

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра радіотехніки
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка
до магістерської кваліфікаційної роботи
«Магістр»
(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: **РАДІОТЕХНІЧНІ НАДВИСОКОЧАСТОТНІ ГЕНЕРАТОРНІ
ПРИСТРОЇ НА ОСНОВІ РЕЗОНАНСНО-ТУНЕЛЬНИХ
НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР ІЗ ВІД'ЄМНИМ
ДИФЕРЕНЦІЙНИМ ОПОРОМ**

Виконав: студент 2-го курсу, групи РТ-18м
спеціальності 172 – Телекомунікації та

радіотехніка Освітня програма:

Радіотехніка

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Дячук Є. О.

(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., проф. зав каф. РТ

Осадчук О. В.

(прізвище та ініціали)

« ____ » _____ 2019 р.

Рецензент: к.т.н., проф., зав. каф. ТКСТБ

Бортник Г. Г.

(прізвище та ініціали)

« ____ » _____ 2019 р.

Вінниця ВНТУ - 2019 рік

Реферат

УДК 621.396

Дячук Є.О. Радіотехнічні надвисокочастотні генераторні пристрої на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором. Магістерська кваліфікаційна робота. - Вінниця: ВНТУ, 2019. – 146 с. укр. мовою.

Бібліографій 70, Рисунків 53; Таблиць 20.

У роботі наведено результати розроблення та дослідження радіотехнічних надвисокочастотних генераторних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором. Проведено аналіз новітніх НВЧ наноелектронних приладів, таких як резонансно-тунельні діоди та резонансно-тунельні транзистори.

Розроблено та досліджено високоефективні НВЧ генератори на основі резонансно-тунельних діодів з високим коефіцієнтом корисної дії, високою потужністю та низьким рівнем фазових шумів, що працюють на частотах близько 30 ГГц та здійснюють переулаштування частотою генерації в діапазоні 29..34 ГГц шляхом зміни напруги керування. Конструкції таких генераторів виконанні за гібридною технологією без застосування хвилеводних елементів.

Графічна частина складається з 9 плакатів із результатами моделювання.

Також у роботі розроблено розділи економічної частини, охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

Ключові слова: резонансно-тунельний ефект, резонансно-тунельний транзистор, резонансно-тунельний діод, квантова точка, генератор, випадковий сигнал, детермінований хаос, від'ємний опір.

Abstract

Dyachuk Ye.O. High-frequency radio engineering generators based on resonant-tunneled semiconductor structures with negative differential resistance. Master's qualification work. Vinnitsa: VNTU, 2019. - 146 p. ukr. language.

Bibliographies 70, Figures 53; Tables 20.

The paper presents the results of the development and research of high-frequency radio engineering generators based on resonant-tunneled semiconductor structures with negative differential resistance. The analysis of the latest microwave nanoelectronic devices, such as resonance tunnel diodes and resonance tunnel transistors, has been performed.

High-efficiency microwave generators based on resonant tunneling diodes with a high efficiency, high power, and low phase noise operating at frequencies of about 30 GHz have been developed and studied, and they are tuned with a generation frequency in the range of 29..34 GHz by changing the control voltage. The design of such generators is performed by hybrid technology without the use of waveguide elements.

The graphical part consists of 9 posters with simulation results.

Also, the sections of the economic part, occupational safety and emergency management are developed.

Key words: resonant tunneling effect, resonant tunneling transistor, resonant tunneling diode, quantum dot, generator, random signal, deterministic chaos, negative resistance.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ПРО РЕЗОНАНСНО-ТУНЕЛЬНИЙ ЕФЕКТ.....	10
1.1 Застосування резонансно-тунельного ефекту	10
1.2 Фізичний механізм резонансно-тунельного ефекту	12
1.3 Транзистори з резонансним тунелюванням (РТТ)	24
1.4 Резонансно-тунельний транзистор на квантовій точці	27
2 ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ РАДІОТЕХНІЧНИХ ГЕНЕРАТОРНИХ ПРИСТРОЇВ НА ОСНОВІ ТУНЕЛЬНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР ІЗ ВІД'ЄМНИМ ДИФЕРЕНЦІЙНИМ ОПОРОМ.....	30
2.1 Рівняння систем з нелінійністю типу тунельного діода	30
2.2 Стани рівноваги генераторів на тунельному діоді та їх стійкість	32
2.3 Розривні коливання мультивібратора	35
2.4 Режим тригера імпульсного генератора на тунельному діоді.....	38
2.5 Динаміка кіпп-реле (одновібратора) на тунельному діоді.....	41
2.6 Висновки до розділу	45
3 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРА ДЕТЕРМІНОВАНОГО ХАОСУ НА ОСНОВІ ТУНЕЛЬНОГО ДІОДА З РЕЗОНАНСНОЮ СИСТЕМОЮ НА ЗОСЕРЕДЖЕНИХ ЕЛЕМЕНТАХ	46
3.1 Розробка електричної схеми генератора детермінованого хаосу на тунельному діоді з резонансною системою на зосереджених елементах	46
3.2 Розрахунок параметрів автоколивальної системи генератора	47
3.3 Результати теоретичних розрахунків	48
3.4 Результати комп'ютерного моделювання пристрою.....	52
3.5 Результати комп'ютерного моделювання пристрою.....	53
3.6 Висновки до розділу	61
4 НАДВИСОКОЧАСТОТНІ ГЕНЕРАТОРНІ РАДІОТЕХНІЧНІ ПРИСТРОЇ НА ОСНОВІ РЕЗОНАНСНО-ТУНЕЛЬНОГО ЕФЕКТУ	63
4.1 Резонансно-тунельні діоди.....	63
4.2 Резонансно-тунельні структури в спіновій електроніці.....	67

4.3 Розрахунок параметрів резонансно-тунельного транзистора	69
4.4 Розроблення радіотехнічного НВЧ генераторного пристрою на основі резонансно-тунельного діоду	71
4.5 Дослідження радіотехнічного НВЧ генераторного пристрою на основі резонансно-тунельного діоду	76
4.6 Висновки до розділу	82
5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	84
5.1 Аналіз комерційного потенціалу розробки радіотехнічного надвисокочастотного генераторного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференціальним опором	84
5.2 Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної, дослідно-конструкторської та конструкторсько-технологічної роботи	92
5.3 Прогнозування комерційних ефектів від реалізації радіотехнічного надвисокочастотного генераторного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференціальним опором	100
5.4 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та період їх окупності	102
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	106
6.1 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії	106
6.2 Технічні рішення щодо промислової та пожежної безпеки під час проведення дослідження.....	112
6.3 Дослідження безпеки роботи надвисокочастотного генераторного пристрою в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій	115
6.4 Висновки до розділу	120
ВИСНОВКИ.....	121
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	123
Додаток А (обов’язковий). Технічне завдання.....	130
Додаток Б (обов’язковий). Електрична схема радіотехнічного генератора детермінованого хаосу на тунельному діоді.....	138
Додаток В (обов’язковий). Математична модель радіотехнічного генератора детермінованого хаосу	139

Додаток Д (обов'язковий). Результати теоретичних розрахунків генератора детермінованого хаосу	140
Додаток Е (обов'язковий). Результати математичного моделювання генератора детермінованого хаосу	141
Додаток Ж (обов'язковий). Результати комп'ютерного схемотехнічного моделювання генератора детермінованого хаосу	142
Додаток К (обов'язковий). Розрахунок статистичних характеристик генерованих хаотичних електричних коливань.....	143
Додаток Л (обов'язковий). Електрична схема та конструкція НВЧ генератора на резонансно-тунельному діоді.....	144
Додаток М (обов'язковий). Графіки амплітудо-частотного та фазочастотного спектру електричних коливань НВЧ генератора на резонансно-тунельному діоді.....	145
Додаток Н (обов'язковий). Графіки діапазонних характеристик НВЧ генератора на резонансно-тунельному діоді.....	146

ВСТУП

Актуальність теми.

Подальший прогрес у створенні матеріалів з новими властивостями підготував реальні можливості до появи електроніки субмалих елементів (*наноелектроніки*). Цей прогрес зумовлюють такі зміни в структурі речовини, які впливають на її фундаментальні властивості. Дотепер ці властивості були визначені здебільшого для макроскопічних об'єктів. Однак давно були помічені (й використовуються в техніці) *розмірні ефекти*, що спостерігаються в *тонких плівках*, у властивостях *поверхні* кристалів і у *надмалих* частинках речовини [1].

Таким чином, з'являється можливість «керувати» властивостями речовини через зміну її фрагментації [2]. У зв'язку з потребами техніки великого прогресу досягнуто в галузі *нанofізики* – нового наукового напрямку фізичного матеріалознавства, пов'язаного зі створенням і вивченням структури та властивостей матеріалів, що сконденсовані з дуже *малих кристалів, кластерів, фрагментів* (що містять усього 10^3 – 10^6 атомів) [3].

Актуальність даної теми полягає в тому, що на даний час проводиться велика кількість досліджень в області резонансного тунелювання електронів через тонкі напівпровідникові плівки та їх застосування в мікроелектроніці [3].

Аналіз останніх досліджень.

Наявність потенційної ями дуже малих розмірів, сформованої в гетеропереходах структури AlGaAs-GaAs, може приводити до квантування рівнів енергії, що відповідають руху електронів у напрямку, перпендикулярному поверхні поділу, хоча рух електронів у площині, паралельній поверхні поділу, практично не відрізняється від руху вільних частинок [4-6]. При цьому відзначалося, що рухливність електронів у цій площині може бути винятково високою, оскільки виникаючі в шарі AlGaAs електрони надходять у нелегований шар GaAs, де відсутнє розсіювання на примісних атомах і вони можуть рухатися паралельно поверхні поділу зовсім вільно під впливом електричного поля [7-11]. Саме на цьому принципі з

початку 1980-х г. почали створюватися польові транзистори з високою рухливістю носіїв (HEMT) [12], які іноді називають польовими транзисторами з модульованим легуванням (MODFET) [13], тому що в них використовуються модульовано-леговані гетеропереходи, а їхня дія заснована на можливості регулювання руху електронів уздовж каналу впливом електричного поля [14].

Метою роботи є розроблення та дослідження радіотехнічних надвисокочастотних генераторних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором. Звідси, основною задачею даного дослідження є дослідження можливості використання резонансно-тунельних транзисторів, як елементів сучасної інтегральної мікросхемотехніки для побудови надвисокочастотних пристроїв радіотехніки.

Задачами дослідження є:

- проведення аналізу використання резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором в мікроелектроніці;
- розробка простих радіотехнічних надвисокочастотних генераторних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором;
- комп'ютерне схемотехнічне моделювання простих радіотехнічних надвисокочастотних генераторних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором;
- розрахунок електричних параметрів радіотехнічних надвисокочастотних генераторних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором;
- дослідження часових характеристик радіотехнічних надвисокочастотних генераторних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором;
- проведення розрахунків економічної частини та розділу охорони праці.

Об'єктом дослідження даної роботи є фізичні явища та ефекти, що відбуваються в резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором та елементах функціональної електроніки, дія яких базується на тунельно-резонансному ефекті.

Предметом дослідження є часові та частотні параметри і характеристики сигналів резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором, як елементів функціональної електроніки, дія яких базується на тунельно-резонансному ефекті.

Наукова новизна одержаних результатів – отримав подальший розвиток застосування резонансно-тунельних транзисторів, як елементів функціональної електроніки, дія яких базується на тунельно-резонансному ефекті.

Практична новизна одержаних результатів – полягає в отриманих нових результатах теоретичних і модельних досліджень радіотехнічних надвисокочастотних генераторних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором.

Апробація результатів роботи. Основні ідеї роботи доповідалися та обговорювалися на XLVIII регіональна науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області (м. Вінниця, 9-10 березня 2019).

Публікації. За темою досліджень автором опубліковано 3 статті в збірнику праць міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2019)» (Вінниця, ВНТУ, 14-16 листопада 2019 р.) [15-17].

1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ПРО ТУНЕЛЬНО-РЕЗОНАНСНИЙ ЕФЕКТ

1.1 Застосування резонансно-тунельного ефекту

Сучасна фізика й техніка вже відносно давно стали на шлях мініатюризації приладів. Зменшуючи розміри приладів, людство прийшло до нанометрових розмірів, до розмірів при яких починає проявлятися квантово-механічні ефекти, тому що довжина хвилі Де-Бройля стає порівнянної з розмірами розглянутих об'єктів.

Одним з яскравих проявів квантової природи твердих тіл є тунелювання. Уже при досягненні характерних розмірів в 100 нм вирішальний вплив на їхню роботу вносять квантові ефекти, у тому числі й тунелювання.

Останнім часом, підвищився інтерес до резонансного тунелювання й до таких об'єктів з модульованим легуванням, як гетероструктури (шаруваті структури із широкозонного напівпровідника й вузькозонного із приблизно рівним періодом ґрат). Наприклад, подвійні гетероструктури активно використовуються в лазерах на квантових ямах. У таких лазерах активним середовищем є тонкий шар вузькозонного напівпровідника між двома широкозонними. Використання таких подвійних гетероструктур запропонував Ж. И. Алфьоров і в 2000 році одержав за це Нобелівську премію разом з Г. Кремером.

Резонансно-тунельний ефект виник на основі досягнень гетероепітаксильної технології, за допомогою якої створені квантово-розмірні структури, які використовують хвильову природу носіїв заряду, що дало змогу створити принципово новий клас мікроелектронних приладів. В основу роботи цих приладів покладено явище резонансного тунелювання електронів через послідовно розташовані напівпрозорі потенціальні бар'єри, розділені

квантовими ямами, що аналогічно резонансному проходженню фотонів через систему напівпрозорих дзеркал, які утворюють інтерферометр Фабрі-Перо.

Резонансне тунелювання електрона приводить до різкої немонотонної залежності коефіцієнта пропускання від енергії частки, причому ширина резонансної лінії залежить від параметрів квантово-розмірної структури. Це дозволяє використовувати резонансно-тунельні структури в якості елементів з від'ємною ділянкою вольт-амперної характеристики, енергетичних фільтрів і моноенергетичних інжекторів гарячих електронів [1].

Ще одним яскравим прикладом є транзистор з високою рухливістю (HEMT - High Electron Mobility Transistor). З назви цього транзистора ясно, що рухливість електронів у них висока, що у свою чергу впливає на таку важливу характеристику транзистора, як крутість (крутість прямо пропорційна рухливості). При цьому в гетероструктурах рухливість висока ($\mu > 10^7$ см²/(В×с)). Для управління концентрацією в таких транзисторах, у широкозонній частини гетероструктури створюється контакт Шоткі. Якщо товщина цього шару досить мала, то область збіднення поблизу гетеропереходу й контакту Шоткі перекриваються й все дно широкозонного шару виявляється іонізованим. Таким чином, цей шар відіграє роль діелектрика, а гетероструктура стає аналогом МДН структури.

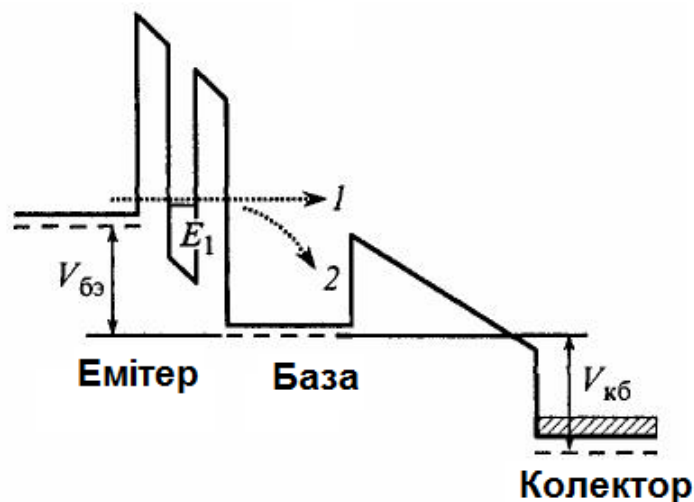


Рисунок 1.1 – Енергетична діаграма RHET

Не можна не згадати такий актуальний на сьогоднішній день прилад як транзистор на гарячих електронах з резонансним тунелюванням (Resonant Tunneling Hot Electron transistor - RHET). Енергетична діаграма цього транзистора наведена на рис. 1.1. Як бар'єр емітер-база використовується подвійна гетероструктура, через яку електрони тунелюють резонансно з відносно вузьким розподілом по енергії. Це сильно знижує втрати, пов'язані з термолізацією електронів (на рис. 1.1. стрілкою 1 схематично позначені гарячі електрони, електрони, у яких кінетична енергія набагато більша теплової; стрілкою 2 схематично показані термолізовані електрони).

У такому транзисторі можна досягти терагерцового діапазону робочих частот (можливо одержати швидкодію порядку 1ТГц). Але на жаль такі транзистори працюють при температурі рідкого азоту ($T = 77,4 \text{ К}$). Щоб підняти робочу температуру, необхідно проводити дослідження резонансного тунелювання при різних температурах.

1.2 Фізичний механізм резонансно-тунельного ефекту

Перш ніж сказати, що таке резонансне тунелювання, необхідно ввести поняття резонансно-тунельної структури. Резонансно-тунельними структурами називають сукупність напівпровідникових шарів, розділених тунельними бар'єрами, де хоча б один із шарів являє собою квантову яму.

Розглянемо як резонансно-тунельна структура складається з двохбар'єрної гетероструктури і спробуємо якісно розібратися з поняттям даного явища. Прикладемо до нашої структури (див. рис.2) позитивну напругу зсуву. Дискретність енергетичного спектра в ямі, утвореної тунельними бар'єрами, приводить до того, що тунелювання через лівий бар'єр можливо лише тоді, коли якої-небудь із заповнених рівнів, наприклад рівень E_{01} збігається з яким-небудь із рівнів у ямі - E_{02} . Обіг струму в нуль означає, що

значення E_{01} і E_{02} (при збільшенні V) уже не збігаються, і струм починає падати. Іншими словами на ВАХ є ділянка з від'ємним диференціальним опором.

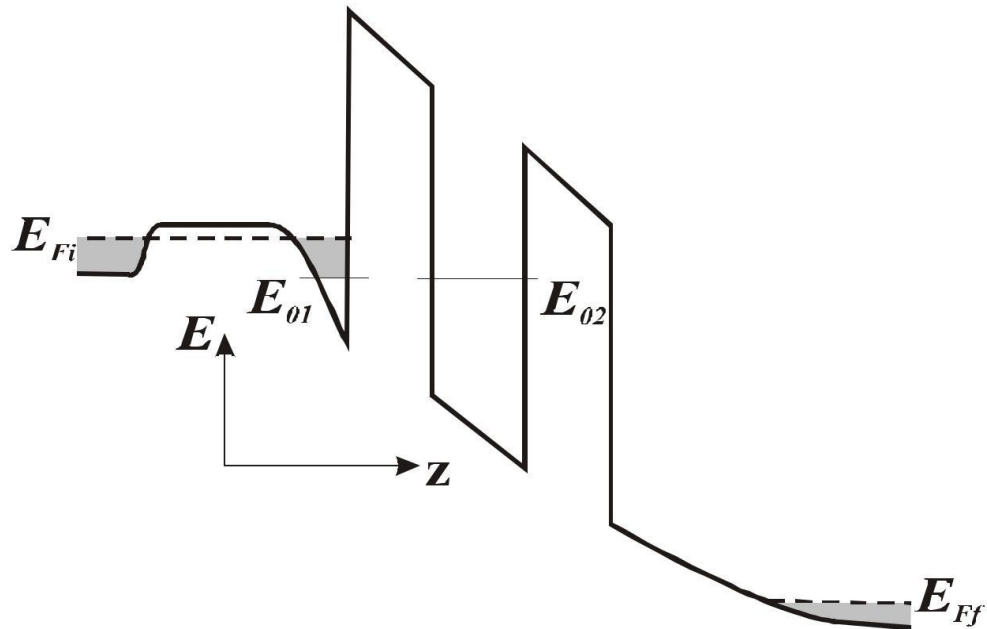


Рисунок 1.2 – Енергетична діаграма двохбар'єрної гетероструктури

На величину тунельного струму буде впливати прозорість бар'єра $T(p_z)$. При тунелюванні будуть зберігатися енергія й паралельна бар'єру компонента імпульсу, звідки треба, що б $T(p_z) \sim \delta(p_z^2 - m^2 - e - E_{02})$. Але на практиці ще потрібно пам'ятати про кінцівку часу життя в ямі τ за рахунок розсіювання на фононах, домішках, електрон-електронної взаємодії й т.п. Це приводить до кінцевої ширини рівнів у ямі й тому резонансний пік на ВАХ буде розширений.

Резонансно-тунельний діод складається з двох бар'єрів, розділених областю з малою потенційною енергією. Область між бар'єрами – це ніби потенційна яма, у якій є один або кілька дискретних рівнів. Характерна ширина бар'єрів і відстань між ними складають кілька нанометрів. Області ліворуч і праворуч від подвійного бар'єра відіграють роль резервуарів електронів провідності, до яких примикають контакти. Електрони займають досить вузький енергетичний інтервал. У приладі використовується наступна особливість подвійного бар'єра: його тунельна прозорість має яскраво

виражений резонансний характер. Пояснимо природу цього ефекту. Для цього припустимо, що прозорість кожного бар'єра мала. Це, однак, не означає, що одночасно буде мала й імовірність тунелювання через подвійний бар'єр. Виявляється, що в тому випадку, коли енергія електронів, що налітають на бар'єри, дорівнює енергії дискретного рівня, тунельна прозорість різко зростає. Механізм резонансного тунелювання такий: електрон, що проникнув в область між бар'єрами, надовго затримується там, у результаті багаторазового відображення від лівого і правого бар'єрів істотно зростає імовірність тунелювання. Одночасно можна сказати, що при резонансі через інтерференцію хвиль у внутрішній області гаситься хвиля, що відбиває від подвійного бар'єра. Отже, хвиля, що упала ліворуч, цілком проходить праворуч [3].

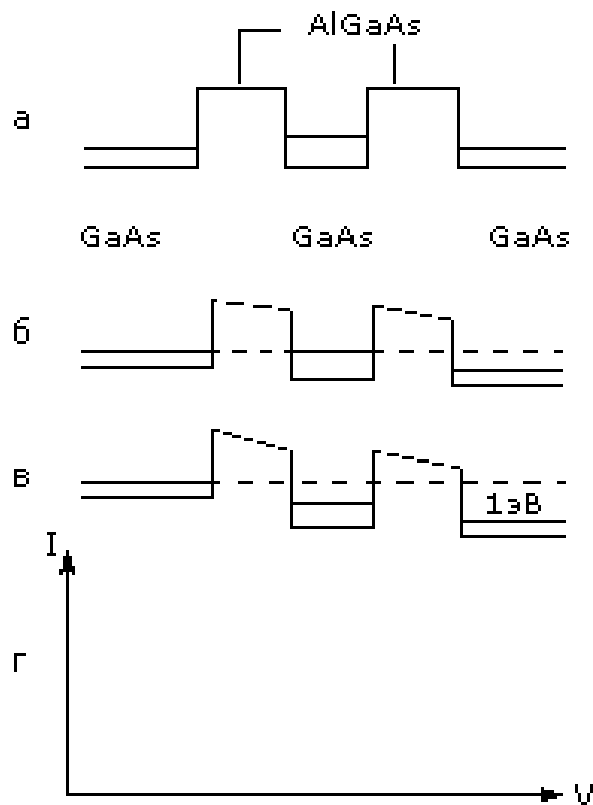


Рисунок 1.3 – Схема роботи і вольт-амперна характеристика резонансного тунельного діода: а – різниця потенціалів дорівнює нулеві; б – на прилад подана резонансна напруга, при якій струм максимальний; в – напруга більше резонансної; г – вольт-амперна характеристика

Основною структурою, на якій проведено теоретичні та експериментальні дослідження по резонансному тунелюванню електронів, є структура, у якій квантова яма розташована між двома напівпрозорими бар'єрами. Омичні контакти до такої структури формуються з використанням сильно легованих n^+ -шарів напівпровідника, який має вузьку енергетичну зону в порівнянні з бар'єроутворюючим напівпровідником. Між цими шарами і шарами бар'єроутворюючого напівпровідника поміщають протяжні буферні шари нелегованого матеріалу (рис. 1.4,а), в результаті чого утворюється семишарова структура, діаграма зони провідності якої наведена на рис. 1.4,б. [2].

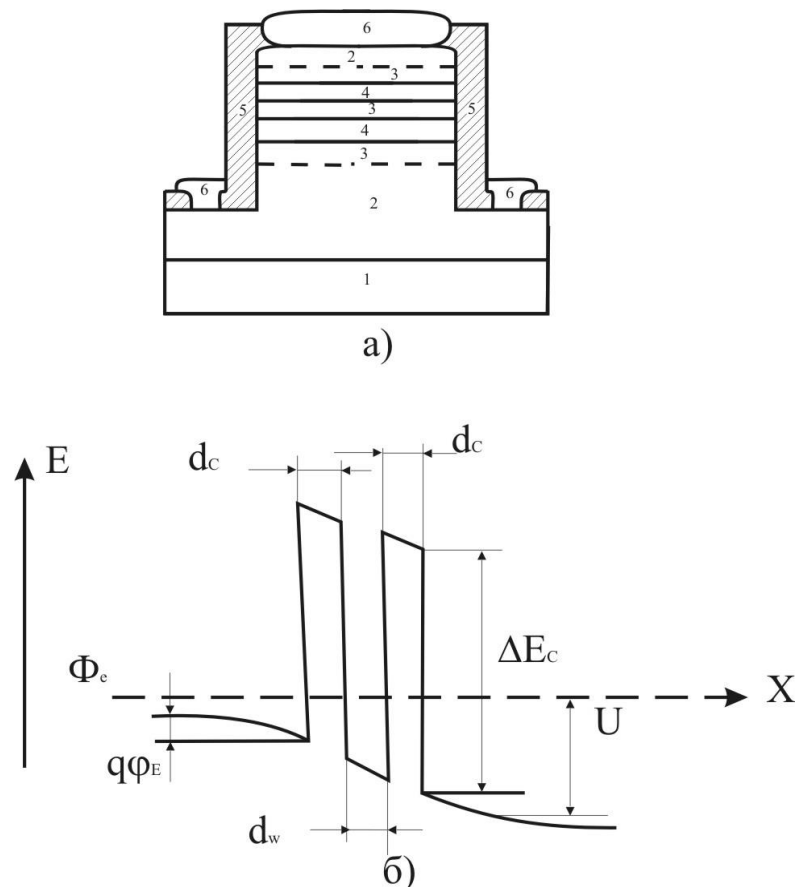


Рисунок 1.4 – Схематичний розріз n^+ - i - n^+ діода з тунельно-резонансною структурою в i -області (а) і його діаграма зони провідності (б): 1- n^+ -InP підкладка; 2- n^+ -InGaAs підкладка; 3- i - InGaAs підкладка; 4- InAlAs підкладка; 5-пасивуючий шар; 6-контакти

Основним методом створення резонансно-тунельних структур є епітаксія з молекулярних пучків, яка дозволяє вирощувати дуже тонкі досконалі шари напівпровідникових сполук 3 і 5 груп на GaAs- і InP-підкладках [1], а також кремній-германієві квантово-розмірні гетероструктури на Si-підкладці та інші.

В експериментальних дослідженнях резонансного тунелювання електронів також використовуються наступні два типи структур: по-перше, гетероструктури на основі добре узгоджених по параметрах кристалічних ґраток пар GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ на GaAs підкладці і $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ на InP-підкладці і, по-друге, напружені псевдоморфні гетероструктури $\text{In}_{0.53}\times\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ на InP-підкладці. Серед методів вирощування цих гетероструктур основними є епітаксія з молекулярних пучків і в меншому ступені хімічне осадження з парів металоорганічних з'єднань. Діоди n-i-n-типу, а також інші прилади з резонансним тунелюванням електронів мають, як правило, вертикальну структуру і формуються з використанням меза-травлення [2].

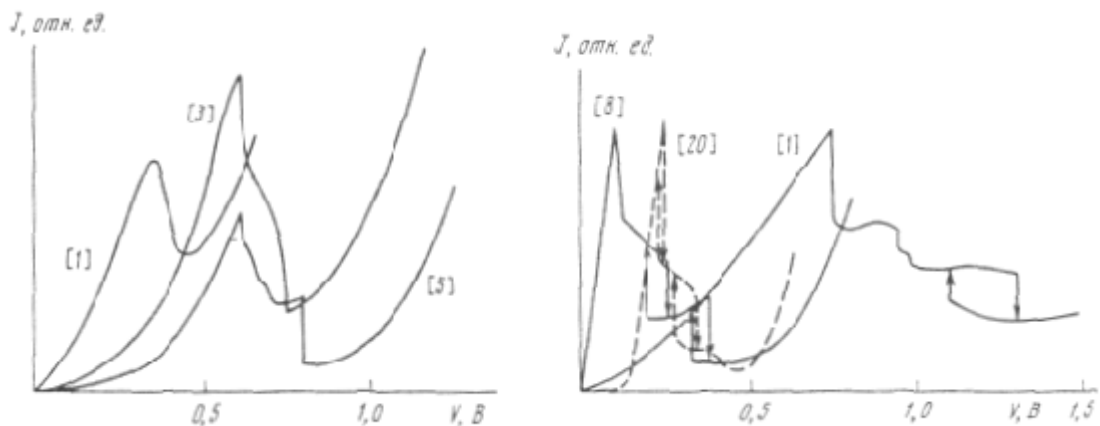


Рисунок 1.5 – Експериментальні вольт-амперні характеристики n^+i-n^+ -діода з ТРС в і-області

На рис. 1.5, а приведені типові експериментальні ВАХ діода з ТРС у базовій і-області [2]. З порівняння їх з ВАХ, розрахованими для аналогічного

діода в рамках елементарної теорії, видно, що при якісному збігу з розрахунковими характеристиками основні кількісні параметри експериментальних ВАХ значно гірші.

Найбільший вплив на транспортні характеристики ТРС і приладів на їхній основі роблять бар'єрні шари. Так, зменшення їх товщин приводить до розширення квазірівня в КЯ і росту резонансного тунельного струму. Контрастність ВАХ при цьому може як збільшуватися, так і зменшуватися в залежності від того, яка з компонентів I_{\min} (термоємісійна, тунельна і т.п.) домінує. Збільшення висоти бар'єрів при типових параметрах ТРС викликає зменшення надбар'єрних термоємісійних і нерезонансних, тунельного струмів у більшому ступені, ніж резонансного, що може дати ріст контрастності. Рекордні значення (30 і 63 при $T=300$ і 77 К, відповідно) отримані в діоді на псевдоморфній структурі InGaAs з AlAs-бар'єрами і складною КЯ — $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InAs}/\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.47}\text{As}$, що має найбільш високі бар'єри в порівнянні з якими-небудь іншими експериментально досліджуваних структур. Контрастність ВАХ діодів із ТРС на AlGaAs, технологія яких відпрацьована в більшому ступені, трохи нижче, однак вона може бути збільшена при використанні в якості бар'єрів короткоперіодичні надгратки (НГ) GaAs/AlAs [2].

Якість ТРС і відповідно характеристики виготовлених на їхній основі приладів істотно залежать від напівпровідникового матеріалу. Порівнюючи перспективи використання InGaAs/InAlAs- і GaAs/AlGaAs-структур, можна відзначити кілька причин, з яких перша гетеропара виявляється переважніше для виготовлення приладів з резонансним тунелюванням. По-перше, через особливості зонної структури процеси тунелювання електронів центральної Γ -долини вузькозонного емітера через бічні L і X-долини широкозонних шарів, що модифікують резонансні властивості розглядуваних двобар'єрних структур, менш ймовірні в гетеропарі InGaAs/InAlAs, чим у GaAs/AlGaAs. По-друге, в системі InGaAs/InAlAs може бути досягнута велика в порівнянні з

GaAs/AlGaAs висота гетеро бар'єрів без істотного погіршення транспортних характеристик тунелюючих електронів у сполученні з меншою ефективною масою електрона, що в остаточному підсумку забезпечує більш високі значення контрастності ВАХ для ТРС на першій гетеропарі. По-третє, через порівняно низький бар'єр Шоткі ($\sim 0,2$ еВ) несплавні контакти до сильнолегованих n^+ -областей InGaAs мають менший омичний опір (до $2 \cdot 10^{-8}$ Ом·см), чим у випадку GaAs.

Уперше тунелювання через потенційний бар'єр спостерігав Есакі [1] в 1958 році. Він винайшов тунельний діод (іноді його називають діодом Есакі) головна властивість якого - наявність ділянки від'ємного диференціального опору (ВДО). В 1973 році за цей винахід він розділив Нобелівську премію із Дживером і Жозефсоном за експериментальне відкриття тунельних явищ у напівпровідниках і надпровідниках. Таким чином, тунелювання електронів стало предметом дослідження для багатьох областей науки й техніки. З появою в 70-х роках молекулярно-пучкової епітаксії стало можливим створювати тонкі плівки гарної якості, шаруваті структури, наприклад надрешітки і гетероструктури. 1973 року Тсу й Есакі [2] розраховали транспортні властивості у надрешітці з погляду тунелювання. Виявилось, що й там можна одержати ВДО. Вони розглянули випадок двобар'єрної, трьохбар'єрної і п'ятибар'єрної надрешітки. 1974 року Чанг, Есакі й Тсу [3] спостерігали резонансне тунелювання у двобар'єрних структурах типу $\text{Ga}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As} - \text{GaAs} - \text{Ga}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}$: перша із шириною бар'єрів 80 \AA і шириною ями 50 \AA ; друга із шириною бар'єрів і ями по 40 \AA відповідно. Висота бар'єрів в обох випадках 0.4 еВ. Концентрація електронів у підкладці й електродах (GaAs) $n = 10^{18} \text{ см}^{-3}$, а енергія Ферми 40 меВ. Також вони розглянули залежність кондактанса від напруги при температурах $4.2 \text{ }^\circ\text{K}$, 77 K і $300 \text{ }^\circ\text{K}$. На рис.1.6 представлені дані отримані Чангом, Есакі й Тсу для першої структури. При кімнатній температурі ми бачимо монотонну криву залежності кондактанса від напруги, що говорить про сильному температурному розмитті й має на увазі відносно малу висоту

бар'єра. Зі зменшенням температури починають проявлятися особливості залежності кондактанса від температури. Це говорить про те, що великий внесок у тунелювання вносять фонони.

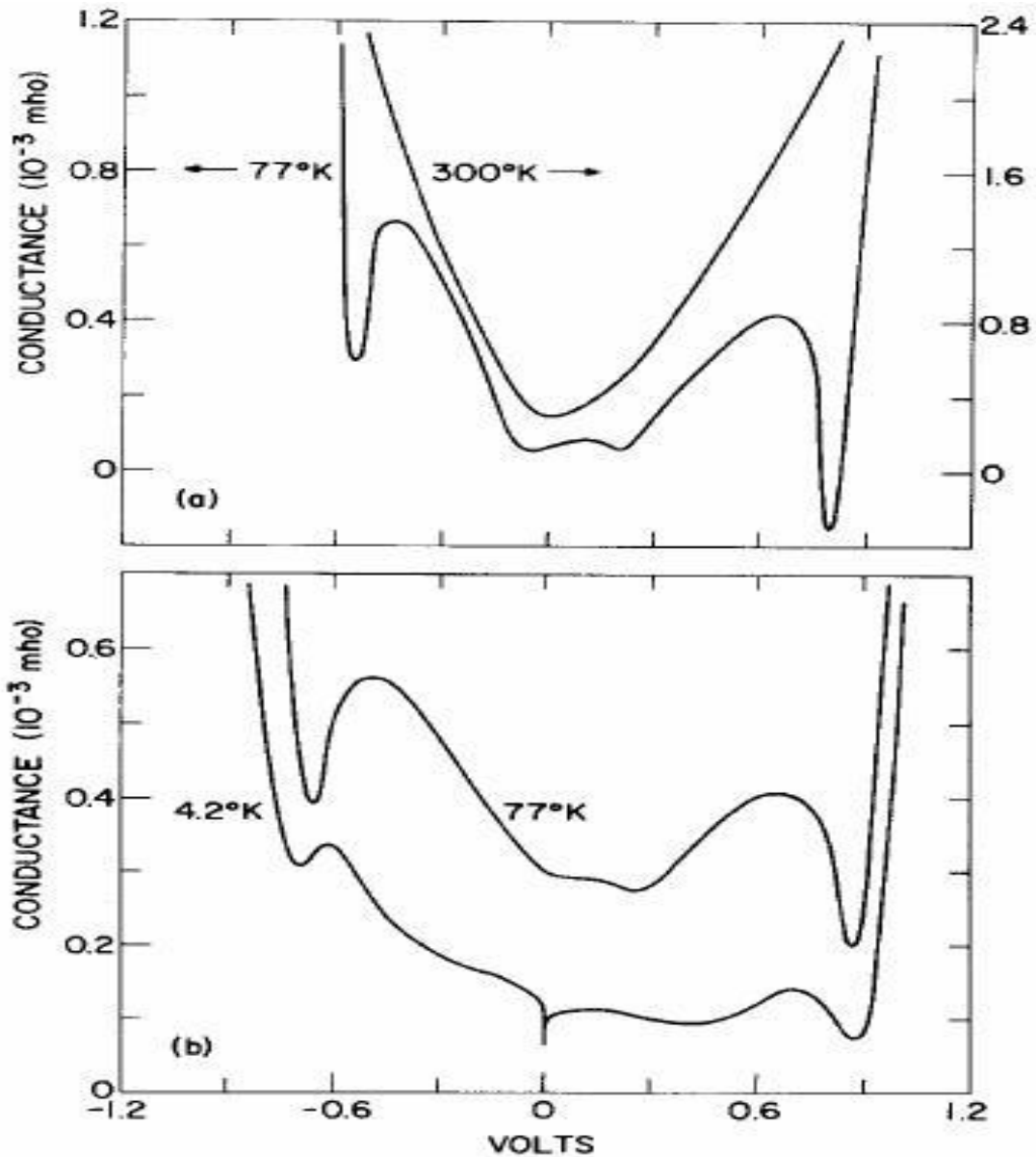


Рисунок 1.6 – Енергетична діаграма двобар'єрної гетероструктури [3]

Не можна не відзначити роботу Соллнера [4] і його співавторів 1983 року. Вони спостерігали резонансне тунелювання при кімнатній температурі й ознаки області ВДО при 200 С. Параметри зразка Ga_{0.75}Al_{0.25}As/GaAs /Ga_{0.75}Al_{0.25}As: ширина бар'єрів і ями по 50 Å, концентрація донорів у ямі $N_{D2} =$

10^{17} см^{-3} , концентрація донорів у позабар'єрному GaAs $N_{D1} = N_{D3} = 10^{18} \text{ см}^{-3}$, висота бар'єрів 0.23 eV. Так само досліджувався відгук на зовнішній терагерцовий сигнал, внаслідок чого було виявлено гранична частота при 2.5 ТГц. Ця робота показала, що резонансно-тунельний діод на двобар'єрної гетероструктури може бути гарним терагерцовим генератором.

З моменту своєї появи на світло, резонансно-тунельний діод ніколи не переставав бути цікавим для багатьох фізиків (бурхливий розвиток технології сприяє одержанню усе більше й більше чистих і якісних зразків). До таких учених можна віднести Мерфі, Ейзенштейна, Пфайфера й Весту. Перш ніж звернути увагу на їхню роботу, пов'язану з температурною залежністю [6], потрібно спочатку згадати про іншій роботі, що присвячена зразку [5], у якій докладно описана досліджувана в роботі [6] структура. На рис. 1.7 зображена схема досліджуваного зразка. Зразок являє собою двухямну гетероструктуру GaAs / AlGaAs / GaAs (плівки GaAs шириною в 200 \AA - квантові ями, плівка AlGaAs в 175 \AA - бар'єр), що була отримана методом молекулярно-пучкової епітаксії. По краях зразка вожжені індієві контакти (на бічному розрізі на верхній вставці позначені як «З»). Вони утворюють омичний контакт до обох ям одночасно (ями заштриховані). Електроди “Top Gate” і “Bottom Gate” нанесені методом фотолітографії. Подаючи на них негативний потенціал можна домогтися того, що кожний з індієвих електродів утворить контакт до різних ям. Наприклад, негативний потенціал, прикладений до електрода “Top Gate” приводить до збідніння електронами тої частини ями, що перебуває під ним. Аналогічна справа обстоїть з іншою ямою й електродом “Bottom Gate”. На нижній вставці рис. 1.3 зображений вид зверху цього зразка. Він зроблений у формі хреста. Така форма дозволяє використовувати чотирьохконтактний метод Ван дер Пау для виміру рухливості електронів і представляється можливим визначити їх концентрацію за допомогою ефекту Холу й Шубнікова-Де Гааза.

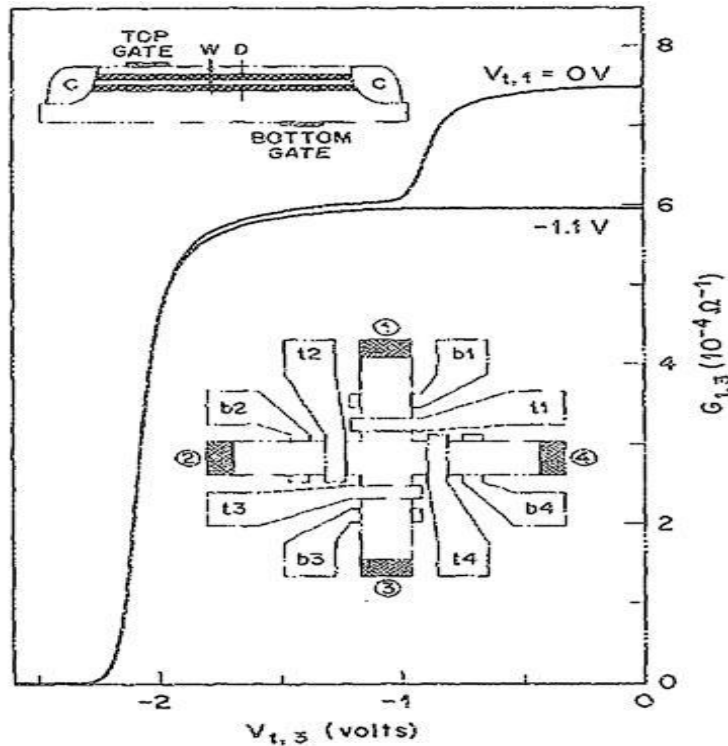


FIG. 1. Upper inset: idealized view of double quantum well structure fitted with two ohmic contacts C and top and bottom gates. Each quantum well is of width W and is separated from the other by a barrier of thickness D . Lower inset: sample mesa and gate configuration. At each end of the cross-shaped mesa a diffused In contact (No. 1–No. 4) is made. Each arm is fitted with top and bottom gates as shown. Data: Conductance $G_{1,3}$ vs top gate bias $V_{t,3}$ for two bias voltages $V_{t,1}$ on the “upstream” top gate. Side arms 2 and 4 are cut off by large (-3 V) biases on their top gates. Data taken at 1.2 K. Substantial series resistances (leads and contacts) are included in the measured conductance.

Рисунок 1.7 – Схематичне зображення зразка із двома квантовими ямами [6]

Аналогічні три зразки були використані в статті [6] (всі теж саме тільки ширини бар'єрів $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ розрізняються в діапазоні від 175 \AA до 340 \AA і $0.1 < x < 0.33$). Виміру були проведені методом тунельної спектроскопії при чотирьох температурах у діапазоні від $T = 0.7 \text{ K}$ до 10 K . Ця стаття присвячена впливу електрон-електронного (e-e) і електрон-фононного (e-ph) розсіювань на ширину резонансного піка. Оскільки при 2 D-2D тунелювання, а тут розглядається саме воно, зберігається компонент імпульсу, паралельна бар'єру, те тунельна провідність повинна звертатися в нуль при всіх напругах, крім тих напруг, при яких рівні квантування в ямах вирівнюються. Автори цієї роботи вважають, що в цьому випадку e-e розсіювання вносить домінуючий вклад у розширення піка.

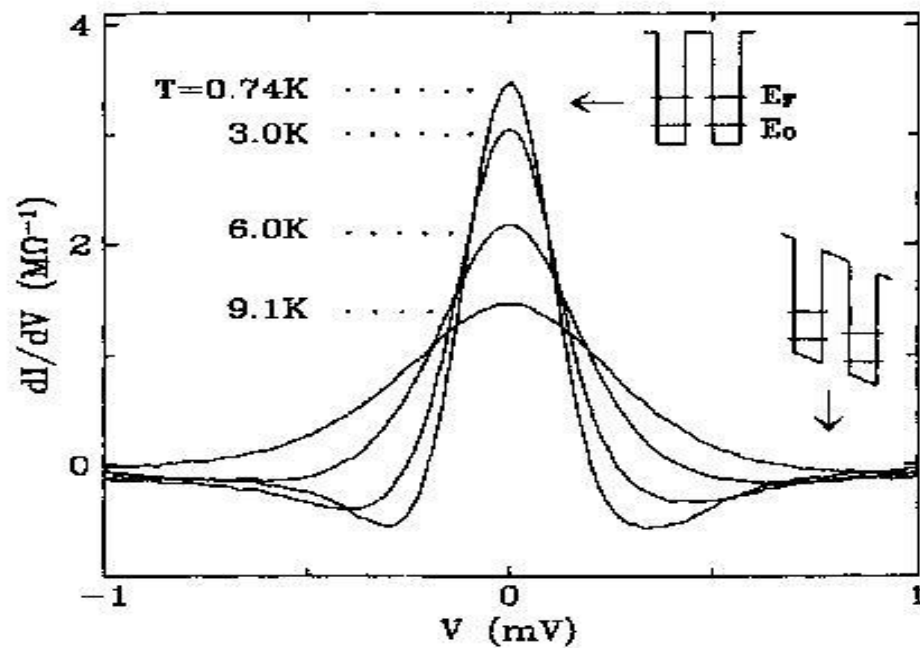


FIG. 1. Typical 2D-2D tunneling resonances observed at various temperatures in a sample with equal densities ($N_s = 1.6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$) in the two 2DES's. Insets show simplified band diagrams on and off resonance.

Рисунок 1.9 – Залежність тунельної провідності від напруги при чотирьох різних температурах [7]

На рис. 1.9 наведена залежність dI/dV від V для зразка з однієї й тією же концентрацією електронів в обох ямах ($N_s = 1.6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$). Із графіка видно, що при збільшенні температури пік розширюється й знижується, а виходить, час життя електронів зменшується через е-е розсіювання в кожній ямі.

У вставці рис. 1.10. представлений графік функції $F(V)=I/V$, що отримана з даних dI/dV чисельним інтегруванням. Із цією функцією зручніше працювати, оскільки при збереженні імпульсу $F(V)$ є сверткою спектральної функції $A(E,k)$ 2D-Електронів (спектральна функція $A(E,k)$ [7] дає ймовірність того, що електрон із хвильовим вектором k має енергію E , і має сильний пік при енергії $\hbar^2 k^2 / 2m$).

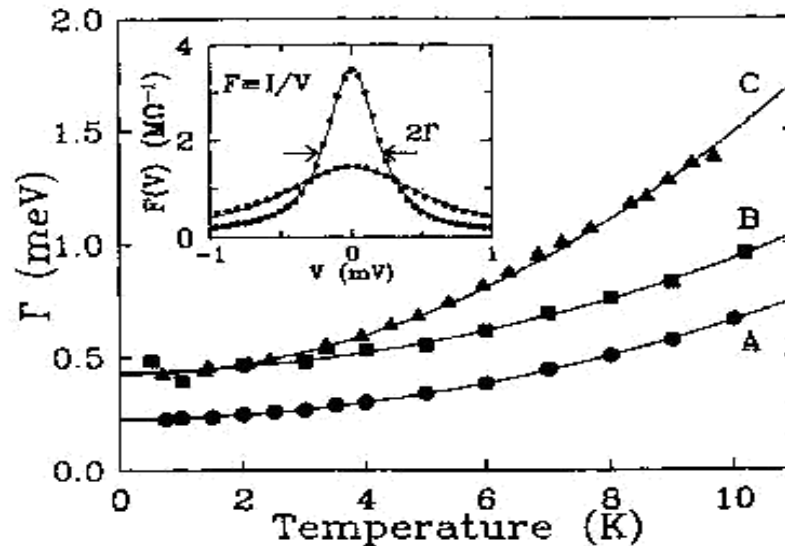


FIG. 2. Temperature dependence of the tunneling linewidth Γ for three samples. Samples A and B have comparable 2DES densities ($N_s \approx 1.6$ and $1.5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$) but different amounts of static disorder [i.e., different $\Gamma(T=0)$]. Sample C has a lower density ($0.8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$). Inset: Dotted curves are the ratios $F(V) = I/V$ determined from the measured dI/dV traces at $T = 0.74$ and 9.1 K shown in Fig. 1. (The point density has been reduced for clarity.) The definition of the linewidth Γ is shown. The solid curves are Lorentzian fits to the $F(V)$ data.

Рисунок 1.10 – Залежність ширини Γ кривій $F(V)$ від температури [7]

В основній частині малюнка наведена температурна залежність ширини Γ кривій $F(V)$ для трьох зразків. Зразки А і В мають майже рівні концентрації 2D-Електронів у ямах ($N_s = 1.6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ у зразка А і $N_s = 1.5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ в В), але різне значення $\Gamma(T=0)$ (так звана кількість статичного безладдя). Зразок С має меншу щільність ($N_s = 0.8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$), але така ж кількість статичного безладдя, що й зразок А. Те що при температурі нижче $T = 2 \text{ K}$ крива Γ майже не залежить від T , говорить про те, що непружні процеси стають надто малими. У цьому режимі ширина резонансної кривої чутлива до щільності неоднорідностей, збій імпульсу через недосконалість бар'єрів і кінцевий час життя в кожному 2ДЕГ (двовимірний електронний газ), викликані розсіюванням на статичному неупорядкованому потенціалі (наприклад на Si донорах). При температурі

$T > 2 K$ величина Γ росте квадратично з температурою. Причому видно, що Γ збільшується зі зменшенням концентрації N_s , отже температурно залежна частина Γ залежить від щільності 2D електронів, а не від безладдя. А це у свою чергу припускає нееластичні процеси, як $e-e$ і $e-ph$ (акустичні фонони) розсіювання. Але $e-ph$ розсіювання можна вважати малим внеском хоча б тому, що при тунелювання за участю фононів з ростом температури пік тунельної провідності збільшувався б.

1.3 Транзистори з резонансним тунелюванням (РТТ)

Об'єднання діодів з тунельним резонансним ефектом з біполярними транзисторами, польовими транзисторами і транзисторами на гарячих електронах дозволяє створювати більш складні пристрої, які отримали назву транзисторів з резонансним тунелюванням (РТТ) [1, 2]. Розгляд роботи таких пристроїв можна почати з біполярних транзисторів, в яких діоди з резонансним тунелюванням додані до емітерного переходу. В цьому випадку резонансний струм визначається напругою U_{EB} між емітером і базою, тому струм колектора таких приладів дуже подібний на відповідній характеристиці діодів з резонансним тунелюванням (рис. 1.11, а). На рис. 1.11, б подано залежність струму колектора від напруги U_{KE} (колектор-емітер). Як видно з рисунку, вихідна вольт-амперна характеристика являє собою чергу областей з позитивною і негативною крутістю, перехід між якими регулюється зміною напруги між базою і емітером (U_{EB}).

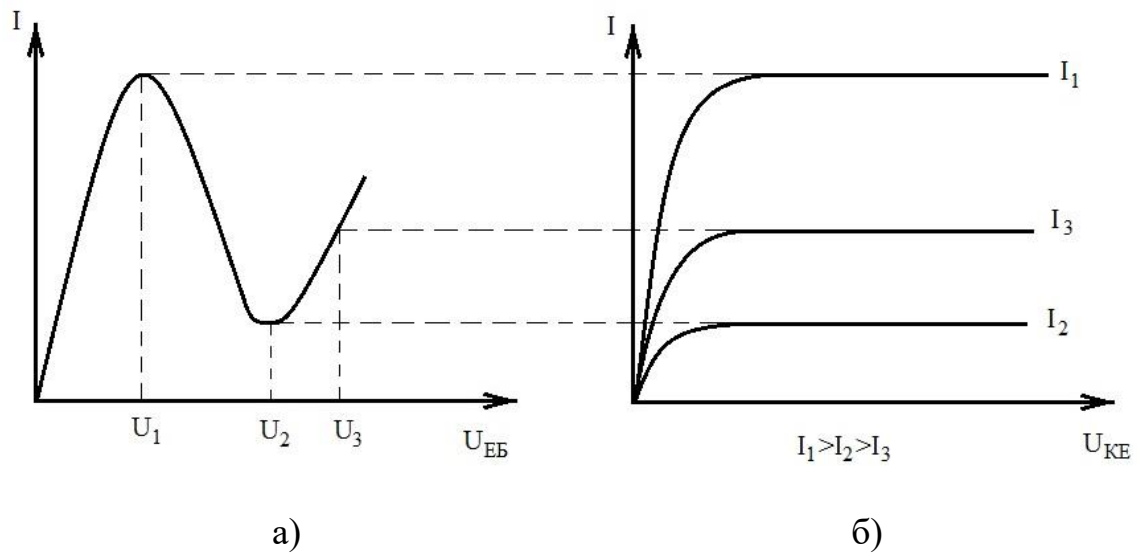


Рисунок 1.11 – Залежність струму колектора в транзисторі з резонансним тунелюванням від напруги база-емітер (а); від напруги колектор-емітер (б)

Діод з резонансним тунелюванням на основі гетероструктури може бути підключено між емітерною і базовою областями транзистора на гарячих електронах (НЕТ). В цьому випадку гетероструктура інжектує значні струми при виконанні умови резонансу. Розташування резонансного рівня відносно емітера регулюється напругою U_{EB} , що подається на базову область (рис. 1.12).

Підвищення напруги U_{EB} до значень, які відповідають резонансному тунелюванню, приводить до максимальної величини струму I_K на виході транзистора. При подальшому зростанні напруги U_{EB} струм починає зменшуватися і приймає мінімальні значення, які відповідають напрузі у долині на спадній ділянці вхідної вольт-амперної характеристики транзистора. Таким чином, вихідні характеристики транзистора також мають області від'ємного диференціального опору, проте на відміну від звичайних транзисторів на гарячих електронах, резонансні структури дозволяють інжектувати електрони в дуже вузькому енергетичному діапазоні ($\sim 1\text{meV}$), що приблизно на порядок перевищує відповідні параметри для транзисторів з високою рухливістю електронів (НЕМТ).

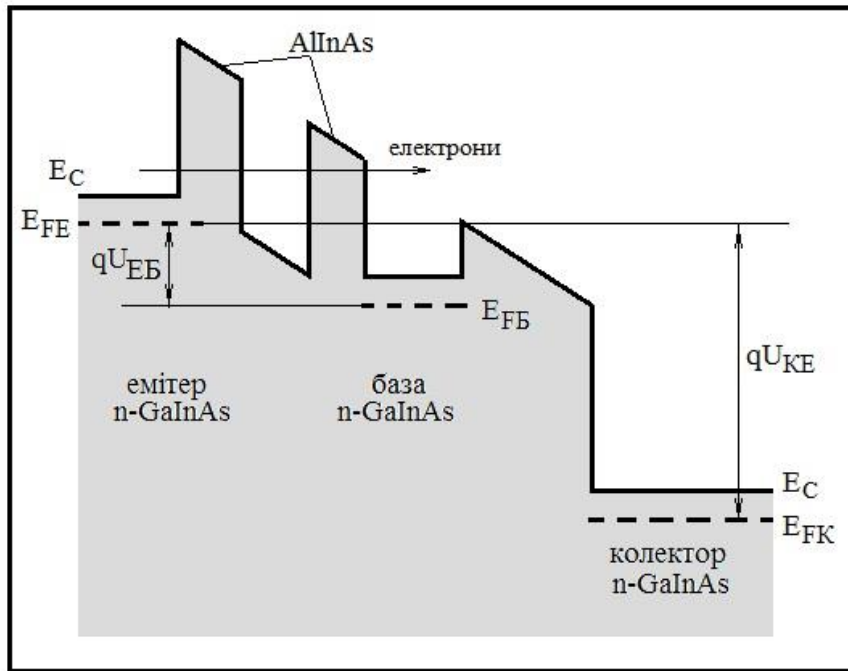


Рисунок 1.12 – Схематична діаграма енергетичних рівнів електронів в транзисторах з резонансним тунелюванням

На рис. 1.13 подано енергетичну діаграму біполярного транзистора AlGaAs-GaAs, у якому до виводу бази підключено діод з резонансним тунелюванням. Квантова яма між двома потенціальними бар'єрами діода виконує особливу роль, тому що вона має декілька квантових рівнів. Відповідно у колекторному струмі такого пристрою з'являються декілька піків, на відміну від одного піку для структури, що подано на рис. 1.13.

Транзистори з резонансним тунелюванням (РТТ) дозволяють створювати багато нових пристроїв, особливо в області цифрової мікроелектроніки на основі відповідних залежностей вихідних вольт-амперних характеристик. Наприклад, якщо створити послідовне коло з декількох приладів з резонансним тунелюванням, то можна вибрати області стабільних станів приладу, які відповідають точкам перетину прямої навантаження з кривими вихідних вольт-амперних характеристик тунельного приладу. Якщо таких областей дві, то утворюється елемент бінарної логічної схеми. У випадку квантової ями з

декількома енергетичними рівнями кількість стабільних станів буде дорівнювати кількості піків.

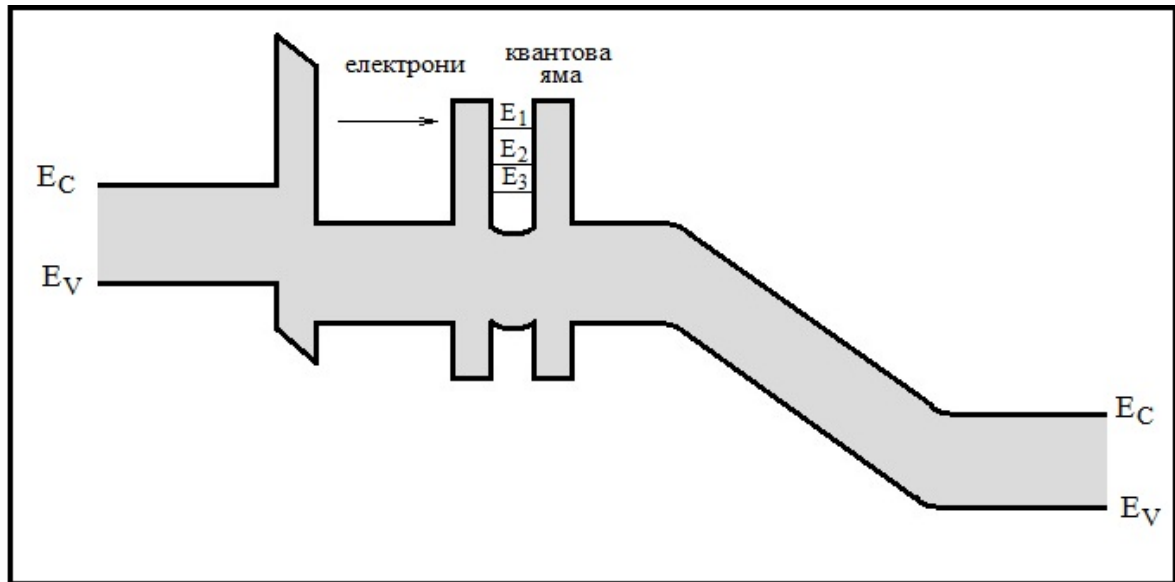


Рисунок 1.13 – Енергетична діаграма транзистора з резонансним тунелюванням з квантовою ямою у базовій області

Такі «дискретні» підсилювачі дозволяють створювати логічні вентиля з значно меншою кількістю елементів, ніж при використанні звичайних транзисторів. Наприклад, при використанні одного біполярного транзистора з резонансним тунелюванням і двох класичних транзисторів можна створити схему підсумовування, для побудови якої потрібно приблизно 40 транзисторів. Це дозволяє значно підвищити щільність розташування елементів створюваної схеми та її швидкодію [1].

1.4 Резонансно-тунельний транзистор на квантовій точці

Двобар'єрна резонансно-тунельна структура являє собою діодну, двоелектродну структуру. Такий резонансно-тунельний діод може бути використаний як окремий прилад при побудові електронних схем, так і як елемент більше складних транзисторних структур. У транзисторі на гарячих

електронах він використовується як бар'єр емітер – база. Такий резонансно-тунельний транзистор можна створити, якщо використовувати резонансне тунелювання не через двобар'єрну структуру, а через квантову точку (рис. 1.14).

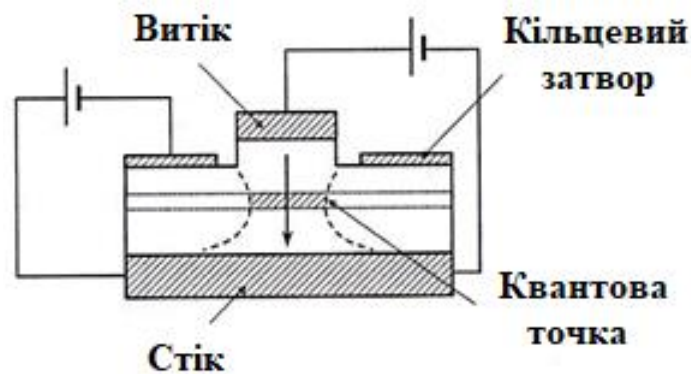


Рисунок 1.14 – Схематичне зображення структури резонансно-тунельного транзистора на основі квантової точки

Квантова точка має дискретний енергетичний спектр. На її основі можна виготовити резонансно-тунельний діод, якщо зв'язати її через тунельно-прозорі бар'єри із двома електродами. У цьому випадку виявляється можливим здійснити керування провідністю структури. Для цього необхідно мати спосіб зміни розмірів квантової точки. У такому випадку буде мінятися положення енергетичних рівнів у квантовій крапці - з'являється принципова можливість «включати» і «виключати» механізм резонансного тунелювання.

Центральний верхній електрод транзистора круглої форми з'єднується з нижнім електродом через двухбар'єрну резонансно-тунельну структуру із двовимірним електронним газом у центрі. Квантова точка в цій структурі утвориться за допомогою третього електрода – затвора, кільцем навколишній центральний верхній електрод. При подачі на нього негативного потенціалу електрони з області двовимірного газу під затвором витісняються до центра структури. Таким способом під центральним електродом може бути сформована квантова точка, поперечні розміри якої, а, отже, і положення енергетичних рівнів у ній визначаються величиною негативної напруги

на затворі. Зрушення рівнів приводить до зміни умов резонансного тунелювання. Положення ділянок від'ємного диференційного опору у вольт-амперній характеристиці між центральним і нижнім електродами залежить від напруги на затворі - такий прилад має більше широкі функціональні можливості, чим просто резонансно-тунельний діод.

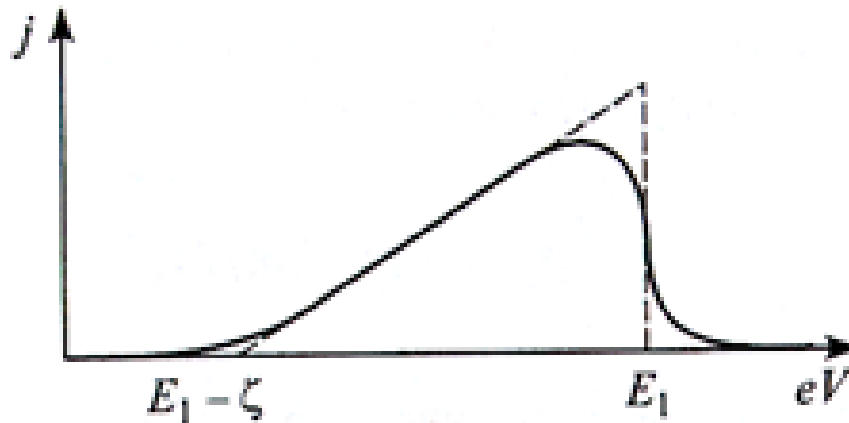


Рисунок 1.15 – ВАХ резонансно-тунельної структури для найпростішої моделі (штрихова крива) і з урахуванням розширення рівнів (суцільна крива)

На роботі резонансно-тунельного транзистора негативно позначається наявність неконтрольованих домішок і дефектів в області квантової точки й тунельних бар'єрів (рис. 1.15). Різні положення примісних атомів в області квантової точки для різних транзисторів приводить через перекручування локального потенціалу до значного розкиду характеристик транзисторів. Крім того, через електронні атомні рівні домішки теж може відбуватися резонансне тунелювання - вольт-амперна характеристика транзистора буде мати в цьому випадку піки, положення яких не залежить від напруги на затворі. Але резонансно-тунельні транзистори споживають дуже малу потужність на одне перемикання - у цьому їхня перевага.

2 ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ РАДІОТЕХНІЧНИХ ГЕНЕРАТОРНИХ ПРИБОРІВ НА ОСНОВІ ТУНЕЛЬНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР ІЗ ВІД'ЄМНИМ ДИФЕРЕНЦІЙНИМ ОПОРОМ

У розділі наведені елементи теорії для вивчення динаміки систем, що здійснюють розривні коливання, на прикладах мультивібратора, тригера, кіпп-реле (одновібратора).

Розривні коливання - це такі коливання, при яких порівняно повільні зміни стану системи чергуються з швидкими, «стрибкоподібними». Така поведінка обумовлена істотністю деяких малих параметрів на певних етапах коливального процесу. Ці малі параметри входять в диференціальні рівняння, що описують систему, як коефіцієнтів при старшій похідній. Нехтування ними призводить до зниження порядку рівняння (втрата полстепені свободи), і, отже, до «дефектної», «вироджених» динамічної моделі системи.

2.1 Рівняння систем з нелінійністю типу тунельного діода

Схеми, динаміка яких є предметом дослідження, містить в якості нелінійного елемента тунельні діоди. Вольт-амперна характеристика такого діода наведена на рисунку 2.1.

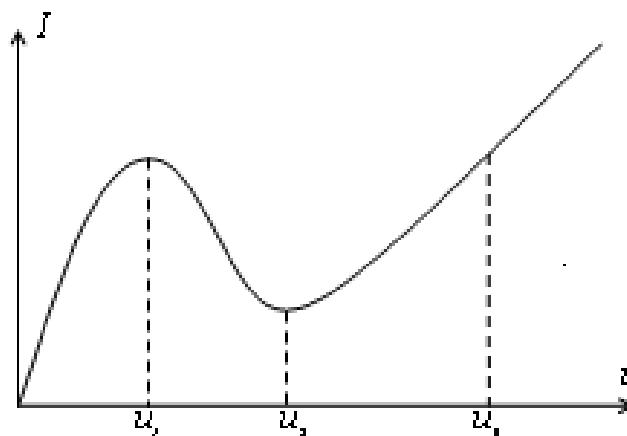


Рисунок 2.1 – Статична ВАХ тунельного діода

Характеристика має спадну ділянку ($u_1 < u < u_2$), на якому провідність тунельного діода є негативною величиною, що і дозволяє отримати розривні коливання.

Схема, виконана на тунельних діодах, наведена на рисунку 2.2, процеси в ній описуються наступними рівняннями

$$\begin{cases} \frac{c}{2} \frac{d(u-E)}{dt} + \frac{c}{2} \frac{du}{dt} + i + I(u) = I(E-u) \\ L \frac{di}{dt} = u - v \\ i = \frac{v-E}{2R} \end{cases} \quad (2.1)$$

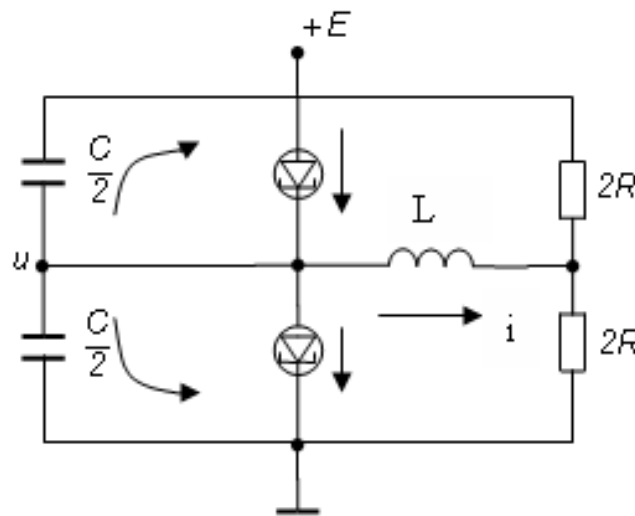


Рисунок 2.2 – Електрична схема імпульсного генератора на тунельному діоді

Якщо перейти до нових безрозмірних змінних

$$\tau = \frac{R}{L} t, \text{ параметр } \mu = \frac{cR^2}{L}, \quad x = \frac{z}{z_0}, \quad y = i \frac{R}{z_0},$$

$$\bar{\varphi}(z) = I\left(\frac{E}{2} - z\right) - I\left(\frac{E}{2} + z\right), \quad z = u - \frac{E}{2}, \quad z_0 = \frac{E}{2},$$

де I - струм через тунельний діод, отримаємо наступні рівняння

$$\begin{cases} \mu \dot{x} = \varphi(x) - y = F(x, y) \\ \dot{y} = x - y = G(x, y) \end{cases} \quad (2.2)$$

де

$$\varphi(x) = \frac{R}{z_0} \bar{\varphi}(z)$$

В системі, описуваної системою рівнянь (2.2), можливі розривні коливання, якщо

$$\mu \ll 1.$$

Це система з малим параметром при старшій похідній.

2.2 Стани рівноваги генераторів на тунельному діоді та їх стійкість

Розглянемо, який вигляд має функція $\varphi(x)$. Залежно від напруги живлення E буде мати місце один з випадків, зображених на рисунку 3.

Стану рівноваги системи (2.2) x_0, y_0 визначаються співвідношеннями

$$\begin{cases} F(x, y) = 0 \\ G(x, y) = 0 \end{cases}$$

або

$$\begin{cases} \varphi(x_0) = y_0 \\ x_0 = y_0 \end{cases}$$

тобто перетином кривої $y = \varphi(x)$ з бісектрисою $x = y$. Таким чином, як видно з рисунку 2.3, схема може мати від одного до п'яти рівноважних станів.

Характер станів рівноваги визначається корінням характеристичного рівняння, отриманого після лінеаризації системи (2.2)

$$\begin{aligned} x &= x_0 + \xi & y &= y_0 + \eta \\ \begin{cases} F(x, y) = F(x_0, y_0) + F'_x(x_0, y_0)\xi + F'_y(x_0, y_0)\eta + \dots \\ G(x, y) = G(x_0, y_0) + G'_x(x_0, y_0)\xi + G'_y(x_0, y_0)\eta + \dots \end{cases} \end{aligned}$$

Або

$$\begin{cases} \mu \dot{\xi} = \varphi'(x_0)\xi - \eta \\ \dot{\eta} = \xi - \eta \end{cases} \quad (2.3)$$

Характеристичне рівняння, отримане з умови $\Delta = 0$, тобто

$$\begin{vmatrix} \mu p - \varphi'(x_0) & 1 \\ 1 & p + 1 \end{vmatrix} = 0$$

де рішення рівнянь (2.3) шукають у вигляді $\xi, \eta \rightarrow A_{\xi, \eta} e^{pt}$, тобто

$$\mu p^2 + (\mu - S)p + (1 - S) = 0, \quad (2.4)$$

де $S = \varphi'(x_0)$ - крутизна функції $\varphi(x)$ в стані рівноваги.

Очевидно, що якщо стан рівноваги лежить на падаючому ділянці функції $\varphi(x)$, $S < 1$, то воно завжди стійко. За умови $S > 1$ стан рівноваги буде сідлом [1,3].

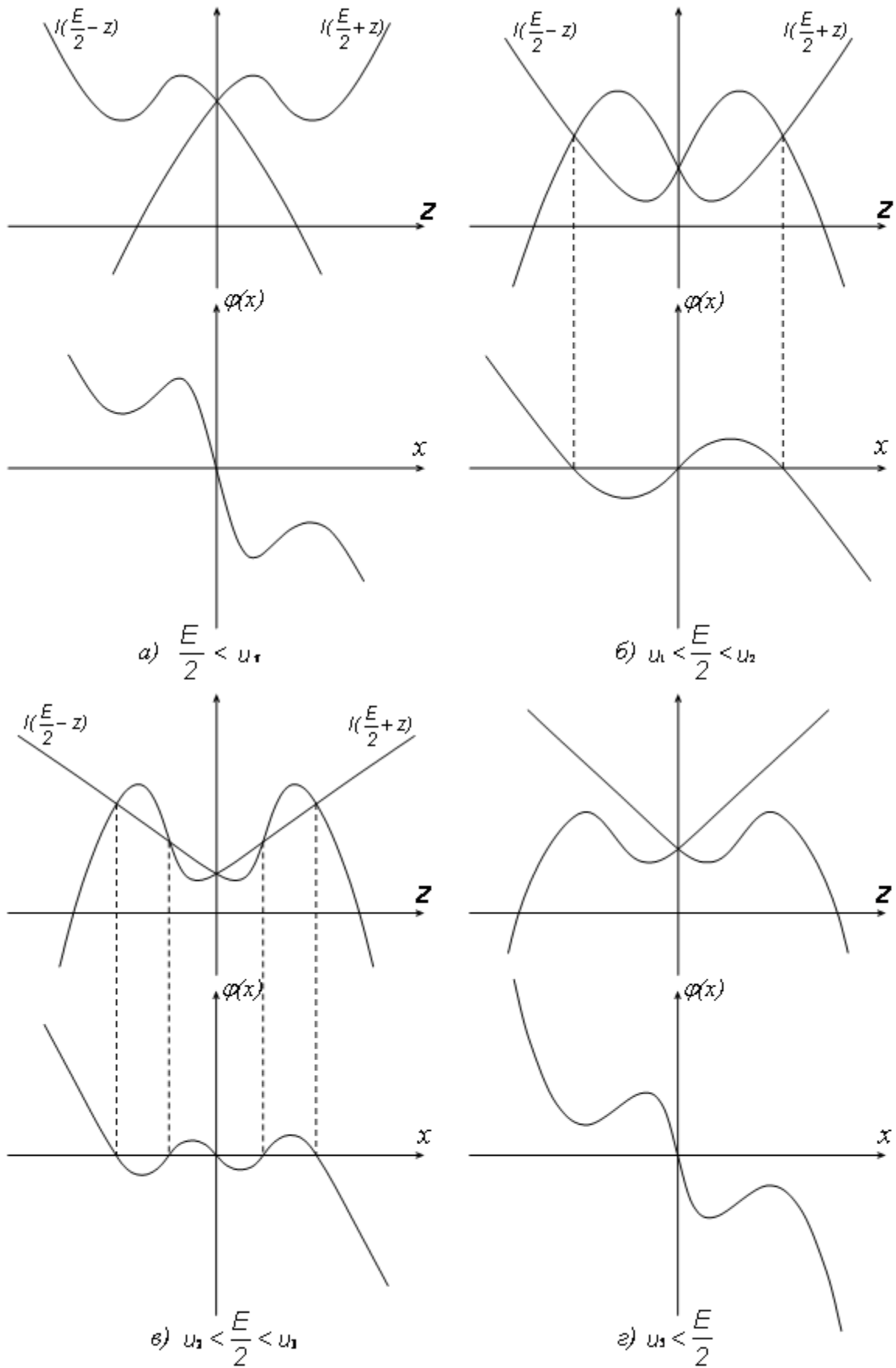


Рисунок 2.3 – Варіанти апроксимації статичних ВАХ тунельного діода

2.3 Розривні коливання мультивібратора

Розглянемо випадок, коли $\varphi(x)$ має вигляд, зображений на рисунку 2.3,б, а стан рівноваги єдине. Це відповідає умові $0 < S(0) < 1$ і тоді воно нестійке (с.р. буде завжди нестійка, оскільки $S > \mu$).

Система описується рівняннями (2.2)

$$\begin{cases} \mu \dot{x} = \varphi(x) - y = F(x, y) \\ \dot{y} = x - y = G(x, y) \end{cases} \quad (2.2)$$

За фазовий простір в цьому випадку приймемо звичайну декартову площину змінних x, y . Рівняння інтегральних кривих отримаємо, поділивши друге рівняння на перше

$$\frac{dy}{dx} = \frac{G(x, y)}{F(x, y)} = \frac{\mu(x - y)}{\varphi(x) - y} \quad (2.5)$$

Розглянемо розбиття на фазовій площині ВАХ на траєкторії при $\mu \rightarrow 0$ (рис 2.4).

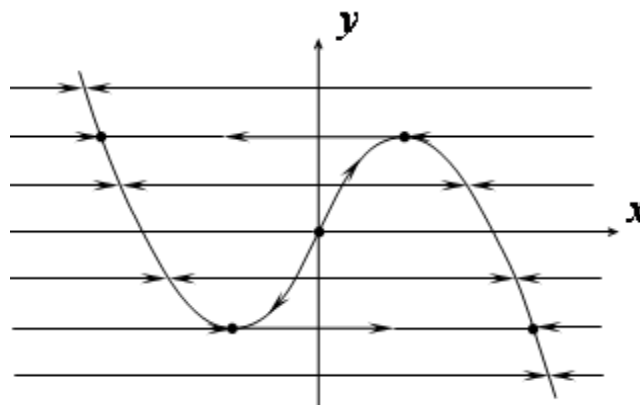


Рисунок 2.4 – Розбиття на фазовій площині ВАХ на траєкторії

Отримуємо поза кривої $y = \varphi(x)$ (знаменник не дорівнює нулю, а μ - мало) $\frac{dy}{dx} \rightarrow 0$, тобто фазові траєкторії будуть прямими $y = \text{const}$ (у «майже» не залежить x). Швидкість руху по ним

$$\dot{x} = \frac{\varphi(x) - y}{\mu} \rightarrow \infty,$$

причому, для $y < \varphi(x)$ $\dot{x} > 0$, тобто x - зростає, а при $y > \varphi(x)$ $\dot{x} < 0$ x - спадає.

Рівняння виду

$$\begin{cases} y = \text{const} \\ \mu \dot{x} = \varphi(x) - y \end{cases} \quad (2.6)$$

описують так звані «швидкі» руху системи. Напрямок руху визначається другим рівнянням. Ці наближені (тим точніші, чим менше μ) рівняння відображають динаміку системи тільки поза малій околиці кривої $y = \varphi(x)$.

Для наближених рівнянь (2.6) точки перетину кривої $y = \varphi(x)$ і кожної прямої $y = \text{const}$ є станами рівноваги, стійкими, якщо $\varphi'(x) < 0$ і нестійкими при $\varphi'(x) > 0$. Це означає, що для системи «швидких» рухів вся крива є геометричним місцем станів рівноваги.

Рухи в малій околиці кривої $\varphi(x)$, де $\varphi(x) \cong y$, називаються «повільними» рухами.

Вони відображаються наступними рівняннями

$$\begin{cases} \varphi(x) = y \\ \dot{y} = x - y \end{cases} \quad (2.7)$$

Крива «повільних» рухів визначається першим рівнянням, а напрямок руху на ділянках «повільних» рухів - з другого рівняння системи (2.7).

Якщо зображає точка системи, «повільно» рухаючись по траєкторії $y = \varphi(x)$, там, де $\varphi'(x) < 0$, (а тільки тут повільні рухи стійкі) приходить в одну з точок a_1 або a_2 , то далі вона виходить в область «швидких» рухів і стрибком потрапляє в точку b_1 (b_2) по траєкторії $y = const$, поки знову не прийде на траєкторію «повільного» руху. Замкнута крива є граничним циклом, що встановлюється при будь-яких початкових умовах. Така система є автоколебательной, генеруючої розривні коливання. Осцилограми коливань u і i наведені на рисунку 2. і у рівнянь (2.2) співвідношеннями 5. При цьому вихідні напруга u і ток i пов'язані з x і y рівнянь (2.2) співвідношеннями

$$x = \frac{u - E/2}{E/2}, \quad y = i \frac{R}{E/2}.$$

Якщо функція $\varphi(x)$ має вигляд, зображений на рисунку 3,в, тоді система (2.2) має єдиний стан рівноваги на початку координат і в цьому випадку воно стійко. Тоді в схемі має місце жорсткий режим збудження розривних коливань.

Розбиття фазовій площині на траєкторії для цього випадку зображено на рисунку 2.б.

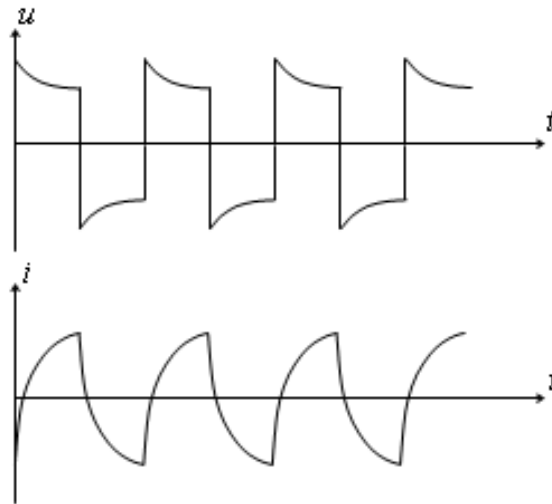


Рисунок 2.5 – Форми часових діаграм генерованих імпульсів напруги та струму

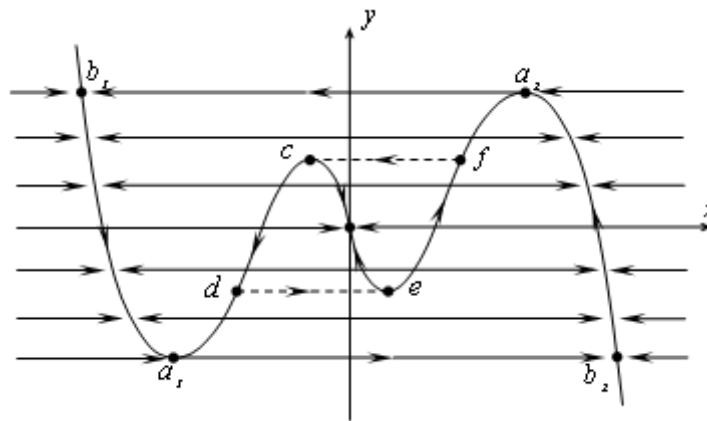


Рисунок 2.6 – Побудована траєкторія на фазовій площині генератора

Поряд зі стійким граничним циклом є нестійкий цикл і стійкий стан рівноваги.

2.4 Режим тригера імпульсного генератора на тунельному діоді

Тригером називається система, яка має два стійких стану рівноваги і одне нестійке і може бути перекинута з одного стану рівноваги до іншого подачею відповідного імпульсу напруги в відповідний вузол схеми. Тригери можуть

застосовуватися в лічильниках електричних імпульсів. Схема на рисунку 2.2 буде вести себе як тригер, якщо функція має вигляд $\varphi(x)$, зображений на рисунку 2.3,б, при цьому $S(0) = \varphi'(0) > 1$. Тоді, згідно з характеристическому рівняння (2.4), стан на початку координат буде сідлом, а два інших (оскільки $\mu \ll 1$) стійкими вузлами. Система як і раніше описується рівняннями

$$\begin{cases} \mu \dot{x} = \varphi(x) - y \\ \dot{y} = x - y \end{cases} \quad (2.2)$$

Розбиття фазової площини на траєкторії «швидких» і «повільних» рухів зображено на рисунку 2.7. Залежно від початкових умов схема буде знаходитися в тому або іншому стані рівноваги і може бути переведена в інший стан подачею прямокутного імпульсу.

Будемо вважати, що система перебувала в стані рівноваги «1» (рис 2.8), при цьому форма кривої має вигляд (I).

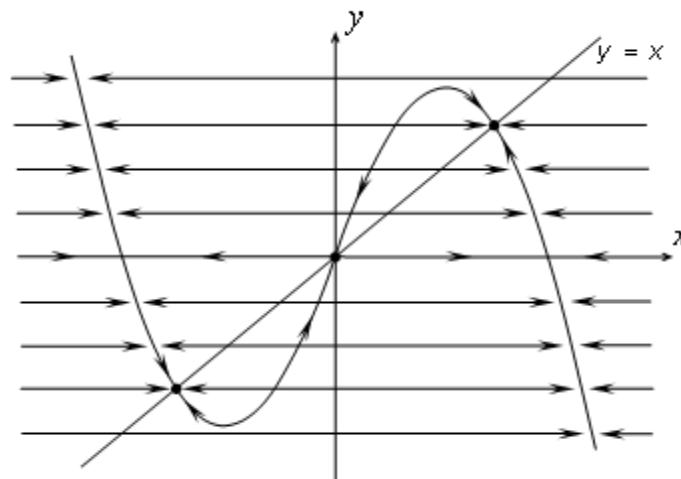


Рисунок 2.7 – Розбиття фазової площини на траєкторії «швидких» і «повільних» рухів

При подачі імпульсу, що еквівалентно зміни напруги живлення E , характеристика $\varphi(x)$ змінює вид, приймаючи форму (II). В цьому випадку залишається єдине нестійкий стан рівноваги на початку координат (режим мультівібратора). Зображає точка з положення 1 рухатиметься «швидким» рухом по траєкторії 1-3. Мінімальна тривалість імпульсу τ_{\min} , необхідна для переходу тригера в стан рівноваги 2 визначається часом проходження точки «а», інакше точка повернеться назад в стан 1 після зняття зовнішнього імпульсу.

Якщо після проходження точки а імпульс не знімається, то подальший рух аналогічно руху, відповідному режиму мультівібратора. Це «швидке» рух 1-3, потім «повільне» рух в точку 4 і знову стрибок в точку b. Якщо тепер зняти імпульс, то система потрапить в попереднє положення 1. З цих міркувань очевидно, що максимально допустима тривалість імпульсу, що запускає визначається часом «повільного» руху на ділянці 3-4 (після точки 4 точка «зривається» по «швидким» рухам). Це час називається час дозволу тригера.

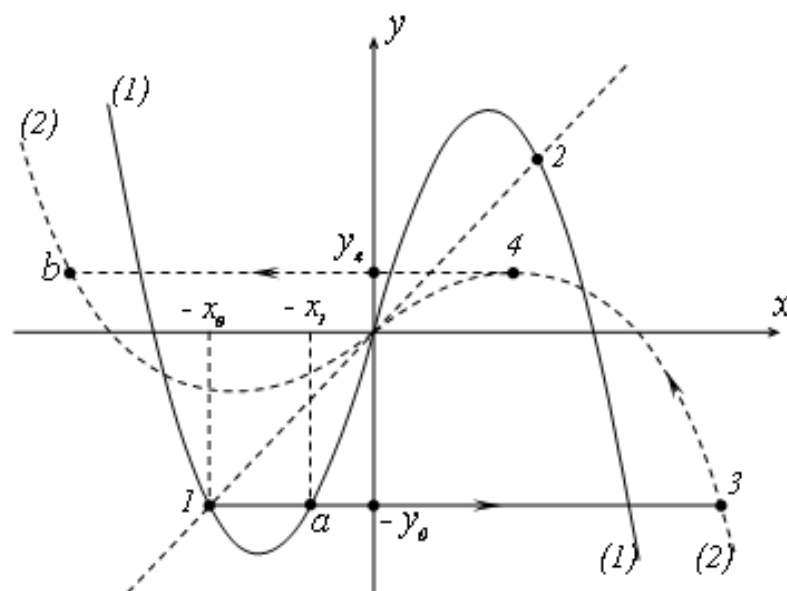


Рисунок 2.8 – Траєкторії «швидких» і «повільних» рухів на фазовій площині генератора

Якщо період проходження імпульсів істотно менше часу дозволу тригера, наприклад в два рази, то можна отримати «розподіл частоти» на тригері. Це означає, що на два поданих запускають імпульсу, схема переходить з одного стану рівноваги в інше.

2.5 Динаміка кіпп-реле (одновібратора) на тунельному діоді

Кіпп-реле (одновібратор, часто його називають спусковий схемою) має єдине стійке стан рівноваги. Якщо на його вхід подати короткий зовнішній імпульс, то з виходу можна зняти широкий прямокутний імпульс, тривалість якого визначається тільки параметрами самої схеми. При подачі зовнішнього імпульсу схема робить одне коливання, а потім знову повертається в стійкий стан. Такі схеми знаходять застосування в якості схем затримки, генераторів «чекає» розгортки в осцилографах і т.д.

Схема одновібратора, виконана на тунельному діоді в якості нелінійного елемента, зображена на рисунку 2.9 і описується рівняннями

$$\begin{cases} L \frac{di}{dt} + Ri = E - u \\ I(u) + c \frac{du}{dt} = i + i_{imp} \end{cases} \quad (2.8)$$

де $I(u)$ - характеристика тунельного діода.

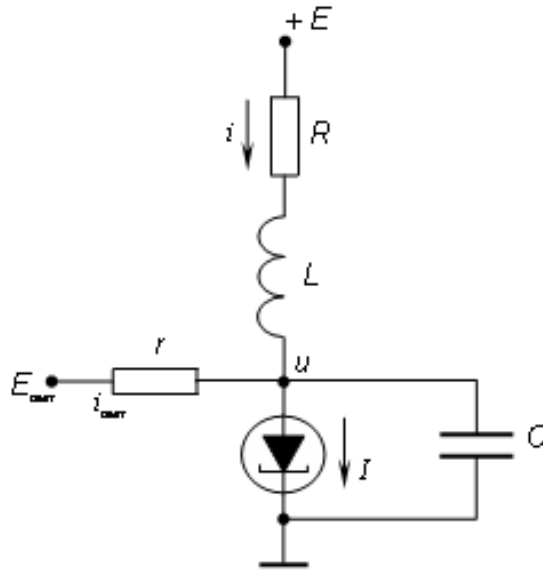


Рисунок 2.9 – Електрична схема одновібратора на тунельному діоді

Ввівши безрозмірні позначення

$$\tau = \frac{R}{L}t, \quad \mu = \frac{cR^2}{L} \ll 1, \quad x = \frac{u}{E}, \quad y = \frac{Ri}{E}, \quad \varphi(x) = \frac{R}{E}I(u), \quad e = \frac{i_{imp}R}{E},$$

отримаємо

$$\begin{cases} \mu \dot{x} = y - \varphi(x) + e \\ \dot{y} = 1 - x - y \end{cases} \quad (2.9)$$

При $e = 0$ (зовнішній сигнал відсутній) схема знаходиться в стійкому стані рівноваги (рис 2.10), координати якого визначаються співвідношеннями

$$\begin{cases} y = \varphi(x_0) \\ y_0 = 1 - x_0 \end{cases} \quad (2.10)$$

Уравнения «быстрых» движений имеют вид

$$\begin{cases} y = const \\ \mu \dot{x} = y - \varphi(x) \end{cases} \quad (2.11,a)$$

Рівняння «повільних» рухів

$$\begin{cases} y = \varphi(x) \\ \dot{y} = 1 - x - y \end{cases} \quad (2.11,b)$$

Перше рівняння в (2.11,b) визначає траєкторію руху, друге дає закон руху і напрямок руху зображає точки по траєкторії.

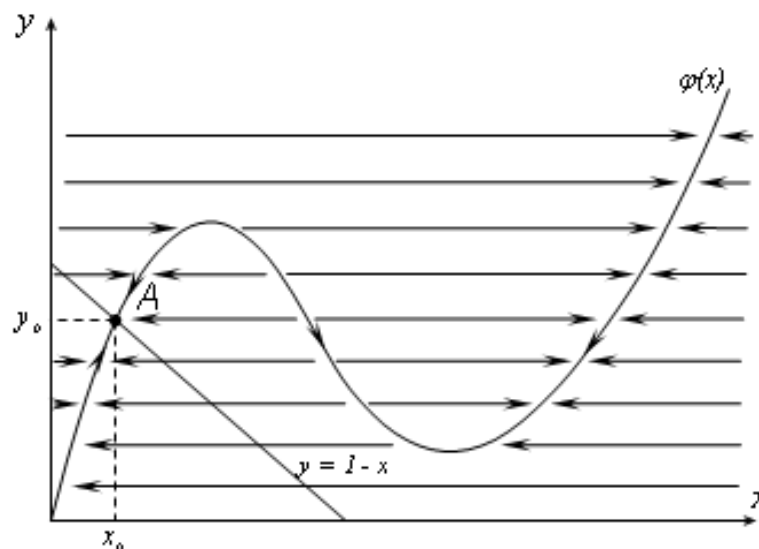


Рисунок 2.10 – Переміщення робочої точки в стані рівноваги по ВАХ тунельного діода

При подачі позитивного імпульсу ($e > 0$) стан рівноваги зміщується в точку В (рис 2.11), координати якої визначаються рівняннями

$$\begin{cases} \bar{y} = \varphi(\bar{x}) - e \\ \bar{y} = 1 - \bar{x} \end{cases} \quad (2.12)$$

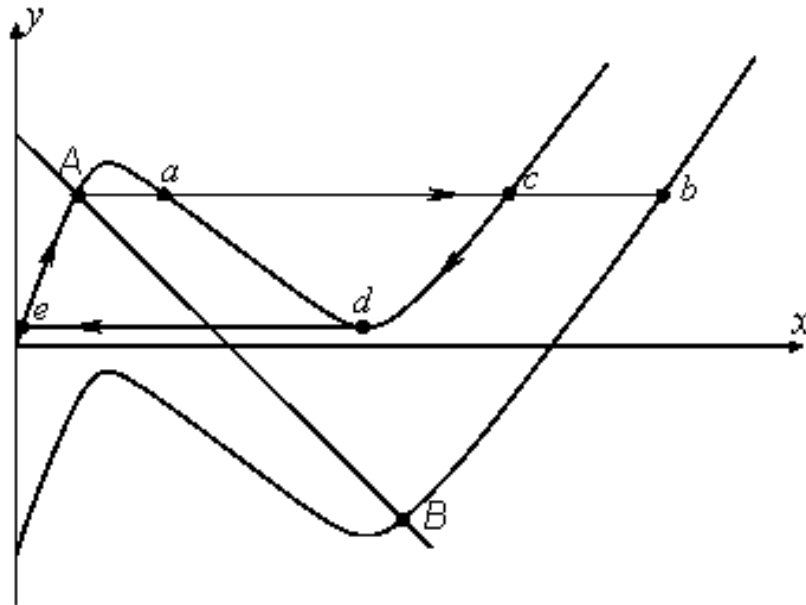


Рисунок 2.11 – Навантажувальна пряма та динамічна ВАХ тунельного діода
одновібратора

При цьому зображає точка з положення A , в якій система знаходилася до подачі імпульсу, буде рухатися «швидким» рухом в точку « b », а потім по траєкторії «повільних» рухів до нового стану рівноваги B . Якщо зовнішній імпульс досить короткий (закінчується раніше, ніж зображає точка дійде до точки « b »), то після його закінчення система приходить в точку « c », а потім по «повільним» і «швидким» рухам повертається в стан A і готова до наступного імпульсу. Осцилограма напруги зображена на рисунку 2.12. Очевидно, що тривалість імпульсу, що запускає повинна бути більше часу «швидкого» руху $A-a$. Тривалість вихідного імпульсу визначається часом руху $c-d$ і залежить тільки від параметрів схеми. Якщо тривалість імпульсу, що запускає сильно відрізняється від заданих, система перестає працювати як формувач імпульсів.

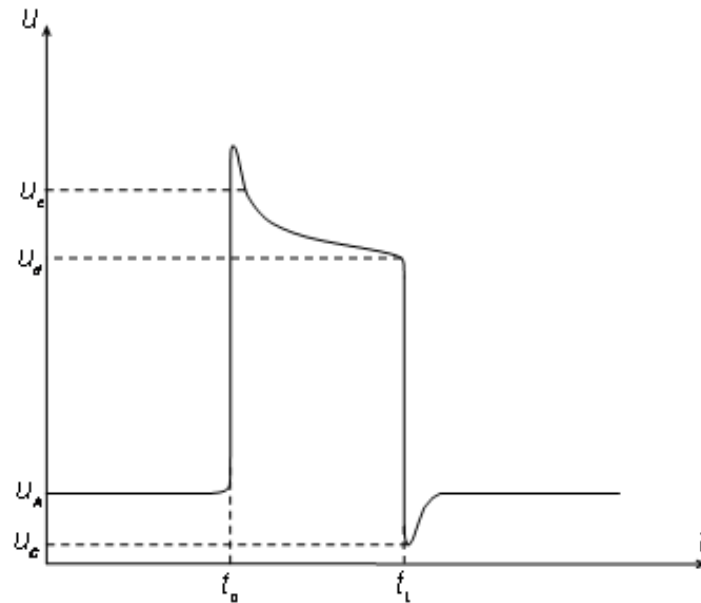


Рисунок 2.12 – Форма генерованих імпульсів напруги

Амплітуда імпульсу, що запускає повинна бути досить великою, щоб стан рівноваги В потрапило на другу зростаючу гілку характеристики тунельного діода.

2.6 Висновки до розділу

У розділі здійснено огляд основних схем і принципів побудови імпульсних генераторів на основі тунельних діодів. Наведено формули розрахунку основних параметрів і характеристик, а також графіки та діаграми, які пояснюють принцип їх роботи. Основний метод, який використано при якісному дослідженні фізичних процесів, що відбуваються в імпульсних генераторах на основі тунельних діодів – це метод фазової площини.

3 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРА ДЕТЕРМІНОВАНОГО ХАОСУ НА ОСНОВІ ТУНЕЛЬНОГО ДІОДА З РЕЗОНАНСНОЮ СИСТЕМОЮ НА ЗОСЕРЕДЖЕНИХ ЕЛЕМЕНТАХ

3.1 Розробка електричної схеми генератора детермінованого хаосу на тунельному діоді

Класичним прикладом хаотичної автоколивальної системи є генератор Чуа [29]. Динамічні властивості такого осцилятора зумовлені діодом Чуа [29]. У роботі [30] розглянуто генератор Чуа на основі тунельного діоду. Проведено теоретичні розрахунки хаотичного генератора на тунельному діоді за допомогою математичної моделі генератора Чуа [30]. Для експериментальної перевірки у Multisim 10.1 були зібрані схема осцилятора та вимірювальне обладнання, як показано на рис. 3.1 (Додаток Б, 08-32.БДР.006.00.001 ПЛ).

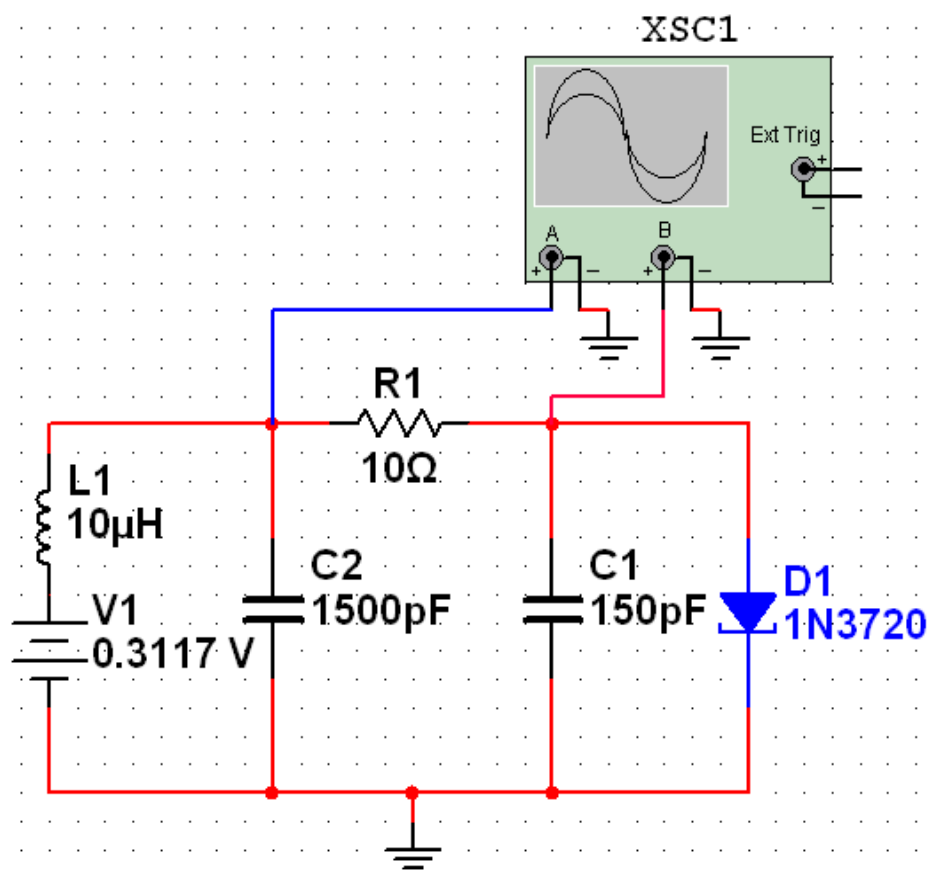


Рисунок 3.1 - Електрична схема генератора детермінованого хаосу

3.2 Розрахунок параметрів автоколивальної системи генератора

Рівняння, що моделюють це коло мають вигляд [21, 22]

$$\begin{cases} \frac{dV_{C1}}{dt} = \frac{1}{RC_1}(V_{C2} - V_{C1}) - \frac{1}{C_1}G(V_{C1}), \\ \frac{dV_{C2}}{dt} = \frac{1}{RC_2}(V_{C1} - V_{C2}) + I_L, \\ \frac{dI_L}{dt} = -\frac{1}{L}V_{C2}, \end{cases} \quad (3.1)$$

де V_{C1} і V_{C2} напруги на конденсаторах C_1 і C_2 , I_L - струм, що протікає через котушку L , а $G(V_{C1})$ - рівняння апроксимації статичної ВАХ тунельного діода.

Заміною реального часу на нормований $\tau=t/(RC_2)$ система (3.1) перетвориться до вигляду

$$\begin{cases} \frac{dx}{d\tau} = \alpha(y - f(x)), \\ \frac{dy}{d\tau} = x - y + z, \\ \frac{dz}{d\tau} = -\beta y. \end{cases} \quad (3.2)$$

Тут введені наступні позначення безрозмірних змінних і параметрів:

$$x=V_{C1}/E, \quad y=V_{C2}/E, \quad z=I_LR/E, \quad \alpha=C_2/C_1, \quad \beta=R^2C_2/L. \quad (3.3)$$

3.3 Результати теоретичних розрахунків

Еквівалентна схема генератора детермінованого хаосу на основі тунельного діода має вигляд, поданий на рис. 3.2.

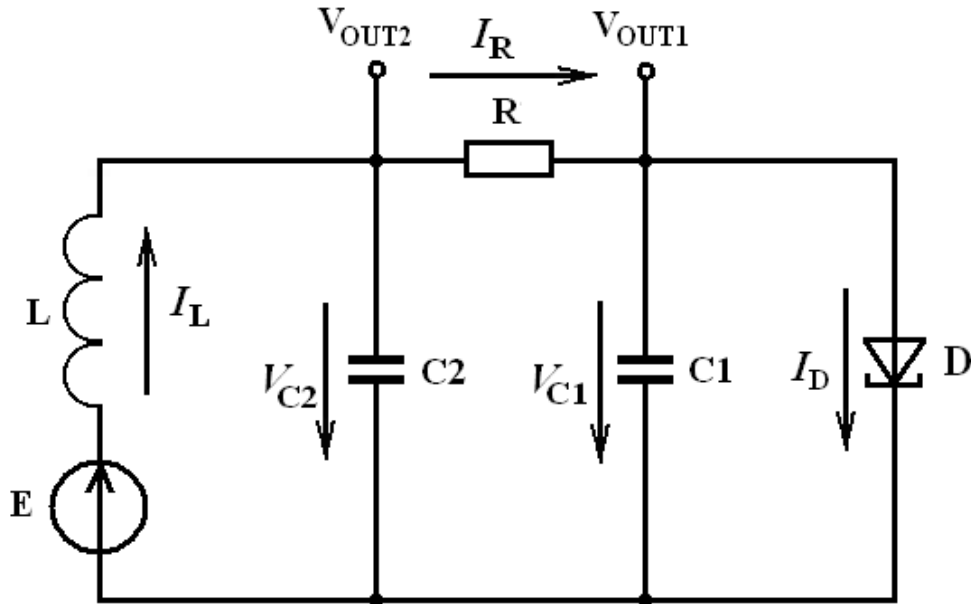


Рисунок 3.2 – Еквівалентна схема генератора

Система рівнянь Кірхгофа для схеми на рис. 3.7 має вигляд

$$\begin{cases} C_1 \frac{dV_{C1}}{dt} = \frac{1}{R}(V_{C2} - V_{C1}) - I_D(V_{C1}), \\ C_2 \frac{dV_{C2}}{dt} = I_L - \frac{1}{R}(V_{C2} - V_{C1}), \\ L \frac{dI_L}{dt} = E - V_{C2}, \end{cases} \quad (3.4)$$

де $I_D(V_{C1})$ - рівняння апроксимації статичної ВАХ тунельного діода.

Математична модель генератора детермінованого хаосу відносно безрозмірного часу

$$\tau = \frac{t}{R \cdot C_2}, \quad (3.5)$$

має вигляд

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = \alpha(x_2 - x_1 - a \cdot f(x_1)), \\ \frac{dx_2}{dt} = x_3 - x_2 + x_1, \\ \frac{dx_3}{dt} = \beta(b - x_2), \end{cases} \quad (3.6)$$

де $f(x)$ - нормована функція (3.7) апроксимації ВАХ тунельного діода степеневим поліномом 3-го порядку, графік якої поданий на рис. 3.3.

$$f(x) = 8.592x - 22x^2 + 14.408x^3. \quad (3.7)$$

Математична модель наведена у Додатку В (08-32.БДР.006.00.002 ПЛ).

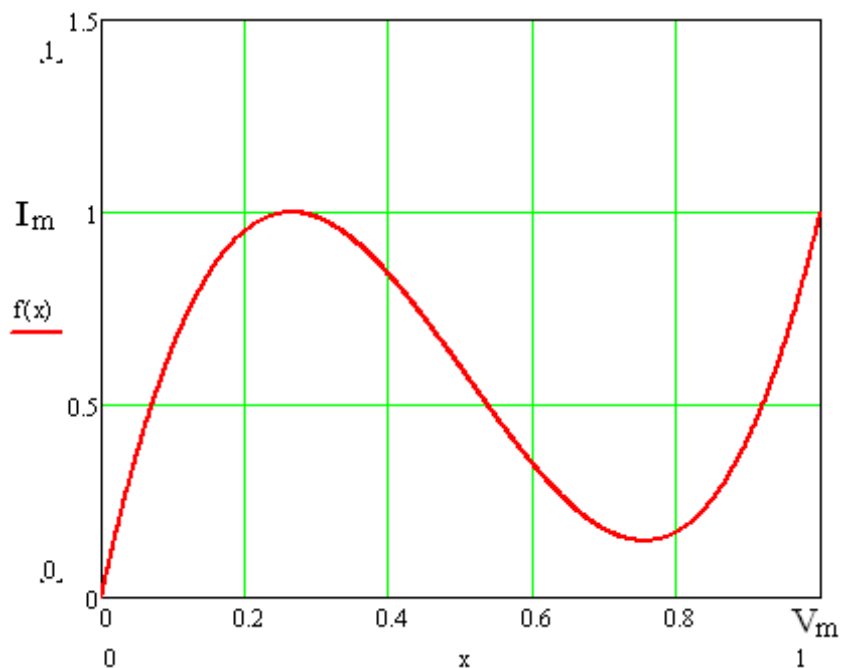


Рисунок 3.3 – Графік апроксимованої функції $f(x)$

У системі диференціальних рівнянь нормовані змінні мають вигляд

$$x_1 = \frac{V_{C1}}{V_m}, x_2 = \frac{V_{C2}}{V_m}, x_3 = \frac{I_L \cdot R}{V_m}. \quad (3.8)$$

Коефіцієнти системи диференціальних рівнянь обраховують по формулах

$$a = \frac{R \cdot I_m}{V_m}, \alpha = \frac{C_2}{C_1}, b = \frac{E}{V_m}, \beta = \frac{R^2 C_2}{L}. \quad (3.9)$$

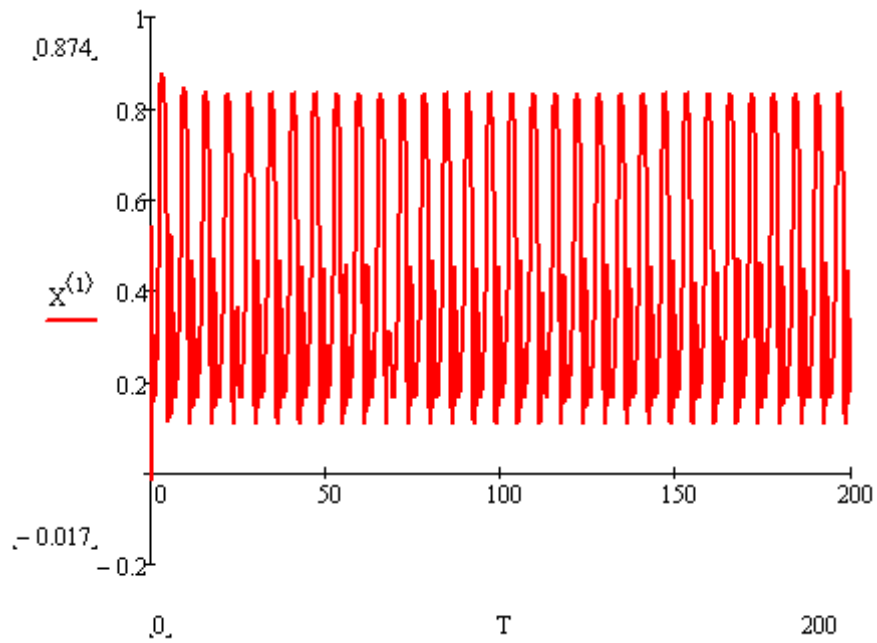
Чисельні обчислення здійснені за допомогою програмного забезпечення для таких MathCad 15.0 при таких значеннях параметрів схеми генератора на рис. 3.7: $C_1 = 150$ пФ, $C_2 = 1500$ пФ, $R_1 = 10$ Ом, $L_1 = 100$ нГн, $V_1 = 0.3117$ В, $V_m = 0.51$ В, $I_m = 22$ мА, $E = 0.3117$ В. На рис. 3.4 наведені часові діаграми генерованих електричних коливань. Фазові портрети генератора детермінованого хаосу на основі тунельного діода показані на рис. 3.5.

Також у роботі розраховані показники Ляпунова для динамічної системи (3.6). В системі були визначені хаотичні коливання. Результати розрахунку наведені в таблиці 3.1. Номери рядків відповідають параметрам математичного моделювання для: 1) $E = 0,3117$ В; 2) $E = 0,34$ В; 3) $E = 0,37$ В; 4) $E = 0,388$ В. Як видно з таблиці 3.1 коливання у режимах: 1) періодичні; 2) і 3) квазіперіодичні, 4) хаотичні.

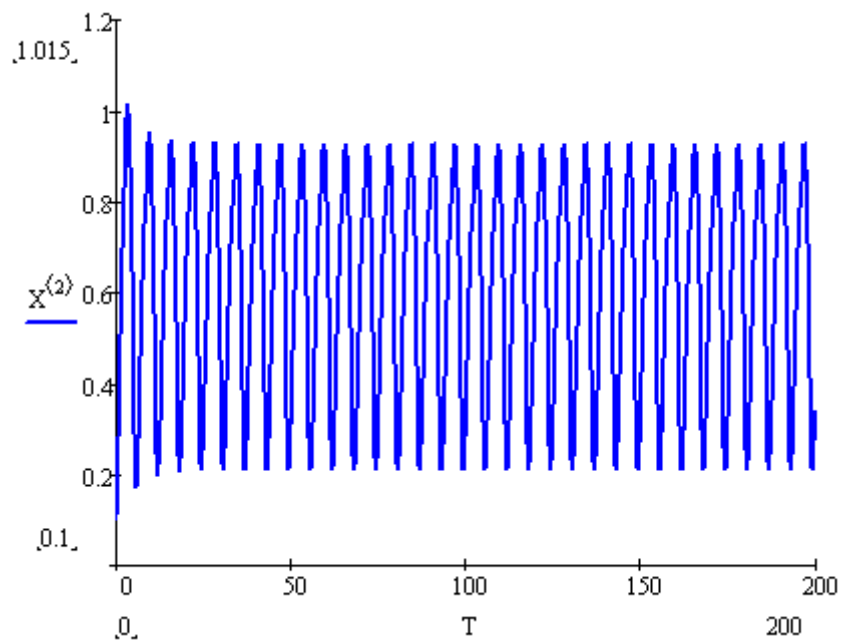
Таблиця 3.1 – Значення показників Ляпунова в різних режимах роботи

№	Показники Ляпунова		
	λ_1	λ_2	λ_3
1)	$-1.3018382 \cdot 10^0$	$-1.6004798 \cdot 10^0$	$-2.5325262 \cdot 10^1$
2)	$-1.4031918 \cdot 10^{-1}$	$-4.2997792 \cdot 10^{-1}$	$-2.5178240 \cdot 10^1$
3)	$-1.3088539 \cdot 10^{-1}$	$-4.4810237 \cdot 10^{-1}$	$-2.5151386 \cdot 10^1$
4)	$1.3122501 \cdot 10^{-1}$	$-4.5105659 \cdot 10^{-1}$	$-2.5049510 \cdot 10^1$

Результати теоретичних розрахунків і досліджень наведені у Додатку Д (08-32.БДР.006.00.003 ПЛ).



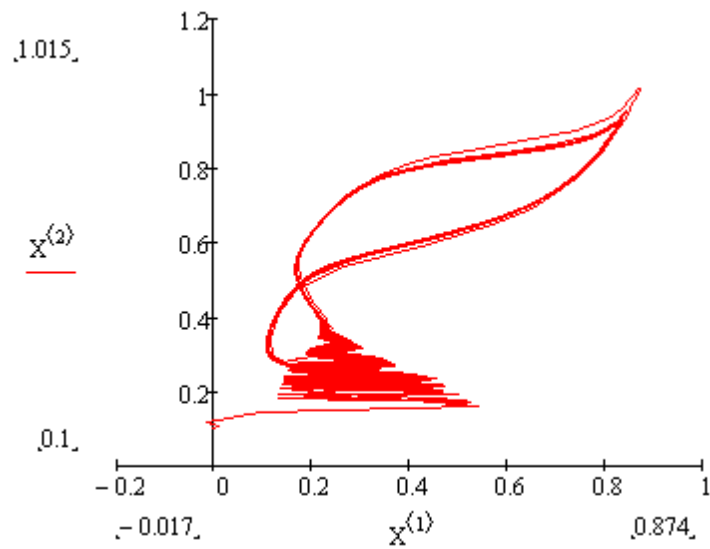
а)



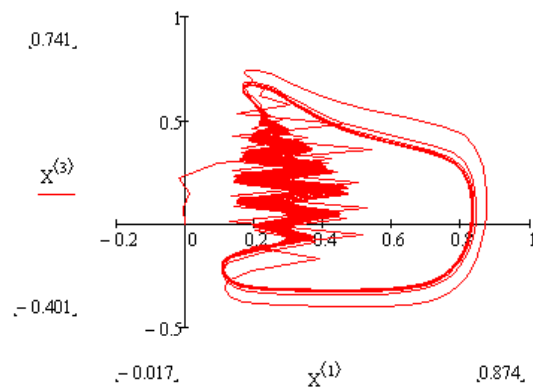
б)

Рисунок 3.4 – Часові діаграми генерованих електричних коливань детермінованого хаосу в генераторі на основі тунельного діода

Результати математичного моделювання наведені у Додатку Е (08-32.БДР.006.00.004 ПЛ).



а)



б)

Рисунок 3.5 – Фазові портрети генератора детермінованого хаосу на основі тунельного діода в площинах нормованих змінних: а) x_1 - x_2 і б) x_1 - x_3

3.4 Розробка комп'ютерної моделі генератора детермінованого хаосу на основі тунельного діода

У роботі [30] зазначено, що динаміка хаотичних коливань генератора на основі тунельного діода забезпечує атрактор типу "подвійний завиток".

Експериментальні дослідження, отримані в роботі, не підтвердили цього твердження. Електрична схема генератора та вимірювальне обладнання для експериментальної перевірки були складені в Multisim 10.1, як показано на рис. 4.6 та наведені у Додатку Ж (08-32.МКР.006.00.005 ПЛ).

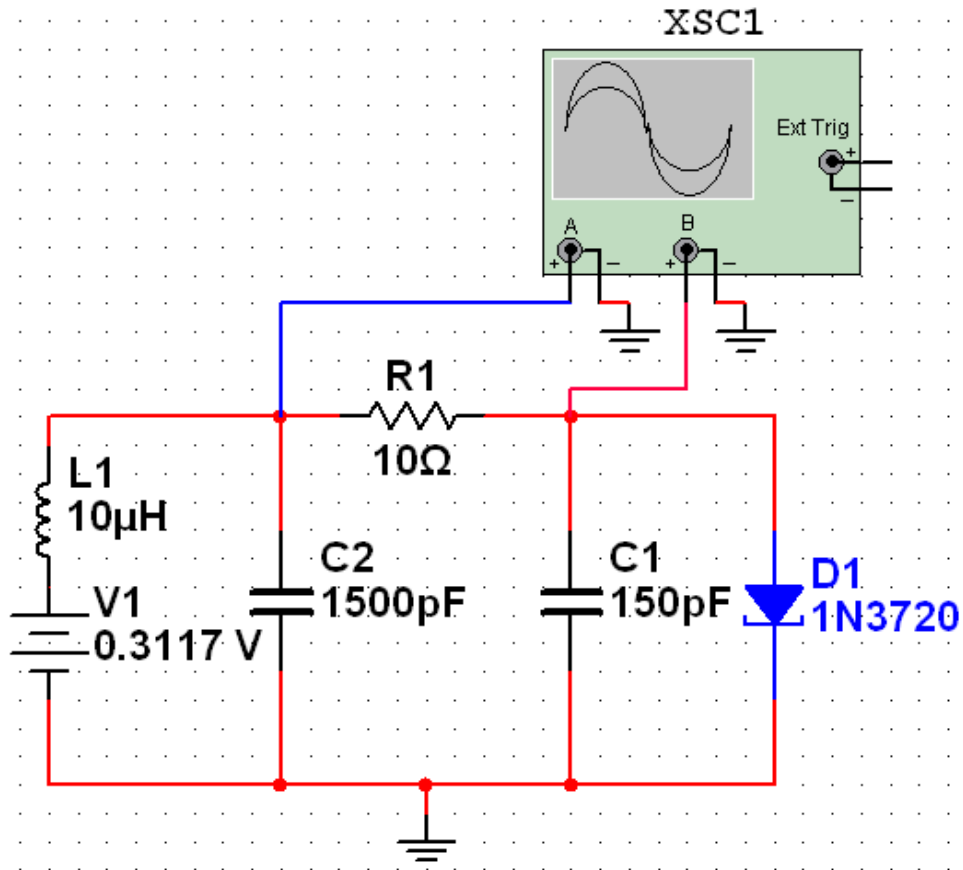


Рисунок 3.6 - Електрична схема генератора детермінованого хаосу в програмі Multisim 10.1 з підключеним вимірювальним обладнанням

3.5 Результати комп'ютерного моделювання пристрою

Номінальні значення, що розглянуті в [30], використовувались як параметри компонентів: $C1 = 150$ пФ, $C2 = 1500$ пФ, $R1 = 10.67$ Ом, $L1 = 10.68$ нГн, $V1 = 0.3117$ В, $VD1$ – діод типу 1N3720. Випробування в Multisim 10.1 показали, що при зазначених номінальних значеннях самозбуджених коливань,

що змінюються у часі, не виникають в осциляторі на рис. 3.6. Для збудження хаотичного режиму було змінено номінальні значення таких компонент: $R1 = 10 \text{ Ом}$, $L1 = 10 \text{ мкГН}$ (рис. 3.6). Генеровані хаотичні сигнали - напруга конденсаторів $C1$ і $C2$. Результати експериментальних досліджень представлені на рис. 3.7 – рис. 3.13. Результати комп'ютерного схемотехнічного моделювання наведені у Додатку Ж (08-32.МКР.006.00.005 ПЛ).

На рисунку 3.7 представлений фазовий портрет генератора в площині напруг $V_{C1}-V_{C2}$ (нормовані змінні x_1-x_2). Періодичні коливання генеруються в цьому режимі. Квазіперіодичні коливання в осциляторі, фазовий портрет якого в площині $V_{C1}-V_{C2}$ показано на рис. 3.8, обумовлені зміною напруги живлення до значення $E = 0,34 \text{ В}$. Як видно на рис. 3.8, у квазіперіодичному режимі фазовий портрет складається з кількох атракторів (на рис. 3.8 присутні 2 граничні цикли атрактору).

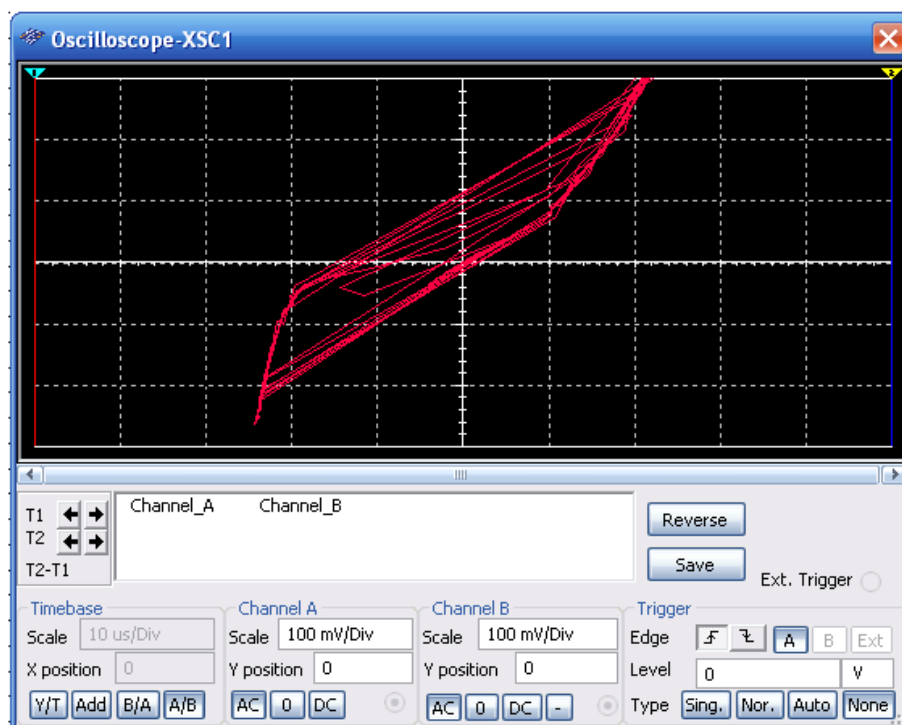


Рисунок 3.7 – Фазові портрети генератора в періодичному режимі
при $E = 0.3117 \text{ В}$

Хаотичні коливання в генераторі, фазовий портрет якого в площині V_{C1} - V_{C2} показано на рис. 3.9, обумовлені зміною напруги живлення до значення $E = 0,388$ В. Як видно на рис. 3.9, в хаотичному режимі фазовий портрет складається з кількох аттракторів (на рис. 3.9 присутні 3 граничні цикли атрактора). Робоча точка рухається від одного граничного цикла атрактора до іншого, що має багато траєкторій.

Осцилограми генерованих хаотичних напруг V_{C1} і V_{C2} показані на рис.3.12. На рисунку 3.13 показані амплітудно-частотні спектри генерованих хаотичних напруг V_{C1} та V_{C2} .

Графіки амплітудно-частотного спектру генерованих хаотичних коливань наведено на рис. 3.32.

Як видно з експериментальних результатів на рис. 3.7 - рис. 3.12, зміна значення напруги живлення ефективно впливає на сформовану динаміку коливань.

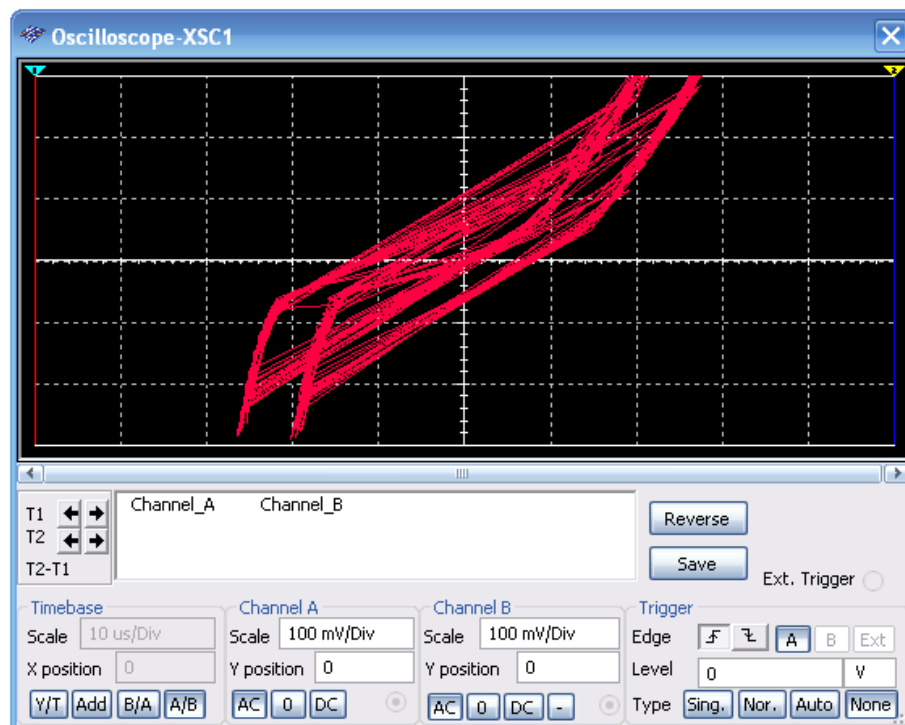


Рисунок 3.8 – Фазовий портрет генератора в квазіперіодичному режимі при $E = 0,34$ В

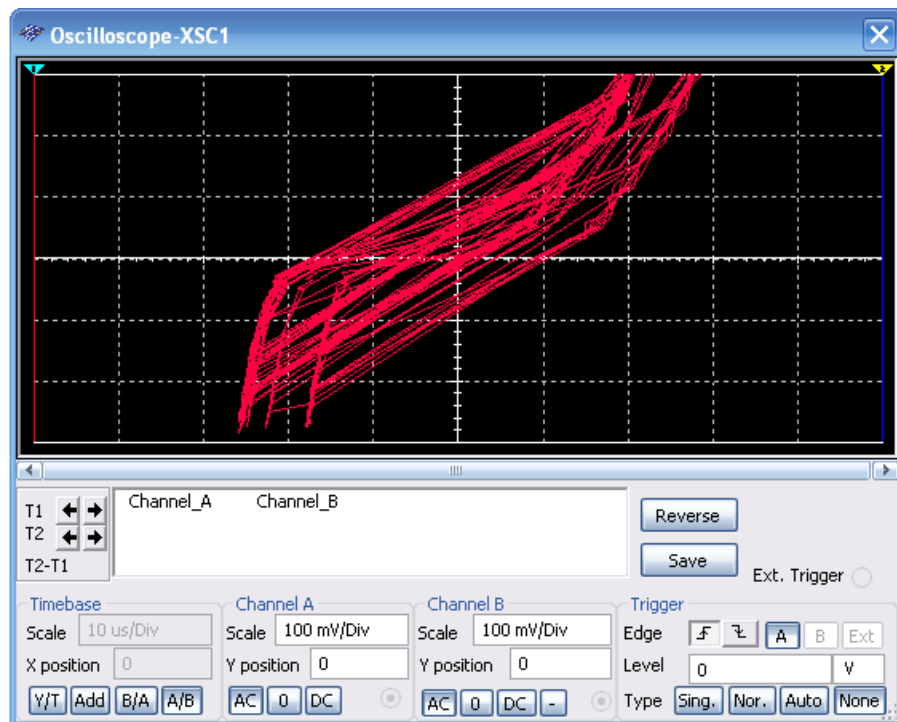


Рисунок 3.9 – Фазові портрети генератора в хаотичному режимі при $E = 0,388 \text{ В}$

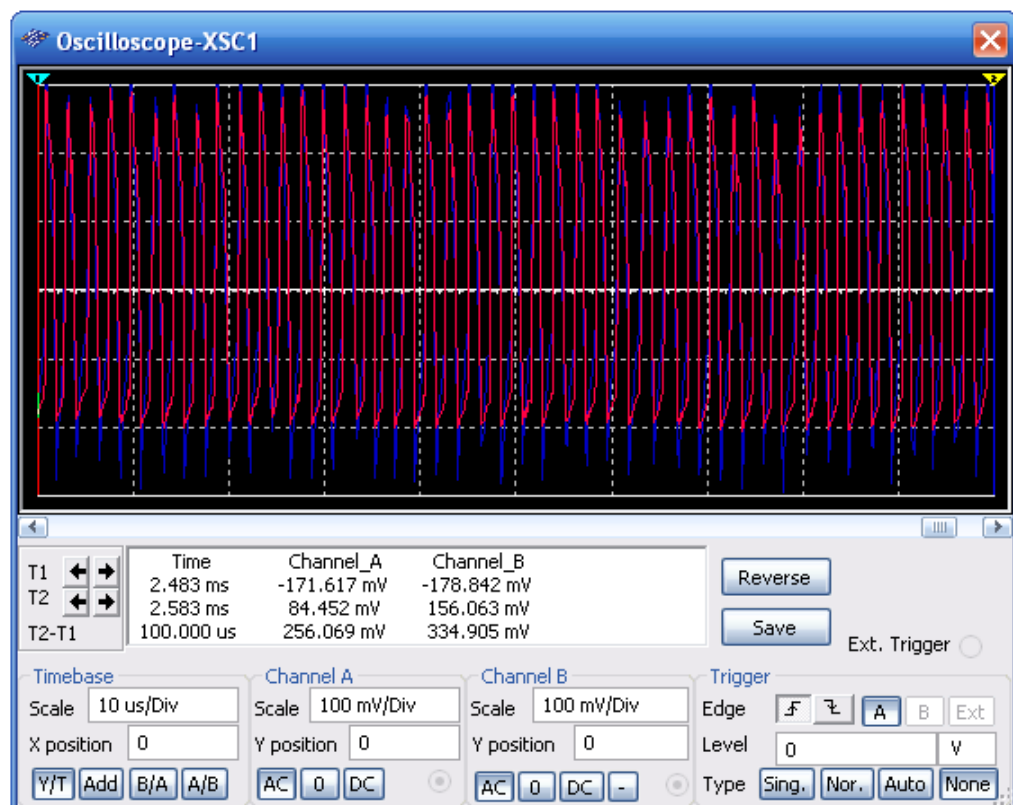


Рисунок 3.10 – Генеровані електричні коливання напруг V_{OUT2} and V_{OUT1} у періодичному режимі

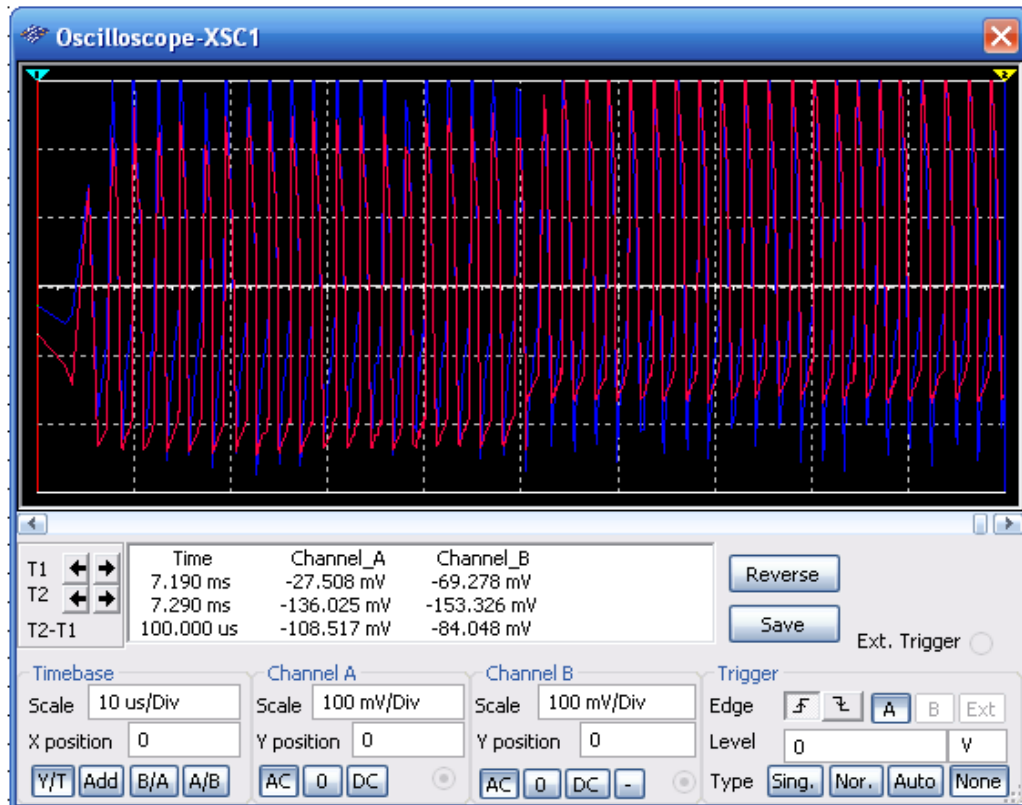


Рисунок 3.11 – Генеровані електричні коливання напруг V_{out2} and V_{out1} у квазіперіодичному режимі

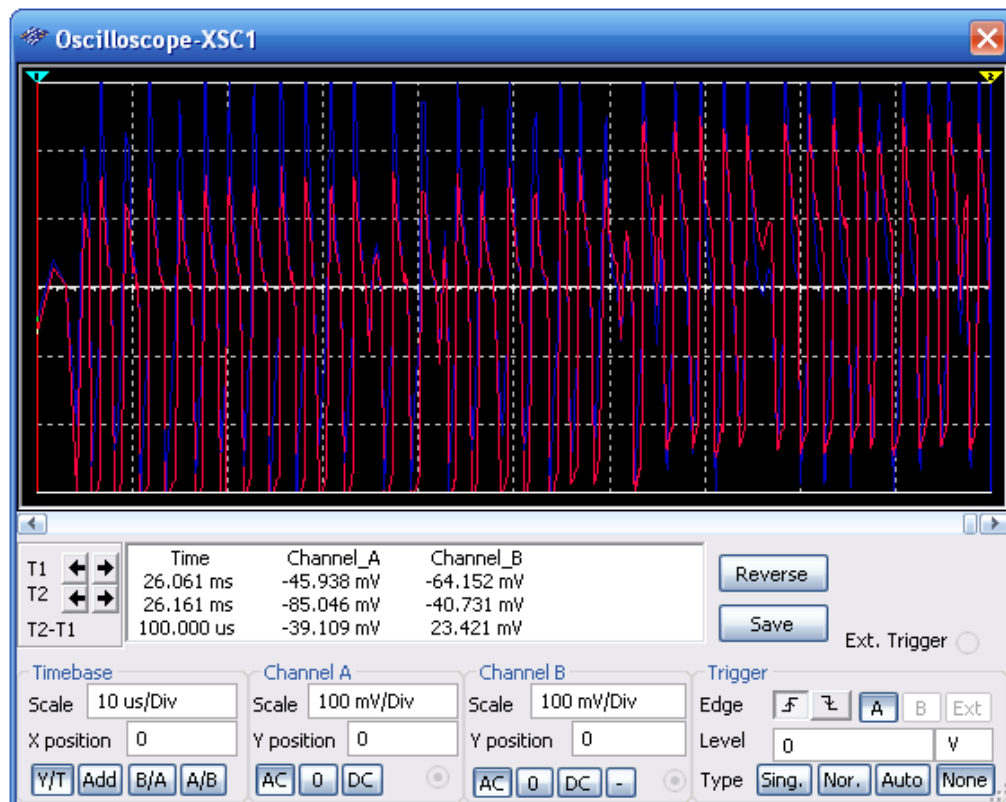
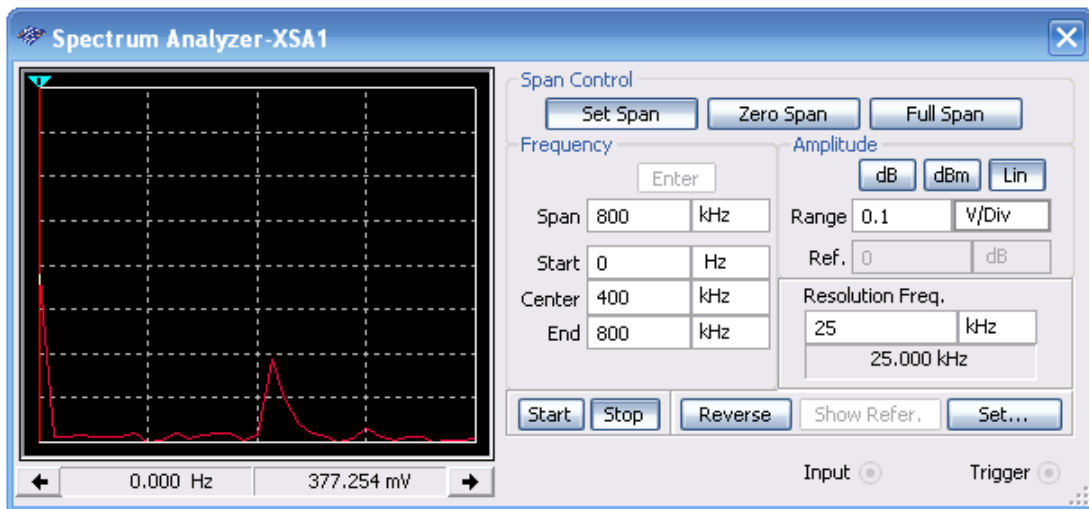
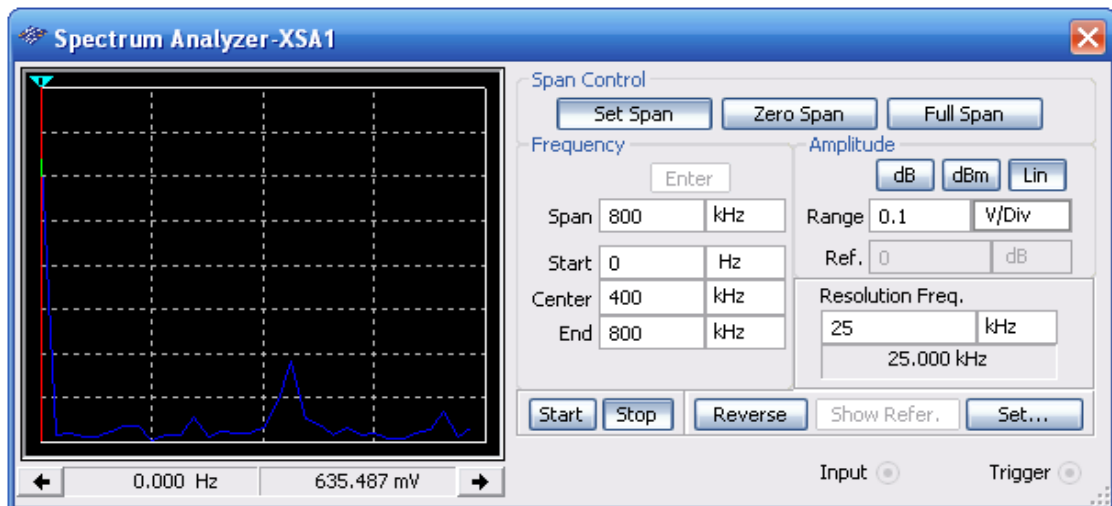


Рисунок 3.12 – Генеровані електричні коливання напруг V_{out2} and V_{out1} у хаотичному режимі



а)



б)

Рисунок 3.13 – Графіки амплітудо-частотного спектру генерованих хаотичних коливань V_{OUT1} (а) і V_{OUT2} (б)

Для аналізу статистичних характеристик сформованих хаотичних імпульсів, наступні розрахунки були зроблені в MATLAB 7.0.1. На рисунку 3.14 представлений графік хаотичних імпульсів V_{OUT2} , їх числові дані були імпортовані з Multisim 10.1 до MATLAB 7.0.1. На рис. 3.15 показана гістограма функцій розподілу для значень генерованих хаотичних імпульсів напруги V_{OUT2} . На рис. 3.16 представлений графік хаотичних імпульсів V_{OUT1} . На рис.

3.17 показана гістограма функцій розподілу для значень породжених хаотичних імпульсів V_{OUT1} .

Для аналізу статистичних характеристик сформованих хаотичних імпульсів, наступні розрахунки були зроблені в MATLAB 7.0.1.

На рис. 3.14 представлений графік хаотичних імпульсів V_{OUT2} , їх числові дані були імпортовані з Multisim 10.1 до MATLAB 7.0.1. На рис. 3.15 показана гістограма функцій розподілу для значень генерованих хаотичних імпульсів напруги V_{OUT2} . На рис. 3.16 представлений графік хаотичних імпульсів V_{OUT1} . На рис. 3.17 показана гістограма функцій розподілу для значень породжених хаотичних імпульсів V_{OUT1} .

Результати дослідження статичних характеристик генерованих хаотичних коливань наведені у Додатку К (08-32.МКР.006.00.006 ПЛ).

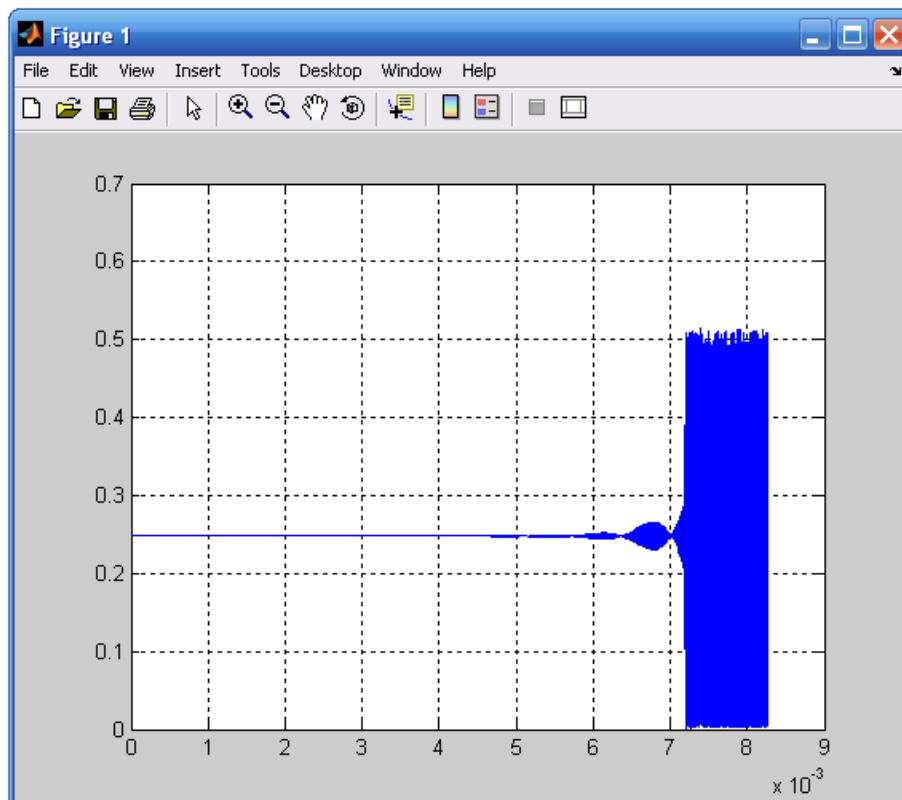


Рисунок 3.13 – Часова діаграма ансамблю генерованих хаотичних коливань напруги V_{OUT1}

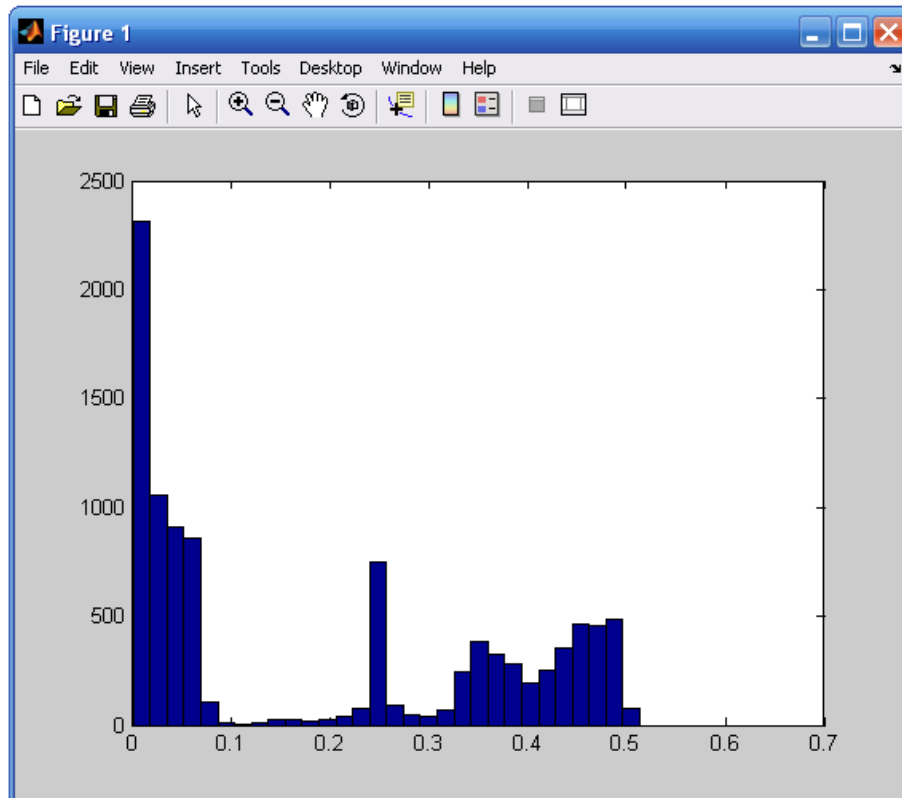


Рисунок 3.14 – Гістограма функції розподілу амплітудних значень ансамблю генерованих хаотичних коливань напруги V_{OUT1}

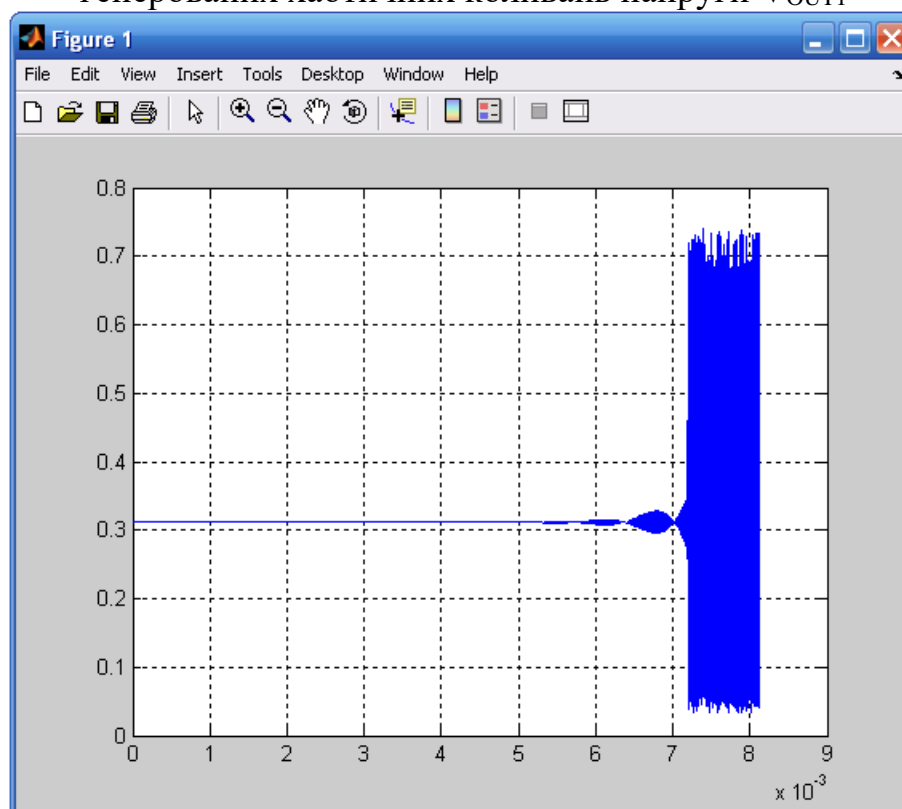


Рисунок 3.15 – Часова діаграма ансамблю генерованих хаотичних коливань напруги V_{OUT2}

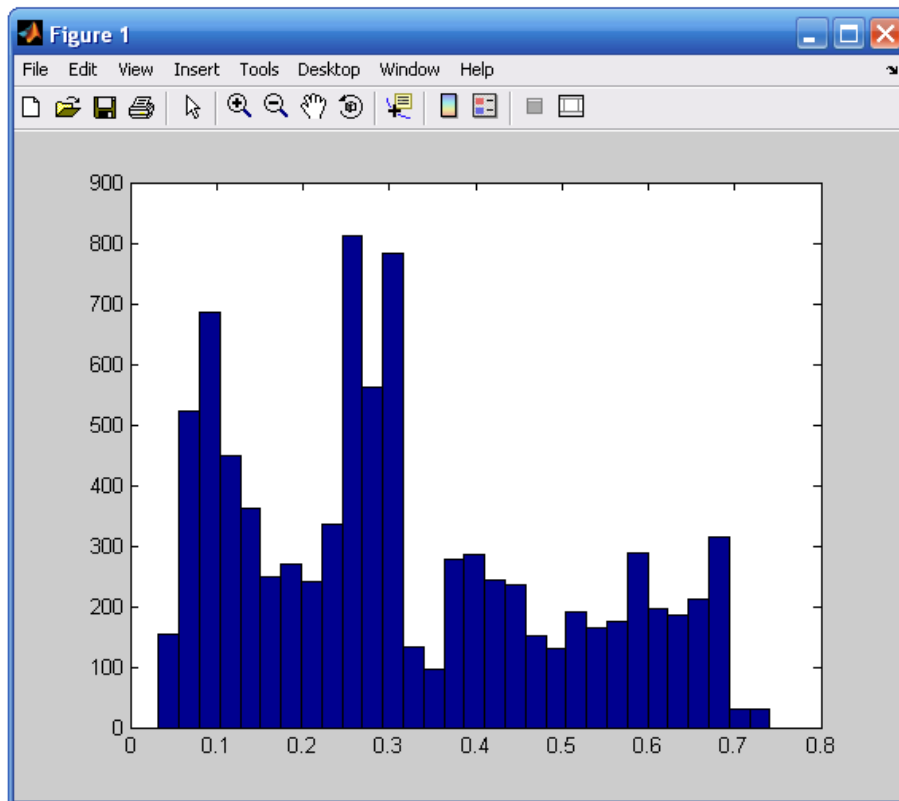


Рисунок 3.16 – Гістограма функції розподілу амплітудних значень ансамблю генерованих хаотичних коливань напруги V_{OUT2}

3.6 Висновки до розділу

У розділі здійснено теоретичне дослідження генератора детермінованого хаоса на базі тунельного діода. На основі математичної моделі генератора Чуа була запропонована математична модель радіочастотного генератора на тунельному діоді. Запропонована модель відрізняється від моделі осцилятора Чуу за допомогою третього диференціального рівняння системи зміненої системи та апроксимаційної функції $f(x)$ (4), яка застосовується в математичній моделі Кияшка-Піковського-Рабіновича [23]. Виконано комп'ютерне схемотехнічне моделювання радіочастотного генератора Чуа на основі тунельного діода. Експериментально визначено, що генератор працює стабільно в режимах гармонічних та періодичних коливань. Коли змінюються

напруги та параметри елементів, у осциляторі з'являються випадкові та хаотичні коливання. Експериментальні дослідження не виявили повністю розвиненого режиму хаосу в осциляторі, як це зазначено в [30]. Отримані графіки гістограми для функцій розподілу коливань, що розподіляються, V_{OUT1} і V_{OUT2} відрізняються від нормальних розподілів, що підтверджує існування хаотичного безшумного коливання в осциляторі. Ефективне управління динамікою коливань в осциляторі здійснюється зі зміною напруги живлення в діапазоні 0,3 ... 0,34 В або зі зміною значення R резистора в діапазоні 10,2 ... 12,0 Ом.

4 НАДВИСОКОЧАСТОТНІ ГЕНЕРАТОРНІ РАДІОТЕХНІЧНІ ПРИБРОЇ НА ОСНОВІ РЕЗОНАНСНО-ТУНЕЛЬНОГО ЕФЕКТУ

4.1 Резонансно-тунельні діоди

Експериментальні дослідження резонансно-тунельної структури типу n^+i-n^+ показали, що критичні значення параметрів, отримані при теоретичному аналізі, важко одержати на практиці. Це пов'язано з недосконалістю самої структури, а також модельним характером елементарної теорії. Подальший розвиток теорії та експериментальних робіт показали можливість використання резонансно-тунельних структур для одержання принципово нових мікроелектронних і оптичних приладів.

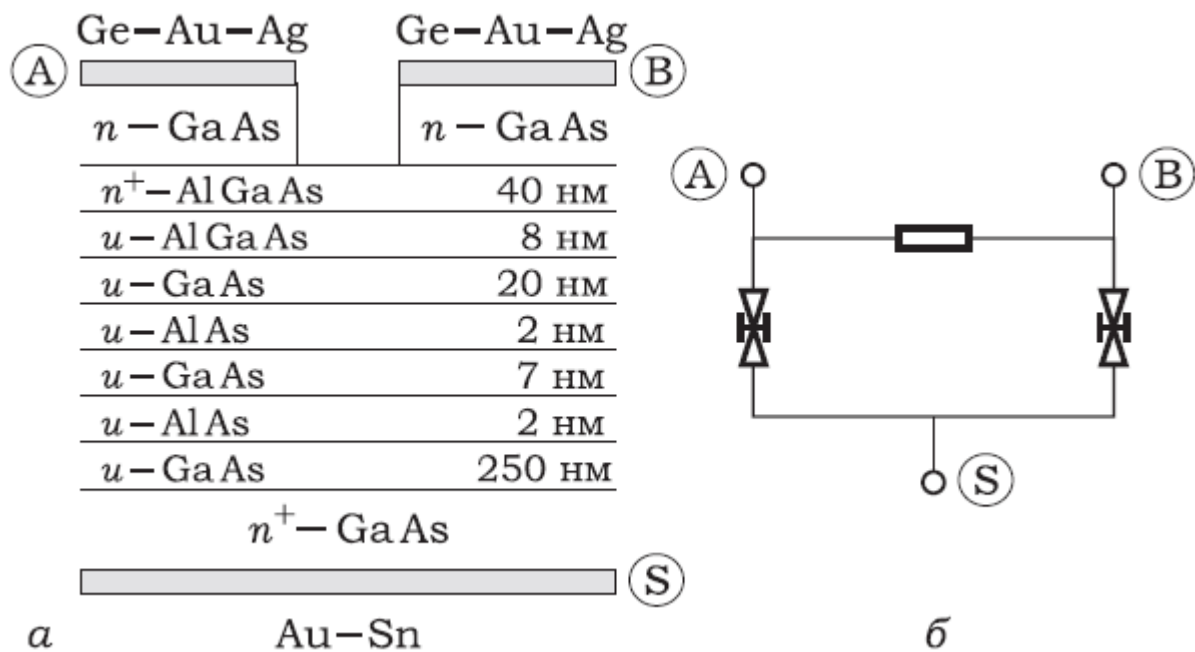


Рисунок 4.1 – Схематична структура паралельно з'єднаних n^+i-n^+ діодів (а), еквівалентна схема (б)

Планарна інтеграція декількох резонансно-тунельних структур дозволяє сформувати компактні комірки багаторівневої логіки, яка конкурує з

транзисторною. Реалізація функцій багаторівневої логіки можлива в тому випадку, якщо пряма навантаження пересікає вольт-амперну характеристику в кількох сталих точках. Дійсно, така ситуація виникає при паралельному або послідовному з'єднанні резонансно-тунельних діодів. Розглянемо принцип роботи паралельної структури, її поперечний розріз і еквівалентна схема наведені на рис. 4.1 [2]. У верхній частині структури діоди з'єднані каналом з високою рухливістю електронів, які локалізовані поблизу гетеропереходу GaAs/AlGaAs/ пунктирною лінією на рис. 4.1, а. Вольт-амперна характеристика наведена на рис. 4.1, в. При температурі 100 К існує два резонансних піка, положення яких залежить від напруги між діодами U_0 . За допомогою цього приладу було продемонстровано помноження частоти пилкоподібного сигналу на три, а синусоїдного на п'ять. При підключенні опору навантаження величиною 215 Ом до контакту підкладки при зовнішній напрузі $U = 16$ В і $U_0 = 0,7$ В електричне коло елемента мало три стаціонарні стани, які відповідали напрузі на підкладці $U = 3,0, 3,6, 4,3$ В. Слід підкреслити, що організація звичайної трьохрівневої комірки пам'яті потребує чотирьох транзисторів і шість опорів, при цьому вона менш економічна як по площі, так і по енергоспоживанню. Недоліком такої структури є необхідність в додатковому джерелі напруги U_0 .

Використовуючи принципи багаторівневої логіки можна створити 11-бітовий генератор парності на основі однієї вертикально інтегрованої багатосарової структури. Схематичний розріз приладу та його вольт-амперна характеристика подані на рис. 4.2. [2]. Він складається з n^+ -InAlAs-підкладки, на якій методом молекулярної епітаксії створені п'ять InGaAs/InAlAs діодів з резонансним тунелюванням електронів, розділених n^+ -InGaAs шарами. Кожен з діодів при кімнатній температурі має вольт-амперну характеристику з вузьким піком резонансного струму, який відповідає тунелюванню через перший рівень розмірного квантування в потенціальній InGaAs-ямі. На вольт-амперній характеристиці цієї структури є п'ять однакових за амплітудою піків

резонансного струму, що свідчить про однаковість параметрів діодів (рис.17,б). Такий прилад може замінити десять елементів двійкової логіки і може бути використаний для реалізації 11-розрядного двійкового слова, потребуючи при цьому лише суматор [2].

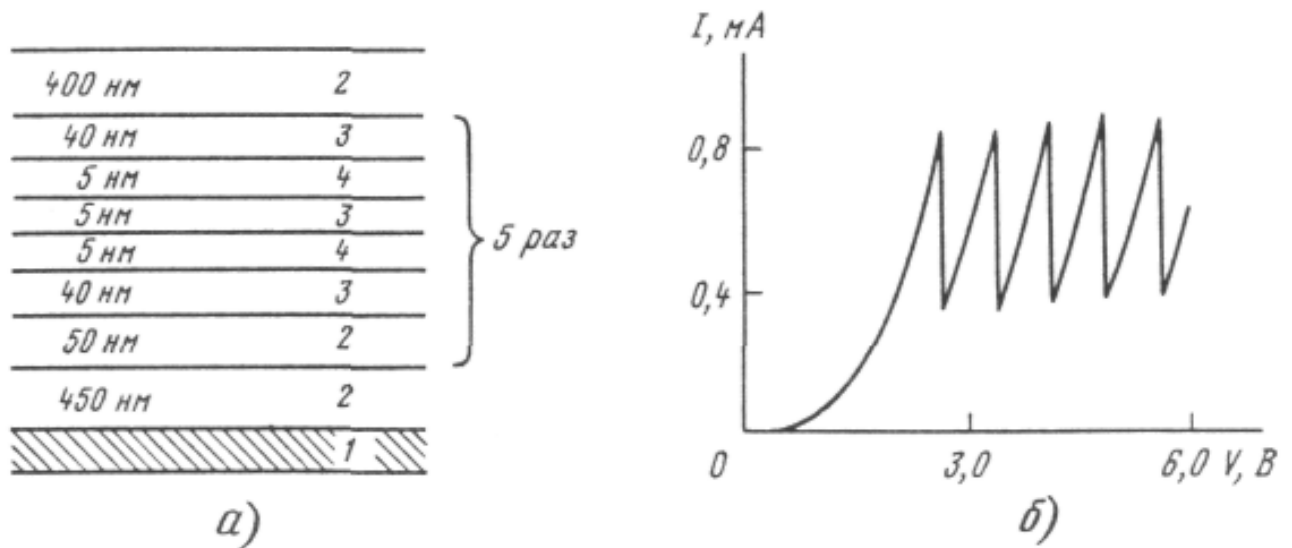


Рисунок 4.2 – Схематичний розріз гетероструктури (а) багатоелементного вертикального інтегрованого діода з тунельно-резонансною структурою і його експериментальна вольт-амперна характеристика (б): 1- n^+ підкладка; 2- n^+ InGaAs; 3- i- InGaAs; 4- InAlAs підкладка [2]

Подивимося тепер, як працює резонансний діод. Струм, що протікає через подвійний бар'єр, залежить від величини прикладеної напруги. Помітимо, що потенціал у нашому приладі падає головним чином в області подвійного бар'єра, тому що області ліворуч і праворуч від нього мають високу провідність. Якщо прикладена напруга мала й енергія електронів, що налітають на бар'єр ліворуч, менше енергії дискретного рівня, то прозорість бар'єра і, отже, струм, що протікає будуть малі. Струм досягає максимального значення при таких напругах, коли енергія електронів дорівнює енергії дискретного рівня (див. рис. 4.2, б). При більш високих напругах енергія електронів, що налітають, стане більше енергії дискретного рівня і тунельна прозорість бар'єра

зменшиться (див. рис. 4.2, в). При цьому струм також зменшиться. Вольтамперна характеристика резонансного тунельного діода показана на рис. 4.2, г. Ми бачимо, що на вольт-амперній характеристиці існує максимум (якщо в області між бар'єрами не один, а кілька дискретних рівнів, то і максимумів буде декілька). Праворуч від максимуму крива $I(U)$ має падаючу ділянку, де струм спадає з ростом напруги. Можна ще сказати, що на вольт-амперній характеристиці існує ділянка негативного диференціального опору. Завдяки цьому в електронних схемах резонансний діод може використовуватися не тільки як випрямляч, але і виконувати самі різноманітні функції. Якщо до центральної області резонансного діода підвести контакт (керуючий електрод), через який можна керувати положенням дискретного рівня, вийде новий прилад – транзистор. Керуючий електрод з'єднується з базовою областю, при цьому він контактує з вузькозонним шаром резонансно-тунельної структури і дозволяє керувати напругою між емітером і квантовою ямою при сталій напрузі між емітером і колектором. Цей ефект досягається при створенні такого стану, коли перший рівень розмірного квантування в потенціальній ямі опускається нижче дна зони провідності на межі резонансно-тунельної структури з боку емітера і колектора. Тоді при подачі позитивного зміщення між емітером і базою можна міняти потенціал квантової ями і концентрацію електронів, які локалізовані на першому рівні розмірного квантування. Резонансно-тунельний струм при цьому визначається положенням другого рівня в квантовій ямі. З таких транзисторів, очевидно, і будуть будуватися інтегральні схеми нових поколінь. Однак серйозною проблемою є виготовлення базового електрода до дуже тонкої структури [1].

Резонансний тунельний діод – це перший реальний пристрій із квантовою ямою і бар'єрами [3].

4.2 Резонансно-тунельні структури в спіновій електроніці

Останнім часом значна увага приділяється розвитку такого перспективного напрямку як спінова електроніка (спінтроніка). На відміну від традиційної електроніки, що оперує тільки з зарядом електрона, спінтроніка припускає роботу зі спіновими ступенями свободи. Для створення спінтронних пристроїв необхідно вирішити кілька задач, зокрема, потрібно навчитися створювати в напівпровідниках спінову поляризацію (тобто "вистроювати" спіни носіїв заряду в одному напрямку), забезпечити як можна більші часи спінової релаксації і навчитися транспортувати носії заряду з орієнтованими спінами на достатні відстані [4].

Для промислової реалізації спінтронних пристроїв бажано вміти керувати спіновою поляризацією в напівпровідникових і гібридних структурах за рахунок зміни напруги при кімнатній температурі. В даний час до досягнення цієї мети ще далеко, і вчені шукають підходи до неї. Задача по створенню спінової поляризації електронів у напівпровіднику може вирішуватися за рахунок інжекції орієнтованих по спіну електронів з феромагнітних матеріалів або розведених магнітних напівпровідників (твердих розчинів, у яких є присутнім кілька відсотків магнітних іонів, наприклад, марганцю), але, схоже, більш зручно вирішувати її з використанням різних тунельних структур.

Про дослідження одного з видів таких структур - магнітного резонансно-тунельного діода - повідомляється в недавній роботі вчених з університету Вюрцбурга. Даний пристрій дозволяє селектувати електрони по спіну за рахунок резонансного тунелювання електронів з тією або іншою орієнтацією спіна і, що особливо зручно, селекцію електронів по спіну можна здійснювати тільки за рахунок зміни напруги. Учені досліджували вирощені методом молекулярно-променевої епітаксії структури на основі напівпровідників II-VI (схема структури зображена на рис. 4.3,а). Основним елементом цієї структури є п'ять напівпровідникових шарів нанометрової товщини ($\text{ZnSe-Zn}_{0.7}\text{Be}_{0.3}\text{Se}$ -

$\text{Zn}_{0.96}\text{Mn}_{0.04}\text{Se}-\text{Zn}_{0.7}\text{Be}_{0.3}\text{Se}-\text{ZnSe}$). $\text{Zn}_{0.96}\text{Mn}_{0.04}\text{Se}$ є розведеним магнітним напівпровідником, а ширина забороненої зони $\text{Zn}_{0.7}\text{Be}_{0.3}\text{Se}$ перевищує ширини заборонених зон двох інших напівпровідників (схематично зонна структура обговорюваної області показана на рис. 18b). За рахунок різниці ширини заборонених зон у центральній області формується квантова яма (енергетичний спектр квантової ями представляє набір енергетичних рівнів, точніше кажучи, енергетичних підзон). При прикладенні магнітного поля відбувається зєсманівське розщеплення рівнів енергії в квантовій ямі (рис. 18b), при цьому, змінюючи прикладену до структури напругу, можна створювати умови для резонансного тунелювання електронів з різною орієнтацією спіна (нагору або вниз).

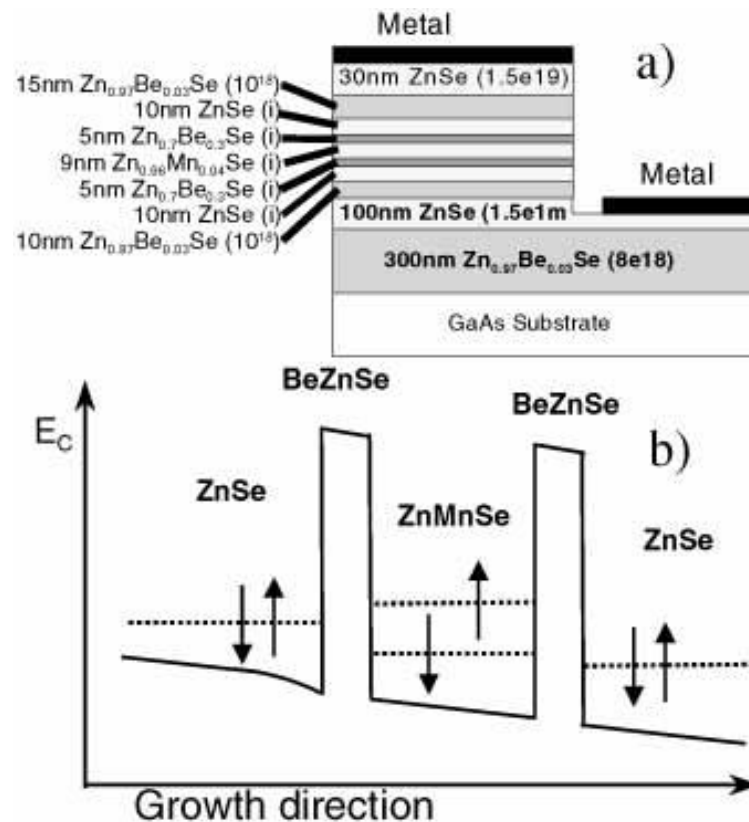


Рисунок 4.3 – а - схематичне зображення магнітного резонансно-тунельного діода; б - схематичне зображення зонної структури (зони провідності) резонансно-тунельного діода при визначеній прикладеній напрузі

При наявності магнітного поля спостерігається поява двох особливостей на вольт-амперних характеристиках, зв'язаних з тунелюванням електронів, що розрізняються напрямком спіна. Проведене моделювання достатнє добре описує зміну вольт-амперних характеристик, що спостерігається, у залежності від магнітного поля. Однак учені не можуть поки точно визначити ступінь спінової поляризації струму, що тече через резонансно-тунельний діод, для цього потрібні нові експерименти [4].

4.3 Розрахунок параметрів резонансно-тунельного діоду

Скориставшись вищенаведеними теоретичними даними та згідно до завдання візьмемо для розрахунку та розрахуємо наступні дані.

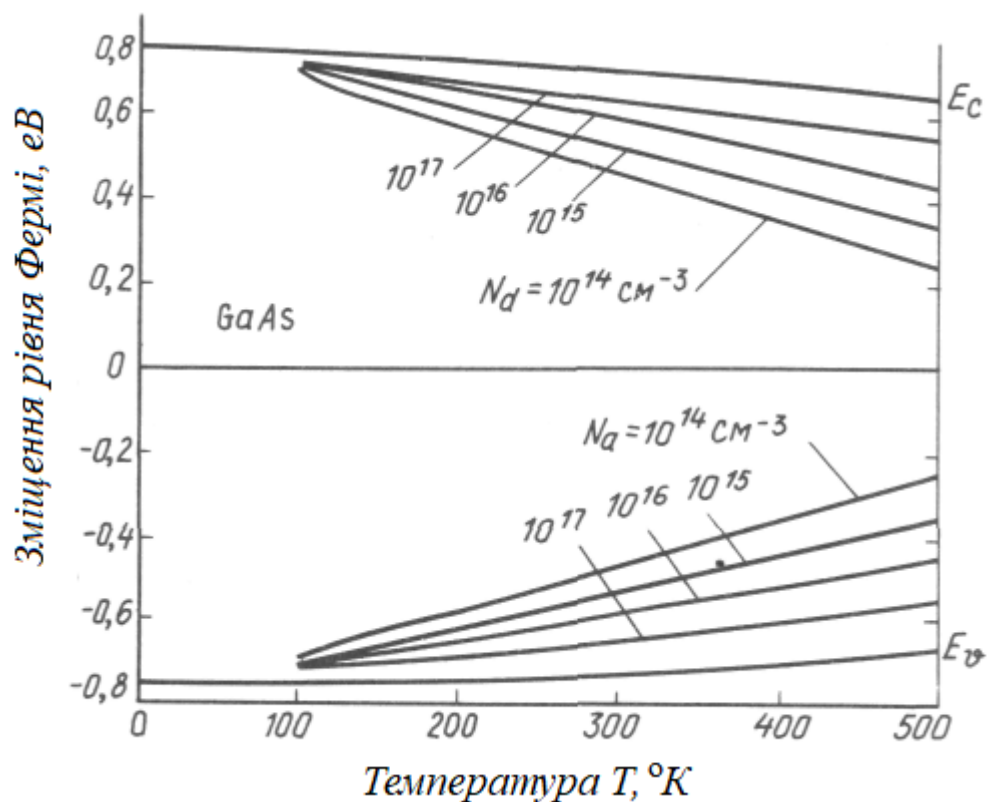


Рисунок 4.4 – Залежності положення рівня Фермі від концентрацій домішок і температури для напівпровідникових матеріалів [5]

1) Граничне значення від'ємної крутості вольт-амперної характеристики при $K_B T \ll \Phi_e$ має вираз:

$$q_{\max} \approx q^2 m \Phi_e / (4\pi^2 \hbar^3)$$

Скориставшись рис. 19 рівень Фермі Φ_e для заданої концентрації рівний $\Phi_e = 0,62 \text{ eV} = 1,28 * 10^{-19} \text{ Дж}$.

Тоді матимемо:

$$q_{\max} \approx (1,6 * 10^{-19})^2 * 10^{-31} * 1,28 * 10^{-19} / (4\pi^2 * (6,626 * 10^{-34})^3) = 2,2 * 10^7 \text{ См/см}^2$$

2) Максимальне значення густини струму визначається рівнянням:

$$I_{\max} = 2\pi q_{\max} \Gamma / q = 2 * 3,14 * 0,2 * 10^{-3} = 2,8 * 10^4 \text{ А/см}^2$$

3) Гранична частота генерації:

$$f_{\max} = 1 / (2\pi C_s) [q_{\max} / R_s]^{1/2} = 1 / (2 * 3,14 * 10^{-12}) (2,86 * 10^7 / 200)^{1/2} = 4,8 * 10^8 \text{ Гц}$$

4) Контрастність вольт-амперної характеристики.

Виходячи з формули (8) обчислені значення енергій на першому і другому енергетичному рівні складають: $E_1 = 110,2 \text{ меВ}$, $E_2 = 153,6 \text{ меВ}$.

$$\frac{I_{\max}}{I_{\min}} = \frac{\Gamma_1}{\Gamma_2} \exp\left(\frac{E_2 - E_1}{K_B T}\right) = \frac{0,19}{0,18} \exp\left(\frac{153,6 * 10^{-3} - 110,2 * 10^{-3}}{1,38 * 10^{-23} * 300}\right) = 5,66$$

5) Швидкодія резонансно-тунельної структури:

$$\tau \approx \hbar / 2\Gamma = 1,055 * 10^{-34} / 2 * 0,2 = 1,65 \text{ (пс)}.$$

4.4 Розроблення радіотехнічного НВЧ генераторного пристрою на основі резонансно-тунельного діоду

НВЧ генератори є ключовою складовою частиною багатьох сучасних електронних систем, а отже, їх проектування має першорядне значення. Для осциляторів міліметрових хвиль (мм-хвилі) та терагерців (ТГц) ті, що базуються на резонансному тунельному діоді (РТД), активно досліджуються для різноманітних застосувань, включаючи засоби бездротового зв'язку та візуалізацію [31] - [34]. Вони також розгортаються в радіолокаційних датчиках мм-хвиль для різних застосувань [35]. Переваги резонансно-тунельних діодів є те, що вони надзвичайно широкосмугові з основними коливаннями до 1,98 ТГц [36], працюють при кімнатній температурі, компактні, споживають низьку потужність, а вихідна потужність легко модулюється через напругу зміщення.

У роботі [37] повідомлено про осцилятори РТД з рекордною потужністю виходу в діапазоні 0,5–1 мВт до 300 ГГц [37] - [40]. Ми використовували цю технологію для демонстрації бездротових зв'язків 15 Гбіт/с за допомогою РТ-діапазону W-діапазону осцилятори [34], і зараз розробляють такі зв'язки для майбутніх бездротових центрів передачі даних [41]. Ця технологія має потенціал, що лежить в основі нових додатків, що вимагають коротких скорочень бездротових посилянь, таких як віртуальні ігри, бездротові картки пам'яті тощо. Частина привабливості для РТД полягає в їхній простоті, наприклад, джерело діапазону потужністю 1 мВт стандарту J вимагає лише одного пристрою РТД, реалізованого за допомогою лише фотолітографії [40], тоді як транзисторні технології, такі як CMOS, потребують масиву з восьми і більше (активних) пристроїв, літографія високої роздільної здатності під 100 нм та вдосконалені методи проектування схем [42]. Також РТД можуть забезпечити високоефективні електронні джерела понад 300 ГГц, частоти, які сьогодні загалом не можуть бути легко покриті жодними транзисторними технологіями [43].

Основою осцилятора RTD є область від'ємного диференціального опору (ВДО) його характеристики струму-напруги ($I-V$). Оскільки ВДО існує безпосередньо від постійного струму, РТД впливають на нестабільність при зміщенні в цій області, що призводить до небажаних коливань паразитичного зміщення. Якщо вони є, вони зменшують вихідну потужність генератора [44], [45]. Загальноприйнятий підхід до усунення коливань зсуву в плоских осциляторах РТД використовує маневровий резистор по всій ВАХ РТД, щоб комбінована характеристика $I - V$ залишалася позитивною в області ВДО пристрою [46]. Використання цього методу в осциляторах RTD, однак, значно знижує ефективність перетворення постійного струму в змінний до 1% та менше, забезпечуючи шлях постійного струму до землі через зазвичай низький опір, як правило, 10 Ом [37], [47]. Набагато раніше осцилятори РТД були реалізовані в прямокутній хвилеводній технології і використовували втрачену ділянку лінії електропередачі для мінімізації коливань зсуву і тому мали обмежену ефективність [49]. Тому підходи до підвищення ефективності можуть мати серйозний вплив щодо впровадження цієї технології, особливо для портативних пристроїв, де ємність акумулятора обмежена.

Для підвищення ефективності перетворення постійного струму в радіочастотні осцилятори NDR (тунельний діод), замість лінійного резистора було використано нелінійний резистор (діод Шоткі) [48]. Використовуючи цей підхід, енерговитрати постійного струму були зменшені в 3–6 разів. У роботі [45] був використаний інтегрований діод Шоткі, але цей підхід обмежується лише епітаксіальними конструкціями РТД, для яких передні напруги падіння діода Шоткі лежать в межах ВДО пристрою, що часто не так, і тому підхід має обмежене застосування. Інший підхід до забезпечення постійної стабілізації РТД - це використання великої шунтової ємності [49]. Незважаючи на те, що це не вплине на постійний струм споживання, його реалізація в колі генератора не завжди можлива через велике необхідне значення конденсатора (як правило, в діапазоні пікофард-мікрофард), оскільки це займе велику область мікросхем в

інтегральній схемі реалізація. Тим не менш, цей підхід застосовується у схемі генератора вейвлет-випромінювачів, в якій затворений осцилятор РТД працює в імпульсному режимі [50], при цьому технологія є основою наявних у продажу радіолокаційних датчиків мм-хвиль [35].

Структура епітаксiального шару РТД в цій роботі складалася з матеріалу з низькою енергією в смузi (E_g), InAs (арсенiд iндiю, $E_g = 0,36$ eВ), затиснутого мiж низькочастотним матеріалом, $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ (iндiй –Галiй-арсенiд, $E_g = 0,71$ eВ), який, у свою чергу, затиснутий мiж двома високопрохiдними бар'єрними бар'єрами AlAs (арсенiд алюмiнiю, $E_g = 2,15$ eВ), утворюючи квантову яму з двома бар'єрами (DBQW). Структура завершується нескороченим та / або злегка легованим розпiрним шаром $In_{0.53}Ga_{0.47}As$, шаром випромiнювача / колектора n типу та контактним шаром сильно легованого. Повна структура епітаксiального шару показана в таблицi I i була адаптована з [51]. Вiн забезпечує велике сiввiдношення пiку до долини (PVCR) i низьку пiкову напругу, якi є основними характеристиками пристрою для високопродуктивних конструкцiй генераторiв.

Епітаксiальну пластину вирощували комерцiйним постачальником за допомогою епітаксiї молекулярного пучка (МВЕ) на напiвiзолюючої пiдкладцi InP. Розмiри пристроiв RTD були обранi максимально великими для вихiдної потужностi з високочастотним радiочастотом та для задоволення вимог стiйкостi до змiщення, як описано в [52]. Мiкрометричнi пристроi RTD розмiром 4×4 мкм² були виготовленi методами оптичної лiтографiї. Розмiр меса визначали шляхом мокрого травлення $H_3PO_4: H_2O_2: H_2O$, тодi як пасивацiю проводили за допомогою полi-iмiду PI-2545, матеріалу з низькою дiелектрикою. Вимiрена I-V характеристика показана на рис. 4.5. З рисунка видно, що пiкова щiльнiсть струму та PVCR RTD становлять 2,18 mA / мкм i 5,83 вiдповiдно i промiжок напруги в областi NDR, V, становить приблизно 0,65 В, тодi як рiзниця струму мiж вершиною i долиною, I, становить 27 mA. Максимальна потужнiсть радiочастоти осцилятора за допомогою цього пристрою може слiд

оцінити за допомогою рівняння $[(3/16) V I]$ [23] і становить приблизно 3,3 мВт. Самостійність пристрою, C_n , містить геометричну ємність та квантову ємність свердловини і, за підрахунком [54], оцінюється як 125 фФ.

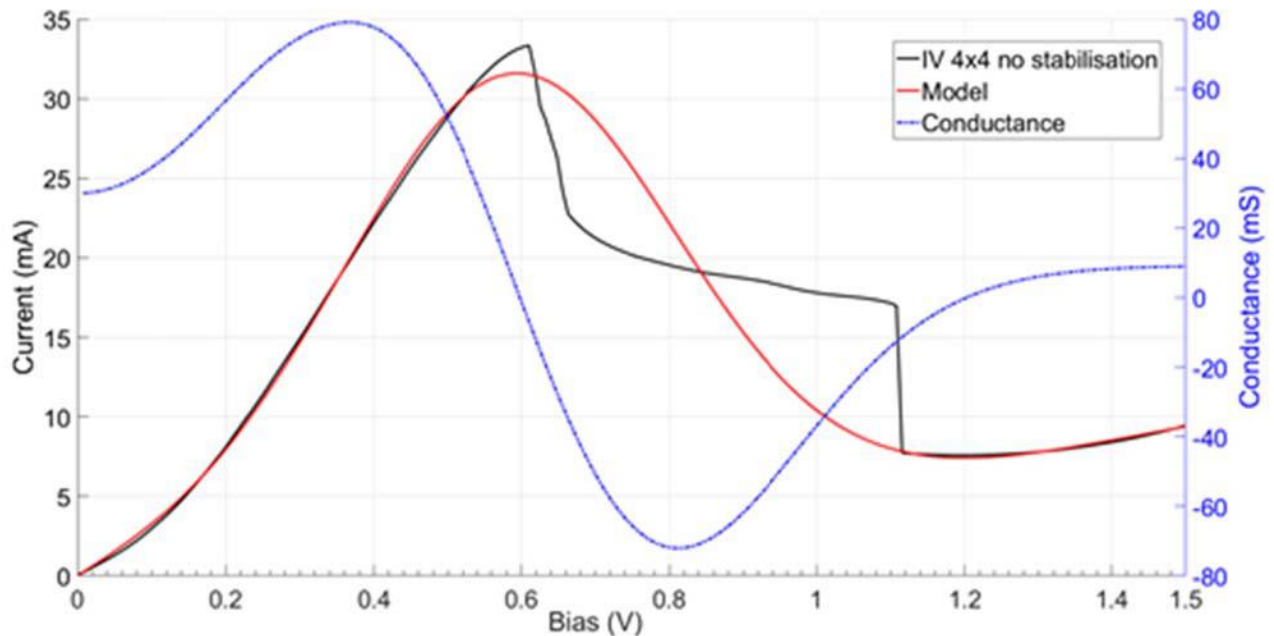


Рисунок 4.5 – Виміряна та змодельована I – V характеристика пристрою RTD $4 \text{ мкм} \times 4 \text{ мкм}$ із епіструктури. Пікова напруга становить (0,62 В, 33 мА), напруга відсічки при (1,27 В, 6 мА). Також показана провідність пристрою, отримана від модельованого I – V (синя лінія)

Виміряна I – V характеристика в області NDR спотворюється на типову платоподібну ознаку через наявність паразитарних коливань під час вимірювання. Аналітична модель I – V була отримана шляхом встановлення вимірюваних даних у регіонах позитивного диференціального опору (PDR) за допомогою великої моделі, заснованої на сигналі [54], при цьому область НДР наближалася до гладкого сліду, як показано на рис. 4.5. З модельованого I – V було обчислено диференційну провідність пристрою і також показано на рис. 4.5 (синя лінія). Пристрій має максимальну негативну різницю провідності G_n - 70 мС. Серійний опір РТД можна оцінити, використовуючи стандартний метод

вимірювання лінії передачі (TLM). Вимірний омичний контактний опір становив 128 мкм для контактної шару колектора (верхній). Тому для RTD 4×4 мкм² опір пристрою становить приблизно 9 Ом. Частоту відсікання пристрою оцінювали з еквівалентних параметрів ланцюга пристрою (C_n , G_n та контактної опору) [49] та / або від часу затримки електронів у межах квантової свердловини та часу проходження електронів через розпірний шар [55], що для цієї структури становить близько 480 ГГц.

Підхід до стабілізаційної системи зміщення зсуву RTD, представлений у цій роботі, використовує додавання шунтового конденсатора СВ, з'єднаного послідовно зі стабілізаційним опором, щоб усунути шлях постійного струму до землі. Схема 2 показана на рис. 5.6 (а), де V_{bias} - напруга зсуву для встановлення пристрою в області NDR, RS і LS - це опір і індуктивність, введені зміщенням кабелю, RB і СВ - резистор і конденсатор шунта відповідно, і L - послідовна індуктивність контактних колодок пристрою. Ця стабілізаційна мережа була використана раніше авторами для прямої характеристики області НДР тунельних діодів в стабільних умовах нециркуляції [56]. У цій роботі він вперше використовується в реалізації високоефективних осциляторів RTD.

Для низьких частот (мегагерцовий діапазон) схема, показана на рис. 4.6 (а), може бути спрощена до еквівалентної схеми, показаної на рис. 4.6 (б), де РТД представлений його негативною диференційною провідністю ($-G_n$) та self-місткістю (C_n). У цьому випадку індуктивність L вважається коротким замиканням, RB ігнорується, оскільки імпеданс конденсатора СВ стає домінуючим, а ємність пристрою C_n (як правило, десятки фемтофарадів) вважається незначною порівняно з СВ (зазвичай десятки пікофарадів). З іншого боку, на високих частотах (діапазон гігагерців) схема на рис. 4.6 (а) може бути спрощена до еквівалентної схеми на рис. 4.6 (в), де індуктивність L_B вважається розімкнутим ланцюгом і ємністю СВ - це коротке замикання. Зауважимо, що схеми на рис. 4.6 (б) та (в) однакові, лише з різними значеннями елементів.

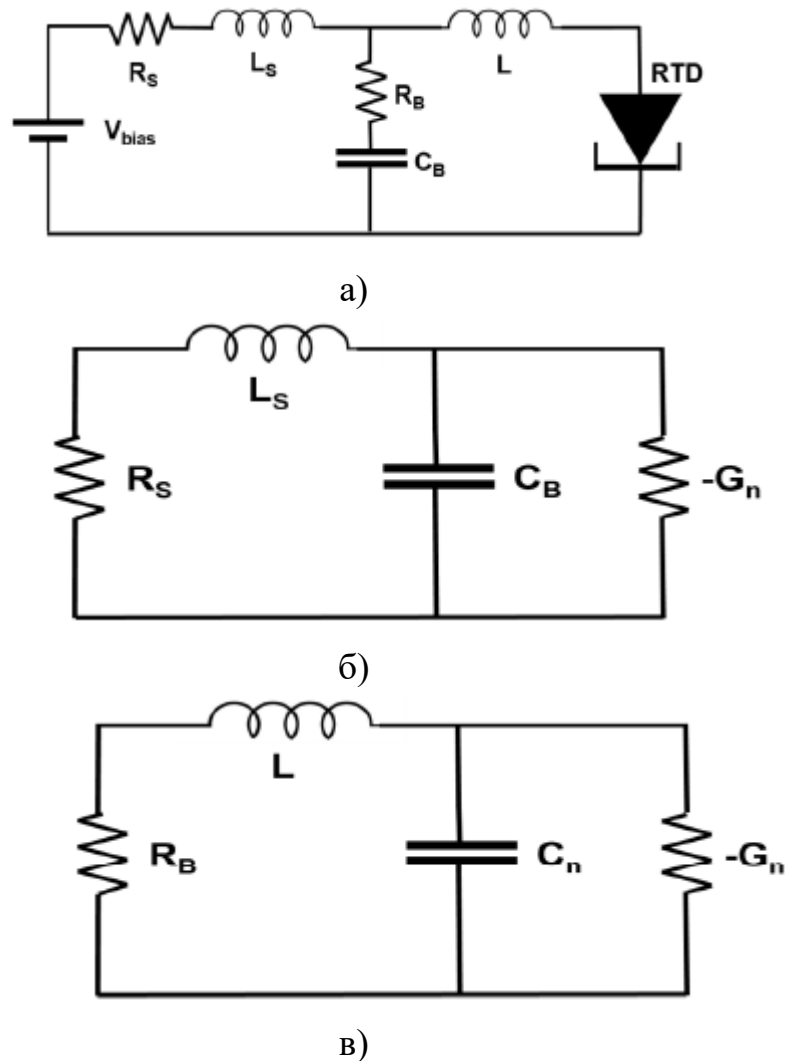


Рисунок 4.6 – (а) Запропонована схема стабілізації для пристрою RTD, де V_{bias} - напруга зсуву, R_S і L_S - паразити, введені мережею зсуву, R_B і C_B - резистор і конденсатор, що стабілізує шунт, а L - індуктивність лінії CPW. (б) Еквівалентний ланцюг низьких частот, L вважається коротким, а імпеданс R_B ігнорується. (в) високочастотний еквівалентний ланцюг, L_S вважається відкритим ланцюгом, а ємність C_B є коротким замиканням

4.5 Дослідження радіотехнічного НВЧ генераторного пристрою на основі резонансно-тунельного діоду

Коливання зміщення для окремого нестабілізованого пристрою RTD спочатку було охарактеризовано за допомогою спектрального аналізатора (див.

рис. 4.7,б). Пристрій зміщувався в області NDR через порту постійного струму зміщення аналізатора спектра, підключеного до радіочастотного порту, а пристрій, що перевіряється (DUT), до порту $dc + RF$.

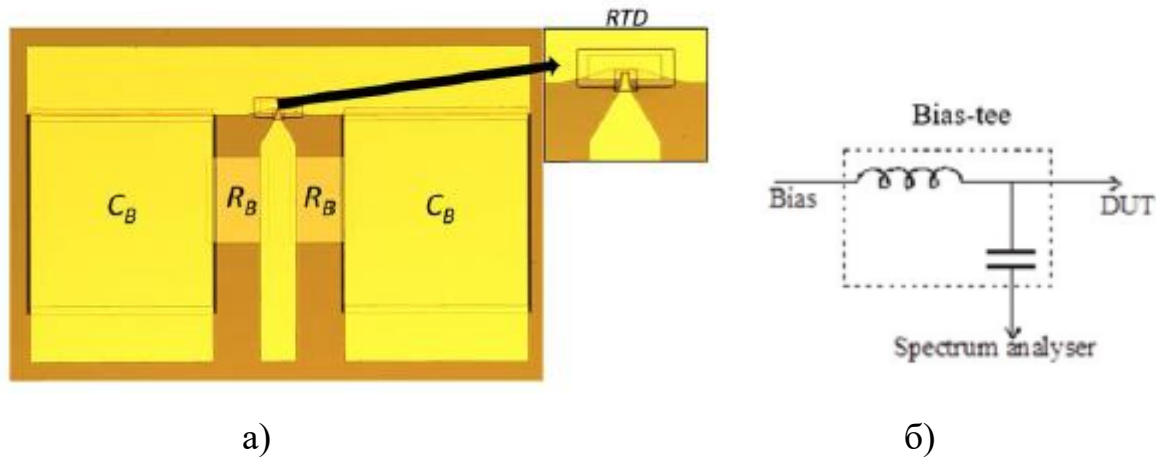


Рисунок 4.6 – Конструкція (а) та фрагмент схеми (б) експериментального макету НВЧ генераторного пристрою на основі резонансно-тунельного діоду:
 (а) Мікрографія виготовленого РТД-пристрою $4 \text{ мкм} \times 4 \text{ мкм}$ із інтегрованою стабілізуючим колом. Вставка: фактичний РТД. Конденсатор C_B і опір R_B реалізуються з двох частин і розміщуються паралельно РТД. (б) Фрагмент кола установки для вимірювання коливань зсуву за допомогою зміщення трійника. DUT є або нестабілізованим, або стабілізованим пристроєм РТД

На рис. 4.8 показані вимірювані коливання зміщення, частота яких визначається значною мірою сполучним коаксіальним кабелем, індуктивністю трійника зсуву та ємністю пристрою і лежать у діапазоні 2–3 МГц для основних коливань (чорна лінія). Потім цей експеримент був повторений для пристроїв RTD із звичайною стабілізацією зміщення резистора шунта (червона лінія) та іншим зі стабілізацією зміщення RC-діапазону шунта (синя лінія). Не спостерігаються коливання зміщення стабілізованих пристроїв.

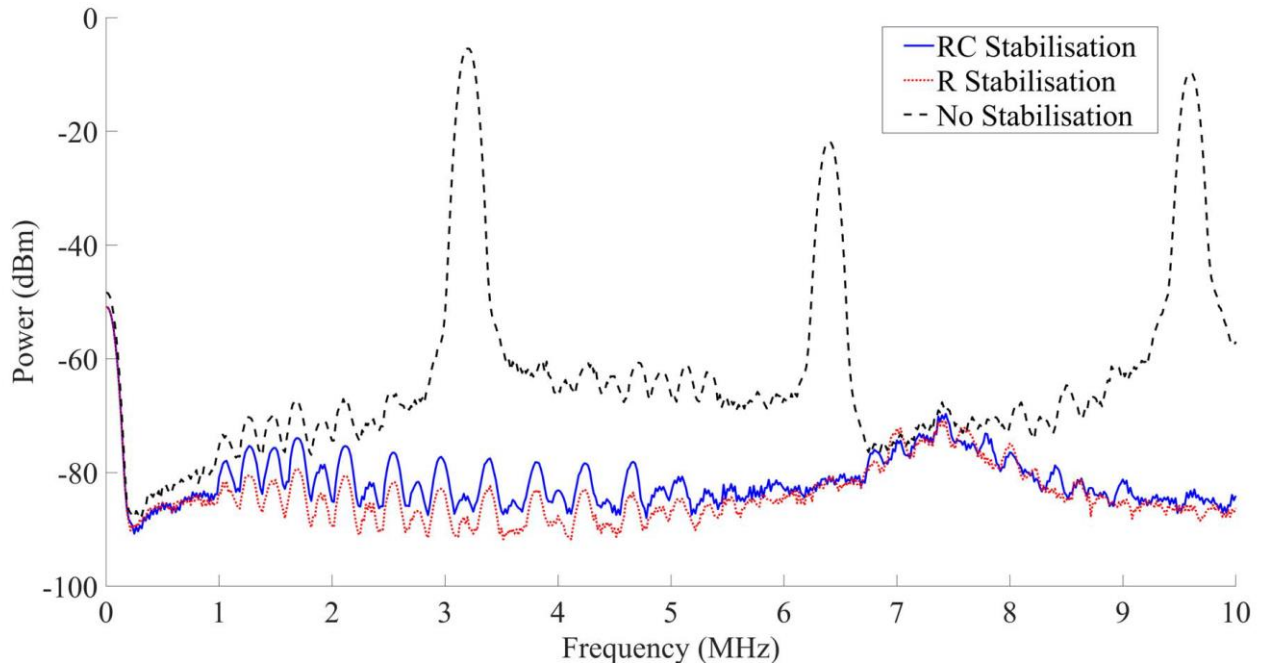
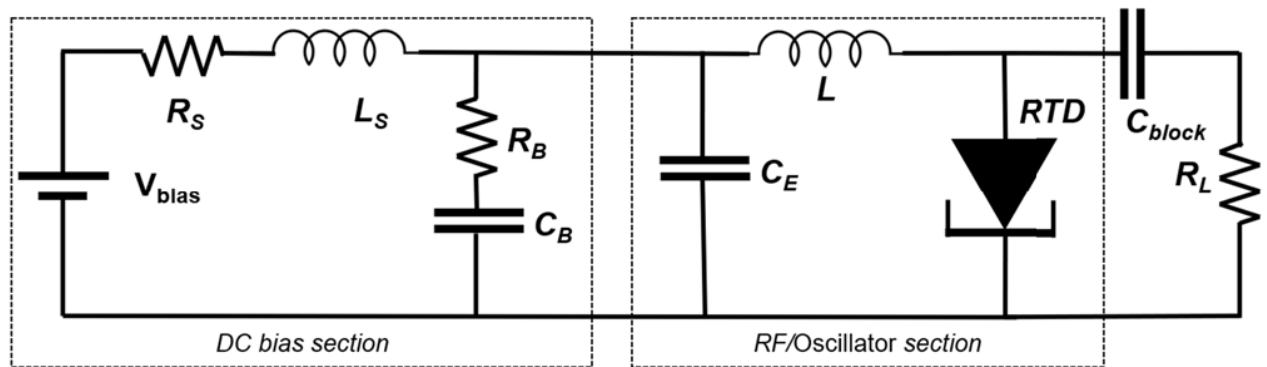


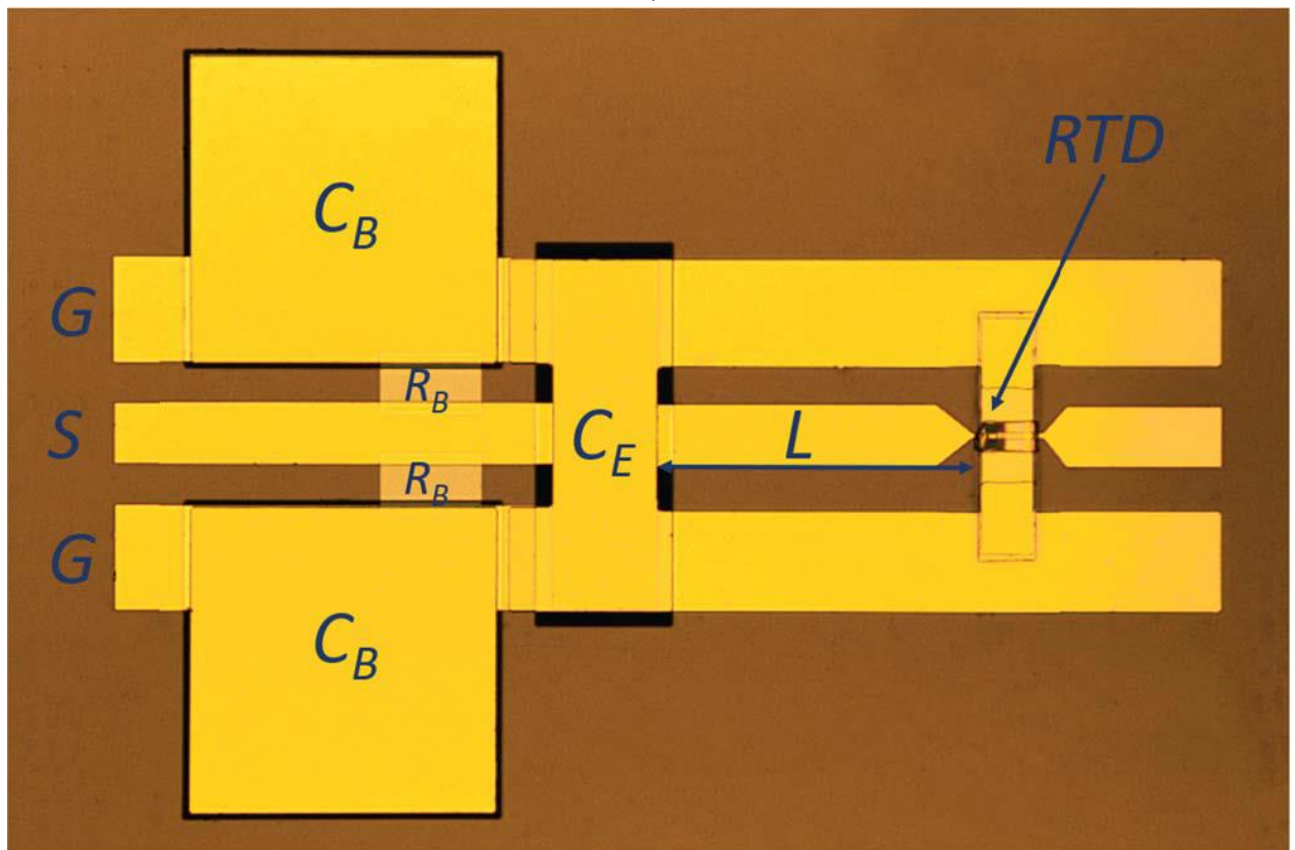
Рисунок 4.8 – Вимірюваний спектр на лініях зміщення при $V_{\text{bias}} = 0,8 \text{ В}$, тобто, в області NDR для пристроїв RTD розміром $4 \times 4 \text{ мкм}^2$ з стабілізацією і без неї (пунктирна чорна лінія). Не виявлено коливань зсуву як для маневрового резистора (червона лінія), так і для стабілізатора серії резистор-конденсатор (синя лінія)

Схема генератора, що використовує коло стабілізації зсуву високої ефективності, показана на рис. 4.9(а). Він також використовує конденсатор роз'єднання C_E (30 пФ), який був доданий для створення шляху короткого замикання для сигналу радіочастотного генератора, і таким чином уникнути втрати потужності радіочастоти в стабілізуючому колі. На низьких частотах C_E і C_V знаходяться паралельно (R_V ігнорується) та їх можна комбінувати. Індуктивність L реалізується як коротке замикання CPW і поряд з ємністю пристрою визначає частоту коливань. Значення для L становило 140 пкГн в нашій конструкції для генераторів 30 ГГц. Це було реалізовано за допомогою лінії електропередачі CPW, яка була навантажена конденсатором C_E (який виконує функцію короткого замикання РЧ на частоті коливань). Вибір частоти коливань близько 30 ГГц повинен був сприяти більш легкій реалізації схеми та

характеристиці для демонстрації запропонованої концепції стабілізації зміщення.



a)



б)

Рисунок 4.9 – Електрична схема та конструкція генератора: (а) Топографічна схема осцилятора, що використовує резистор та конденсаторну стабілізаційне коло R_B - C_B . Розріз у пунктирному прямокутнику, реалізований як ММІС. б) Мікрографія виготовленого RTD-генератора з інтегрованою стабілізуючою мережею. Для вимірювання використовується зонд GSG. Конденсатор C_B і опір R_B розділяються надвоє і розміщуються паралельно RTD. Конденсатор C_E виконує функцію короткого заземлення для радіочастотного сигналу

RTD та пасивні компоненти були виготовлені, як описано раніше. Процес виготовлення повної монолітної мікрохвильової мікрохвильової печі (ММІС) описаний у [38]. R_L - опір навантаження, введений аналізатором спектру, який дорівнює 50 Ом, з коаксіальним блоком постійного струму між ними. Мікрографія виготовленої схеми генератора зображена на рис. 4.9 (б). Загальний розмір кола генератора склав близько 1000×700 мкм².

Ті ж вимірювання, які описані на рис. 4.8, проводилися в схемі генераторів, і паразитичні коливання низьких частот не спостерігалися.

Частоту генератора ММІС RTD вимірювали на пластинах за допомогою аналізатора спектру Agilent E4448A (3 Гц – 50 ГГц). Вимірний спектр показаний на рис. 4.10(а). Коли напруга зміщення становить 0,94 В, RTD коливається на 34 ГГц із вихідною потужністю 3,95 дБм. Струм постійного струму становив 18 мА, тому ефективність перетворення постійного струму в радіочастоту становила 14,7%. Це добре порівнюється з розрахунковою максимальною потужністю генератора з області NDR пристрою в 3,3 мВт (5,18 дБм), тобто теоретична ефективність постійного струму в радіочастоті близько 19,5%. Для цієї установки вимірювання втрати введення зонда, блоку постійного струму та кабелю між генератором та аналізатором спектру вимірювали 3,4, 5,4 та 5,46 дБ при 25, 30 та 35 ГГц відповідно та були виправлені з повідомленням результатів. Для осцилятора RTD, що використовує лише 10-шунтовий опір для стабілізації, постійний струм становив 100 мА, а ефективність перетворення постійного струму в RF - 0,93%. Ця низька ефективність, очевидно, пов'язана з постійною потужністю, яка розсіюється через низький опір шунта.

Також вимірювали фазовий шум осциляторів RTD, а на рис. 4.10(б) зображено типовий результат. При частотах зміщення частот 100 кГц та 1 МГц значення фазового шуму становили -100,2 та -112,9 дБк/Гц відповідно. Ці значення можна порівняти з RTD-генератором, стабілізованим за допомогою резистора шунта, реалізованого на одній пластині. Вимірний низькофазний

шум відповідає нашим попереднім результатам [37] і є ключовим для таких застосувань, як бездротовий зв'язок або радар.

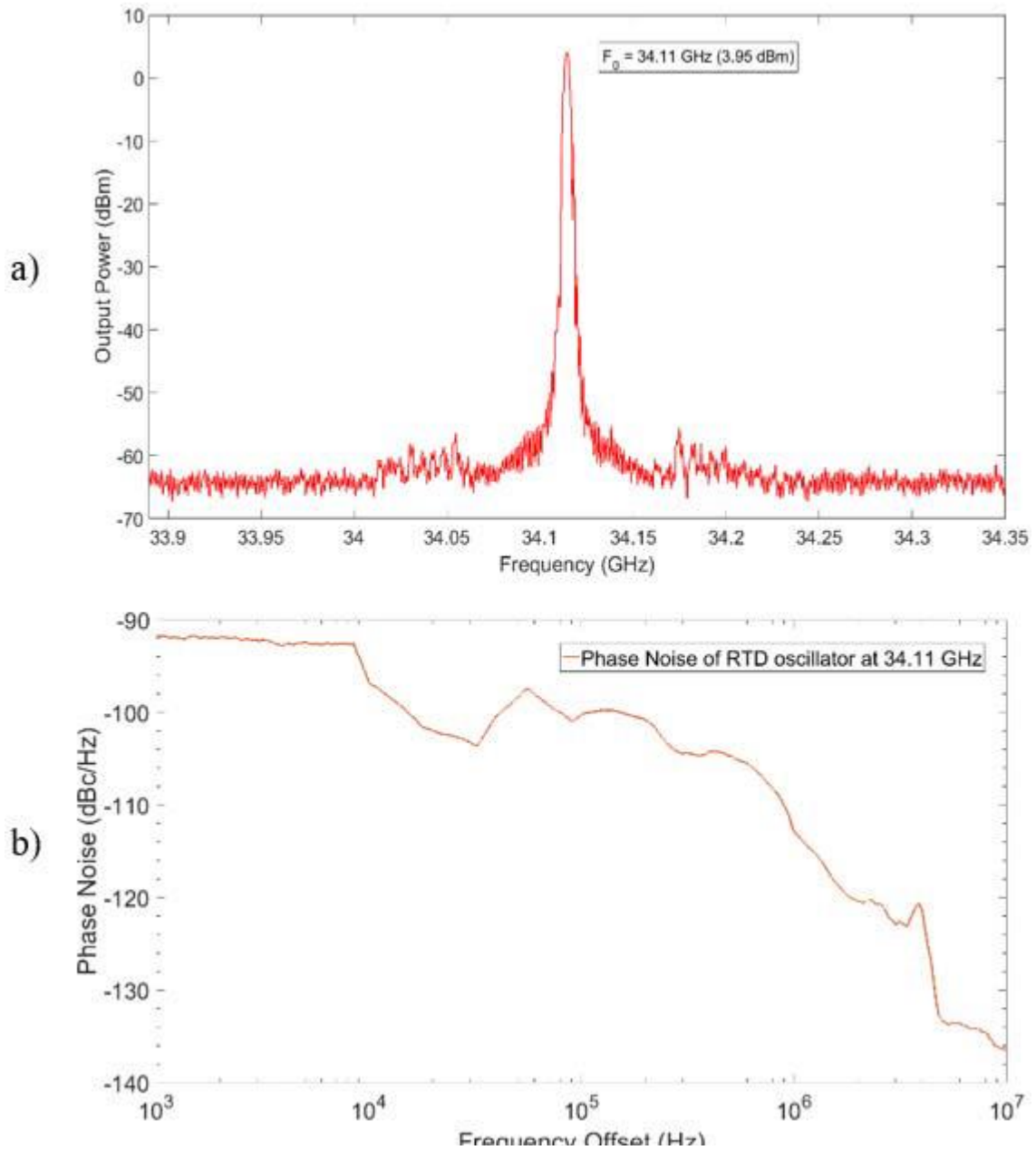


Рисунок 4.10 – Графіки амплітудо-частотного (а) та фазочастотного спектру (б):

- (а) Вимірюваний спектр вихідного осцилятора RTD з конденсаторною і резисторною стабілізаційною мережею при $V_{\text{BIAS}} = 0,94 \text{ В}$, $I_{\text{BIAS}} = 18 \text{ мА}$. (б) Вимірювана продуктивність фазового шуму на несучій частоті 34,1 ГГц

На рис. 4.11 показано вимірювання спектра генератора та вихідної потужності при різних рівнях зміщення для генератора високої ефективності. Він має діапазон настройки близько 7 ГГц і високу вихідну потужність близько 1–2 дБм у більшості цього діапазону, що відповідає ефективності близько 6% – 10%.

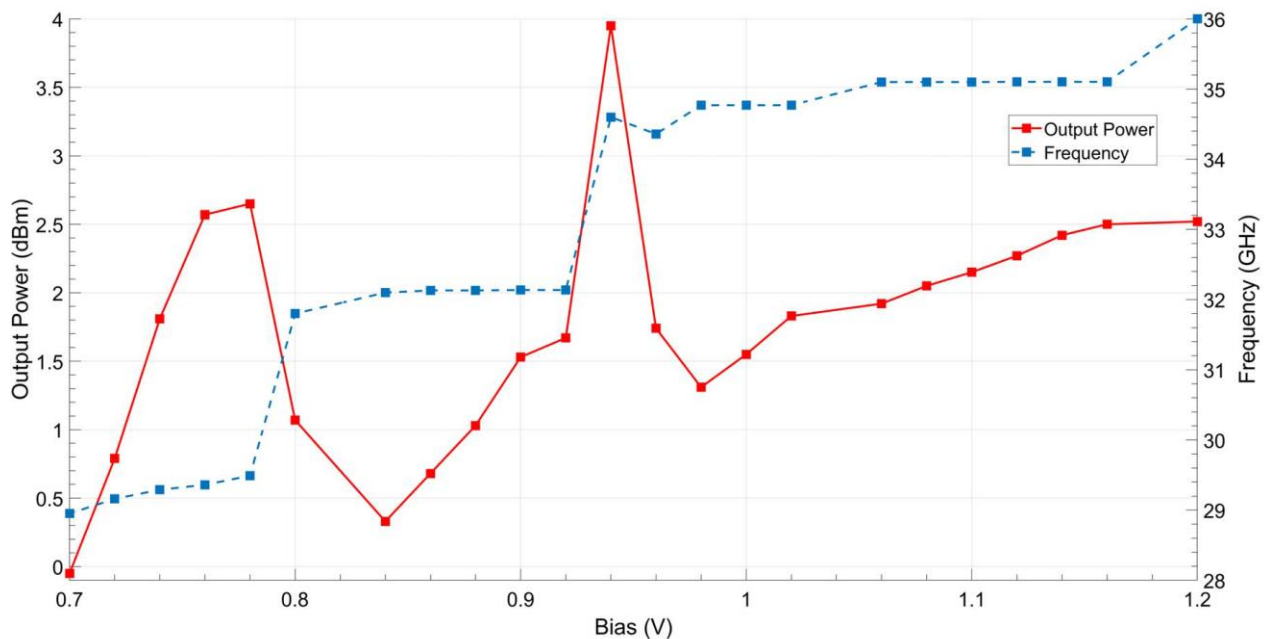


Рисунок 4.11 – Вимірювана вихідна потужність і частота генератора в залежності від напруги зміщення

4.6 Висновки до розділу

У розділі представлені високоефективні RTD-осцилятори з регульованою частотою від 29 до 36 ГГц. Вони використовують коло стабілізації напруги зсуву, яке не споживає постійного струму, що призводить до десятикратного підвищення ефективності перетворення постійного струму в радіочастоти. Запропоновані генератори також мають низький фазовий шум. Для подальшого підвищення ефективності генератора постійного струму до ВЧ

необхідно зменшити пікову напругу та струм відсікання. Порівняно з іншими напівпровідниковими електронними технологіями, генератори RTD пропонують просте, недороге рішення для майбутнього бездротового зв'язку короткого діапазону систем та інших застосувань, і тому такі покращення потребують підвищення їх вихідної потужності (10 мВт на частотах понад 100 ГГц) та ефективності (понад 20%). Для вихідної потужності з високою радіочастотою потрібно збільшувати проміжок області NDR. Таким чином, майбутня робота, таким чином, буде зосереджена на розробці вдосконалених структур епітаксiального шару RTD та оптимально завантажених осциляторів мм-хвилі та ТГц, використовуючи цей високоефективний підхід до стабілізації напруги зміщення.

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1 Аналіз комерційного потенціалу розробки радіотехнічного надвисокочастотного генераторного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором

5.1.1 Визначення рівня комерційного потенціалу розробки радіотехнічного надвисокочастотного генераторного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором

Метою проведення технологічного аудиту є оцінювання комерційного потенціалу розробки радіотехнічного надвисокочастотного генераторного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором, створеної в результаті науково-технічної діяльності. В результаті оцінювання можна буде зробити висновок щодо напрямів (особливостей) організації подальшого її впровадження з врахуванням встановленого рейтингу.

Для проведення технологічного аудиту залучимо 3-х незалежних експертів. У нашому випадку такими експертами будуть керівник магістерської роботи та провідні викладачі випускової та споріднених кафедр.

Оцінювання комерційного потенціалу розробки радіотехнічного надвисокочастотного генераторного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором будемо здійснювати за 12-ю критеріями згідно рекомендацій.

Результати оцінювання комерційного потенціалу розробки радіотехнічного надвисокочастотного генераторного пристрою на основі

резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором заносимо до табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Результати оцінювання комерційного успіху розробки радіотехнічного надвисокочастотного генераторного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором

Критерії	Експерти		
	д.т.н., професор Осадчук О.В.	к.т.н., доцент Воловик А.Ю.	к.т.н., доцент Гаврілов Д.В.
	Бали, виставлені експертами		
1	2	2	2
2	3	3	3
3	4	2	3
4	3	2	2
5	2	2	2
6	3	3	2
7	2	2	3
8	2	3	2
9	3	3	3
10	3	3	2
11	3	3	2
12	2	2	2
Сума балів	32	30	28
Середньоарифметична сума балів, СБ	30		

За даними табл. 5.1 робимо висновок щодо рівня комерційного потенціалу розробки радіотехнічного надвисокочастотного генераторного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором. При цьому користуємося рекомендаціями, наведеними в табл.5.2.

Таблиця 5.2 – Рівні комерційного потенціалу розробки

Середньоарифметична сума балів, розрахована на основі висновків експертів	Рівень комерційного потенціалу розробки
0 – 10	Низький
11 – 20	Нижче середнього
21 – 30	Середній
31 – 40	Вище середнього
41 – 50	Високий

Таким чином, робимо висновок, щодо рівня комерційного потенціалу нашої розробки радіотехнічного надвисокочастотного генераторного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором – середній.

5.1.2 Визначення рівня якості розробки радіотехнічного надвисокочастотного генераторного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором

Оцінювання рівня якості розробки радіотехнічного надвисокочастотного генераторного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором проводиться з метою

порівняльного аналізу і визначення найбільш ефективного, з технічної точки зору, варіанта інженерного рішення.

Рівень якості – це кількісна характеристика міри придатності певного виду продукції для задоволення конкретного попиту на неї при порівнянні з відповідними базовими показниками за фіксованих умов споживання.

Абсолютний рівень якості розробки радіотехнічного надвисокочастотного генераторного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференціальним опором знаходимо обчисленням вибраних для її вимірювання показників, не порівнюючи їх із відповідними показниками аналогічних виробів. Для цього необхідно визначити зміст основних функцій, які повинні реалізовувати розробка, вимоги замовника до неї, а також умови, які характеризують експлуатацію, визначають основні параметри, які будуть використані для розрахунку коефіцієнта технічного рівня виробу. Система параметрів, прийнята до розрахунків, повинна достатньо повно характеризувати споживчі властивості інноваційного товару (його призначення, надійність, економічне використання ресурсів, стандартизація тощо).

Далі визначаємо величину параметрів якості в балах та встановлюємо граничні його значення (кращі, гірші, середні). Всі ці дані для кожного параметра заносимо в табл. 5.3.

Із врахуванням коефіцієнтів вагомості відповідних параметрів можна визначити абсолютний рівень якості інноваційного рішення за формулою:

$$K_{\text{я.а.}} = \sum_{i=1}^n P_{ni} \cdot a_i, \quad (5.1)$$

де P_{ni} – числове значення i -го параметра інноваційного рішення,

n – кількість параметрів інноваційного рішення, що прийняті для оцінювання,

a_i – коефіцієнт вагомості відповідного параметра (сума коефіцієнтів вагомості всіх параметрів повинна дорівнювати 1).

Таблиця 5.3 – Основні параметри радіотехнічного надвисокочастотного генераторного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференційним опором

Параметри	Абсолютне значення параметра			Коефіцієнт вагомості параметра
	Краще +5...+4	Середнє +3	Гірше +1...+2	
Безперервна робота в робочих умовах при збереженні своїх технічних характеристик протягом часу, не менше, год.			2	0,4
Середній час відновлення працездатного стану, не більше, год.			2	0,25
Середнє напрацювання на відмову вимірювача, не менше, год.		3		0,1
Ресурс приладу, не менше, год.		3		0,15
Маса, не більше, кг.		3		0,1

Отже, абсолютний рівень якості радіотехнічного надвисокочастотного генераторного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференційним опором становитиме – 2,35 бали.

Одночасно визначаємо відносний рівень якості радіотехнічного надвисокочастотного генераторного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором, що виробляється (проекується), порівнюючи її показники з абсолютними показниками якості найліпших вітчизняних та зарубіжних аналогів (товарів-конкурентів) (табл. 5.4).

Таблиця 5.4 – Основні параметри радіотехнічного надвисокочастотного генераторного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором та товару-конкурента

Параметри	Варіанти		Відносний показник якості	Коефіцієнт вагомості параметра
	Базовий (конкурент)	Новий		
Безперервна робота в робочих умовах при збереженні своїх технічних характеристик протягом часу, не менше, год.	16	18	1,1	0,4
Середній час відновлення працездатного стану, не більше, год.	8	6	1,3	0,25
Середнє напрацювання на відмову вимірювача, не менше, год.	6000	7 000	1,2	0,1
Ресурс приладу, не менше, год.	14 000	16 000	1,1	0,15
Маса, не більше, кг.	8,5	6,5	1,3	0,1

Відносний рівень якості радіотехнічного надвисокочастотного генераторного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором визначаємо за формулою:

$$K_{\text{я.в.}} = \sum_{i=1}^n q_i \cdot a_i, \quad (5.2)$$

За розрахунками відносний рівень якості радіотехнічного надвисокочастотного генераторного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором становитиме – 1,18. Це означає, що наша розробка краща за якістю на 18% від товару-аналога.

5.1.3 Визначення конкурентоспроможності розробки радіотехнічного надвисокочастотного генераторного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором

У найширшому розумінні конкурентоспроможність товару – це можливість його успішного продажу на певному ринку і в певний проміжок часу. Водночас конкурентоспроможною можна вважати лише однорідну продукцію з технічними параметрами і техніко-економічними показниками, що ідентичні аналогічним показникам уже проданого товару. Для того, щоб високоякісний товар був одночасно і конкурентоспроможним, він має відповідати критеріям оцінювання споживачів конкретного ринку в конкретний час.

Дані для розрахунку загального показника конкурентоспроможності розробки необхідно занести до табл. 5.5.

Таблиця 5.5 – Нормативні, технічні та економічні параметри радіотехнічного надвисокочастотного генераторного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференційним опором і товару-конкурента

Параметри	Варіанти		Відносний показник якості	Коефіцієнт вагомості параметра
	Базовий (конкурент)	Новий		
Безперервна робота в робочих умовах при збереженні своїх технічних характеристик протягом часу, не менше, год.	16	18	1,1	0,4
Середній час відновлення працездатного стану, не більше, год.	8	6	1,3	0,25
Середнє напрацювання на відмову вимірювача, не менше, год.	6000	7 000	1,2	0,1
Ресурс приладу, не менше, год.	14 000	16 000	1,1	0,15
Маса, не більше, кг.	8,5	6,5	1,3	0,1
Ціна за продукт, тис. грн.	5000	4500	0,9	-

Загальний показник конкурентоспроможності розробки (К) з урахуванням вищезазначених груп показників визначаємо за формулою:

$$K = \frac{I_{т.п.}}{I_{е.п.}} = \frac{1,18}{0,9} = 1,31, \quad (5.3)$$

де $I_{т.п.}$ – індекс технічних параметрів (відносний рівень якості інноваційного рішення);

$I_{е.п.}$ – індекс економічних параметрів.

$$I_{е.п.} = \frac{P_{Неі}}{P_{Беі}} = \frac{4500}{5000} = 0,9, \quad (5.4)$$

де $P_{Неі}$, $P_{Беі}$ – економічні параметри (ціна придбання та споживання товару) відповідно нового та базового товарів.

Згідно розрахунків загальний показник конкурентоспроможності – 1,31. Це означає, що наша розробка радіотехнічного надвисокочастотного генераторного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференційним опором більш конкурентна на 31% від товару-аналога.

5.2 Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної, дослідно-конструкторської та конструкторсько-технологічної роботи

5.2.1 Розрахунок витрат, що стосуються виконавців розробки радіотехнічного надвисокочастотного генераторного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференційним опором

Основна заробітна плата кожного із розробників (дослідників) Z_0 , якщо вони працюють в наукових установах бюджетної сфери:

$$Z_0 = \frac{M}{T_p} \cdot t, \quad (5.5)$$

де M – місячний посадовий оклад конкретного розробника (інженера, дослідника, науковця тощо), грн. У 2019 році величини окладів (разом з встановленими доплатами і надбавками) рекомендується брати в межах (5000...10000) грн. за місяць;

T_p – число робочих днів в місяці; приблизно $T_p = (21...23)$ дні;

t – число робочих днів роботи розробника (дослідника).

Зроблені розрахунки зводимо до табл. 5.6.

Таблиця 5.6 – Заробітна плата розробників

Посада	Місячний посадовий оклад, грн.	Оплата за робочий день, грн.	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн.
Керівник	10000	454.5	7	3182
Інженер	5000	227.3	4	910
Технолог	4400	200.0	3	600
Всього:				4692

Основна заробітна плата робітників Z_p , якщо вони беруть участь у виконанні даного етапу роботи і виконують роботи за робочими професіями у випадку, коли вони працюють в наукових установах бюджетної сфери, розраховується за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n t_i \cdot C_i, \quad (5.6)$$

де t_i – норма часу (трудомісткість) на виконання конкретної роботи, годин;

n – число робіт по видах та розрядах;

C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, який виконує дану роботу. C_i визначається за формулою:

$$C_i = \frac{M_m \cdot K_i}{T_p \cdot T_{zm}}, \quad (5.7)$$

де M_m – розмір мінімальної заробітної плати за місяць, грн.; в 2019 році мінімальна заробітна плата становить – 4173 грн.,

K_i – тарифний коефіцієнт робітника відповідного розряду,

T_p – число робочих днів в місяці; приблизно $T_p = 21 \dots 23$ дні;

T_{zm} – тривалість зміни, зазвичай $T_{zm} = 8$ годин.

Величина чинних тарифних коефіцієнтів робітників відповідних розрядів для бюджетної сфери наведена в таблиці:

Розряд	1	2	3	4	5	6	7	8
K_i	1,00	1,09	1,18	1,27	1,36	1,45	1,54	1,64

Таблиця 5.7 – Заробітна плата робітників

Найменування робіт	Трудомісткість, н-год.	Розряд роботи	Погодинна тарифна ставка	Тариф. коеф.	Величина, грн.
Монтаж	4	3	28	1,18	112
Складання	1	3	28	1,18	28
Тестування	1	4	30,1	1,27	30
Всього					170

Додаткова заробітна плата Зд всіх розробників та робітників, які брали участь у виконанні даного етапу роботи, розраховується як (10...12)% від суми основної заробітної плати всіх розробників та робітників, тобто:

$$Зд = 0,1 \cdot (Зр + Зо) = 0,1 \cdot (4692 + 170) = 486,2 \text{ грн.} \quad (5.8)$$

Нарахування на заробітну плату Нзп розробників та робітників, які брали участь у виконанні даного етапу роботи, розраховуються за формулою:

$$\begin{aligned} \text{Нзп} &= 0,22 \cdot (Зр + Зо + Зд) = 0,22 \cdot (4692 + 170 + 486,2) = \\ &= 1177 \text{ грн.} \end{aligned} \quad (5.9)$$

де $Зо$ – основна заробітна плата розробників, грн.;

$Зр$ – основна заробітна плата робітників, грн.;

$Зд$ – додаткова заробітна плата всіх розробників та робітників, грн.;

β – ставка єдиного внеску на загальнообов’язкове державне соціальне страхування, % (приймаємо для 1-го класу професійності ризику 22%).

Амортизація обладнання, комп’ютерів та приміщень A , які використовувались під час (чи для) виконання даного етапу роботи.

Дані відрахування розраховують по кожному виду обладнання, приміщенням тощо.

У спрощеному вигляді амортизаційні відрахування A в цілому бути розраховані за формулою:

$$A = \frac{\text{Ц} \cdot \text{На}}{100} \cdot \frac{\text{Т}}{12},$$

де Ц – загальна балансова вартість всього обладнання, комп’ютерів, приміщень тощо, що використовувались для виконання даного етапу роботи, грн.;

На – річна норма амортизаційних відрахувань. Для нашого випадку можна прийняти, що $\text{На} = (10...25)\%$; Т – термін, використання обладнання, приміщень тощо, місяці.

Таблиця 5.8 – Амортизаційні відрахування

Найменування	Ціна, грн.	Норма амортизації, %	Термін використання, м.	Сума амортизації
Комп'ютер	11200	20	2	373
Осцилограф	8100	10	1	67,5
Генератор	7400	10	1	61,5
Частотомір	9360	10	1	78
Всього	580			

Витрати на матеріали M , що були використані під час виконання даного етапу роботи, розраховуються за формулою:

$$M = \sum_1^n N_i \cdot C_i \cdot K_i, \text{ грн}$$

де N_i – кількість матеріалу i -го виду, шт.;

C_i – ціна матеріалу i -го виду, грн.;

K_i – коефіцієнт транспортних витрат, $K_i = (1,1 \dots 1,15)$;

n – кількість видів матеріалів.

Витрати на комплектуючі K , що були використані під час виконання даного етапу роботи, розраховуються за формулою:

$$K = \sum_1^n N_i \cdot C_i \cdot K_i, \text{ грн}$$

де N_i – кількість комплектуючих i -го виду, шт.;

C_i – ціна комплектуючих i -го виду, грн.;

K_i – коефіцієнт транспортних витрат, $K_i = (1,1 \dots 1,15)$;

n – кількість видів комплектуючих.

Таблиця 5.9 - Матеріали, що використані на розробку

Найменування матеріалу	Ціна за одиницю, грн.	Витрачено	Вартість, грн.
Лак ЕП-730	50	0,05	2,5
Припой ПОС-61	200	0,09	18
Флюс БС-2	150	0,023	3,45
Спиртобензин СВС-50	25	0,04	1
Дріт монтажний	50	0,04	2
Всього, з урахуванням коефіцієнта транспортних витрат	29,6		

Витрати на силову електроенергію $В_e$, якщо ця стаття має суттєве значення для виконання даного етапу роботи, розраховуються за формулою:

$$В_e = В \cdot П \cdot \Phi \cdot К_p, \text{ грн}$$

$В$ – вартість 1 кВт-год. електроенергії, в 2019 р. $В \approx 8,45$ грн./кВт; $П$ – установлена потужність обладнання, кВт; Φ – фактична кількість годин роботи обладнання, годин, $К_p$ – коефіцієнт використання потужності; $К_p < 1$.

Потужність обладнання складає – 0,5 кВт.

Кількість годин роботи складає – 700 годин.

Коефіцієнт викор. потужності -0,9.

$В_e=2662$ грн.

Інші витрати $В_{ін}$ охоплюють: витрати на управління організацією, оплата службових відряджень, витрати на утримання, ремонт та експлуатацію основних засобів, витрати на опалення, освітлення, водопостачання, охорону праці тощо.

Таблиця 5.10 - Комплектуючі, що використані на розробку

Найменування матеріалу	Ціна за одиницю, грн.	Витрачено	Вартість, грн.
Резонансно-тунельний діод	380	1	380
Варактор (АА-632А)	150	1	150
Хвилевід прямокутний	312	1	312
Полікорова гібридна плата	18,3	1	18,3
Пермикач двопозиційний	14,8	1	14,8
НВЧ діод	15,4	1	15,4
Котушка індуктивності з феритовим осердям	4,65	1	4,65
Резистор	0,75	2	1,5
Конденсатор – 3,3 нФ	2,05	1	2,05
Конденсатор – 47 нФ	2,2	1	2,2
Роз'єми	8,1	2	16,2
Коаксіальний кабель з вхідним опором 50 Ом	8,4	1	8,4
Всього, з урахуванням коефіцієнта транспортних витрат	1018		

Інші витрати Ів можна прийняти як (100...300)% від суми основної заробітної плати розробників та робітників, які були виконували дану роботу, тобто:

$$I_b = 1 \cdot (Z_o + Z_p) = 1 \cdot (4692 + 170) = 4862 \text{ грн.} \quad (5.10)$$

Сума всіх попередніх статей витрат дає витрати на виконання даної частини (розділу, етапу) роботи – В.

$$B = 15191 \text{ грн.}$$

5.2.2 Розрахунок загальних витрат на розробку радіотехнічного надвисокочастотного генераторного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором

Загальна вартість всієї наукової роботи визначається за Взаг формулою:

$$\text{Взаг} = \frac{I_b}{\alpha} = \frac{4862}{0,9} = 5402 \text{ грн,} \quad (5.11)$$

де α – частка витрат, які безпосередньо здійснює виконавець даного етапу роботи, у відн. одиницях.

5.2.3 Прогнозування витрат на виконання та впровадження радіотехнічного надвисокочастотного генераторного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором

Прогнозування загальних витрат ЗВ на виконання та впровадження радіотехнічного надвисокочастотного генераторного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором здійснюється за формулою:

$$\text{ЗВ} = \frac{\text{Взаг}}{\beta} = \frac{5402}{0,5} = 10804 \text{ грн,} \quad (5.12)$$

де β – коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання даної роботи.

Так, якщо розробка знаходиться: на стадії науково-дослідних робіт, то $\beta \approx 0,1$; на стадії технічного проектування, то $\beta \approx 0,2$; на стадії розробки конструкторської документації, то $\beta \approx 0,3$; на стадії розробки технологій, то $\beta \approx 0,4$; на стадії розробки дослідного зразка, то $\beta \approx 0,5$; на стадії розробки промислового зразка, $\beta \approx 0,7$; на стадії впровадження, то $\beta \approx 0,9$.

5.3 Прогнозування комерційних ефектів від реалізації радіотехнічного надвисокочастотного генераторного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференціальним опором

З метою прогнозування комерційних ефектів від реалізації радіотехнічного надвисокочастотного генераторного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференціальним опором складемо таблицю вихідних показників, за рахунок яких і відбуватиметься отримання комерційного ефекту.

Таблиця 5.11 – Вихідні дані для прогнозування комерційного ефекту від реалізації радіотехнічного надвисокочастотного генераторного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференціальним опором

Рік реалізації розробки	1	2	3
Кількість од. реалізації, шт.	100	250	350

Величина зростання ціни реалізації радіотехнічного надвисокочастотного генераторного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференційним опором, грн. – 500 грн.

Кількість продукції, що випускалась до впровадження радіотехнічного надвисокочастотного генераторного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференційним опором – 150 шт.

Збільшення чистого прибутку підприємства Π_i для кожного із років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки, розраховується за формулою:

$$\Delta \Pi_i = \sum_1^n (\Delta \text{Ц}_0 \cdot N + \text{Ц}_0 \cdot \Delta N)_i \cdot \rho \cdot \gamma \cdot \left(1 - \frac{v}{100}\right) \quad (5.13)$$

де $\Delta \Pi_0$ – покращення основного оціночного показника від впровадження результатів розробки у даному році. Зазвичай таким показником може бути ціна одиниці нової розробки;

N – основний кількісний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році до впровадження результатів наукової розробки;

ΔN – покращення основного кількісного показника діяльності підприємства від впровадження результатів розробки;

Ц_0 – основний оціночний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році після впровадження результатів наукової розробки;

n – кількість років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки;

λ – коефіцієнт, який враховує сплату податку на додану вартість. У 2018 р. ставка податку на додану вартість дорівнює 20%, а коефіцієнт – 0,8333. З 2014 року ставка податку на додану вартість встановлена на рівні 17%, а коефіцієнт – 0,8547;

ρ – коефіцієнт, який враховує рентабельність продукту. Рекомендується приймати – 0,2...0,3;

v – ставка податку на прибуток. У 2018 році – 21%, у 2013 році – 19%, а з 2014 року – 16%.

Збільшення чистого прибутку підприємства Пі протягом першого року складе:

$$\Delta\Pi_1=16874 \text{ грн.}$$

Збільшення чистого прибутку підприємства Пі протягом другого року (відносно базового року, тобто року до впровадження результатів наукової розробки) складе:

$$\Delta\Pi_2=89765 \text{ грн.}$$

Збільшення чистого прибутку підприємства протягом третього року (відносно базового року, тобто року до впровадження результатів наукової розробки) складе:

$$\Delta\Pi_3=104530 \text{ грн.}$$

5.4 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та період їх окупності

5.4.1 Визначення абсолютної ефективності вкладених інвестицій у розробку радіотехнічного надвисокочастотного генераторного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором

З метою визначення абсолютної ефективності вкладених інвестицій у розробку радіотехнічного надвисокочастотного генераторного пристрою на

основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором користуються формулою:

$$E_{абс} = (ПП - PV), \quad (5.14)$$

де ПП – приведена вартість всіх чистих прибутків, що їх отримає підприємство (організація) від реалізації результатів наукової розробки, грн.;

PV – теперішня вартість інвестицій PV = ЗВ, грн.

У свою чергу, приведена вартість всіх чистих прибутків ПП розраховується за формулою:

$$ПП = \sum_1^t \frac{\Delta\Pi}{(1+\tau)^t} \quad (5.15)$$

де $\Delta\Pi$ – збільшення чистого прибутку у кожному із років, протягом яких виявляються результати виконаної та впровадженої НДДКР, грн.;

t – період часу, протягом якого виявляються результати впровадженої НДДКР, роки;

τ – ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований рівень інфляції в країні; для України цей показник знаходиться на рівні 0,1;

t – період часу (в роках) від моменту отримання чистого прибутку до точки „0”.

$$ПП = 158654 \text{ грн.},$$

$$E_{абс} = 158654 - 10804 = 147850 \text{ грн.}$$

Оскільки $E_{абс} > 0$, то результат від проведення наукових досліджень та їх впровадження принесе прибуток, але це також ще не свідчить про те, що інвестор буде зацікавлений у фінансуванні розробки радіотехнічного

надвисокочастотного генераторного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором.

5.4.2 Розрахунок відносної ефективності вкладених коштів в НДДКР радіотехнічного надвисокочастотного генераторного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором

Для цього користуються формулою:

$$E_B = \tau \sqrt{1 + \frac{E_{абс}}{PV}} - 1 \quad (5.16)$$

де $E_{абс}$ – абсолютна ефективність вкладених інвестицій, грн.;

PV – теперішня вартість інвестицій $PV = ZB$, грн.;

$Tж$ – життєвий цикл наукової розробки, роки.

$$E_B = 1,4$$

Далі, розрахована величина E_B порівнюється з мінімальною (бар'єрною) ставкою дисконтування, що дорівнює:

$$\tau = d + f, \quad (5.17)$$

де d – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2018 році в Україні $d = (0,14...0,2)$;

f – показник, що характеризує ризикованість вкладень; зазвичай, величина $f = (0,05...0,1)$, але може бути і значно більше.

$$E_B = 1,4 \geq \tau = 0,2 + 0,1 = 0,3.$$

Оскільки величина $E_B > \tau_{\text{мін}}$, то інвестор може бути зацікавлений у фінансуванні даної наукової розробки.

5.4.3 Розрахунок терміну окупності коштів, вкладених в наукову розробку радіотехнічного надвисокочастотного генераторного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором

Термін окупності вкладених у реалізацію наукового проекту інвестицій Ток можна розрахувати за формулою:

$$\text{Ток} = \frac{1}{E_B} = \frac{1}{1,4} = 0,7 \text{ року.} \quad (5.18)$$

Оскільки $\text{Ток} < 3 \dots 5$ -ти років, то фінансування даної наукової розробки радіотехнічного надвисокочастотного генераторного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором є доцільним.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Забезпечення захисту працівників під час трудового процесу від небезпечних та шкідливих виробничих факторів, які негативно впливають на життя, здоров'я, а також працездатність людини, забезпечення належних умов праці є важливими завданнями охорони праці, як складової безпеки життєдіяльності.

В цьому розділі проводиться розгляд небезпечних, шкідливих [57] і уражаючих для людини і навколишнього довкілля чинників, що виникають при проведенні дослідження радіотехнічних надвисокочастотних генераторних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором. В ньому висвітлюються, зокрема, технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення послаблення ЕМВ сітчастим екраном, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки під час проведення дослідження, безпека у надзвичайних ситуаціях.

6.1 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

6.1.1 Склад повітря робочої зони та мікроклімат

Визначаємо для приміщення для проведення дослідження радіотехнічних надвисокочастотних генераторних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором, категорію важкості робіт за фізичним навантаженням – легка Іа.

Згідно із [58] допустимі параметри мікроклімату в робочій зоні для холодного та теплого періодів року приведені у табл. 6.1.

Для опромінення менше 25% поверхні тіла людини, допустима інтенсивність теплового опромінення складає 100 Вт/м^2 .

Вміст шкідливих речовин в повітрі робочої зони не повинен перевищувати гранично допустимих концентрацій (ГДК) у повітрі робочої зони та підпадає під систематичний контроль для запобігання можливості перевищення ГДК, значення яких для роботи з ЕОМ наведено в табл.6.2.

При роботі з ЕОМ джерелом забруднення повітря є також іонізація молекул речовин, що містяться у повітрі. Рівні додатних та від'ємних іонів повинні відповідати [60] та приведені в табл. 6.3.

Таблиця 6.1 – Допустимі показники мікроклімату

Період року	Категорія робіт	Температура повітря, °С для робочих місць		Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
		постійних	непостійних		
Холодний	Іа	21-25	18-26	75	≤0,1
Теплий		22-28	20-30	55 при 28°С	0,1-0,2

Таблиця 6.2 – ГДК шкідливих речовин [60]

Назва речовини	ГДК, мг/м ³	Агрегатний стан	Клас небезпеки
Озон	0,1	Пара	4
Оксиди азоту	5	Пара	2
Пил	4	Аерозоль	2

Таблиця 6.3 – Кількість іонів у 1 см³ повітря приміщення при роботі на ЕОМ

Рівні	Мінімально необхідні	Оптимальні	Максимально допустимі
додатній	400	1500-3000	50000
від'ємний	600	3000-5000	50000

Для встановлення необхідних за нормативами показників мікроклімату і складу повітря робочої зони запропоновано:

- 1) у приміщенні повинна бути встановлена система опалення для холодного і кондиціонування для теплого періодів року;
- 2) припливно-витяжна система вентиляції, а при несприятливих погодних умовах кондиціонування.

6.1.2 Виробниче освітлення

З метою забезпечення раціональних гігієнічних умов на робочих місцях значні вимоги пред'являються до якісних та кількісних параметрів освітлення.

З точки зору задач зорової роботи в приміщенні, в якому проводиться робота з дослідження радіотехнічних надвисокочастотних генераторних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором, згідно [59] визначаємо, що вони відносяться до IV розряду зорових робіт. Вибираємо контраст об'єкта з фоном – великий та характеристику фону – середню, яким відповідає підрозряд г.

Нормативні значення коефіцієнта природного освітлення (КПО) і мінімальні значення освітленості для штучного освітлення наведені в табл. 6.4.

Таблиця 6.4 – Нормативні значення КПО та мінімальні освітленості для штучного освітлення

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фону	Освітленість для штучного освітлення, лк			КПО для бокового освітлення, %	
						комбіноване		загальне	Природного	Суміщеного
						всього	у т. ч. від загального			
Середньої точності	0,5-1	IV	г	великий	середній	300	150	150	1,5	0,9

Так як приміщення розташоване у м. Вінниця (2-га група забезпеченості природним світлом), а світлові пройми орієнтовані за азимутом 45° , то за таких умов КЕО визначатиметься за виразом [59, 60]

$$e_N = e_H m_N [\%], \quad (6.1)$$

де e_H – табличне значення КЕО для бокового освітлення, %;

m_N – коефіцієнт світлового клімату;

N – номер групи забезпеченості природним світлом.

За відомими значеннями отримаємо нормовані значення КПО для бокового та суміщеного освітлення:

$$e_{N,b} = 1,5 \cdot 0,9 = 1,4 (\%);$$

$$e_{N,c} = 0,9 \cdot 0,9 = 0,8 (\%).$$

Для забезпечення нормативних значень показників освітлення запропоновано:

1) за недостатнього природного освітлення у світлу пору доби доповнення штучним за допомогою газорозрядних ламп з утворенням системи суміщеного освітлення;

2) застосування загального штучного освітлення у темну пору доби.

6.1.3 Виробничі віброакустичні коливання

Зважаючи на те, що при використанні пристроїв крім усього іншого устаткування використовується обладнання, робота якого генерує шум та вібрацію, потрібно передбачити шумовий та вібраційний захист.

Встановлено, що приміщення, в якому відбувається робота з дослідження радіотехнічних надвисокочастотних генераторних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором може мати робочі місця із шумом та вібрацією, що створюється рухомими елементами ЕОМ.

З метою попередження травмування працюючих під дією шуму він підпадає під нормування. Основним документом стосовно промислового шуму, що діє в Україні, є [61], у відповідності з яким нормовані рівні звукового тиску, рівні звуку та еквівалентні рівні шуму на робочих місцях в промислових приміщеннях не мають перевищувати значень, що наведено у табл. 6.5. Норми виробничих вібрацій наведені в табл.6.6 для локальної вібрації.

Таблиця 6.5 – Допустимі рівні звукового тиску і еквівалентні рівні звуку

Рівні звукового тиску в дБ в октавних полосах із середньо-геометричними частотами, Гц									Рівні звуку та еквівалентні рівні звуку, дБА
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Таблиця 6.6 – Допустимі рівні віброприскорення [52]

Гранично допустимі рівні віброприскорення, дБ, в октавних полосах із середньо-геометричними частотами, Гц								Коректовані рівні віброприскорення, дБА
8	16	31,5	63	125	250	500	1000	
73	73	79	85	91	97	103	109	76

З метою поліпшення віброакустичного клімату у приміщенні передбачено:

1) оздоблення стін спеціальними перфорованими плитами, панелями з метою шумопоглинання;

2) контроль рівня шуму та вібрації не менше 1 разу на рік.

6.1.4 Виробничі випромінювання

Величина напруженості електромагнітного поля на робочих місцях з персональними комп'ютерами не повинні перевищувати граничнодопустимі, які складають 20 кВ/м.

Експозиційна доза рентгенівського випромінювання на відстані 5 см від екрана до корпусу монітора при будь-яких положеннях регулювальних пристроїв не повинні перевищувати $7,74 \cdot 10^{-12}$ Кл/кг, що відповідає потужності еквівалентної дози 0,1 мБер/год (100 мкР/год) у відповідності до [70].

З метою гарантування захисту та досягнення нормативних рівнів випромінювань потрібно використовувати екранування робочого місця і скорочення часу опромінення за рахунок перерв на відпочинок.

Визначимо послаблення магнітного випромінювання сітчастим екраном, якщо довжина хвилі $\lambda = 40$ мм, крок сітки $d = 15$ мм, радіус дроту $r_0 = 0,4$ мм.

Послаблення магнітного випромінювання сітчастим екраном можна визначити за формулою

$$L = 10 \lg \frac{4 \left(\frac{d}{\lambda} \ln \frac{d}{2\pi r_0} \right)^2}{1 + 4 \left(\frac{d}{\lambda} \ln \frac{d}{2\pi r_0} \right)^2} \text{ [дБ]}, \quad (6.2)$$

де d – крок сітки, мм;

λ – довжина хвилі, мм;

r_0 – радіус дроту, мм.

Підставляючи відомі значення у формулу (6.2), одержимо:

$$L = 10 \lg \frac{4 \left(\frac{15}{40} \ln \frac{15}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,4} \right)^2}{1 + 4 \left(\frac{15}{40} \ln \frac{15}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,4} \right)} = 1,4535 \text{ (дБ)}.$$

6.2 Технічні рішення щодо промислової та пожежної безпеки під час проведення дослідження

Сучасний етап розвитку техніки, автоматизації розробок та досліджень характеризується широким використанням на робочому місці ЕОМ. Велика кількість прикладних програм перетворює ЕОМ на основне знаряддя праці радіоінженера.

6.2.1 Безпека щодо організації робочих місць

Розміщення робочих місць, оснащених ЕОМ здійснюється в приміщеннях з одnobічним розташуванням вікон, що неодмінно повинні бути оснащені сонцезахисним засобами: жалюзьями та шторами [63].

У випадку розміщення робочих місць у приміщеннях з джерелами шкідливих та небезпечних промислових чинників, вони повинні розміщатись у абсолютно відокремлених кабінетах з природним освітленням та організованим повітрообміном. Площа, на якій розташовується одне робоче місце для обслуговуючого персоналу, повинна складати не менше 6,0 м², об'єм – не менше як 20 м³, а висота – не менше 3,2 м [64].

Поверхня підлоги має бути рівною, без вибоїн, не слизькою, мати антистатичні властивості, зручною для вологого прибирання. Не дозволяється застосовувати для оздоблення інтер'єру полімери, які забруднюють повітря шкідливими хімічними речовинами та сполуками.

6.2.2 Електробезпека

Основними причинами ураження електричним струмом в цьому приміщенні можуть бути: робота під напругою під час проведення ремонтних робіт, несправність електрообладнання, випадковий дотик до металевих частин, що опинилися під напругою або струмоведучих частин. У відповідності до [65] це приміщення відноситься до приміщень із підвищеною небезпекою ураження електричним струмом в наслідок наявності високої (понад 75 %) відносної вологості. Через це безпека експлуатації електрообладнання має забезпечуватись рядом заходів, які включають використання ізоляції струмоведучих частин, захисного заземлення, захисних блокувань та ін [66].

6.2.3 Пожежна безпека

Відповідно до [67] приміщення, де проводиться робота з дослідження радіотехнічних надвисокочастотних генераторних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором, відноситься до категорії пожежної небезпеки Б. Дане приміщення відноситься до 3-го ступеня вогнестійкості, в якому приміщення знаходяться в будівлі з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону. Для перекриттів дозволяється застосовувати дерев'яні конструкції, захищені штукатуркою або негорючими листовими, плитними матеріалами, або матеріалами груп горючості Г1, Г2. До елементів покриттів не висовуються вимоги щодо межі вогнестійкості, поширення вогню, при цьому елементи горючого покриття з деревини повинні мати вогнезахисну обробку.

Мінімальні межі вогнестійкості конструкцій розглядуваного приміщення наведені в табл. 6.7. В табл. 6.8 приведено протипожежні норми проектування будівель і споруд.

Встановлюємо, що приміщення, в якому проводиться робота з дослідження, має бути обладнане двома вогнегасниками, пожежним щитом, а також ємністю з піском [68].

Таблиця 6.7 – Значення мінімальних меж вогнестійкості приміщення [67]

Ступінь вогнестійкості будівлі	Стіни				Колони	Східчасті майданчики	Плити та інші несучі конструкції	Елементи покриття	
	Несучі та східчасті клітки	Самонесучі	Зовнішні несучі	Перегородки				Плити, прогони	Балки, ферми
3	REI 120	REI 60	E 15	EI 15	R 120	R 60	REI 45	нн	нн
	M0	M0	M0	M1	M0	M0	M1	нн	нн

Примітка. R – втрати несучої здатності; E – втрати цілісності; I – втрати теплоізолювальної спроможності; M – показник здатності будівельної конструкції поширювати вогонь (межа поширення вогню); M0 – межа поширення вогню дорівнює 0 см; M1 – $M \leq 25$ см – для горизонтальних конструкцій; $M \leq 40$ см – для вертикальних і похилих конструкцій; нн – не нормується.

Таблиця 6.8 – Протипожежні норми проектування будівель і споруд [69]

Об'єм приміщення, тис. м ³	Категорія пожежної безпеки	Ступінь вогнестійкості	Відстань, м, при щільності людського потоку в загальному проході, осіб/м ²			Кількість людей на 1 м ширини евакуиходу	Протипожежні розриви, м, при ступені їх вогнестійкості			Найбільша кількість поверхів	Максимально допустима площа поверху, м ² , для числа поверхів		
			до 1	2-3	4-5		I,II	III	IV,V		1	2	3 і більше
до 15	Б	3	40	25	15	45	9	12	15	1	5200	–	–

6.3 Дослідження безпеки роботи надвисокочастотного генераторного пристрою в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій

В даній частині розділу необхідно провести дослідження безпеки роботи надвисокочастотного генераторного пристрою в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій. Серед таких чинників самі актуальні для виходу з ладу розроблювального пристрою є іонізуючі випромінювання та електромагнітний імпульс. Такі фактори впливу на надвисокочастотний генератор може бути при його використанні у військовій сфері та при ліквідації аварій на ядерних об'єктах.

Вплив радіації призводить як до оборотних, так і необоротних змін електричних властивостей твердотільних приладів і інтегральних схем. Оскільки такі зміни можуть приводити до відмов електронних підсистем, значні зусилля останнім часом направляються на розробку методів, що дозволяють уникнути погіршення параметрів мікроелектронного обладнання при опроміненні. У багатьох випадках вирішувати цю проблему доцільно шляхом створення радіаційно-стійких приладів і інтегральних схем [70].

До часток, які при влученні в прилади й схеми можуть викликати небажані наслідки, відносяться електрони, протони, фотони, альфа-частинки, важкі іони. Основні наслідки впливу опромінення на електронні пристрої – іонізація і зсув атомів. Вони викликають різні зміни в напівпровідникових приладах.

При бомбардуванні кремнію фотони й заряджені частинки можуть викликати зсув атомів з положення рівноваги. У випадку фотонів цей процес реалізується за рахунок появи комптоновських електронів з досить великою енергією, які потім взаємодіють із ядрами мішені. Поки ядрам передається мінімальна енергія (для кремнію 21 еВ), буде відбуватися зсув атомів. Відсутність атома у своєму нормальному положенні – це перший вид радіаційного дефекту.

В опроміненому кремнії можуть зустрічатися різні типи дефектів. Елементарні дефекти іноді називають точковими або ізольованими. Можливе виникнення областей з більшим числом досить близько розташованих дефектів. Така область називається кластером дефектів або каскадом зсувів. Згідно з фізикою напівпровідників, атоми домішки в решітках кремнію мають дискретні рівні енергії, які лежать у забороненій зоні між мінімумом зони провідності й максимумом валентної зони. Порушення періодичності атомної решітки може привести до виникнення деяких рівнів енергії в забороненій зоні. До їхньої появи приводять, зокрема, радіаційні дефекти, і саме ці дефектні стани або центри впливають на електричні властивості напівпровідникових приладів. Тому є необхідним провести дослідження стійкості роботи надвисокочастотного генераторного пристрою саме при впливах іонізуючих випромінюваннях та електромагнітному імпульсі.

6.3.1 Дослідження безпеки роботи надвисокочастотного генераторного пристрою в умовах дії іонізуючих випромінювань

За критерій безпеки роботи генератора в цих умовах приймається таке максимальне значення дози опромінення елементної бази (D_{epi}, P), при якому в елементній базі можуть виникнути зміни, але РЕА ще буде працювати з необхідною якістю.

В якості критерію по стійкості роботи генератора можна використати граничне значення рівня радіації. Максимально допустимі значення потужності доз елементів контролера вітрогенератора наведені в таблиці 6.9.

1. За мінімальним значенням $r_{гр}$ (див. табл. 6.9) межа стійкості $P_{гр}$ роботи генераторного пристрою складає $P_{гр} = 10^4$ (Р/год).

2. Для оцінки безпеки роботи генераторного пристрою визначається граничне значення потужності дози гамма-випромінювання ($r_{гр}$) за наступною формулою:

$$P_{zp} = K \times P_{zp} \times K_{noc}, \quad (6.3)$$

де: K – коефіцієнт надійності, $K = 0,9..0,95$;

P_{zp} – рівень радіації, що відповідає початку зворотних змін найменш стійкого елемента;

K_{noc} – коефіцієнт послаблення радіації ($K_{noc} = 1$),

$$P_{гр} = 0,9 \times 10^4 \times 1 = 9 \times 10^3 \text{ (Р/год)}.$$

Таблиця 6.9 - Максимально допустимі потужності доз елементів генератора

№	Блок	Елементи приладу	$P_{гр,i}$ (Р/год)	$P_{гр}$ (Р/год)
1	БЖ	Транзистори КТ3102В	10^5	10^4
		Діоди загального призначення S1M	10^5	
2	МПК	Конденсатори SMD1206 Inf, 16V	10^6	
		Резистори SMD1206 0,125 - 10кОм	10^6	
		Мікросхеми PIC16F877	10^4	
		Діелектрики GTP15	10^4	

З вище наведених розрахунків можна зробити висновок, що стійкість роботи генераторного пристрою в умовах дії іонізуючих випромінювань буде забезпечуватись, якщо радіація в умовах експлуатації не перевищуватиме $P_{гр} = 9 \times 10^3$ (Р/год). Розрахуємо максимально допустимий час перебування пристрою в умовах дії іонізуючих випромінювань:

$$D_m = \frac{2P_{zp}(\sqrt{t_K^2} - \sqrt{t_{II}^2})}{1},$$

де: $\sqrt{t_{II}^2}$, дорівнює 1;

D_m – дорівнює 10^3 ;

$t_{\text{доп}} = 12,6 \times 10^3$ (год).

Отже, працездатність надвисокочастотного генераторного пристрою в умовах дії іонізуючих випромінювань можлива при $P_{\text{гр}} = 9 \times 10^3$ (Р/год).

6.3.2 Дослідження безпеки роботи надвисокочастотного генераторного пристрою в умовах дії електромагнітного імпульсу

Початкові дані: напруга живлення: $U_{\text{жс}} = 12\text{В}$; максимальна довжина горизонтальної струмопровідної частини електричної принципової схеми: $l_B = 5\text{м}$. В якості показника стійкості елементів системи до дії електромагнітного імпульсу використовують коефіцієнт безпеки [70]:

$$K_{\sigma} = 20 \lg \frac{U_{\sigma}}{U_{B(\Gamma)}} \geq 40 \text{дБ}, \quad (6.4)$$

де U_{σ} - допустиме коливання напруги живлення;

$U_{B(\Gamma)}$ - напруга наведена за рахунок електромагнітних випромінювань у вертикальних (горизонтальних) струмопровідних системах.

Спочатку визначається допустиме коливання напруги живлення:

$$U_{\sigma} = U_{\text{жс}} + \frac{U_{\text{жс}}}{100} \cdot N, \quad (6.5)$$

де N - допустимі коливання (приймається $N = 5\%$)

Шляхом підстановки числових даних в (7.3) отримується:

$$U_{\sigma} = 12 + \frac{12}{100} \cdot 5 = 12,6(\text{В}).$$

Визначається максимально очікувана напруга в горизонтальних лініях [70]:

$$U_B = \frac{U_{\partial}}{10^{\frac{K}{20}}} \quad (6.6)$$

Після підстановки числових даних:

$$U_B = \frac{12,6}{10^{\frac{40}{20}}} = 0,126(B).$$

З формули визначається горизонтальна складова напруженості електричного поля[70]:

$$U_B = E_{\Gamma} \cdot l_B. \quad (6.7)$$

Отже, E_{Γ} визначається:

$$E_{\Gamma} = \frac{U_B}{l_B}. \quad (6.8)$$

Після підстановки числових даних в формулу (6.8):

$$E_{\Gamma} = \frac{0,126}{5} = 0,0252(B/m).$$

Вертикальна складова напруженості електричного поля визначається з формули [70]:

$$E_{Г} = 10^{-3} \cdot E_{B}. \quad (6.9)$$

Тоді E_B буде:

$$E_B = 0,0252 \cdot 1000 = 25,2 (В / м).$$

Це значення вертикальної складової напруженості електромагнітного поля можна вважати граничним, до якого гарантується безпечна робота надвисокочастотного генераторного пристрою.

6.4 Висновки до розділу

Під час написання цього розділу було опрацьовано такі питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях, як технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення послаблення ЕМВ сітчастим екраном, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки під час проведення дослідження радіотехнічних надвисокочастотних генераторних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором, безпека в надзвичайних ситуаціях.

Також в даному розділі було проведено дослідження безпеки роботи надвисокочастотного генераторного пристрою при дії іонізуючих випромінювань та електромагнітного імпульсу. Як видно з отриманих результатів, надвисокочастотного генераторного пристрою є безпечним при дії іонізуючих випромінювань до значення $P_{гр}=9 \times 10^3$ (Р/год).

Згідно з виконаними розрахунками безпека роботи надвисокочастотного генераторного пристрою в умовах дії електромагнітного імпульсу можлива при напруженості вертикальної складової електричного поля $E_B < 25,2 В/м$.

ВИСНОВКИ

У роботі здійснено розробку та теоретичне дослідження генератора детермінованого хаосу на базі тунельного діода. На основі математичної моделі генератора Чуа була запропонована математична модель радіочастотного генератора на тунельному діоді. Було виконано комп'ютерне схемотехнічне моделювання радіочастотного генератора Чуа на основі тунельного діода. Експериментально визначено, що генератор працює стабільно в режимах гармонічних та періодичних коливань. Коли змінюються напруги та параметри елементів, у осциляторі з'являються випадкові та хаотичні коливання. Експериментальні дослідження не виявили повністю розвиненого режиму хаосу в осциляторі. Отримані графіки гістограми для функцій розподілу генерованих коливань вихідних напруг V_{OUT1} і V_{OUT2} відрізняються від нормальних розподілів, що підтверджує існування хаотичного безшумного коливання в осциляторі. Ефективне управління динамікою коливань в осциляторі здійснюється зі зміною напруги живлення в діапазоні 0,3 ... 0,34 В або зі зміною значення R резистора в діапазоні 10,2 Ом ... 12,0 Ом.

Розроблено та досліджено високоефективні НВЧ генератори на основі резонансно-тунельних діодів з високою ефективністю, потужністю та низьким рівнем фазових шумів, що працюють на частотах близько 30 ГГц. Використовуючи стабілізаційне коло напруги зміщення, яка не прозводить до падіння постійного струму (постійної напруги), такі генератори демонструють вдесятькратне покращення ефективності перетворення постійного струму в змінні у часі НВЧ електричні коливання (до 14,7%) порівняно зі звичайними конструкціями (0,9%). Радіотехнічні надвисокочастотні генераторні пристрої на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором забезпечують високу максимальну вихідну потужність близько 2 дБм і низький фазовий шум -100 та -113 дБк / Гц при частотах зміщення частот 100 кГц і 1 МГц відповідно. Запропонований підхід є перспективним для реалізації дуже високої ефективності, низькофазного шуму

та потужної міліметрової хвилі (мм-хвиля), а також для створення радіотехнічних пристроїв у терагерцевому (ТГц) діапазоні.

В економічній частині було визначено абсолютну та відносну ефективності вкладених інвестицій у розробку радіотехнічного надвисокочастотного генераторного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором, а також розраховано окупності коштів, вкладених в наукову розробку, який склав 0,7 року.

У розділі Охорони праці було опрацьовано такі питання, як технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення послаблення ЕМВ сітчастим екраном, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки під час проведення дослідження радіотехнічних надвисокочастотних генераторних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором, безпека в надзвичайних ситуаціях

За результатами виконання магістерської кваліфікаційної роботи зроблені такі загальні висновки:

1. Використання резонансно-тунельних структур, зокрема резонансно-тунельних діодів і резонансно-тунельних транзисторів, є перспективним напрямком радіоелектроніки та радіотехніки. Завдяки їх властивостям можна використовувати резонансно-тунельні структури в якості елементів з від'ємною ділянкою вольт-амперної характеристики, енергетичних фільтрів і моноенергетичних інжекторів гарячих електронів.

2. Використання схем на резонансно-тунельних діодах і резонансно-тунельних транзисторах дає можливість підвищити потужність генерованих НВЧ коливань і к.к.д. радіотехнічних генераторних пристроїв.

3. Використання резонансно-тунельних діодів та резонансно-тунельних транзисторів дає можливість розширити область використання напівпровідників, за рахунок використання резонансно-тунельної гетероструктури.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Осадчук В.С. Основи функціональної мікроелектроніки. Навчальний посібник. / В.: ВДТУ, 1998 – 245 с. Укр. Мовою
2. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Фізична наноелектроніка. – Вінниця: ВНТУ, 2015. – 146 с.
3. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Основи наноелектроніки. – Вінниця: ВНТУ, 2016. – 199 с.
4. Долманов И.Н., Толстихин В.И., Еленский В.Г. Полупроводниковые приборы с резонансным туннелированием электронов. Зарубежная радиоэлектроника. М., Радио и связь. №7, 1990. С.66-89.
5. http://plasma.karelia.ru/pub/nano-kurs/NANO8_3tun.shtml
6. <http://www.scientific.ru/journal/news/0803/n030803.html>
7. Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника. М.: Высш. Шк., 1991. – 351 с.
8. Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни “Твердотіла електроніка”.- Уклад. Ю.С.Кравченко – Вінниця: ВДТУ, 2001.
9. S. Q. Murphy, J. P. Eisenstein, L. N. Pfeiffer, K. W. West, *Phys. Rev. B*, 52, 14825 (1995).
10. Туннельные явления в твердых телах, Глава 22. М.: Мир, 2003. – 534 с.
11. F. W. Sheard, G. A. Toombs, *Appl. Phys. Lett.*, 52, 1228 (1998).
12. V. J. Goldman, D. C. Tsui, J. E. Cunningham, *Phys. Rev. B*, 35, 9387 (1997).
13. M. L. Leadbeater, E. S. Alves, L. Eaves, M. Henini, O. H. Hughes, F. W. Sheard, G. A. Toombs, *Semicind. Sci. Technol.*, 3, 1060-1062 (1998).
14. А. Я. Шик, Л. Г. Бакуева, С. Ф. Мусихин, С. А. Рыков, Физика низкоразмерных систем, издательство Санкт – Петербург: Наука (2001).
15. Семенов А. О., Дячук Є. О., Мельник Я. В., Шейко Є. О. Радіотехнічні надвисокочастотні генераторні пристрої на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференційним опором. Матеріали I

Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2019)», м. Вінниця, 14-16 листопада 2019 року. – Вінниця: ВНТУ, 2019. – С. 126-127.

16. Семенов А. О., Мельник Я. В., Дячук Є. О., Шейко Є. О. Оптико-електронні радіотехнічні пристрої на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором. Матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми інфокому-нікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2019)», м. Вінниця, 14-16 листопада 2019 року. – Вінниця: ВНТУ, 2019. – С. 128-129.

17. Семенов А. О., Шейко Є. О., Мельник Я. В., Дячук Є. О. Логічні радіо-імпульсні пристрої на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором. Матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми інфокому-нікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2019)», м. Вінниця, 14-16 листопада 2019 року. – Вінниця: ВНТУ, 2019. – С. 130-131.

18. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э., Теория колебаний.- М.: Наука, 1980.

19. Сборник задач по теории колебаний, под редакцией Постникова Л.В., Королева В.И.,- М.: Главная ред. физ-мат лит., 1978.

20. Лекции по курсам «Основы теории колебаний», «Нелинейные колебания и волны».

21. V. S. Osadcuk, A. V. Osadchuk, and Y. A. Yushchenko, "Radiomeasuring thermal flowmeter of gas on the basis of transistor structure with negative resistance," Elektronika ir Elektrotechnika, Vol. 84, No 4, pp. 47-52, 2008.

22. V.V. Ulansky, S.F. Ben Suleiman, H.M. Elsherif, and M.F. Abusaid. Optimization of NDR VCOs for Microwave Applications. 2016 IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine, pp. 353-357, April 19-21, 2016.

23. Andriy Semenov. Reviewing the mathematical models and electrical circuits of deterministic chaos transistor oscillators. 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Proceedings, National Research University "Higher School of Economics", Russia, Moscow, pp. 1-6, May 12–14, 2016.
24. Andriy Semenov. Mathematical simulation of the chaotic oscillator based on a field-effect transistor structure with negative resistance. 2016 IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2016 - Conference Proceedings, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine, pp. 52 – 56, April 19-21, 2016.
25. A. S. Elwakil, and M. P. Kennedy. A low-voltage, low-power, chaotic oscillator, derived from a relaxation oscillator. *Microelectronics Journal*, Vol. 31, pp. 459-468, 2000.
26. Kwang-Jow Gan, Kuan-Yu Chun, Wen-Kuan Yeh, Yaw-Hwang Chen, and Wein-So Wang. Design of Dynamic Frequency Divider using Negative Differential Resistance Circuit. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, Volume: 3 Issue: 8, pp. 5224-5228, August 2015.
27. Kwang-Jow Gan, Ping-Feng Wu, Din-Yuen Chan, Cher-Shiung Tsai, Zhen-Kai Kao, and Jian-Syong Huang. Frequency Divider Design Using CMOS-NDR-Based Chaos Circuit. *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2012 Vol II, IMECS 2012*, pp. 1-4, March 14 -16, 2012, Hong Kong.
28. Juan Nunez, Maria J. Avedillo, and Jose M. Quintana. Bifurcation Diagrams in MOS-NDR Frequency Divider Circuits. 19th IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems (ICECS 2012), pp. 480-484, 9-12 Dec. 2012.
29. Damon A. Miller, Kristie L. Kovalski, and Andrzej Losowski. Synchronization and anti-synchronization of Chua's oscillators via a piecewise linear coupling circuit. *Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems 5: Vol.5*, pp.458 - 462, February 1999.

30. Iskren Abdomerovich, Andrzej G. Lozowski, and Peter B. Aronhime. High-Frequency Chua's Circuit. Proceeding 43rd IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems, Lansing, MI, pp. 1026-1027, August 8-11, 2000.
31. S. Diebold et al. High-speed error-free wireless data transmission using a terahertz resonant tunnelling diode transmitter and receiver. *Electron. Lett.*, vol. 52, no. 24, pp. 1999–2001, Nov. 2016.
32. T. Miyamoto, A. Yamaguchi, and T. Mukai. Terahertz imaging system with resonant tunneling diodes. *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 55, no. 3, 2016, Art. no. 032201.
33. N. Oshima, K. Hashimoto, S. Suzuki, and M. Asada. Wireless data transmission of 34 Gbit/s at a 500-GHz range using resonant-tunnelling-diode terahertz oscillator. *Electron. Lett.*, vol. 52, no. 22, pp. 1897–1898, Oct. 2016.
34. J. Wang, A. Al-Khalidi, L. Wang, R. Morariu, A. Ofiare, and E. Wasige. 15-Gb/s 50-cm wireless link using a high-power compact III–V 84-GHz transmitter. *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 66, no. 11, pp. 4698–4705, Nov. 2018.
35. A1 Radar Sensor. Accessed: Jun. 6, 2019. [Online]. Available URL: <https://www.acconeer.com/products>
36. R. Izumi, S. Suzuki, and M. Asada. 1.98 THz resonant-tunneling-diode oscillator with reduced conduction loss by thick antenna electrode. in *Proc. 42nd Int. Conf. Infr., Millim., THz Waves (IRMMW-THz)*, Aug./Sep. 2017, pp. 1–2.
37. J. Wang, L. Wang, C. Li, B. Romeira, and E. Wasige. 28 GHz MMIC resonant tunnelling diode oscillator of around 1mW output power. *Electron. Lett.*, vol. 49, no. 13, pp. 816–818, Jun. 2013
38. J. Wang et al. High performance resonant tunneling diode oscillators for THz applications. in *Proc. IEEE Compound Semiconductor Integr. Circuit Symp. (CSICS)*, Oct. 2015, pp. 1–4.
39. J. Wang et al. High performance resonant tunneling diode oscillators as terahertz sources. in *Proc. 46th Eur. Microw. Conf. (EuMC)*, Oct. 2016, pp. 341–344.

40. A. Al-Khalidi, J. Wang, and E. Wasige. Compact J-band oscillators with 1m RF output power and over 110 GHz modulation bandwidth. Proc. 43rd Int. Conf. Infr., Millim., THz Waves (IRMMW-THz), Sep. 2018, pp. 1–2.
41. A. Al-Khalidi, K. Alharbi, J. Wang, and E. Wasige. THz Electronics for data centre wireless links—The TERAPOD project. Proc. 9th Int. Congr. Ultra Mod. Telecommun. Control Syst. Workshops (ICUMT), Nov. 2017, pp. 445–448.
42. R. Han and E. Afshari. A CMOS high-power broadband 260-GHz radiator array for spectroscopy. IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 48, no. 12, pp. 3090–3104, Dec. 2013.
43. R. Lachner. Overview of new Si-based mm-wave technologies and packaging solutions and their potential impact on future mm-wave sensing in automotive and industrial applications. in Proc. Workshop Future Automot. Radar Towards Auto. Driving, Eur. Microw. Week, Sep. 2018.
44. C. Kidner, I. Mehdi, J. R. East, and G. I. Haddad. Bias circuit instabilities and their effect on the d.c. current-voltage characteristics of double-barrier resonant tunneling diodes. Solid-State Electron., vol. 34, no. 2, pp. 149–156, Feb. 1991.
45. M. Reddy et al. Bias stabilization for resonant tunnel diode oscillators. IEEE Microw. Guided Wave Lett., vol. 5, no. 7, pp. 219–221, Jul. 1995.
46. M. Q. Bao and K. L. Wang. Accurately measuring current-voltage characteristics of tunnel diodes. IEEE Trans. Electron Devices, vol. 53, no. 10, Oct. 2006, pp. 2564–2568.
47. S. Suzuki, K. Hinata, M. Shiraishi, M. Asada, H. Sugiyama, and H. Yokoyama. RTD oscillators at 430–460 GHz with high output power (200 μ W) using integrated offset slot antennas. Proc. 22nd Int. Conf. Indium Phosph. Rel. Mater. (IPRM), May/June. 2010, pp. 1–4.
48. J. T. Wallmark and A. H. Dansky. Nonlinear biasing resistors for microwave tunnel-diode oscillators. IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. MTT-11, no. 4, pp. 260–262, Jul. 1963.

49. C. Kidner, I. Mehdi, J. R. East, and G. I. Haddad. Power and stability limitations of resonant tunneling diodes. *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 38, no. 7, pp. 864–872, Jul. 1990.
50. M. Egard, M. Ärlelid, E. Lind, and L.-E. Wernersson. Bias stabilization of negative differential conductance oscillators operated in pulsed mode. *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 59, no. 3, pp. 672–677, Mar. 2011.
51. T. Broekaert, W. Lee, and C. Fonstad. Pseudomorphic In_{0.53}Ga_{0.47}As/AlAs/InAs resonant tunneling diodes with peak-to-valley current ratios of 30 at room temperature. *Appl. Phys. Lett.*, vol. 53, no. 16, p. 1545, Aug. 1988.
52. L. Wang, “Reliable design of tunnel diode and resonant tunnelling diode based microwave and millimeterwave sources,” Ph.D. dissertation, Univ. Glasgow, Glasgow, U.K., 2011.
53. C. S. Kim and A. Brändli. High-frequency high-power operation of tunnel diodes. *IRE Trans. Circuit Theory*, vol. CT-8, no. 4, pp. 416–425, Dec. 1961.
54. S. F. Nafea and A. A. S. Dessouki. An accurate large-signal SPICE model for resonant tunneling diode. *Proc. Int. Conf. Microelectron. (ICM)*, Cairo, Egypt, Dec. 2010, pp. 507–510.
55. M. Asada, S. Suzuki, and N. Kishimoto. Resonant tunneling diodes for sub-terahertz and terahertz oscillators. *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 47, no. 6R, p. 4375, Jun. 2008.
56. L. Wang, J. M. L. Figueiredo, C. N. Ironside, and E. Wasige. DC characterization of tunnel diodes under stable non-oscillatory circuit conditions. *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 58, no. 2, pp. 343–347, Feb. 2011.
57. ГОСТ 12.0.003-74.ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
58. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
59. ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення.

- 60.Пособие по расчету и проектированию, естественного, искусственного и совмещенного освещения НИИСФ – М.: Стройиздат. 1985. – 384 с.
- 61.ДСН 3.3.6-037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
- 62.ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої та загальної вібрацій.
- 63.ГОСТ 12.2.032-78. ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
- 64.Березюк О. В. Охорона праці. Підсумкова державна атестація спеціалістів, магістрів в галузях електроніки, радіотехніки, радіоелектронних апаратів та зв'язку : навчальний посібник / О. В. Березюк, М. С. Лемешев. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 104 с.
- 65.ДНАОП 0.00-1.21-98 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. – К. : Держнаглядохоронпраці, 1998. – 382 с.
- 66.ДБН В.2.5-27-2006. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд.
- 67.ДБН В.1.1.7-2002. Пожежна безпека об'єктів будівництва.
- 68.НАПБ Б.03.001-2004. Типові норми належності вогнегасників.
- 69.СНиП 2.09.02-85. Противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений.
- 70.Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97), МОЗ України. – К., 1997.

Додаток А
(обов'язковий)
ВНТУ

ПОГОДЖЕНО

“ _ ” _____ 2019 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри РТ ВНТУ,
докт. техн. наук, професор
О.В. Осадчук

“ _ ” _____ 2019 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на виконання магістерської кваліфікаційної роботи

«Радіотехнічні надвисокочастотні генераторні пристрої на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором»

08-36.МКР.002.00.000 ТЗ

Керівник роботи

д.т.н., проф., зав кафедри РТ ВНТУ

_____ Осадчук О. В.

Виконавець: ст. гр. РТ-18м

_____ Дячук Є. О.

1 ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Робота проводиться на підставі наказу ректора по Вінницькому національному технічному університету № ____ від "__"_____2019 р. та індивідуального завдання на магістерську кваліфікаційну роботу.

Дата початку роботи: 01.09.2019 р.

Дата закінчення: 15.12.2019 р.

2 МЕТА І ПРИЗНАЧЕННЯ МКР

Метою роботи є проведення аналізу використання резонансно-тунельних транзисторів в мікроелектроніці. Звідси, основною задачею даного дослідження є дослідження можливості використання резонансно-тунельних транзисторів, як елементів сучасної радіотехніки.

Задачами дослідження є:

- розробка простих радіотехнічних надвисокочастотних генераторних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором;
- комп'ютерне схемотехнічне моделювання простих радіотехнічних надвисокочастотних генераторних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором;
- розрахунок електричних параметрів радіотехнічних надвисокочастотних генераторних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором;
- дослідження часових характеристик радіотехнічних надвисокочастотних генераторних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором;
- проведення розрахунків економічної частини та розділу охорони праці.

Об'єктом дослідження даної роботи є фізичні явища та ефекти, що відбуваються в резонансно-тунельних транзисторах та елементах функціональної електроніки, дія яких базується на тунельно-резонансному ефекті.

Предметом дослідження є часові та частотні параметри і характеристики сигналів резонансно-тунельних транзисторів, як елементів функціональної електроніки, дія яких базується на тунельно-резонансному ефекті.

3 ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ МКР

Джерела розробки:

1. Осадчук В.С. Основи функціональної мікроелектроніки. Навчальний посібник. / В.: ВДТУ, 1998 – 245 с. Укр. Мовою
2. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Фізична наноелектроніка. – Вінниця: ВНТУ, 2015. – 146 с.
3. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Основи наноелектроніки. – Вінниця: ВНТУ, 2016. – 199 с.
4. Долманов И.Н., Толстихин В.И., Еленский В.Г. Полупроводниковые приборы с резонансным тунелированием электронов. Зарубежная радиоэлектроника. М., Радио и связь. №7, 1990. С.66-89.
5. http://plasma.karelia.ru/pub/nano-kurs/NANO8_3tun.shtml
6. <http://www.scientific.ru/journal/news/0803/n030803.html>
7. Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника. М.: Высш. Шк., 1991. – 351 с.
8. Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни “Твердотіла електроніка” / Уклад. Ю.С.Кравченко – Вінниця: ВДТУ, 2001.
9. S. Q. Murphy, J. P. Eisenstein, L. N. Pfeiffer, K. W. West, *Phys. Rev. B*, 52, 14825 (1995).
10. Туннельные явления в твердых телах, Глава 22. М.: Мир, 2003. – 534 с.

11. Козловський В. О., Лесько О. Й. Бізнес-планування: Навчальний посібник / В. О. Козловський, О. Й. Лесько [2-е вид., доп. та переробл.] – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, ВНТУ, 2008. – 241 с.
12. Козловський В. О. Інноваційний менеджмент : Навчальний посібник / В. О. Козловський – Вінниця : ВНТУ, 2007. – 210 с.
13. ГОСТ 12.0.003-74.ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
14. Березюк О. В. Охорона праці. Підсумкова державна атестація спеціалістів, магістрів в галузях електроніки, радіотехніки, радіоелектронних апаратів та зв'язку : навчальний посібник / О. В. Березюк, М. С. Лемешев. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 104 с.

4 ВИКОНАВЕЦЬ

Вінницький національний технічний університет, кафедра радіотехніки, студент групи РТ-18м Дячук Є. О.

5 ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ МКР

Здійснити аналіз резонансно-тунельного ефекту. Основна увага приділити фізичному механізму резонансно-тунельного ефекту, параметрам характеристикам резонансно-тунельних діодів. Розробити та дослідити нові функціональні пристрої на основі резонансно-тунельного ефекту.

Основними вимогами є:

– теоретично та модельно дослідити радіотехнічні надвисокочастотні генераторні пристрої на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором;

– застосувати алгоритм найближчих сусідів для перехресного передбачення та прогнозування часових рядів хаотичної напруги.

Вихідні дані для розрахунку:

- діапазон частот генерації радіосигналів – 29..34 ГГц із вихідною потужністю 3,3 мВт (3,95 дБм);
- коефіцієнт корисної дії 14,5%;
- струм живлення 18 мА при напрузі живлення 0,94 В;
- при частотах зміщення 100 кГц та 1 МГц значення фазового шуму - 100,2 дБк/Гц та -112,9 дБк/Гц відповідно.

-

6. ЕТАПИ МКР І ТЕРМІНИ ЇХ ВИКОНАННЯ

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Термін виконання		Очікувані результати	Звітна документація
1.	Огляд літературних джерел. Вибір та узгодження теми МКР	02.09.2019	15.09.2019	Проведено огляд літературних джерел. Вибрана тема	Узгодження теми МКР по кафедрі РТ
2.	Аналіз літературних джерел. Попередня розробка основних розділів	16.09.2019	22.09.2019	Проведений аналіз літературних джерел по даній тематиці. Підготовлений матеріал основних розділів	Вступ
3.	Затвердження теми. Розробка технічного завдання	23.09.2019	02.10.2019	Розроблене ТЗ	Наказ ВНТУ про затвердження тем Додаток А
4.	Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми	03.10.2019	20.10.2019	Проведений аналіз. Розроблені схеми пристрою	Вступ Розділ 1- 2 Звіт по переддипломній практиці
5.	Електричні розрахунки. Експериментальне дослідження	21.10.2019	29.10.2019	Проведені розрахунки та дослідження	Розділ 3
6.	Розділ моделювання	30.10.2019	03.11.2019	Проведено моделювання	Результати моделювання
7.	Розробка графічної частини МКР	04.11.2019	10.11.2019	Плакати. Структурні та електричні схеми	Графічна частина

8.	Аналіз економічної ефективності розробки	11.11.2019	15.11.2019	Економічна частина	Розділ 4
9.	Охорона праці (ОП)	16.11.2019	22.11.2019	Частина БЖД	Розділ 5
10.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	23.11.2019	27.11.2019	Оформлена документація	ПЗ та графічна частина
11.	Нормоконтроль	28.11.2019	29.11.2019	Підпис нормоконтроля	Оформлена ПЗ та графічна частина
12.	Попередній захист МКР, доопрацювання, рецензування МКР	02.12.2019	06.12.2019	Позитивні відзиви	Відзив. Рецензія
13.	Захист МКР ЕК	09.12.2019	17.12.2019	Позитивний захист	Протокол ЕК

7 ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОРЯДОК РЕАЛІЗАЦІЇ МКР

У результаті виконання роботи будуть розроблені:

- електричні схеми радіотехнічних надвисокочастотних генераторних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором;
- результати теоретичних досліджень параметрів і характеристик радіотехнічних надвисокочастотних генераторних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором;
- результати розрахунків елементів схем і проектування радіотехнічних надвисокочастотних генераторних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором
- результати комп'ютерного моделювання параметрів і характеристик радіотехнічних надвисокочастотних генераторних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором;
- економічна частина МКР, розділ охорони праці та цивільного захисту.

Результати, отримані в процесі виконання даної роботи, будуть впроваджені в галузі радіовимірювань:

- Вінницька філія державного концерну РРТ;
- ПАТ “Укртелеком”.

Очікуваний техніко-економічний ефект. При впровадженні результатів досліджень очікується підвищення точності та розширення функціональних можливостей обладнання радіотехнічних і телекомунікаційних систем із використанням радіотехнічних надвисокочастотних генераторних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференційним опором.

8 МАТЕРІАЛИ, ЯКІ ПОДАЮТЬ ПІСЛЯ ЗАКІНЧЕННЯ РОБОТИ ТА ПІД ЧАС ЕТАПІВ

За результатами виконання МКР до ЕК подаються пояснювальна записка, графічна частина МКР, відзив і рецензія.

9 ПОРЯДОК ПРИЙМАННЯ МКР ТА ЇЇ ЕТАПІВ

Поетапно результати виконання МКР розглядаються керівником роботи та обговорюються на засіданні кафедри.

Захист магістерської кваліфікаційної роботи відбувається на відкритому засіданні ЕК.

10 ВИМОГИ ДО РОЗРОБЛЮВАНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

Документація, що розробляється в процесі виконання досліджень повинна містити:

- техніко-економічне обґрунтування розробки;
- електричні схеми радіотехнічних надвисокочастотних генераторних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференційним опором;

- результати чисельних обчислень і теоретичних досліджень радіотехнічних надвисокочастотних генераторних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором;

- результати комп'ютерного моделювання параметрів і характеристик радіотехнічних надвисокочастотних генераторних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором;

- економічну частину та розділ БЖД і ЦЗ.

11 ВИМОГИ ЩОДО ТЕХНІЧНОГО ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ З ОБМЕЖЕНИМ ДОСТУПОМ

У зв'язку з тим, що інформація не є конфіденційною, заходи з її технічного захисту не передбачаються.

Додаток Б
(обов'язковий)

РАДІОТЕХНІЧНІ НАДВИСОКОЧАСТОТНІ ГЕНЕРАТОРНІ ПРИСТРОЇ
НА ОСНОВІ РЕЗОНАНСНО-ТУНЕЛЬНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ
СТРУКТУР ІЗ ВІД'ЄМНИМ ДИФЕРЕНЦІЙНИМ ОПОРОМ

Електрична схема радіотехнічного генератора детермінованого хаосу на
тунельному діоді

Електрична схема генератора детермінованого хаосу на тунельному діоді

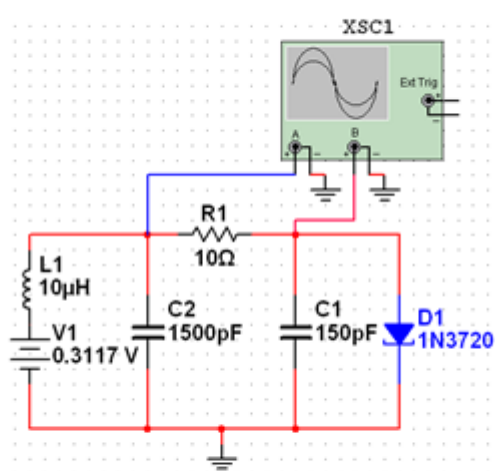


Рисунок Б.1 - Електрична схема генератора детермінованого хаосу NI Multisim 10.1

Додаток В
(обов'язковий)

РАДІОТЕХНІЧНІ НАДВИСОКОЧАСТОТНІ ГЕНЕРАТОРНІ ПРИСТРОЇ
НА ОСНОВІ РЕЗОНАНСНО-ТУНЕЛЬНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ
СТРУКТУР ІЗ ВІД'ЄМНИМ ДИФЕРЕНЦІЙНИМ ОПОРОМ

Математична модель радіотехнічного генератора детермінованого хаосу

Математична модель радіотехнічного генератора детермінованого хаосу

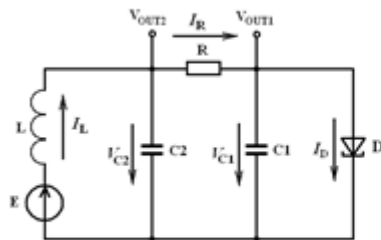


Рисунок В.1 – Еквівалентна схема генератора

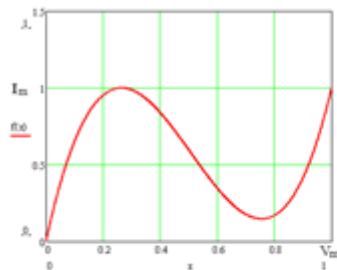


Рисунок В.2 – Графік апроксимованої функції $f(x)$

Система рівнянь Кірхгофа

$$\begin{cases} C_1 \frac{dV_{C1}}{dt} = \frac{1}{R} (V_{C2} - V_{C1}) - I_D(V_{C1}), \\ C_2 \frac{dV_{C2}}{dt} = I_L - \frac{1}{R} (V_{C2} - V_{C1}), \\ L \frac{dI_L}{dt} = E - V_{C2}, \end{cases} \quad (\text{B.1})$$

Математична модель генератора детермінованого хаосу

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{d\tau} = \alpha(x_2 - x_1 - a \cdot f(x_1)), \\ \frac{dx_2}{d\tau} = x_3 - x_2 + x_1, \\ \frac{dx_3}{d\tau} = \beta(b - x_2), \end{cases} \quad (\text{B.2})$$

$$\text{де } \tau = \frac{t}{R \cdot C_2}$$

$$f(x) = 8.592x - 22x^2 + 14.408x^3. \quad (\text{B.3})$$

Додаток Д
(обов'язковий)

РАДІОТЕХНІЧНІ НАДВИСОКОЧАСТОТНІ ГЕНЕРАТОРНІ ПРИСТРОЇ
НА ОСНОВІ РЕЗОНАНСНО-ТУНЕЛЬНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ
СТРУКТУР ІЗ ВІД'ЄМНИМ ДИФЕРЕНЦІЙНИМ ОПОРОМ

Результати теоретичних розрахунків генератора детермінованого хаосу

Результати теоретичних розрахунків генератора детермінованого хаосу

У системі диференціальних рівнянь (В.2) нормовані змінні мають вигляд

$$x_1 = \frac{V_{C1}}{V_m}, x_2 = \frac{V_{C2}}{V_m}, x_3 = \frac{I_L \cdot R}{V_m}. \quad (\text{Д.1})$$

Коефіцієнти системи диференціальних рівнянь обраховують по формулах

$$a = \frac{R \cdot I_m}{V_m}, \alpha = \frac{C_2}{C_1}, b = \frac{E}{V_m}, \beta = \frac{R^2 C_2}{L}. \quad (\text{Д.2})$$

У роботі розраховані показники Ляпунова для: 1) $E = 0,3117 \text{ В}$; 2) $E = 0,34 \text{ В}$; 3) $E = 0,37 \text{ В}$; 4) $E = 0,388 \text{ В}$. Як видно з таблиці В.1 коливання у режимах: 1) періодичні 2) -3) квазіперіодичні, 4) хаотичні.

Таблиця Д.1 – Показники Ляпунова динамічної системи В.2

№	Показники Ляпунова		
	λ_1	λ_2	λ_3
1)	$-1.3018382 \cdot 10^0$	$-1.6004798 \cdot 10^0$	$-2.5325262 \cdot 10^0$
2)	$-1.4031918 \cdot 10^{-1}$	$-4.2997792 \cdot 10^{-1}$	$-2.5178240 \cdot 10^0$
3)	$-1.3088539 \cdot 10^{-1}$	$-4.4810237 \cdot 10^{-1}$	$-2.5151386 \cdot 10^0$
4)	$1.3122501 \cdot 10^{-1}$	$-4.5105659 \cdot 10^{-1}$	$-2.5049510 \cdot 10^0$

Додаток Е
(обов'язковий)

РАДІОТЕХНІЧНІ НАДВИСОКОЧАСТОТНІ ГЕНЕРАТОРНІ ПРИСТРОЇ
НА ОСНОВІ РЕЗОНАНСНО-ТУНЕЛЬНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ
СТРУКТУР ІЗ ВІД'ЄМНИМ ДИФЕРЕНЦІЙНИМ ОПОРОМ

Результати математичного моделювання генератора детермінованого хаосу

Результати математичного моделювання генератора детермінованого хаосу

Чисельні обчислення здійснені за допомогою програмного забезпечення MathCad 15.0 при таких значеннях параметрів схеми генератора: $C1 = 150$ пФ, $C2 = 1500$ пФ, $R1 = 10$ Ом, $L1 = 100$ нГн, $V1 = 0.3117$ В, $Vm = 0.51$ В, $Im = 22$ мА, $E = 0.3117$ В.

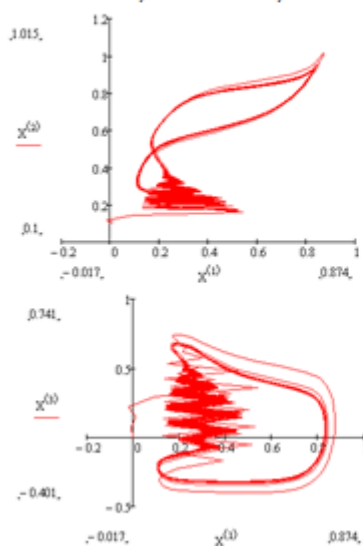


Рисунок Е.1 – Фазові портрети генератора в площинах нормованих змінних: а) x_1-x_2 ; і б) x_1-x_3 .

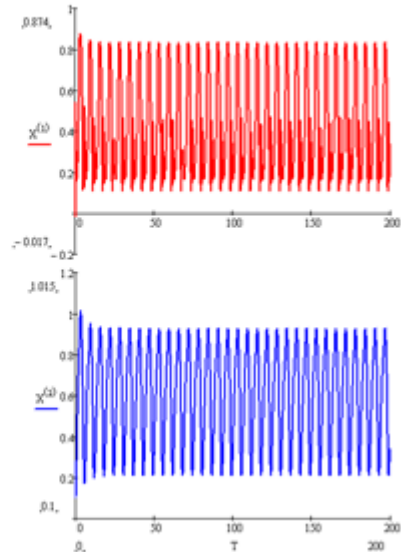


Рисунок Е.2 – Часові діаграми генерованих електричних коливань

Додаток Ж
(обов'язковий)

РАДІОТЕХНІЧНІ НАДВИСОКОЧАСТОТНІ ГЕНЕРАТОРНІ ПРИСТРОЇ
НА ОСНОВІ РЕЗОНАНСНО-ТУНЕЛЬНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ
СТРУКТУР ІЗ ВІД'ЄМНИМ ДИФЕРЕНЦІЙНИМ ОПОРОМ

Результати комп'ютерного схемотехнічного моделювання генератора
детермінованого хаосу

Результати комп'ютерного схемотехнічного моделювання

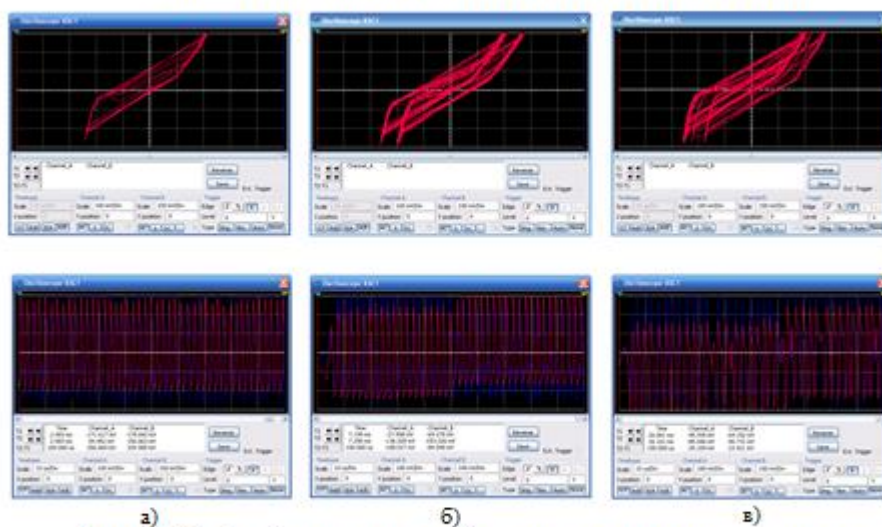


Рисунок Ж.1 – Фазові портрети та часові діаграми генерованих напруг генератора в:
 а) періодичному режимі при $E = 0,3117 \text{ В}$;
 б) квазіперіодичному режимі при $E = 0,34 \text{ В}$;
 в) хаотичному режимі при $E = 0,388 \text{ В}$

Додаток К
(обов'язковий)

РАДІОТЕХНІЧНІ НАДВИСОКОЧАСТОТНІ ГЕНЕРАТОРНІ ПРИСТРОЇ
НА ОСНОВІ РЕЗОНАНСНО-ТУНЕЛЬНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ
СТРУКТУР ІЗ ВІД'ЄМНИМ ДИФЕРЕНЦІЙНИМ ОПОРОМ

Розрахунок статистичних характеристик генерованих хаотичних електричних
коливань

Розрахунок статистичних характеристик генерованих хаотичних електричних коливань

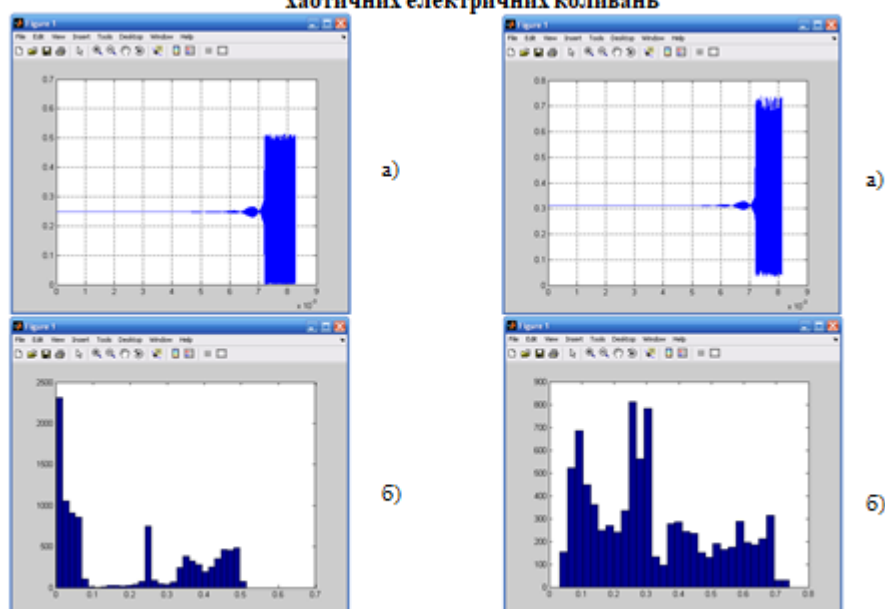


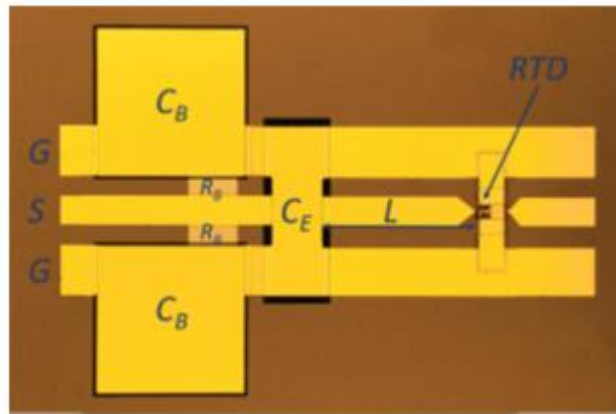
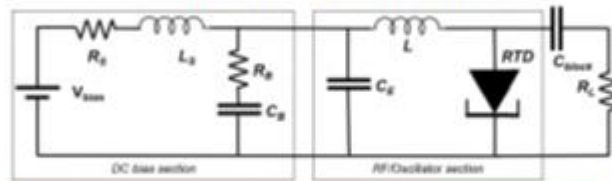
Рисунок К.1 – Часові діаграми та гістограми функції розподілу амплітудних значень ансамблів генерованих хаотичних коливань напруги відповідно V_{OUT1} і V_{OUT2}

Додаток Л
(обов'язковий)

РАДІОТЕХНІЧНІ НАДВИСОКОЧАСТОТНІ ГЕНЕРАТОРНІ ПРИСТРОЇ
НА ОСНОВІ РЕЗОНАНСНО-ТУНЕЛЬНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ
СТРУКТУР ІЗ ВІД'ЄМНИМ ДИФЕРЕНЦІЙНИМ ОПОРОМ

Електрична схема та конструкція НВЧ генератора на резонансно-тунельному
діоді

Електрична схема та конструкція НВЧ генератора на резонансно-тунельному діоді

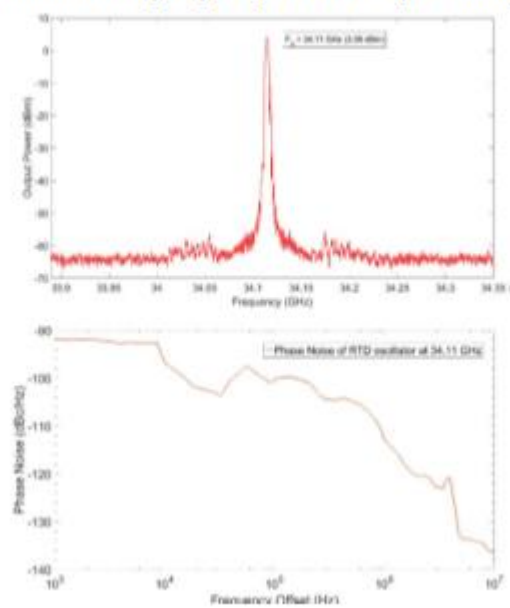


Додаток М
(обов'язковий)

РАДІОТЕХНІЧНІ НАДВИСОКОЧАСТОТНІ ГЕНЕРАТОРНІ ПРИСТРОЇ
НА ОСНОВІ РЕЗОНАНСНО-ТУНЕЛЬНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ
СТРУКТУР ІЗ ВІД'ЄМНИМ ДИФЕРЕНЦІЙНИМ ОПОРОМ

Графіки амплітудо-частотного та фазочастотного спектру електричних
коливань НВЧ генератора на резонансно-тунельному діоді

Графіки амплітудо-частотного та фазочастотного спектру електричних коливань НВЧ генератора на резонансно-тунельному діоді



Додаток Н
(обов'язковий)

РАДІОТЕХНІЧНІ НАДВИСОКОЧАСТОТНІ ГЕНЕРАТОРНІ ПРИСТРОЇ
НА ОСНОВІ РЕЗОНАНСНО-ТУНЕЛЬНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ
СТРУКТУР ІЗ ВІД'ЄМНИМ ДИФЕРЕНЦІЙНИМ ОПОРОМ

Графіки діапазонних характеристик НВЧ генератора на резонансно-тунельному
діоді

Графіки діапазонних характеристик НВЧ генератора
на резонансно-тунельному діоді

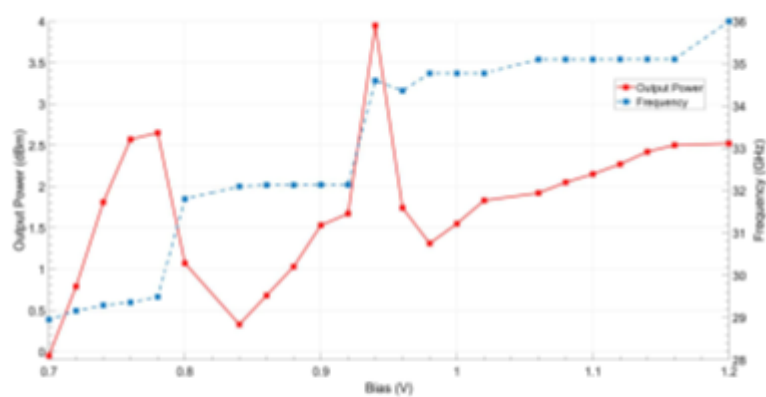


Рис. Н1. Вимірювана вихідна потужність і частота генератора
в залежності від напруги зміщення