

67-42-10/2  
12.02.19

Ученому секретарю спеціалізованої вченої ради  
Д 35.052.10  
Національного університету  
«Львівська політехніка»  
79013, м. Львів, вул. Степана Бандери, 12

### ВІДГУК

**офіційного опонента на дисертаційну роботу Семенова Андрія Олександровича «Методи і пристрої генерування та формування сигналів з регулярною й хаотичною динамікою для інфокомунікаційних систем» представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій**

**Актуальність теми дисертаційної роботи.** На цей час важливим напрямом радіоелектронного приладобудування є розробка нових і вдосконалення існуючих пристроїв генерування та формування сигналів із заданими параметрами та характеристиками.

Розвиток теоретичних аспектів побудови й оптимізації пристроїв генерування та формування сигналів з регулярною і, особливо, хаотичною динамікою та їх практична реалізація є актуальним науковим напрямом, що уможливорює ефективну розробку сучасних радіотехнічних пристроїв і засобів телекомунікацій. Особливо актуальним є застосування сигналів детермінованого хаосу для побудови систем передачі конфіденційної інформації, сучасних систем зв'язку підвищеної чутливості та завадостійкості, здатних працювати в умовах складної сигнально-завадової обстановки. Саме цьому науковому напрямку і присвячені дослідження дисертаційної роботи Семенова А.О.

Дисертаційна робота виконана у відповідності до планів наукової тематики кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету, зокрема, державної бюджетної тематики «Методи та пристрої формування, оброблення й вимірювання сигналів радіоінформаційних систем промислових і військових об'єктів» (2017-2019 рр., номер державної реєстрації 0117U007139). Наведені в дисертаційній роботі методи і пристрої генерування й формування сигналів із регулярною та хаотичною динамікою, що забезпечують оптимізацію режимів роботи за максимумом інформаційних властивостей, відповідають сучасному рівню вимог до інфокомунікаційних систем, а також дають змогу оцінити вплив адитивного білого шуму на динамічні процеси в них, вважаю **актуальними**.

**Наукова новизна одержаних результатів.** В результаті дисертаційного дослідження автором отримані нові наукові результати, а саме:

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 вольт-амперної характеристики (ВАХ) та уможливорює електричне керування параметрами генерованих періодичних сигналів, що дало змогу розрахувати часові діаграми та частотні характеристики генерованої напруги в умовах дії адитивного білого шуму;

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;

уперше запропоновано узагальнене трансцендентне рівняння апроксимації статичних ВАХ транзисторних структур із від'ємним диференціальним опором, яке, на відміну від

відомих, описує в нормованих змінних нелінійні властивості різних геометричних форм статичних ВАХ  $\Lambda$ -типу;

уперше встановлено, теоретично обґрунтовано і досліджено процеси виникнення режимів хаотичних коливань у побудованих за методом Кияшко-Піковського-Рабіновича генераторах на основі транзисторних структур із від'ємним диференційним опором із нелінійностями  $\Lambda$ -типу на відміну від класичного генератора Кияшко-Піковського-Рабіновича, принцип дії та елементи теорії якого базуються на основі приладів з від'ємним диференційним опором із нелінійностями  $N$ -типу;

удосконалено математичну модель генератора сигналів детермінованого хаосу, побудованого за методом Кияшко-Піковського-Рабіновича, яка, на відміну від відомої, враховує вплив нелінійних властивостей підсилювального елемента генератора на динаміку хаотичних коливань і яка базується на апроксимації статичних ВАХ транзисторних структур із від'ємним диференційним опором узагальненим трансцендентним рівнянням, що дало змогу визначити умови керованості динамікою генератора в осциляторному, періодичному та хаотичному режимах при електричному перелаштуванні параметрів автоколивної системи генератора;

уперше запропоновано, теоретично обґрунтовано та експериментально досліджено схемні варіанти генераторів детермінованого хаосу, принцип функціонування яких, на відміну від відомих, 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;

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  $\Lambda$ -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;

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  $\Lambda$ -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;

уперше виявлено та досліджено явище детермінованого хаосу з керуванням напруженою 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.

**Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.** Достовірність та обґрунтованість наукових положень і висновків роботи підтверджується коректністю постановки задач, правильно обраними методами їх вирішення, співставлення одержаних результатів із результатами, опублікованими в наукових працях авторів провідних видань, коректною організацією експериментальних досліджень із застосуванням сучасного вимірювального обладнання, стандартних методів статистичної обробки результатів математичного моделювання та експериментальних досліджень, а також представленням та обговоренням результатів роботи на тематичних міжнародних та вітчизняних конференціях.

**Оцінка змісту та завершеності дисертації.** У вступі автором обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано основну мету та задачі роботи, що



розв'язувалися для її досягнення, показано наукове і практичне значення отриманих результатів, приведені наукова новизна, зв'язок з науковими програмами, планами та виконаними держбюджетними темами, зазначено особистий внесок здобувача, надано інформацію про апробацію результатів досліджень, впровадження та наукові публікації за темою дисертаційних досліджень.

**У першому розділі** дисертації приведено аналіз сучасного стану методів і пристроїв генерування та формування сигналів із регулярною та хаотичною динамікою на основі транзисторних схем і структур із від'ємним диференційним опором. Розглянуті структурні та принципові електричні схеми активних елементів таких пристроїв, приведені статичні вхідні, вихідні та прохідні ВАХ із різними видами нелінійностей транзисторних структур із від'ємним диференційним опором.

Здійснено патентний огляд генераторів керованих напругою з регулярною динамікою електричних коливань на основі транзисторних схем і структур із від'ємним диференційним опором. Виокремлено два основні варіанти побудови транзисторних генераторів керованих напругою – за схемою Колпітца та на основі диференційного каскаду. Наведено елементи теорії таких генераторів.

На основі патентного пошуку (за останні 15 років) окремо проаналізовані методи і пристрої генерування сигналів з хаотичною динамікою на основі транзисторних схем і структур із від'ємним диференційним опором. Приведені структурні схеми генераторів детермінованого хаосу на основі транзисторних структур із від'ємним диференційним опором, їх математичні моделі та електричні функціональні схеми. Окремо наведені результати аналізу пристроїв формування сигналів.

Встановлено, що використання класичних підходів до побудови електричних схем і забезпечення режимів роботи таких радіотехнічних пристроїв звужує їхні функціональні можливості. Тому, перспективним підходом розширення функціональних можливостей радіосистем є використання нелінійних і реактивних властивостей транзисторних схем і структур із від'ємним диференційним опором.

**У другому розділі** набув подальшого розвитку метод Ван дер Поля для побудови генераторів електричних коливань з регулярною динамікою на основі транзисторних схем і структур із від'ємним диференційним опором. Удосконалено математичну модель генераторів Ван дер Поля періодичних сигналів осциляторного і релаксаційного типів, яка базується на апроксимації кубічним поліномом статичної ВАХ транзисторних структур із від'ємним диференційним опором, що на відміну від відомої, містить квадратичний член нелінійності автоколивної системи генератора, а також враховує параметри еквівалентного джерела білого гаусового шуму. За рахунок урахування координат положення робочої точки на спадній ділянці ВАХ транзисторних структур із від'ємним диференційним опором удосконалена математична модель уможливує розрахунок часових діаграм і частотних характеристик генерованої напруги за дії адитивного білого шуму при електричному керуванні параметрами генерованих періодичних сигналів.

Розроблені нові електричні схеми УВЧ генераторів осциляторного типу побудованих за методом Ван дер Поля на основі БТ-МДН і НЕМТ транзисторних структур із від'ємним диференційним опором та отримані нові аналітичні співвідношення для визначення умов збудження, амплітуди стаціонарних коливань і запасу самозбудження, які отримані за допомогою нелінійної апроксимації статичних ВАХ транзисторних структур функціями гіперболічних тангенсу та косинусу із врахуванням параметрів дискретних транзисторів. Розроблені нові електричні схеми генераторів релаксаційного типу, побудованих за методом Ван дер Поля, на основі біполярної та польової транзисторних структур із від'ємним диференційним опором та отримані нові аналітичні співвідношення, які описують параметри пилкоподібних і прямокутних імпульсів напруги таких генераторів.

Розроблено багаточастотний генератор Ван дер Поля квазіперіодичних електричних коливань на основі польової транзисторної структури з від'ємним диференційним опором та запропоновано його математичну модель. Отримано нові аналітичні співвідношення для розрахунку амплітуди стаціонарних коливань в одночастотному та багаточастотному

режимах, величини критичного розстроювання по частоті при переході від одночастотного до багаточастотного режиму, а також нижньої та верхньої граничних частот робочої смуги.

**У третьому розділі** дисертації здійснено оптимізацію генераторів Колпітца сигналів детермінованого хаосу на основі транзисторних схем із від'ємним диференційним опором та досліджено динамічні процеси, які мають місце у них. З метою розширення функціональних властивостей генераторів детермінованого хаосу за схемою Колпітца з одностранзисторним і двотранзисторним активними елементами автором використані керовані напругою транзисторні еквіваленти ємності на основі біполярних транзисторних структур із від'ємним диференційним опором. Шляхом математичного моделювання досліджені динамічні процеси в одностранзисторних і двотранзисторних генераторах детермінованого хаосу за схемою Колпітца. Отримано діаграми нормованих динамічних змінних автоколивної системи генератора Колпітца відносно нормованого часу, їх амплітудно-частотні та фазочастотні спектри, а також графіки показників Ляпунова автоколивних систем досліджених генераторів. Виконано оптимізацію параметрів автоколивної системи одностранзисторних генераторів детермінованого хаосу за схемою Колпітца по максимуму ентропії Колмогорова-Сіная.

Здійснено дослідження методів керування динамічними процесами в одностранзисторному генераторі детермінованого хаосу за схемою Колпітца. Розроблено одностранзисторний генератор детермінованого хаосу за схемою Колпітца з електричним керуванням динамікою коливаль. Досліджено застосування балансного метода для стабілізації параметрів генератора детермінованого хаосу за схемою Колпітца. Встановлено, що ефективним способом керування динамікою сигналів детермінованого хаосу генератора Колпітца 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. Отримано результати практичного застосування обох методів у схемних рішеннях генераторів Колпітца. В якості практичного значення одержаних результатів автором отримано величини ентропії Колмогорова-Сіная та фрактальної розмірності оптимізованих одностранзисторного ( $H = 0,1292$  і  $dF = 2,1123$ ) та двотранзисторного ( $H = 0,1642$  і  $dF = 2,6293$ ) генераторів за схемою Колпітца.

**У четвертому розділі** представлено розроблені автором пристрої генерування електричних сигналів детермінованого хаосу за методом Кияшко-Піковського-Рабіновича на основі польової та біполярної транзисторних структур із від'ємним диференційним опором. Автором уперше встановлено, теоретично обґрунтовано і досліджено процеси виникнення режимів хаотичних коливаль у побудованих за методом Кияшко-Піковського-Рабіновича генераторах на основі транзисторних структур із від'ємним диференційним опором із нелінійностями  $\Lambda$ -типу на відміну від класичного генератора Кияшко-Піковського-Рабіновича, принцип дії та елементи теорії якого базуються на основі приладів з від'ємним диференційним опором із нелінійностями  $N$ -типу. Досліджено структурні та функціональні схеми транзисторних генераторів детермінованого хаосу Кияшко-Піковського-Рабіновича.

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 коливаль і яка базується на апроксимації статичних ВАХ транзисторних структур із від'ємним диференційним опором узагальненим трансцендентним рівнянням. Це дало змогу визначити умови керованості динамікою генератора в осциляторному, періодичному та хаотичному режимах при електричному перелаштуванні параметрів автоколивної системи генератора.

Отримано численні результати математичного моделювання динаміки генерованих хаотичних коливаль залежно від параметрів автоколивної системи генератора. 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  $D > 0,01$ .

Здійснено оптимізацію параметрів автоколивної системи генератора Кияшка-Піковського-Рабіновича на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференційним опором за максимумом ентропії Колмогорова-Сіная. Встановлено, що ентропія Колмогорова-Сіная оптимізованого генератора Кияшка-Піковського-Рабіновича ( $H = 0,1605$ ) є більшою за ентропію Колмогорова-Сіная одностранзисторного генератора Колпітца та на рівні ентропії Колмогорова-Сіная двотранзисторного генератора Колпітца.

**У п'ятому розділі** наведено результати розроблення та дослідження пристроїв генерування електричних сигналів детермінованого хаосу за методом Аніщенко-Астахова на основі транзисторних структур із від'ємним диференційним опором. Автором здійснено дослідження структур і функціональних схем пристроїв генерування електричних сигналів детермінованого хаосу за методом Аніщенко-Астахова. Запропоновано узагальнене трансцендентне рівняння апроксимації статичних ВАХ  $\Lambda$ -типу транзисторних структур із від'ємним диференційним опором. Розроблені нові схемні рішення генераторів детермінованого хаосу з інерційною нелінійністю методом Аніщенко-Астахова на основі біполярної та біполярно-польової транзисторних структур із від'ємним диференційним опором.

Запропоновано узагальнене трансцендентне рівняння апроксимації статичних ВАХ транзисторних структур із від'ємним диференційним опором, що, на відміну від відомих, описує в нормованих змінних нелінійні властивості різних геометричних форм статичних ВАХ  $\Lambda$ -типу. 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  $\Lambda$ -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. Як практичні результати в роботі отримано фазові портрети, часові та частотні характеристики коливань в осциляторному, релаксаційному, періодичному та хаотичних режимах.

Наведено результати експериментальних досліджень і комп'ютерного схемотехнічного моделювання генераторів детермінованого хаосу з інерційною нелінійністю на основі біполярної та біполярно-польової транзисторних структур із від'ємним диференційним опором, які працюють у трьох режимах – одночастотному, багаточастотному і хаотичному, з керуванням напругою динамікою та параметрами генерованих коливань. Здійснено розрахунок коефіцієнтів взаємної кореляції сигналів, а також ентропії Колмогорова-Сіная та фрактальної розмірності генераторів детермінованого хаосу з інерційною нелінійністю на основі транзисторних структур із від'ємним диференційним опором.

**У шостому розділі** наведено результати розроблення та дослідження генераторів детермінованого хаосу на основі нелінійних і реактивних властивостей транзисторних структур із від'ємним диференційним опором. Здійснено побудову генераторів детермінованого хаосу за методом Чуа на основі МДН і БТ-МДН транзисторних структур із від'ємним диференційним опором і різними геометричними формами ВАХ з кубічною нелінійністю. Запропоновано математичні моделі таких генераторів детермінованого хаосу в нормованих змінних. Отримано результати математичного моделювання, комп'ютерного схемотехнічного моделювання та експериментальних досліджень.

Вперше виявлено та досліджено явище детермінованого хаосу з керуванням напругою динамікою генерованих коливань в базовій схемі мікроелектронного генератора на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференційним опором, у якій, на відміну від відомих, забезпечено широкий діапазон зміни параметрів генерованих періодичних і хаотичних коливань, а також режим розвинутого хаосу. Встановлено, що автоколивна система такого генератора має третій порядок, що зумовлено реактивними властивостями

емнісного ефекту вхідного опору біполярної транзисторної структури. За рахунок великої інерційності перенесення повного заряду трьох  $p-n$  переходів (двох емітерних і одного колекторного) явище виникнення хаотичних коливань спостерігається на низьких частотах.

Побудовано новий малопотужний генератор детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференційним опором і ВАХ  $N$ -типу та отримано результати його експериментальних досліджень. За рахунок використання нелінійних і реактивних властивостей біполярної транзисторної структури з від'ємним диференційним опором і ВАХ  $N$ -типу забезпечено електричне керування осциляторним, хаотичним і релаксаційним режимами в широкому діапазоні напруг живлення.

**У цьому розділі** здійснено розроблення неавтономних пристроїв формування сигналів з регулярною динамікою на основі нелінійних і реактивних властивостей транзисторних структур із від'ємним диференційним опором. Запропоновано загальну еквівалентну схему радіотехнічних пристроїв формування сигналів з регулярною динамікою на основі транзисторних структур із від'ємним диференційним опором з ВАХ  $\Lambda$ -типу. Запропоновано метод формування сигналів із регулярною динамікою, принцип якого полягає у компенсації від'ємним диференційним опором активних втрат в автоколивній системі неавтономного радіотехнічного пристрою, що викликає перетворення енергії постійного струму джерела живлення в змінні в часі нелінійні коливання, суперпозиція яких з вхідним сигналом перетворює його спектральний склад, що дозволяє, на відміну від відомих методів, забезпечити режими підсилення вхідного сигналу, амплітудної модуляції сигналу, а також ділення частоти сигналу на електрично керований коефіцієнт поділу не лише у цілу, але й дробову кількість разів.

Запропоновано нову математичну модель пристроїв формування періодичних електричних сигналів на основі нелінійних властивостей транзисторних структур із від'ємним опором, яка, на відміну від існуючих, застосовує апроксимацію статичних ВАХ транзисторних структур  $\Lambda$ -типу з різними геометричними формами спадних ділянок, а також враховує режими живлення та зовнішнього збудження для опису режимів підсилення вхідного сигналу, ділення частоти та амплітудної модуляції сигналу, що дозволило отримати фазові портрети і фігури Ліссажу, часові та частотні характеристики періодичних коливань.

Розроблено нові електричні схеми помножувачів частоти на біполярній, польовій та біполярно-польовій транзисторних структурах з від'ємним диференційним опором із керуванням напругою коефіцієнтом помноження частоти. Запропоновано нові квазілінійні математичні моделі таких помножувачів частоти на основі узагальненої еквівалентної схеми, які, на відміну від існуючих, враховують режими роботи активних елементів помножувачів частоти залежно від зміни напруги живлення та керування.

На основі реактивних властивостей транзисторних структур із від'ємним диференційним опором розроблено фільтри низьких частот з електричним керуванням частотою зрізу, а також електрично керовані УВЧ фазообертачі відбивного типу діапазону 900 МГц. Зазначено практичні застосування пристроїв формування сигналів з регулярною динамікою на основі реактивних властивостей транзисторних структур із від'ємним диференційним опором.

Робота завершується висновками, які впливають зі змісту роботи та є логічними.

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

**Значення одержаних результатів для науки і практики та рекомендації щодо їх можливого використання.** Отримані результати характеризуються теоретичною та практичною значимістю. Вони можуть бути використані для подальшого теоретичного та експериментального дослідження і розроблення нових пристроїв генерування та формування сигналів за регулярною й хаотичною динамікою для інфокомунікаційних систем, режими яких оптимізовані за максимумом інформаційних властивостей за рахунок використання запропонованих нових схемних рішень, розроблених та удосконалених математичних моделей, результатів випробувань, висновків та рекомендацій. Усі розроблені у роботі електричні схеми та конструкції пристроїв



генерування та формування сигналів можуть використовуватись безпосередньо у складі передавачів і приймачів сигналів кінцевого обладнання інфокомунікаційних систем. Це підтверджується наведеними актами впровадження результатів дисертаційних досліджень.

**Повнота викладення в опублікованих працях отриманих у роботі результатів.** Здобувачем за темою дисертації опубліковано 70 наукових праць, у тому числі: 2 монографії; 27 статей опубліковано у виданнях, що входять до переліку фахових видань; 2 статті у наукових періодичних виданнях інших держав з напрямку, 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, які в достатній мірі висвітлюють результати роботи, що виносяться на захист.

Представлення результатів наукової роботи є, на мій погляд, достатнім. Кількість публікацій, обсяг, якість, повнота висвітлення результатів та розкриття змісту дисертації відповідає вимогам Міністерства освіти України. Серед публікацій, що відображають основні результати дисертаційної роботи, 21 проіндексовані у міжнародних наукометричних базах Scopus та Web of Science. Зазначені публікації повною мірою висвітлюють наукові положення дисертації.

Основні положення роботи широко апробовані на багатьох міжнародних наукових конференціях та семінарах, у тому числі зарубіжних, на яких здобувач робив доповіді як на секційних, так і пленарних засіданнях.

Спрямованість наукових конференцій та семінарів, на яких відбувалась апробація дисертаційного дослідження, характер статей здобувача, в яких відображено наукові положення дисертації і результати проведених досліджень, повною мірою розкривають дослідницьку задачу.

Вважаю, що дисертація пройшла належну апробацію, є самостійною науковою працею, що має завершений характер.

#### **Відповідність змісту автореферату основним положенням дисертації.**

Ознайомлення з авторефератом дає підстави стверджувати, що за структурою та змістом автореферат відповідає вимогам, що ставляться МОН України до авторефератів дисертаційних робіт. У тексті автореферату відображено основні положення, зміст, результати і висновки здійсненого здобувачем дисертаційного дослідження. Зміст автореферату та основних положень дисертації є ідентичним.

#### **Загальні зауваження.**

1. Об'єм основного змісту дисертації, на мій погляд, мог бути скорочений за рахунок винесення в додатки результатів математичного моделювання впливу дії адитивного білого шуму на динамічні процеси в генераторі Кияшко-Піковського-Рабіновича (рис. 4.12 – рис. 4.24, стор. 229 – стор. 238, рис. 4.25 – рис. 4.40, стор. 240 – стор. 252).

2. В математичній моделі багаточастотного генератора квазіперіодичних коливань на основі польової транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором відсутні співвідношення для розрахунку амплітуди гармонік  $U_k$ , а лише зазначено, що обчислення їх величин здійснюється за «методикою, що запропонована автором у [39]». Було б доцільно привести цю методику в дисертаційній роботі.

3. У дисертаційній роботі наведена велика кількість отриманих амплітудно-частотних спектрів генерованих хаотичних сигналів як у лінійному, так і напівлогарифмічному масштабі. При цьому відсутні будь-які пояснення до них.

4. У п. 4.4 наведено графічні результати дослідження впливу нелінійних властивостей прохідної ВАХ підсилювального елемента на динамічні процеси розроблених за методом Кияшко-Піковського-Рабіновича генераторів при дії адитивного білого шуму. При цьому відсутній аналіз отриманих результатів. В наслідок цього не зрозуміло, як нелінійність прохідної ВАХ підсилювального елемента впливає на роботу генератора за наявності адитивного білого шуму.

5. У п. 5.2 автором запропоновано узагальнене трансцендентне рівняння апроксимації статичних ВАХ  $\Lambda$ -типу транзисторних структур із від'ємним диференціальним опором. На мій



погляд, автором запропоновано не рівняння, а саме функцію апроксимації у двох виглядах для різних вигинів спадної ділянки нормованої статичної ВАХ транзисторної структури. При цьому, схожу функцію апроксимації використано автором раніше в дисертації на стор. 221 формула (4.8).

6. Вважаю, що крім впливу адитивного білого гаусового шуму з різною інтенсивністю на динамічні процеси в розроблених за методом Кияшко-Піковського-Рабіновича нових генераторах детермінованого хаосу (стор. 229 – стор. 252) необхідно було б дослідити вплив інших видів шуму (із полігаусовим (бімодальним) і рівномірним розподілами).

7. На графіках характеристичних показників Ляпунова при зміні коефіцієнтів автоколивної системи генератора Кияшко-Піковського-Рабіновича на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором (рис. 4.52 на стор. 267) наочно видно лише ламані криві двох показників Ляпунова за відсутності кривої старшого показника Ляпунова, який повинен бути додатнім для забезпечення стійкого хаотичного режиму.

8. У роботі зустрічаються неточності у термінах. Так, у п. 3 висновків, як у дисертаційній роботі, так і в авторефераті у другому реченні зазначено «генератор Колпітця», а в третьому, четвертих і останньому реченнях цього абзацу – «генератор Колпітца».

**Висновки.** Дисертаційна робота Семенова А.О. «Методи і пристрої генерування та формування сигналів з регулярною й хаотичною динамікою для інфокомунікаційних систем» є закінченим науковим дослідженням, містить нові теоретичні і практичні результати та відповідає вимогам п.п. 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 (зі змінами, внесеними згідно з Постановою КМ № 656 від 19.08.2015 р., № 1159 від 30.12.2015 р. та № 567 від 27.07.2016 р), а її автор Семенов Андрій Олександрович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій.

#### ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ

доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри радіоприймання  
та оброблення сигналів  
Національного технічного університету  
України «Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського»

В.А. Дружинін

Підпис професора Дружиніна В.А. засвідчую.

Учений секретар Вченої ради  
Національного технічного університету  
України «Київський політехнічний  
Інститут імені Ігоря Сікорського»  
кандидат філософських наук, доцент



А.А. Мельниченко