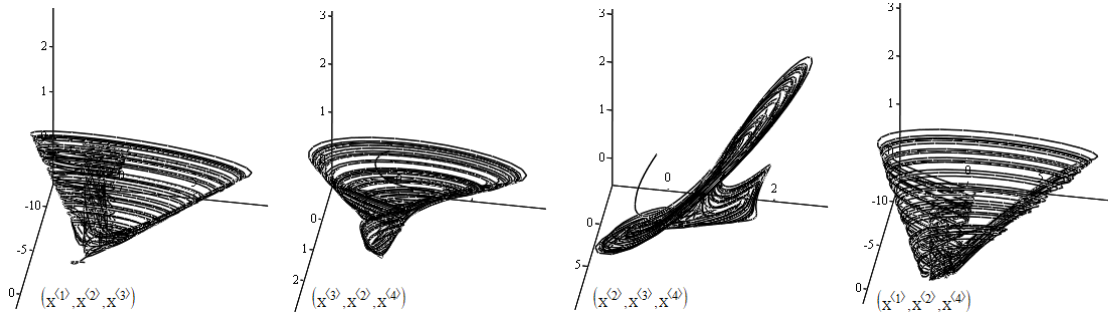


Рис. 9. Фазові портрети генератора Колпітца з двотранзисторним активним елементом у просторах змінних: а) $x_1-x_2-x_3$, б) $x_3-x_2-x_4$, в) $x_2-x_3-x_4$, г) $x_1-x_2-x_4$

У четвертому розділі «Розроблення пристроїв генерування електричних сигналів детермінованого хаосу за методом Кияшко-Піковського-Рабіновича на основі транзисторних структур із від’ємним диференційним опором» побудовано генератори детермінованого хаосу за методом Кияшко-Піковського-Рабіновича (КПР) на основі польової (рис. 10,б) та біполярної (рис. 10,в) транзисторних структур із від’ємним диференційним опором, що мають нелінійності Λ -типу, на відміну від відомих, що мають нелінійності N -типу.

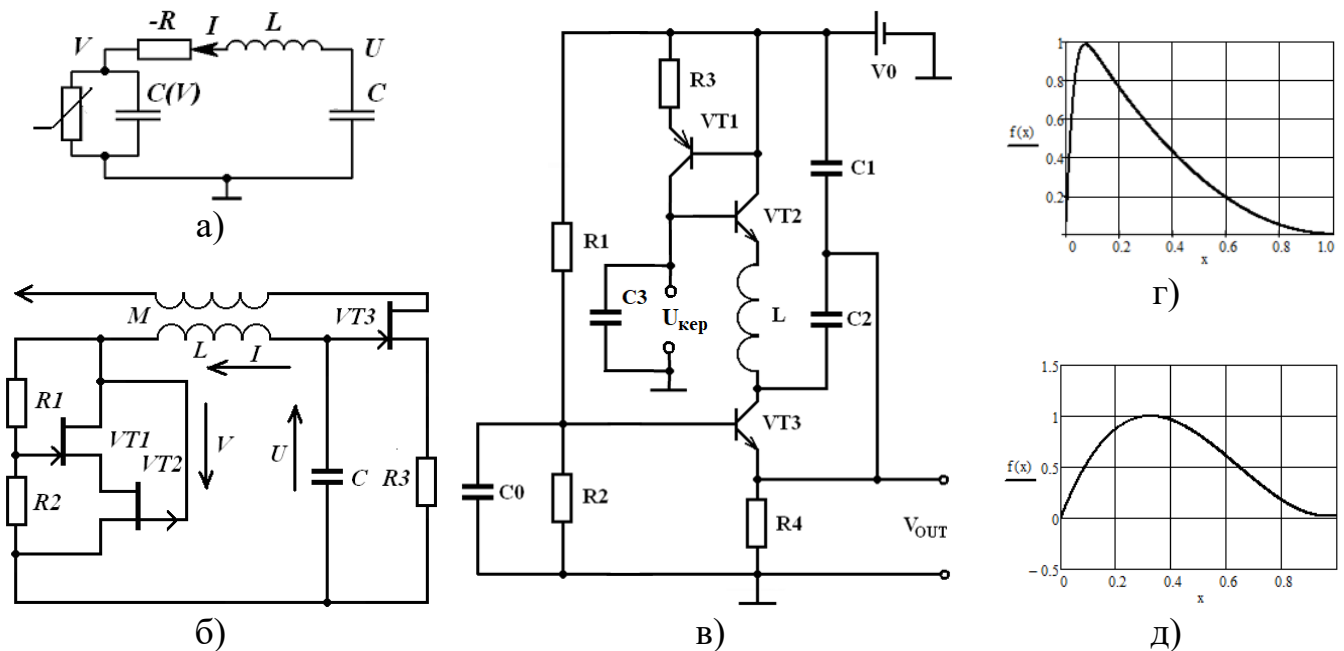


Рис. 10. Електричні схеми генераторів КПР: еквівалентна (а), спрощена на основі польової ТСВО (б), принципова на основі біполярної ТСВО (в) та графіки нормованих функцій апроксимації ВАХ польової (г) і біполярної (д) ТСВО

У роботі було удосконалено математичну модель генератора КПР на польовій ТСВО (рис. 10,б), що є системою диференціальних рівнянь (10) у нормованих змінних (11), нормованих коефіцієнтах системи (12) і нормованій функції апроксимації статичної ВАХ (13), графік якої подано на рис. 10,г.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = 2hx_1 + x_2 - gx_3 + dx_1 \cdot x_2^2, \\ \dot{x}_2 = -x_1, \\ \varepsilon \dot{x}_3 = x_1 - f(x_3) + \sqrt{2D}n(t), \end{cases} \quad (10) \quad x_1 = \frac{I}{I_m}, x_2 = \frac{U}{I_m} \sqrt{\frac{C}{L}}, x_3 = \frac{V}{V_m}, \quad (11)$$

$$h = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}, g = \frac{V_m}{I_m} \sqrt{\frac{C}{L}}, \varepsilon = \frac{gC(V)}{C}, d = \frac{V_m}{U_0} \sqrt{\omega_0 M \cdot S}, \quad (12)$$

$$f(x) = 2,029 \cdot 10^{-3} x + 1,217(1 - 1,042x)^2 \tanh\left(\frac{25x}{1 - 1,042x}\right), \quad (13)$$

де $n(t)$ – нормоване джерело білого гаусового шуму, D – рівень інтенсивності шуму в безрозмірних величинах ($0 < D \leq 1$).

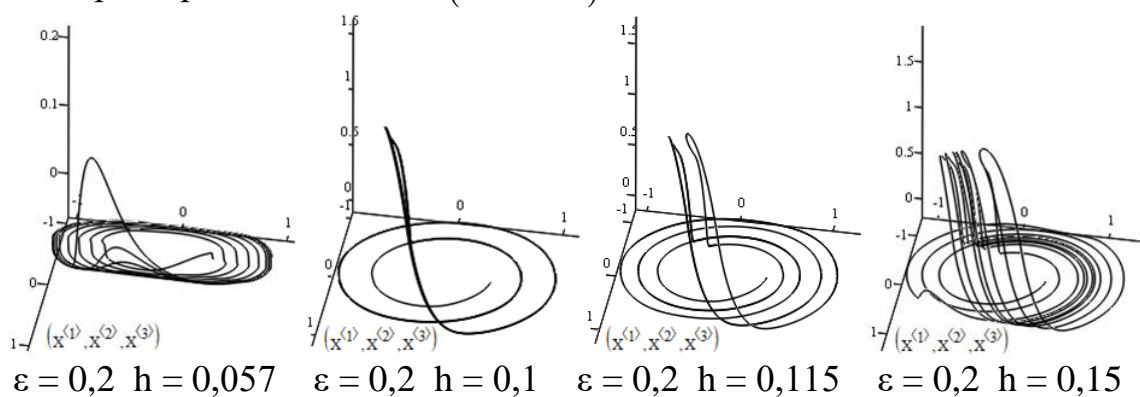


Рис. 11. Фазові портрети генератора КПР на польовій ТСВО за відсутності шуму

Запропоновано математичну модель генератора КПР на біполярній ТСВО (рис. 10,в) вигляду (10) у нормованих змінних (11) при нормованих коефіцієнтах автоколивної системи (12) за умови $d = 0$ та $\varepsilon = gC(V)(C_1 + C_2)/(C_1C_2)$ і при нормованій функції апроксимації ВАХ (14), графік якої поданий на рис. 10,д.

$$f(x) = -1,143 \cdot 10^{-3} + 6,972x - 14,382x^2 + 7,439x^3. \quad (14)$$

Фазові портрети генератора детермінованого хаосу КПР на біполярній ТСВО за відсутності шуму при $\varepsilon = 0,2$ подані на рис. 12.

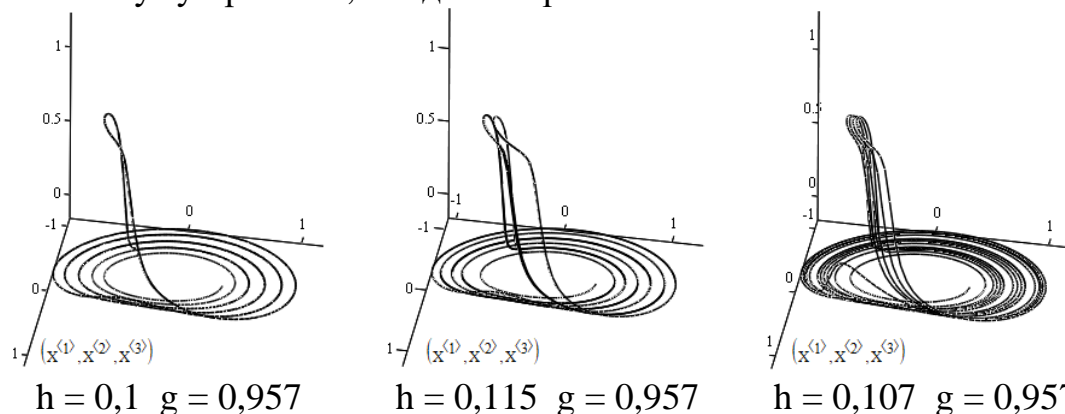


Рис. 12. Фазові портрети генератора КПР на біполярній ТСВО з ВАХ Λ -типу

Оцінено вплив адитивного білого гаусового шуму на динамічні процеси, параметри та характеристики хаотичних коливань генератора КНР. Встановлено, що вплив адитивного білого шуму на динаміку хаотичних коливань в генераторі КНР на основі польової ТСВО спостерігається при інтенсивності шуму починаючи з відносного рівня $D \geq 0,01$ (рис. 13).

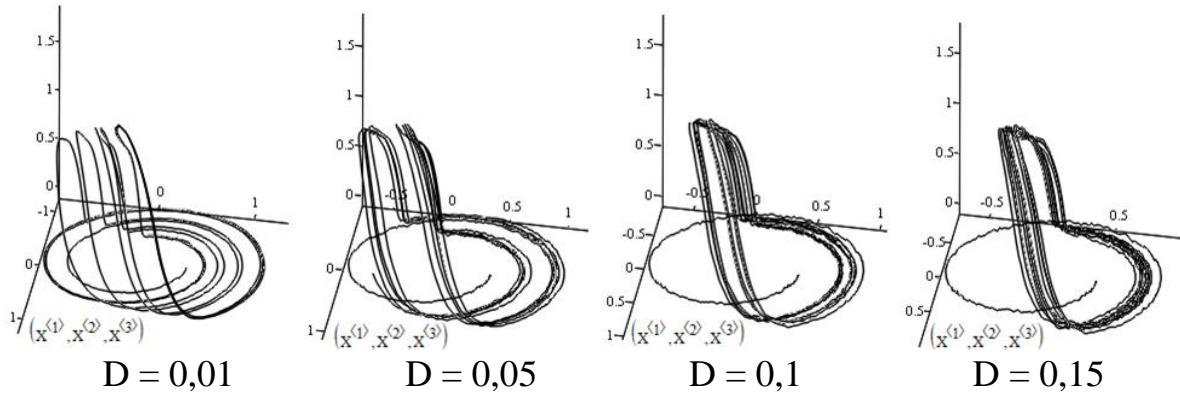


Рис. 13. Фазові портрети генератора КНР на польовій ТСВО при $g = 0,957$, $d = 0,2$, $\varepsilon = 0,2$ та $h = 0,15$ та різних інтенсивностях білого гаусового шуму

Здійснено оптимізацію параметрів автоколивної системи генератора КНР на основі біполярної ТСВО за максимумом його інформаційних властивостей. Встановлено, що ентропія Колмогорова-Сіная оптимізованого генератора КНР становить $H = 0,1605$, що знаходиться на рівні значення ентропії КС двотранзисторного генератора Колпітца ($H = 0,1642$) і значно більше ентропії КС одностранзисторного генератора Колпітца ($H = 0,1292$). У той же час, фрактальна розмірність генератора КНР $d_F = 2,004$ менша ніж у одностранзисторного та двотранзисторного генераторів реалізованих за схемою Колпітца.

У п'ятому розділі «Розроблення пристроїв генерування електричних сигналів детермінованого хаосу за методом Аніщенко-Астахова на основі транзисторних структур із від'ємним диференційним опором» за методом Аніщенко-Астахова побудовано генератори детермінованого хаосу з інерційною нелінійністю на основі біполярної (рис. 14,а) та БТ-МДН (рис. 14,б) транзисторних структур із від'ємним диференційним опором.

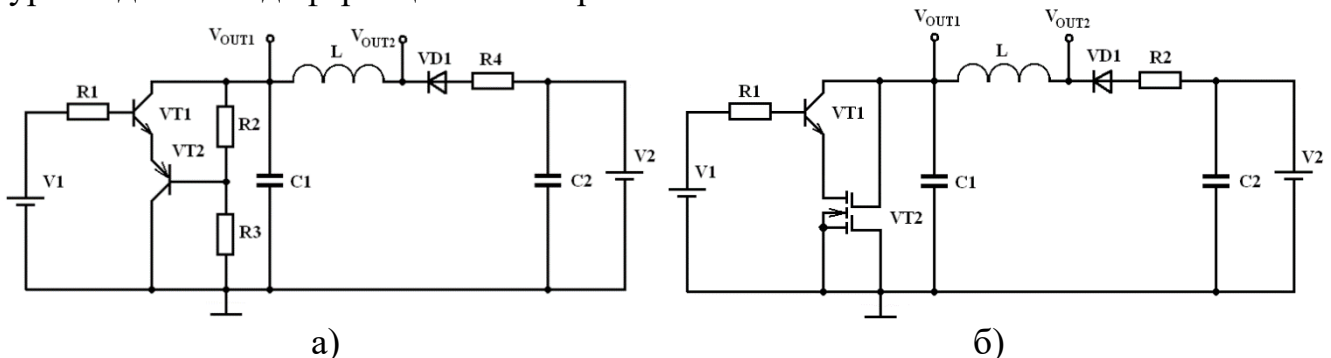


Рис. 14. Електричні схеми генераторів детермінованого хаосу, побудовані за методом Аніщенко-Астахова на біполярній (а) і БТ-МДН (б) ТСВО

Для дослідження динамічних процесів, що відбуваються в генераторах, запропоновано нормовані рівняння (15) і (16) апроксимації статичних ВАХ ТСВО з використанням функції гіперболічного тангенсу

$$G(x) = 2,029 \cdot 10^{-3} x + M(1 - 1,002x)^n \tanh\left(\frac{25x}{1 - 1,002x}\right), \quad (15)$$

$$G(x) = 2,029 \cdot 10^{-3} x + M \sqrt[n]{1 - 1,002x} \tanh\left(\frac{25x}{1 - 1,002x}\right), \quad (16)$$

де n – ціле додатне число ($n \neq 0$), M – масштабний коефіцієнт графіка нормованої ВАХ. Графіки нормованих функцій апроксимації наведені на рис. 15 і рис. 16 (по вісі абсцис – нормована напруга, по вісі ординат – нормований струм).

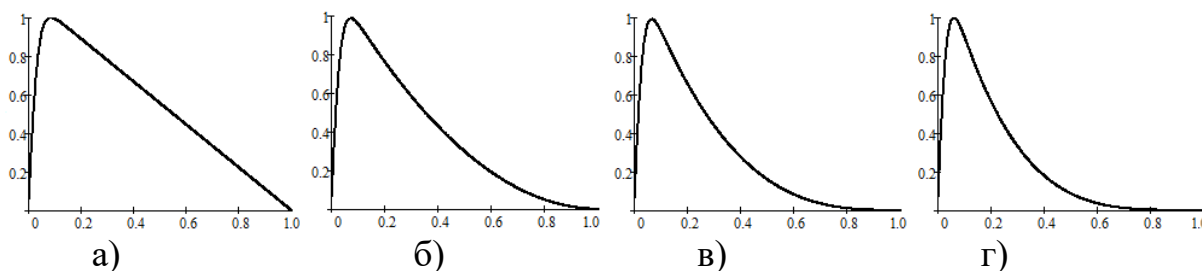


Рис. 15. Графіки апроксимації ВАХ Λ -типу, побудовані за (15) при:
а) $n = 1$ і $M = 1,114$, б) $n = 2$ і $M = 1,217$, в) $n = 3$ і $M = 1,29$, г) $n = 4$ і $M = 1,39$

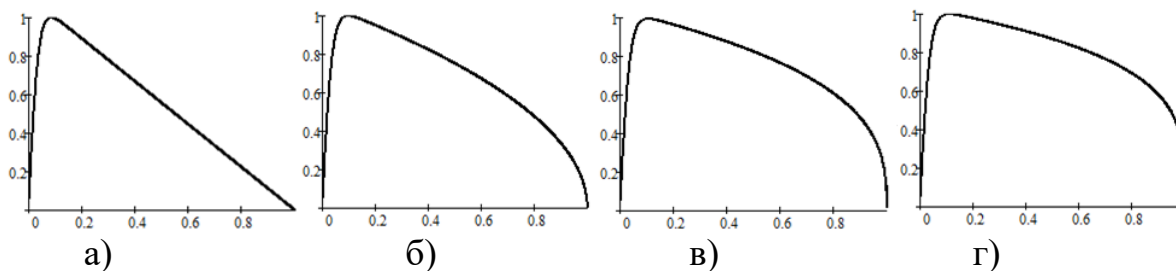


Рис. 16. Графіки апроксимації ВАХ Λ -типу, побудовані за (16) при:
а) $n = 1$ і $M = 1,114$, б) $n = 2$ і $M = 1,062$, в) $n = 3$ і $M = 1,037$, г) $n = 4$ і $M = 1,033$

Удосконалена математична модель Аніщенко-Астахова, що в нормованому часі $T = \omega_0 t$ має вигляд (17), де $G(x_1)$ – нормована функція апроксимації робочої вітки з сімейства ВАХ біполярної транзисторної структури (15) або (16); $F(x_1)$ – нормована функція апроксимації статичної ВАХ напівпровідникового діода (18); $I(x_1)$ – функція, яка описує умову пропускання струму крізь діод у прямому напрямку (19); ω_0 – частота стаціонарних періодичних коливань генератора; m – параметр автоколивної системи, що пропорційний різниці внесеної в коливальний контур та розсіяної енергії ($m = 0,6..1,2$); g – параметр автоколивної системи, що пропорційний відносному часу релаксації інерційного елемента ($g = 0,1..0,9$); d – малий параметр, що відповідає ступеню впливу нелінійності крутизни ВАХ транзисторної структури ($d = 0,1..0,2$). Результати моделювання хаотичного режиму генератора показані на рис. 17, а експериментальних досліджень – на рис. 18.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = m \cdot x_1 + x_2 - x_1 x_3 - d \cdot G(x_1), & F(x_1) = 2,88 \cdot 10^{-6} x_1 + 2,074 \cdot 10^{-3} x_1^2 + 0,995 x_1^3, \\ \dot{x}_2 = -x_1, & (17) \\ \dot{x}_3 = -g \cdot x_3 + g \cdot I(x) \cdot F(x_1), & I(x) = \begin{cases} 1, & x > 0, \\ 0, & x \leq 0. \end{cases} \end{cases} \quad (18)$$

$$I(x) = \begin{cases} 1, & x > 0, \\ 0, & x \leq 0. \end{cases} \quad (19)$$

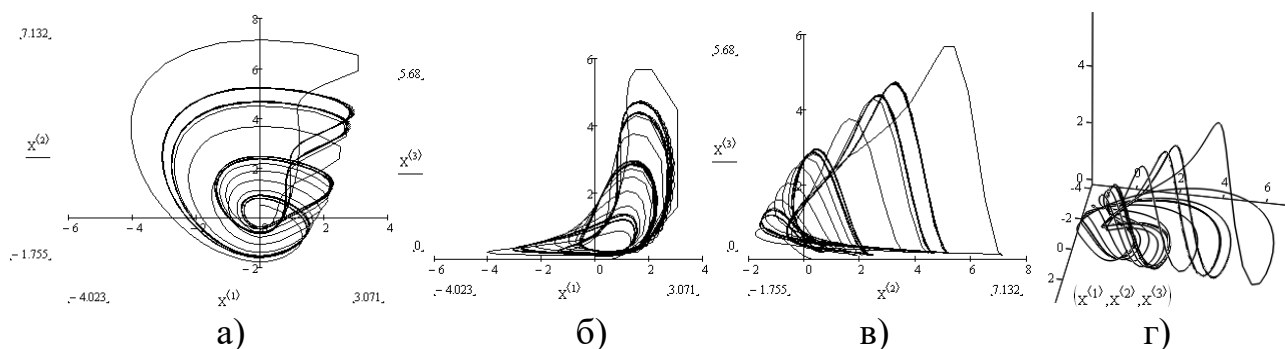


Рис. 17. Фазові портрети генератора на основі біполярної ТСВО (рис. 14,а) при $m = 1,117$, $d = 0,01$, $g = 2,0$ в площинах нормованих змінних x_1-x_2 (а), x_1-x_3 (б), x_2-x_3 (в) і у просторі нормованих змінних $x_1-x_2-x_3$ (г)

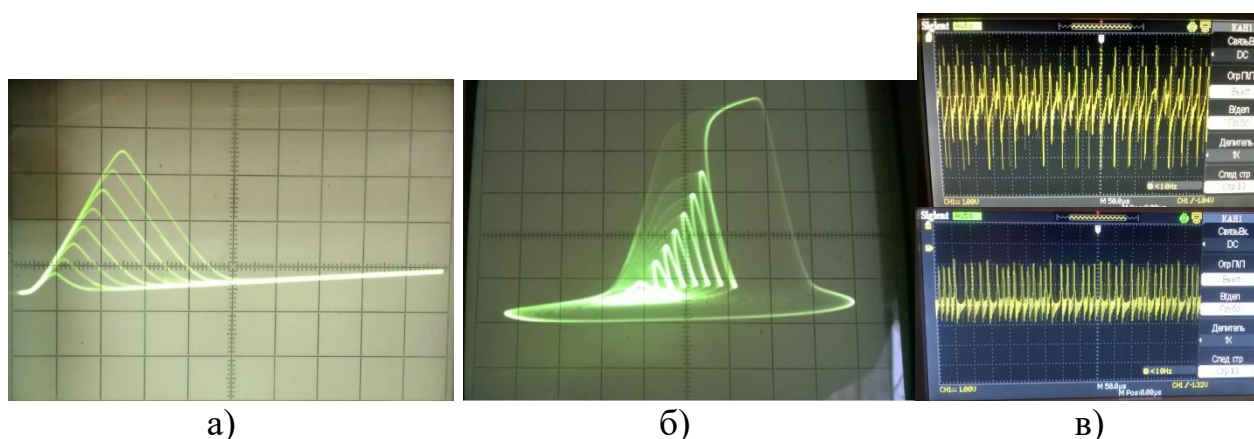


Рис. 18. Результати експериментальних досліджень генератора, побудованого за методом Аніщенко-Астахова на біполярній ТСВО: а) сімейство статичних ВАХ; б) фазовий портрет; в) осцилограми хаотичних напруг V_{OUT1} (вгорі) і V_{OUT2} (внизу)

З'ясовано, що використання транзисторної структури з сімейством ВАХ Λ -типу розширює фазовий простір генерованих хаотичних коливань у нормованих змінних. Для класичної математичної моделі Аніщенко-Астахова при $d = 0,1..0,2$ хаотичний режим забезпечений при коефіцієнтах $m = 0,72..1,2$ і $g = 0,13..0,9$. Для запропонованої автоколивної системи при $d = 0,1$ хаотичний режим має місце при значеннях коефіцієнтів m та g $0,07..1,7$ і $0,4..3,4$ відповідно.

Ентропія та фрактальна розмірність класичного генератора Аніщенко-Астахова становлять $H = 0,02787$ та $d_F = 2,04397$ відповідно. Ентропія генератора, побудованого за методом Аніщенко-Астахова на основі БТ-МДН ТСВО, становить $H = 0,0295$, а фрактальна розмірність – $d_F = 2,0391$.

У шостому розділі «Розроблення генераторів детермінованого хаосу на основі нелінійних і реактивних властивостей транзисторних структур із від'ємним диференціальним опором» побудовано електричну схему (рис. 19,а) генератора детермінованого хаосу за методом Чуа (рис. 19,б) на основі МДН ТСВО, що має ВАХ з кубічною нелінійністю. Отримано результати математичного моделювання динамічних процесів у режимі розвинутого хаосу з атрактором типу «подвійний завиток» (рис. 20). Значення ентропії та фрактальної розмірності генератора Чуа на МДН ТСВО становлять $H = 0,2947$ та $d_F = 2,0973$ відповідно.

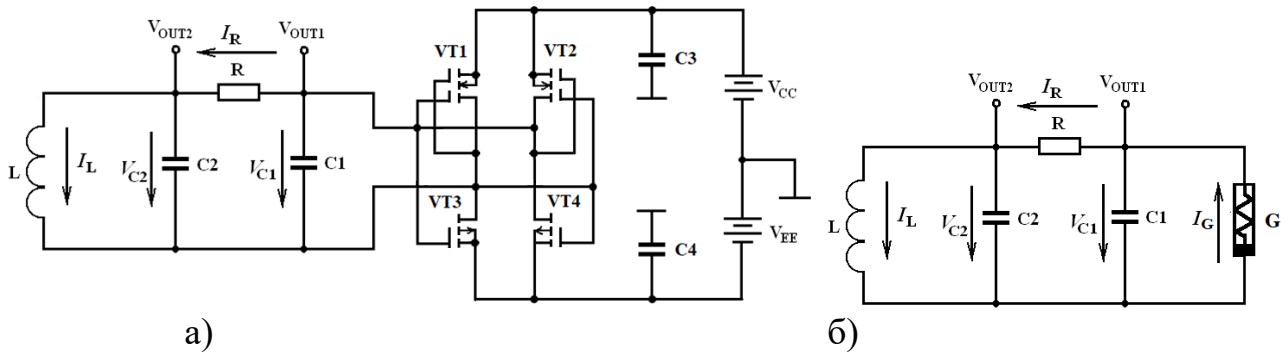


Рис. 19. Електрична (а) та еквівалентна (б) схеми генератора детермінованого хаосу, побудованого за методом Чуа, на основі МДН ТСВО з кубічною нелінійністю

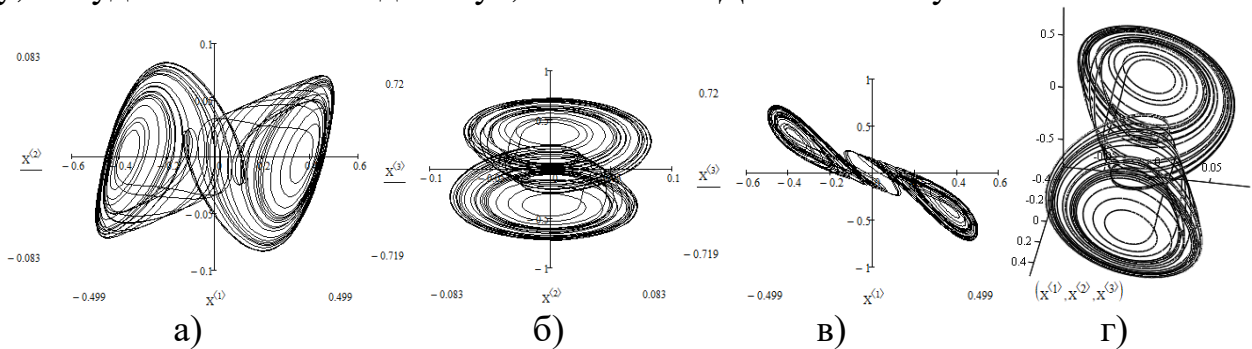


Рис. 20. Фазові портрети генератора Чуа на основі МДН ТСВО у площинах нормованих змінних x_1-x_2 (а), x_2-x_3 (б), x_1-x_3 (в) і в просторі змінних $x_1-x_2-x_3$ (г)

У роботі побудовано електричну схему (рис. 21,а) генератора детермінованого хаосу за методом Чуа (рис. 19,б) на основі БТ-МДН ТСВО, що має ВАХ Λ -типу. У результаті експериментальних досліджень такого генератора, хаотичний сигнал якого V_{OUT1} та його амплітудо-частотний спектр наведені на рис. 22, повністю розвинений режим хаосу з атрактором типу «подвійний завиток» не спостерігався (рис. 21,б). Ефективне управління динамікою коливань в генераторі (рис. 21,а) здійснюється зміною напруги живлення V_2 та керування V_1 .

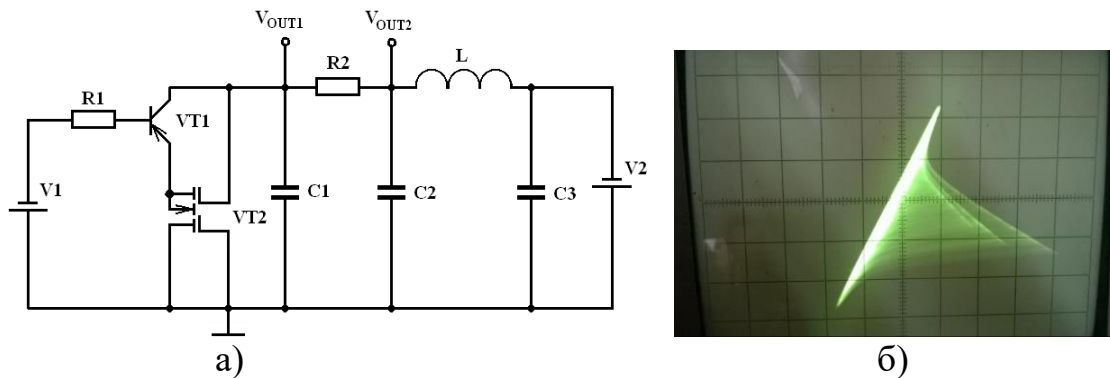


Рис. 21. Електрична схема генератора побудованого за методом Чуа на основі БТ-МДН ТСВО (а) та його фазовий портрет (б)

Вперше виявлено та досліджено явище детермінованого хаосу з керуванням напругою динамікою генерованих коливань в базовій схемі мікроелектронного генератора на основі біполярної ТСВО (рис. 23), у якій, на відміну від відомих, забезпечено широкий діапазон зміни параметрів генерованих періодичних і хаотичних коливань, а також режим розвинутого хаосу (рис. 24). Встановлено, що автоколивна система такого генератора має третій порядок, що зумовлено реактивни-

ми властивостями ємнісного ефекту вхідного опору біполярної ТСВО. За рахунок великої інерційності перенесення повного заряду трьома р-п переходами явище виникнення хаотичних коливань спостерігається на низьких частотах.



Рис. 22. Осцилограма та АЧС хаотичних коливань генератора на рис. 25,а

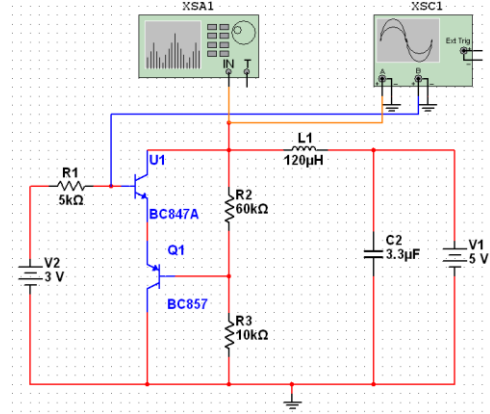
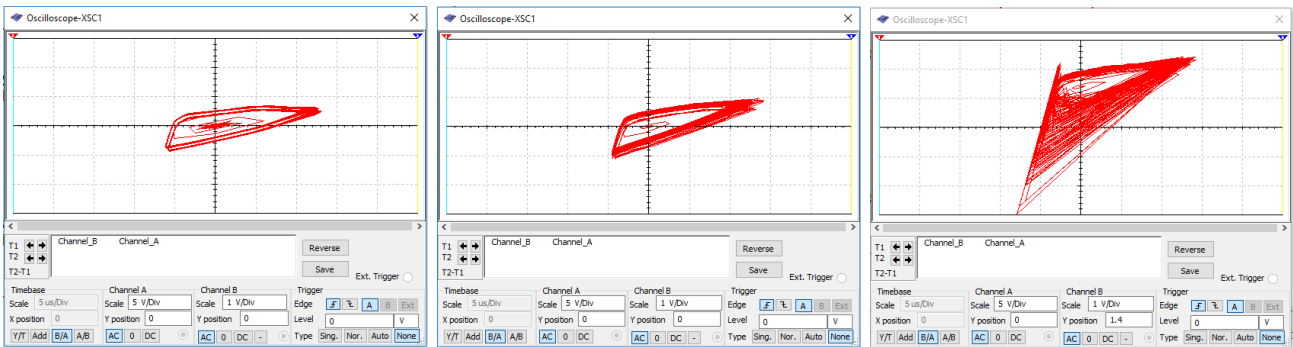


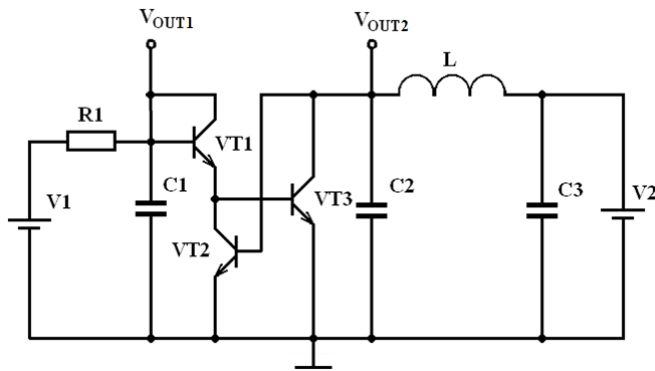
Рис. 23. Електрична схема базового генератора на біполярній ТСВО



а) б) в)

Рис. 24. Фазові портрети режимів роботи базового генератора на біполярній ТСВО: а) квазігармонічного; б) багаточастотного; в) хаотичного

Побудовано новий малопотужний генератор детермінованого хаосу на основі біполярної ТСВО і ВАХ N-типу, схема якого наведена на рис. 25, та отримано результати експериментальних досліджень динаміки його коливань (рис. 26). За рахунок використання нелінійних і реактивних властивостей біполярної ТСВО і ВАХ N-типу забезпечено електричне керування осциляторним, хаотичним і релаксаційним режимами в широкому діапазоні напруг живлення із збереженням запасу стійкості на рівні 10..12%.



а) б)

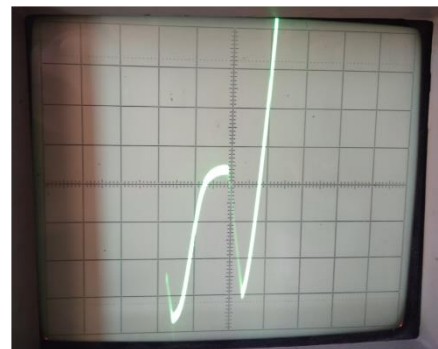


Рис. 25. Електрична схема малопотужного генератора детермінованого хаосу на основі біполярної ТСВО (а) і ВАХ N-типу його активного елемента (б)

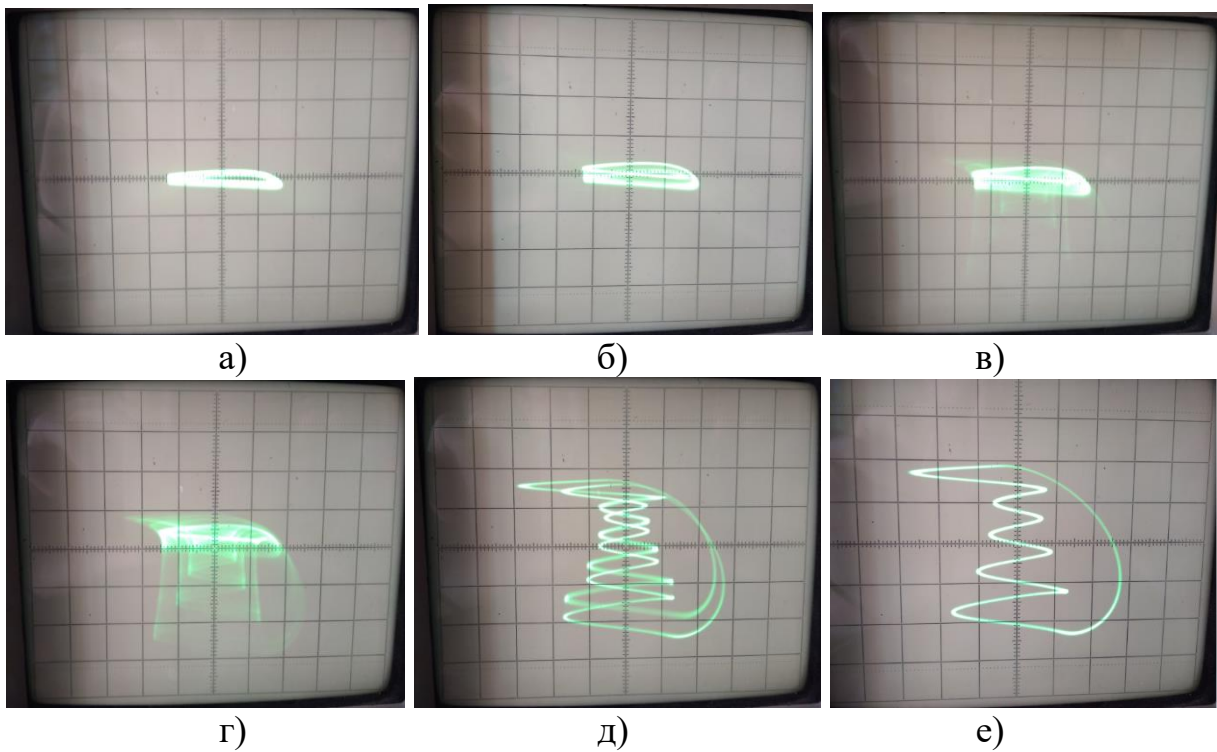


Рис. 26. Результати експериментальних досліджень малопотужного генератора детермінованого хаосу на основі біполярної ТСВО (осцилограми фазових портретів у площині генерованих напруг $V_{C2}-V_{C1}$) при: а) $V1 = (1,4..1,42)$ В – осциляторний режим, б) $V1 = 1,43$ В – роздвоєння фазової траєкторії, в) $V1 = 1,44$ В – перехід від квазіперіодичного до хаотичного режиму, г) $V1 = (1,45..1,52)$ В – режим розвинутого хаосу, д) $V1 = 1,52$ В – перехід до релаксаційного режиму, е) $V1 = (1,52..1,55)$ В – релаксаційний режим

У цьому розділі «Розроблення неавтономних пристроїв формування сигналів з регулярною динамікою на основі нелінійних і реактивних властивостей транзисторних структур із від’ємним диференціальним опором» розроблено та досліджено нові неавтономні пристрої формування періодичних сигналів на основі нелінійних і реактивних властивостей ТСВО. На рис. 27 подана еквівалентна схема неавтономного пристрою формування періодичних сигналів, удосконалена математична модель якого має вигляд (20) у нормованих змінних і нормованому часі (21) при дії на вході напруги (22) за нормованих параметрів автоколивної системи (23).

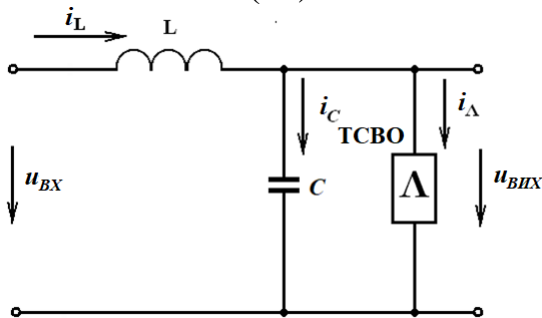


Рис. 27. Еквівалентна схема неавтономного пристрою на основі ТСВО з ВАХ Λ -типу

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dT} = \frac{1}{\varepsilon} [x_2 - f(x_1)], \\ \frac{dx_2}{dT} = \varepsilon [\Gamma + \nu \cdot \sin(\omega t) - x_1], \end{cases} \quad (20)$$

$$x_1 = \frac{u_C}{V_M}, \quad x_2 = \frac{i_L}{I_M}, \quad T = \frac{t}{\sqrt{LC}}, \quad (21)$$

$$u_{BX} = U_0 + U_m \sin(\omega_{IN} t), \quad (22)$$

$$\omega = \omega_{BX} \sqrt{LC}, \quad \Gamma = \frac{U_0}{V_M}, \quad \nu = \frac{U_m}{V_M}, \quad \varepsilon = \frac{V_M/I_M}{\sqrt{L/C}}. \quad (23)$$

У роботі отримано результати математичного моделювання неавтономного пристрою формування періодичних сигналів на основі біполярної ТСВО при апроксимації її ВАХ рівнянням (16) за умови $n = 3$ і $M = 1,037$ у таких режимах роботи:

1) Режим підсилення напруги при коефіцієнтах (23) динамічної системи (20): $\varepsilon = 2$, $\Gamma = 0,85$, $\nu = 0,05$, $\omega = 1,0$. Результати моделювання приведено на рис. 28,а;

2) Режим ділення частоти на 2 при коефіцієнтах (23) динамічної системи (20): $\varepsilon = 2$, $\Gamma = 0,2$, $\nu = 0,2$, $\omega = 2,0$. Результати моделювання приведено на рис. 28,б;

3) Режим ділення частоти на 3 при коефіцієнтах (23) динамічної системи (20): $\varepsilon = 2$, $\Gamma = 0,14$, $\nu = 0,14$, $\omega = 3,0$. Результати моделювання приведено на рис. 28,в;

4) Режим ділення частоти на 10 при коефіцієнтах (23) динамічної системи (20): $\varepsilon = 2$, $\Gamma = 0,2$, $\nu = 0,05$, $\omega = 10,0$. Результати моделювання приведено на рис. 28,г.

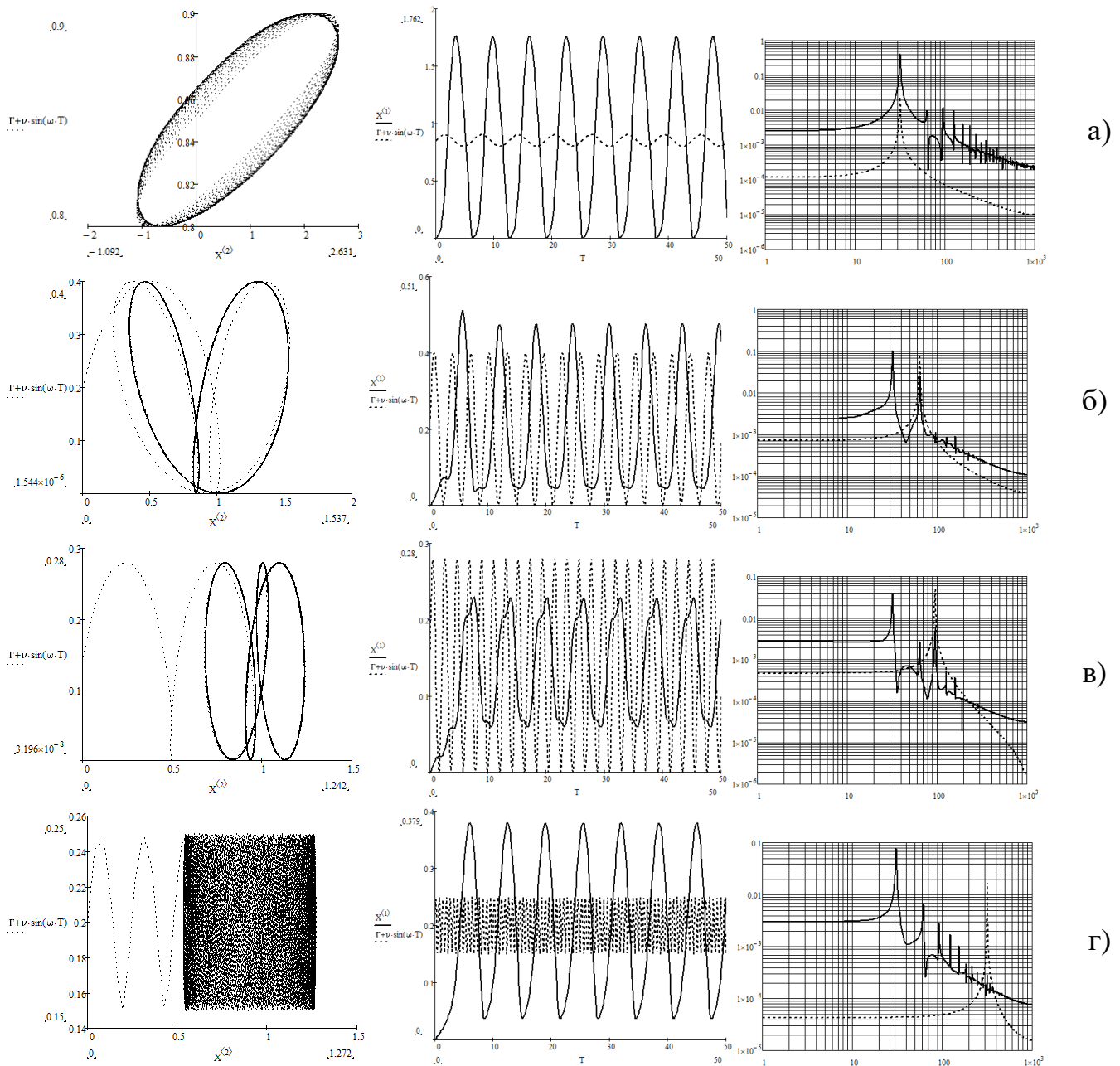


Рис. 28. Результати моделювання неавтономного пристрою формування періодичних сигналів: фігури Ліссажу (ліворуч), часові діаграми (у центрі) та АЧС (праворуч) нормованих вхідної (пунктирна лінія) та вихідної (суцільна лінія) напруги

У роботі розроблено фазообертачі відбивного типу УВЧ і НВЧ діапазонів на основі ємнісного ефекту ТСВО. Еквівалентна схема таких фазообертачів подана на рис. 29,а у вигляді послідовного з'єднання керованого активного і реактивного опорів, а їх електричні схеми наведені на рис. 29,б-в. Властивості фазообертачів такого типу характеризуються модулем $|\Gamma|$ (24) і фазою φ (25) коефіцієнта відбиття.

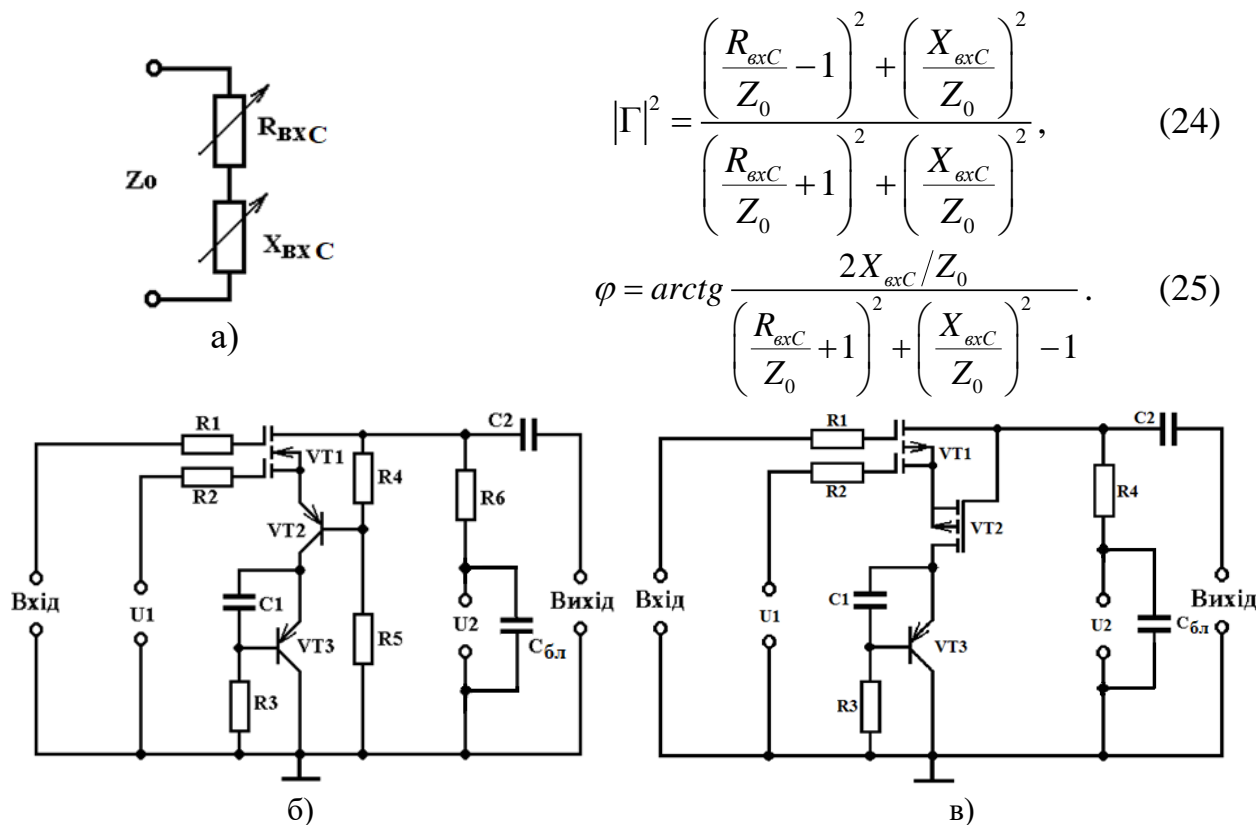


Рис. 29. Еквівалентна схема (а) та електричні схеми фазообертачів відбивного типу на основі реактивних властивостей БТ-МДН (б) і МДН (в) ТСВО

Основні технічні параметри побудованих УВЧ фазообертачів на основі реактивних властивостей ТСВО подані в табл. 1.

Табл. 1. Параметри розроблених УВЧ фазообертачів

Тип ТСВО	U1, В	$ \Gamma $	$\Delta\varphi, ^\circ$
БТ-МДН	2,1..2,8	0,12..0,08	-78..+75
МДН-МДН	2,9..4,3	0,63..0,33	-140..+160

У роботі розроблено та досліджено 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 ТСВО.

Використання реактивних властивостей і від'ємного опору транзисторних структур дозволяє значно спростити конструкцію електрично керованих фільтрів низьких частот. Проведено моделювання частотних характеристик ФНЧ на МДН ТСВО (рис. 30,а) залежно від впливу напруги керування та живлення. Активні елементи в розробленому ФНЧ утворені ТСВО реалізованих на дискретних транзисторах 2N6804 та 2N6661.

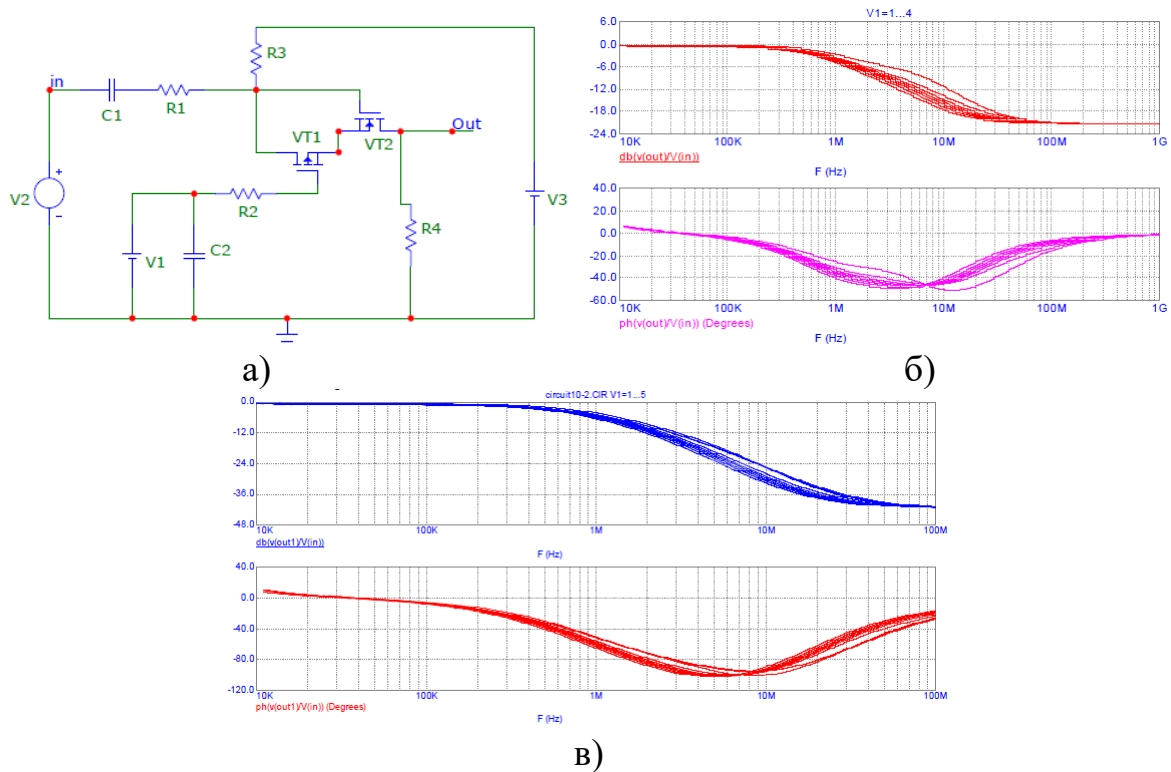


Рис. 30. Електрична схема одноланкового ФНЧ на МДН ТСВО в MicroCap 9.0 (а), його АЧХ і ФЧХ (б) та АЧХ і ФЧХ дволанкового ФНЧ (в)

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано 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.

За результатами розв'язання поставленої проблеми можна зробити такі висновки:

1. Проведено аналіз сучасного стану пристроїв генерування і формування сигналів, відомих принципів, методів, структур та математичних моделей, що покладено в основу їх побудови, який показав, що перспективним підходом розширення функціональних можливостей радіотехнічних пристроїв і засобів телекомунікацій є використання нелінійних і реактивних властивостей транзисторних схем і структур із від'ємним диференціальним опором.

2. За методом Ван дер Поля побудовано нові схемні рішення генераторів електричних коливань з регулярною динамікою на основі нелінійних властивостей ТСВО. Удосконалено математичні моделі генераторів осциляторного та релаксаційного типів із генерованими періодичними сигналами. Наведено результати чисельного моделювання й експериментальних досліджень генераторів у діапазонах частот 860..910 МГц і 1,8..2,1 ГГц. У результаті цього вдалося розширити перелаштування параметрів до 20..30% автоколивних систем генераторів зі збереженням стійкості режимів їх роботи. За методом Ван дер Поля побудовано багаточастот-

ний генератор квазіперіодичних коливань на основі польової ТСВО та запропоновано його математичну модель. Встановлено, що за рахунок нелінійних властивостей запропонованої польової ТСВО на основній частоті генерації 1,25 МГц при електричному перелаштуванні в діапазоні 0,8..1,7 МГц режим роботи генератора змінюється від 1-частотного до 22-частотного, амплітудо-частотний спектр сигналу якого має дискретний характер із дзвіноподібною формою обвідної.

3. Досліджено динамічні процеси в автоколивних системах генераторів Колпітца з одностранзисторним і двотранзисторним активним елементом із застосуванням керованих напругою транзисторних еквівалентів ємності. Оптимізовано за максимумом ентропії хаотичних сигналів параметри автоколивних систем генераторів за схемою Колпітца з одностранзисторним і двотранзисторним активним елементом, що мають такі значення ($\varepsilon = 1,07$, $a = 30$, $b = 0,93$, $c = 20$, $d = 0,08$, $e = 10$) та ($a=10,2$, $b=0,46$, $\varepsilon_2=5,56$, $\varepsilon_3=3,1$) відповідно. Встановлено, що ентропія КС $H = 0,1642$ та фрактальна розмірність $d_F = 2,6293$ двотранзисторного генератора Колпітца більші за ентропію КС $H = 0,1292$ та фрактальну розмірність $d_F = 2,1123$ одностранзисторного генератора Колпітца. Запропоновано та досліджено низькочастотну електричну схему генератора Колпітца з електричним керуванням динамікою сигналів детермінованого хаосу. 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.

4. Розроблено нові схемні рішення генераторів детермінованого хаосу, побудованих за методами Кияшко-Піковського-Рабіновича та Аніщенко-Астахова на основі біполярних, польових і біполярно-польових ТСВО із ВАХ Λ -типу, що уможливило забезпечити електричне керування динамікою генерованих хаотичних сигналів. Шляхом математичного моделювання досліджено нелінійні та хаотичні режими роботи у розроблених схемах генераторів. Розроблено експериментальні зразки генераторів детермінованого хаосу, побудованих за методом Аніщенко-Астахова, що базуються на біполярних і біполярно-польових ТСВО. Отримано нові результати експериментальних досліджень динамічних процесів у генераторах детермінованого хаосу, побудованих за методом Аніщенко-Астахова, на основі нелінійних властивостей ТСВО.

5. Удосконалено математичні моделі генераторів детермінованого хаосу Кияшко-Піковського-Рабіновича та Аніщенко-Астахова на основі польових, біполярних і біполярно-польових ТСВО у яких, на відміну від відомих, застосовано узагальнене трансцендентне рівняння апроксимації статичних ВАХ ТСВО Λ -типу за допомогою функції гіперболічного тангенсу, а також враховано дію адитивного білого шуму на автоколивну систему, що дало змогу дослідити режими роботи та умови керованості таких генераторів, а також вплив адитивного білого шуму на динаміку хаотичних сигналів. Оцінений вплив адитивного білого шуму на динамічні процеси в генераторах КІР на польовій транзисторній структурі з від'ємним диференційним опором. Встановлено, що його дія проявляється при рівні $D \geq 0,01$. Це підтверджує більш високу стійкість генератора КІР до впливу шуму

у порівнянні з класичним генератором Ван дер Поля. Оптимізовані параметри автоколивної системи генератора КІР на основі біполярної ТСВО за максимумом інформаційних властивостей і встановлено такі оптимальні параметри його автоколивної системи $\varepsilon = 0,2$, $h = 0,115$ і $g = 0,775$. Встановлено, що ентропія КС оптимізованого генератора КІР становить $H = 0,1605$ та фрактальна розмірність – $d_F = 2,004$, а максимальна ентропія КС генератора детермінованого хаосу Аніщенко-Астахова становить $H = 0,0295$ і фрактальна розмірність – $d_F = 2,0391$.

6. Запропоновано нову електричну схему генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури з електричним керуванням динамікою коливань в осциляторному, релаксаційному та хаотичному режимах при забезпеченні запасу стійкості його роботи. Запропоновано нові електричні схеми генераторів детермінованого хаосу, побудованих за методом Чуа, на основі БТ-МДН і МДН ТСВО, що мають кубічні нелінійності ВАХ, з несиметричною та симетричною схемами живлення відповідно. Встановлено, що у режимі розвинутого хаосу генератор Чуа на базі МДН ТСВО має фазовий портрет з атрактором типу «подвійний завиток», що забезпечує кращі його інформаційні властивості – ентропія КС $H = 0,2947$ і фрактальна розмірність $d_F = 2,0973$).

7. Удосконалено математичну модель неавтономних пристроїв формування періодичних сигналів на основі нелінійних властивостей транзисторних структур із від'ємним диференціальним опором, що, на відміну від існуючих, застосовує узагальнене трансцендентне рівняння для апроксимацію 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.

8. Досліджено принцип формування сигналів із регулярною динамікою, який полягає у компенсації від'ємним диференціальним 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 диференціальним опором: помножувачів частоти у 2 та 3 рази діапазону 600..900 МГц, одно- і дволанкових фільтрів низьких частот з частотою зрізу в діапазоні 0,2...2 МГц і фазообертачів сигналів діапазону 900 МГц, робочі параметри яких керуються напруженою. Отримано результати їх теоретичних і експериментальних досліджень.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії у співавторстві:

1. Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О. Генератори електричних коливань на основі транзисторних структур з від'ємним опором : монографія. Вінниця: ВНТУ, 2009. 184 с. ISBN 978-966-641-315-7.

2. Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О., Коваль К. О. Функціональні вузли радіовимірювальних приладів на основі реактивних властивостей

транзисторних структур з від'ємним опором : монографія. Вінниця: ВНТУ, 2011. 336 с. ISBN 978-966-641-405-5.

Статті у закордонних наукових періодичних виданнях з напрямку, з якого підготовлено дисертацію:

3. Olena O. Semenova, Andriy O. Semenov, Oleg V. Bisikalo, Pavlo I. Kulakov, Rami R. Hamdi, Ryszard Romaniuk, Baituma Bissarinov. Genetic ANFIS for scheduling in telecommunication networks. *Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, 2018, Vol. 108081Z; 8 pages, <https://doi.org/10.1117/12.2501503>. (Іноземне наукове періодичне видання з напрямку, індексується Scopus, Web of Science)

4. Mohammed Al-Maitah, Olena O. Semenova, Andriy O. Semenov, Pavel I. Kulakov, Volodymyr Yu. Kucheruk. A Hybrid Approach to Call Admission Control in 5G Networks. *Advances in Fuzzy Systems*, Volume 2018, Article ID 2535127, 7 pages, <https://doi.org/10.1155/2018/2535127>. (Іноземне наукове періодичне видання з напрямку, індексується Scopus, Web of Science)

Статті у журналах, що включені до міжнародних наукометричних баз даних:

5. Семенов А. О. Теоретичні засади для оптимізації побудови генераторів періодичних електричних коливань на основі транзисторних структур з від'ємним опором. *Научний взгляд в будуще*. 2018. Випуск 10. Том 1. С. 20–26. DOI: 10.30888/2415-7538.2018-10-01-041. (Міжнародне періодичне наукове видання, індексується Index Copernicus, РИНЦ, Google scholar; ISSN 2415-7538)

6. Семенов А. О. Транзисторні генератори детермінованого хаосу для засобів прихованої передачі інформації. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2016. №2 (55). С. 62–67. (Міжнародне друковане наукове періодичне видання з напрямку; індексується Index Copernicus, Google scholar; ISSN 2219-9365)

7. Семенов А. О. Хаотична автоколивальна система з кубічною інерційною нелінійністю на основі приладу з від'ємним опором. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2016. №3 (56). С. 77–81. (Міжнародне друковане наукове періодичне видання з напрямку; індексується Index Copernicus, Google scholar; ISSN 2219-9365)

8. Семенов А. О. Транзисторні генератори детермінованого хаосу за схемою Копитця. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2017. №1. С. 223–232. (Міжнародне друковане наукове періодичне видання з напрямку; індексується Index Copernicus, Google scholar; ISSN 2219-9365)

9. Семенов А. О. Модельне дослідження динамічних процесів у генераторі детермінованого хаосу за схемою Колпитця з двотранзисторним активним елементом. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2017. №2. С. 91–96. (Міжнародне друковане наукове періодичне видання з напрямку; індексується Index Copernicus, Google scholar; ISSN 2219-9365)

10. Семенов А. О. Генератор детермінованого хаосу Кияшко-Піковського-Рабіновича на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2017. №3. С. 76–

82. (Міжнародне друковане наукове періодичне видання з напряму; індексується Index Copernicus, Google scholar; ISSN 2219-9365)

Статті у журналах, що включені до переліку наукових фахових видань України:

11. Andriy O. Semenov. The deterministic chaos oscillator based on a field-effect transistor structure with negative resistance for telecommunications systems. *Journal of Informational and Telecommunication Sciences*. 2016. №2. pp. 46–53. (Наукове фахове видання, індексується EBSCO, Engineering Village, OvidSP, ProQuest, STN International, WorldCat). DOI: <https://doi.org/10.20535/2411-2976.22016.46-53>.

12. Семенов А. О. Математичне моделювання радіовимірювального генератора детермінованого хаосу на основі транзисторної структури з від'ємним опором. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2018. №2. С. 15–21. (Наукове фахове видання, індексується Ulrich's Web Global Serials Directory, Index Copernicus, РИНЦ; ISSN 1995-0519) DOI: 10.30929/1995-0519.2018.2.p1.15-21.

13. Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О., Коваль К. О. Оптично керований НВЧ генератор на основі НЕМТ-транзисторної структури. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2007. №2 (14). С. 215–221. (Наукове фахове видання) ISSN 1681-7893.

14. Семенов А. О., Осадчук О. В., Коваль К. О. Помножувач частоти на основі польової транзисторної структури з від'ємним опором. *Вісник Хмельницького національного університету: Технічні науки*. 2008. №3, Т.1. С. 139–144. (Наукове фахове видання) ISSN 2307-5732.

15. Осадчук О. В., Семенов А. О., Коваль К. О. Електрично керована еквівалентна ємність на основі транзисторної структури з від'ємним опором. *Збірник наукових праць Севастопольського національного університету ядерної енергії та промисловості*. 2008. Вип.1 (25). С. 159–164. (Наукове фахове видання)

16. Осадчук О. В., Семенов А. О., Коваль К. О. НВЧ помножувач частоти на основі транзисторної структури з від'ємним опором. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2008. №1 (29). С. 48–52. (Наукове фахове видання) ISSN 2219-9365.

17. Осадчук О. В., Семенов А. О., Коваль К. О. Генератор прямокутних імпульсів на основі польової транзисторної структури з від'ємним опором. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2009. №1. С. 92–97. (Наукове фахове видання, індексується РИНЦ, Google scholar) ISSN 1997-9266.

18. Осадчук О. В., Семенов А. О., Задорожний В. К. Математична модель мікроелектронного частотного сенсора оптичного випромінювання. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2009. №1 (17). С. 187–193. (Наукове фахове видання, індексується РИНЦ) ISSN 1681-7893.

19. Осадчук О. В., Семенов А. О., Коваль К. О. Генератор лінійно змінної напруги на основі транзисторної структури з від'ємним опором. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2008. № 2. С. 71–75. (Наукове фахове видання, індексується Google scholar) ISSN 2219-9365.

20. Осадчук О. В., Семенов А. О., Коваль К. О. Квазілінійна математична модель помножувача частоти на основі біполярної транзисторної структури з

від'ємним опором. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2009. №4. С. 244–249. (Наукове фахове видання, індексується Google scholar) ISSN 2307-5732.

21. Семенов А. О. Квазілінійна математична модель генераторів на основі транзисторних структур з від'ємним опором. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2009. №4. С. 1–9 (Наукове фахове видання, індексується РИНЦ, Google scholar) URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/175/174> (дата звернення: 07.08.2018) ISSN 2307-5376.

22. Осадчук О. В., Семенов А. О., Барабан С. В. Частотний перетворювач температури на основі сегнетоконденсатора. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2011. №2. С. 198–202. (Наукове фахове видання, індексується Google scholar) ISSN 2307-5732.

23. Осадчук О. В., Семенов А. О., Коваль К. О. Багаточастотний генератор на основі ємнісного ефекту польової транзисторної структури з від'ємним опором. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2011. №2. С. 1–10. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/273/271> (Наукове фахове видання, індексується РИНЦ, Google scholar) ISSN 2307-5376.

24. Осадчук О. В., Семенов А. О., Лазарев О. О., Коваль К. О. Ємнісний активний елемент на польовій транзисторній структурі з від'ємним опором. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2011. №4. С. 1–7. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/305/303> (дата звернення: 07.08.2018). (Наукове фахове видання, індексується РИНЦ, Google scholar) ISSN 2307-5376.

25. Осадчук О. В., Семенов А. О., Барабан С. В. Математична модель автогенераторного засобу для визначення фазових перетворень твердих матеріалів. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2012. №1. С. 120–125. (Наукове фахове видання, індексується Google scholar) ISSN 2307-5732.

26. Осадчук О. В., Семенов А. О., Барабан С. В. Визначення метрологічних характеристик автогенераторного засобу з від'ємним опором для дослідження твердофазних систем. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2012. №1. С. 54–59. (Наукове фахове видання, індексується Google scholar) ISSN 2219-9365.

27. Осадчук О. В., Семенов А. О., Барабан С. В. Система вхідного контролю некристалічних напівпровідників на основі автогенераторних приладів з від'ємним опором. *Нові технології. Науковий вісник Кременчуцького університету економіки, інформаційних технологій і управління*. 2011. №4(34). С. 9–12. (Наукове фахове видання, індексується Google scholar)

28. Осадчук О. В., Семенов А. О., Барабан С. В. Засіб неруйнівного контролю структурних перетворень твердофазних систем. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2013. №1. С. 53–56. (Наукове фахове видання, індексується РИНЦ, Google scholar) ISSN 2219-9365.

29. Рудик А. В., Семенова О. О., Семенов А. О. Амплітудно-фазовий метод вимірювання параметрів резонансних контурів. *Вісник Інженерної академії України*. 2013. №2. С. 276–281. (Наукове фахове видання) ISBN 5-7763-836.

30. Осадчук О. В., Семенов А. О., Барабан С. В. Автогенераторний вимірювальний перетворювач температури об'єктів, що обертаються. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2013. №3. Тематичний випуск. С. 140–145. (Наукове фахове видання, індексується Google scholar) ISSN 1813-6796.

31. Рудик А. В., Рудик В. А., Семенова О. О., Семенов А. О. Використання фільтра Тоу для фільтрації низькочастотних вузькосмугових процесів. *Вісник Інженерної академії України*. №2. 2014. С. 126–130. (Наукове фахове видання) ISBN 5-7763-836.

32. Рудик А. В., Рудик В. А., Семенов А. О., Семенова О. О. Аналіз зміни характеристик фільтра Тоу. *Вісник Інженерної академії України*. 2014. № 3–4. С. 129–134. (Наукове фахове видання) ISBN 5-7763-836.

33. Семенов А. О., Осадчук О. В. Генератор детермінованого хаосу з інерційною нелінійністю на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2017. № 6. С. 147–152. (Наукове фахове видання, індексується Index Copernicus International, РИНЦ, Google scholar) ISSN 1997-9266.

34. Семенов А. О. Оптико-електронний генератор детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2017. № 2. С. 70–78 (Наукове фахове видання, індексується РИНЦ, Google scholar) ISSN 1681-7893.

35. Семенов А. О. Дослідження генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія : Технічні науки*. 2018. Том 29 (68). №1. Частина 1. С. 50–57. (Наукове фахове видання) ISSN 1606-3721.

36. Семенов А. О. Радіоелектронний пристрій формування сигналів детермінованого хаосу на основі нелінійної системи Дуффінга-Холмса. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія : Технічні науки*. 2018. Том 29 (68). №2. Частина 1. С. 84–91 (Наукове фахове видання) ISSN 1606-3721..

37. Семенов А. О. Модельне дослідження нелінійної динаміки радіотехнічних пристроїв на основі транзисторних структур з від'ємним опором. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія : Технічні науки*. 2018. Том 29 (68). №3. Частина 1. С. 74–78. (Наукове фахове видання) ISSN 1606-3721.

Опубліковані праці апробаційного характеру у матеріалах конференцій, що включені до міжнародних наукометричних баз даних:

38. A. Osadchuk, K. Koval, A. Semenov, M. Prutyla. Mathematical model of transistor equivalent of electrical controlled capacity. *The International Conference "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunication and Computer Science" TCSET 2008*. Lviv-Slavske, Ukraine, February 19–23, 2008. P. 35–36. ISBN 978-966-553-678-9. INSPEC Accession Number: 11155526. (Індексується Scopus, Web of Science)

39. Osadchuk V. S., Osadchuk A. V., Semenov A. A., Semenova E. A. Experimental research and modeling of the microwave oscillator based on the static inductance

transistor structure with negative resistance. *Proceedings of the 20th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo)*. 13–17 Sept. 2010, Sevastopol, Ukraine, 2010. P. 187–188. DOI: 10.1109/CRMICO.2010.5632543. (Індексується Scopus, Web of Science)

40. Osadchuk A. V., Semenov A. A., Baraban S. V., Semenova E. A., Koval K. O. Noncontact infrared thermometer based on a self-oscillating lambda type system for measuring the human body's temperature. *Proceedings of the 23rd International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo)*. 8–14 Sept. 2013, Sevastopol, Ukraine. 2013. P. 1069-1070. INSPEC Accession Number: 13882857. (Індексується Scopus, Web of Science)

41. Osadchuk A. V., Semenov A. A., Koval K. O., Semenova E. A., Baraban S. V. Electrically controllable microwave phase shifters based on capacitive effect of the transistor structure with negative resistance. *Proceedings of the 23rd International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo)*. 8–14 Sept. 2013, Sevastopol, Ukraine, 2013. P. 106–107. INSPEC Accession Number: 13887412. (Індексується Scopus, Web of Science)

42. Andriy Semenov, Olena Semenova, Oleksandr Osadchuk. The UHF oscillators based on a HEMT structure with negative conductivity. *Proceedings of the International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. 21–23 May 2015. Omsk, Russia. P. 1–4. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147215 (Індексується Scopus, Web of Science)

43. Andriy Semenov. Deterministic Chaos Oscillator Based on a Bipolar and Field-Effect Transistor Structure with Negative Resistance. *X International IEEE Scientific and Technical Conference "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines" (Dynamics)*. 15–17 November, 2016. Russia, Omsk. P. 1–4. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819081 (Індексується Scopus, Web of Science)

44. Andriy Semenov. The Additive White Gaussian Noise Impact on the Deterministic Chaos Oscillator Based on a Field-Effect Transistor Structure with Negative Resistance. *IEEE Conference Publications 2016 International Conference Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo)*. September 11-15, 2016, Kyiv, Ukraine. P. 1–5, DOI: 10.1109/UkrMiCo.2016.7739614 (Індексується Scopus, Web of Science)

45. Andriy O. Semenov, Alexander V. Osadchuk, Iaroslav A. Osadchuk, Kostyantyn O. Koval, Maksym O. Prytula. The Chaos Oscillator with Inertial Non-Linearity Based on a Transistor Structure with Negative Resistance. *17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2016*. Erlagol, Altai, Russia, 30 June – 4 July, 2016. Conference Proceedings, 2016. – P. 178–184. DOI: 10.1109/EDM.2016.7538720. (Індексується Scopus, Web of Science)

46. Andriy Semenov. Reviewing the Mathematical Models and Electrical Circuits of Deterministic Chaos Transistor Oscillators. *2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings*. Moscow, Russia, May 12–14, 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491758 (Індексується Scopus, Web of Science)

47. Andriy Semenov. Mathematical Simulation of the Chaotic Oscillator Based on a Field-Effect Transistor Structure with Negative Resistance. *2016 IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. April 19-21, 2016,

Kyiv, Ukraine. P. 52–56. DOI: 10.1109/ELNANO.2016.7493008 (Індексується Scopus, Web of Science)

48. Andriy Semenov. The Van der Pol's Mathematical Model of the Voltage-Controlled Oscillator Based on a Transistor Structure With Negative Resistance. *Proceedings of the XIII International Conference "Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science"*. Lviv-Slavsko, Ukraine, February 23 – 26, 2016. P. 100–104. DOI: 10.1109/TCSET.2016.7451982 (Індексується Scopus, Web of Science)

49. Andriy Semenov. Mathematical Model of the Microelectronic Oscillator Based on the BJT-MOSFET Structure with Negative Differential Resistance. *Conference proceedings of 2017 IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. Kyiv, Ukraine April 18–20, 2017. P. 146–151. DOI: 10.1109/ELNANO.2017.7939736 (Індексується Scopus, Web of Science)

50. Andriy Semenov, Alexander Osadchuk. Experimental Research of the Deterministic Chaos Oscillator Based on a Bipolar Transistor Structure with Negative Differential Resistance. *Proceedings of the 4th International Scientific-Practical Conference «Problems of Infocommunications Science and Technology»*. 10 – 13 October, 2017, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine, 2017, pp. 34–37. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2017.8246343 (Індексується Scopus, Web of Science)

51. Andriy Semenov, Oleksandr Osadchuk. Modeling the Deterministic Chaos Microelectronic Oscillator Based on the Bipolar Transistor Structure with Negative Resistance. *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. Conference Proceedings. May 29 – June 2, 2017. Kyiv, Ukraine. – P. 704–708. DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100335 (Індексується Scopus, Web of Science)

52. Oleksander Osadchuk, Andriy Semenov, Oleksander Zviahin, Anton Savytskyi. Numerical Method for Processing Frequency Measuring Signals from Microelectronic Sensors Based on Transistor Structures with Negative Resistance. *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. Conference Proceedings. May 29 – June 2, 2017. Kyiv, Ukraine. P. 721–725. DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100338 (Індексується Scopus, Web of Science)

53. Andriy Semenov. Numerical Researching the Radiofrequency Chua's Oscillator Based on a Device with Negative Differential Resistance. *The Second International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2017)*. Conference Proceeding. 11–15 September 2017, Odessa, Ukraine. P. 1–6. DOI: 10.1109/UkrMiCo.2017.8095376 (Індексується Scopus, Web of Science)

54. Andriy Semenov. Radiofrequency Deterministic Chaos Oscillator Based on a Transistor Structure with Negative Resistance. Numerical Researching. *2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT)*. Kyiv, Ukraine. May 24, 2017 – May 27, 2017. P. 343–347. DOI: 10.1109/ICATT.2017.7972659 (Індексується Scopus, Web of Science)

55. Andriy O. Semenov, Anton Yu. Savytskyi, Oleg V. Bisikalo, Pavlo I. Kulakov. Mathematical Modeling of the Two-Stage Chaotic Colpitts Oscillator. *Proceedings of 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*. Lviv-Slavske, Ukraine, February 20 – 24,

2018. P. 835-839. DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336327 (Індексується Scopus, Web of Science)

56. Andriy Semenov, Kostyantyn Koval, Anton Savvitskyi, Oleksander Zviahin, Serhii Baraban. Numerical Study of the Deterministic Chaos Oscillator with a Differential Integral Element on the Colpitts Circuit. *Proceedings of 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*. Lviv-Slavske, Ukraine, February 20 – 24, 2018. P. 846–850. DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336329 (Індексується Scopus, Web of Science)

Патенти України на винахід:

57. Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О., Семенова О. О., Коваль К. О. Електрично керований НВЧ фазообертач : патент 90435 Україна на винахід, МПК8 H01P 1/18. № a200806924; заявл. 19.05.2008; опубл. 26.04.2010, Бюл. №8. 5 с.

58. Осадчук О. В., Осадчук В. С., Семенов А. О., Гурський А. П., Семенова О. О. Інфрачервоний газоаналізатор з частотним виходом : патент 89423 Україна на винахід, МПК8 G01N 21/21. № u 2008 03617; заявл. 21.03.2008; опубл. 25.01.2010, Бюл. №2. 6 с.

59. Осадчук О. В., Осадчук В. С., Семенов А. О., Гурський А. П., Семенова О. О. Інфрачервоний вимірювач концентрації газу з частотним виходом : патент 89424 Україна на винахід, МПК8 G01N 21/21. № u 2008 03628; заявл. 21.03.2008; опубл. опубл. 25.01.2010. Бюл. №2. 6 с.

Патенти України на корисну модель:

60. Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О., Коваль К. О. Електрично керований фільтр низьких частот : патент 29421 Україна на корисну модель МПК6 H03H7/01. №u200710779; заявл. 01.10.2007; опубл. 10.01.2008, Бюл. №1. 3 с.

61. Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О., Коваль К. О. Електрично керований фільтр високих частот : патент 30176 Україна на корисну модель, МПК7 H03H 7/01. № u200712797; заявл. 19.11.2007; опубл. 11.02.2008, Бюл. №3. 3 с.

62. Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О., Коваль К. О. Оптично керований генератор електричних коливань : патент 32335 Україна на корисну модель, МПК7 H03C3/00. №u200800389; заявл. 11.01.2008; опубл. 12.05.2008, Бюл. 9. 5 с.

63. Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О., Коваль К. О. Генератор прямокутних імпульсів : патент 33049 Україна на корисну модель, МПК8 H03B7/00. № u2008 01301; заявл. 03.03.2008; опубл. 10.06.2008, Бюл. №11. 4 с.

64. Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О., Коваль К. О., Мартинюк В. В. Електрично керований генератор лінійно змінної напруги : патент 33041 Україна на корисну модель, МПК8 H03B7/01. № u2008 01261; заявл. 01.02.2008; опубл. 10.06.2008, Бюл. №11. 3 с.

65. Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О., Коваль К. О. Електрично керований помножувач частоти : патент 38506 Україна на корисну модель, МПК8 H03B19/00. № u200810040; заявл. 04.08.2008; опубл. 12.01.2009, Бюл. № 1. 5 с.

66. Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О., Семенова О. О., Коваль К. О. Електрично керований генератор лінійно змінної напруги : патент 38348 Україна на корисну модель, МПК8 H03B7/00. № u2008 12442; завл. 23.10.2008; опубл. 12.01.2009, Бюл. № 1. 5 с.

67. Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О., Семенова О. О., Коваль К. О. Мікроелектронний електрично керований помножувач частоти : патент 38347 Україна на корисну модель, МПК8 H03B19/00. № u200812443; заявл. 23.10.2008; опубл. 12.01.2009, Бюл. № 1. 5 с.

68. Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О., Коваль К. О., Семенова О. О. Електрично керований фазообертач діапазону НВЧ : патент 39839 Україна на корисну модель, МПК8 H01P1/18. № u200812834; заявл. 03.11.2008; опубл. 10.03.2009, Бюл. №5. 5 с.

69. Семенов А. О., Осадчук О. В. Мікроелектронний електрично-керований генератор хаотичних коливань : патент 127219 Україна на корисну модель, МПК H03B 29/00. № u 2018 00990; заявл. 02.02.2018; опубл. 25.07.2018, Бюл. № 14. 6 с.

70. Семенов А. О., Осадчук О. В. Мікроелектронний електрично-керований генератор хаотичних коливань з інерційною нелінійністю : патент 127220 Україна на корисну модель, МПК H03B 29/00. № u201800991; заявл. 02.02.2018; опубл. 25.07.2018, Бюл. № 14. 6 с.

АНОТАЦІЯ

Семенов А. О. Методи і пристрої генерування та формування сигналів з регулярною й хаотичною динамікою для інфокомунікаційних систем. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.13 «Радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій» (172 – Телекомунікації та радіотехніка). – Національний університет «Львівська політехніка» МОН України, Львів, 2019.

Дисертаційну роботу присвячено розв'язанню науково-прикладної проблеми, яка полягає у необхідності 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 інформаційних властивостей, зокрема ентропією й фрактальною розмірністю.

Отримали подальший розвиток метод Ван дер Поля для побудови генераторів сигналів з регулярною динамікою та методи Чуа, Кияшко-Піковського-Рабіновича й Аніщенко-Астахова для побудови генераторів сигналів з хаотичною динамікою, які, на відміну від відомих, полягають у застосуванні нелінійних і реактивних властивостей транзисторних структур із від'ємним диференціальним опором. Удосконалені математичні моделі генераторів Ван дер Поля періодичних і квазіперіодичних електричних коливань на основі транзисторних структур із від'ємним диференціальним опором. Удосконалені математичні моделі генераторів Кияшко-Піковського-Рабіновича й Аніщенко-Астахова хаотичних електричних коливань на основі транзисторних структур із від'ємним диференціальним опором. Розроблено нові та удосконалено відомі схеми генераторів з електричним керуванням динамікою регулярних і хаотичних коливань. Досліджені динамічні процеси в автоколивних системах таких генераторів при електричному перелаштуванні їх параметрів у широких межах. Досліджено нелінійні та хаотичні режими роботи у розроб-

лених схемах генераторів із електричним керуванням динамікою періодичних і хаотичних сигналів та оптимізовані параметри їх автоколивних систем по максимуму ентропії Колмогорова-Сіная. Досліджено динамічні процеси в генераторах Колпітца з однострижковим і двострижковим активними елементами із застосуванням керування напруженням транзисторних еквівалентів ємності та оптимізовані параметри їх автоколивних систем по максимуму ентропії Колмогорова-Сіная. Запропонований новий метод формування періодичних сигналів у неавтономних пристроях на основі транзисторних структур із від'ємним диференціальним опором зі статичною ВАХ Λ -типу. Розроблена нова математична модель пристроїв формування періодичних сигналів та досліджені динамічні процеси, що мають місце в них, у режимах підсилення вхідних сигналів, ділення частоти та амплітудної модуляції. Розроблено нові та удосконалені відомі схеми електрично керування помножувачів частоти, електричних фільтрів та фазообертачів сигналів з регулярною динамікою, принцип роботи яких заснований на використанні нелінійних і реактивних властивостей транзисторних структур із від'ємним диференціальним опором.

Ключові слова: генератор, детермінований хаос, транзисторна структура, від'ємний опір, ван дер Поль, генератор Колпітца, Аніщенко-Астахов, Кияшко-Піковський-Рабінович, радіотехнічний пристрій, автоколивна система, математична модель, фазовий портрет, показники Ляпунова, ентропія Колмогорова-Сіная.

АННОТАЦИЯ

Семенов А. А. Методы и устройства генерирования и формирования сигналов с регулярной и хаотической динамикой для инфокоммуникационных систем. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.12.13 «Радиотехнические устройства и средства телекоммуникаций» (172 – Телекоммуникации и радиотехника). – Национальный университет "Львівська політехніка" МОН Украины, Львов, 2019.

Диссертационная работа посвящена решению научно-прикладной проблемы, которая заключается в необходимости разработки новых и усовершенствования известных методов и устройств генерирования и формирования сигналов, обеспечивающих управление регулярной и хаотической динамикой сигналов при электрической перестройке параметров автоколебательных систем таких устройств в широких пределах с сохранением устойчивости режимов их работы, оптимизированных по максимуму информационных свойств, в частности энтропии и фрактальной размерности.

Получили дальнейшее развитие метод Ван дер Поля для построения генераторов сигналов с регулярной динамикой и методы Чуа, Кияшко-Пиковского-Рабиновича и Анищенко-Астахова для построения генераторов сигналов с хаотической динамикой, которые, в отличие от известных, заключаются в применении нелинейных и реактивных свойств транзисторных структур с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Усовершенствованы математические модели генераторов Ван дер Поля периодических и квазипериодических электрических колебаний на основе транзисторных структур с отрицательным дифференциаль-

ным сопротивлением. Усовершенствованы математические модели генераторов Кияшко-Пиковского-Рабиновича и Анищенко-Астахова хаотических электрических колебаний на основе транзисторных структур с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Разработаны новые и усовершенствованы известные схемы генераторов с электрическим управлением динамикой регулярных и хаотических колебаний. Исследованы динамические процессы в автоколебательных системах таких генераторов при электрической перестройке их параметров в широких пределах. Исследованы нелинейные и хаотические режимы работы в разработанных схемах генераторов с электрическим управлением динамикой периодических и хаотических сигналов и оптимизированы параметры их автоколебательных систем по максимуму энтропии Колмогорова-Синяя. Исследованы динамические процессы в генераторе Колпитца с одностранзисторным и двухтранзисторным активными элементами с применением управляемых напряжением транзисторных эквивалентов емкости и оптимизированы параметры их автоколебательных систем по максимуму энтропии Колмогорова-Синяя. Предложен новый метод формирования периодических сигналов в неавтономных устройствах на основе транзисторных структур с отрицательным дифференциальным сопротивлением со статической ВАХ Λ -типа. Разработана новая математическая модель устройств формирования периодических сигналов и исследованы динамические процессы, имеющие место в них, в режимах усиления входных сигналов, деления частоты и амплитудной модуляции. Разработаны новые и усовершенствованы известные схемы электрически управляемых умножителей частоты, электрических фильтров и фазовращателей сигналов с регулярной динамикой, принцип работы которых основан на использовании нелинейных и реактивных свойств транзисторных структур с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

Ключевые слова: генератор, детерминированный хаос, транзисторная структура, отрицательное сопротивление, Ван дер Поля, генератор Колпитца, Анищенко-Астахов, Кияшко-Пиковский-Рабинович, радиотехническое устройство, автоколебательная система, математическая модель, фазовый портрет, показатели Ляпунова, энтропия Колмогорова-Синяя.

ABSTRACT

Semenov A. O. Methods and devices for generating and forming signals with regular and chaotic dynamics for infocommunication systems. – On the rights of the manuscript.

Thesis for a scientific degree of Doctor of Engineering in the specialty 05.12.13 «Radio Engineering Devices and Telecommunication Means» (172 – Telecommunications and radio engineering). – Lviv Polytechnic National University of Ministry for Education and Science of Ukraine, Lviv, 2019.

The thesis is dedicated to solving the scientific and practical problem, that is creating new and improving well-known methods and devices of generating and forming signals, that provide regular and chaotic signal dynamics control at electric retuning self-oscillatory system parameters of such devices in a wide range, preserving stability of their operating modes, optimized by the maximum of informational properties, particularly entropy and fractal dimension.

The Van der Pol method for constructing oscillators of signals with regular dynamics and the Chua, Kiyashko-Pikovsky-Rabinovich, and Anishchenko-Astakhov methods for constructing oscillators of signals with chaotic dynamics have got a further development. They differ from well-known ones by applying non-linear and reactive properties of the transistor structures with negative differential resistance. Mathematic models of the Van der Pol oscillators of periodic and quasiperiodic electric oscillations based on transistor structures with negative differential resistance have been improved. Mathematic models of the Kiyashko-Pikovsky-Rabinovich and Anishchenko-Astakhov oscillators of chaotic electric oscillations based on transistor structures with negative differential resistance have been improved. For oscillators with electric control of periodic and chaotic signal dynamics new circuits have been developed and well-known ones have been improved. Dynamic processes in the self-oscillatory systems of these oscillators have been examined at electric retuning their parameters in a wide range. Non-linear and chaotic operating modes in the developed oscillator circuits with electric control of periodic and chaotic signal dynamics have been examined. Parameters of self-oscillatory systems of these oscillators have been optimized by the maximum of the Kolmogorov-Sinai entropy. Dynamic processes in the Colpitts oscillators with one-transistor and two-transistor active element using voltage-controlled transistor capacitance equivalents have been examined. Parameters of self-oscillatory systems of these oscillators have been optimized by the maximum of the Kolmogorov-Sinai entropy. A new method for forming periodic signals in non-autonomous devices based on the transistor structures with negative differential resistance and a Λ -type static I-V curve has been proposed. A new mathematical model of devices for forming periodic signals has been developed, dynamic processes in them have been examined in modes of input signal amplification, frequency division, and amplitude modulation. There have been developed new and improved well-known circuits of electrically-controlled frequency multipliers, electric filters, and phase shifters with regular dynamics, which operate using non-linear and reactive properties of the transistor structures with negative resistance.

Keywords: oscillator, deterministic chaos, transistor structure, negative resistance, Van der Pol, Colpitts oscillator, Anishchenko-Astakhov, Kiyashko-Pikovsky-Rabinovich, radio-frequency device, self-oscillatory system, mathematical model, phase portrait, Lyapunov exponents, Kolmogorov-Sinai entropy.

Скорочення, що прийняті в авторефераті

АА	–	Аніщенко-Астахов
АЧС	–	амплітудно-частотний спектр
АЧХ	–	амплітудно-частотна характеристика
БТ	–	біполярний транзистор
БТСВО	–	біполярна транзисторна структура з від'ємним (диференційним) опором
ВАХ	–	вольт-амперна характеристика
ВО	–	від'ємний опір
ВЧ	–	високі частоти
ККД	–	коефіцієнт корисної дії
КПР	–	Кияшко-Піковський-Рабинович
КС	–	Колмогоров-Сінай
МДН	–	метал-діелектрик-напівпровідник
НВЧ	–	надзвичайно високі частоти (3 ГГц .. 30 ГГц)
НЧ	–	низькі частоти
ПТ	–	польовий транзистор
ПТСВО	–	польова транзисторна структура з від'ємним (диференційним) опором
ТСВО	–	транзисторна структура з від'ємним (диференційним) опором
УВЧ	–	ультра високі частоти (300 МГц .. 3 ГГц)
ФВЧ	–	фільтр високих частот
ФНЧ	–	фільтр низьких частот
ФЧС	–	фазочастотний спектр
ФЧХ	–	фазочастотна характеристика

Підписано до друку 21.01.2019 р. Формат 29,7×42 ¼

Наклад 100 прим. Зам. № 2019-011.

Віддруковано в інформаційному редакційно-видавничому центрі

Вінницького національного технічного університету

м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 65-18-06

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК №3516 від 01.07.2009 р.

