

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інформаційних радіотехнологій і технічного захисту інформації
 Кафедра комп'ютерної радіоінженерії і систем технічного захисту інформації
 Рівень вищої освіти другий (магістерський)
 Спеціальність 172 " Телекомунікації та радіотехніка "
 Тип програми освітньо-професійна
 Освітня програма Радіотехніка
(код і повна назва)
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Соніну Олексію Ігоровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Проектування багаточастотної активної монопольної друкованої антени осциляторного типу на основі хаотичних схем» затверджена наказом по університету від "21" жовтня 2022р. № 1378 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії: 15.12.2022

3. Вихідні дані до роботи: спроектувати засобами комп'ютерного моделювання (CAD) генератор хаотичних коливань та друковану антену для генерації кількох частот у RF/MW діапазоні для багаточастотної роботи з такими параметрами (характеристиками):

3.1. Генератор синусоїдальних (хаотичних) коливань по схемі Колпітца, налаштований на частоту 2.2 ГГц;

3.2. Напряга живлення схеми генератора 10В

3.3. Монопольна друкована патч антена прямокутної форми;

3.4. Коефіцієнт підсилення антени в робочій смузі частот: 1 – 2 дБі;

4. Перелік питань, які потрібно опрацювати в роботі:

4.1. Вступ.

4.2 Огляд активних антен у складі радіо засобів RF/MW діапазону.

4.3. Огляд генераторів динамічного хаосу

4.4 Моделювання засобами CAD генератора хаотичних коливань з монопольною друкованою патч антеною та дослідження їх характеристик.

4.5. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів):

Презентація, але не менше 10 слайдів (Огляд активних антени у складі безконтактних багаточастотних електронних інтелектуальних карток (радіо засобів RF/MW діапазону). Огляд генераторів динамічного хаосу. Моделювання засобами САД генератора хаотичних коливань та дослідження його характеристик. Результати моделювання активної багаточастотної монопольної друкованої антени та дослідження його характеристик..)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи (проекту)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Огляд літератури	4.11.2022-18.11.2022	
2	Вибір напрямку дослідження	10.11.2022-19.11.2022	
3	Комп'ютерне моделювання генератора хаосу та антени	15.11.2022-25.11.2022	
4	Висновки по роботі	19.11.2022-30.12.2022	
5	Оформлення та здача роботи	1.12.2022-10.12.2022	

Дата видачі завдання _____

Студент _____ Сонін О.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) _____ Лихограй В. Г.
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 70 с., 30 рис., 3 табл., 1 додаток, 9 джерел.

RF/MW, ХАОТИЧНІ СИСТЕМИ, СХЕМА ГЕНЕРАТОРА КОЛПІТЦА, ГЕНЕРАТОР ХАОСУ, ДИНАМІЧНИЙ ХАОС, АТТРАКТОР, АКТИВНА ІНТЕГРОВАНА АНТЕНА,

Об'єкт дослідження. Активні антени у складі безконтактних багато частотних електронних інтелектуальних карток.

Предмет дослідження. Багаточастотна активна монопольна друкована антена осциляторного типу на основі хаотичної схеми Колпітца.

Мета роботи – розробка засобами комп'ютерного моделювання багаточастотної активної монопольної друкованої антени осциляторного типу на основі хаотичної схеми Колпітца та дослідження їх характеристик.

Генератор хаосу Колпітца інтегрований разом з друкованою монопольною антеною реалізує активну антену осциляторного типу, яка є навантаженням та одночасно випромінювачем генератора хаотичних коливань. Змінюючи напругу зміщення генератора, антена може працювати на одній або кількох частотах.

Область застосування – безконтактні (радіочастотні) електронні ідентифікатори, системи захищеного радіозв'язку

ABSTRACT

Explanatory note: 70 p., 30 fig., 3 table, 1 appendix, 9 sources.

RF/MW, CHAOTIC SYSTEMS, COLPITTS GENERATOR, CHAOS GENERATOR, DYNAMIC CHAOS, ATTRACTOR, ACTIVE INTEGRATED ANTENNA,

Object of study. Active antennas are part of contactless multi-frequency electronic smart cards.

Subject of study. Multi-frequency active monopole printed antenna of the oscillator type based on the chaotic Colpitts circuit.

The purpose of the work is to develop a multi-frequency active monopole printed antenna of the oscillator type based on the chaotic Colpitts scheme and to study their characteristics by means of computer simulation.

The Colpitts chaos generator integrated together with the printed monopole antenna implements an active oscillator-type antenna, which is both a load and an emitter of the chaotic oscillation generator. By changing the bias voltage of the generator, the antenna can operate at one or more frequencies.

Field of application – contactless (radio frequency) electronic identifiers, secure radio communication systems

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ	7
ВСТУП	8
1. БЕЗКОНТАКТНІ ЕЛЕКТРОННІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ КАРТКИ	12
1.1. Застосування активних інтелектуальних карток	12
1.2. Застосування активних антен у складі інтелектуальних карток	15
1.3. Висновки до розділу 1	21
2. ГЕНЕРАТОРИ ДИНАМІЧНОГО ХАОСУ	23
2.1. Загальні поняття хаосу	23
2.2. Схемотехнічні рішення побудови RF генераторів хаосу	26
2.2.1. Генератор Колпітца	26
2.2.2. Генератор Хартлі	29
2.2.3. Хаотична система Лоренца	30
2.2.4. Генератор Чуа	32
2.2.5. RC-генератор хаосу	34
2.3. Загальні підходи до проектування мікрохвильових генераторів	36
2.4. Показники стабільності RF/MW схем	37
2.5. Вимоги при конструюванні RF/MW генератора	40
2.6. Вибір схеми-прототипу генератора хаосу	43
2.7. Висновки до розділу 2	45
3. ПРОЕКТУВАННЯ БАГАТОЧАСТОТНОЇ АКТИВНОЇ МОНОПОЛЬНОЇ ДРУКОВАНОЇ АНТЕНИ ОСЦИЛЯТОРНОГО ТИПУ НА ОСНОВІ ХАОТИЧНОЇ СХЕМИ КОЛПІТЦА	46
3.1. Проектування мікрохвильового осцилятора Колпітца	46
3.2. Проектування друкованої монопольної патч антени	50
3.3. Висновки до розділу 3	58
ВИСНОВКИ	59
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	60
ДОДАТОК А Графічний матеріал до кваліфікаційної роботи	62

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

АА – активна антена

АІА – активна інтегрована антена

ІК – інтелектуальна картка

МСЛ – мікросмужкова лінія

МСА – мікросмужкова антена

НШС – надширока смуга

НВЧ – надвисокі частоти

ДХ – динамічний хаос

AIA – Active Integrated Antenna

BJT – Bipolar Junction Transistor

FET – Field Effect Transistor

MPA – Microstrip Patch Antenna,

MW – Micro Wave

RF – Radio Frequency

RFID – Radio Frequency Identification

ВСТУП

В останні роки у всі сфери життєдіяльності людини активно впроваджуються інформаційно – комунікаційні технології (ІКТ). Їх застосування дозволяє значно підвищити керованість регіонів і міст, інфраструктури підприємств, а також оптимізувати та автоматизувати багато суспільних та технологічних процесів.

Також в останні роки спостерігається високий попит на недорогі високоякісні пристрої та системи, що працюють в діапазоні від радіочастот (radio frequency, RF) до мікрохвиль (Microwave, MW). Приймачі для бездротових персональних та локальних мереж, прийомовідповідачі для віддаленої ідентифікації персоналу та предметів, автомобільні радіолокатори міліметрового діапазону для інтелектуального управління рухом в крейсерському режимі – це лише кілька прикладів численних застосунків таких систем. Основними вимогами при їх проектуванні є забезпечення малих габаритів, малої ваги, низької ціни та мінімальної споживаної потужності.

Зокрема, важливим елементом ІК технологій в сучасному світі є контактні та безконтактні (радіочастотні) електронні ідентифікатори (Radio Frequency Identification, RFID), які присвоюються кожному ідентифікованому об'єкту (людині, майну) та виконують дві основні функції: ідентифікацію об'єкта та накопичення певної інформації про нього. Для унеможливлення несанкціонованого доступу третіх осіб, радіочастотні ідентифікатори мають відповідний рівень захисту.

На основі технологій RFID можна створювати різноманітні системи автоматичного обслуговування людини і її майна, що легко інтегруються з індивідуальними режимами обслуговування кожного об'єкта.

До всіх таких ідентифікаторів, незалежно від їхньої основної функції та конструктивного виконання, зараз застосовується зазвичай єдиний термін — інтелектуальна картка (ІК). Основними завданнями технологій ІК є автоматизація обслуговування людини та її майна у всіх сферах її життєдіяльності.

При розробці ІК перспективним є застосування активних інтегрованих антен (АІА) – це ідеальний кандидат на проектування компактних приймачів та передавачів через можливість побудови цілої радіочастотної підсистеми,

включаючи генератор, підсилювач, антену та змішувач на єдиній діелектричній підкладці.

Останнім часом велика увага приділяється розробці та застосуванню активних антен (АА), де реалізована інтеграція випромінюючих елементів з активними пристроями. Інтеграція активних пристроїв безпосередньо в структуру антени відома як активні інтегровані антени (active integrated antenna, AIA).

В залежності від функцій активних пристроїв, які використовуються в антенній структурі, АА можуть бути:

- активна антена – підсилювач,
- активна антена – осцилятор та
- активна антена – перетворювач частоти [3].

До складу активної антени (підсилювача, осцилятора, перетворювача частоти) можуть входити нелінійні активні прилади/елементи типу:

- тунельні діоди, діоди Ганна; або
- біполярні транзистори (Bipolar Junction Transistor, BJT), в яких використовуються носії заряду обох типів (електрони, дірки);
- польові (на ефекті поля) транзистори (Field Effect Transistor, FET)
- інтегральні мікросхеми – підсилювачі RF/MW діапазонів .

В свою чергу ці напівпровідникові нелінійні активні елементи є навантаженнями для антенного чи антенних елементів у складі AIA.

Багаточастотні АА – це такі антени, які можуть працювати на декількох частотах одночасно або в певні моменти часу, що важливо для технологій з ІК.

Більшість нелінійних пристроїв за певних параметричних умов демонструють хаотичні режими роботи. Є різні шляхи створення режиму хаосу. Для досягнення багаточастотного режиму роботи (multifrequency operation) використовується концепція детермінованого хаосу (deterministic chaos) на основі хаотичного осцилятора Колпітса (chaotic Colpitts oscillator). Осцилятор Колпітса демонструє явище біфуркації (bifurcation, невизначеність, роздвоювання) за певних значень параметрів електричної схеми і, таким чином, може працювати в періодичному, багатоперіодичному та хаотичному режимх [3].

За певних параметричних умов такі осцилятори можуть проявляти хаотичні явища через наявність у їх схемі нелінійних елементів. Вихідний сигнал таких осциляторів спочатку має синусоїдальні коливання, а при зміні одного з

параметрів осцилятора, вихідний період такої системи може перейти в стан невизначеності (біфуркації). При зміні значення такого параметра такий процес біфуркації продовжується далі і період вихідного сигналу стає 2, 4, 8, 16 і так далі, і продовжується до тих пір, поки не буде досягнутий стабільний стан і система перейде в хаотичний режим роботи. Хаотичні осцилятори мають властивість широкого спектру, яка може використовуватись для розробки багаточастотних антен.

У цій роботі використовується хаотичний режим роботи нелінійних осциляторів для генерації кількох частот у RF/MW діапазоні при використанні в друкованих антенах для багаточастотної роботи. Розроблена активна антена осциляторного типу може працювати на одиночній, подвійній, четверній, вісімковій частотах і так далі, або в хаотичному режимі роботи шляхом зміни напруги зсуву генератора. Коли генератор працює в багаточастотному режимі, він може бути використаний для реалізації багаточастотних антен; в іншому випадку в хаотичному режимі роботи його можна використовувати в системах захищеного зв'язку [3].

Робота організована в такий спосіб. Розділ 1 містить огляд активних антен у складі радіо засобів RF/MW діапазону. Розділ 2 містить огляд генераторів динамічного хаосу та експериментальне дослідження мікрохвильового хаотичного осцилятора Колпітса та шляхи його виведення в хаотичний режим. У розділі 3 розглянуто проектування друкованої прямокутної монопольної патч антени, а також її результати моделювання та об'єднання хаотичного генератора Колпітса з друкованою монопольною антеною для реалізації антени, що працює в багаточастотному режимі.

Мета роботи – розробка засобами комп'ютерного моделювання багаточастотної активної монопольної друкованої антени осциляторного типу на основі хаотичної схеми Колпітца та дослідження їх характеристик.

Зміст задач поставлених у магістерській роботі:

1. Огляд активних антени у складі безконтактних багато частотних електронних інтелектуальних карток.
2. Огляд RF/MW генераторів динамічного хаосу.
3. Моделювання засобами САД засобами комп'ютерного моделювання багаточастотної активної монопольної друкованої антени осциляторного типу на основі хаотичної схеми Колпітца та дослідження їх характеристик.

Об'єкт дослідження. Активні антени у складі безконтактних багато частотних електронних інтелектуальних карток.

Предмет дослідження. Багаточастотна активна монопольна друкована антена осциляторного типу на основі хаотичної схеми Колпітца.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених задач застосований математичний апарат теорії автоколивань динамічних систем, методи обчислювальної математики й чисельного моделювання.

Наукова новизна роботи:

1. Проведене моделювання засобами CAD двочастотної активної монопольної мікросмужкової друкованої антени осциляторного типу на основі хаотичної схеми Колпітца, яка є навантаженням та одночасно випромінювачем генератора хаотичних коливань, демонструє добре узгодження теорії з результатами моделювання і дозволяє стверджувати, що змінюючи напругу зміщення генератора, антена може працювати на одній або двох частотах.

Положення, які виносяться на захист:

1. Огляд активних антени у складі безконтактних багато частотних електронних інтелектуальних карток.

2. Огляд RF/MW генераторів динамічного хаосу.

3. Моделювання засобами CAD засобами комп'ютерного моделювання багаточастотної активної монопольної друкованої антени осциляторного типу на основі хаотичної схеми Колпітца та дослідження їх характеристик.

1. БЕЗКОНТАКТНІ ЕЛЕКТРОННІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ КАРТКИ

1.1. Застосування активних інтелектуальних карток

При обслуговуванні особи, ІК-ідентифікатори можуть містити такі дані (рис. 1.1):

- ідентифікаційний код власника;
- засоби захисту інформації від несанкціонованого доступу;
- інформацію (постійну та, за потреби, змінювану), що відповідає функціям RFID;
- стандартні інтерфейси його спілкування з навколишніми приладами ;
- системами для автоматичного обслуговування та ін.

Ці ідентифікатори забезпечують виконання приладами та системами необхідних набір функцій, як показано на **рис. 1.1**, що у багатьох випадках потребує наявності в ідентифікаторі мікроконтролера та спеціальної пам'яті: це й визначило ще одну їх назву — інтелектуальні картки або Smart Card.

Часто в одному ІК-ідентифікаторі реалізується кілька незалежних функцій. У перспективі всі або більшість ІК-ідентифікаторів, що обслуговують людину, зіллються в єдиний багатофункціональний ідентифікатор — інтегровану ІК громадянина.

Як правило, відповідно до вимог ISO 7816, ІК-ідентифікатори конструктивно можуть бути виконані у вигляді пластикової картки. Однак іноді зручнішими є інші конструкції, наприклад:

- брелоки (ключі від будинку, машини тощо);
- браслети;
- персні, тощо.

При обслуговуванні особистого та громадського майна (транспортних засобів, обладнання, товарів, тварини та інших об'єктів) ІК-технології використовують ті ж принципи, що і при обслуговуванні людини. На відміну від

персональних ІК, ідентифікатори майна мають значно більше розмаїття параметрів ІК, їх конструкції та умов застосування (рис. 1.2):

- контроль та управління різними процесами;
- автоматизація зберігання, формування замовлень, відвантаження;
- контроль при транспортуванні;
- автоматизація торгового процесу, гарантія справжності товару;
- інформація для утилізації об'єкта (зміст дорогоцінних металів, екологічні вимоги) тощо.

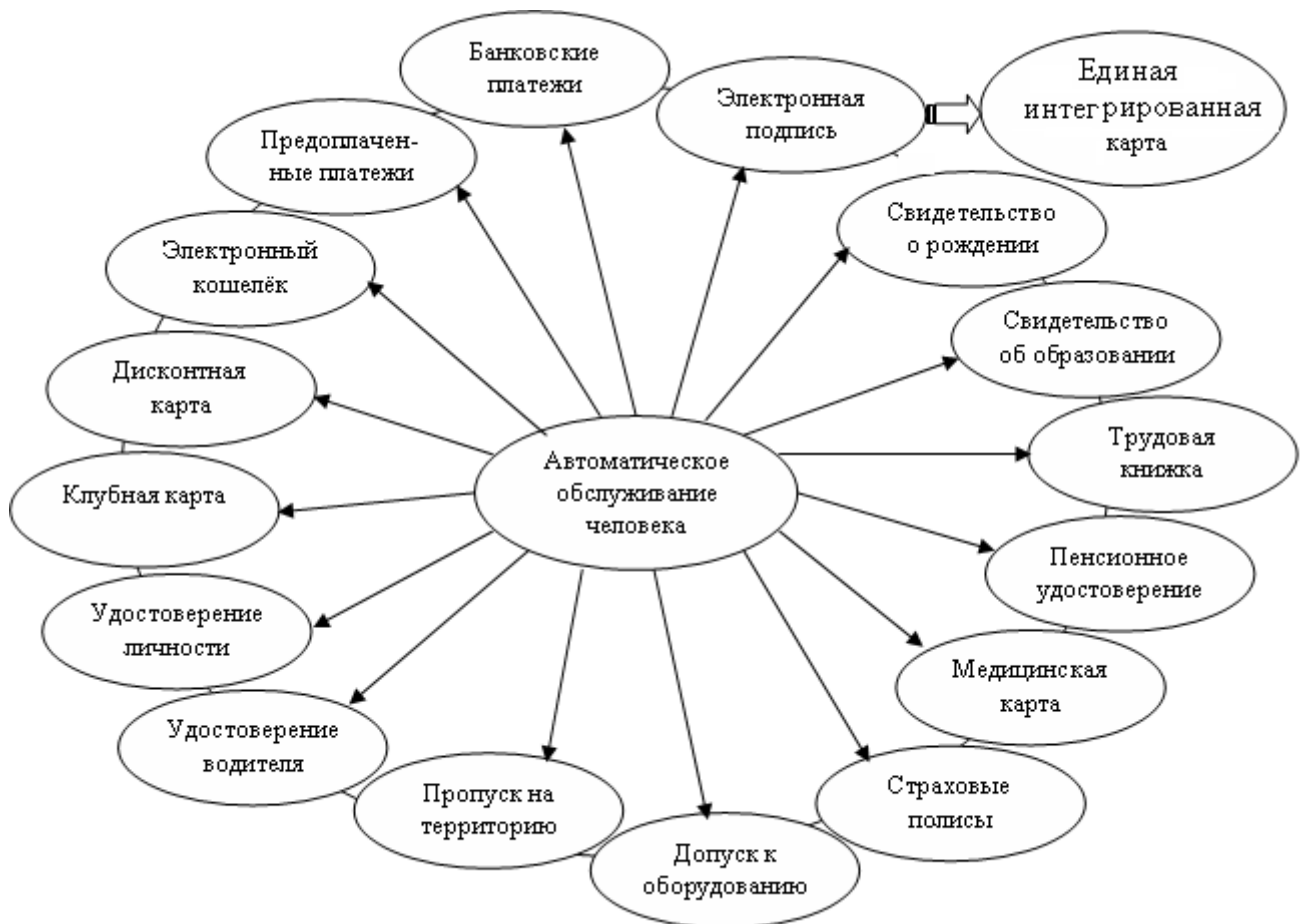


Рисунок 1.1 – Дані, що можуть використовуватись при автоматичному обслуговуванні людини на основі технологій ІК

Вимоги до конструкції ІК для майна визначаються специфікою як об'єкта ідентифікації, так і умов його змісту, що визначає різноманіття конструкцій таких ІК. Це може бути пластикова карта (технічний талон на автомобіль, талон про проходження техогляду); блок, що пригвинчується (ІК залізничного вагона); мітка, що приклеюється або вводиться в пластмасову масу деталі; диск, що

пригвинчується або пришивається; скляна ампула, імплантована під шкіру тварини, та багато інших варіантів.

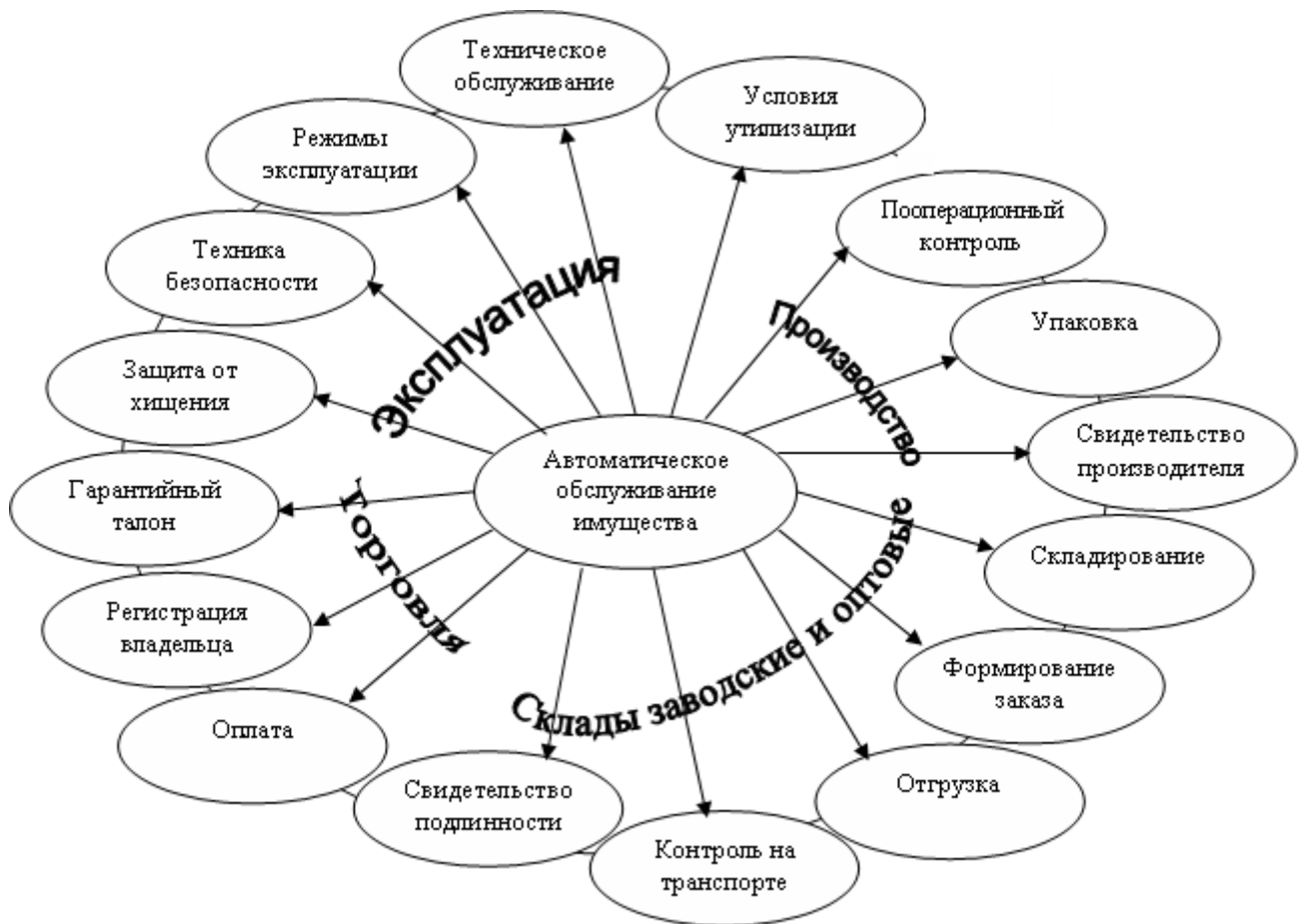


Рисунок 1.2 – Автоматичне обслуговування майна

На сьогодні в ІК-технологіях існує велика кількість контактних і безконтактних радіочастотних платіжних та ідентифікаційних засобів. Зараз розроблені низка технологічних платформ, які включають безпосередньо мікрочіпи, антени, а також безпосередньо картки, мітки, брелоки, зчитувачі і системи контролю доступу. Перелік цих засобів (ІК- чи SmartCard- технології) наведено в **таблиці 1.1**.

Слід наголосити, що дальність зчитування та запису при роботі на частоті 13.56 МГц можлива до 1,5 м при площі антени ІК більше 100 x 150 см. При менших площах антен зменшується дальність. Тому для зменшення розмірів антен потрібен перехід в область вищих частот. Як видно з **табл.1.1**, серед безконтактних ІК набуває тенденція руху в область MW діапазону на частотах 2 ГГц.

Таблиця 1.1 – ІК- чи SmartCard- технології

ІК з контактами і портом згідно ISO 7816	ІК безконтактні, радіоканал 125 кГц	ІК безконтактні, радіоканал 13.56 МГц	ІК безконтактні, радіоканал 2.0 ГГц	ІК сумісні, контактні/ безконтактні
<u>Банківські платіжні ІК</u> Ідентифікатори: картки Застосування: Банківські платіжні ІК, модуль безпеки таксофона, надзахищений допуск	<u>Ідентифікаційні ІК</u> Ідентифікатори: картки, брелоки і т.д. Застосування: контроль доступу, утримання тварин, контроль майна і т.д.	<u>Ідентифікаційні ІК</u> Ідентифікатори: картки, брелоки, мітки, диски і т.д. Застосування: контроль доступу, складський облік та обіг, контроль майна, управління транспортом	<u>ІК віддаленого зчитування</u> Ідентифікатори: блоки Застосування: контроль за вагонами, морськими судами, контейнерами і т.д.	<u>Сумісні ІК:</u> сумісність в одній ІК контактної та безконтактної методів зчитування/ запису даних
<u>Передплачені ІК</u> Застосування: телефонія, АЗС, транспорт (автобуси, трамваї, метро), паркування, дисконтні ІК, абонемент		<u>Багатоцільові ІК</u> Ідентифікатори: карти Застосування: контроль доступу, складський облік і обіг, передоплачений доступ		
<u>Інформаційні ІК</u> Застосування: Медичний і страховий поліси, контроль доступу і т.д.				

1.2. Застосування активних антен у складі інтелектуальних карток

Інтелектуальна картка по суті є прийомовідповідачем. Приймач – це схема, яка коли запускається зовнішнім джерелом опитування з встановленою частотою, передає сигнал реакції запитувачу, бажано на іншій частоті з метою зменшення інтерференційного ослаблення сигналу. Використання компактних

дешевих мікрохвильових приймачів для безконтактної ідентифікації в системах пропуску, збору, оплати та контролю за станом запасів привернула до них увагу останні роки.

При розробці конструкцій ІК перспективним є застосування активних інтегрованих антен. Активні інтегровані антени (AIA) – це ідеальний кандидат на проектування компактних приймачів та приймачів для цих безпроводних систем через можливість побудови цілої радіочастотної підсистеми, включаючи генератор, підсилювач, антену та змішувач на єдиній діелектричній підкладці.

Схему безконтактного прийомовідповідача посвідчення особи (RFID), яка працює за принципом квазіоптичного змішувача на частоті 6 ГГц, наведено на рис. 1.3 [1].

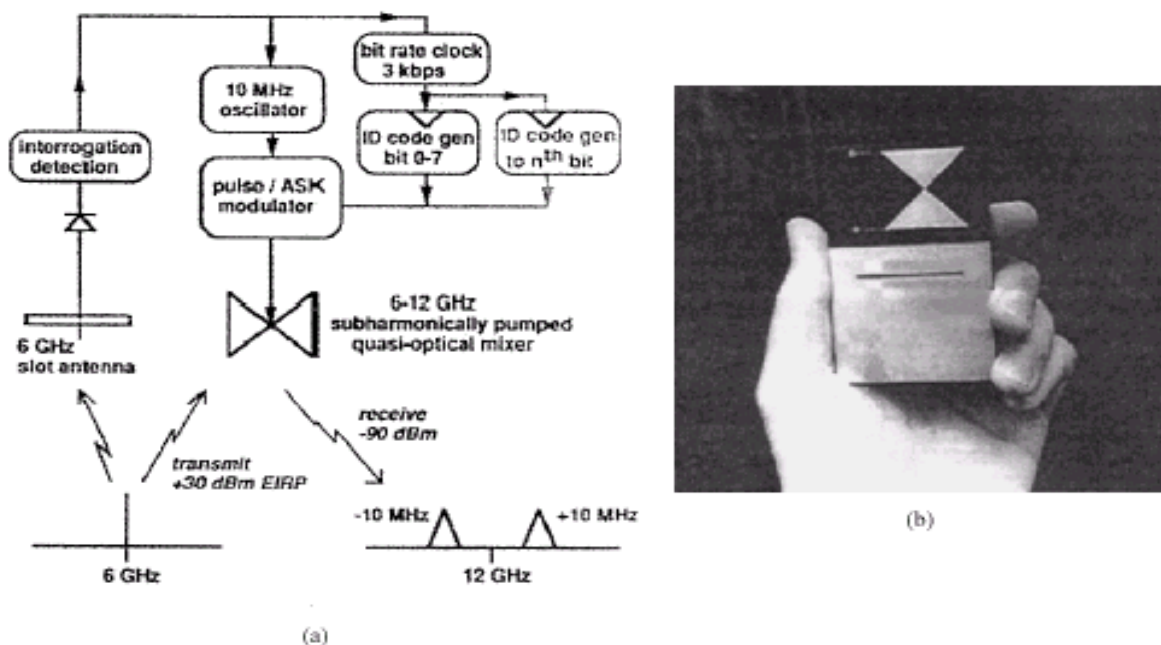


Рисунок 1.3 - Безконтактне посвідчення особистості
(а- схема, b - зовнішній вигляд)

У цьому прийомовідповідачеві використовується широкопasmової мікросмужкова антена [1]. При отриманні сигналу опитування на частоті 6 ГГц, приймач-відповідач передає унікальний цифровий розпізнавальний код на частоті близько 12 ГГц. Слід зазначити, що багато карток може читатись одночасно при незмінному цифровому коді сигналу ID при використанні різних частот. Оскільки сигнал у відповідь не має прямого зв'язку з сигналом опитування, можливість неправильної ідентифікації в системі мінімізована. Інша характерна особливість -

використання щілинної антени разом із випрямляючим діодом для запуску картки зі стану спокою. Чергові та робочі струми 25 мкА та 1 мА, відповідно при використанні срібло-окисної батареї 1.5 В. Падіння струму до 1 мкА в режимі допомогло збільшувати поточний термін служби батареї від двох років приблизно до десяти років за умови, що картка використовується щодня хочаб протягом однієї хвилини [2].

Іншим прикладом дешевого, компактного планарного прийомовідповідача є приймально-передавальна антена з **подвоєнням частоти** (рис. 1.4). Поряд з прийомом вхідного сигналу, приймальна мікросмужкова антена також поділяє потужність на дві рівні частини і здійснює зсув фаз на 180° між двома вихідними портами. Це ліквідує потребу у фазозсувному пристрої та дільнику потужності між активними пристроями та приймальною антеною. При використанні двох подвоювачів частоти на монолітних надвисокочастотних ІМС отримано коефіцієнт передачі перетворювача близько 6 дБ.

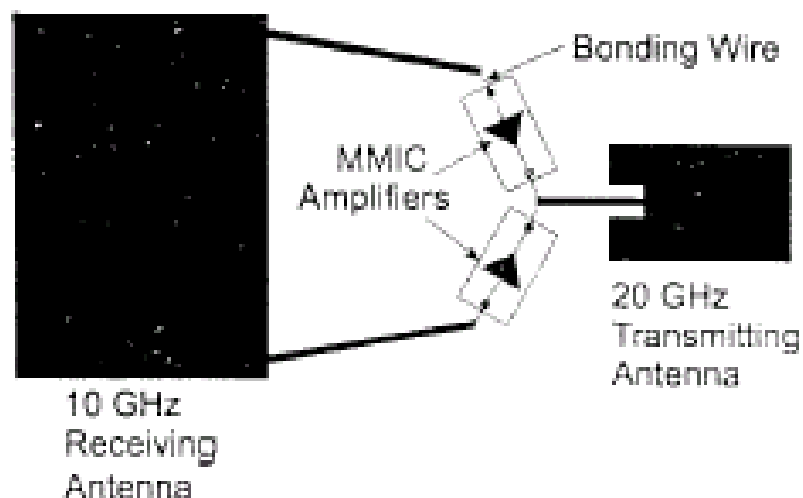


Рисунок 1.4 – Приймальна антена AIA з подвоєнням частоти

В іншій розробці [1] був реалізований квазіоптичний приймально-передавальний елемент у НВЧ-діапазоні з використанням у передавачі польового транзистора в якості змішувача і гетеродина. У цьому випадку сигнал проміжної частоти зазнає доплерівського зсуву частоти, що дозволяє реалізувати простий, і компактний датчик руху.

Ця концепція застосовувалася також в двоелементній мікросмужковій комутованій антенній решітці, де промінь перемикається сигналом зовнішньої синхронізації для функціонування в режимі радіолокатора на ефекті Доплера з можливістю супроводження по азимуту [2]. Як показано на **рис. 1.5**, в прийомному модулі використовуються два польових транзистора з затвором на бар'єрі Шотки, в якості генератора і в якості змішувача для отримання проміжної частоти сигналу. Початкові випробування показали, що радар може бути перспективним варіантом у стандартних системах, що використовують генератори Ганна та рупорні антени.

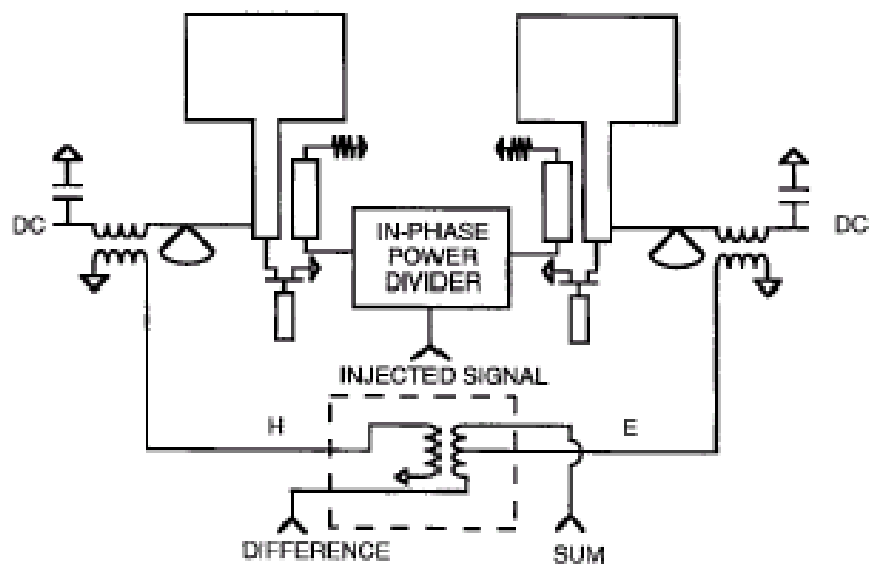


Рисунок 1.5 - Модуль приймача на ефекті Доплера з можливістю супроводу по азимуту

На **рис.1.6** зображено інший компактний і дешевий приймач з АІА, який може використовуватися для двостороннього зв'язку [2].

В цьому пристрої використовується дискова мікросмужкова антена зворотного випромінювання. Польовий транзистор генерує несучу для передавача, яка також використовується як частота гетеродина для діодного змішувача, інтегрованого в мікросмужкову антену. У режимі прийому поляризація ортогональна до поляризації антени в режимі передачі з метою розподілу сигналів, що приймається і випромінюється. Система двостороннього зв'язку, що використовує такі приймачі, може працювати з максимальною дальністю до 4.8 км.

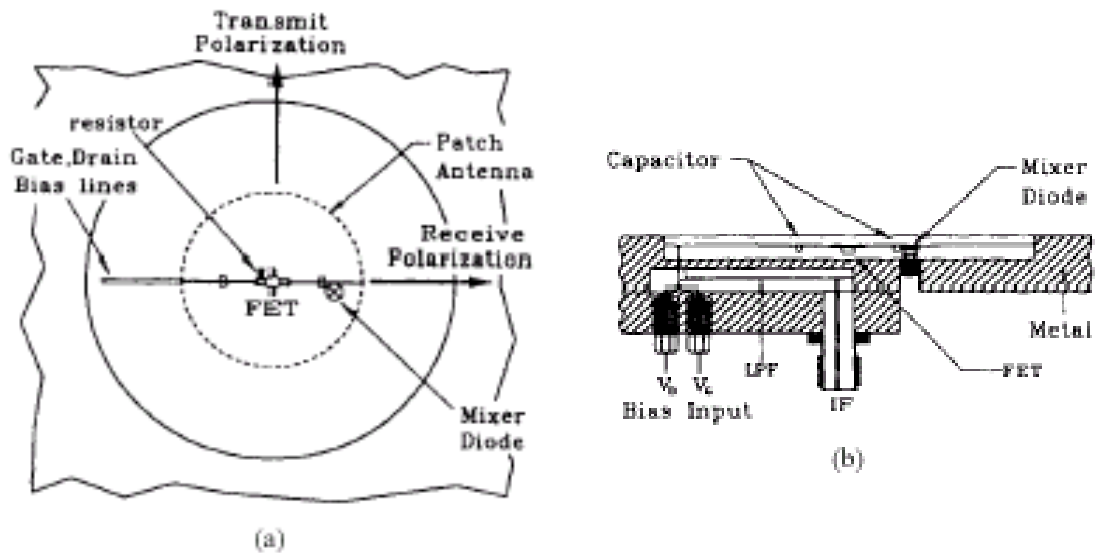


Рисунок 1.6 – Приймач з АІА у вигляді дискової мікросмужкової антени зворотного випромінювання (а - вид зверху, b - вид збоку)

Оскільки безпроводні програми просуваються в область вищих частот, АІА стають суттєвою альтернативою стандартним конструкціям. Нещодавно було запропоновано активну інтегровану антену міліметрового діапазону на кремнієвій монолітній інтегральній мікросхемі (МІМС) для мобільного датчика в діапазоні 76.5 ГГц [2]. На **рис. 1.7** показана конструкція мікросмужкової антени, інтегрованої з лавинно-прогоновим діодом, а також з відгалужувачем в якості схеми синхронізації.



Рисунок 1.7 – Мікросмужкова антена, інтегрована з лавинно-прогоновим діодом, а також з відгалужувачем як ланцюг синхронізації для діапазону 76.5 ГГц

Вся структура монолітно об'єднана на кремнієвій підкладці товщиною 125 мкм, що дає дуже малий розмір кристала – всього 3.2x2.6 мм. Ця схема забезпечує

високу для міліметрового діапазону вихідну потужність - до 5 dBm, має добре розв'язку по входам для ланцюгів зміщення і зовнішньої синхронізації на субгармоніці. Вимірний діапазон перебудови частоти становив 300 МГц при вхідній потужності 0 дБм на частоті 25.5 ГГц. Такі АІА перспективні при реалізації дешевих систем різноманітних автомобільних датчиків міліметрового діапазону.

Двочастотні антени необхідні там, де потрібна робота двох подібних систем у різних діапазонах довжин хвиль, як наприклад у системах ідентифікації (RFID), в системах мобільного зв'язку (GSM900, GSM 1800, UMTS, PCS), в системах глобальної супутникової навігації (Global Navigation Satellite System, GNSS), де взаємодіють дві групи приймачів.

У [1] подана класифікація дводіапазонних мікросмушкових антен, основна ідея якої полягає в поділі антен **за типом збудження** – збудження двома або однією лініями передачі. Запропоновано розділяти двочастотні (загалом – багаточастотні) антени за такими способами збудження:

- антени, для збудження яких у різних діапазонах використовуються різні лінії передачі (різні входи), віднесені до класу однорежимних;
- антени, для збудження яких у різних діапазонах використовується одна лінія передачі (один вхід), віднесені до класу багато режимних.
- інші механізми збудження.

Так, в роботі [1] наведено цікаву концепцію реалізації багато частотної активної монопольної друкованої антени осциляторного типу (**рис. 1.8**). Концепція подвоєння періоду коливань до рівня хаотичних коливань (хаосу) використовується для створення кількох частот. Генератор хаосу Колпітса інтегрований разом з друкованою монопольною антеною (printed monopole antenna, РМА) на тій самій підкладці для реалізації активної антени осциляторного типу, де РМА є як навантаженням та одночасно випромінювачем генератора хаотичних коливань. Змінюючи напругу зміщення генератора, антену можна змусити працювати на одній або кількох частотах. Для перевірки характеристик антени на одній або кількох частотах розроблено два схожих прототипи друкованих монопольних широкосмугових антен. Одна з цих антен, яка використовується на передавальній стороні, живиться від генератора хаосу Колпітса, а інша використовується як приймальна антена. Тобто антена

одночасно приймає одну або кілька частот для певних значень напруги зміщення генератора хаосу на стороні передачі.

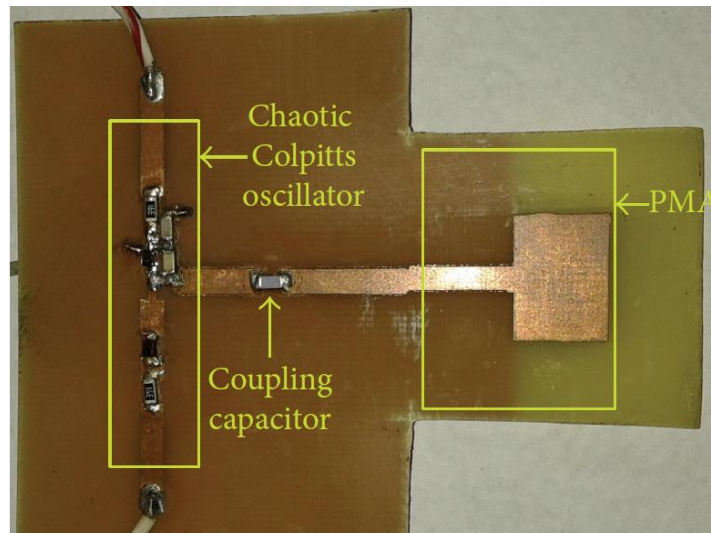


Рисунок 1.8 – Модель прототипу багаточастотної активної антени осциляторного типу на підкладці FR4

У роботі [1] представлена антена у вигляді подвійного квадратного патча з хрестоподібною щілиною, що живиться однією лінією передачі, що працює в двох діапазонах частот 1.04 ГГц і 2.49 ГГц зі смугою 5.7% і 8% при КСВН < 2. Однак, конкретних даних щодо розмірів випромінювачів не наведено.

У [2] подана розробка випромінювача у вигляді комбінації диполів і щілин для роботи в трьох діапазонах хвиль $f_0 = 5.3 \text{ GHz}$ (КСВН < 2) = 4.2%, $f_0 = 6.28 \text{ GHz}$ (КСВН < 2) = 4.5%, і $f_0 = 7.13 \text{ GHz}$ (КСВН < 2) = 2.5%. Для цього випромінювача не наводяться дані про смугу робочих частот у діапазонах.

Таким чином, область застосування двочастотних активних інтегрованих антен, як показано вище, видається досить переконливим для .

1.3. Висновки до розділу 1

Однією із актуальних задач є дослідження та розробка випромінювачів для АІА. У наведених вище прикладах реалізація двочастотних антен проводилася в основному з використанням двох окремих випромінювачів. Однак перспективною є спроба розробки активної антени, в якій є випромінювач, що працює одночасно в двох діапазонах частот.

З огляду на літературу впливає, що такими випромінювачами можуть бути випромінювачі на основі активної монопольної друкованої антени осциляторного типу з подвоєнням періоду коливань до рівня хаотичних коливань (хаосу), що дає змогу отримати АА осциляторного типу для кількох частот.

Відповідно до завдання на роботу, тут буде розглянута і досліджена багато частотна активна монопольна друкована антена осциляторного типу, яка для досягнення багаточастотного режиму роботи (multifrequency operation) використовує концепцію детермінованого хаосу (deterministic chaos) на основі хаотичного осцилятора Колпітса (chaotic Colpitts oscillator), що резонує на кількох (зокрема, на одній, двох, чотирьох) частотах і в може працювати в режимі динамічного хаосу.

2. ГЕНЕРАТОРИ ДИНАМІЧНОГО ХАОСУ

2.1. Загальні поняття хаосу

Стародавні греки називали безладну матерію, неорганізовану стихію, з якої утворилося згодом все існуюче, хаосом. Хаотична поведінка виникає не через вплив зовнішніх джерел шуму, не через велике число ступенів свободи системи і не через невизначеність, пов'язану з квантовою механікою. Така хаотична поведінка породжується власною динамікою нелінійної детермінованої системи [5]. За аналогією явищу нерегулярного (хаотичного) руху в нелінійних системах був даний термін динамічний або детермінований хаос. Детермінований хаос виникає, коли незначне відхилення при початкових умовах призводить до значного відхилення в кінці.

Простір (двовимірний або загалом багатовимірний) змінних динамічної системи утворює фазовий простір, у якому кожна точка відповідає стану динамічної системи в певний час. Певній поведінці системи у фазовому просторі відповідає поняття атрактор (attractor), що в перекладі з англійської означає "той, що притягує до себе".

Атрактор — множина точок у фазовому просторі, до якої збігаються фазові траєкторії динамічної системи (**рис.2.1**) [6]. Атрактори можуть бути точковими (точки рівноваги), лініями (граничні цикли), поверхнями, і складними багатовимірними фрактальними структурами, як у випадку дивного атрактора. Навколо атрактора в фазовому просторі існує басейн притягання. В загальному випадку атрактор — це безліч траєкторій в фазовому просторі, до яких притягуються всі інші траєкторії з деякої області і така область називається ще басейном тяжіння атрактора [6].

Причиною нерегулярності поведінки є властивість нелінійних систем експоненціально швидко формувати спочатку близькі траєкторії в обмеженій області фазового простору. Передбачити поведінку траєкторій хаотичних систем на тривалий час неможливо, оскільки чутливість до початкових умов висока, а початкові умови, як у фізичних експериментах, так і при комп'ютерному моделюванні, можна задати лише з кінцевою точністю [5].

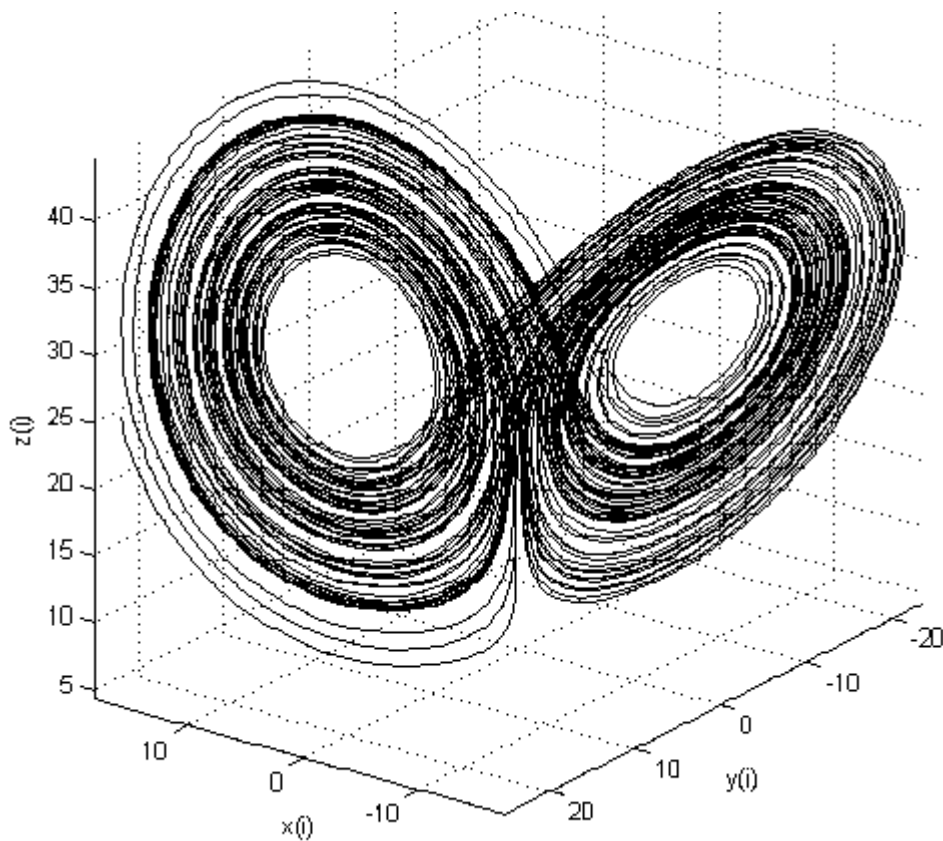


Рисунок 2.1 – Атрактор Лоренца у тривимірному просторі

На перший погляд, природа хаосу виключає можливість керувати ним. Насправді ж все з точністю до навпаки: нестійкість траєкторій хаотичних систем робить їх надзвичайно чутливими до управління. Нехай, наприклад, є динамічна система і потрібно перевести фазову траєкторію з однієї точки аттрактора в іншу. Хаотичні траєкторії мають властивість з часом потрапляти в околицю до будь-якої точки, що належить аттрактору. Якщо потрібно, щоб це сталося через певний час, не більший ніж T , необхідний результат може бути отриманий за рахунок одного або серії малопомітних, незначних збурень траєкторії. Кожне з цих збурень лише незначно змінює траєкторію. Але через деякий час накопичення і експоненціальне підсилення малих збурень призводить до досить сильної корекції траєкторії. При правильному виборі збурень це дозволяє вирішувати поставлену задачу, не відводячи траєкторію з хаотичного аттрактора [5].

Таким чином, хаотичні системи демонструють одночасно і добру керованість і добру пластичність (гнучкість): система чітко реагує на зовнішні впливи, при цьому зберігаючи характеристики руху.

Поєднання керованості і пластичності є причиною того, що хаотична динаміка є характерним типом поведінки багатьох важливих систем. Наприклад, хаотичний характер серцевого ритму дозволяє серцю гнучко реагувати на зміну фізичних і емоційних навантажень, забезпечуючи при цьому запас динамічної міцності.

Очевидно, що подібні механізми надійного і гнучкого реагування на збудження та управляючі впливи властиві й іншим складним системам, які ефективно функціонують в мінливому середовищі. Такі системи повинні бути достатньо чутливі до "інноваційних" збурень і реагувати на них шляхом корекції "траєкторій", щоб мати здатність еволюціонувати, але при цьому залишатися на своєму аттракторі і зберігати в цілому тип поведінки, властивий даній системі. Якщо система втрачає ці властивості, то навіть значний запас "міцності" може виявитися недостатнім по відношенню до впливу специфічних малих динамічних збурень, і зовні благополучна система може втратити стійкість і зруйнуватися.

Аналіз накопиченої до цього часу інформації дозволив зробити висновок про те, що пропозиції, які розглядалися в переважній більшості публікацій, присвячених побудові радіотехнічних генераторів на основі динамічного хаосу, страждали відсутністю практичної цільової установки: як, навіщо, і за яких умов такі системи можуть бути використані практично. При цьому в більшості робіт автори обмежувалися суто модельними ситуаціями, типу розгляду характеристик системи в цілому, досить далеко від конкретних практичних задач і практичних інженерних рішень.

2.2. Схемотехнічні рішення побудови RF генераторів хаосу

Протягом останніх трьох десятиліть для аналізу поведінки антени з нелінійним навантаженням використовувалися різні методи. Однак у літературі немає інформації про те, що такі схеми можуть бути інтегровані з антеною. Overfelt [1] досліджував вплив хаосу на електрично малу дипольну антену, що працює на низькій частоті, навантажену нелінійною схемою, відомою як осцилятор Чуа (Chua's oscillator), припускаючи, що диполь можна змоделювати як чисто ємність та визначено еквівалентну схему комбінованої антени/навантаження такої системи. Однак характеристика хаотичних осциляторів для роботи в багаточастотному режимі не досліджувалась. Коли такий генератор хаосу інтегрується з друкованою патч-антеною на одній підкладці, його можна розглядати як активну інтегровану антену [1].

Основним елементом хаотичної динамічної системи є генератор хаосу. До теперішнього часу відомий не один десяток різних динамічних систем, які демонструють хаотичну поведінку. Однак створити на її основі потрібний генератор хаосу не здається настільки простим і однозначним. Далі розглянуто основні типи генераторів динамічного хаосу для RF/MW.

2.2.1. Генератор Колпітца

Генератор Колпітца (ємнісна триточка) – схема, особливістю якої є та обставина, що сигнал у ланцюг зворотного зв'язку надходить з дільника напруги на конденсаторах. Це зручна в реалізації електронна схема, що часто використовується для генерації синусоїдальних коливань на RF/MW.

Про хаос в осциляторі Колпітца вперше повідомив Кеннеді [1], а згодом були реалізовані інші типи схем хаотичних осциляторів Колпітца, що працюють як на низьких, так і на RF/MW частотах [4].

Було встановлено, що в певній області параметрів транзисторний генератор Колпітца демонструє хаотичну поведінку, при цьому у фазовому просторі формується атрактор (рис. 2.2, b).

У порівнянні з іншими генераторами хаосу, генератор Колпітца має деякі привабливі особливості: схема досить проста і легко реалізується в різних частотних діапазонах RF/MW. Генератор Колпітца розглядається як один з найбільш підходящих варіантів на основі хаосу для систем телекомунікацій.

Схема генератора Колпітца подана на **рис. 2.2** [7].

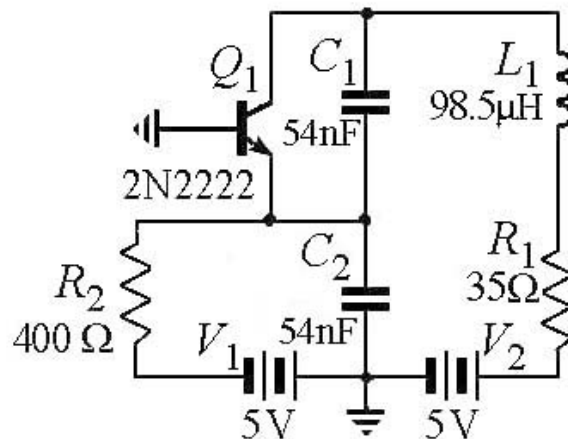


Рисунок 2.2 – Схема генератора хаосу Колпітца

Математична модель для цієї схема описується системою диференціальних рівнянь [7]:

$$\begin{aligned} C_1 \frac{dV_{C1}}{dt} &= \alpha_F f(-V_{C2}) + I_L \\ C_2 \frac{dV_{C2}}{dt} &= (1 - \alpha_F) f(-V_{C2}) + I_L + I_0 \\ L \frac{dI_L}{dt} &= -V_{C1} - V_{C2} - RL_L + V_{CC} \end{aligned} \quad (2.1)$$

де V_{C1} – напруга на ємності C_1 ,

V_{C2} – напруга на ємності C_2 ,

I_L – струм через індуктивність L ,

I_0 – струм джерела струму;

V_{CC} – напруга на джерелі напруги;

$f(V_{C2})$ – нелінійна вольт-амперна характеристика транзистора, яка описує залежність струму емітера від напруги база - емітер:

$$I_E = f(V_{BE}) = I_S \exp(V_{BE}/U_t) \quad (2.2)$$

де I_s – струм насичення; $U_t = kT/e = 25.3$ мВ при кімнатній температурі (T – температура; e – заряд електрона; k – постійна Больцмана). В цій моделі $V_{BE} = -V_{C2}$, а відношення струмів колектора і емітера $a_F = 1$.

Залежності в часі напруг на конденсаторах $C1$ і $C2$, (V і U відповідно), показані на **рис. 2.3, а**. Портрет атрактора у проекції на площину двох змінних (V і U) показано на **рис. 2.3, б**. Спектр сигналу на конденсаторі $C1$, що відповідає напрузі V , показано на **рис. 2.3, с**.

З **рис. 2.3** видно, що схема генератора Колпітца функціонує як генератор хаосу: реалізації демонструють неперіодичний процес, атрactor виглядає як характерний портрет дивного атрактора («клубок ниток»), спектр суцільний – не містить виражених дискретних складових.

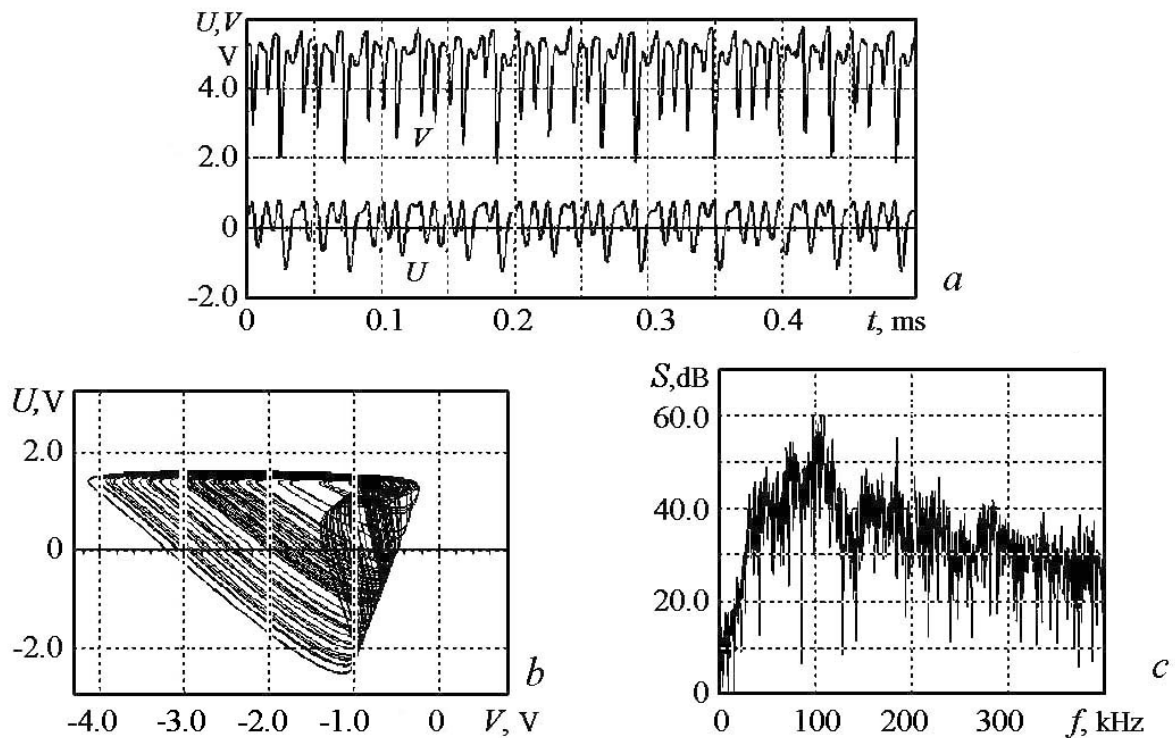


Рисунок 2.3 – Генератора хаосу Колпітца: залежності в часі напруг на конденсаторах $C1$ і $C2$ (а); портрет атрактора (б) та спектр сигналу на конденсаторі $C1$ (с)

2.2.2. Генератор Хартлі

Генератор Хартлі («індуктивна триточка») – одна з класичних схем електронних генераторів, що відрізняється тим, що позитивний зворотний зв'язок здійснюється через відведення від частини катушки індуктивності паралельного LC-контуру. Як і у випадку генератора Колпітца, традиційне використання схеми – генерація синусоїдальних коливань.

Схема генератора Хартлі подана на **рис. 2.4**[7].

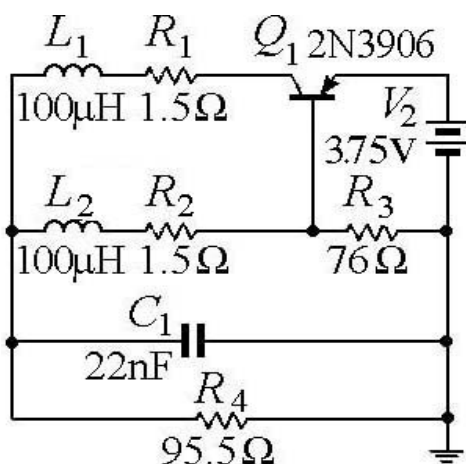


Рисунок 2.3 – Схема генератора хаосу Хартлі

Опис динаміки генератора Хартлі задано рівняннями [7]:

$$\begin{aligned} C_1 \dot{V} &= I_1 - I_2 - V R_4^{-1}, \\ L_1 \dot{I}_1 &= E - V_{EC} - V - I_1 R_1, \\ L_2 \dot{I}_2 &= V - I_2 R_2 - (I_2 - I_B) R_3. \end{aligned} \quad (2.3)$$

де V – напруга на конденсаторі C_1 ; I_1 та I_2 – струми через індуктивності L_1 та L_2 ; E – напруга батареї V . Струм бази та напруга емітер-колектор транзистора Q_1 , відповідно до прийнятої моделі транзистора подані таким чином:

$$\begin{aligned} I_B &= \begin{cases} 0, & V_{EB} \leq U_0, \\ R_0^{-1}(V_{EB} - U_0), & V_{EB} > U_0, \end{cases} \\ V_{EC} &= \begin{cases} k(V_{EB} - U_0), & V_{EB} > U_0, \\ V_{EC0}, & V_{EB} < U_0, \end{cases} \end{aligned} \quad (2.4)$$

де U_0 , R_0 , k – параметри транзистора (прийнято параметри $U_0=0.75\text{В}$, $R_0=100\Omega$, $k=900$).

Залежності в часі напруги U на індуктивності L_2 і струму I через неї показані на **рис. 2.5, а**. Було встановлено, що в певній області параметрів транзисторний генератор Хартлі демонструє хаотичну поведінку, при цьому у фазовому просторі формується атрактор у проекції на площину двох змінних (U і I) (**рис. 2.5, б**). Спектр сигналу на індуктивності L_2 , що відповідає напрузі U , показано на **рис. 2.5, с**.

З **рис. 2.5** видно, що схема генератора Хартлі функціонує як генератор хаосу: реалізації демонструють неперіодичний процес, атрактор виглядає як характерний портрет дивного атрактора («мушля»), спектр суцільний – не містить виражених дискретних складових.

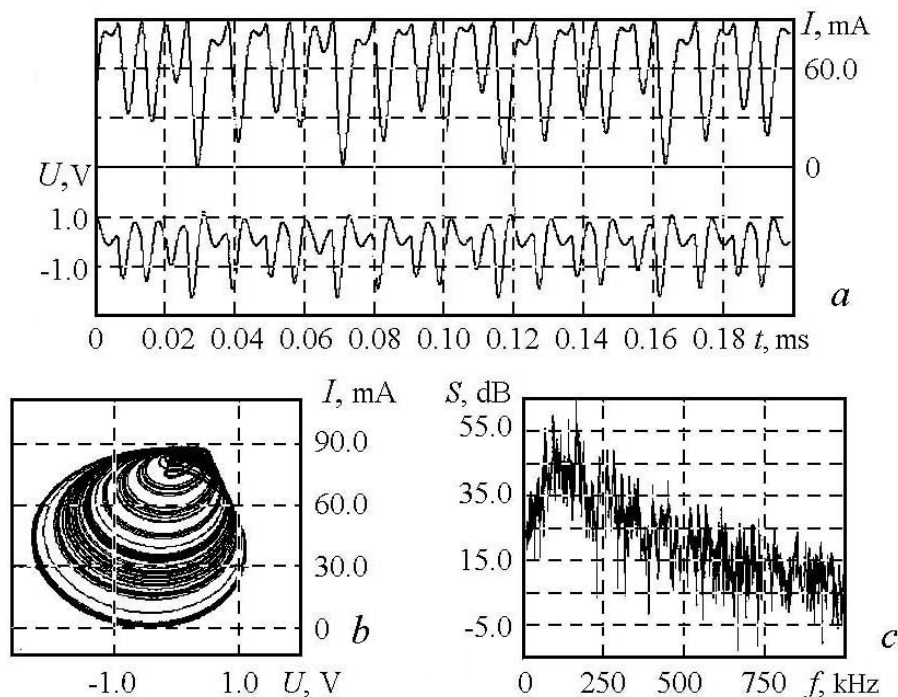


Рисунок 2.5 – Генератора хаосу Хартлі : залежності в часі напруги U на індуктивності L_2 і струму I через неї (а); портрет атрактора (б) та спектр сигналу на індуктивності L_2 (с)

2.2.3. Хаотична система Лоренца

Хаотична система Лоренца – популярний і добре вивчений приклад дивного хаотичного атрактора у системі трьох диференціальних рівнянь першого порядку [5]:

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= \sigma(y - x), \\
 \dot{y} &= rx - y - xz, \\
 \dot{z} &= -bz + xy.
 \end{aligned}
 \tag{2.5}$$

де $\sigma = 10$, $b = 8/3$, $r = 28$ – «класичний» набір параметрів у рівняннях (2.5).

Спочатку модель системи Лоренца розглядалась для задач багатьох систем різної фізичної природи [5].

Схемотехнічну реалізацію системи Лоренца на трьох операційних підсилювачах і двох аналогових помножувачах вперше подав Пауль Хоровіц у відомому двотомнику «Мистецтво схемотехніки» [7]. Спрощений варіант цієї схеми з двома операційними підсилювачами подано на **рис. 2.6** [7]. Вузли, де напруга пропорційна змінним x , y , z , позначені відповідними літерами.

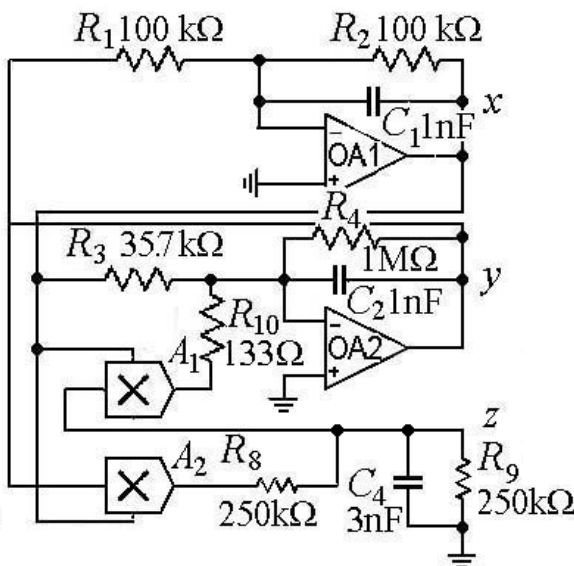


Рисунок 2.6 – Схема генератора хаосу на основі системи Лоренца

Залежності в часі напруг U_x і U_z у вузлах x і z показані на **рис. 2.7, а**. Портрет атратора у проекції на площину двох змінних (U_x і U_z) показано на **рис. 2.7, б**. Спектр сигналу U_x подано на **рис. 2.7, с**.

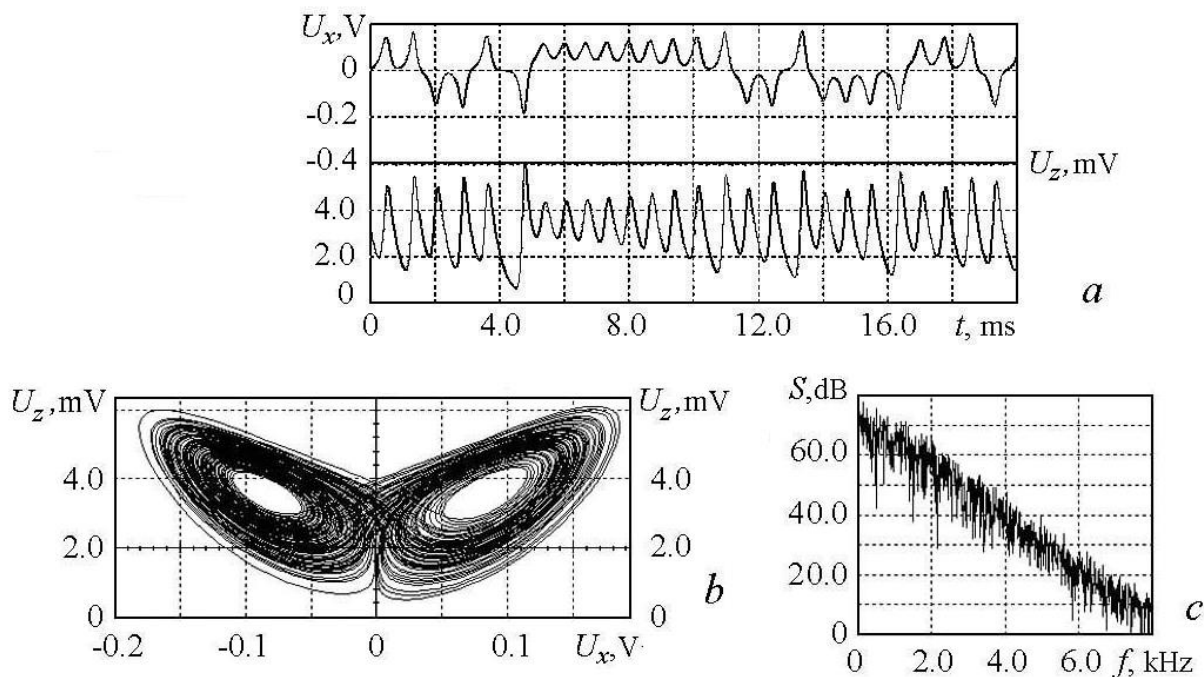


Рисунок 2.7 – Генератора хаосу Лоренца : залежності в часі напруг U_x і U_z у вузлах x і z (а); портрет атрактора у проекції на площину змінних U_x і U_z (b) та спектр сигналу U_x (c)

2.2.4. Генератор Чуа

Однією з перших електронних схем з хаотичною динамікою був генератор Чуа, початковою мотивацією побудови якої був намір реалізувати електронний аналог системи Лоренца. Надалі ця система була піддана всебічному теоретичному та експериментальному дослідженню і на сьогоднішній день є однією з добре досліджених моделей у нелінійній динаміці.

Один із варіантів схеми генератора Чуа подано на **рис. 2.8, а**. Схема містить індуктивність L , резистор R , два конденсатори $C1$ і $C2$ та спеціальний елемент зі кусково-лінійною вольтамперною характеристикою – «діод Чуа», показаний на **рис. 2.8, б**. [7]. «Діод Чуа» в даному випадку є блоком, позначеним на схемі пунктирним прямокутником, і реалізований на операційних підсилювачах ОА1, ОА2.

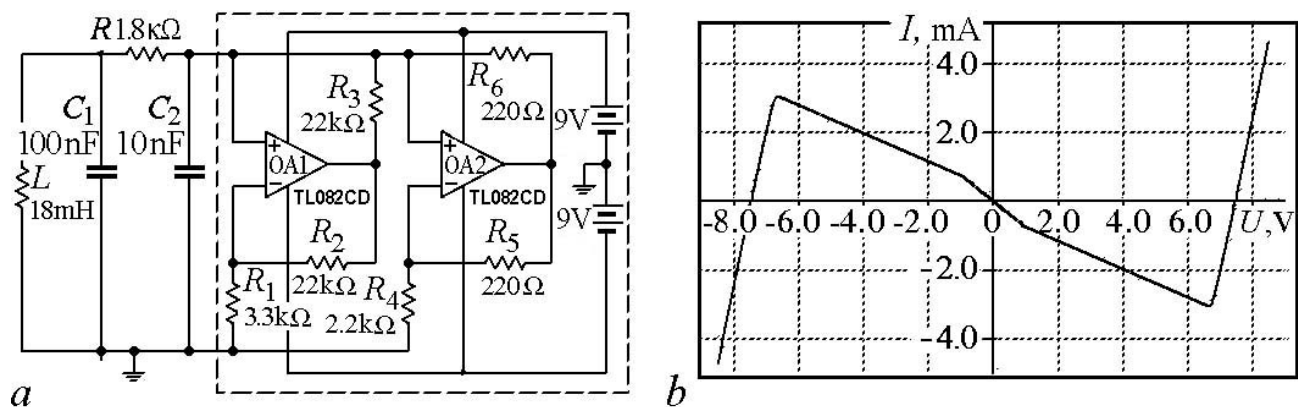


Рисунок 2.8 – Схема Чуа (а), і вольт-амперна характеристика діода Чуа (b)

Записуючи рівняння Кірхгофа і переходячи до безрозмірних змінних, можна отримати для схеми Чуа таку систему рівнянь:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \alpha(y - h(x)), \\ \dot{y} &= x + y - z, \\ \dot{z} &= -\beta y, \end{aligned} \quad (2.6)$$

де змінні x , y , z пропорційні, відповідно, напрузі на нелінійному елементі, напрузі на індуктивності та струму через індуктивність, $\alpha = C_1 C_2^{-1}$ та $\beta = R_2 C_1 L^{-1}$, а функція $h(x)$ визначається характеристикою нелінійного елемента і для конкретного випадку показана на **рис. 2.8, b**.

На **рис. 2.9, а** показані осцилограми напруги на конденсаторах C_1 і C_2 , відповідно V_1 і V_2 . На **рис. 2.9, b** подано портрет атратора в проекції на площину цих двох змінних. На **рис. 2.9, c** наводиться спектр сигналу, що відповідає напрузі V на конденсаторі C_1 . З наведених даних можна бачити, що схема функціонує як генератор хаосу: реалізації демонструють явно неперіодичний процес. Спектр є суцільним та не містить виражених дискретних складових.

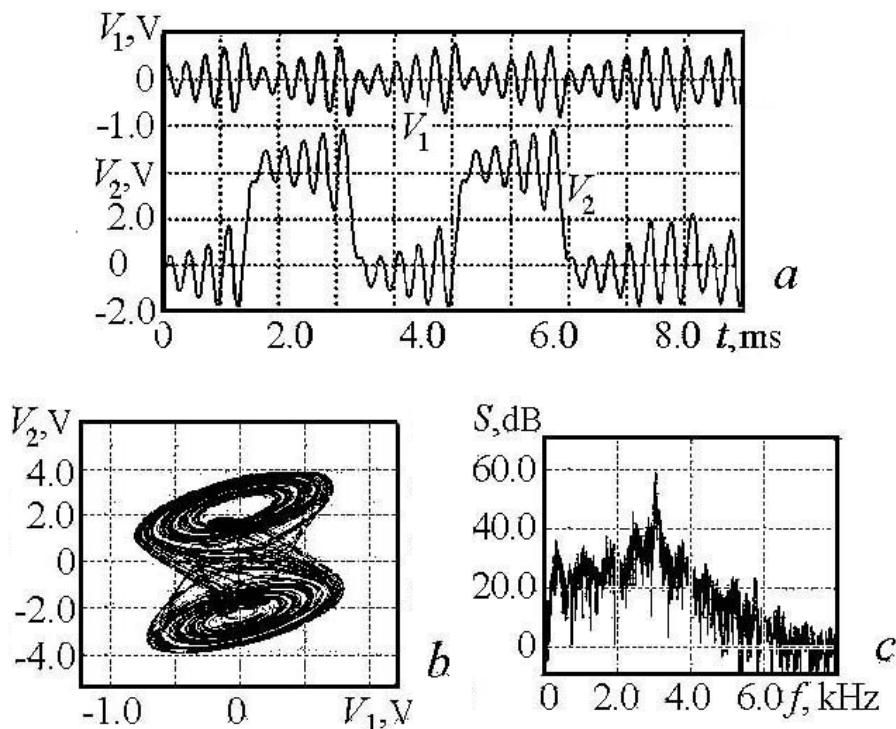


Рисунок 2.9 – Генератора хаосу Чуа : залежності в часі напруг на конденсаторах C_1 і C_2 (a); портрет атратора у проекції на площину цих змінних (b) та спектр сигналу, що відповідає напрузі на конденсаторі C_1 (c)

2.2.5. RC-генератор хаосу

На **рис. 2.10** наведена схема RC-генератора хаотичних автоколивань, в якій використовується два транзистори, немає катушок індуктивності, і живлення здійснюється від єдиного джерела, що є привабливе та недороге рішення для можливих додатків [7].

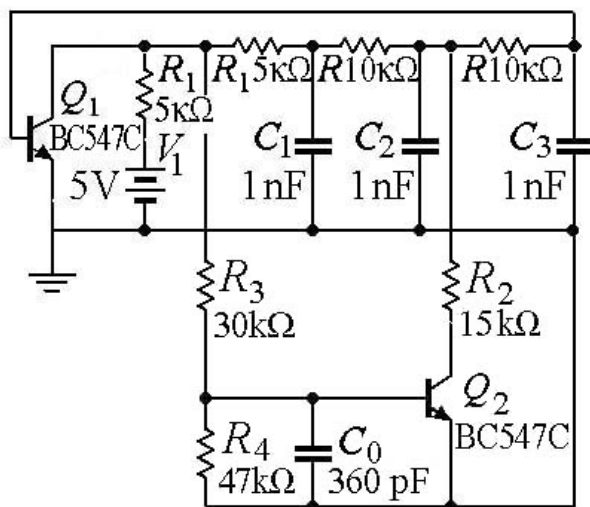


Рисунок 2.10 – Схема RC-генератора хаотичних автоколивань

Опис динаміки хаотичного RC-генератора задано рівняннями [7]:

$$\begin{aligned} RC \frac{dU_1}{dt} &= -U_1 \left(1 + \frac{R}{R_1} - \frac{RR_3}{R_1(2R_3+R_1)} \right) + U_2 + \frac{RR_3}{2R_3+R_1} \left(\frac{E}{R_1} - i_{C1} + \frac{v_{BE2}}{R_3} \right) \\ RC \frac{dU_2}{dt} &= -2U_2 + U_1 + v_{BE1} - i_{C2}R, \\ RC \frac{dv_{BE1}}{dt} &= -v_{BE1} + U_2 - i_{B1}R, \end{aligned} \quad (2.7)$$

де прийнято, що $C = C_1 = C_2 = C_3$.

Розв'язання системи (2.7) призводить до рівняння:

$$(2R_3+R_1)C_0 \frac{dv_{BE2}}{dt} = -v_{BE2} \frac{R_1+2R_3+2R_4}{R_4} + U_1 + E - i_{C1}R_1 - i_{B2}(R_1+2R_3), \quad (2.8)$$

де $U_{1,2}$ – напруги на конденсаторах C_1, C_2 ; струми $i_{B1}, i_{B2}, i_{C1}, i_{C2}$ визначаються моделлю транзистора, як функції напруги база-емітер і колектор-емітер $v_{BE1}, v_{BE2}, v_{CE1}, v_{CE2}$.

На **рис. 2.9, а** подані осцилограми напруг $U_{1,2}$. На **рис. 2.9, б** подано портрет атрактора у проекції напруг $U_{1,2}$. На **рис. 2.9, с** подано спектр сигналу, що відповідає напрузі U_1 .

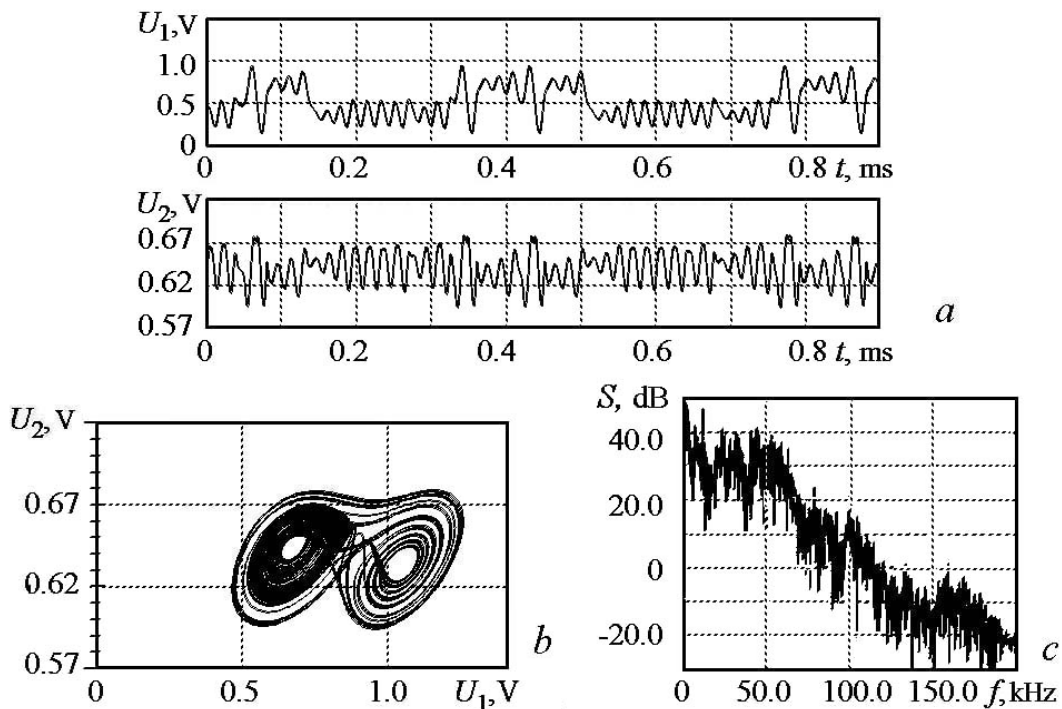


Рисунок 2.9 – Схема RC-генератора хаотичних автоколивань: залежності в часі напруг $U_{1,2}$ (а); портрет атрактора у проекції напруг $U_{1,2}$ (б) та спектр сигналу, що відповідає напрузі U_1

2.3. Загальні підходи до проектування мікрохвильових генераторів

В даний час електричні генератори гармонічних сигналів відіграють важливу роль у визначенні ключових характеристик будь-яких електронних систем, особливо в області радіочастот (RF) і мікрохвиль (microwave, MW) – RF/MW генератори. RF/MW генератори в даний час є одним з найбільш ефективних і потрібних електронних пристроїв в будь-яких RF/MW системах. Крім того, на практиці RF/MW генератори можна розділити на багато різних типів залежно від ширини смуги частот, типу використовуваного резонатора або типу використовуваного активного пристрою .

Як і інші типи генераторів, MW генератори функціонують як перетворювачі постійного струму в змінний.

Типовий RF/MW генератор зазвичай включає дві основні частини [8]:

- активний пристрій і
- пасивний резонансний елемент, що формує робочу частоту.

Зазвичай у схемах RF/MW генераторів використовуються активні пристрої [8]:

- з двома електродами, типу діод Ганна (Gunn diode), і
- з трьома електродами, наприклад, біполярний транзистор (Junction Bipolar Transistor, JBT) або транзистор на ефекті поля (польовий) (Field Effect Transistor, FET) або
- інші пристрої, в яких використовуються нові напівпровідникові властивості і матеріали.

Щоб змусити схему генератора працювати функціонально, основні умови генерації коливань повинні бути виконані. Однією з цих умов є формування сигналу активним пристроєм з необхідним підсиленням для компенсації втрат у контурі зворотного зв'язку на RF/MW частоті. В конфігурації MW генераторів для виконання цієї умови існують дві різні топології: з послідовним та паралельним зворотнім зв'язком (**рис. 2.10**) [8].

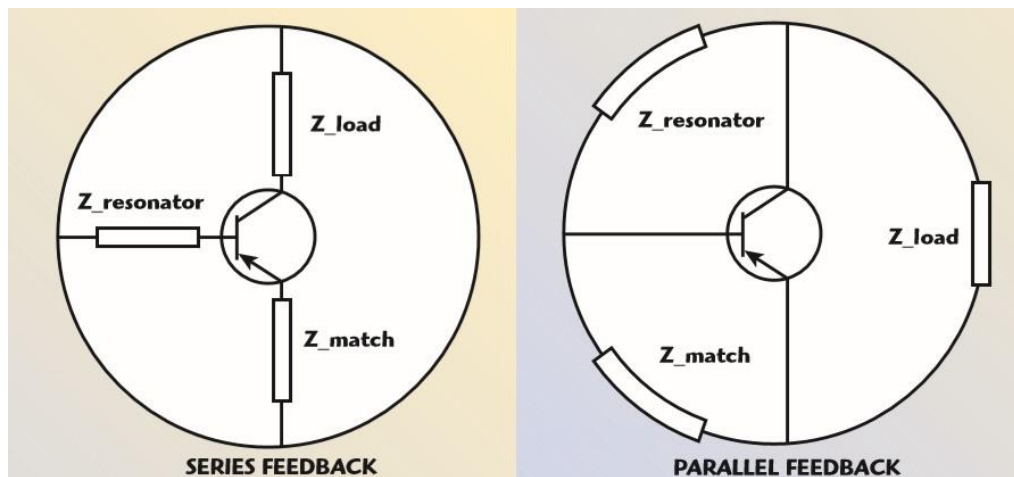


Рисунок 2.10 – Узагальнена конфігурація генератора на транзисторі з послідовним та паралельним зворотнім зв'язком

У паралельній топології елемент, який визначає частоту генерування ($Z_{\text{resonator}}$), використовується як елемент зворотного зв'язку між входом і виходом генератора. Задачею паралельної топології є збільшення необхідної нестабільності всієї системи.

У випадку послідовної топології, осцилятор із негативним опором — це такий осцилятор, де підсилення відбитого сигналу на вихідному терміналі використовується для виконання умов генерування при підключенні до резонатора за належних фазових умов.

Підхід паралельного зворотного зв'язку на практиці більше підходить для вузькосмугових регульованих генераторів з низьким рівнем шуму, а підхід послідовного зворотного зв'язку з негативним опором використовується для широкосмугових регульованих генераторів.

2.4. Показники стабільності RF/MW схем

При проектуванні пристроїв RF/MW діапазону, стабільність є одним із найважливіших факторів, який необхідно враховувати. Як правило, стабільність визначає, яке навантаження та імпеданс джерела слід підключити до двопортового пристрою для стабільного підсилення сигналу чи потенційно нестабільного генератора.

В ідеалі всі активні пристрої є неззаємними. Це означає, що сигнали перетворюються лише в одному, прямому напрямку (від входу до виходу), але не в зворотному напрямку, тому теоретично $S_{12} \rightarrow 0$. Однак на практиці параметр S_{12} двопортового транзистора зазвичай передає невелику кількість вихідної потужності назад на вхідний порт, і вона об'єднується з вхідною потужністю, змінюючи коефіцієнт відбиття S_{11} на вхідному порту. Після такого об'єднання, величина коефіцієнта відбиття S_{11} може перевищувати одиницю. Таким чином, транзистор може перейти в режим надмірного підсилення і це може спричинити його автогенерацію. Іншими словами, зміна імпедансу навантаження транзистора у складі двопортової схеми може спричинити зміну вхідного імпедансу і навпаки.

На **рис. 2.12** наведена блок-схема двопортового пристрою на основі транзистора.

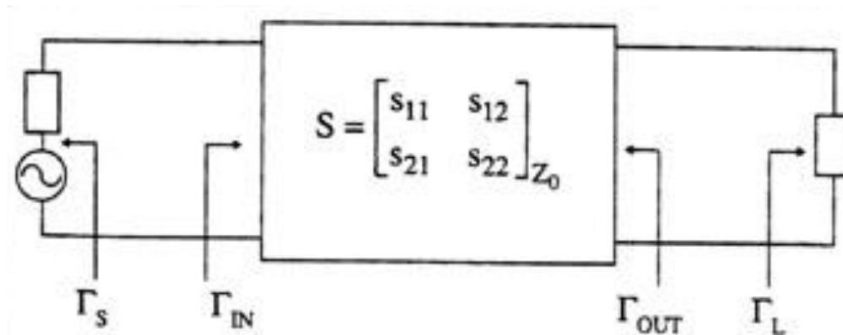


Рисунок 2.11 – Двопортовий пристрій/багатополосник

В своєму застосуванні транзистор може бути стабільним або нестабільним у певному діапазоні частот. Тому важливо заздалегідь проаналізувати стабільність транзисторів або активних пристроїв у складі RF/MW багатопортових пристроїв. Іншими словами, шляхом перевірки стабільності транзистора на основі його S-параметрів або специфікацій, транзистор може працювати як стабільний підсилювач або як нестабільний генератор у вибраному діапазоні частот.

Є два параметри, з допомогою яких двопортовий RF/MW пристрій на активному елементі можна аналізувати з точки зору стабільності.

Перший параметр – це **безумовна стабільність** (unconditional stability) [8], що описує ситуацію, коли транзистор знаходиться в стабільному режимі, тобто його збудження є стабільним та не виникає режиму самозбудження (автоколивань) для будь-яких навантажень та джерел сигналів. Ця умова виникає

тоді, коли дійсна частина вхідного та вихідного імпедансів завжди буде більша за нуль і менша за одиницю ($0 < |\varphi_S| < 1$ і $0 < |\varphi_L| < 1$) [8].

Друге параметр – це умовна стабільність (conditional stability), що описує ситуацію, коли транзистор знаходиться в стабільному режимі для деяких, але не для всіх навантажень та джерел сигналів. Це означає, що двопортовий пристрій може бути стабільним, коли до нього підключена вихідна схема узгодження, але двопортовий пристрій також може перебувати в режимі самозбудження (автоколивання) при підключенні до неузгодженої вихідної схеми. Тому термін умовна стабільність (conditional stability) відомий також як потенційна нестабільність (potential instability).

Для аналізу стабільності двопортового RF/MW пристрою вводиться два коефіцієнти [8].

1. Коефіцієнт стабільності K визначається наступним чином [8]:

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta|^2}{2|S_{12} \times S_{21}|} \quad (2.9)$$

де $\Delta = S_{11} \times S_{22} - S_{12} \times S_{21}$. Коефіцієнт стабільності K вводиться на основі S -параметрів за припущення, що у складі лінійного двопортового пристрою є транзистор.

Безумовна стабільність (unconditional stability) у транзисторній схемі виникає лише тоді, коли $K \geq 1$. Коли $K \geq 1$, тоді існує унікальне поєднання параметрів джерела та імпедансу, φ_{mS} та φ_{mL} , що дозволяє стверджувати про комплексно-спряжене узгодження на вході та виході пристрою. При цьому, коли $K > 1$, величини комплексно-спряжених S_{11}^* і S_{22}^* лежать всередині зовнішнього кола діаграми Сміта. Коли $K = 1$, дійсна частина цих комплексно-спряжених параметрів лежить точно на зовнішньому колі діаграми Сміта.

Умовна стабільність або потенційна нестабільність у транзисторі може виникнути, коли $K < 1$. Якщо $K < 1$, φ_{mS} і φ_{mL} стають від'ємними імпедансами, а їх реальна частина лежить за межами кола діаграми Сміта, тобто двопортовий пристрій більше не знаходиться в області безумовної стабільності (unconditional stability).

2. Коефіцієнт стабільності (stability factor) $B1$, який визначається як [8]:

$$B1 = 1 + |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 - |S_{11} \times S_{22} - S_{21} \times S_{12}|^2 \quad (2.10)$$

Щоб забезпечити положення параметрів двопортового пристрою в області безумовної стабільності, $B1$ має бути більшим нуля.

Загалом, при RF/MW проектуванні є два кола стабільності. Вхідне коло стабільності — це гранична лінія у вхідній площині, яка показує значення імпедансу джерела, яке робить величину вихідного коефіцієнта відбиття рівним 1. Вихідне коло стабільності аналогічно визначає контур у вихідній площині, і вказує на ті значення опору навантаження, які роблять величину вхідного коефіцієнта відбиття рівним 1. Для обох кіл стабільності дійсна частина коефіцієнта відбиття дорівнює або менша 1, і такий двопортовий пристрій лежить абсолютно в стабільній області; якщо ж дійсна частина більша 1, двопортовий пристрій є потенційно нестабільним.

Коефіцієнти $B1$ і K доступні для розрахунку та аналізу в Microwave Office (MWO). При використанні MWO коло стабільності складається з двох областей на кожній окремій частоті. Перша область є областю нестабільності і подається пунктирною лінією, а друга область є областю стабільності і подається суцільною лінією. Якщо «пунктирне коло» знаходиться всередині «суцільного кола», зовнішня сторона кола вказує на стабільну область, а якщо «пунктирне коло» знаходиться зовні «суцільного кола», внутрішня частина кола вказує на стабільну область. Крім того, зазвичай стабільність двопортового пристрою розраховується на основі S-параметрів, за умови вимірювань в 50-омній системі, тобто опір джерела та навантаження становить 50 Ом, тоді вихідний і вхідний коефіцієнти відбиття будуть S_{22} і S_{11} відповідно. Тому область кола стабільності, що включає 50 Ом, є також стабільною областю.

Підводячи підсумок, можна сказати, що існує дві умови для генерації коливаний: коефіцієнт стабільності $K < 1$ та **вхідний і вихідний коефіцієнти відбиття** (input and output reflection coefficients) становлять більше одиниці ($|Γ_{in}| > 1$ і $|Γ_{out}| > 1$) [8].

2.5. Вимоги при конструюванні RF/MW генератора

Отримавши базове розуміння фізичних процесів в RF/MW генераторах, а також їх основних топологій, далі увага буде зосереджена на методах та

практичних підходах до розробки мікрохвильового генератора. Зараз є досить багато типів RF/MW генераторів. Розглянемо лише конструктивні особливості RF/MW генераторів на біполярних транзисторах.

Перед початком розробки MW генератора необхідно застосувати простий аналітичний метод для транзисторного генератора. За допомогою цього аналітичного методу оптимальні значення ланцюга зворотного зв'язку та навантаження можна знайти за допомогою явних виразів через z-параметри біполярного транзистора. Залежно від застосування RF/MW генераторів, технічні вимоги до їх конструкції можуть відрізнятися в кожному конкретному застосуванні.

При проектуванні MW генератора важливо визначити його конфігурацію. Існують такі обов'язкові кроки для визначення конфігурації генератора [8]:

1. Вибір відповідного типу транзистора,
2. Аналіз і визначення всіх параметрів у еквівалентних схемах транзистора в режимі малого та великого сигналу,
3. Дослідження (вимірювання) всіх електричних характеристик генератора.

По-перше, робоча частота та управління шумовими характеристиками є двома важливими факторами, які використовуються для вибору відповідного типу транзистора в схемі генератора. Як правило, біполярні транзистори (BJT) чудово працюють в генераторах як з фіксованими, так і регульованими частотами аж до 20 ГГц та з низькими шумовими характеристиками. З іншого боку, біполярні транзистори можуть генерувати стабільні коливання на частотах понад 100 ГГц. Крім того, BJT-транзистори забезпечують на 10 дБ кращий фазовий шум поблизу носійної частоти в порівнянні з польовими транзисторами.]

По-друге, для оцінки основних параметрів транзисторних еквівалентних схем можна проводити вимірювання безпосередньо або використовувати експериментальні дані з прийнятною точністю на частоті проектування. Крім того, якщо вибраний транзистор у схемі MW генератора подано як двопортова пристрій, можна розрахувати всі елементи в еквівалентних схемах за допомогою Microwave Office (MWO).

Нарешті, бажано мати короткий аналітичний метод розрахунку оптимальних значень елементів зворотного зв'язку, опору навантаження, а також максимальної вихідної потужності з точки зору еквівалентних елементів

транзистора та їх вольт-амперних характеристик. Для визначення оптимальної комбінації елементів схеми зворотного зв'язку, яка відіграє ключову роль у формуванні коливань із найбільшою амплітудою, враховується максимальний малий негативний опір сигналу. Параметри схеми транзистора в режимі малого сигналу використовуються для знаходження оптимального значення навантаження всієї схеми генератора. Крім того, нелінійність еквівалентної схеми транзистора в режимі великого сигналу дає змогу визначати максимальну вихідну потужність генератора.

Підсумовуючи сказане, якщо перед проектуванням MW генератора розглянути простий аналітичний підхід, можна спростити саму процедуру проектування і відповідно прискорити весь процес проектування.

Процес проектування двопортового MW генератора включає такі кроки:

1. Вибрати транзистор та ретельно перевірити його відповідні специфікації.
2. Розрахувати або обчислити коефіцієнт стабільності транзистора, щоб перевірити, чи може транзистор бути потенційно нестабільним ($K < 1$). Якщо пристрій не є потенційно нестабільним, змінити його схему включення з спільного емітера (common emitter, CE) на спільну базу (common base, CB), а між базою та землею слід додати зосереджені елементи типу індуктивність, щоб зробити пристрій більш потенційно нестабільним. Крім того, для збільшення величини вхідного та вихідного коефіцієнтів відбиття також можна використати послідовний зворотний зв'язок або шунт. Це означає, що нестабільність пристрою також має збільшитись.

3. Схема узгодження на виході розроблена шляхом вибору відповідного значення для Γ_L . Величина Γ_L має лежати далеко в області нестабільності вихідного кола стабільності, щоб величина вхідного коефіцієнта відбиття була більшою за 1 ($|\Gamma_{in}| > 1$). Крім того, значення Γ_L слід вибирати таким чином, щоб створити найбільший можливий опір на вході транзистора $R_{in} < 0$. Зазвичай оптимальне значення для R_{in} становить близько 100 Ом.

4. Спроекувати вихідну схему для визначення Z_{in} і X_{in} . Значення Z_{in} і X_{in} повинні відповідати наведеним нижче рівнянням [8]:

$$\begin{aligned} X_{in} &= -X_S \\ R_{in} &= -3 \times R_S \end{aligned} \tag{2.11}$$

Значення R_{in} слід вибирати так, щоб коливання не припинялися, доки вони не досягнуть усталеного стану.

5. Створити схеми настроюваного узгодження для джерела і узгодження для навантаження шляхом додавання відповідних зосереджених або розподілених елементів.

2.6. Вибір схеми-прототипу генератора хаосу

Слід зазначити, що математичні моделі транзисторних генераторів хаосу стали з'являтися вже після розробки реальних пристроїв і початком їх практичного використання [4]. Серед цих моделей вдалою з теоретичної точки зору виявилася модель генератора з ступенем свободи 1.5, яка була побудована на основі триточкової схеми Колпітца[7]. Відзначимо, однак, що схеми Колпітца вивчалася відповідно до існуючих традицій як система, що описується системою звичайних диференціальних рівнянь третього порядку і тому принципово була низькочастотною моделлю транзисторного генератора [7].

Активні пристрої можна легко інтегрувати з друкованою антеною на спільній підкладці. У літературі повідомлялося про кілька різних схем RF/MW генераторів, інтегрованих із друкованою антеною, де використовувалися активні нелінійні пристрої, такі як діод Ганна чи діод ІМРАТТ [1].

Хаскінс та ін. [1] розробили активну антену, використовуючи діод Шоттки як пристрій налаштування, і показали, що частоту коливань можна змінювати за допомогою напруги зміщення, прикладеної до пристрою налаштування.

Основні етапи переходу від спрощеної математичної моделі до моделі джерела хаосу у радіо- та НВЧ діапазонах були розглянуті в [4]. Сенс процедури полягає в переході від спрощеної математичної моделі для використання спеціальних пакетів моделювання, в яких використовуються досить складні моделі активних елементів (для споживачів це моделі типу чорного ящика). Моделі активних елементів поставляються або в самих пакетах, або виробниками відповідних компонентів. Крім того, в пакетах моделювання використовуються

моделі як активних, так і пасивних компонентів, що враховують появу артефактів на високих і надвисоких частотах.

Зазначений підхід застосовується на прикладі розробки СВЧ генератора хаосу на основі триточкового осцилятора.

За основу взята схема MW генератора Колпітса на основі триточкової схеми з використанням транзистора в якості активного елемента, яка наведена на **рис. 2.12** [1].

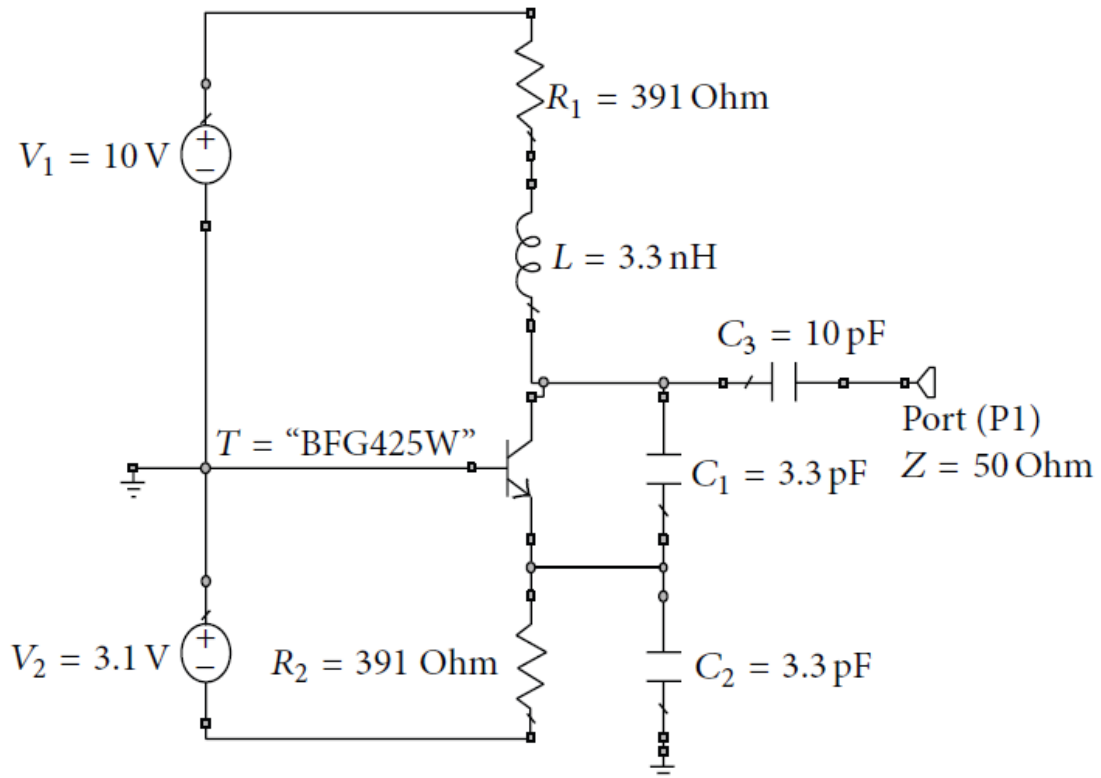


Рисунок 2.12 – Схема мікрохвильового генератора Колпітса зі спільною базою

Активним елементом, який використовується у осциляторі є біполярний транзистор NPN BFG425W, включений по схемі зі спільною базою. Резонансний контур має три елементи накопичення енергії: котушку індуктивності L і два конденсатори C_1 і C_2 . Тут C_3 – роздільний конденсатор (зв'язку) [1].

2.7. Висновки до розділу 2

Для досягнення багаточастотного режиму роботи використовується концепція детермінованого хаосу на основі хаотичного осцилятора Колпітса. Осцилятор Колпітса демонструє явище біфуркації (невизначеність) за певних значень параметрів електричної схеми і, таким чином, може працювати в періодичному, багатоперіодичному та хаотичному режимах.

3. ПРОЕКТУВАННЯ БАГАТОЧАСТОТНОЇ АКТИВНОЇ МОНОПОЛЬНОЇ ДРУКОВАНОЇ АНТЕНИ ОСЦИЛЯТОРНОГО ТИПУ НА ОСНОВІ ХАОТИЧНОЇ СХЕМИ КОЛПІТЦА

3.1. Проектування мікрохвильового осцилятора Колпітса

Класичний осцилятор Колпітса (рис. 2.10) зазвичай використовується для генерації синусоїдальних сигналів. Однак за допомогою зміни певного набору параметрів схеми, на конденсаторах можна отримати хаотичну форму коливань.

Активним елементом, який використовується у осциляторі є біполярний транзистор NPN BFG425W, включений по схемі зі спільною базою. Резонансний контур має три елементи накопичення енергії: котушку індуктивності L і два конденсатори C_1 і C_2 . Тут C_3 – роздільний конденсатор (зв'язку) [1].

Основна частота коливань осцилятора визначається згідно [1]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2 L}} \quad (3.1)$$

З урахуванням значень параметрів елементів схеми: $C_1 = 3,3$ пФ, $C_2 = 3,3$ пФ, $R = 391$ Ω , $C_3 = 10$ пФ, $L = 3,3$ нГн можна визначити основну частоту коливань розроблюваного генератора, яка становить 2,2 ГГц.

Хаотичний осцилятор Колпітса демонструє різну динаміку поведінки при різних значеннях напруги зміщення емітера V_2 . У схемі всі параметри залишаються постійними, крім напруги живлення V_2 , що дає змогу мати різну динаміку поведінки [1]:

- в періодичному режимі,
- в режимі подвоєння періоду та
- в хаотичному режимі роботи.

Мікрохвильовий генератор Колпітса працює на частоті 2,2 ГГц. Тут параметром, що призводить до біфуркації, є джерело напруги зміщення емітера V_2 хаотичного осцилятора Колпітса. Результати моделювання для залежностей в часі для V_{C_1} і V_{C_2} мікрохвильового хаотичного осцилятора Колпітса показані на рис.3.1.

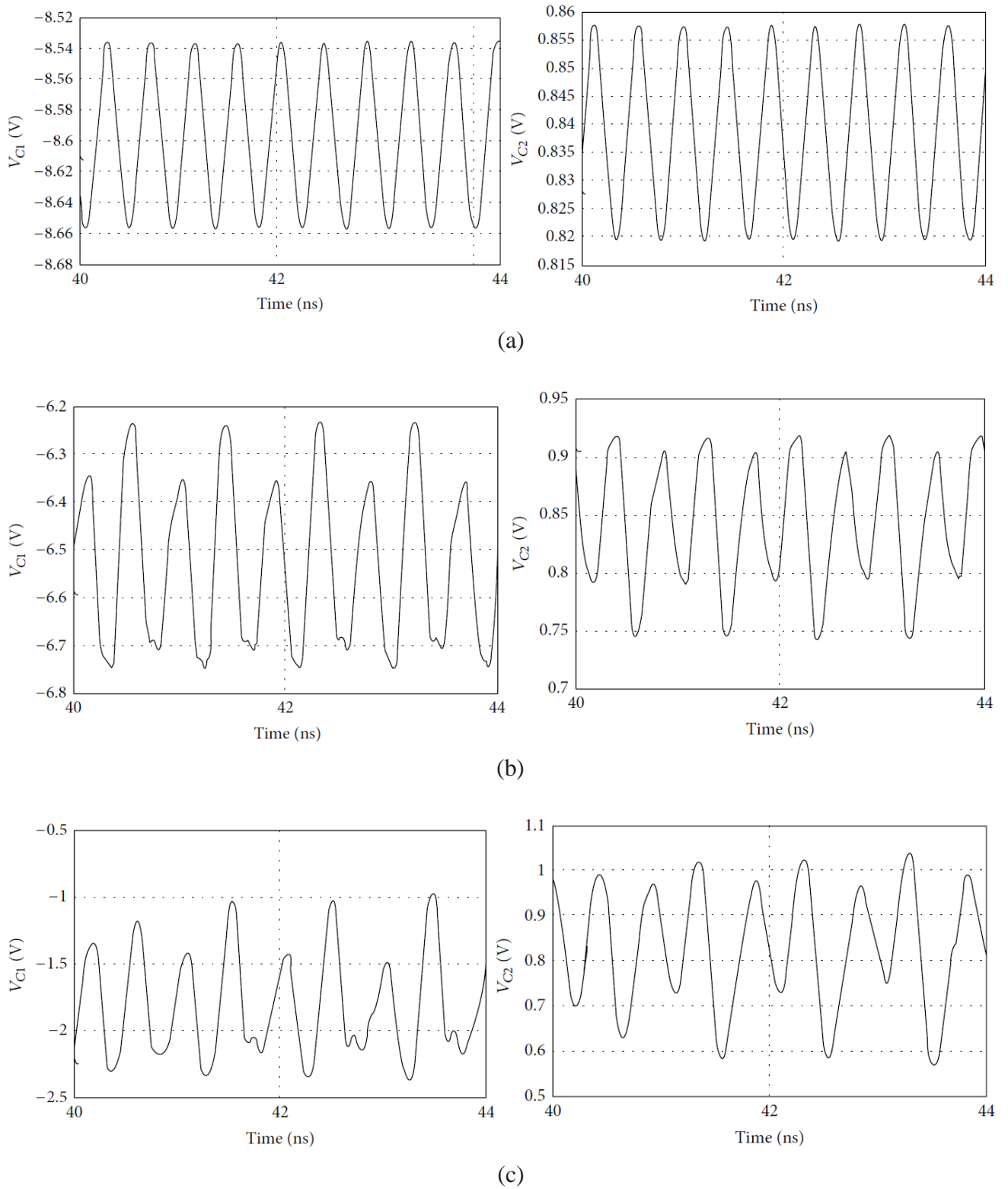


Рисунок 3.1 – Графіки часових залежностей V_{C1} і V_{C2} при зсуві напруги емітера V_2 хаотичного генератора Колпітса: (а) періодичний режим для $V_2 = 3,1$ В, (б) режим подвоєння періоду для $V_2 = 5,2$ В, (с) хаотичний режим для $V_2 = 7$ В.

Хаотичний осцилятор Колпітса демонструє різну динаміку поведінки при різних значеннях напруги зміщення емітера V_2 . У схемі всі параметри залишаються постійними, крім напруги живлення V_2 , що дає змогу мати різну динаміку поведінки в періодичному режимі, режимі подвоєння періоду та хаотичному режимах роботи (**рис. 3.1**).

Фазові портрети, отримані під час моделювання подано на **рис. 3.2** для залежностей VC_2 від VC_1 і VC_4 від VC_3 . Тут VC_1 , VC_2 , VC_3 і VC_4 — напруги на конденсаторах C_1 , C_2 , C_3 і C_4 . Конденсатори C_1 і C_2 є компонентами, що визначають частоту генератора Колпітса; C_3 є конденсатором зв'язку, а конденсатор C_4 є одним із зосереджених еквівалентних елементів MSA.

На **рис. 3.2 (а)** показано періодичний режим роботи при $V_2 = 3,1$ В, оскільки можна бачити одну петлю/контур. На **рис. 3.2 (б)** показано переривчастий режим (intermittent state) роботи при $V_2 = 5,2$ В; тут можна побачити дві петлі, що знаходяться в межах смуги частот MSA. На **рис. 3.2 (с)** показано хаотичний режим роботи в діапазоні V_2 від 7 до 10 В, де спостерігається велика кількість частотних компонентів, що потрапляють в смугу частот MSA.

Результати дослідження аналізатора спектру наведені на **рис. 3.3**. На **рис. 3.3(а)** показаний періодичний режим роботи для $V_2 = 3,1$ В, оскільки можна бачити лише один частотний компонент на частоті 2,161 ГГц. На **рис. 3.3(б)** показаний режим роботи з подвоєнням періоду при $V_2 = 5,2$ В, оскільки можна бачити дві частотні складові на частотах 1,08 ГГц і 2,161 ГГц. На **рис. 3.3(с)** показаний режим роботи з чотирма періодами для $V_2 = 8,9$ В, оскільки можна бачити чотири частотні компоненти на 1,067 ГГц, 2,1272 ГГц, 3,1915 ГГц і 4,2639 ГГц. На **рис. 3.3(д)** показаний хаотичний режим роботи для $V_2 = 10$ В.

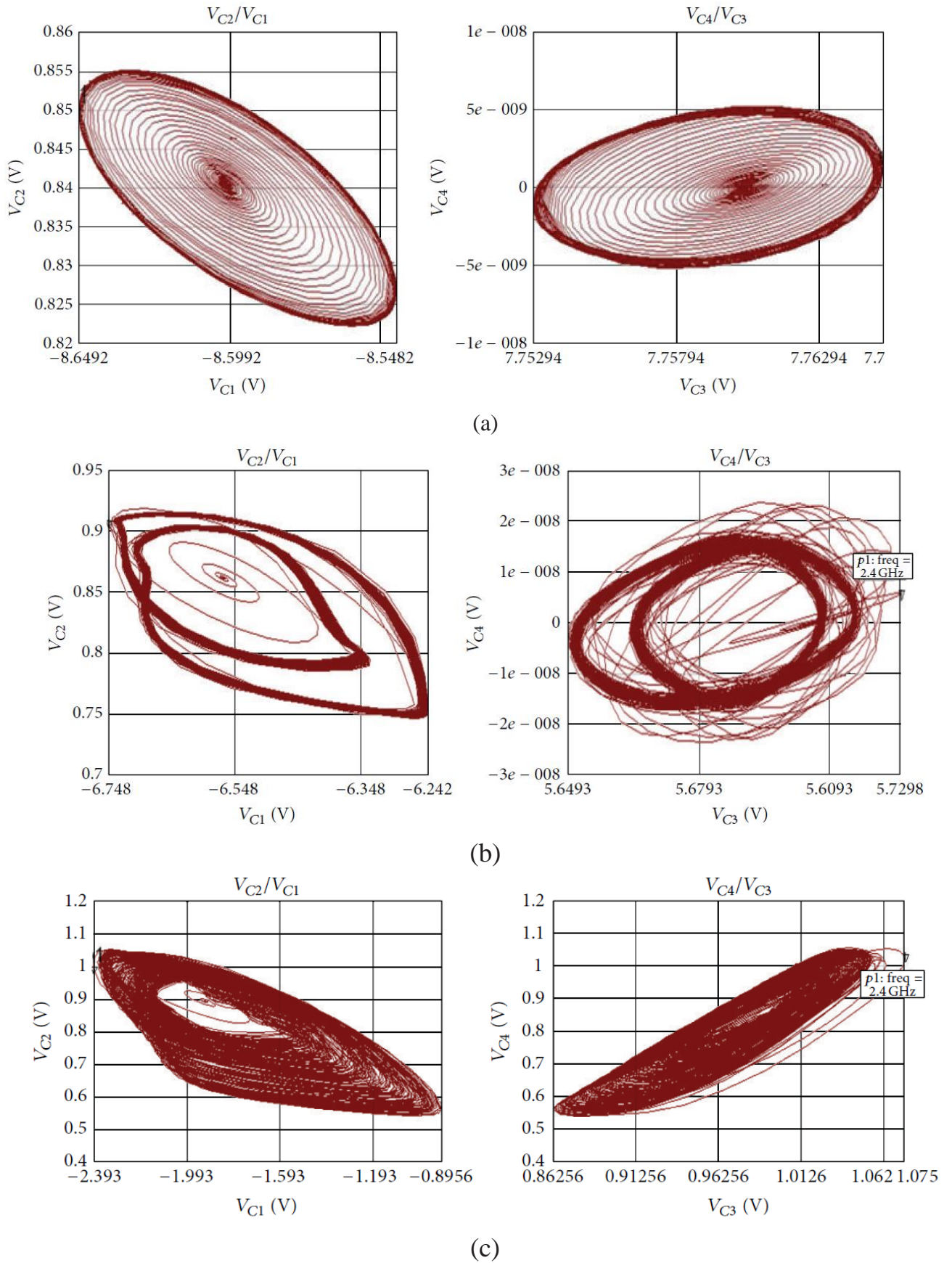


Рисунок 3.2 – Фазовий портрет V_{C2} від V_{C1} та V_{C4} від V_{C3} при зміні напруги зміщення емітера V_2 хаотичного генератора Колпітса (а) періодичний режим для $V_2 = 3,1$ В, (б) переривчастий стан для $V_2 = 5,2$ В та (в) хаотичний режим для $V_2 = 7$ В.

мікросмушковим або копланарним хвилеводом (coplanar waveguide, CPW). Перевага надається МРА і є перспективним рішенням, оскільки МРА – це малогабаритні, низько профільні та прості у виготовленні конструкції для виконання цих вимог [2]. Водночас МРА має певні недоліки, такі як, вузька смуга пропускання та низький коефіцієнт підсилення (КП). Ці показники можна покращити за допомогою різних методів.

Випромінюючі властивості патча характеризуються відносною діелектричною проникністю та товщиною підкладки. Антена розташована на підкладці з матеріалу FR4 товщиною $h = 1,6$ мм, діелектричною проникністю $\epsilon_r = 4,6$ і тангенсом втрат $\delta = 0,019$. Геометрія друкованої прямокутної монопольної антени наведена **рис. 3.4** [1].

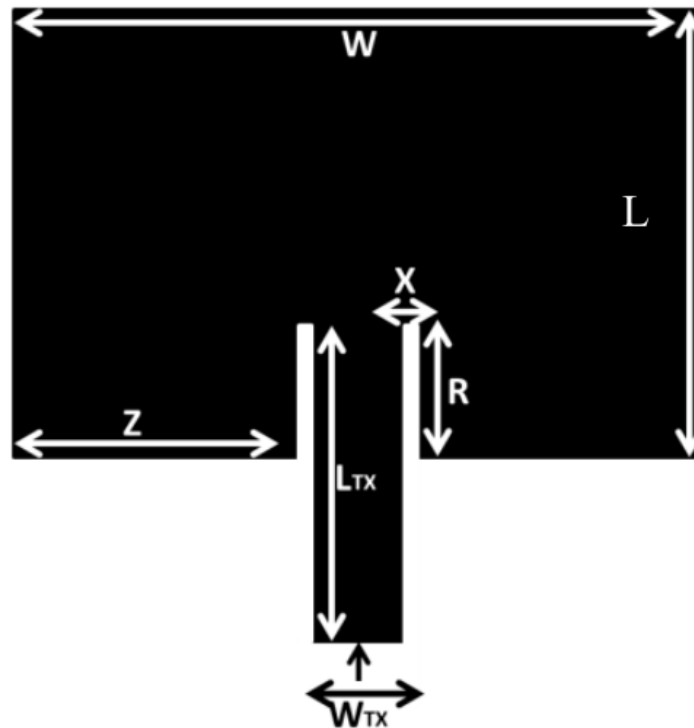


Рисунок 3.4 – Геометрія розробленої МРА.

Антена живиться за допомогою лінії живлення (transmission line, TL) розміром $3 \text{ мм} \times 17 \text{ мм}$ на основі технології врізного живлення (inset feed technique). Ця технологія є реалізацією планарної семи живлення, легко реалізується практично та забезпечує керування імпедансом.

Спочатку обчислюється довжина вставної лінії живлення (inset-feed length) [1]:

$$Z_{in}(R) = \cos\left(\frac{\pi R}{L}\right)^2 Z_{in}(0), \quad (3.2)$$

де $Z_{in}(R)$ – вхідний опір, що становить 50Ω , R – відстань вставленого живлення (inset-feed distance), як показано на рис. 2, L – довжина патч-антени, $Z_{in}(0)$ – вхідний імпеданс на краях патчу, який становить $244\ \Omega$ [1]. Довжина вставної лінії живлення становить 10,4 мм.

Відстань врізного живлення потім було оптимізовано за допомогою [1]:

$$R = 0.82 \times \frac{L}{2} \quad (3.3)$$

Відстань вставленого живлення має значення $R = 12$ мм.

Основні розміри запропонованої патч-антени наведені в **табл. 3.1**.

Таблиця 3.1 – Параметри конструкції антени на основі підкладки FR4 (в мм)

Freq.	W	L	W_{TX}	L_{TX}	X	R	Z
2.4GHz	37	29	3	25.1	0.1	12	16.9

МРА складається з випромінюючого патчу та поверхні заземлення. Загальний розмір патч-антени становить $54\text{ мм} \times 57\text{ мм}$. (**рис. 3.5**) [1].

Ефект окантовочного поля (fringing-field effect) між поверхнею заземлення та випромінюючим патчем змушує патч-антену випромінювати на одній резонансній частоті. Щоб випромінюючий патч резонував на кількох частотах, у конструкції МРА можуть бути введені щілини та прорізи, які змінюють шлях струмів на патчі.

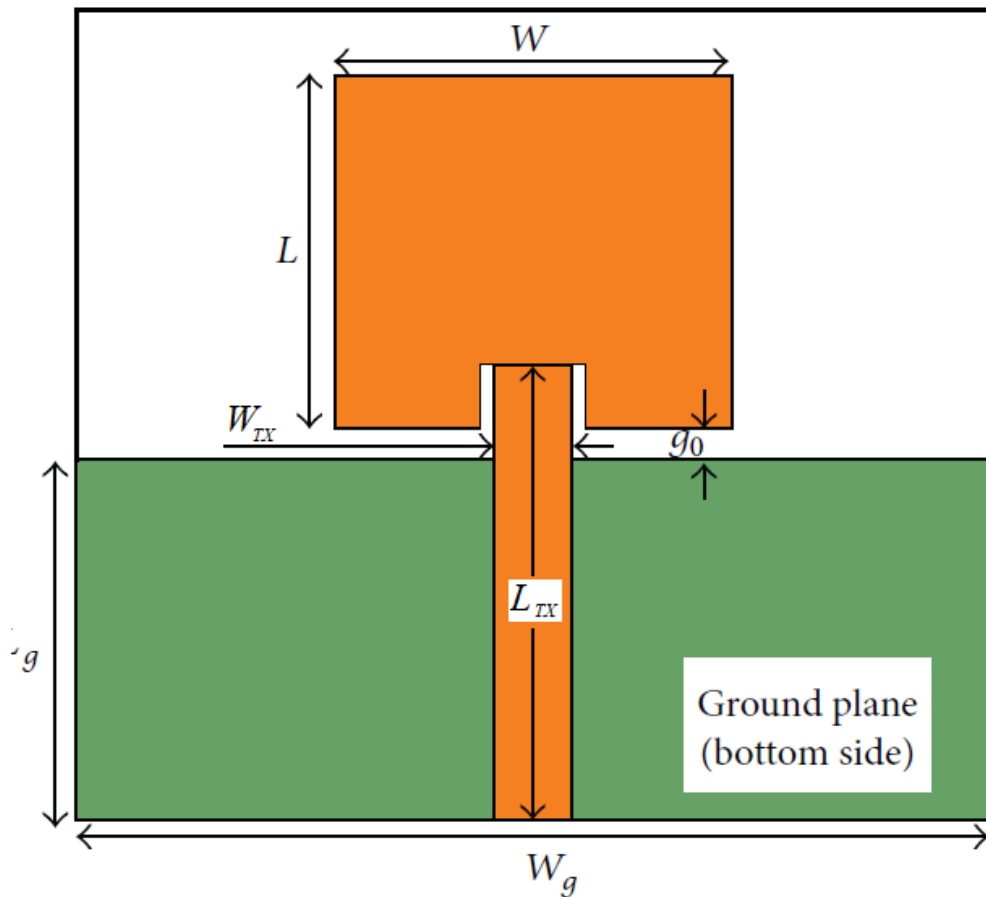


Рисунок 3.5 – Типова МРА складається з випромінюючого патчу та поверхні заземлення

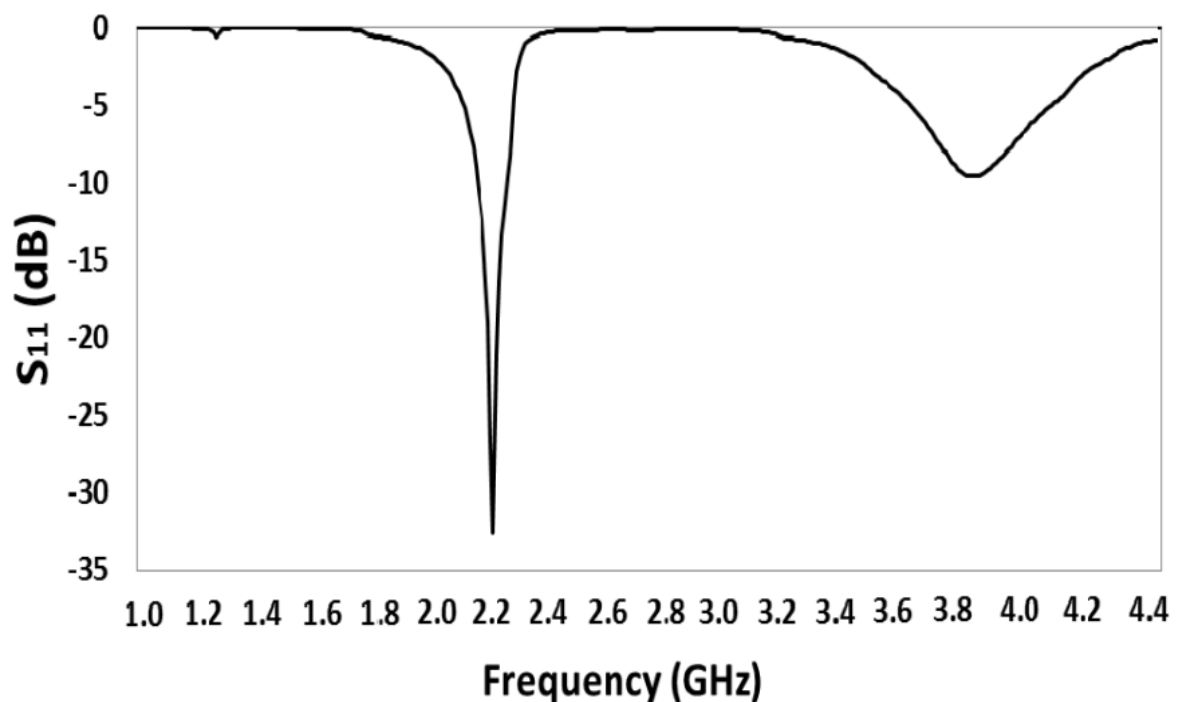
Моделювання та оптимізація патч-антени було здійснено за допомогою САД стимулятора MWO. При першій реалізації в MWO довжина та ширина прямокутного патча такі ж, як і розраховані. Для підкладки з FR4 довжина та ширина патча розраховуються для TL 50Ω і становлять 16,8 мм та 3 мм відповідно. При оптимізації розмірів TL в MWO довжина мікросмужкової лінії живлення стає 17 мм, а ширина залишається незмінною. TL вставляється в патч на глибину 12 мм. Відстань визначається за допомогою (3.2 – 3.3).

Таким чином, параметри (розміри) патчу/накладки антени для потрібної смуги частот отримано вибираються наступним чином: довжина патчу $L = 11,33$ мм, ширина патчу $W = 15,21$ мм, довжина лінії живлення $l = 12,5$ мм, ширина лінії живлення $d = 3$ мм, довжина площини заземлення $L_g = 11,5$ мм, ширина заземленої площини заземлення $W_g = 35,21$ мм, відстань між патчем та площиною заземлення $g_0 = 1$ мм. Решта параметрів антени наведені в **табл. 3.2**.

Таблиця 3.2 – Результати моделювання запропонованої антени

Parameters	Results
Bandwidth (MHz)	25
Gain (dBi)	5.6
Directivity (dBi)	6.4
Efficiency (%)	82.2
Radiation Pattern	Omni-directional

Зворотні втрати (Return Loss) / втрати на відбиття або коефіцієнт відбиття (reflection coefficient) S_{11} модельованої патч антени здійснено за допомогою САД стимулятора MWO і показано на **рис. 3.6**.

Рисунок 3.6 – Зворотні втрати (Return Loss) S_{11} [dB] патч антени

На графіку **рис. 3.6** видно, що S_{11} змодельованої антени резонує на частоті 2,2 ГГц і демонструє прийнятну смугу пропускання 25 МГц.

Діаграма направленості (ДН) патч антени побудовані в площині E та H для частот 1,08 ГГц та 2,2 ГГц і показані на **рис. 3.7**.

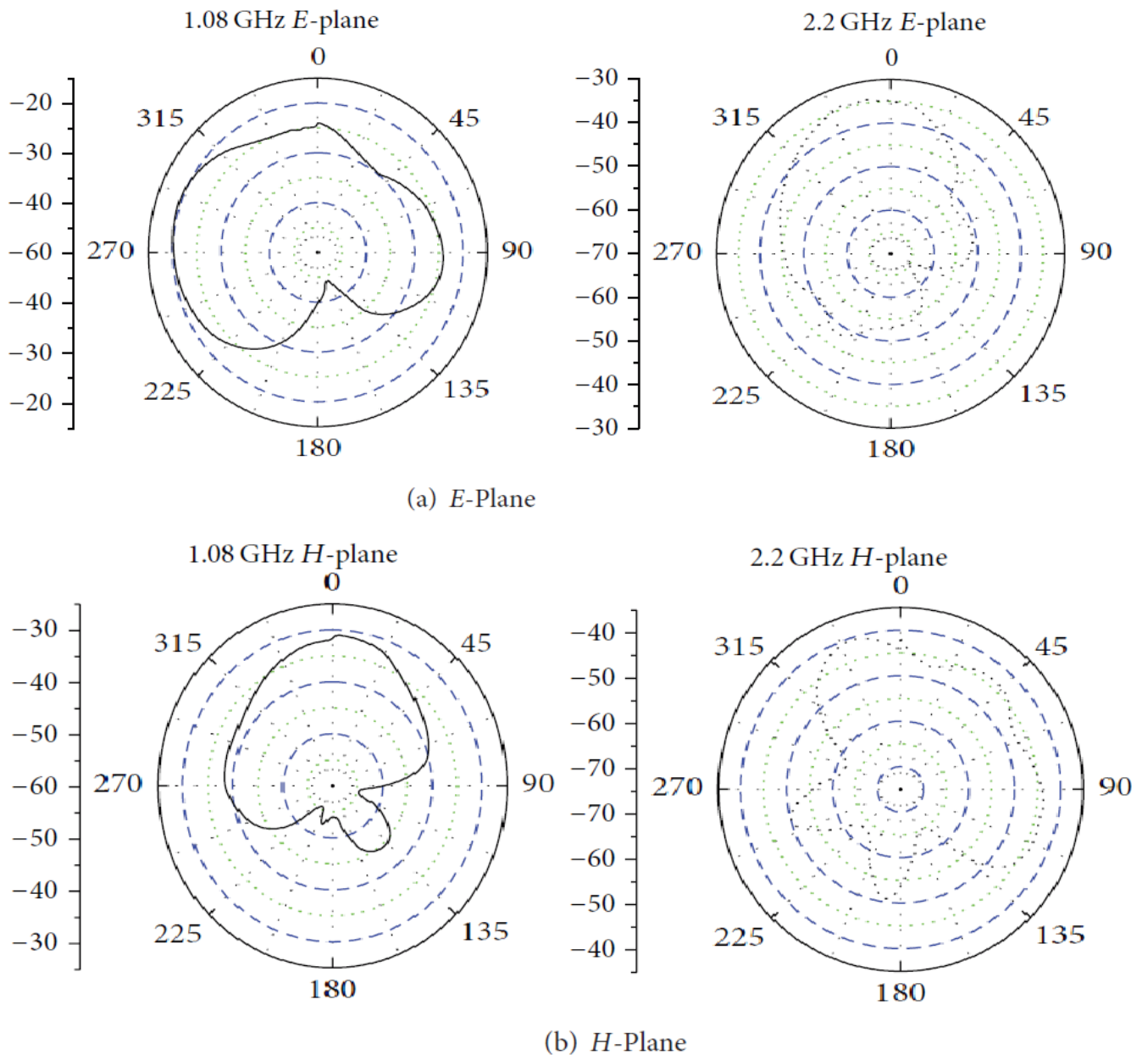


Рисунок 3.7 - ДН в площині E та H для частот 1,08 ГГц та 2,2 ГГц

Еквівалентна схема друкованої прямокутної монопольної антени на зосереджених елементах отримана згідно [1] і показана на **рис. 3.8**. Далі мікросмужкова антена, подана еквівалентною схемою (**рис. 3.8**), навантажена на генератор Колпітса (**рис. 2.10**) і результат показаний на **рис. 3.9**.

На **рис. 3.10** наведено порівняння результатів моделювання коефіцієнта відбиття S_{11} для таких результатів моделювання: 1. ЕМ симуляції та 2. симуляція на основі еквівалентної схеми запропонованої антени на зосереджених елементах з допомогою AWR. Як видно з отриманих результатів спостерігається схожість отриманих залежностей коефіцієнта відбиття S_{11} .

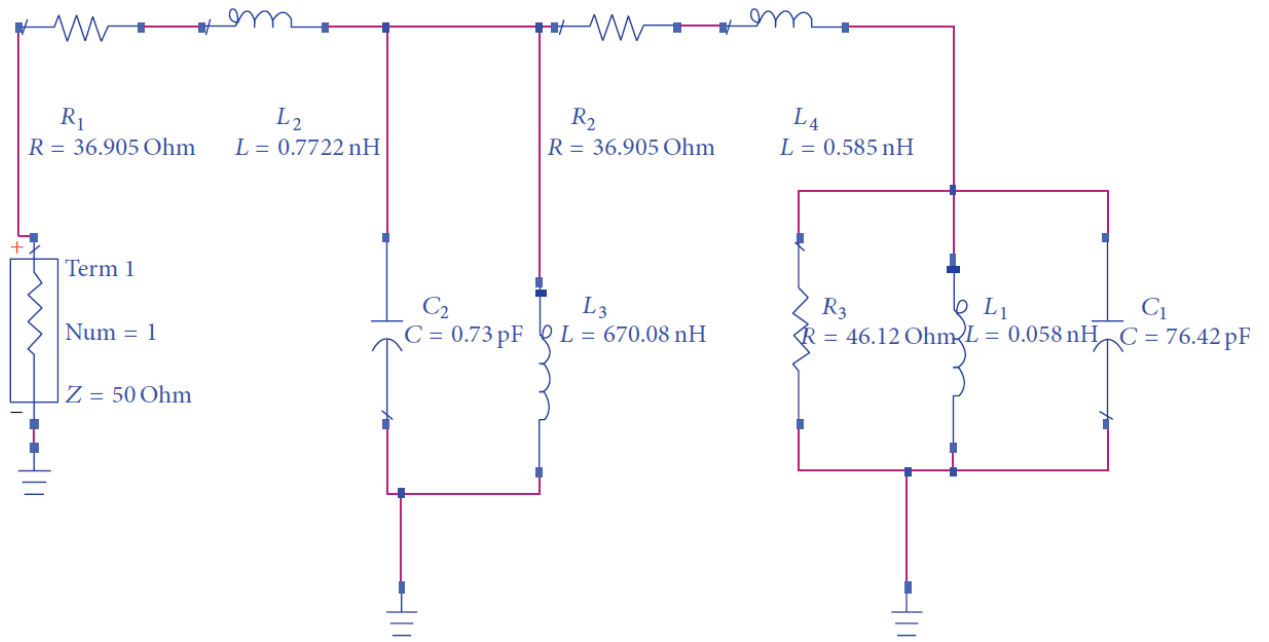


Рисунок 3.8 – Модель еквівалентної схеми запропонованої друкованої монопольної антени

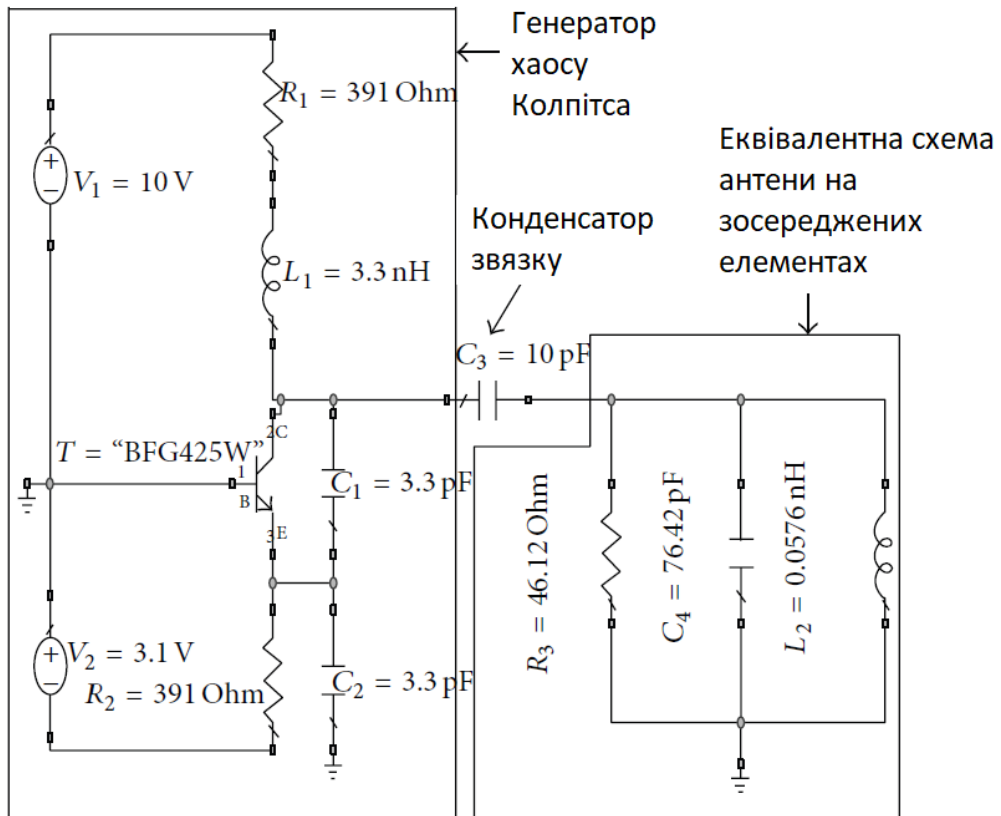


Рисунок 3.9 – Схема, що демонструє інтеграцію хаотичного осцилятора Колпітса та еквівалентної схеми запропонованої антени МРА на зосереджених елементах

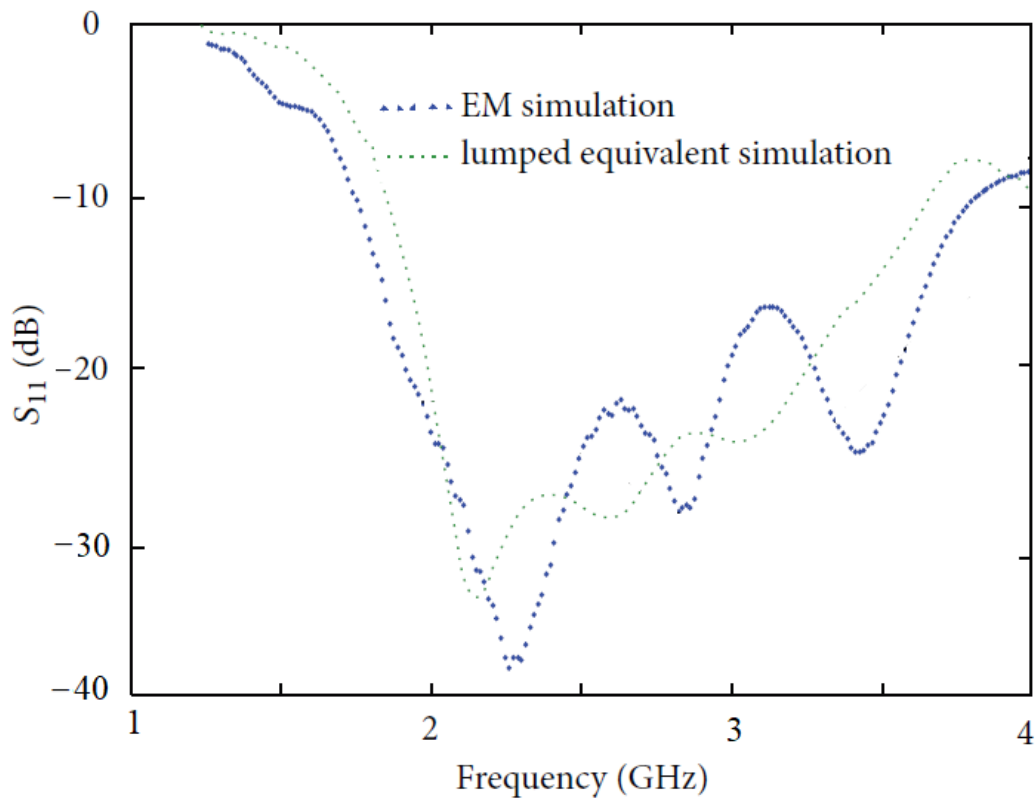


Рисунок 3.10 – Порівняння результатів ЕМ та схемотехнічного моделювання S_{11} для МРА

3.3. Висновки до розділу 3

Хаотичний осцилятор Колпітса може генерувати кілька частот, що наближаються до хаотичного режиму при зміні напруги зміщення емітера V_2 . Для передачі цих частот в хаотичному режимі потрібна широкопasmовою антена. Таким чином, друкована прямокутна монопольна антена вибирається для досягнення широкопasmових характеристик.

З результатів моделювання видно, що для певних значень напруги зсуву різні типи періодичного, переривчастого та хаотичного режимів роботи виникають у еквівалентній схемі МРА на зосереджених елементах, оскільки антена живиться від хаотичного генератора Колпітса.

Однак вузькосмугові характеристики МРА обмежують передачу усіх частотних компонентів, що відповідають станам в напрямку появи режиму хаосу; тому можна спостерігати лише кілька частотних компонентів, що потрапляють у смугу пропускання МРА. Для пропускання всіх частот, що генеруються хаотичним генератором у хаотичному режимі роботи, перевага надається широкопasmовій друкованій монопольній антені.

ВИСНОВКИ

Дослідження та розробка випромінювачів для АІА у складі інтелектуальних карток (ІК) є однією із актуальних задач. Зазвичай для ІК використовуються двочастотні антени з використанням двох окремих випромінювачів. Однак перспективною є спроба розробки активної антени, в якій є випромінювач, що працює одночасно в двох діапазонах частот - багаточастотної активної монопольної друкованої антени осциляторного типу на основі хаотичної схеми Колпітца.

Результати проведених досліджень дозволяють стверджувати, що спроектований прямо хаотичний генератор з ємнісною нелінійністю має ознаки режиму динамічного хаосу, а саме не дотримуються умови конвергентності; формується неперервний спектр коливань та присутня сильна залежність режиму хаосу від незначних змін початкових умов.

Активна антена осциляторного типу була розроблена з використанням хаотичного генератора Колпітца. Багаточастотна робота антени використовується на основі теорії руху до хаосу. Як моделювання, так і експериментальні результати підтверджують достовірність запропонованої методики. Очевидно, що антену можна змусити передавати кілька частот одночасно, встановивши напругу зсуву хаотичного генератора на певне значення. Запропонована методика визнана придатною для безпроводних пристроїв.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Bibha Kumari and Nisha Gupta. Multifrequency Oscillator-Type Active Printed Antenna Using Chaotic Colpitts Oscillator International // Hindawi Publishing Corporation Journal of Microwave Science and Technology, Vol. 2014, Article ID 675891, 10 pages.
2. Kin-Lu Wong. Compact and Broadband Microstrip Antennas. - John Wiley & Sons, 2002, - 324 p.
3. Лучанинов А.И. и др. Исследование свойств нелинейных неконвергентных электродинамических устройств / А.И. Лучанинов, Д.С. Гавва, Е.В. Крикун, Ю.В. Вишнякова, В.А. Назаренко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2011. № 6/5(54). С. 68—72.
4. Дмитриев А.С., Ефремова Е. В., Никишов А. Ю. Генерация СВЧ хаотических колебаний в интегральной кремний – германиевой системе // Журн. радиотехника и электроника. – 2010. Т. 55, №7. – С. 818-825.
5. Детермінований хаос. URL:
https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B5%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BC%D1%96%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D1%85%D0%B0%D0%BE%D1%81#%D0%A5%D0%B0%D0%BE%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B0_%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D1%96%D0%BA%D0%B0 (дата звернення: 16.10.2022).
6. Атрактор URL:
<https://www.wikiwand.com/uk/%D0%90%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80> (дата звернення: 16.10.2022).
7. Граф Р. Электронные схемы: пер. с англ. – Логинова В.А.; М.: Мир, 1989. – 686 с.
8. Thuy Do. Microwave Oscillator Design // Metropolia University of Applied Sciences Bachelor of Engineering Electronics Bachelor’s Thesis, 22nd February 2020. – p. 48
9. Методичні вказівки до виконання та захисту атестаційної роботи магістра для студентів усіх форм навчання спеціальності 172 " Телекомунікації та радіотехніка» спеціалізації «Радіотехніка» / Упоряд. І.О.Милютченко, А.М. Олейніков. – Харків: ХНУРЕ, 2018. – 52 с.