

Вінницький національний технічний університет  
Факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем  
Кафедра телекомунікаційних систем та телебачення  
Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр  
Галузь знань 17– Електроніка та телекомунікації  
(шифр і назва)  
Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка  
(шифр і назва)  
Освітня програма Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри ТКСТБ  
к.т.н., професор Г.Г. Бортник

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2019 року

## З А В Д А Н Н Я НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Дячку В'ячеславу Олеговичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Керований за частотою генератор мікрохвильового блоку радіорелейної станції

керівник роботи Кононов Сергій Павлович, канд. техн. наук, доцент,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “02” 10 2019 року № 254

2. Строк подання студентом роботи 02 грудня 2019 року

3. Вихідні дані до роботи смуга частот робочих сигналів: робоча частота 15 ГГц; діапазон електричного керування частотою 175 МГц; перепад вихідної потужності в діапазоні управління 1,5 дБ; робоча напруга 7 В і резонансний опір 8 Ом; добротність ненавантаженого коливного контуру 150; тип фідера - прямокутний хвилевід перерізом 23x10 мм<sup>2</sup>; відношення сигнал/шум – не нижче 60 дБ; коефіцієнт стоячої хвилі у фідері – не більше 1,1; поляризація електромагнітних хвиль – лінійна, вертикальна.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Теоретичні відомості про генератори та підсилювачі мікрохвильового діапазону на діодах Ганна; електричні розрахунки керованого за частотою генератора мікрохвильового блоку радіорелейної станції; моделювання характеристик мікрохвильового генератора на діоді Ганна; економічний розділ; охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях; висновки, додатки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Режими роботи діода Ганна; конструкція генератора; електрична схема генератора, результати модельного дослідження мікрохвильової провідності діоду Ганна; діапазонні властивості мікрохвильового генератора на діоді Ганна.

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Кононов С.П., доцент кафедри ТКСТБ		
Економічна частина			
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях			

7. Дата видачі завдання 02 вересня 2019 року**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розробка технічного завдання	06.09.2019р.	
2.	Техніко-економічне обґрунтування розробки	13.09.2019р.	
3.	Теоретичні відомості про генератори та підсилювачі мікрохвильового діапазону на діодах Ганна	04.10.2019р.	
4.	Дослідження мікрохвильової провідності діодів Ганна	25.10.2019р.	
5.	Електричні розрахунки керованого за частотою генератора мікрохвильового блоку радіорелейної станції	08.11.2019р.	
6.	Аналіз економічної ефективності розробки	15.11.2019р.	
7.	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	22.11.2019р.	
8.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	29.11.2019р.	
9.	Нормоконтроль МКР	02.12.2019р.	
10.	Попередній захист МКР, рецензування МКР	06.12. 2019р.	
11.	Захист МКР ЕК	09.12. 2019р.	

Студент

\_\_\_\_\_

( підпис )

Дячок В.О.

Керівник роботи

\_\_\_\_\_

( підпис )

Кононов С.П.

Вінницький національний технічний університет  
Факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем  
Кафедра телекомунікаційних систем та телебачення

**Пояснювальна записка**  
до магістерської кваліфікаційної роботи  
за освітньо-кваліфікаційним рівнем «магістр»  
на тему:  
**КЕРОВАНІЙ ЗА ЧАСТОТОЮ ГЕНЕРАТОР МІКРОХВИЛЬОВОГО БЛОКУ  
РАДІОРЕЛЕЙНОЇ СТАНЦІЇ  
08-34.МКР.003.00.000 ПЗ**

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

\_\_\_\_\_ Дячок В. О.

Керівник: к.т.н., доцент каф. ТКСТБ

\_\_\_\_\_ Кононов С.П.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 р.

Рецензент: к.т.н., доцент каф. БМІ

\_\_\_\_\_ Тимчик С.В.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 р.

**РЕФЕРАТ**

УДК 621.396

Дячок В. О. Керований за частотою генератор мікрохвильового блоку радіорелейної станції. Магістерська кваліфікаційна робота. – Вінниця: ВНТУ, 2019. – 121 с.

На українській мові. Рис.: 32. Табл.: 24. Бібліогр.: 41 назв.

У магістерській кваліфікаційній роботі здійснено розроблення та дослідження керованого за частотою генератора мікрохвильового блоку радіорелейної станції.

Проведено аналіз технічного завдання та теоретичне дослідження роботи режимів роботи діодів Ганна. Наведено теоретичні відомості про генератори та підсилювачі мікрохвильового діапазону на діодах Ганна. Здійснено теоретичні та модельні дослідження мікрохвильової провідності діодів Ганна. Розроблено конструкцію та проведено електричні розрахунки керованого за частотою генератора діапазону частот 15 ГГц на основі діоду Ганна.

У роботі проведено розрахунки економічної частини, а також розділу охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

Зроблено відповідні висновки по роботі.

Ключові слова: генератор, діод Ганна, радіорелейна станція, мікрохвильова провідність, від'ємна провідність.

## ABSTRACT

Dyachok V. O. Frequency-controlled generator of the microwave unit of the radio relay station. Master's qualification work. – Vinnytsya, VSTU, 2019. – 121 pages.

In Ukrainian language. Figs.: 32. Tables: 24. Refs.: 41 titles.

In the master's qualification work, the development and research of a frequency-controlled microwave generator of a microwave relay station was carried out..

An analysis of the technical specifications and a theoretical study of the operation modes of the Gunn diodes. Theoretical information on microwave generators and amplifiers based on Gunn diodes is presented. Theoretical and model studies of the microwave conductivity of Gunn diodes have been carried out. The design was developed and electrical calculations of a frequency-controlled oscillator in the frequency range of 15 GHz based on the Gunn diode were performed.

The calculations of the economic part, as well as the section on labor and safety in emergency situations, were carried out.

The relevant conclusions are drawn from the work.

Keywords: generator, Gunn diode, relay stations, microwave conductivity, negative conduction.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	6
1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ПРО ГЕНЕРАТОРИ ТА ПІДСИЛЮВАЧІ МІКРОХВИЛЬОВОГО ДІАПАЗОНУ НА ДІОДАХ ГАННА .....	11
1.1 Основні режими роботи діода Ганна .....	11
1.2 Диференційна рухливість електронів у діодах Ганна .....	14
1.3 Доменні режими роботи діода Ганна.....	18
1.4 Режим ОНОЗ діода Ганна.....	20
1.5 Будова та параметри генераторів на діодах Ганна.....	22
1.6 Підсилювачі на діодах Ганна .....	23
1.7 Область робочих частот генераторів на діодах Ганна.....	25
1.8 Конструкції генераторів на діодах Ганна.....	29
2 ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОХВИЛЬОВОЇ ПРОВІДНОСТІ ДІОДІВ ГАННА.....	31
3 ЕЛЕКТРИЧНІ РОЗРАХУНКИ КЕРОВАНОГО ЗА ЧАСТОТОЮ ГЕНЕРАТОРА МІКРОХВИЛЬОВОГО БЛОКУ РАДІОРЕЛЕЙНОЇ СТАНЦІЇ .....	41
3.1 Структурна схема керованого за частотою генератора мікрохвильового блоку радіорелейної станції.....	41
3.2 Вибір конструкції генератора та еквівалентної схеми .....	42
3.3 Розрахунок електронного режиму .....	45
3.4 Розрахунок діодного підсилювача .....	52
3.5 Розрахунок модулятора .....	48
4 МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МІКРОХВИЛЬОВОГО ГЕНЕРАТОРА НА ДІОДІ ГАННА .....	57
5 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ .....	64
5.1 Технологічний аудит розробленого керованого за частотою генератора мікрохвильового блоку радіорелейної станції (дослідження) .....	64
5.2 Розрахунок витрат на проведення досліджень .....	69

5.3 Розрахунок економічного ефекту від можливої комерціалізації нашої розробки.....	75
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	81
6.1 Виробнича санітарія та гігієна праці .....	81
6.2 Технічні рішення з промислової та пожежної безпеки при проведенні дослідження.....	87
6.3 Дослідження стійкості роботи мікрохвильового генератора в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій .....	90
6.4 Висновки до розділу .....	98
ВИСНОВКИ.....	99
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	101
Додаток А (обов'язковий). Технічне завдання .....	106
Додаток Б (обов'язковий). Режим роботи діода Ганна .....	113
Додаток В (обов'язковий). Конструкція мікрохвильового керованого за частотою генератора на діоді Ганна .....	114
Додаток Д (обов'язковий). Електрична схема мікрохвильового керованого за частотою генератора на діоді Ганна .....	115
Додаток Е (обов'язковий). Результати модельного дослідження мікрохвильової провідності діоду Ганна.....	116
Додаток Ж (обов'язковий). Будова мікрохвильових генераторів на діодах Ганна .....	117
Додаток К (обов'язковий). Діапазонні властивості мікрохвильового генератора на діоді Ганна .....	118
Додаток Л (довідниковий). Програма розрахунку мікрохвильової провідності структури Діода Ганна .....	119

## ВСТУП

*Актуальність теми.*

В останні роки спостерігається інтерес до сантиметрових і міліметрових електромагнітних хвиль. Їм відповідають частоти від 3 ГГц і вище, причому вони об'єднані в діапазон надвисоких частот (НВЧ). Перехід в цю частину діапазону пов'язаний з тим, що зі збільшенням частоти збільшується можливість концентрації електромагнітного випромінювання у вузький промінь. Якщо довжина хвилі багато менше розмірів об'єкта, тоді використання гостроспрямованих променів забезпечує зниження взаємних перешкод одночасно працюючих радіолокаторів, збільшує дальність дії радіосистем, дозволяє досягти високої точності визначення координат радіолокованих об'єктів.

Інша особливість електромагнітних хвиль НВЧ діапазону - велика інформативна ємність. Це дозволяє, наприклад, організувати багатоканальну передачу ширококутових телевізійних сигналів з одночасним підвищенням якості зв'язку.

Частиною НВЧ діапазону є вкрай високочастотний (КВЧ) діапазон радіохвиль від 30 до 300 ГГц. Ця частина діапазону знаходить застосування в медицині (КВЧ-терапія), а в перспективі - в рослинній і ветеринарній селекції. В електронних системах НВЧ-діапазону застосовуються напівпровідникові і вакуумні прилади. Однак, поліпшені масогабаритні, вартісні, технологічні показники, низьковольтних схем живлення твердотільних активних елементів дозволяють віддати перевагу їх вакуумним приладів СВЧ. Таким елементом є діод з міждолинним перенесенням електронів - діод Ганна (ДГ). Сучасні ДГ працюють в смузі частот більш октави, мають малі шуми, їх гарантований термін служби перевищує 100 років. Автогенератори на ДГ широко використовуються в якості передавачів радіолокаторів ближньої дії, радіомаяки, приймача-передавач, радіокомунікацій та передачі даних, датчиках швидкості, системах охоронної сигналізації, медицині. У даній ВКР основна увага приділяється питанням теорії і розробці генератора на ДГ (ГДГ) з електричним керуванням частотою.



*Аналіз останніх досліджень.*

Якщо до однорідних зразків арсеніду галію (фосфіду індію) докласти достатньо сильне електричне поле, в них виникнуть спонтанні коливання струму [1]. Такий ефект був виявлений Джоном Ганном в 1963 році. Уже в першій публікації Ганна була висловлена думка, що експериментально виявлений їм ефект може знайти важливе практичне застосування для створення твердотільних генераторів СВЧ діапазону. Це припущення повністю виправдалося. Вже у 1967 року з'явилися промислові зразки генераторів, що працюють на основі ефекту Ганна, здатні замінити відбивні клістри в гетеродина приймачів РЛС і ряді інших пристроїв. Пізніше на основі ефекту Ганна були розроблені СВЧ підсилювачі, аналогові і оптоелектронні пристрої, швидкодіючі логічні схеми.

Міліметрові хвилі (ММХ) знаходять застосування в найрізноманітніших галузях народного господарства. У цьому діапазоні можуть бути створені високоточні радіолокаційні та навігаційні системи ближньої дії, надширокосмугові супутникові системи зв'язку, прилади для дослідження природних ресурсів Землі, медична апаратура і різні наукові прилади.

У даний час особливе значення має завдання створення напівпровідникових систем КВЧ - діапазону хвиль, так як тільки вони дозволяють знизити вагу і габарити апаратури, підвищити її надійність.

Радіотехнічні системи СВЧ діапазону мають широку сферу застосування. До складу більшості з них входять радіопередавачі - пристрої, в значній мірі визначають надійність і довговічність всієї системи в цілому [2].

Проблема створення багатофункціональної, високонадійної, економічної і малогабаритної апаратури вирішується шляхом мініатюризації застосовуваних активних приладів і коливальних систем на основі використання напівпровідникових приладів і інтегральних схем. Раніше прогрес в зазначеному напрямку цілком і повністю визначався рівнем розвитку технології виготовлення транзисторів. Однак з'явилися в кінці 60-х років ХХ століття напівпровідникові генераторні діоди СВЧ склали серйозну конкуренцію транзисторів, і в даний час, завдяки успіхам сучасної технології, значно перевершили їх по ряду найважли-

віших показників [3].

У порівнянні з транзисторами генераторні діоди НВЧ мають істотні переваги в максимальній частоті генерації, вихідної потужності на частотах вище 5 ГГц, надійності, технологічності і масогабаритні характеристики. Ці прилади виділені в окремий клас електронних приладів - напівпровідникові генераторні діоди СВЧ або діоди з негативним опором, до яких відносяться лавинно - пролітні діоди (ЛПД), діоди з міждолинним перенесенням електронів (МПД), так звані діоди Ганна, лавинно-ключові діоди (ЛКД), інжекційно-пролітні діоди (ШД).

У радіолокаційному спостереженні важко переоцінити унікальні властивості ММХ і твердотільних приладів цього діапазону: велика ефективна смуга радіочастот, висока доплерівська девіація частоти, наявність вікон атмосферної прозорості і піків поглинання сигналу на певних частотах, що робить РЛС всепогодними і значно стійкими до радіопротидії [4]. Твердотільні прилади НВЧ-діапазону надають можливість проектування систем з урахуванням зниження масогабаритних характеристик, споживаної потужності, збільшення довговічності і надійності.

При проектуванні генератора необхідно розглянути теорію провідності діода Ганна.

Питання про причини генерації автогенераторів на діодах Ганна було предметом обговорення дослідників протягом більше двох десятиліть. Початкові уявлення, отримані при розгляді процесів в діоді, ізольованому від схеми генератора, ґрунтувалися на гіпотезі про мимовільне зародження в діод Ганна при додатку до нього досить великого постійної напруги рухомих від катода до анода доменів - згустків негативного об'ємного заряду, яким передує область збіднення цим зарядом [5]. Так як при такому підході домени могли існувати при будь-як завгодно малої зовнішньої навантаженні, то доменна теорія ГДГ приводила до гіпотетичної можливості реалізації ККД більшого 100% [6]. Тому в останні роки стали робитися спроби побудови теорії ДГ, позбавленої згаданого недоліку звичайних доменних уявлень [7].

В роботі [8] методом математичного моделювання на основі локальної польовий моделі проведений аналіз впливу профілю легування на характеристики арсенід галієвих ДГ зі структурою  $n + -n-n +$ . Основний вплив профіль легування напівпровідникових структур ДГ надає на амплітудні та частотні характеристики генераторів. Це пов'язано з тим, що у ДГ, що працює в міліметровому діапазоні довжин хвиль, коротка активна область і час формування згустку негативного об'ємного заряду, а також час його відходу в анод, що визначаються рівнем і профілем легування активної області, мають порядок ненабагато менший, ніж період пролітних коливань.

У статті [9] здійснюється моделювання процесів в діоді для поліпшення його гетероструктури з метою використання в генераторі. Моделювання проводиться з урахуванням зміни рівня легування пролітної області. Досліджено робочі характеристики діодів Ганна з гетероструктур GaAs / AlGaAs за допомогою моделі Монте-Карло. Проведено порівняння між звичайними приладами і приладами з гетероструктур з різними профілями легування. Показано, що при відповідному розподілі домішок всередині активної перехідною області можливе поліпшення характеристик генератора, зокрема, спостерігається збільшення граничної частоти і ККД генератора.

Залежно від параметрів кристала, властивостей навантаження, діапазону робочих частот, температури і напруги живлення, ДГ в генераторній схемою може працювати в одному з чотирьох режимів [10]: доменному, обмеженого накопичення об'ємного заряду, гібридного, негативною провідності.

*Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.* Робота проводилася згідно з напрямками наукових досліджень по кафедрі телекомунікаційних систем та телебачення Вінницького національного технічного університету на 2018 і 2019 календарні роки.

*Метою роботи є* розроблення, теоретичне та модельне дослідження мікрохвильового генератора з електронним керуванням частоти діапазону 15 ГГц.

*Задачами магістерської кваліфікаційної роботи є:*

- аналіз теоретичних відомостей про генератори мікрохвильового діапазону на діоді Ганна;
- огляд частотних діапазонів генераторів мікрохвильового діапазону на діоді Ганна;
- теоретичні дослідження мікрохвильової провідності діодів Ганна;
- розробка конструкції генератора мікрохвильового діапазону на діоді Ганна;
- проведення розрахунків економічної частини та розділу охорони праці.

*Об'єктом дослідження є процеси перетворення енергії постійного струму в незатухаючі в часі електричні коливання мікрохвильового діапазону частот.*

*Предметом дослідження є електричні параметри і характеристики генератора мікрохвильового діапазону частот на основі діода Ганна.*

*Наукова новизна одержаних результатів – отримав подальший розвиток метод побудови генераторів НВЧ діапазону на основі напівпровідникових приладів із від'ємним диференціальним опором.*

*Практична новизна одержаних результатів – полягає в отриманих нових результатах експериментальних і модельних досліджень генератору мікрохвильового діапазону частот на основі діода Ганна.*

*Апробація результатів роботи.* Основні ідеї роботи доповідалися та обговорювалися на XLVIII регіональній науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області (м. Вінниця, 14-15 березня 2019).

*Публікації.* За темою досліджень автором опубліковано 3 статті в збірнику праць міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування» (Вінниця, ВНТУ, 14-16 листопада 2019 р.) [11-13].

# 1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ПРО ГЕНЕРАТОРИ ТА ПІДСИЛЮВАЧІ МІКРОХВИЛЬОВОГО ДІАПАЗОНУ НА ДІОДАХ ГАННА

## 1.1 Основні режими роботи діода Ганна

Доменним називається такий режим роботи ДГ, при якому характерна наявність сформованого дипольного домену протягом значної частини періоду коливань. Змінюючи опір навантаження, можна отримати три різних режиму, що відносяться до доменного режиму: пролітний, з затримкою домену, з гасінням домену.

Пролітний режим існує при роботі на мале навантаження порядку опору ДГ в слабкому полі, коли амплітуда коливань напруги на навантаженні мала і не робить помітного впливу на освіту і рух доменів. Частота пролітних коливань  $f_{\text{пр}}$  визначається в основному товщиною активного шару діода  $l_{\text{дг}}$ :

$$f_{\text{пр}} = \frac{100}{l_{\text{дг}}}, \quad (1.1)$$

де  $f_{\text{пр}}$  – частота пролітних коливань, [ГГц],  $l_{\text{дг}}$  - товщина активного шару діода, [мкм].

Режим з затримкою домену реалізується, коли ДГ навантажений на паралельний коливальний контур, резонансне опір якого досить велика, щоб мінімальна напруга на діоді

$$U_{\text{min}} = U_0 - U_1, \quad (1.2)$$

де  $U_1$  - амплітуда синусоїдальних коливань,  $U_0$  - постійна напруга на діоді опускалося нижче порогового рівня  $U_{\text{пор}}$ , причому за припущенням домен досягає анода в такий момент часу  $t$ , для якого миттєве напруга  $U$  на діоді лежить між напругою гасіння домену  $U_{\text{гаш}}$  і напругою  $U_{\text{пор}}$ , тобто

$$U_{\text{гаш}} < \left( U_0 - U_1 \cos \omega t \right) < U_{\text{пор}}. \quad (1.3)$$

При зменшенні вхідного опору контуру умова (1.3) порушується. Режим генератора змінюється на пролітний, що супроводжується стрибком частоти і потужності коливань. Резонансна навантаження в даному випадку виконує роль фільтра, що виділяє одну з гармонік пролітної частоти.

При збільшенні опору навантаження режим з затримкою домену переходить в режим з гасінням домену. Цей перехід супроводжується стрибком потужності і невеликою зміною частоти, що генерується, обумовленим зміною реактивного опору ДГ [14]. Режим з гасінням домену можливий, коли в процесі руху домену до анода миттєва напруга на ДГ падає нижче напруги гасіння домену  $U_{\text{гаш}}$ . В цьому випадку домен швидко розсмоктується.

Область робочих частот даного режиму відповідає нерівності

$$\frac{f_{np}}{2} < f < (2 \div 3) f_{np}, \quad (1.4)$$

а в режимі з затримкою домену -

$$\frac{f_{np}}{2} < f < f_{np}. \quad (1.5)$$

Розглянуті випадки реалізуються на практиці при  $f = 1-3$  ГГц, тобто на тих частотах, де ДГ повністю витіснені транзисторами. Тому дані режими роботи генератора на ДГ не використовуються.

Режим ОНОЗ полягає в запобіганні формування домену за допомогою використання інерційності даного процесу. Для досягнення мети робоча частота, напруга живлення і амплітуда коливань вибираються настільки великими,

щоб миттєве напруга на ДГ пробігало через сферу негативної диференціальної рухливості (ОДП) за час, мале в порівнянні з часом формування домену. В результаті помітний просторовий заряд не встигає сформуватися. Відповідно, електричне поле в активному шарі діода залишається однорідним. Для реалізації режиму ОНОЗ потрібні спеціальні ДГ з дуже однорідним профілем легування. Неоднорідності неприпустимі, оскільки вони прискорюють формування домену. У режимі ОНОЗ здійснюється пряме використання негативною провідності ДГ в області ОДП для перетворення енергії джерела живлення в енергію коливань [14]. Звідси головні переваги режиму: незалежність частоти генерації від пролітної частоти в гранично високий рівень вихідної потужності.

Гібридні режими виникають при відношенні

$$\frac{N_D}{f} \geq 5 \cdot 10^4 c \cdot c''^{-3},$$

де  $N_D$  - концентрація легуючої домішки,  $c$  - питома ємність збідненого шару, і займають проміжне положення між режимами ОНОЗ і доменним. Від режиму ОНОЗ гібридні режими відрізняються існуванням протягом частини періоду коливання досить великого нерівноважного просторового заряду, зазвичай має вигляд одного або декількох дипольних доменів. Багатодоменний режим можливий при високій швидкості зміни напруги на ДГ ( $\frac{dU}{dt} \geq 10^{12} \text{B/c}$ ) і наявності помітних неоднорідностей профілю легування. Але на відміну від ідеалізованого режиму з гасінням домену, час формування просторового заряду тут настільки велике, що він не встигає досягти стаціонарного стану і починає помітно впливати на величину струму, що протікає.

Відмінною особливістю режиму негативною провідності є відсутність автоколивань при роботі ДГ на мале навантаження. Властивості ДГ в даному режимі визначаються наявністю статичного домену.

Залежно від добутку  $N_D l_{ДГ}$  режим негативною провідності розпадається на два якісно різних випадку. Перший виходить при малих  $N_D l_{ДГ} < 2,5 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ , що не допускають існування рухомих доменів. Практичного інтересу він не представляє, оскільки пристрої при таких  $N_D l_{ДГ}$  зазвичай виходять вузькосмуговими і володіють посередніми шумовими характеристиками, а ККД автоколивальних режимів вкрай низький.

Другий випадок відповідає «надкритичному» легуванню, коли виконується нерівність  $N_D l_{ДГ} > 2,5 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ , автоматично забезпечує періодичне виникнення доменів при харчуванні ДГ від джерела ЕРС.

Численні дослідження показали, що існує два основних механізми стабілізації розподілу електромагнітного поля в ДГ, що усувають рухомі домени. Перший з них передбачає рівномірний профіль легування. Другий - обмеження той чи інший спосіб інжекції електронів з катода. Наприклад, стабілізація розподілу електричного поля може бути досягнута при наявності у катода слаблегованого шару (катодного плями), змінним лінійним наростанням  $N_D$  в сторону анода.

## 1.2 Диференційна рухливість електронів у діодах Ганна

У слабкому полі рухливість  $\mu_1$  електронів велика (рис. 1.1), а тому

$$q = q(0)e^{|t/\tau_D|},$$

де  $\tau_D = \varepsilon \varepsilon_0 / [en_0 \mu_{diff}(E_0)]$  - постійна діелектричної релаксації;  $n_0$  - концентрація електронів (рис. 1.2).

Напруженість електричного поля для одновимірного випадку має вигляд (рис. 1.3)

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} [n(x) - n_0] \quad (1.6)$$



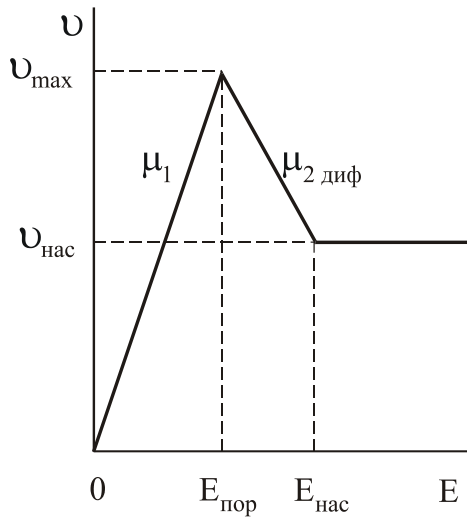


Рисунок 1.1 – Апроксимована залежність дрейфової швидкості електронів від напруженості електричного поля для GaAs

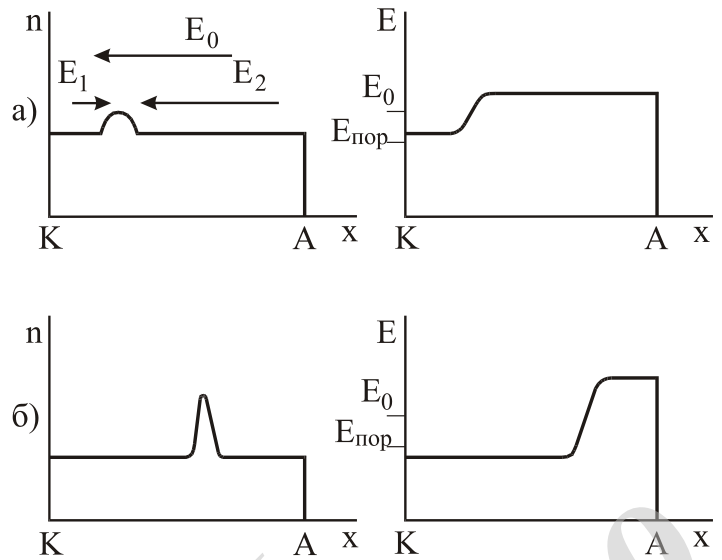


Рисунок 1.2 – Пояснення процесу формування шару накопичення в однорідно-легованому GaAs

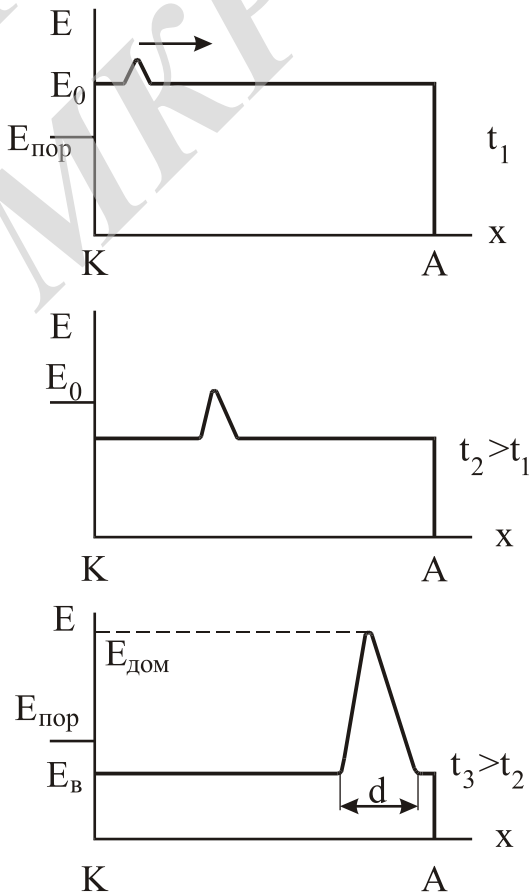
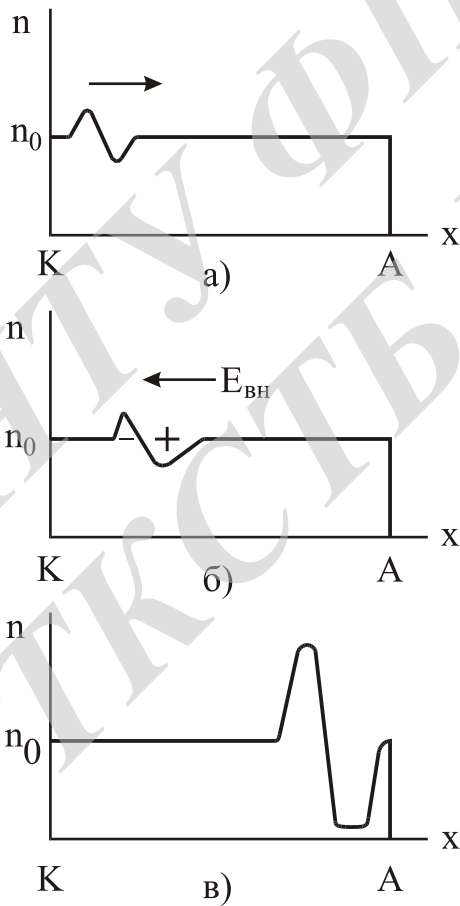


Рисунок 1.3 - Пояснення процесу формування дипольного домену

Струм переходу є максимальним (рис. 1.4, в)

$$I_{\max} = Sen_0 v_{\max} . \quad (1.7)$$

Такий режим роботи діода Ганна називають прогонових режимом. У прогонових режимі струм через діод являє собою імпульси, слідують з періодом

$$T = t_{np} = l / v_{\text{дом}} .$$

Діод генерує НВЧ-коливання з пролітної частотою

$$f_{np} = 1 / t_{np} = v_{\text{дом}} / l .$$

Електронні процеси в діоді Ганна повинні розглядатися з урахуванням рівнянь Пуассона, безперервності і повної щільності струму, що мають для одновимірного випадку такий вигляд

$$e \frac{\partial n}{\partial t} + e \frac{\partial}{\partial x} \left[ nv(E) - D \frac{\partial n}{\partial x} \right] = 0 , \quad (1.8)$$

$$J_{\text{полн}} = \frac{I}{S} = env(E) - eD \frac{\partial n}{\partial x} + \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} . \quad (1.9)$$

Миттєве напруга на діоді

$$U = \int_0^l E dx .$$

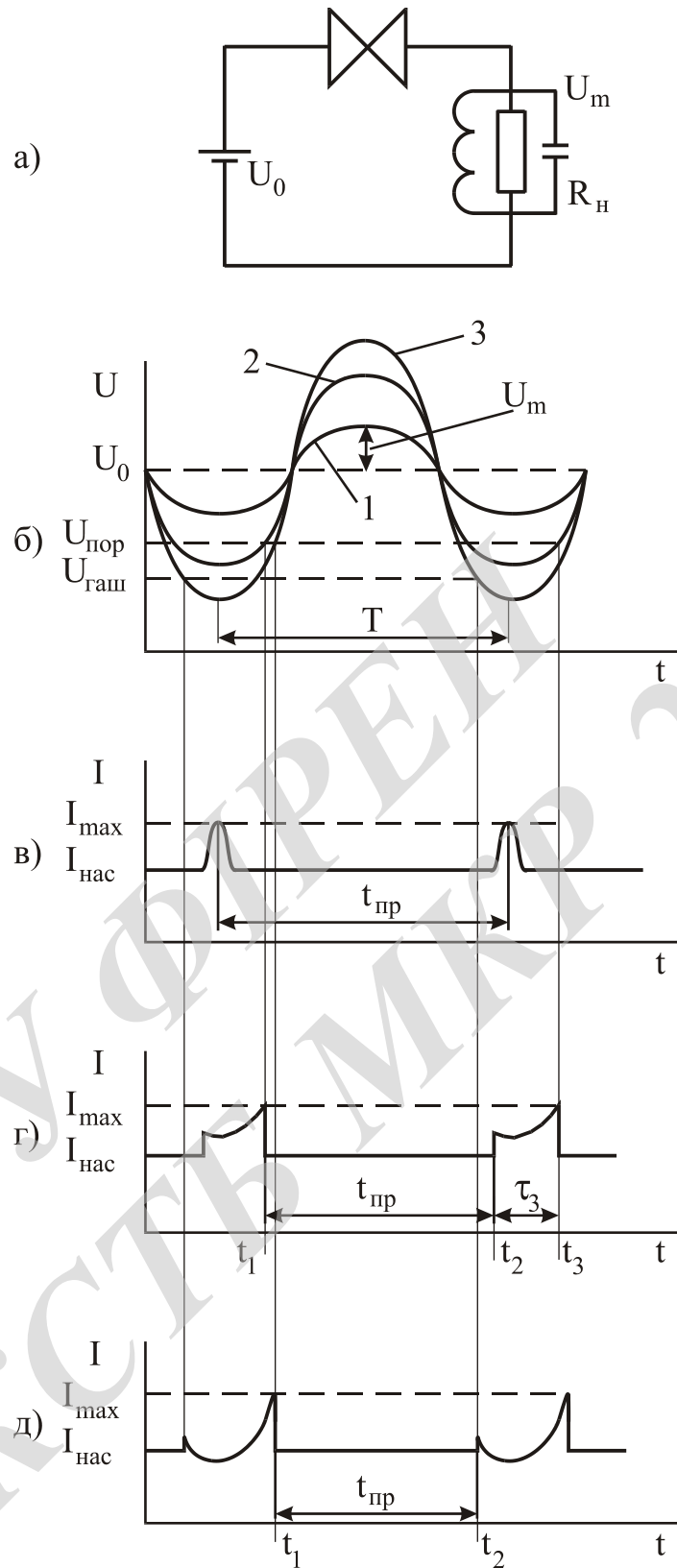


Рисунок 1.4 – Еквівалентна схема генератора на діоді Ганна (а) і часові залежності напруги (б) і струму через діод Ганна в прогонових режимах (в) і в режимах з затримкою (г) і гасінням домену (д)

### 1.3 Доменні режими роботи діода Ганна

Для доменних режимів роботи діода Ганна характерна наявність в зразку сформованого дипольного домену. У [9] показано, що з (1.6), (1.8) і (1.9) випливає, що швидкість домену та максимальна напруженість поля в ньому  $E_{дом}$  пов'язані правилом рівних площ

$$\int_{E_B}^{E_{дом}} [v(E) - v_{дом}] dx = 0. \quad (1.10)$$

Відповідно до (1.10) площі, заштриховані на рис. 1.5, а й обмежені лініями  $v(E), v_{дом} = const, E_{дом} = const$ , є однаковими.

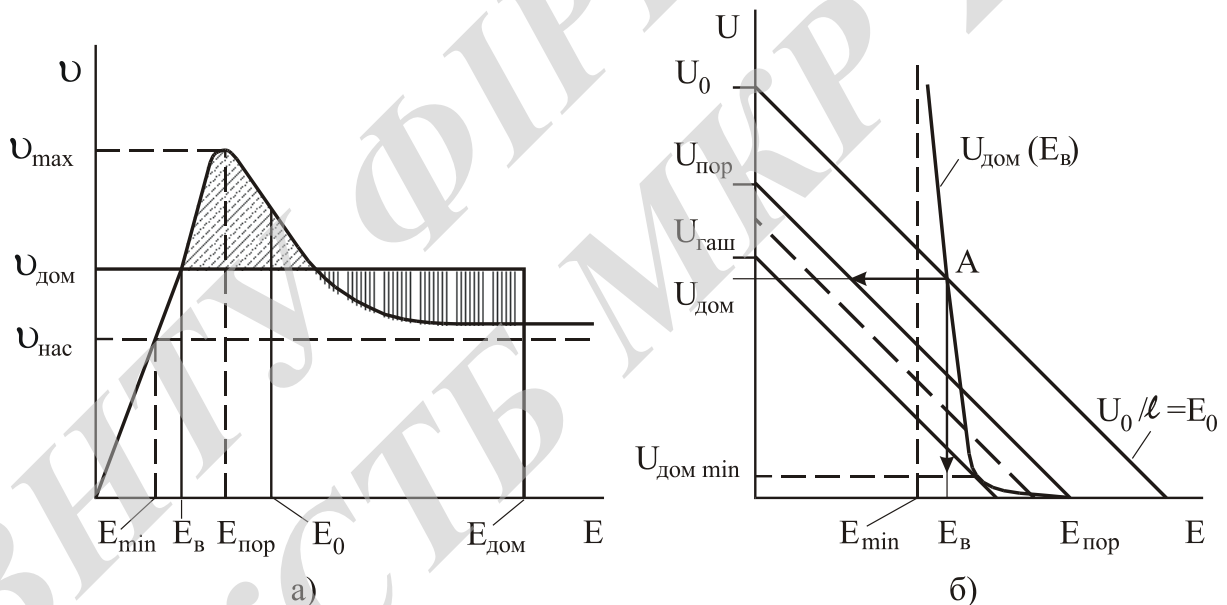


Рисунок 1.5 – Визначення параметрів дипольного домену

На рис. 1.5,б приведена залежність напруги домену від напруженості електричного поля поза ним, де  $d$  - довжина домену (рис. 1.3,в). Там же побудована «приладова пряма» діода довжиною  $l$  при заданій напрузі  $U_0$  з урахуванням того, що повне напруга на діоді  $U_0 = E_0 l = U_{дом} + E_B l$ . Точка перетину  $A$  визначає напругу домену  $U_{дом}$  і напруженість поля поза ним  $E_B$ .

При  $U_0 = (2 \div 3)U_{пор}$  можна наближено вважати, що  $v_{дом} = v_{нас}$ , а  $E_B = 0,5E_{пор}$ , тому пролітна частота:

$$f_{пр} = v_{нас} / l . \quad (1.6)$$

Постійна часу наростання об'ємного заряду в режимі малого обурення дорівнює постійній діелектричній релаксації  $\tau_D$  і визначається негативною диференційною рухливістю  $\mu_{диф}$  і концентрацією електронів  $n_0$ . При максимальному значенні  $\mu_{2диф} \approx 2000 \text{ см}^2 \times (B \cdot c)^{-1} \tau_D \approx 3 \cdot 10^{-12} \text{ с}$ , тоді як час встановлення ОДП менш  $10^{-12} \text{ с}$ . Таким чином, час формування домену визначається в значній мірі процесом перерозподілу об'ємного заряду. Воно залежить від початкової неоднозначних - неоднорідностей поля, рівня легування і прикладеної напруги.

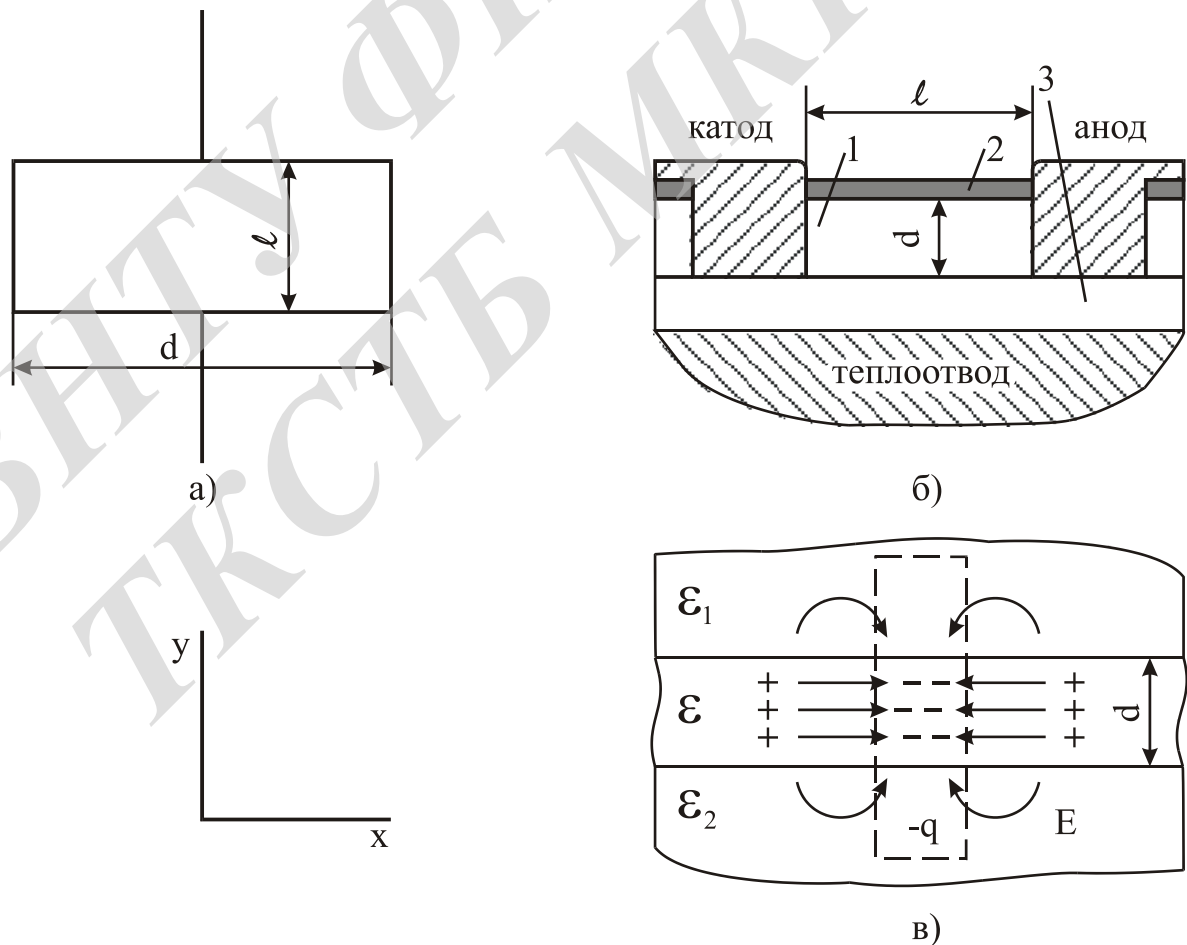


Рисунок 1.6 - Діод Ганна

Наближено вважають, що

$$\tau_{\phi} \approx (10 \div 20)\tau_{Д} \approx 5 \cdot 10^4 / n_0, \quad (1.7)$$

де  $n_0$  виражено в  $\text{см}^{-3}$ . Звідси умовою існування дипольного домену є  $t_{np} > \tau_{\phi}$  або  $n_0 l > 5 \cdot 10^{11} \text{см}^{-2}$ .

Значення твору концентрації електронів на довжину зразка  $n_0 l = 5 \cdot 10^{11}$  називають критичним і позначають  $(n_0 l)_{кр}$ . При  $n_0 l < (n_0 l)_{кр}$  домен сильного поля не утворюється і зразок називають стабільним. При  $n_0 l > (n_0 l)_{кр}$  можливі різні доменні режими. Критерій, коли  $d \ll l$ , критерій відсутності доменної нестійкості  $n_0 l < (n_0 l)_{кр}$  замінюється на умову  $n_0 d < (n_0 d)_{кр}$ . Для таких структур  $n_0 l$  при стійкому розподілі електричного поля може бути більше  $5 \cdot 10^{11} \text{см}^{-2}$ .

При малому опорі навантаження, коли  $R_H \approx R_0$ , де  $R_0 = l / (en_0 \mu_1 S)$  - опір діода Ганна в слабких полях, амплітуда високочастотної напруги  $U_m$  невелика і миттєве напруга на діоді перевищує порогове значення  $I_{нас} = Sen_0 v_{нас}$  (див. рис. 1.4,б).

#### 1.4 Режим ОНОЗ діода Ганна

Умова слабого наростання заряду за час  $T - \tau_1$  наближено запишемо у вигляді  $\tau_{\phi} \approx 3\tau_{Д.ср} > T$ , де  $\tau_{Д.ср} = \varepsilon\varepsilon_0 / (en_0 |\mu_{диф.ср}|)$ ;  $\mu_{диф.ср}$  - середнє значення негативної диференціальної рухливості електронів в області  $E > E_{нор}$ . Розсмоктування об'ємного заряду за час  $\tau_1$ , буде ефективним, якщо  $\tau_1 > \tau_{д1}$  і  $T \gg \tau_{д1}$ , де  $\tau_{д1} = \varepsilon\varepsilon_0 / (en_0 \mu_1)$ ;  $\tau_{д1}$  і  $\mu_1$  - постійна часу діелектричної релаксації і рухливість електронів в слабкому полі.

Вважаючи  $\mu_1 = 5000 \text{ см}^2 / (B \cdot c)$ ,  $|\mu_{\text{диф.ср}}| = 100 \text{ см}^2 / (B \cdot c)$ , маємо  $2 \cdot 10^5 > n_0 / f > 2 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3} \cdot c$ . Це нерівність визначає інтервал значень  $n_0 / f$ , в межах якого реалізується режим ОНОЗ.

Електронний к.к.д. генератора на діоді Ганна в режимі ОНОЗ можна розрахувати за формою струму (рис. 1.7). При  $U_0 / U_{\text{пор}} = 3 \div 4$  максимальний к.к.д. становить 17%.

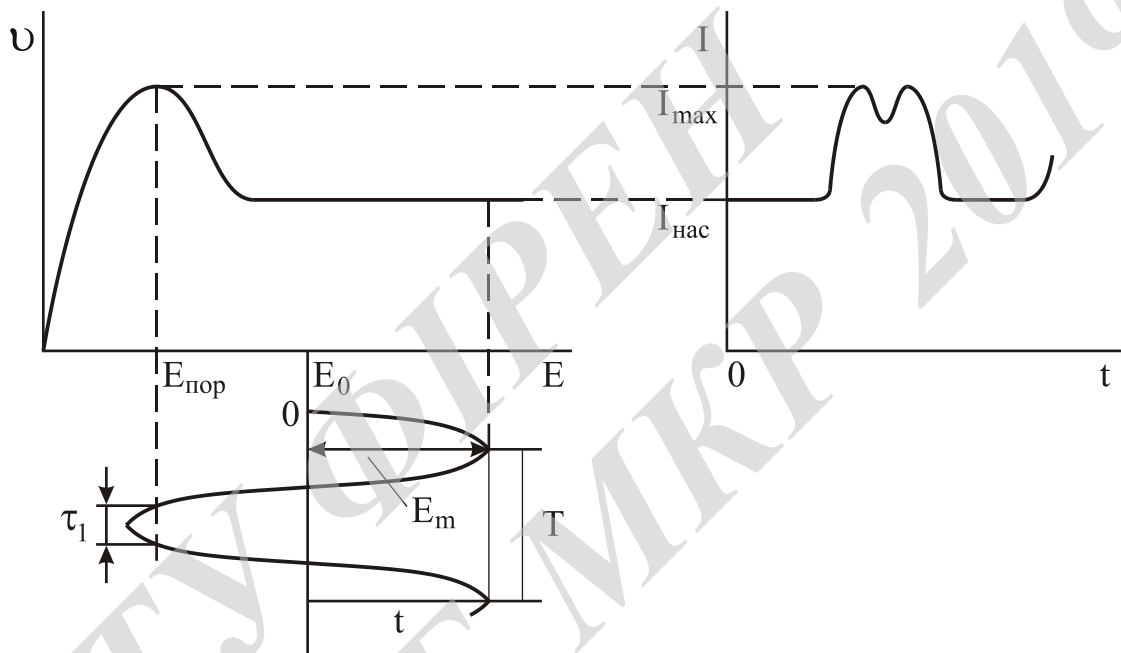


Рисунок 1.7 – Часова залежність струму на діоді Ганна в режимі ОНОЗ

Довжина діодів Ганна

$$l \approx 100 / f, \quad (1.13)$$

де  $f$  виражена в ГГц, а  $l$  - в мкм.

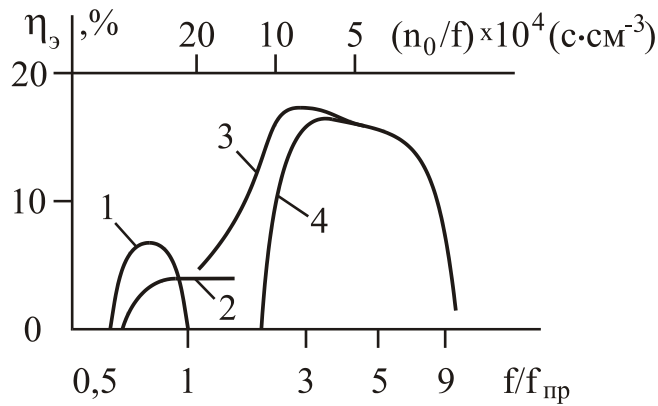


Рисунок 1.8 – Електронний ККД генераторів на діоді Ганна з GaAs для різних режимів роботи: 1-з затримкою формування домену; 2-з гасінням домену; 3-гібридний; 4-ОНОЗ

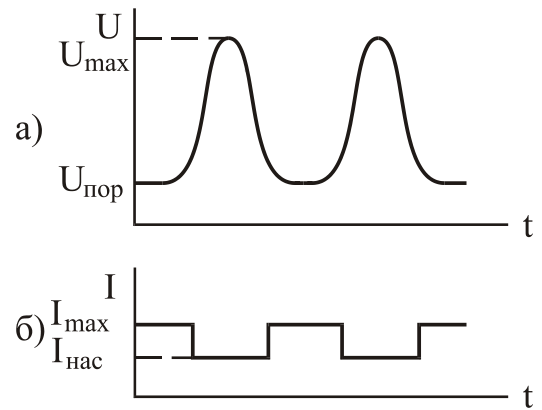


Рисунок 1.9 – Часова залежність напруги (а) і струму (б) діода Ганна в режимі підвищеного ККД

### 1.5 Будова та параметри генераторів на діодах Ганна

На рис. 1.8  $\eta_e$  не перевищують 20%. Часові залежності струму для підвищення ККД генератора показані на рис. 1.9. Розкладання функцій  $U(t)$  і  $I(t)$  в ряд Фур'є при  $U_m > U_{пор} > 10$  і  $I_{max}/I_{нас} \approx 2$  дає значення електронного ККД. Для діодів Ганна з GaAs  $\eta_e \approx 25\%$  при застосуванні в діодах Ганна матеріалів з великим відношенням  $v_{max}/v_{нас}$ .

У доменних режимах  $f \approx f_{пр} = v_{нас}/l$  тому відповідно до  $P_{вих} = 0,5U_m^2/R_{\Omega}$  маємо:

$$P_{вих} f = 0,5E_{0Доп}^2 v_{нас}^2 / R_{\Omega} ,$$

де  $R_{\Omega}$  - еквівалентний опір навантаження.



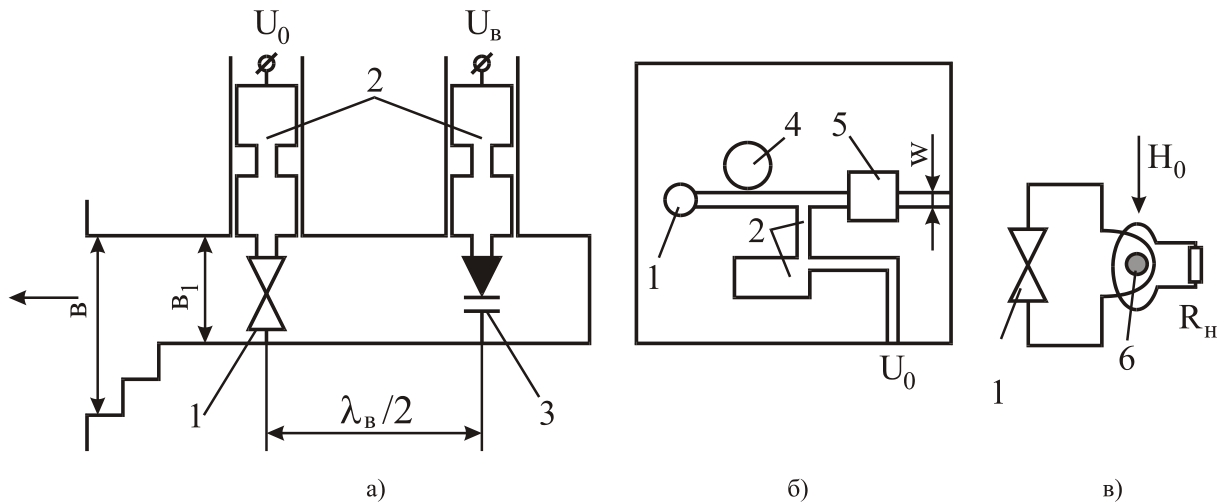


Рисунок 1.10 – Будова генераторів на діодах Ганна:

а - хвильове; б - мікросмужкова; в - з перебудовою частоти ЗПГ-сферою

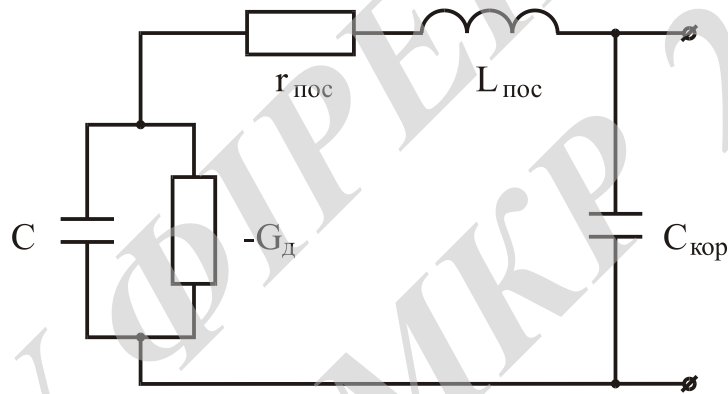


Рисунок 1.11 – Узагальнена еквівалентна схема діода Ганна

### 1.6 Підсилювачі на діодах Ганна

У субкритично легованих діодах при  $n_0 l < 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  неможливе утворення біжить домену навіть при напружених, що перевищують граничне (див. рис. 1.12).

На рис. 1.13 наведена схема будови тонко-плівкового підсилювача біжної хвилі на GaAs з поздовжнім дрейфом.

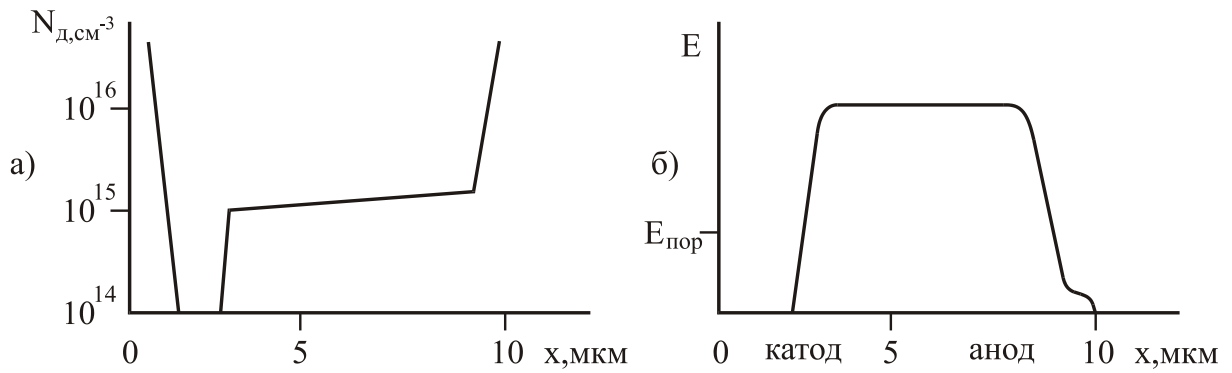


Рисунок 1.12 – Профіль легування (а) і розподіл поля (б) в діод Ганна з високоомною прикатодною областю

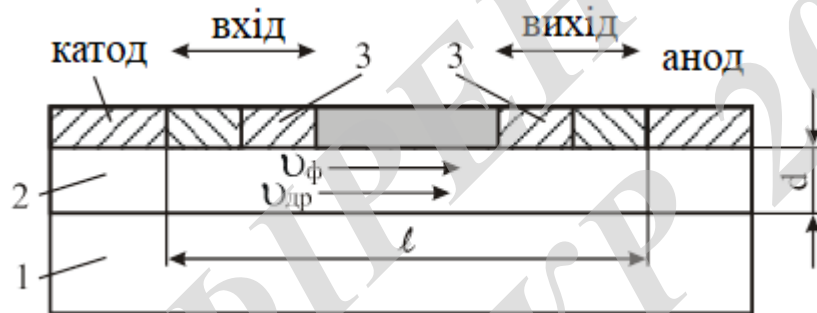


Рисунок 1.13 – Схема будови тонкоплівкового підсилювача біжної хвилі на GaAs з поздовжнім дрейфом

Для роботи підсилювача потрібно забезпечити

$$E = E_0 + E_m e^{j\alpha z - \Gamma z}; n = n_0 + n_m e^{j\alpha z - \Gamma z}; E_0, n_0 \gg E_m, n_m,$$

що призводить до дисперсійного рівняння для постійної поширення

$$\Gamma = \alpha + j\beta,$$

має рішення у вигляді двох хвиль.

Одна з них є прямою хвилею, що розповсюджується вздовж плівки від катода до анода з фазової швидкістю  $v_\phi \approx v_{dr}$ , і має амплітуду, непостійну по закону:

$$\exp[z/(\tau_D v_{dp})] = \exp(-t'/\tau_D) , \quad (1.14)$$

де  $t'$  - час руху електронів від входу приладу. При роботі в області ОДП  $\tau_D < 0$  і пряма хвиля наростає. Друга хвиля є зворотною, поширюється від анода до катода і загасає по амплітуді як  $\exp(v_{dp}z/D)$ . Коефіцієнт дифузії  $D$  для GaAs становить  $200 \div 600 \text{ см}^2/\text{с}$ , тому  $zv_{dp} \gg D$  і зворотна хвиля швидко затухає. З (1.14) коефіцієнт підсилення приладу дорівнює (дБ)

$$K_y = 10 \lg \frac{P_{\text{вих}}}{P_{\text{вх}}} = 8,68 \frac{e |\mu_{\text{диф}}|}{v_{dp} \epsilon \epsilon_0} n_0 l . \quad (1.15)$$

Оцінка по (1.15) при  $|\mu_{\text{диф}}| = 2000 \text{ см}^2/(B \cdot \text{с})$  і  $n_0 = 10^{14} \div 10^{15} \text{ см}^{-3}$  дає підсилення порядку 0,3-3 дБ/мкм.

### 1.7 Область робочих частот генераторів на діодах Ганна

Для використання ГДГ вельми важливим завданням є смуга робочих частот. В основному використовуються два способи управління робочою частотою генератора: електричний і механічний. Перевага віддається першому способу зважаючи на порівняно простий технології виготовлення таких генераторів, малої інерційності, можливості отримання досить великий смуги перебудови, високої лінійності модуляційної характеристики.

Для отримання широкої смуги перебудови частоти у ГДГ необхідно вдосконалювати хвильоводно-резонансні структури. В роботі [15] описана резонансна система на поза межних типах коливань, що представляє собою

Н-площинне ортогональне розгалуження поза межних прямокутних хвильоводів з діелектриком в центральній області. Автори використовували ГДГ з механічною перебудовою частоти, яка досягла 20%.

Небажаним якістю механічної перебудови є те, що частота змінюється дискретно. Генератори, керовані по частоті резонатором з феритом з залізо-ітрієві граната, відрізняються високою лінійністю (нелінійність становить менше 1% в сантиметровому діапазоні), але малою швидкістю перебудови.

Електрична перебудова частоти ГДГ забезпечує максимальну швидкість перебудови при мінімальних габаритах і масі. Електрична перебудова частоти можлива напругою зміщення, використанням р-і-п - діодів і за допомогою варактора. Варакторний метод перебудови є найбільш перспективним. Основна проблема перебудови зводиться до вибору способу включення варикапа або варактора таким чином, щоб в діапазоні перебудови не порушувалася стійкість схеми, і опір втрат, наведене до контактів включення структури ДГ, не перевищувало величини її негативного опору. Ці умови виконуються при максимальній конструктивній простоті при паралельному або послідовному включенні варактора в резонатор ГДГ. У міліметровому діапазоні довжин хвиль для отримання максимальної смуги електричної перебудови використовується послідовне включення генераторного і варакторного діодів [16].

Резонансні системи генераторів СВЧ з варакторною перебудовою частоти можна розділити на дві основні групи: квазізосереджені (що не містять розподілених елементів) і шлейфного (з використанням відрізків лінії передачі в якості елементів резонансних систем). Квазізосереджені резонансні системи створюються на основі реактивних елементів напівпровідникової структури діода і сполучних провідників, розміри яких багаторазово менше довжини хвилі коливань.

Активний елемент представимо послідовним з'єднанням негативного активного опору  $RA$  і ємнісного опору  $XA$ , а варактор - ємнісним опором  $XB$ . Для створення резонансної системи необхідна наявність ще одного опору індуктивного характеру  $XL$ . Всього можливі вісім варіантів з'єднання корисного навантаження, ДГ, варактора і додаткової індуктивності (рис. 1.14). З показаних схем перевага віддається послідовної схемою типу «Н».

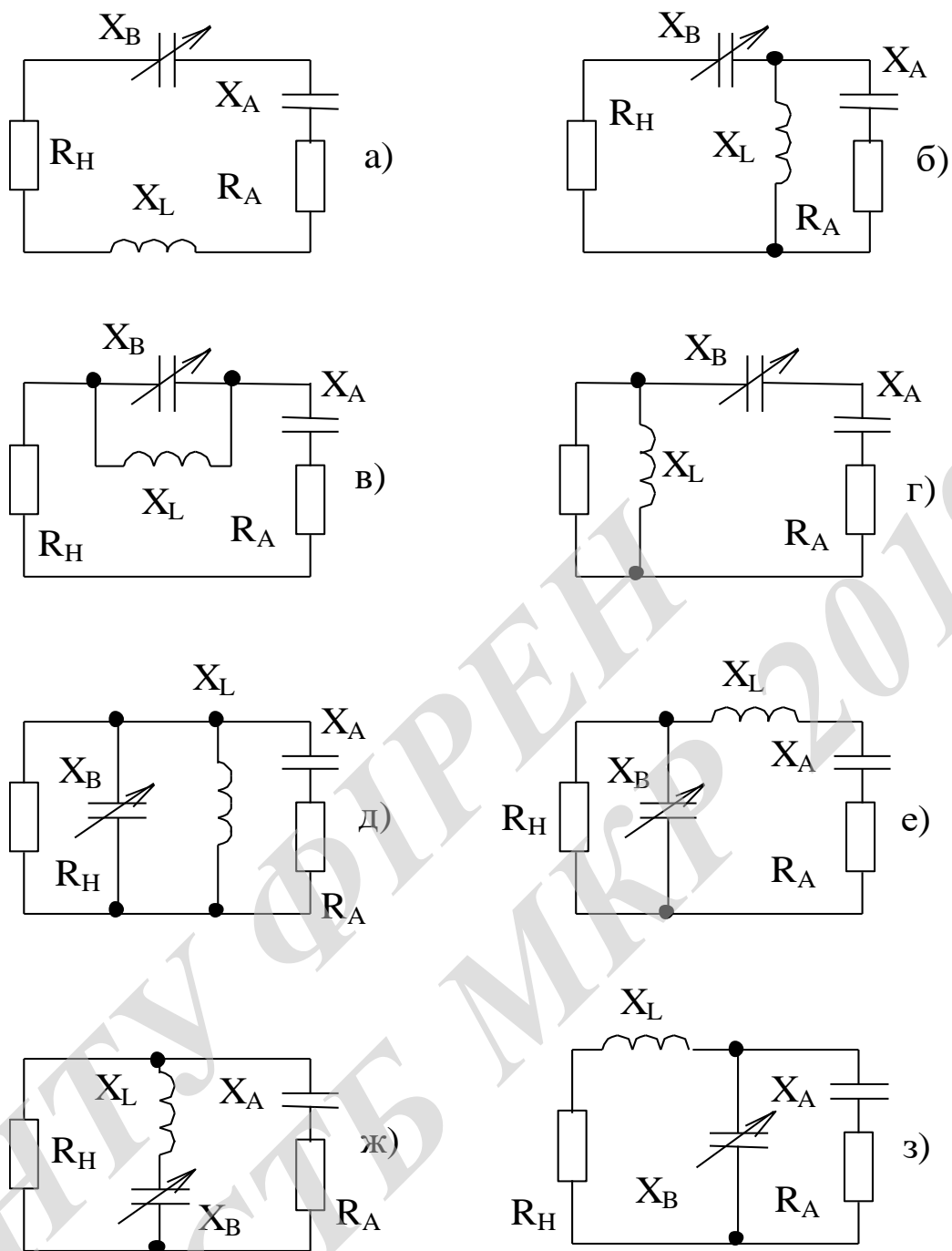


Рисунок 1.14 - Структурні схеми генераторів з квазісередоточеними резонансними системами:

- а), б) - послідовні типу «О» і «А»,  
 в), г) - послідовні типу «В» і «Н»,  
 д), е) - паралельні типу «О» і «А»,  
 ж), з) - паралельні типу «В» і «Н».

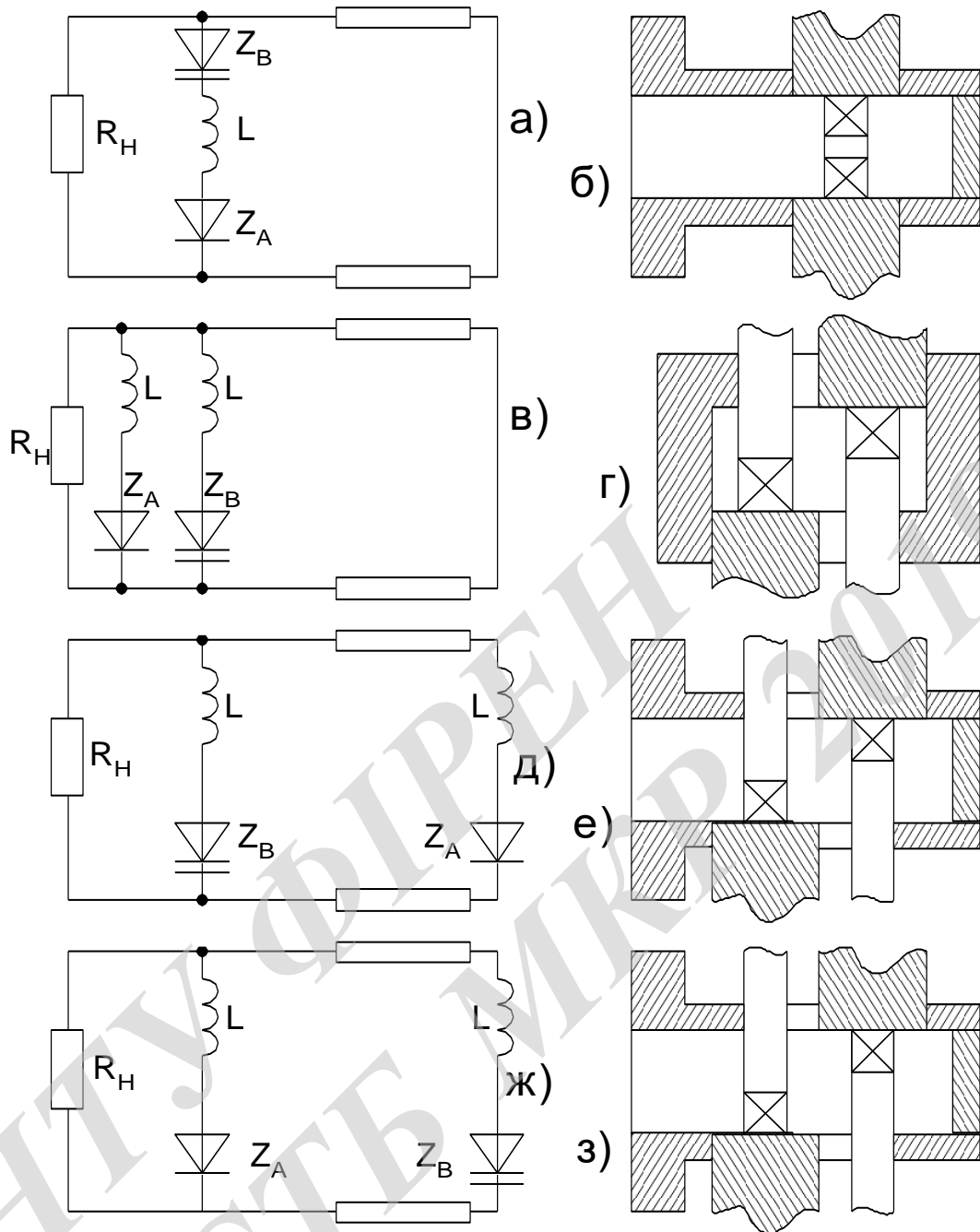


Рисунок 1.15 - Схеми і конструкції генераторів з шлейфними резонансними системами:

- а), б) - шлейф-последовна структура,
- в), г) - шлейф-паралельна структура,
- д), е) - шлейф-каскадна структура типу «А»,
- ж), з) - шлейф-каскадна структура типу «Б».

Основою шлейфних схем генераторів з варакторною перебудовою частоти є відрізки базових ліній передачі (хвильових, коаксіальних, мікросмушкових та ін.). Можливі чотири варіанти підключення ДГ і варактора до лінії передачі, навантаженої на узгоджене опір корисного навантаження: послідовне підключення (рис. 1.15 а, б), паралельне підключення (рис. 1.15 в, г), каскадне підключення типу «А» - активний елемент пов'язаний через шлейф (рис. 1.15 д, е), шлейф-каскадне підключення типу «Б» (рис. 1.15 ж, з). Не всі схеми рівноцінні по перепаду наведеного до активного елементу опору корисного навантаження, що визначає перепад вихідної потужності. Мінімальний перепад вихідної потужності можна реалізувати в шлейф-каскадній схемі типу «Б». Діапазон частотної перебудови генераторів зі шлейфного резонансними системами виявляється досить малий, що обумовлено фіксує здатність шлейфу.

### **1.8 Конструкції генераторів на діодах Ганна**

Широке застосування генераторів на ДГ в сучасній радіоелектроніці зумовлює велику різноманітність конструкцій: хвилеводно-коаксіальної, мікрополоскової, хвилеводної, хвилеводної з хвилеводом зменшеною висоти. Ці конструкції були досліджені в роботі [14].

Проведений в результаті досліджень аналіз показав, що максимальний діапазон електричної перебудови частоти виходить при розташуванні в одній поперечній площині перетину хвилеводу ДГ і варакторного діода без зазору між ними (рис. 1.16).

Одним із різновидів хвилеводних електрично перебудовуваних генераторів є генератори на основі позамежного хвилеводу [17]. У позамежному хвилеводі основна частина енергії запасється поблизу активного елементу, тому при близькому розташуванні варактора і ДГ можлива реалізація сильного зв'язку варактора і резонансної системи. Отримано діапазон електричної перебудови 315 МГц при початковій частоті 9,2 ГГц.

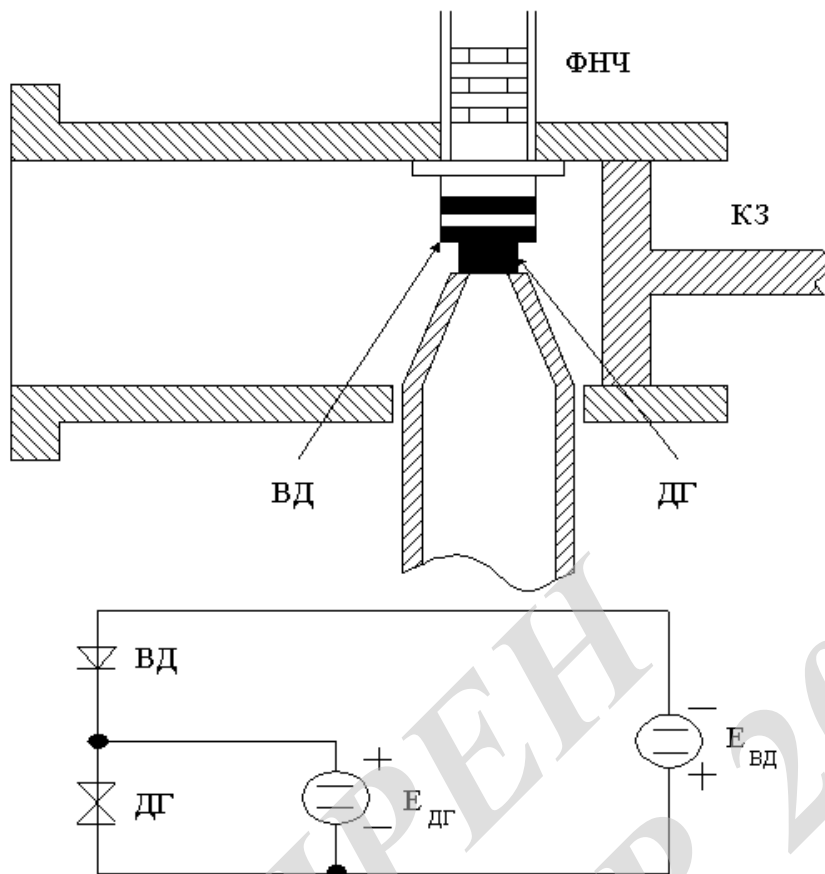


Рисунок 1.16 – Конструкція і схема живлення діодів автогенератора

З урахуванням вимог технічного завдання найбільш підходящим є ГДГ хвильоводної конструкції з послідовним включенням ДГ і варактора в поперечному перерізі хвильоводу без зазору між ними. При досить малих габаритах і вазі ця конструкція дозволяє зменшити втрати в елементах конструкції, усунути з резонансної системи паразитні реактивності (у порівнянні з конструкцією, що має зазор), які можуть призводити до перескоків частоти генерації і обмежувати діапазон перебудови ГДГ, також усувається явище дисперсії - залежно частоти генерації від довжини відрізка лінії передачі, що з'єднує діоди.



## 2 ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОХВИЛЬОВОЇ ПРОВІДНОСТІ ДІОДІВ ГАННА

Питання про причини генерації автогенераторів (АГ) на діодах Ганна було предметом обговорення дослідників протягом більше двох десятиліть. Початкові уявлення, отримані при розгляді процесів в діоді, ізольованому від схеми АГ, ґрунтувалися на гіпотезі про мимовільне зародження в ДГ при додатку до нього досить великого постійної напруги рухомих від катода до анода доменів - згустків негативного об'ємного заряду, яким передує область збіднення цим зарядом. Так при такому підході домени могли існувати при будь-як завгодно великою зовнішньою навантаженні, то доменна теорія АГ на ДГ приводила до гіпотетичної можливості реалізації ККД, більшого 100%. Тому в останні роки стали робитися спроби побудови теорії ДГ, позбавленої згаданого недоліку звичайних доменних уявлень. При цьому виявляється, що і надтротка, і ДГ можна розглядати з єдиних позицій і аналізувати їх поведінку за єдиним планом. Нижче наводиться теорія нелінійної комплексної провідності ДГ і надрешіток, яка базується на уявленнях про хвилях об'ємного заряду, наростаючих внаслідок наявності нелінійної негативною об'ємної провідності напівпровідника.

Фізичні процеси, що відбуваються в напівпровідникових приладах, значно складніше і різноманітніше явищ, що протікають в вакуумних приладах. Процеси, що характеризують роботу напівпровідникових приладів, можна умовно розділити на процеси в контактах і процеси в обсязі напівпровідників. Спочатку зупинимося на останніх і розглянемо основний процес - дрейф носіїв в постійному і змінному електричних полях. Як відомо, в напівпровідниках на відміну від вакууму рух носіїв заряду (електронів і дірок) носить дрейфовий характер, коли відповідно до стаціонарним варіантом рівняння

$$\frac{dp}{dt} = eE - \frac{p}{\tau}, \quad (2.1)$$

де  $e$  - заряд електрона,

$p$  - імпульс частинки,

$E$  - напруженість електричного поля в об'ємі напівпровідника,

$\tau$  - час релаксації імпульсу електронів,

$\frac{p}{\tau}$  - грає роль тертя при дрейфі.

Друге рівняння характеризує розігрів електронів і визначає зміна їх енергії  $W$  за одиницю часу, по - перше, за рахунок зовнішнього поля ( $ep / m$ ), по - друге, за рахунок втрат енергії на зіткнення:

$$\frac{dW}{dt} = \left( \frac{ep}{m} \right) E - \frac{(W - W_0)}{\tau_{\mathcal{E}}} . \quad (2.2)$$

де  $\tau_{\mathcal{E}}$  - час релаксації енергії електронів,

$W_0$  - енергія електронів на дні зони провідності.

Тоді дрейфова швидкість електронів буде:

$$v = \frac{p}{m} = \frac{e\tau E}{m} = \mu_0 E , \quad (2.3)$$

де  $\mu_0$  - рухливість носіїв заряду в слабкому полі.

Тобто дрейфова швидкість електронів визначається величиною прикладеного поля  $E$ . Проте залежність  $v(E)$ , представлена вище, описує звичайний закон Ома, має місце лише при невеликих полях  $E$ . В сильних полях починається відступу від закону Ома. У неполярних напівпровідниках, таких як германій та кремній, ці відступи викликані появою при великих полях інтенсивного розсіювання енергії на оптичних фонах. Коли електрон, рухаючись в поле, набирає на довжині вільного пробігу  $\lambda$  енергію  $eE\lambda$ , достатню для народження оптичного фонуна  $h\lambda_f$  (причому  $h\lambda_f \approx 0,04$  еВ), він в кінці вільного пробігу створює такий фонон, повертаючись знову до нульової енергії. Таким чином, при полях  $E = E_n$ , в яких можливий цей процес, швидкість електронів перестає збі-

льшуватися зі зростанням поля і її середнє значення стає рівним половині максимальної швидкості  $v_m = \lambda/t$ , що відповідає виконанню рівності

$$eE_n\lambda = eE_nv_0\tau = h\nu_{\Phi} = \frac{mv^2_m}{2}, \quad (2.4)$$

так що ця середня швидкість (швидкість насичення)

$$v = \frac{v_M}{2} = \frac{e\tau E_n}{m} = \mu_0 E_n, \quad (2.5)$$

причому для германію і кремнію і в разі електронів і в разі дірок має порядок  $10^7$  см/с і  $E_n \approx 10^4$  В/см. Співвідношення (2.3) і (2.5) описуються залежністю рухливості  $\mu$  від поля вигляду

$$\mu = \frac{\mu_0}{\left[1 + \frac{E}{E_n}\right]}; v = \mu E, \quad (2.6)$$

яка і визначає характер відступу від закону Ома в обсязі напівпровідників типу германію та кремнію.

В останні роки крім використання в електроніці НВЧ звичайних напівпровідників роблять спроби застосувати надрешітки. Щоб зрозуміти особливості поведінки надрешіток, слід згадати, що дозволені енергетичні зони в напівпровідниках утворилися з дозволених для електронів рівнів енергії в окремих атомах за рахунок щільного зближення великої кількості таких однотипних атомів. Очевидно, що якщо атомів трохи або вони не дуже щільно з'єднані, то ширина дозволених зон виявиться невеликий і ці зони перетворяться в так звані мінізони, всередині яких електрон здатний досягти середнього для мінізони значення енергії при порівняно невеликих зовнішніх полях. Досягнення таких енергій пов'язано з ростом ефективної маси і появою у цій середовища негативної ди-

ференційної провідності. Остання властивість може знайти застосування для генерації і посилення НВЧ - коливань. Створити середовища, що володіють мінізони, намагаються за рахунок формування різного роду дрібношарових структур, які і отримали назву надрешіток.

Слід зауважити, що згаданий вище зростання ефективної маси зі збільшенням зовнішнього постійного електричного поля і поява негативної диференційної провідності мають місце крім надрешіток і в напівпровідниках типу  $A^{III}B^V$ , так що відносно цього важливого для СВЧ-приладів властивості надгратка і напівпровідники типу  $A^{III}B^V$  можна розглядати з єдиної точки зору.

Таким чином, в напівпровідниках типу  $A^{III}B^V$  і надгратка відступу від закону Ома мають інший характер, ніж в Німеччині і кремнії, і визначаються зростанням ефективної маси із зростанням енергії. Якщо прийняти, що зміна ефективної маси зі зміною енергії визначається загальною залежністю:

$$\frac{1}{m} = \frac{1}{m_0} \left[ 1 - p_m \left( \frac{W - W_0}{W_0} \right) \right], \quad (2.7)$$

де

$$p_m = -W_0 m_0 \left| d \left( \frac{1}{m} \right) / dW \right|_{W=W_0}$$

$m_0$  - ефективна маса електрона на дні зони провідності, і в співвідношеннях (2.1) і (2.2) вважати  $E = E_0 + E_{\sim}$ ;  $p = p_0 + p_{\sim}$ ;  $W = W_{cm} + W_{\sim}$ , причому  $E_{\sim}$ ,  $p_{\sim}$  і  $W_{\sim}$  змінюються з круговою частотою  $\omega$ , то, нехтуючи творами змінних величин, тоді, розглядаючи режим малого сигналу, можна з (2.1); (2.2) і співвідношення

$$j = en \frac{p(t)}{m_0} \left[ 1 - p_m \left( \frac{W(t) - W_0}{W_0} \right) \right], \quad (2.8)$$

отримати для  $v = v_0 + v_{\sim}$  співвідношення

$$v_0 = \mu_{no} E_0; \mu_{no} = \frac{\mu_0}{(1+x^2)}; \quad (2.9)$$

$$x = \frac{E_0}{E_n}; E_n = \frac{m_0 W_0}{\rho_m e^2 \tau \tau_3}; \quad (2.10)$$

$$v_{\sim} = \mu_o E_{\sim} = (\mu_{ao} + j\mu_{ro}) E_{\sim}; k = \frac{\tau}{\tau_3}; y = \omega \tau_3; \quad (2.11)$$

$$\frac{\mu_{e'}}{\mu_{\bullet'}} = \frac{1-x^4 + y^2 [1+kx^2(1-k(1+x^2))]}{(1+k^2 y^2) [y^2 + (1+x^2)^2]}; \quad (2.12)$$

$$\frac{\mu_{r'}}{\mu_{\bullet'}} = y \frac{2x^2 - k[1+x^2 + y^2(1-kx^2)]}{(1+k^2 y^2) [y^2 + (1+x^2)^2]}; \quad (2.13)$$

які визначають, по-перше, залежно (2.10) рухливості по постійному струму в функції від напруги постійного поля  $E_0$  (тобто характер відступу від закону Ома), а, по-друге, залежно від цього поля (від параметра  $x$ ) і відносної частоти  $y = \omega \tau_E$  компонент  $\mu_{al}$  і  $\mu_{rl}$  малосигнальних активної і реактивної високочастотних рухомостей, що характеризують поведінку обсягу розглянутих напівпровідників в СВЧ-полях при наявності сильного постійного поля. Так як параметр  $k = \tau/\tau_E$ , що визначає частку енергії, втрачаємо носієм заряду в середньому при кожному зіткненні, зазвичай буває достатньо малим, то вважаючи його в співвідношеннях (2.12) і (2.13) рівним нулю, можна ці співвідношення істотно спростити:

$$\begin{cases} \frac{\mu_{a'}}{\mu_{\bullet'}} = \frac{\mu_{a'}(1+x^2)}{\mu_0} = \frac{(1+y^2-x)}{[y^2 + (1+x^2)^2]} \\ \frac{\mu_{r'}}{\mu_{\bullet'}} = \frac{\mu_{r'}(1+x^2)}{\mu_0} = \frac{2yx^2}{[y^2 + (1+x^2)^2]} \end{cases} \quad (2.14)$$

Частотні залежності подвижностей в координатах  $\mu_{al} / \mu_0 = f(y^2)$  і  $\mu_{rl} / \mu_0 = f(y^2)$ , побудовані в загальному вигляді згідно співвідношенням (2.14), представлені суцільними лініями на рис. 2.1. Пунктиром там же показаний уточне-

ний хід цих залежностей, які утворюються на основі виразів (2.12), (2.13) для випадків  $k \neq 0$ . Активну рухливість на низьких частотах, відповідну нагоди  $y=0$  (див. рис. 2.3), можна також отримати шляхом диференціювання по  $x$  правій частині співвідношення (2.10) для  $\nu_0$ . Видно, що  $\mu_{ал} < 0$  при  $x > 1$ , причому чим більше  $x$ , тим до великих частот ( $y = y_{np} = (x^4 - 1)^{1/2}$ ) реалізується негативна рухливість.

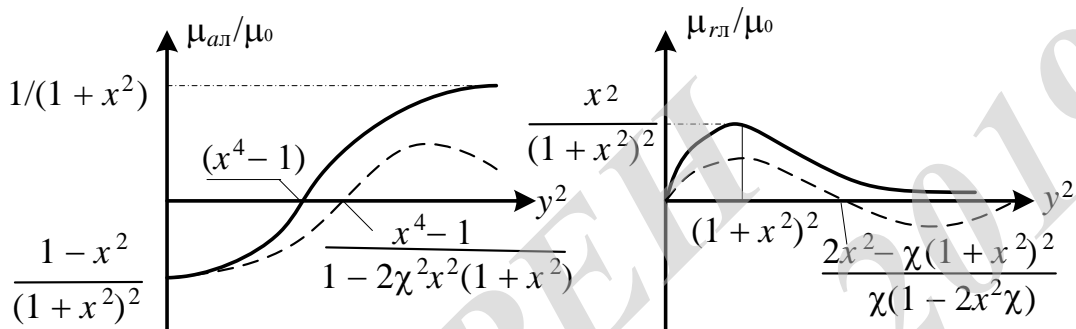


Рисунок 2.1 - Частотні залежності малосигнальних активної і реактивної складових рухливості

Складніше характер залежностей при постійних  $y$  (див. рис. 2.3). Перші завжди починаються від  $\mu_{ал} / \mu_0 = 1$  при  $x = 0$  і мають мінімум в області негативних  $\mu_{ал}$ , а другі - максимум в області позитивних  $\mu_{рл}$ . З (2.14) можна отримати мінімуми  $\mu_{ал}$ , що реалізуються при значеннях  $x = x_a$ , пов'язаних з  $y^2$  співвідношенням

$$y^2 = (1+x_a^2) \left[ \left( (1+x_a^2)(5x_a^2+1) \right)^{1/2} - 2(1+x_a^2) \right] \approx \left( \frac{1}{4} \right) \left[ (x_a^2-1)^2 - 4 \right] \quad (2.15)$$

і причому останнім наближене рівність виконується до  $x_a \approx 10$ .

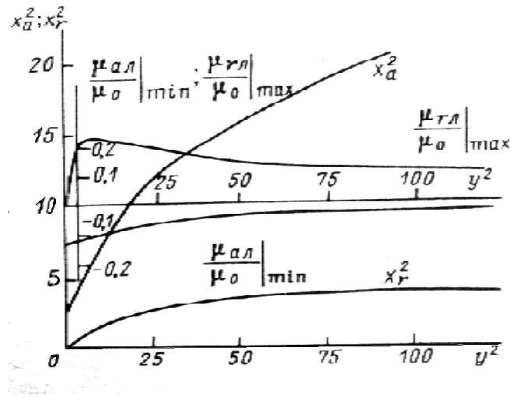


Рисунок 2.2 – Частотні залежності екстремальних значень малосигнальних активної та реактивної рухливостей

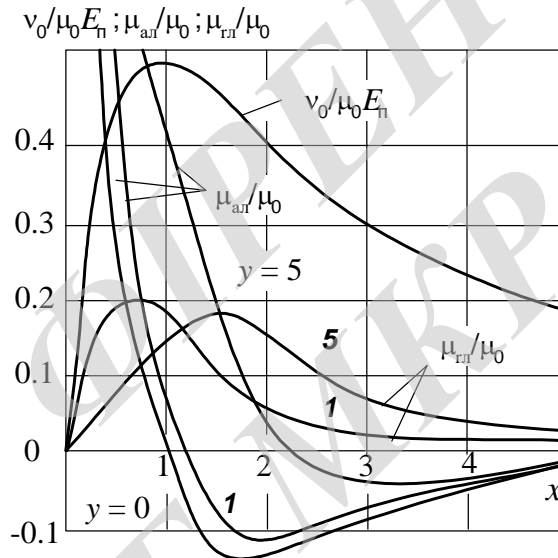


Рисунок 2.3 – Залежність малосигнальних рухливостей і дрейфовой швидкості електрона від постійного електричного поля

Максимуми  $\mu_{rl}$  мають місце, коли  $x = x_r$ , при цьому

$$y^2 = (1 + x_r^2)^2 (2x_r^2 - 1) \quad (2.16)$$

Графіки функцій  $x_a^2 = f(y^2)$  і  $x_r^2 = f(y^2)$  побудовані на рис. 2.2, там же за допомогою внутрішніх координатних осей представлені залежності

$\mu_{al} / \mu_0 = (\mu_{al} / \mu_0)_{min} = f(y^2)$  і  $\mu_{rl} / \mu_0 = (\mu_{rl} / \mu_0)_{max} = f(y^2)$  значень, знайдені шляхом підстановки отриманих параметрів  $x_a$  і  $x_r$  в співвідношення (2.14).

Слід зауважити, що, використовуючи наближене рівність в (2.15), можна отримати співвідношення

$$\left(\frac{\mu_{a'}}{\mu_0}\right)_{\min} = \frac{\sqrt{y^2+1}\left(3\sqrt{y^2+1}+4\right)+1}{2\left(\sqrt{y^2+1}+1\right)\left[4\left(\sqrt{y^2+1}+1\right)^2+y^2\right]}, \quad (2.17)$$

визначальне найбільшу негативну величину  $\mu_{al}$ , що реалізується для заданої відносної частоти  $y$  при  $x = x_a$ . Для найбільшої величини  $\mu_{rl}$  можна знайти

$$\left|\frac{\mu_{r'}}{\mu_0}\right|_{\max} = \sqrt{2x_r^2-1}\left(1+x_r^2\right)^{-2}, \quad (2.18)$$

так що, визначивши за графіком, наведеним на рис. 2.2, величину  $x_r^2$  для заданої відносної частоти  $y$ , можна з (2.18) знайти точне значення  $(\mu_{rl} / \mu_0)_{\max}$ .

З рис. 2.2 випливає, що залежність  $(\mu_{rl} / \mu_0)_{\max} = f(y^2)$  має максимум, рівний 0,25 при  $y = 2$ , коли  $x = x_r = 1$ .

Дрейфова характеристика надрешітки, що визначається правою частиною співвідношення (2.10), і характеристики високочастотної рухливості, обчислені за допомогою виразів (2.14), побудовані на рис. 2.3, причому  $\mu_{al} / \mu_0 = f(x)$  і  $\mu_{rl} / \mu_0 = f(x)$  при різних значеннях відносної частоти  $y$ .

З рис. 2.3 і співвідношень (2.14) випливає, що хоча диференціальна рухливість на низькій частоті, яка визначається нахилом дотичної в кожній точці дрейфової характеристики, стає негативною при  $x > 1$ , активна складова високочастотної рухливості може бути негативною лише при значно більших постійних полях, коли  $x^4 > 1 + y^2$ .

Таким чином, не можна ототожнювати провідність, отриману за нахилом дотичної до дрейфової характеристики, і високочастотну активну провідність системи.



Проаналізуємо нелінійні властивості обсягу напівпровідника. У загальному випадку кілька причин дають відхилення від закону Ома при впливі напруженості сильного зовнішнього електричного поля  $E$  в напівпровіднику. Таке поле, як правило, призводить до збільшення середньої енергії  $W$  хаотичного руху електронів, тобто до розігріву електронів, а зростання  $W$  змінює ті процеси і визначають їх параметри, які залежать від  $W$  і визначають струм. До числа цих параметрів відносяться наступні:

1. Поперечний перетин рекомбінації електронів з тими центрами, які передають електрони в зону провідності. Так як концентрація електронів визначається умовою рівності числа рекомбінацій числу генеруються в результаті теплового збудження за той же час електронів, то зміна числа рекомбінацій при зростанні  $E$  і  $W$  призводить до зміни концентрації електронів. У зв'язку з тим, що постійна тимчасова часу генераційно-рекомбінаційних процесів змінюється в межах мікросекунд, то ці процеси, як правило, на НВЧ непомітні та їх зазвичай не враховують.

2. Часи релаксації енергії  $\tau_E$  та імпульсу  $\tau$  електронів в процесі їх хаотичного руху в кристалі. Характер залежностей цих часів від  $W$  визначається типом розсіювання енергії і імпульсу в кристалі. Існують 12 видів такого розсіювання: на акустичних і оптичних фонах, в полярних або неполярних кристалах, на іонізованих, дипольних або полярних домішках, на різного роду дислокаціях і т. д. В залежності від типу напівпровідника переважає один вид розсіювання або присутні кілька одночасно. У напівпровідниках типу АІІВV, в яких найбільш чітко проявляються об'ємні нелінійності, зазвичай переважає розсіювання на оптичних фонах в полярних кристалах. Дослідження залежності часів релаксації і в таких напівпровідниках від  $W$ , показало, що ці залежності досить слабкі і їх в першому наближенні можна не враховувати.

3. Ефективна маса електронів. Відомі принаймні три причини зміни ефективної маси електронів  $m$  при зміні  $W$ . Величина  $m$  визначається кривизною залежності енергії електрона від його квазіімпульса. На дні зони провідності ця залежність квадратична (квадратичний закон дисперсії), і ефективна маса пос-

тійна. Зі зростанням  $W$  спостерігається відхилення дисперсії від квадратичного закону (так звана решіточна дисперсія), і  $m$  зростає з ростом  $W$ . Подібний ефект буде тим більш помітний, ніж менше енергетична ширина дозволених зон. У зв'язку з цим в останні роки ведуться роботи по створенню надрешіток з дуже вузькими зонами за рахунок того, що надрешітки представляють собою тонкі шари напівпровідника, що чергуються з шарами діелектрика.

Друга причина відхилення дисперсії від квадратичного закону (і, таким чином, збільшення  $m$  з ростом  $W$ ) полягає у впливі валентної зони, якщо вона близька до зони провідності (кейновская дисперсія). І, нарешті,  $m$  змінюється з ростом  $W$  в багатодолінних напівпровідниках, коли електрони внаслідок розігріву їх полем починають переходити в бічні долини, розташовані вище дна зони провідності. Так як в цих долинах ефективна маса більше, ніж в основній долині, то результуюча, усереднена по всіх електронів, ефективна маса при такому переході зростає.

## **3 ЕЛЕКТРИЧНІ РОЗРАХУНКИ КЕРОВАНОГО ЗА ЧАСТОТОЮ ГЕНЕРАТОРА МІКРОХВИЛЬОВОГО БЛОКУ РАДІОРЕЛЕЙНОЇ СТАНЦІЇ**

### **3.1 Структурна схема керованого за частотою генератора мікрохвильового блоку радіорелейної станції**

Аналізуючи технічне завдання і з огляду на робочу частоту 15 ГГц, виберемо діодну схему опорного генератора керованого за частотою генераторного мікрохвильового блоку радіорелейної станції. Так як діоди НВЧ перевершують транзистори по ряду найважливіших показників. Як діода СВЧ виберемо діод Ганна [2].

Сигнал з виходу генератора подається на модулятор. Модулятор зібраний на волноводном Е-трийнику, в бічному плечі якого знаходяться перемикаючий діод і короткозамкнутого поршень.

Генератор не дає нам необхідної вихідної потужності. Тому на виході необхідно поставити підсилювач.

Залежно від способу включення джерела вхідного сигналу і навантаження розрізняють прохідні і відбивні діодні підсилювачі [1].

У прохідних підсилювачах для зв'язку резонатора з джерелом сигналу і навантаженням використовуються два окремих елемента зв'язку; при цьому резонатор з діодом включається за схемою чотирьохполюсника. У відбивних підсилювачах для зв'язку резонатора з джерелом сигналу і навантаженням використовується феритовий циркулятор, при цьому резонатор включається за схемою двохполюсника.

Найбільше практичне застосування знаходять відбивні підсилювачі, так як вони істотно перевершують прохідні підсилювачі по вихідній потужності, смузі пропускання, коефіцієнтом шуму і чутливості до зміни параметрів навантаження.

Виберемо підсилювач відбивної типу з феритовим циркулятором.

Аналізуючи вище сказане, отримаємо таку структурну схему керованого за частотою генератора мікрохвильового блоку радіорелейної станції.



Рисунок 3.1 – Структурна схема керованого за частотою генератора мікрохвильового блоку радіорелейної станції

### 3.2 Вибір конструкції генератора та еквівалентної схеми

Конструкції генераторів на діодах Ганна (ДГ) подібні конструкціям генераторів на інших активних елементах і включають в себе резонансну коливальну систему, елементи зв'язку з навантаженням, елементи зв'язку ДГ з коливальною системою і подачі живлення на діод [17].

Колівальні системи генераторів можуть бути утворені відрізками хвилеводних, коаксіальних або смужкових ліній, а також елементами з зосередженими параметрами.

Хвилеводна конструкція характеризується найменшими втратами і відповідно, найбільшою добротністю, порівняно вузьким діапазоном механічної та електричної перебудови по частоті, зручна при побудові багатодіодних генераторів. Зв'язки з навантаженням здійснюються через накладаються або вбудовані електромагнітні або ємкісні діафрагми. Можливе використання хвилеводів прямокутного і еліптичного перетину. Для зменшення розмірів іноді хвилевід заповнюють діелектриком.

Коаксіальна конструкція характеризується простотою, великим діапазоном механічної та електричної перебудови. Генераторний діод встановлюється зазвичай в розрив центрального провідника коаксіала. Може бути використана

будь-яка (кондуктивна, індуктивна, місткість, дифракційна) зв'язок з навантаженням.

Перевагами мікросмужкових конструкцій генераторів є малі габарити і маса, дешевизна і технологічність. Ці конструкції зручні при використанні безкорпусних діодів. Добротність мікросмужкових резонаторів порівняно мала. При низькій добротності погіршуються шумові параметри генератора. Мікросмужкових конструкції зазвичай використовуються на частотах не вище 20 ГГц. Більш технологічні несиметричні смужкової лінії.

Виберемо хвилевідну конструкцію генератора.

Еквівалентна схема генератора при використанні короткозамкнутого відрізка лінії показана на рис. 3.2, де  $Y_0$  - провідність навантаження, трансформована до затискачів ДГ,  $l$  - довжина короткозамкнутою лінії,  $r_k$  - опір втрат (надалі його не враховуємо),  $C_k, L_k$  - ємність і індуктивність корпусу діода,  $G_e, B_e$  - активна і реактивна електронні провідності кристала [17].

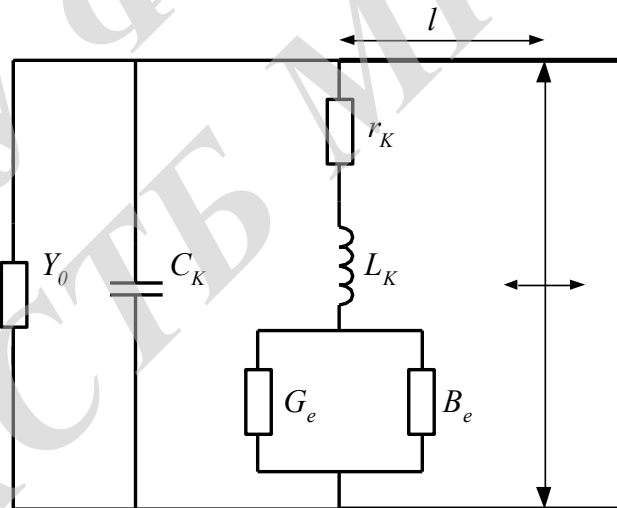


Рисунок 3.2 – Еквівалентна схема генератора

Реактивна провідність кристала може носити як індуктивний, так і ємнісний характер. У роботі буде використана місткість провідність кристала. На рис. 3.3. Наведено еквівалентна схема генератора з ємнісний провідністю кристала, де  $B_k$  - реактивна провідність відрізка лінії,  $C_{кр}$  - еквівалентна ємність, що

враховує реактивну провідність кристала,  $G_{\Sigma} = G_K + Y_0$  - сумарна активна провідність навантаження і втрат резонатора, трансформована до затискачів ДГ.

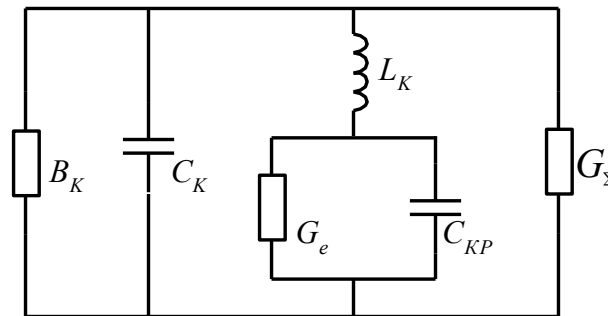


Рисунок 3.3 – Еквівалентна схема генератора з ємнісний провідністю кристала

Для резонатора використовуємо короткозамкнений відрізок прямокутного хвилеводу перерізом  $23 \cdot 10 \text{ мм}^2$ . Базова конструкція хвилеводного генератора на діоді Ганна наведена на рис. 3.4. Хвилеводна конструкція характеризується найменшими втратами і відповідно, найбільшою добротністю. Діод включений в центрі хвилеводу. Наповнення повітряне ( $\varepsilon = 1, \mu = 1$ ). Визначимо параметри коливальної системи [17].

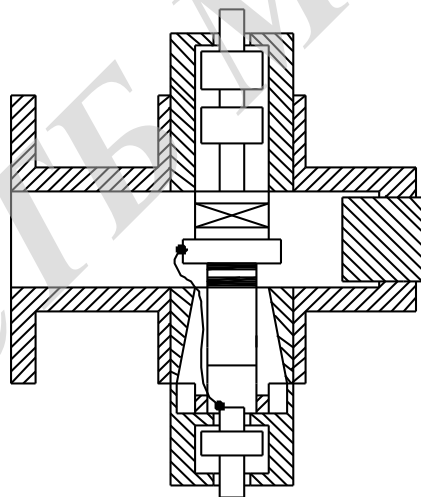


Рисунок 3.4 - Базова конструкція хвилеводного генератора на діоді Ганна

Конструкція генератора, побудованого за схемою "дисконий резонатор в закритичному хвилеводі" являє собою хвилеводну вставку, з одного боку якої підключається вихідний хвилевід перетином  $23 \cdot 10 \text{ мм}^2$ , а з іншого - рухливий

короткозамикачем, що забезпечує налаштування контуру першої гармоніки пристрою на максимум вихідної потужності. Вставка складається з двох половин, що дозволяє монтувати діод Ганна, варактор та їх вводи живлення. Дисковий резонатор утворений відрізком радіальної лінії передачі довжиною меншою  $\lambda_1/4$ , де  $\lambda_1$  - довжина хвилі НВЧ-коливань на основній частоті, і являє собою частину корпусу діоду Ганна (капельюшок). У разі використання діоду Ганна, корпус яких не має капельюшки, дисковий резонатор може виготовлятися окремо. Співвісно з діодом Ганна і дисковим резонатором у центрі поперечного перерізу хвилеводу розміщені варактор та його вводи живлення, який представляє собою провідник діаметром менше  $\lambda_1/10$ , довжиною менше  $\lambda_1/4$  і носить індуктивний характер. Виводи живлення варактора закінчується коаксіальним ФНЧ, який служить для розв'язування коливальної системи автогенератора на діоді Ганна та джерела живлення варактора. ФНЧ закріплений у верхній частині корпусу за допомогою ізолюючої втулки і притискає варактор введенням живлення до діелектричного резонатора. Введення живлення діоду Ганна здійснюється тонким емальованим провідником, що проходить через проріз цангового затиску діоду Ганна, що закінчується аналогічним ФНЧ з одного боку і припаюють до торця ДР з іншого боку. Перетин вихідного хвилеводу автогенератора на діоді Ганна вибирається таким чином, щоб він був позамежним для НВЧ-коливань основної частоти. У цьому випадку ці коливання будуть локалізовані в системі: діод Ганна, дисковий резонатор, варактор, його вводи живлення, а хвилевід буде являти собою для них деяку індуктивність.

### 3.3 Розрахунок електронного режиму

Відповідно до робочої частотою  $f = 15$  ГГц, виберемо діод Ганна типу 3A723A, параметри якого наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Параметри діоду Ганна типу 3A723A

f, ГГц	$P_{ВИХ.МИН}$ , Вт	$R_0$ , Ом	$U_{PМАКС}$ , В	$I_{PМАКС}$ , А	$P_{РАСМАКС}$ , Вт	m, г	$f_{np}$ , ГГц
10,15-15,44	0,01	3-10	8	0,3-0,4	3,5	0,15	12,7

Виберемо такі робочі параметри діоду Ганна:

- робоча напруга  $U_P = 7$  В;
- резонансний опір  $R_0 = 8$  Ом;
- порогову напругу  $U_{ПОР} = 5$  В;
- робочий струм  $I_P = 0,4$ .

Визначимо ККД контуру, поклавши добротність навантаженого контуру  $Q = 20$ , а добротність ненавантаженого контуру

$$\eta_k = 1 - \frac{Q}{Q_0} = 0,867$$

Розрахуємо активну провідність діоду Ганна

$$G_e(U) = G_{e\max} (1 - \nu U^2 - \mu U^4 - \eta U^6),$$

де  $\nu, \mu, \eta$  – коефіцієнти нелінійності. Приймемо

$$\nu = 9,5 \cdot 10^{-2}, \quad \mu = -3 \cdot 10^{-4}, \quad \eta = 5 \cdot 10^{-6}.$$

Сумарна активна провідність, трансформована до затискачів діоду Ганна

$$G_\Sigma = \frac{1}{24R_0} \cdot \left( 1 - 2 \cdot \left| 1 - \frac{f}{f_{np}} \right| \right) = 3,32 \text{ (мСм)}.$$



Скористаємося апроксимацією активної провідності діоду Ганна поліномом шостого ступеня

$$G_e(U) = G_{e \max} (1 - \nu U^2 - \mu U^4 - \eta U^6),$$

де  $G_{e \max}$  - максимальна величина провідності. Її можна обрахувати за формулою

$$G_{e \max} = -\frac{1}{12R_0} \left[ 1 - \left( \frac{U_p - U_{nop}}{2U_{nop}} \right)^2 \right] \left( 1 - 2 \cdot \left| 1 - \frac{f}{f_{np}} \right| \right) = -4.98 \text{ (мСм)}.$$

Для еквівалентної схеми на рис. 3.3 нелінійне диференціальне рівняння відносно напруги  $u = U \cos \omega t$  на кристалі (провідності  $G_e$ ) має вигляд

$$\ddot{u} + u = \mu_0 f(u, \dot{u}),$$

де

$$f(u, \dot{u}) = - \left[ 1 + \theta_0 (1 - \nu U^2 - \mu U^4 - \eta U^6) \right],$$

а коефіцієнт регенерації

$$\theta_0 = \frac{G_{e \max}}{G_\Sigma} = -1.5.$$

Рішення цього рівняння дає амплітуду напруги на провідності  $G_e$

$$U = \sqrt{\frac{-2 \sqrt{|240 \cdot \nu \cdot \eta - 64 \cdot \mu^2|} \cdot sh(\varphi/3) - 8 \cdot \mu}{15 \cdot \eta}} = 8.5 \text{ (В)},$$

де

$$\varphi = \operatorname{Arsh} \left( \frac{512 \cdot \mu^3 - 2880 \cdot \nu \cdot \mu \cdot \eta - 21600 \cdot \beta \cdot \eta^2}{(240 \cdot \nu \cdot \eta - 64 \cdot \mu^2)^{3/2}} \right),$$

$$\beta = \frac{1 + \theta_0}{\theta_0}.$$

Потужність, яка споживана від джерела живлення

$$P_0 = I_P U_P = 0,4 \cdot 7 = 2,8 \text{ (Вт)}.$$

Коливальна потужність генератора

$$P_{\approx} = 0,5 U^2 |G_e| = 0,5 \cdot 73,6 \cdot 3,32 \cdot 10^{-3} = 0,176 \text{ (мВт)}.$$

Електронний ККД генератора

$$\eta_e = \frac{P_{\approx}}{P_0} = \frac{0,176}{2,8} = 6,4\%.$$

Потужність, що розсіюється на діоді Ганна

$$P = P_0 - P_{\approx} = 2,8 - 0,176 = 2,624 \text{ (Вт)}.$$

Фактична потужність

$$P_H = P_{\approx} \eta_e = 0,176 \cdot 0,87 = 0,15312 \text{ (Вт)}.$$

### 3.3 Розрахунок коливальної системи генератора

Довжина хвилі у вільному просторі

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{15 \cdot 10^9} = 2 \text{ (см)}.$$

Критична довжина хвилі

$$\lambda_{кр} = 2 \cdot a = 2 \cdot 23 \cdot 10^{-3} = 4.6 \text{ (см)}.$$

Довжина хвилі у хвилеводі

$$\lambda_{Л} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda / \lambda_{кр})^2}} = \frac{0,02}{\sqrt{1 - (0,02 / 4,6 \cdot 10^{-3})^2}} = 3.6 \text{ (см)}.$$

Хвильовий опір хвилеводу

$$Z_B = \frac{377 \cdot (b/a)}{\sqrt{1 - (\lambda / \lambda_{кр})^2}} = \frac{377 \cdot \left(\frac{10}{23}\right)}{\sqrt{1 - (0,02 / 4,6 \cdot 10^{-3})^2}} = 195.3 \text{ (Ом)}.$$

Для визначення довжини резонатора задамося наступними параметрами діоду Ганна:

- індуктивність корпусу діода  $L_k = 0,5$  нГн,
- ємність корпусу діода  $C_k = 0,4$  пФ,
- ємність кристала  $C_{кр} = 0,15$  пФ,

Довжина резонатора ( $n = 1$ ):

$$l = \frac{\lambda_{Д}}{2 \cdot \pi} \cdot \arctg \left( \frac{1 - \omega^2 \cdot L_k \cdot C_{kp}}{\omega \cdot Z_B [(C_k + C_{kp}) - \omega^2 \cdot L_k \cdot C_k \cdot C_{kp}]} \right) + n \cdot \frac{\lambda_{Д}}{2} = 2 \text{ (см).}$$

### 3.4 Розрахунок діодного підсилювача

Підсилювач вибираємо відбивної типу [16] на лавинно-пролітному діоді. Оберемо лавинно-пролітний діод типу АА730Г, його параметри наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Електричні параметри лавинно-пролітного діоду типу АА730Г

f, ГГц	f <sub>пр</sub> , ГГц	C, пФ	C <sub>пт</sub> , пФ	L <sub>пт</sub> , нГн	L <sub>p</sub> , нГн	P <sub>ном</sub> , Вт	R <sub>s</sub> , Ом	U <sub>0</sub> , В	I <sub>0</sub> , мА	n
11,5-15,0	13.25	0.14	0.45	0.7	0.5	0,5	1,5	35-80	120-250	1.04

Визначимо необхідну кількість діодів ( $\kappa = 0.8$ ):

$$N \geq P_{вих} / \kappa P_{ном} = 1.25.$$

Отже потрібно використовувати 2 діода. Потужність одного діода:

$$P_{Д} = \frac{P_{ВВІХ}}{\kappa \eta N} = \frac{0.5}{0.8 \cdot 0.7 \cdot 2} = 0.45 \text{ (Вт).}$$

Визначимо параметри A і  $\beta^2$

$$A = 0.08 \frac{1}{\omega C} \frac{1 - \cos(\theta)}{\theta} = 0.08 \frac{1}{2\pi \cdot 10 \cdot 10^9 \cdot 0.15 \cdot 10^{-12}} \frac{1 - \cos(\theta)}{\theta} = 3.265$$

$$\theta = \pi \frac{f_0}{f_{\text{ПР}}} = 3.56 \quad a = \frac{P_{\text{Д max}} n}{A} = 0.18$$

$$\beta^2 = \frac{1 - \sqrt{1 - 3.6a(3a + 1)}}{2(3a + 1)} = 0.31$$

Малосигнальний опір p-n переходу

$$R_{p-n} = -\frac{1}{\omega C} \frac{\beta^2}{1 - \beta^2} \frac{1 - \cos(\theta)}{\theta} = -18.3 \text{ Ом}.$$

Реактивний опір p-n переходу

$$X_{p-n} = \frac{1}{\omega C} \left( \frac{\beta^2}{1 - \beta^2} \frac{\theta - \sin(\theta)}{\theta} - \frac{1}{1 - \beta^2} \right) = -71.9 \text{ Ом}.$$

Визначимо опір p-n переходу в робочому режимі [17]

$$q = 0.8(1 - \beta^2) = 0.552 ,$$

$$R_{p-n \text{ ом}} = 0.5 R_{p-n} n q = -5.26 \text{ (Вт)}.$$

Опір діода визначаємо, використовуючи той факт, що геометричні розміри напівпровідникової структури настільки малі, що практично в усьому НВЧ діапазоні вона може бути представлена схемою на зосереджених елементах, вхідний опір якої  $Z_k = r_k + jX_k$  визначається електронними процесами в діодному проміжку. При впливі на діод ВЧ електромагнітного поля конструктивні елементи контуру створюють додаткові реактивні опору, тому повне опір діода визначають на підставі еквівалентної схеми діода [2], яка подана на рис. 2.5.

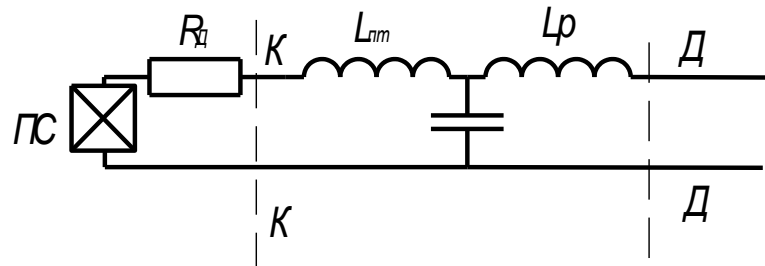


Рисунок 3.5 - Еквівалентна схема діода Ганна для НВЧ діапазону

$ПС$  - напівпровідникова структура;

$L_{nm}$  - індуктивність виведення;

$C_{nm}$  - ємність керамічної втулки між електродами;

$L_p$  - індуктивність, обумовлена точками СВЧ, що розтікаються по верхній капелюшка корпусу від контакту її з резонатором.

Для наведеної еквівалентної схеми повний опір діода визначається такими співвідношеннями:

$$r_D = \frac{r_k^2 X_{cn}^2}{r_k^2 + (X_k + X_{L\Pi} - X_{cn})^2} = -2.358 \text{ (Ом)},$$

$$X_D = \omega L_p - \frac{X_{cn} (r_k^2 + (X_k + X_{L\Pi}) (X_k + X_{L\Pi} - X_{cn}))}{r_k^2 + (X_k + X_{L\Pi} - X_{cn})^2} = 42.07 \text{ (Ом)},$$

де активний опір напівпровідникової структури

$$r_k = R_{p-n\text{ on}m} + R_S = -3.76 \text{ Ом} \quad (\text{Ом}),$$

а реактивний опір напівпровідникової структури

$$X_k = X_{p-n} = -67.136 \text{ Ом} \quad (\text{Ом}).$$

Тоді

$$X_{cn} = \frac{1}{\omega C_{ПТ}} = 23.58 \text{ Ом} \quad (\text{Ом}),$$

$$X_{L\Pi} = \omega L_{nm} = 65.97 \text{ Ом} \quad (\text{Ом}),$$

Модуль опору діода дорівнює

$$r_{D0} = \sqrt{r_D^2 + X_D^2} = 42.13 \quad (\text{Ом}).$$

Розрахуємо опір зовнішньої кола (опір резонатора, приведене до затискачів діода)

$$Z_P = R_P + jX_P$$

з виразу для резонансного коефіцієнта підсилення.

Розрахункова потужність на виході генератора становить

$$P = 84 \text{ мВт}.$$

Вважаємо, що за рахунок збільшення втрат при підключенні керуючого діода, що не ідеальності узгодження, загасання, втрат в циркулятора і вентиля потужність зменшиться приблизно в 2 рази. Приймемо

$$K_0 = \frac{P_{вых}}{P_{ex}} = \frac{500}{0.5 \cdot 100} \approx 7 \text{ дБ}$$

Для його забезпечення визначимо резонансний опір контуру

$$R_P = r_{Д0} \frac{\sqrt{K_0} + 1}{\sqrt{K_0} - 1} = 66.403 \quad (\text{Ом}).$$

Для виконання балансу фаз реактивна частина повного опору резонатора повинна дорівнювати

$$X_P = -X_{Д} = -33.274 \quad (\text{Ом}).$$

Для отримання необхідного  $R_P$  висота хвильоводу повинна бути рівною

$$b = \frac{a \sqrt{1 - (\lambda / \lambda_{кр})^2}}{377} R_P = 2.2 \quad (\text{мм}).$$

Хвильовий опір і висота чверть-хвильового трансформатора

$$Z_{TP} = \sqrt{Z_B R_P} = 127 \quad (\text{Ом}),$$

$$b = \frac{a \sqrt{1 - (\lambda / \lambda_{кр})^2}}{377} Z_{TP} = 4.2 \quad (\text{мм}).$$

### 3.5 Розрахунок модулятора

Як перемикального діода візьмемо діод КА601, його параметри наведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Електричні параметри НВЧ перемикального діода КА601

$R_{пр}, \text{Ом}$	$C_{pn}(U), \text{пФ}$	$U_{д}, \text{В}$	$R_s, \text{Ом}$	$L_{л}, \text{нГн}$	$C_{л}, \text{пФ}$	$P_{доп}, \text{Вт}$
1.5	0.2	-4	1	1.4	0.13	< 0,15



Імпульсний модулятор являє собою короткозамкнений шлейф з встановленим в ньому перемикаючим діодом. Принцип дії модулятора заснований на різкій зміні опору діода при перемиканні напруги зсуву на ньому.

Вибираємо довжину шлейфа

$$l = 0.75\lambda = 0.75 \cdot 3.6 = 2.7 \text{ (см)}.$$

і відстань від входу шлейфу до площини включення діода

$$l_D = 0.5\lambda = 0.5 \cdot 4 = 3 \text{ (см)}.$$

Найбільший перемикальний ефект може бути отриманий при перемикаванні схеми зі стану послідовного резонансу до паралельного. Послідовний резонанс здійснюється при закритому діоді

$$R_{pn} \gg (\omega C_{pn})^{-1}.$$

При цьому повний опір діода

$$Z_D \approx R_S \ll (\omega C_{pn})^{-1}$$

і становить

$$Z_{ДПС} \approx 1 \text{ (Ом)}.$$

Для забезпечення послідовного резонансу зворотне зміщення підбирають таким чином, щоб

$$C_{pn} = \left( 4\pi^2 f_0^2 L_{ПТ} \right)^{-1} = 0.16 \text{ (пФ)}.$$

Напруга зворотного зсуву для знайденого значення ємності

$$U_{OBR} \approx U_D \left[ \frac{C_{pn(U)}}{C_{pn}} \right]^2 = -9.95 \text{ (В)}.$$

При перемиканні діода у відкритий стан повний опір діода стає рівним

$$|Z_{Д ПП}| = X_{C_{ПП}} \left[ \frac{R_{ПП}^2 + X_{L_{ПП}}^2}{R_{ПП}^2 + (X_{L_{ПП}} - X_{C_{ПП}})^2} \right]^{\frac{1}{2}} = 326 \text{ (Ом)},$$

де

$$X_{C_{ПП}} = (2\pi f_0 C_{ПП})^{-1} = 131 \text{ (Ом)},$$

$$X_{L_{ПП}} = 2\pi f_0 L_{ПП} = 72 \text{ (Ом)}.$$

Повної настройки на паралельний резонанс не відбувається, однак опір діода різко зростає. З огляду на, що

$$l_D = 0.5\lambda$$

приймаємо вхідний опір шлейфа

$$Z_{ВХ} = Z_{Д}.$$

Коефіцієнти проходження потужності

$$\Pi_{\max} = 1 - \left( 1 + \frac{2Z_B}{Z_{ДПС}} \right)^{-2} = 1$$

$$\Pi_{\min} = 1 - \left( 1 + \frac{2Z_B}{Z_{Д ПП}} \right)^{-2} = 0.73$$

Глибина модуляції

$$m = 10 \lg(\Pi_{\max} / \Pi_{\min}) \approx 1 \text{ (дБ)}.$$

Для збільшення глибини модуляції необхідно використовувати трансформатор опорів. При включенні перемикального діода у відрізок хвилеводу з хвильовим опором

$$Z_B = 100 \text{ Ом}$$

і коефіцієнт проходження потужності

$$\Pi_{\min} = 0.52$$

Тоді глибина модуляції  $m = 3$  дБ.

Постійне зміщення на діоді вибирається з умови допустимої потужності, що розсіюється діодом, таким чином, щоб забезпечити прямий опір

$$R_{\text{ПР}} = 1.5 \text{ (Ом)},$$

$$U_{\text{ПР}} \leq \left( R_{\text{ПР}} P_{\text{ДОП}} \right)^{\frac{1}{2}} = 0.48 \text{ (В)}.$$

Амплітуда модулюючих імпульсів

$$U_M = U_{\text{ПР}} + U_{\text{ОБР}} = 10.4 \text{ (В)}.$$

#### 4 МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МІКРОХВИЛЬОВОГО ГЕНЕРАТОРА НА ДЮДІ ГАННА

Труднощі моделювання мікрохвильових пристроїв за допомогою відомих пакетів прикладних програм пов'язані з тим, що ці пристрої мають розподілені параметри, пов'язані складними залежностями з конструктивними розмірами елементів пристрою. Тому для визначення конструктивних розмірів потрібно вирішувати чисельними методами досить складні рівняння, що не завжди виправдано в рамках відомих пакетів прикладних програм.

Визначення мікрохвильової провідності діода проведемо методом заданого поля, вважаючи, що зовнішнє поле у багато разів більше поля об'ємного заряду, за допомогою співвідношень:

$$P = E^* d \frac{i_{\text{нав}}}{2} = \frac{1}{d} \int_0^d S j(x) dx, \quad (4.1)$$

де  $P$  - середня за період комплексна потужність взаємодії електронів і поля;  $E^*$  - комплексно-поєднане значення амплітуди мікрохвильового поля;  $i_{\text{нав}}$  - наведений у зовнішнє коло діода струм;  $d = L$  - довжина структури діода;  $S$  - площа структури діода;  $j(x)$  - щільність конвекційного струму всередині діода.

У підсумку це дає для струму  $j(x)$  співвідношення

$$j = \sigma E_{\sim} + NE_{\sim} + \left[ \frac{NE_{\sim}}{\exp \gamma_2 L - \exp \gamma_1 L} \right] \times \\ \times \left[ (\exp \gamma_2 L - 1) \exp \gamma_1 z + (1 - \exp \gamma_1 L) \exp \gamma_2 z \right] \quad (4.2)$$

$$N = j \omega \varepsilon \frac{\sigma_{\text{жс}} - \sigma}{\sigma_{\text{жс}} + j \omega \varepsilon} \approx j \omega \varepsilon. \quad (4.4)$$

де  $L$  - довжина активної області діода,  $j = \sigma_k E_k$ , де  $\sigma_k$  - активна провідність контакту,  $E_k$  - поле в контакті, яке можна виразити через поле в обсязі  $E \sim$  на основі рівності індукції поля в контакті  $E_k(\varepsilon - j\sigma_k/\omega)$  і в обсязі  $E(\varepsilon - j\sigma_k/\omega)$ .

Підставляючи (4.2) в (4.1) і визначаючи наведений струм, легко знайти співвідношення

$$Y_e = \frac{S}{L} \left[ \sigma_{a+} + j\sigma_{r+} + \frac{j\omega\varepsilon(\exp \gamma_2 L - 1)(1 - \exp \gamma_1 L)}{L(\exp \gamma_2 L - \exp \gamma_1 L)} \left( \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{\gamma_1 \gamma_2} \right) \right], \quad (4.4)$$

яке в загальному вигляді характеризує нелінійну комплексну провідність структури діода Ганна.

Співвідношення (4.4) використано для розрахунку амплітудних і частотних залежностей активної та реактивної мікрохвильової провідності діода Ганна за допомогою програмного середовища "Mathcad" (Додаток Л) при наступних параметрах і наближеннях, характерних для  $n$ -GaAs:

- постійна Больцмана:  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/град;
- діелектрична постійна:  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;
- маса вільного електрона:  $m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг;
- заряд електрона:  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл;
- коефіцієнт зменшення маси електрона в  $n$ -GaAs: 0,07;
- коефіцієнт зміни ефективної маси електрона:  $p_m = 0,1$ ;
- відносна діелектрична проникність  $n$ -GaAs:  $\varepsilon = 12,5$ ;
- рухливість електронів в слабкому полі:  $\mu_0 = 0,8$  м<sup>2</sup>/В·с;
- час релаксації енергії електронів:  $\tau_e = 8 \cdot 10^{-12}$  с;
- концентрація електронів:  $n = 8 \cdot 10^{21}$  м<sup>-3</sup>;
- абсолютна температура:  $T = 300$  °К;
- довжина напівпровідникової структури діода:  $L = 4 \cdot 10^{-6}$  м;
- площа структури діода:  $S = 10^{-8}$  м<sup>2</sup>;
- час релаксації імпульсу електрона розраховувалося за формулою:  
 $\tau = 0,07 \cdot m_0 \cdot \mu_0 / e$ ;

- коефіцієнт дифузії електронів в слабкому полі розраховувався за формулою:

$$D_o = \mu_o \cdot k \cdot T / e;$$

- залежність коефіцієнта дифузії від напруженості постійного електричного поля враховувалася за допомогою формули:

$$D(E) = D_o (1 + CE^2) / (1 + E^2)^2,$$

де  $E = E_o / E_n$ ;  $C = (1 + p_m) / p_m$ ;  $E_n = 3,5 \cdot 10^5$  В/м – порогове поле ефекта Ганна в  $n$ -GaAs.

Амплітудні залежності складових мікрохвильової провідності відповідають частоті сигналу, що дорівнює 15 ГГц, і зображені на рис. 4.2 і 4.3, частотні залежності - відповідають оптимальній амплітуді сигналу, що дорівнює 0,45 В, і зображені на рис. 4.4 і 4.5. Значення активної і реактивної провідності позначені відповідно буквами  $G_{eol}$ ,  $B_{eol}$  і приведені в Сіменс, значення амплітуди "U" наведені в Вольтах, а значення частоти "a" - в Герцах. Сімейства залежностей відповідають різним постійним напруженням на ДГ.

Під оптимальною розуміється амплітуда сигналу, при якій структура ДГ може генерувати максимальну потужність за рахунок своєї негативної активної мікрохвильової провідності:

$$P_{\max} = |-G_{eol}| U_{opt}^2 / 2.$$

Оптимальна амплітуда сигналу визначалася по рис. 4.1, де показані залежності потужності в Вт, що генерується на структурі ДГ, від амплітуди сигналу.

Залежності на рис. 4.3 і рис. 4.5 використовуються для визначення реактивної провідності структури ДГ при оптимальній амплітуді мікрохвильового сигналу на структурі ДГ з метою розрахунку його ємності.

Залежності на рис. 4.4 можуть використовуватися для оцінки зміни негативної активної провідності структури ДГ від частоти сигналу і можливостей ДГ генерувати мікрохвильові коливання.

Залежності на рис. 4.3 і рис. 4.5 можуть використовуватися для оцінки зміни реактивної провідності структури ДГ від амплітуди і частоти сигналу.

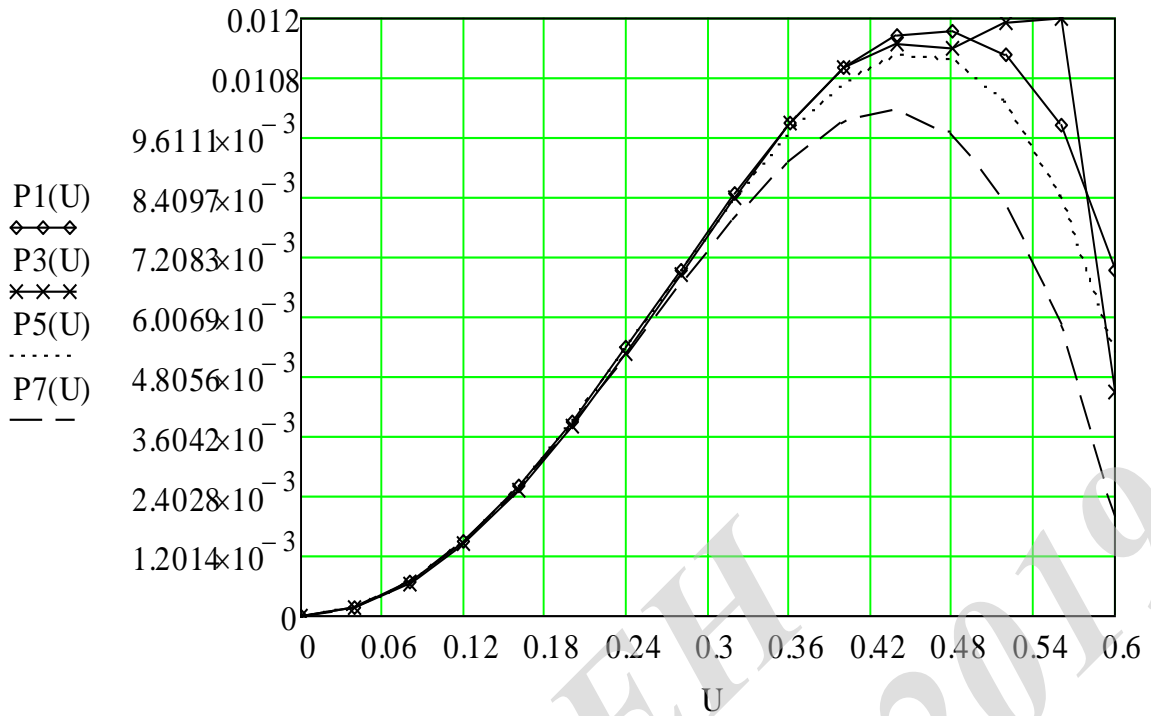


Рисунок 4.1 – Залежності потужності, що генерується на структурі ДГ, від амплітуди сигналу

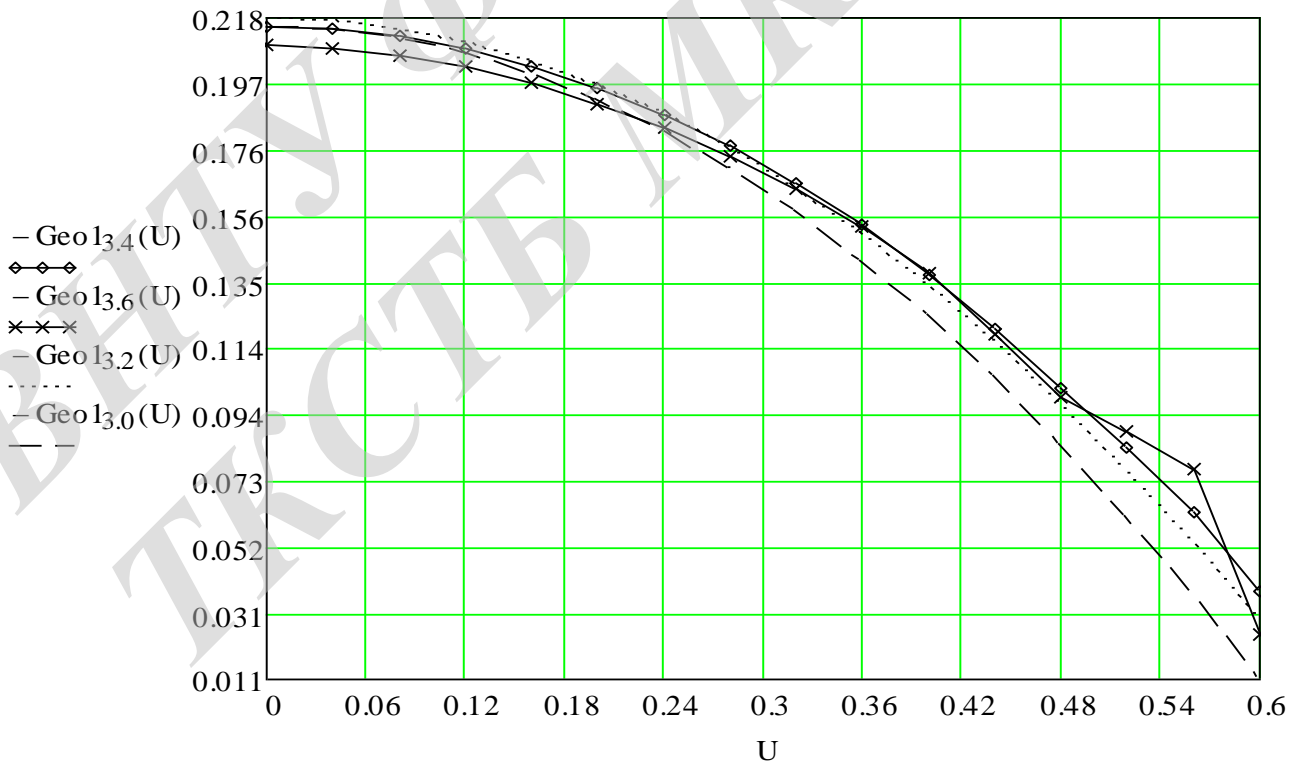


Рисунок 4.2 – Залежності активної провідності структури ДГ від амплітуди мікрохвильового сигналу

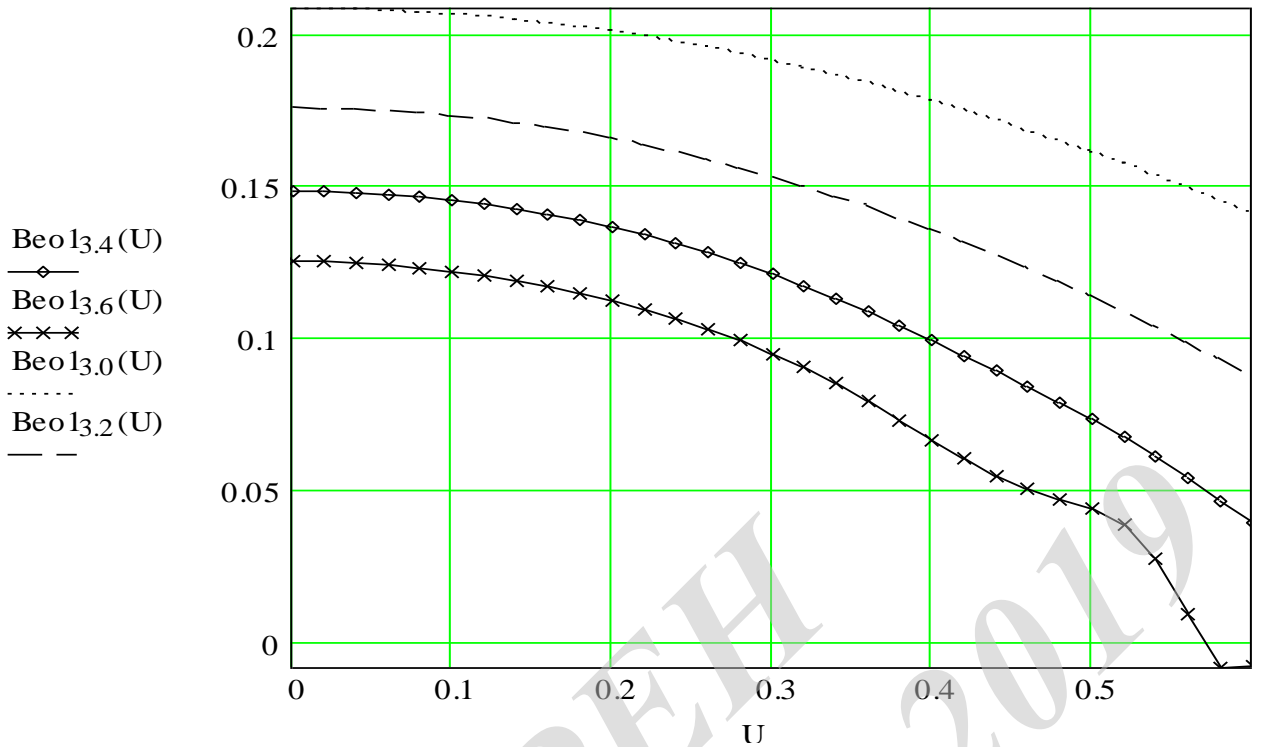


Рисунок 4.3 – Залежності реактивної провідності структури ДГ від амплітуди мікрохвильового сигналу

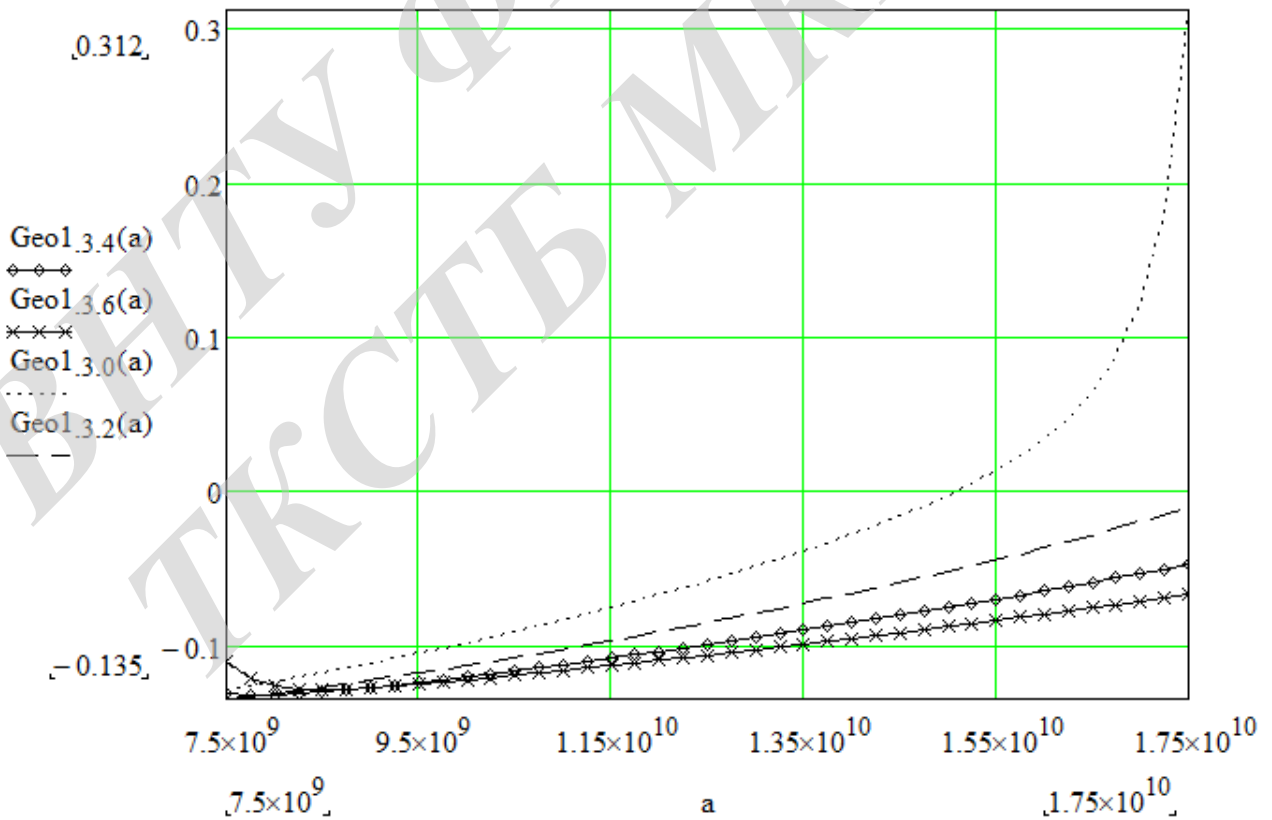


Рисунок 4.4 - Залежності активної провідності структури ДГ від частоти мікрохвильового сигналу



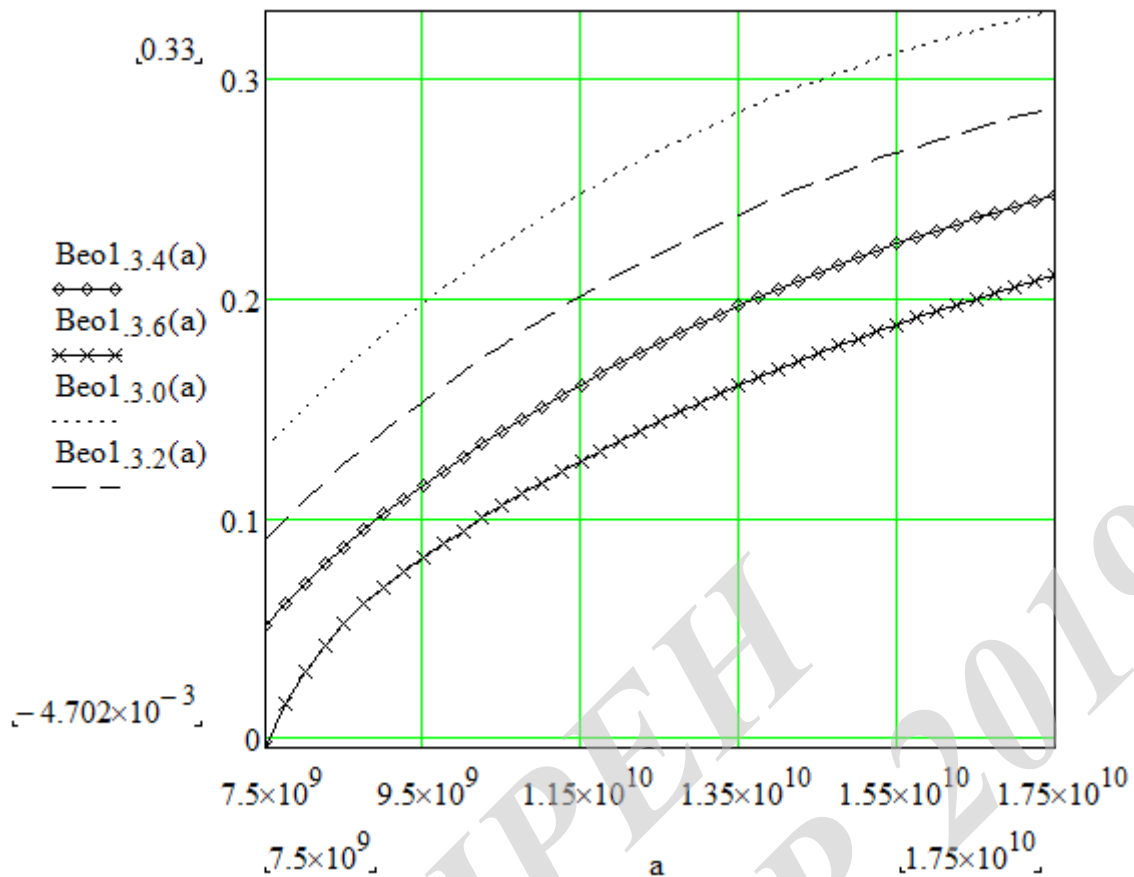


Рисунок 4.5 – Залежності реактивної провідності структури ДГ від частоти мікрохвильового сигналу

Як впливає з рисунка 4.4, на частотах понад 17,5 ГГц структура діода Ганна втрачає властивість негативної активної провідності, тому на цих частотах діод Ганна може використовуватися в режимі генерації гармонік. Зокрема, в роботі досліджується можливість використання другої гармоніки.

Хід наведених залежностей відповідає загальноприйнятим уявленням [10], тому результати моделювання можуть бути використані для розробки різних пристроїв на діодах Ганна. Крім того результати роботи носять загальний характер і можуть використовуватися для моделювання мікрохвильової провідності діодів Ганна з інших матеріалів.

На рис. 4.6 – рис. 4.8 наведено графіки результатів дослідження діапазонних властивостей розробленого генератора.

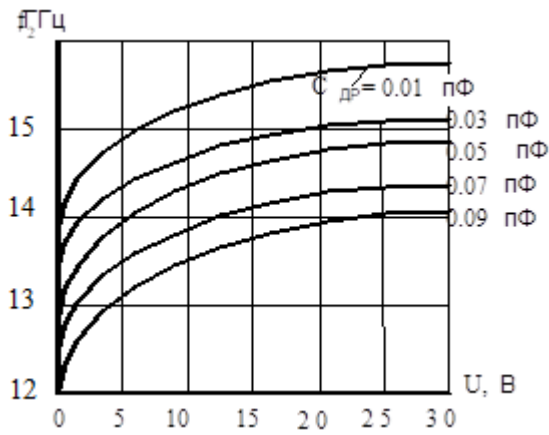


Рисунок 4.6 - Залежності вихідної частоти мікрохвильового генератора від напруги на варакторі при різних значеннях  $C_{др}$

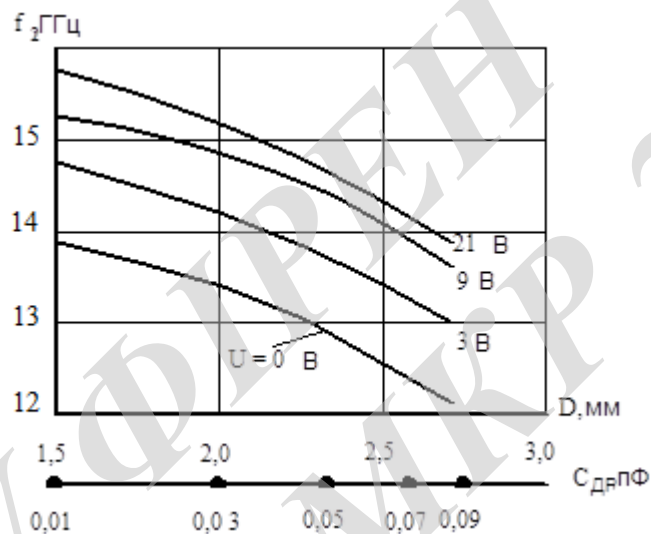


Рисунок 4.7 - Залежності вихідної частоти мікрохвильового генератора від діаметра дискового резонатора при різній напрузі на варакторі

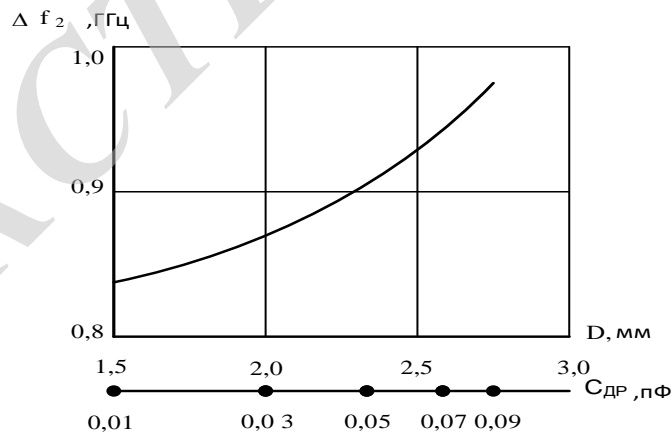


Рисунок 4.8 – Залежність діапазону електричної перебудови вихідної частоти генератора від діаметра ДР при зміні напруги на варакторов від 0 до 30 В

## 5 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

### 5.1 Технологічний аудит розробленого керованого за частотою генератора мікрохвильового блоку радіорелейної станції (дослідження)

Як було підкреслено у попередніх розділах роботи, в останні роки зростає інтерес до використання сантиметрових і міліметрових електромагнітних хвиль. Перехід в цю частину діапазону пов'язаний з тим, що зі збільшенням частоти збільшується можливість концентрації електромагнітного випромінювання у вузький промінь. Якщо довжина хвилі багато менше розмірів об'єкта, тоді використання гостроспрямованих променів забезпечує зниження взаємних перешкод одночасно працюючих радіолокаторів, збільшує дальність дії радіосистем, дозволяє досягти високої точності визначення координат радіолокаційних об'єктів.

Іншою особливістю електромагнітних хвиль НВЧ-діапазону є велика інформативна ємність. Це дозволяє, наприклад, організувати багатоканальну передачу широкосмугових телевізійних сигналів з одночасним підвищенням якості зв'язку.

Не випадково, що питання, пов'язані з дослідженням особливостей роботи генераторів, що працюють в сантиметровому та міліметровому діапазоні електромагнітних хвиль, постійно перебувають центрі уваги багатьох дослідників.

Тому нами у виконаній магістерській кваліфікаційній роботі також було проведено теоретичне та модельне дослідження мікрохвильового генератора з електронним керуванням частоти діапазону 42 ГГц, зокрема проведено дослідження електричних параметрів і характеристик генератора мікрохвильового діапазону частот на основі діода Ганна.

Для цього нами було: проаналізовано теоретичні відомості про генератори мікрохвильового діапазону на діоді Ганна; зроблено огляд частотних діапазонів генераторів мікрохвильового діапазону на діоді Ганна; проведено теоре-

тичні дослідження мікрохвильової провідності діодів Ганна; розроблено конструкції генератора мікрохвильового діапазону на діоді Ганна тощо.

В результаті, нами було спроектовано генератор на діоді Ганна, який має досить просту конструкцію, порівняно низьку ціну і може використовуватися в таких сферах людської діяльності, як медицина, біологічна промисловість, радіотехнічні системи та комплекси тощо.

Для визначення технічного рівня та комерційного потенціалу проведених досліджень та розробленого керованого за частотою генератора мікрохвильового блоку радіорелейної станції проведемо технологічний аудит нашої розробки. Для проведення технологічного аудиту були запрошені компетентні фахівці з цього питання: д.т.н., професор Осадчук О.В., директор Вінницького ННВЦ ОНАЗ Герасимлюк В.С. та директор Вінницької філії концерну РРТ Півнев О.В.

Запрошені до проведення технологічного аудиту експерти здійснювали оцінювання технічного рівня та комерційного потенціалу нашої розробки за методикою та рекомендаціями Державного комітету України з питань науки, інновацій та інформатики [26], які наведено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Критерії оцінювання технічного рівня та комерційного потенціалу розробки

Критерії оцінювання та бали (за 5-ти бальною шкалою)					
Кри- тері й	0	1	2	3	4
Технічна здійсненність концепції:					
1	Достовірність концепції не підтверджена	Концепція підтверджена експертними висновками	Концепція підтверджена розрахунками	Концепція перевірена на практиці	Перевірено роботоздатність продукту в реальних умовах
Ринкові переваги (недоліки):					
2	Багато аналогів на малому ринку	Мало аналогів на малому ринку	Кілька аналогів на великому ринку	Один аналог на великому ринку	Продукт не має аналогів на великому ринку

Продовження таблиці 5.1

Критерії оцінювання та бали (за 5-ти бальною шкалою)					
Кри- те- рій	0	1	2	3	4
3	Ціна продукту значно вища за ціни аналогів	Ціна продукту дещо вища за ціни аналогів	Ціна продукту приблизно дорівнює цінам аналогів	Ціна продукту дещо нижче за ціни аналогів	Ціна продукту значно нижче за ціни аналогів
4	Технічні та споживчі властивості продукту значно гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту на рівні аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи кращі, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту значно кращі, ніж в аналогів
Ринкові перспективи					
5	Експлуатаційні витрати значно вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати дещо вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати на рівні експлуатаційних витрат аналогів	Експлуатаційні витрати трохи нижчі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж в аналогів
6	Ринок малий і не має позитивної динаміки	Ринок малий, але має позитивну динаміку	Середній ринок з позитивною динамікою	Великий стабільний ринок	Великий ринок з позитивною динамікою
7	Активна конкуренція великих компаній на ринку	Активна конкуренція	Помірна конкуренція	Незначна конкуренція	Конкурентів немає
Практична здійсненність					
8	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно наймати фахівців або витрачати значні кошти та час на навчання наявних фахівців	Необхідне незначне навчання фахівців та збільшення їх штату	Необхідне незначне навчання фахівців	Є фахівці з питань як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї
9	Потрібні значні фінансові ресурси, які відсутні. Джерела фінансування ідеї відсутні	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування відсутні	Потрібні значні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Не потребує додаткового фінансування

## Продовження таблиці 5.1

Критерії оцінювання та бали (за 5-ти бальною шкалою)					
Кри- те- рій	0	1	2	3	4
10	Необхідна розробка нових матеріалів	Потрібні матеріали, що використовуються у військово-промислового комплексі	Потрібні дорогі матеріали	Потрібні досяжні та дешеві матеріали	Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у виробництві
11	Термін реалізації ідеї більший за 10 років	Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10-ти років	Термін реалізації ідеї від 3-х до 5-ти років. Термін окупності інвестицій більше 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій від 3-х до 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій менше 3-х років
12	Необхідна розробка регламентних документів та отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту	Необхідно отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту, що вимагає значних коштів та часу	Процедура отримання дозвільних документів для виробництва та реалізації продукту вимагає незначних коштів та часу	Необхідно тільки повідомлення відповідним органам про виробництво та реалізацію продукту	Відсутні будь-які регламентні обмеження на виробництво та реалізацію продукту

Експерти провели технологічний аудит нашої розробки за бальною шкалою [27] (табл. 5.2).

Результати технологічного аудиту та розрахунків, які наведено в табл. 5.2, показують, що середньоарифметична сума балів, що їх виставили експерти, дорівнює 32,33 бали.

Керуючись рекомендаціями, наведеними в табл. 5.3, можна зробити висновок, що результати проведених нами досліджень та розробленого керованого за частотою генератора мікрохвильового блоку радіорелейної станції мають технічний рівень та комерційний потенціал, який вважається «вище середнього».

Таблиця 5.2 – Результати технологічного аудиту нашої розробки

Критерії	Прізвище, ініціали експерта		
	Герасимлюк В.С.	Півнев О. В.	Осадчук О.В.
	Бали, виставлені експертами:		
1	2	2	1
2	2	2	4
3	4	4	4
4	3	2	4
5	3	2	3
6	1	1	2
7	1	1	1
8	4	4	4
9	3	3	1
10	4	4	3
11	4	4	4
12	2	2	2
Сума балів	СБ <sub>1</sub> =33	СБ <sub>2</sub> =31	СБ <sub>3</sub> =33
Середньоарифметична сума балів $\overline{СБ}$	$\overline{СБ} = \frac{\sum_{i=1}^3 СБ_i}{3} = \frac{33 + 31 + 33}{3} = \frac{97}{3} = 32,33.$		

Таблиця 5.3 – Потенційні технічні рівні та комерційний потенціал розробки

Середньоарифметична сума балів $\overline{СБ}$ , розрахована на основі висновків експертів	Технічний рівень та комерційний потенціал розробки
0 – 10	Низький
11 – 20	Нижче середнього
21 – 30	Середній
31 – 40	Вище середнього
41 – 48	Високий

Це пояснюється тим, що наша розробка має значно кращі функціональні можливості та характеристики, між аналоги, про що свідчать дані табл. 5.4.

Тобто розроблений нами керований за частотою генератор мікрохвильового блоку радіорелейної станції може бути успішно використаний в багатьох галузях радіоелектроніки, радіозв'язку, телебаченні тощо.

Таблиця 5.4 – Основні характеристики нашої розробки та продукції основного конкурента (у відносних показниках)

Показник	Варіанти		Коефіцієнт вагомості параметра
	Базовий (товар-конкурент)	Наша розробка	
Безперервна робота в робочих умовах при збереженні своїх технічних характеристик протягом часу, не менше, год.	16	18	40%
Середній час відновлення працездатного стану, не більше, год.	8	6	25%
Середнє напрацювання на відмову вимірювача, не менше, годин	6000	7 000	10%
Ресурс приладу, не менше, годин	14 000	16 000	15%
Маса, не більше, кг	8,5	6,5	10%
			100%

## 5.2 Розрахунок витрат на проведення досліджень

При виконанні даної роботи були використані такі статті витрат [27]:

5.2.1 Основна заробітна плата  $Z_o$  розробників (формула 5.1):

$$Z_o = \frac{M}{T_p} \cdot t \text{ [грн]}, \quad (5.1)$$

де  $M$  – місячний посадовий оклад конкретного розробника; у ВНТУ місячні оклади коливаються в межах:  $M = (4173 \dots 17200)$  грн/міс.;

$T_p$  – число робочих днів в місяці; прийmemo  $T_p = 22$  дні;

$t$  – число робочих днів роботи розробників.

Розрахунки основної заробітної плати розробників зведені в табл. 5.5:



Таблиця 5.5 – Основна заробітна плата розробників (округлено до цілих чисел)

Найменування посади виконавця	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на оплату праці, грн	Примітка
1. Науковий керівник магістерської кваліфікаційної роботи	15000	682	25 годин	2842	При 36-годинній робочій неділі
2. Розробник- магістрант	1900	86	73 дні	6278	
3. Консультант	11400	518	2,5 години	216	При 36-годинній робочій неділі
4. Інші фахівці	6000	273	4	1092	
Всього				$Z_o = 10428$ грн	

5.2.2 Розрахунки основної заробітної плати  $Z_{роб}$  робітників наведено в табл.5.6:

Таблиця 5.6 – Основна заробітна плата робітників (округлено до цілих чисел)

Найменування робіт	Трудомісткість, нормо-годин	Розряд роботи	Погодинна тарифна ставка, грн/годину	Величина оплати, грн
1. Монтажні	1,5	4	$25,13 \times 1,4 = 35,18$	52,77
2. Складальні	2	3	$25,13 \times 1,29 = 32,42$	64,88
3. Налаштовувальні (тестування)	3	5	$25,13 \times 1,57 = 39,45$	118,36
Всього $Z_{роб}$				$\approx 236$

5.2.3 Додаткова заробітна плата  $Z_d$  розробників та робітників (формула 5.2):

$$Z_d = (0,1 \dots 0,12) \cdot (Z_o + Z_{роб}). \quad (5.2)$$

Для нашого випадку отримаємо:

$$З_д = 0,11 \times (10428 + 236) \approx 1173 \text{ (грн)}.$$

5.2.4 Нарахування на заробітну плату  $НР_{зп}$  розробників та робітників розраховуються за формулою (5.3):

$$Н_{зп} = (З_о + З_{роб} + З_д) \cdot \frac{\beta}{100} \text{ [грн.]}, \quad (5.3)$$

де  $\beta = 22\%$  – ставка єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування.

Для нашого випадку отримаємо:

$$НР_{зп} = (10428 + 236 + 1173) \times 0,22 = 2604 \text{ (грн)}.$$

5.2.5 Амортизація  $A$  основних засобів, обладнання, комп'ютерів тощо розраховується за формулою (5.4) :

$$A = \frac{Ц \cdot Н_a}{100} \cdot \frac{T}{12} \text{ [грн]}, \quad (5.4)$$

де  $Ц$  – загальна балансова вартість основних засобів, обладнання, комп'ютерів тощо, які використовувалися під час виконання роботи, грн;

$Н_a$  – річна норма амортизаційних відрахувань. Спрощено можна прийняти, що  $Н_a = (5...25)\%$ ;

$T$  – термін використання кожного виду основних засобів, місяці.

Розрахунки амортизаційних відрахувань наведено в табл. 5.7.

5.2.6 Витрати на матеріали  $M$  розраховуються за формулою (5.5):

$$M = \sum_1^n H_i \cdot Ц_i \cdot K_i - \sum_1^n B_i \cdot Ц_b \text{ [грн]}, \quad (5.5)$$

де  $H_i$  – витрати матеріалу  $i$ -го найменування, кг;

$\Pi_i$  – вартість матеріалу  $i$ -го найменування, грн/кг.;

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

$B_i$  – маса відходів матеріалу  $i$ -го найменування, кг;

$\Pi_{\text{в}}$  – ціна відходів матеріалу  $i$ -го найменування, грн/кг;

$n$  – кількість видів матеріалів.

Таблиця 5.7 - Амортизаційні відрахування (округлено)

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн.	Норма амортизації, %	Термін використання обладнання, міс.	Величина амортизаційних відрахувань, грн.
1.Комп'ютер	42500	25	3	2656
2.Осцилограф	8600	20	3	430
3.Генератор	26000	25	3	1625
4.Частотомір	14500	20	3	725
Всього				5436

При виконанні роботи були використані: припій ПОС-61; флюс ВС-2; клей; спиртобензин СВС-50; лак ЕП-730; дріт монтажний тощо. Загальна вартість всіх матеріалів становить 500 грн.

5.2.7 Витрати на комплектуючі  $K$  розраховуються за формулою (5.6):

$$K = \sum_1^n H_i \cdot \Pi_i \cdot K_i \text{ [грн.]}, \quad (5.6)$$

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

$\Pi_i$  – ціна комплектуючих  $i$ -го виду, грн;

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

$n$  – кількість видів комплектуючих.

При виконанні роботи були використані: кварцовий резонатор; діод Ганна; мікросхеми; мікроконтролер; транзистори, резистори, конденсатори, діоди

тощо. Загальна вартість комплектуючих, які були використані під час виконання даної роботи, становить приблизно 3000 грн.

5.2.8 Витрати на силову електроенергію  $V_e$  розраховуються за формулою (5.7):

$$V_e = \frac{V \cdot \Pi \cdot \Phi \cdot K_{\Pi}}{K_d} \text{ [грн.]}, \quad (5.7)$$

де  $V$  – вартість 1 кВт-год. електроенергії, в 2019 р.  $V \approx 2,5$  грн/кВт;

$\Pi$  – установлена потужність обладнання, кВт;  $\Pi = 2,45$  кВт;

$\Phi$  – фактична кількість годин роботи обладнання, годин. Прийmemo, що  $\Phi = 145$  годин;

$K_{\Pi}$  – коефіцієнт використання потужності;  $K_{\Pi} < 1 = 0,88$ .

$K_d$  – коефіцієнт корисної дії,  $K_d = 0,77$ .

Тоді витрати на силову електроенергію становитимуть:

$$V_e = \frac{V \cdot \Pi \cdot \Phi \cdot K_{\Pi}}{K_d} = \frac{2,5 \cdot 2,45 \cdot 145 \cdot 0,88}{0,77} \approx 1015 \text{ (грн)}.$$

5.2.9 Інші витрати  $V_{in}$  (опалення, освітлення, ремонт, утримання приміщень тощо) розраховуються як (100...300)% від основної заробітної плати робників, тобто:

$$V_{in} = (1 \dots 3) \times (Z_o + Z_{pob}) \text{ [грн]}. \quad (5.8)$$

Для нашого випадку отримаємо:

$$V_{in} = 1,8 \times (10428 + 236) = 19195 \text{ (грн)}.$$

5.2.10 Сума всіх попередніх статей дає витрати на виконання роботи безпосередньо магістрантом –  $V_{\text{заг}}$ .

$$V_{\text{заг}} = 10428 + 236 + 1173 + 2604 + 5436 + 500 + 3000 + 1015 + 19195 = 43587 \text{ (грн)}.$$

5.2.11 Загальні витрати на остаточне завершення роботи та оформлення їх результатів розраховуються за формулою (5.9):

$$ЗВ = \frac{V_{\text{заг}}}{\beta} \text{ [грн]}, \quad (5.9)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт, який характеризує етап виконання даної роботи на шляху до її можливого впровадження.

Загальні рекомендації: 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  $\beta \approx (0,8 - 0,9)$ .

Для нашого випадку доцільно прийняти, що  $\beta \approx 0,6$ .

Тоді:

$$ЗВ = \frac{43587}{0,6} = 72645,00 \text{ (грн) або приблизно 73 тисяч грн.}$$

Тобто загальні витрати на остаточне завершення роботи та оформлення її результатів становлять приблизно 73 тис. грн.

### 5.3 Розрахунок економічного ефекту від можливої комерціалізації нашої розробки

Економічний ефект від можливої комерціалізації нашої розробки можливий за рахунок її значно кращих функціональних можливостей та характеристик, які були описані вище (табл. 4.4), а також суттєвого зростання попиту на нашу розробку. Причому, якщо існуючі подібні генератори коштують на ринку в середньому приблизно 100 тис. грн, то нашу розробку можна буде реалізувати на ринку дорожче, наприклад, за 110 тис. грн, чи на 10 тис. грн дорожче.

Аналіз місткості ринку даної продукції показує, що в даний час в Україні кількість охочих придбати нашу (або аналогічну) розробку складає щороку приблизно 100 осіб, але їх кількість буде стрімко зростати. Оскільки наша розробка має значно кращі функціональні можливості та характеристики, то вона повинна користуватися підвищеним попитом на ринку протягом 3-х років після впровадження.

Тобто наша розробка може бути впроваджена з 1 січня 2021 року (оскільки потребує певного доопрацювання), а її результати будуть виявлятися протягом 2021-го, 2022-го та 2023-го років.

Прогноз зростання попиту на нашу розробку складає по роках:

- 2021 р. – приблизно на  $\Delta 25$  шт.;
- 2022 р. – приблизно на  $\Delta 35$  шт.;
- 2023 р. – приблизно на  $\Delta 50$  шт.

Розрахуємо можливе збільшення чистого прибутку  $\Delta\Pi_i$ , що його можна отримати потенційний інвестор від впровадження нашої розробки [27]:

$$\Delta\Pi_i = \sum_1^n (\Delta\Pi_o \cdot N + \Pi_o \cdot \Delta N)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{\rho}{100}\right) \text{ [тис. грн]}, \quad (5.10)$$

де  $\Delta\Pi_o$  – зміна основного якісного показника від впровадження результатів розробки у даному році. Таким показником є зміна ціни нової розробки; для нашого випадку це буде:  $\Delta\Pi_o = (110 - 100) = +10$  (тис. грн);

$N$  – основний кількісний показник, який визначає обсяг діяльності у даному році до впровадження результатів розробки;  $N = 100$  шт.;

$\Delta N$  – покращення основного кількісного показника від впровадження результатів нашої розробки. Таке покращення відповідно по роках становитиме:

$$\Delta_{21} = +25, \Delta_{22} = +35 \text{ та } \Delta_{23} = +50 \text{ шт.};$$

$C_0$  – основний якісний показник, який визначає обсяг діяльності у році після впровадження результатів розробки; для нашого випадку  $C_0 = 110$  тис. грн;

$n$  – кількість років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки;  $n = 3$  роки;

$\lambda$  – коефіцієнт, який враховує сплату податку на додану вартість;  $\lambda = 0,8333$ ;

$\rho$  – коефіцієнт, який враховує рентабельність продукту. Рекомендується приймати  $\rho = (0,2 \dots 0,5)$ ; візьмемо  $\rho = 0,5$ ;

$\nu$  – ставка податку на прибуток. У 2019 році  $\nu = 18\%$ .

Величина чистого прибутку  $\Delta \Pi_1$  для потенційного інвестора протягом першого року від можливого впровадження нашої розробки (2021 р.) складе:

$$\Delta \Pi_1 = [10 \cdot 100 + 110 \cdot 25] \cdot 0,8333 \cdot 0,5 \cdot \left(1 - \frac{18}{100}\right) \approx 1281 \text{ (тис. грн).}$$

Величина чистого прибутку  $\Delta \Pi_2$  для потенційного інвестора від можливого впровадження нашої розробки протягом другого (2022 р.) року складе:

$$\Delta \Pi_2 = [10 \cdot 100 + 110 \cdot 35] \cdot 0,8333 \cdot 0,5 \cdot \left(1 - \frac{18}{100}\right) \approx 1657 \text{ (тис. грн).}$$

Величина чистого прибутку  $\Delta \Pi_3$  для потенційного інвестора від можливого впровадження нашої розробки протягом третього (2023 р.) року складе:

$$\Delta \Pi_3 = [10 \cdot 100 + 110 \cdot 50] \cdot 0,8333 \cdot 0,5 \cdot \left(1 - \frac{18}{100}\right) \approx 2221 \text{ (тис. грн).}$$

Приведена вартість всіх можливих чистих прибутків ПП розраховується за формулою (в цінах на 1.12.2019 року):

$$\text{ПП} = \sum_1^t \frac{\Delta\Pi_i}{(1 + \tau)^t} \text{ [тис. грн]}, \quad (5.11)$$

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

$t$  – період часу, протягом якого виявляються результати впровадженої роботи, роки. Для нашого випадку  $t = 3$  роки;

$\tau$  – ставка дисконтування; приймемо ставку дисконтування  $\tau = 0,07$  (7%);

$t$  – період часу від моменту здійснення тих чи інших платежів (отримання прибутків та вкладення інвестицій) до моменту впровадження.

Тоді приведена вартість (в цінах на 1.12.2019 року) всіх чистих прибутків ПП, що їх може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження нашої розробки, складе:

$$\text{ПП} = \frac{1281}{(1+0,07)^2} + \frac{1657}{(1+0,07)^3} + \frac{2221}{(1+0,07)^4} \approx 1119 + 1353 + 1694 = 4166 \text{ (тис. грн)}.$$

Далі розрахуємо початкову теперішню вартість інвестицій PV, що можуть бути вкладені інвестором у випадку реалізації нашої розробки:

$$\text{PV} = (2\dots5) \times \text{ЗВ} \text{ [тис. грн]}, \quad (5.12)$$

де ЗВ – витрати на розробку; ЗВ = 73 тис. грн (див. формулу 5.9).

Тоді для нашого випадку отримаємо:

$$\text{PV} = (2\dots5) \times 73 = 5 \times 73 = 365 \text{ (тис. грн)}.$$



Тоді абсолютний ефект від можливих вкладених інвестицій  $E_{абс}$  може становити:

$$E_{абс} = ПП - PV, \quad (5.13)$$

де ПП – приведена вартість всіх можливих чистих прибутків від можливого впровадження нашої розробки, грн;

PV – теперішня вартість інвестицій  $PV = 365$  тис. грн.

$$E_{абс} = 4166 - 365 = 3801 \text{ (тис. грн)}$$

або приблизно по 1267 тис. грн щорічно протягом 3-х років.

Внутрішня норма дохідності  $E_v$  інвестицій, вкладених у комерціалізацію нашої розробки, розраховується за формулою (5.14):

$$E_v = \sqrt[T_{ж}]{1 + \frac{E_{абс}}{PV}} - 1, \quad (5.14)$$

де  $E_{абс}$  – абсолютний ефект вкладених інвестицій;  $E_{абс} = 3801$  тис. грн;

PV – теперішня вартість початкових інвестицій  $PV = 365$  тис. грн;

$T_{ж}$  – життєвий цикл розробки, роки.  $T_{ж} = 4$ .

Для нашого випадку отримаємо:

$$E_v = \sqrt[4]{1 + \frac{3801}{365}} - 1 = \sqrt[4]{1 + 10,413} - 1 = \sqrt[4]{11,413} - 1 = 1,838 - 1 \approx 0,838 \approx 83,8 \%$$

Далі визначимо ту мінімальну дохідність, нижче за яку потенційний інвестор не буде зацікавлений займатися комерціалізацією нашої розробки.

Мінімальна дохідність або мінімальна (бар'єрна) ставка дисконтування  $\tau_{мін}$  визначається за формулою (5.15):

$$\tau = d + f, \quad (5.15)$$

де  $d$  – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2019 році в Україні  $d = (0,10...0,19)$ ;

$f$  – показник, що характеризує ризикованість вкладень; зазвичай, величина  $f = (0,05...0,5)$ , але може бути і значно більше.

Для нашого випадку отримаємо:

$$\tau_{\text{мін}} = 0,15 + 0,50 = 0,65 \text{ або } \tau_{\text{мін}} = 65\%.$$

Оскільки величина  $E_B = 83,8\% > \tau_{\text{мін}} = 65\%$ , то потенційний інвестор може бути зацікавлений у комерційному впровадженні нашої розробки.

Далі розраховуємо термін окупності коштів, вкладених у нашу розробку. Термін окупності  $T_{\text{ок}}$  можна розрахувати за формулою (5.16):

$$T_{\text{ок}} = \frac{1}{E_B} \text{ [років]}. \quad (5.16)$$

Термін окупності  $T_{\text{ок}}$  коштів, вкладених у нашу розробку, становитиме:

$$T_{\text{ок}} = \frac{1}{0,838} \approx 1,193 \text{ (років)},$$

що свідчить про потенційну доцільність комерціалізації нашої розробки.

Результати виконаної економічної частини магістерської кваліфікаційної роботи зведено у табл. 5.8

Таким чином, основні техніко-економічні показники проведених досліджень та розробленого керованого за частотою генератора мікрохвильового блоку радіорелейної станції, визначені у технічному завданні, виконані.

Таблиця 5.8 – Основні техніко-економічні показники

Показники	Задані у ТЗ	Досягнуті у магістерській кваліфікаційній роботі	Висновок
1. Витрати на проведення досліджень та розробку керованого за частотою генератора мікрохвильового блоку радіорелейної станції	Не більше 80 тис. грн	73 тис. грн.	Виконано
2. Абсолютний щорічний ефект від можливого впровадження розробки, тис. грн	не менше 1200 тис. грн за рік	1267 тис. грн щорічно протягом 3-х років.	Виконано
3. Внутрішня норма дохідності вкладених інвестицій, %	не менше 65%	83,8%	Досягнуто
4. Термін окупності, роки	до 3-х років	1,193 років	Виконано

## 6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Забезпечення захисту працюючих під час трудового процесу від небезпечних та шкідливих виробничих факторів, які негативно впливають на життя, здоров'я та працездатність людини, забезпечення належних умов праці є основними аспектами безпеки життєдіяльності у виробничому середовищі.

У даному розділі наводиться розгляд шкідливих, небезпечних [28] і уражаючих для людини і оточуючого середовища факторів, що утворюються під час проведення дослідження керованого за частотою генератора мікрохвильового блоку радіорелейної станції. Тут висвітлюються, зокрема, технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення безпечної відстані від джерела електричного поля, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки при проведенні дослідження, безпека в надзвичайних ситуаціях.

### 6.1 Виробнича санітарія та гігієна праці

#### 6.1.1 Мікроклімат та склад повітря робочої зони

Визначаємо для приміщення для проведення дослідження керованого за частотою генератора мікрохвильового блоку радіорелейної станції, категорію важкості робіт за фізичним навантаженням – легка Іб.

У відповідності із [29] допустимі параметри температури, відносної вологості та швидкості руху повітря у робочій зоні для теплого та холодного періодів року наведені в табл. 6.1.

При опроміненні менше 25% поверхні тіла людини, допустима інтенсивність теплового опромінення складає  $100 \text{ Вт/м}^2$ .

Вміст шкідливих речовин в повітрі робочої зони не повинен перевищувати гранично допустимих концентрацій (ГДК) у повітрі робочої зони

і підлягає систематичному контролю з метою запобігання можливості перевищення ГДК, значення яких для роботи з ЕОМ наведено в табл. 6.2.

При використанні ЕОМ джерелом забруднення повітря є також іонізація молекул речовин, що містяться в повітрі. Рівні позитивних та негативних іонів повинні відповідати [31] та наведені у 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	Іб	20-24	17-25	75	≤0,2
Теплий		21-28	19-30	60 при 27°С	0,1-0,3

Таблиця 6.2 – ГДК шкідливих речовин [31]

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

Таблиця 6.3 – Число іонів у 1 см<sup>3</sup> 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 нормованих параметрів мікроклімату і складу повітря робочої зони передбачено такі заходи:

1) в приміщенні має бути розміщена система кондиціонування для теплового і опалення для холодних періодів року;

2) застосування вентиляції, яка видаляє забруднення або нагріте повітря з приміщення, а також за допомогою неї контролюється швидкість руху повітря і вологість.

### 6.1.2 Виробниче освітлення

З метою створення раціональних гігієнічних умов на робочих місцях великі вимоги висуваються до кількісних та якісних параметрів освітлення.

З погляду задач зорової роботи в приміщенні, в якому проводиться робота з дослідження керованого за частотою генератора мікрохвильового блоку радіорелейної станції, відповідно до [30] визначаємо, що вони відносяться до IV розряду зорових робіт. Приймаємо контраст об'єкта з фоном – середній, а характеристику фону – середню, яким відповідає підрозряд в.

Нормовані значення коефіцієнта природного освітлення (КПО) та мінімальні значення освітленості для штучного освітлення приведені в табл.6.4.

Таблиця 6.4 – Нормативні значення коефіцієнта природного освітлення 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	в	середній	середній	400	200	200	1,5	0,9

Оскільки приміщення розташоване в місті Вінниця (2-га група забезпеченості природним світлом), а вікна розташовані за азимутом 90°, то за таких обставин КЕО визначатиметься за формулою [30, 31]

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

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

$m_N$  – коефіцієнт світлового клімату;

$N$  – порядковий номер групи забезпеченості природним світлом.

Підставляючи відомі значення одержимо нормовані значення КПО для бокового та суміщеного освітлення:

$$e_{N.б} = 1,5 \cdot 0,85 = 1,28 (\%);$$

$$e_{N.с} = 0,9 \cdot 0,85 = 0,77 (\%).$$

Для встановлення нормативних значень показників освітлення передбачено:

1) при недостатньому природному освітленні в світлу пору доби доповнення штучним завдяки використанню 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 під час експлуатації пристроїв крім усього іншого обладнання використовується устаткування, робота якого супроводжується шумом та вібрацією, необхідно передбачити шумовий та вібраційний захист.

Встановлено, що приміщення, в якому проводиться робота з дослідження керованого за частотою генератора мікрохвильового блоку радіорелейної станції може містити робочі місця із шумом та вібрацією, що спричиняється вентиляторами блоку живлення ЕОМ і кулерами мікропроцесора, відеоадаптера.

З метою запобігання травмуванню працівників від дії шуму він підлягає нормуванню. Основним нормативом стосовно виробничого шуму, що діє в Україні, є [32], у відповідності з яким допустимі рівні звукового тиску, рівні звуку і еквівалентні рівні шуму на робочих місцях у промислових приміщеннях не повинні перевищувати значень, які приведені у таблиці 6.5. Норми виробничих вібрацій наведені в таблиці 6.6 для локальної вібрації.

Таблиця 6.5 – Нормовані рівні звукового тиску та еквівалентні рівні звуку

Рівні звукового тиску в дБ в октавних полосах із середньо-геометричними частотами, Гц									Рівні звуку і 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 – Нормовані рівні віброприскорення [33]

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 забезпечення допустимих показників шуму та вібрації в 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

Проведений аналіз умов праці показав, що приміщення, в якому проводиться робота з дослідження може містити електромагнітні випромінювання.



Гранично допустимі рівні електромагнітних полів наведені в табл. 6.7.

Таблиця 6.7 – Гранично допустимі значення електромагнітних полів на робочих місцях згідно [41]

Параметри та одиниці вимірю- вання	Граничні значення в діапазонах частот					
	1-10 кГц	10-60 кГц	0,06-3 МГц	3-30 МГц	30-50 МГц	50-300 МГц
$E_{ГД}$ , В/м	1000	700	500	300	80	
$E_{H_{ГД}}$ , (В/м) <sup>2</sup> ·год	120000	40000	20000	7000	800	
$H_{ГД}$ , А/м	75	57	50	–	3,0	–
$E_{H_{H_{ГД}}}$ , (А/м) <sup>2</sup> ·год	675	390	200	–	0,72	–

Для забезпечення захисту і досягнення нормованих рівнів випромінювань необхідно використовувати екранування робочого місця і скорочення часу опромінення за рахунок перерв на відпочинок.

Визначимо безпечну відстань від джерела електричного поля, якщо сила струму в провіднику (антені)  $I = 5,8$  А, а частота поля  $f = 21$  МГц. Довжина провідника (антени)  $L = 7$  м.

Біля джерела ЕМВ виділяють ближню зону (зону індукції), що знаходиться на відстані  $r \leq \lambda / 2\pi$ , і далеку зону (зону випромінювання), для якої  $r > \lambda / 2\pi$ , де  $\lambda$  – довжина хвилі, м.

Безпечну відстань від джерела електричного поля для ближньої зони можна визначити за формулою

$$E_{\text{бл}} = \frac{IL}{4\pi^2 f \epsilon r^3} \text{ [В/м]}, \quad (6.2)$$

звідки

$$r = \sqrt[3]{\frac{IL}{4\pi^2 f \varepsilon E_{\text{дл}}}} \text{ [м]}, \quad (6.3)$$

де  $E_{\text{дл}}$  – напруженість електричного поля дальньої зони, В/м;

$I$  – сила струму в провіднику (антені), А;

$L$  – довжина провідника (антени), м;

$f$  – частота електромагнітного поля, Гц;

$\varepsilon$  – діелектрична проникність середовища, Ф/м (для повітря  $\varepsilon = 1$  Ф/м).

Для діапазону частот 3...30 МГц  $E_{\text{дл}} = 300$  В/м.

Після підстановки відомих значень у формулу (6.3), одержимо:

$$r = \sqrt[3]{\frac{5,8 \cdot 7}{4 \cdot 3,14^2 \cdot 21 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 300}} = 0,00055 \text{ (м)}.$$

## 6.2 Технічні рішення з промислової та пожежної безпеки при проведенні дослідження

На теперішньому етапі розвитку техніки, автоматизації розробок та досліджень широкого використання на робочому місці набули ЕОМ. Наявність великої кількості прикладних програм сприяє тому, що ЕОМ є основним робочим інструментом інженера в галузі радіотехніки.

### 6.2.1 Безпека щодо організації робочих місць

Розміщення робочих місць, забезпечених ЕОМ здійснюється в приміщеннях з однобічним розташуванням світлових отворів, що обов'язково повинні бути обладнані сонцезахисним пристроями: шторами та жалюзями [34].

При розміщенні робочих місць у приміщеннях з джерелами небезпечних та шкідливих промислових факторів, вони зобов'язані розміщатись у абсолютно відокремлених кабінетах з природним освітленням та організованою вентиляцією. Площа, на якій розташовується одне робоче місце для обслуговуючого персоналу, повинна складати не менше  $6,0 \text{ м}^2$ , об'єм – не менше ніж  $20 \text{ м}^3$ , а висота – не менше  $3,2 \text{ м}$  [35].

Поверхня підлоги повинна бути гладкою, не слизькою, без вибоїн, зручною для вологого прибирання, мати антистатичні властивості. Забороняється використовувати для оснащення інтер'єру полімери, які забруднюють повітря шкідливими хімічними речовинами та сполуками.

#### 6.2.2 Електробезпека

Причинами ураження електричним струмом у даному приміщенні можуть бути: робота під напругою під час проведення ремонтних робіт, несправність устаткування, випадковий дотик до металевих частин, що опинилися під напругою або струмоведучих частин. У відповідності до [36] це приміщення відноситься до приміщень із підвищеною небезпекою ураження електричним струмом через наявність високої (понад 75 %) відносної вологості. Тому безпека експлуатації електрообладнання має забезпечуватись комплексом заходів, що передбачають використання ізоляції струмовідних елементів, захисних блокувань, захисного заземлення та ін [37].

#### 6.2.3 Пожежна безпека

Відповідно до [38] приміщення, в якому проводиться робота з дослідження керованого за частотою генератора мікрохвильового блоку радіорелейної станції, відноситься до категорії пожежної небезпеки В. Це приміщення відноситься до 2-го ступеня вогнестійкості, в якому приміщення знаходяться в будівлі з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних

кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону із застосуванням листових і плитних негорючих матеріалів.

Мінімальні межі вогнестійкості конструкцій приміщення, що розглядається наведені в табл.6.8. В табл.6.9 наведено протипожежні норми проектування будівель і споруд.

Таблиця 6.8 – Мінімальні межі вогнестійкості приміщення [38]

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
2	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	EI 15 M0	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M0	REI 15 M0	R 30 M0

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.

Таблиця 6.9 – Протипожежні норми проектування будівель і споруд [40]

Об'єм приміщення, тис. м <sup>3</sup>	Категорія пожежної небезпеки	Ступінь вогнестійкості	Відстань, м, для щільності людського потоку в загальному проході, осіб/м <sup>2</sup>			Кількість людей на 1 м ширини евакуиходу	Протипожежні розриви, м, для ступеня їх вогнестійкості				Найбільша кількість поверхів	Максимально допустима площа поверху, м <sup>2</sup> , для кількості поверхів		
			до 1	2-3	4-5		I,II	III	IV,V	1		2	3 і більше	
до 15	B	2	100	60	40	110	9	9	12	8	н.о.	н.о.	н.о.	

Примітки: н.о. – не обмежується.

Вибираємо, що приміщення, де проводиться робота з дослідження, має бути оснащено двома вогнегасниками, пожежним щитом, ємністю з піском [39].

### **6.3 Дослідження стійкості роботи мікрохвильового генератора в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій**

Розроблений мікрохвильовий генератор може отримати впливи від загрозливих чинників надзвичайних ситуацій техногенного, природного, військового походження. Вони наносять вплив на прилади електроніки і навіть можуть вивести з ладу. Серед НС можна виділити найбільш небезпечні: наявність у довкіллі шкідливих речовин понад ГДК, аварії зі загрозою викиду небезпечних хімічних і біологічних речовин, радіоактивне забруднення, вплив ЕМІ.

Головну небезпеку для мікрохвильового генератора становить ударна хвиля, світлове випромінювання, вторинні вражаючі фактори і радіоактивне зараження місцевості та вплив проникаючої радіації і електромагнітного імпульсу.

У мікрохвильовому генераторі використовуються такі елементи, як: мікросхеми, діоди, резистори та ін. Серед цих матеріалів найбільш чутливі до радіації транзистори, бо їм властива велика концентрація вільних носіїв. Таким чином блоки генератора можуть раптово втратити працездатність при певних рівнях радіації. Оскільки такі зміни можуть приводити до відмов електронних підсистем, значні зусилля останнім часом направляються на розробку методів, що дозволяють уникнути погіршення параметрів обладнання при опроміненні. У багатьох випадках вирішувати цю проблему доцільно шляхом створення радіаційно-стійких приладів і інтегральних схем [41].

Основні наслідки впливу опромінення на електронні пристрої – іонізація і зсув атомів. Вони викликають різні зміни в напівпровідникових приладах. 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.

Отже існує актуальна проблема розрахунку і підвищення стійкості роботи мікрохвильового генератора в умовах загрозливих чинників надзвичайних ситуацій. Тому є необхідним провести оцінку стійкості роботи мікрохвильового генератора, саме при впливах іонізуючих випромінюваннях та електромагнітному імпульсі.

### 6.3.1 Дослідження стійкості роботи мікрохвильовий генератор в умовах дії іонізуючих випромінювань

Для інженерної практики важливою є Дослідження стійкості роботи приладів при знаходженні їх на зараженій радіоактивними речовин на даній місцевості тривалістю однієї години після випадання радіоактивних речовин на даній місцевості. За критерій стійкості роботи мікрохвильового генератора в цих умовах приймається таке максимальне значення дози опромінення елементної бази ( $D_{гр}, P$ ), або граничне значення рівня радіації ( $P_{гр}, P/год$ ), при якому можуть виникати елементні зміни.

Границю стійкості роботи в цілому визначаємо про мінімальні значення допустимої дози окремого елемента, при якій в елементній базі виникають не-оборотні зміни, в даному випадку конденсатори і транзистори

$$D_{гр}, (P) = 10^4.$$

Таблиця 6.10 – Визначення максимального значення доз елементів мікрохвильового генератора

№	Елементи мікрохвильового генератора	$D_{гр}, (P)$	$D_{гр}, (P)$
1	Конденсатор WX60Q - 220 пФ $\pm 5\%$	$10^4$	$10^4$
2	Котушка BLM21 – 50 мкГн	$10^4$	
3	Резистор R-EU_R0603 – 27 Ом $\pm 5\%$	$10^5$	
4	Резистор C2 – 23 – 0,125 – 100 Ом $\pm 5\%$	$10^5$	
5	Транзистор TIP32	$10^4$	
6	Транзистор BF240/PLP	$10^4$	
7	Мікросхема LM723	$10^4$	

Знайдемо можливу дозу опромінення елементної бази за формулою:

$$D_M = \frac{2 \cdot P_{tmax} \cdot (\sqrt{t_k} - \sqrt{t_n})}{K_{noc}} [P]. \quad (6.4)$$

Для блоку БЖ можлива доза опромінення за часом напрацювання (5 років):

$$D_M^{БЖ} = \frac{2 \cdot 4,29 \cdot (\sqrt{5 \cdot 8760} - \sqrt{t_n})}{1} = 348,7(P).$$

Для блоку БУ можлива доза обраховується за часом напрацювання на відмову (4 роки):

$$D_M^{БУ} = \frac{2 \cdot 4,29 \cdot (\sqrt{5 \cdot 8760} - \sqrt{t_n})}{1} = 312,5(P).$$

Для блоку МПБ можлива доза обраховується за часом напрацювання на відмову (2 роки):

$$D_M^{МПБ} = \frac{2 \cdot 4,19 \cdot (\sqrt{5 \cdot 8760} - \sqrt{t_n})}{5} = 220,4(P).$$

Доступний час роботи в заданих умовах визначається за формулою:

$$t_{\text{доп}} = \left( \frac{D_{\text{гр}} \cdot K + 2 \cdot P_{\text{tmax}} \sqrt{t_n}}{2 \cdot P_{\text{tmax}}} \right)^2. \quad (6.5)$$

$$t_{\text{доп}}^{\text{БЖ}} = \left( \frac{10^4 \cdot 5 + 2 \cdot 4,19 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot 4,19} \right)^2 = 1354320294(\text{год});$$

$$t_{\text{доп}}^{\text{БУ}} = \left( \frac{10^4 \cdot 5 + 2 \cdot 4,19 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot 4,19} \right)^2 = 35549,8(\text{год});$$

$$t_{\text{доп}}^{\text{МПБ}} = \left( \frac{10^4 \cdot 5 + 2 \cdot 4,2 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot 4,2} \right)^2 = 3544274,4(\text{год}).$$

Оскільки умова виконується, то робота мікрохвильового генератора вважається стійкою.



### 6.3.2 Дослідження стійкості роботи мікрохвильового генератора в умовах дії електромагнітного імпульсу

За критерій стійкості роботи окремих елементів в умовах дії електромагнітних випромінювань можна прийняти коефіцієнт безпеки:

$$K_6 = 201g \frac{U_d}{U_{B(\Gamma)}}, [\text{дБ}], \quad (6.6)$$

де  $U_d$  - допустиме коливання напруги живлення, В ;

$U_{B(\Gamma)}$  - напруга наведена за рахунок електромагнітного імпульсу у вертикальних (горизонтальних) струмопровідних частинах, В.

Так для живлення використовується мережа живлення постійної напруги 5(В) , а вертикальна складова напруженості електричного поля становить,  $E_B = 9,89(\text{кВ/м})$ . То проведемо розрахунок стійкості подачі живлення.

$$E_\Gamma = 10^{-3} \cdot E_B; \quad (6.7)$$

$$E_\Gamma = 10^{-3} \cdot 9,69 = 9,69(\text{В/м}).$$

На кожній функціональній ділянці визначається максимальна довжина струмопровідної частини, як на горизонтальній, так і на вертикальній частинах:

$$I_{B1} = 1,9\text{м}; I_{B2} = 2,9\text{м}; I_{B3} = 2,3\text{м};$$

$$I_{\Gamma1} = 0,9\text{м}; I_{\Gamma2} = 1,5\text{м}; I_{\Gamma3} = 1,8\text{м}.$$

Напруга наведення в вертикальних та горизонтальних струмопровідних частинах

$$U_{B(\Gamma)} = E_{\Gamma(B)} \cdot I_{B(\Gamma)}, [\text{В}]; \quad (6.8)$$

$$\begin{aligned}
 U_{\text{В}}^{\text{ЖИВ}} &= E_{\text{Г}} \cdot I_{\text{В}} = 9,69 \cdot 1,9 = 18,41(\text{В}); \\
 U_{\text{В}}^{\text{УПР}} &= E_{\text{Г}} \cdot I_{\text{В}} = 9,69 \cdot 2,9 = 28,1(\text{В}); \\
 U_{\text{В}}^{\text{МІК}} &= E_{\text{Г}} \cdot I_{\text{В}} = 9,69 \cdot 2,3 = 22,29(\text{В}); \\
 U_{\text{В}}^{\text{ЖИВ}} &= E_{\text{Г}} \cdot I_{\text{В}} = 9690 \cdot 0,9 = 8721(\text{В}); \\
 U_{\text{В}}^{\text{УПР}} &= E_{\text{Г}} \cdot I_{\text{В}} = 9690 \cdot 1,5 = 14535(\text{В}); \\
 U_{\text{В}}^{\text{МІК}} &= E_{\text{Г}} \cdot I_{\text{В}} = 9690 \cdot 1,8 = 17442(\text{В}).
 \end{aligned}$$

Визначаємо допустиме коливання напруги живлення різних ділянок:

$$U_{\text{доп}} = U_{\text{ж}} + \frac{U_{\text{ж}}}{100} \cdot N[\text{В}], \quad (6.9)$$

де  $N$  – допустиме відхилення напруги,  $N = 5\%$

- Допустимі коливання великого кола ( $U_{\text{ж}} = 3,8 \text{ В}$ ):

$$U_{\text{доп}} = 3,8 + \frac{3,8}{100} \cdot 5 = 3,99(\text{В}),$$

- Допустиме коливання кола ( $U_{\text{ж}} = 2,2 \text{ В}$ ):

$$U_{\text{доп}} = 2,2 + \frac{2,2}{100} \cdot 5 = 2,31(\text{В}),$$

- Допустимі коливання кола управління ( $U_{\text{ж}} = 4,8$ )

$$U_{\text{доп}} = 4,8 + \frac{4,8}{100} \cdot 5 = 5,04(\text{В}).$$

Визначають коефіцієнти безпеки  $K_{\text{бі}}^{\text{В}}$ ;  $K_{\text{бі}}^{\text{Г}}$  для кожної ділянки за формулою 6.6, окремо для вертикальних і горизонтальних струмопровідних частин:

$$K_{\text{бі}}^{\text{ЖИВ}} = 20 \cdot \lg \frac{399}{18,41} = 26,7(\text{дБ}),$$

$$K_{\text{б,в}}^{\text{упр}} = 20 \cdot \lg \frac{231}{28,1} = 18,3(\text{дБ}),$$

$$K_{\text{б,в}}^{\text{мік}} = 20 \cdot \lg \frac{50,4}{22,29} = 7,1(\text{дБ}),$$

$$K_{\text{б,в}}^{\text{жив}} = 20 \cdot \lg \frac{3,99}{8721} = -66,8(\text{дБ}),$$

$$K_{\text{б,в}}^{\text{упр}} = 20 \cdot \lg \frac{2,31}{14535} = -76(\text{дБ}),$$

$$K_{\text{б,в}}^{\text{мік}} = 20 \cdot \lg \frac{5,04}{17442} = -70,8(\text{дБ}),$$

Зведемо отримані результати в табл. 6.11.

Таблиця 6.11 – Результат обчислення коефіцієнтів безпеки в умовах дії ЕМІ

Напруга живлення	$I_{\Gamma}$	$I_{\text{в}}$	$K_{\text{б,в,дБ}}$	$K_{\text{бг,дБ}}$	Стійкість
Силове коло 3,8(В)	0,9	1,9	26,7	-66,8	нестійка
Силове коло 2,2 (В)	1,5	2,9	18,3	-76	нестійка
Коло управління 7.5(В)	1,8	2,3	7,1	-70,8	нестійка

Так як для мереж живлення  $K_{\text{бв}} \leq 40$  і  $K_{\text{бг}} \leq 40$ , то можна зробити висновки, що мікрохвильовий генератор не є стійким до дії електромагнітного імпульсу. Для підвищення стійкості роботи мікрохвильового генератора слід застосувати пасивний екран.

6.3.3 Розробка заходів по підвищенню стійкості роботи мікрохвильового генератора до дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій.

Щоб визначити якої товщини необхідно застосувати екран, знайдемо необхідне перехідне гасіння екрану:

$$A = 40 - K_{\text{бмін}}, [\text{дБ}],$$

$$A = 40 + 66,8 = 106,8(\text{дБ}),$$

$$A = 40 + 76 = 116(\text{дБ}),$$

$$A = 40 + 70,8 = 110,8(\text{дБ}).$$

Розрахуємо товщину захисного екрану:

$$t = \frac{A}{1,03 \cdot \sqrt{f}} [\text{см}], \quad (6.10)$$

де  $A$  – перехідне затування екрану, дБ;

$f$  – найбільш характерна частота, (15 кГц).

$$t_1 = \frac{106,8}{5,2 \cdot \sqrt{1500}} = 0,3(\text{см});$$

$$t_2 = \frac{116}{5,2 \cdot \sqrt{1500}} = 0,12(\text{см});$$

$$t_3 = \frac{110,8}{5,2 \cdot \sqrt{1500}} = 0,2(\text{см}).$$

Отже, для підвищення безпеки роботи мікрохвильового генератора в умовах дії загрозливих чинників було здійснено розрахунок екрану товщина якого має становити не менше 2 мм.

Таким чином нами встановлено, що робота мікрохвильового генератора в умовах дії іонізуючих випромінювань та електромагнітного імпульсу буде стійкою, якщо граничне значення рівня радіації в умовах експлуатації не перевищуватиме  $6,65 \cdot 10^4$  Р/с. Для підвищення стійкості роботи мікрохвильового генератора в умовах дії ЕМІ було здійснено розрахунок екрану товщина якого має становити не менше 2 мм.

#### **6.4 Висновки до розділу**

Під час написання цього розділу було опрацьовано такі питання охорони праці і безпеки в надзвичайних ситуаціях, як технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення безпечної відстані від джерела електричного поля, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки під час проведення дослідження керованого за частотою генератора мікрохвильового блоку радіорелейної станції, безпека у надзвичайних ситуаціях.

ВНТУ ФІРЕН  
ТКСТЬ МКР 2019

## ВИСНОВКИ

Під час дипломного проектування на підставі проведеного огляду літератури була обрана хвилеводна конструкція генератора з послідовним включенням по НВЧ діода Ганна і варактора, яка забезпечує необхідний діапазон електричного управління частотою. На основі іноземної літератури було проведено порівняння ціни розробленого генератора на діоді Ганна з іноземним генератором.

Проектування генератора проводилося за допомогою еквівалентної схеми та програмного забезпечення в середовищах MATHCAD 15.0. Розглянуто техніко-економічне обґрунтування проекту, охорони праці та цивільного захисту. На підставі цього було доведено доцільність даного проекту.

Спроектований генератор на діоді Ганна має досить просту конструкцію, порівняно низьку ціну і може використовуватися в таких областях, як радіотехнічні системи та комплекси, системи службового радіозв'язку.

Конструкція генератора, побудованого за схемою "дисковий резонатор в закритичному хвилеводі" являє собою хвилеводну вставку, з одного боку якої підключається вихідний хвилевід перетином  $23 \cdot 10 \text{ мм}^2$ , а з іншого - рухливий короткозамикачем, що забезпечує налаштування контуру першої гармоніки пристрою на максимум вихідної потужності. Вставка складається з двох половин, що дозволяє монтувати діод Ганна, варактор та їх вводи живлення. Перетин вихідного хвилеводу автогенератора на діоді Ганна вибраний таким чином, щоб він був поза межним для НВЧ-коливань основної частоти. У цьому випадку ці коливання будуть локалізовані в системі: діод Ганна, дисковий резонатор, варактор, його вводи живлення, а хвилевід буде являти собою для них деяку індуктивність.

Труднощі моделювання мікрохвильових пристроїв за допомогою відомих пакетів прикладних програм пов'язані з тим, що ці пристрої мають розподілені параметри, пов'язані складними залежностями з конструктивними розмірами елементів пристрою. Тому для визначення конструктивних розмірів потрібно

вирішувати чисельними методами досить складні рівняння, що не завжди виправдано в рамках відомих пакетів прикладних програм. У магістерській кваліфікаційній роботі моделювання диференційної провідності діода Ганна виконано на основі його математичної моделі у пакеті MATHCAD 15.0.

У магістерській кваліфікаційній роботі було здійснено економічні розрахунки проведених досліджень. Отримано такі техніко-економічні показники розробки: 1) витрати на проведення досліджень та розробку керованого за частотою генератора мікрохвильового блоку радіорелейної станції становлять 73 тис. грн.; 2) абсолютний щорічний ефект від можливого впровадження розробки 1267 тис. грн. щорічно протягом 3-х років; 3) Внутрішня норма дохідності вкладених інвестицій 83,8 %; 4) Термін окупності 1,193 роки. Основні техніко-економічні показники проведених досліджень та розробленого керованого за частотою генератора мікрохвильового блоку радіорелейної станції, визначені у технічному завданні, виконані, що свідчить про потенційну доцільність комерціалізації цієї розробки.

Під час написання розділу Охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях було опрацьовано такі питання охорони праці і безпеки в надзвичайних ситуаціях, як технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення безпечної відстані від джерела електричного поля, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки під час проведення дослідження керованого за частотою генератора мікрохвильового блоку радіорелейної станції, безпека у надзвичайних ситуаціях.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Левенштейн М.Е., Пожела Ю.К., Шур М.С. Эффект Ганна. М., Сов. Радио, 1975.
2. Туннельные явления в твердых телах. Глава 22, издательство “Мир” 2003. – 534 с.
3. Осадчук В.С. Основи функціональної мікроелектроніки. Навчальний посібник. / В.: ВДТУ, 1998 – 245 с. Укр. Мовою
4. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Фізична наноелектроніка. –Вінниця: ВНТУ, 2015. – 146 с.
5. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Основи наноелектроніки. –Вінниця: ВНТУ, 2016. – 199 с.
6. Кононов С. П., Дячок В. О., Огородник О. С., Костін І. І. Конструкції керування за частотою мікрохвильових генераторів на основі діодів Ганна. Матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2019)», 14-16 листопада 2019 року, м. Вінниця. Вінниця: ВНТУ, 2019. С. 106-107.
7. Кононов С. П., Костін І. І., Огородник О. С., Дячок В. О. Математична модель модального керування рухом безпілотного літального апарату. Матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2019)», 14-16 листопада 2019 року, м. Вінниця. Вінниця: ВНТУ, 2019. С. 108-109.
8. Михалевський Д. В., Огородник О. С., Дячок В. О., Костін І. І. Застосування спіральних антен в обладнанні радіоподовження. Матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2019)», 14-16 листопада 2019 року, м. Вінниця. Вінниця: ВНТУ, 2019. С. 115-116.
9. Перспективы использования твёрдотельных активных устройств крайне-высоких частот. Изв. вузов. сер. Радиоэлектроника. 1993. №10.



10. Малышев В.А. Бортовые активные устройства сверхвысоких частот. Л. Судостроение, 1990.
11. Малышев В.А. Теория разогретых нелинейностей плазмы твёрдого тела. Ростов-на-Дону: Изд. Рост. унив-та. 1979.
12. Муравьёв В.В., Шалашонин В.И. Методики улучшения параметров диодов Ганна. Изв. вузов сер. Радиоэлектроника, №11, 1993.
13. Махнов Б.К., Дзень И.А. Диоды Ганна с гетероструктурой GaAs/AlGaAs. Изв. вузов сер. Радиоэлектроника, №10, 1992.
14. Царапкин Д.П. Генератор СВЧ на диодах Ганна. М. Радио и связь 1982.
15. Аспшоненко И.А., Моторненко А.П. Генератор Ганна с широкой полосой перестройки частоты // Изв. ВУЗов, сер. Радиоэлектроника №5, 1992.
16. Тараненко В.П., Коцержинский Б.Л., Малусский Е.А. Твердотельные генераторы СВЧ колебаний миллиметрового диапазона радиоволн // Изв. ВУЗов, сер. Радиоэлектроника. №10 1978 г.
17. Архипов А.В., Майстренко Ю.В. Частотные флуктуации электрически перестраиваемого генератора на диоде Ганна миллиметрового диапазона. Харьков, ИРЭ АН УССР, 1989.
18. Березин и др. Электронные приборы СВЧ. – М. Высшая школа 1985.
19. Метрология, стандартизация и измерения в технике связи: Учеб. пособие для вузов /Под ред. Б.П. Хромого. – М.: Радио и связь, 2006.
20. Зикий А.Н. Стабильность частоты генераторов СВЧ. Учебное пособие. Таганрог. ТТИ ЮФУ, 2008, – 82 с.
21. Давыдова Н.С., Данюшевский Ю.З. Диодные генераторы и усилители СВЧ. – М.: Радио и связь, 1986. – 184 с.
22. Алексеев Ю.И. и др. Методические указания по выполнению курсового проекта по курсу «Радиопередающие устройства». Ч.2. Проектирование генераторов на диодах Ганна. – Таганрог: ТРТИ, 1985. – 53с.
23. Проектирование радиопередатчиков: Учебное пособие для вузов; под ред. В.В. Шахгильдяна. – 4-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 2000. – 656с.

24. Проектирование радиопередающих устройств СВЧ: Учебное пособие для вузов; под ред. Г.М. Уткина. – М.: Советское радио, 1979. – 320с.
25. Коган В.И. СВЧ полупроводниковые радиопередатчики. – М.: Радио и связь, 1981. – 400с.
26. Методичні рекомендації з комерціалізації розробок, створених в результаті науково-технічної діяльності – К.: Наказ Державного комітету України з питань науки, інновацій та інформатики (Лист № 1/06-4-97 від 13.09.2010 р.).
27. Козловський В. О. Методичні вказівки до виконання студентами-магістрантами економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт. – Вінниця: ВНТУ, 2012.
28. ГОСТ 12.0.003-74. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
29. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
30. ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення.
31. Пособие по расчету и проектированию, естественного, искусственного и совмещенного освещения НИИСФ – М.: Стройиздат. 1985. – 384 с.
32. ДСН 3.3.6-037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
33. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої та загальної вібрацій.
34. ГОСТ 12.2.032-78. ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
35. Методичні вказівки до опрацювання розділу "Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях" в дипломних проектах і роботах студентів спеціальностей, що пов'язані з функціональною електронікою, автоматизацією та управлінням / Уклад. О. В. Березюк, М. С. Лемешев. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 64 с.
36. ДНАОП 0.00-1.21-98 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. – К. : Держнагляд охорони праці, 1998. – 382 с.

- 37.ДБН В.2.5-27-2006. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд.
- 38.ДБН В.1.1.7-2002. Пожежна безпека об'єктів будівництва.
- 39.НАПБ Б.03.001-2004. Типові норми належності вогнегасників.
- 40.СНиП 2.09.02-85. Противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений.
- 41.ДСанПіН 3.3.6-096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів.

ВНТУ ФІРЕН  
ТКСТЬ МКР 2019

ДОДАТКИ

ВНТУ ФІРМЕН  
ТКСТЬ МКР 2019

Додаток А  
(обов'язковий)  
ВНТУ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав.кафедри ТКСТБ ВНТУ,  
канд. техн. наук, професор  
Г.Г.Бортник

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2019 р.

**ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ**  
на виконання магістерської кваліфікаційної роботи  
**КЕРОВАНІЙ ЗА ЧАСТОТОЮ ГЕНЕРАТОР МІКРОХВИЛЬОВОГО**  
**БЛОКУ РАДІОРЕЛЕЙНОЇ СТАНЦІЇ**

08-34.МКР.003.00.000 ТЗ

Керівник роботи

к.т.н., доц. кафедри ТКСТБ ВНТУ

Кононов С.П.

Виконавець: ст. гр. АРЗ-18м

Дячок В.О.

## 1 ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Робота проводиться на підставі наказу ректора по Вінницькому національному технічному університету від “02” 10 2019 року № 254 та індивідуального завдання на магістерську кваліфікаційну роботу.

Дата початку роботи: 02.09.2019 р.

Дата закінчення: 09.12.2019 р.

## 2 МЕТА І ПРИЗНАЧЕННЯ МКР

*Метою роботи* є розроблення, теоретичне та модельне дослідження мікрохвильового генератора з електронним керуванням частоти діапазону 15 ГГц.

*Задачами магістерської кваліфікаційної роботи є:*

- аналіз теоретичних відомостей про генератори мікрохвильового діапазону на діоді Ганна;
- огляд частотних діапазонів генераторів мікрохвильового діапазону на діоді Ганна;
- теоретичні дослідження мікрохвильової провідності діодів Ганна;
- розробка конструкції генератора мікрохвильового діапазону на діоді Ганна;
- проведення розрахунків економічної частини та розділу охорони праці.

*Об'єктом дослідження* є процеси перетворення енергії постійного струму в незатухаючі в часі електричні коливання мікрохвильового діапазону частот.

*Предметом дослідження* є електричні параметри і характеристики генератора мікрохвильового діапазону частот на основі діода Ганна.

*Основними завданнями роботи є:*

- техніко-економічне обґрунтування доцільності даної розробки;
- аналіз і теоретичні дослідження режимів роботи діоду Ганна;
- розроблення конструкції керованого за частотою генератора мікрохвильового блоку радіорелейної станції;
- модельне дослідження мікрохвильової провідності діоду Ганна;

- розроблення електричної схеми та розрахунок параметрів радіоелементів керованого за частотою генератора мікрохвильового блоку радіорелейної станції;
- дослідження питань безпеки життєдіяльності.

Розроблений в ході виконання радіоподовжувач може бути використаний в якості радіомодема. При підключенні модему комп'ютера до телефонної лінії через радіоподовжувач максимальна швидкість досягає 21 Мбіт/с (при хороших умовах зв'язку). Середня швидкість на рівні 12 ... 16 Мбіт/с..

### 3 ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ МКР

Робота базується на результатах курсової роботи “Дослідження мікрохвильових радіотехнічних пристроїв на основі діода Ганна”, яка виконувалась у ВНТУ у 2017/2018 н.р. Під час підготовки магістерської кваліфікаційної роботи будуть використані матеріали цієї курсової роботи.

Список використаних джерел розробки:

3.1 Осадчук В.С. Основи функціональної мікроелектроніки. Навчальний посібник. Вінниця: ВДТУ, 1998 – 245 с. Укр. Мовою

3.2 Осадчук В.С., Осадчук О.В. Фізична наноелектроніка. – Вінниця: ВНТУ, 2015. – 146 с.

3.3 Осадчук В.С., Осадчук О.В. Основи наноелектроніки. –Вінниця: ВНТУ, 2016. – 199 с.

3.4 Давыдова Н.С., Данюшевский Ю.З. Диодные генераторы и усилители СВЧ. – М.: Радио и связь, 1986. – 184 с.

3.5 Положення про кваліфікаційну роботу у Вінницькому національному технічному університеті / Уклад. О. Н. Романюк, Р. Р. Обертюх, Т. О. Савчук, Л. П. Громова – Вінниця : ВНТУ, 2015 – 27 с.

3.6 Кухарчук В.В., Ігнатенко О.Г., Обертюх Р.Р. Методичні вказівки до оформлення дипломних проєктів (робіт) для студентів всіх спеціальностей.- В.: ВДТУ, 2002.

3.7 Козловський В.О. Техніко-економічні обґрунтування та економічні розрахунки в дипломних проектах та роботах. Навчальний посібник. – В.: ВДТУ, 2003.

3.8 ДСТУ 3008-2015. Інформація та документація, звіти у сфері науки і техніки.- К.: ДП «УкрНДНЦ», 2016.

3.9 Разработка и оформление конструкторской документации радиоэлектронной аппаратуры. Справочник. Под ред. Э.Т.Романычевой. - М: Радио и связь, 1989.

3.10 Бортник Г.Г., Васильківський М.В. Методичні вказівки до підготовки магістерських кваліфікаційних робіт для студентів спеціальності «Телекомунікації та радіотехніка» усіх форм навчання. - Вінниця:ВНТУ, 2018.- 50 с.

#### 4 ВИКОНАВЕЦЬ

Вінницький національний технічний університет, кафедра телекомунікаційних систем та телебачення, студент групи АРЗ-18м Дячок В.О.

#### 5 ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ МКР

Пропонується виконати дослідження методу підвищення точності широкосмугових імпульсно-кодових модуляторів

Технічні вимоги, яким повинна відповідати розробка, наступні:

- робоча частота 15 ГГц;
- діапазон електричного керування частотою 175 МГц;
- перепад вихідної потужності в діапазоні управління: менш 1,5 дБ.
- робоча напруга 7 В і резонансний опір 8 Ом;
- добротність ненавантаженого коливного контуру 150;
- тип фідера - прямокутний хвилевід перерізом  $23 \times 10 \text{ мм}^2$ ;
- відношення сигнал/шум – не нижче 60 дБ;
- коефіцієнт стоячої хвилі у фідері – не більше 1,1;
- поляризація електромагнітних хвиль – лінійна, вертикальна.



При розробці мікрохвильового пристрою для Wi-Fi радіоподовження слід максимально використовувати стандартні та уніфіковані деталі.

## 6 ЕТАПИ МКР І ТЕРМІНИ ЇХ ВИКОНАННЯ

№	Назва та зміст етапу	Термін виконання		Очікувані результати	Звітна документація
		початок	закінчення		
1.	Розробка технічного завдання (ТЗ)	02.09.2019р.	06.09.2019р.	Розроблене ТЗ	Додаток А
2.	Техніко-економічне обґрунтування розробки (ТЕО)	09.09.2019р.	13.09.2019р.	Розроблене ТЕО	Вступ.
3.	Теоретичні відомості про генератори та підсилювачі мікрохвильового діапазону на діодах Ганна	16.09.2019р.	04.10.2019р.	Проведений аналіз, елементи теорії	Розділ 1. Розділ 2
4.	Дослідження мікрохвильової провідності діодів Ганна	07.10.2019р.	25.10.2019р.	Результати модельних досліджень	Розділ 3
5.	Електричні розрахунки керованого за частотою генератора мікрохвильового блоку радіорелейної станції	28.10.2019р.	08.11.2019р.	Електрична схема та конструкція генератора на діоді Ганна	Розділ 4
6.	Аналіз економічної ефективності	11.11.2019р.	15.11.2019р.	Економічна частина МКР	Розділ 5
7.	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	18.11.2019р.	22.11.2019р.	Частина ОТ та БНС	Розділ 6
8.	Оформлення пояснювальної записки (ПЗ) та графічної частини	25.11.2019р.	29.11.2019р.	Оформлена документація	ПЗ та графічна частина
9.	Нормоконтроль, попередній захист, рецензування МКР	02.12. 2019р.	06.12.2019р.	Позитивні відзиви	Відзив. рецензія
10.	Захист МКР ЕК		09.12. 2019р.	Позитивний захист	Протокол ЕК

## 7 ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОРЯДОК РЕАЛІЗАЦІЇ МКР

В результаті виконання роботи будуть розроблені:

- конструкція керованого за частотою генератора мікрохвильового блоку радіорелейної станції;
- електрична схема керованого за частотою генератора мікрохвильового блоку радіорелейної станції;
- економічна частина МКР;
- розділ ОП та БНС;
- рекомендації щодо подальшого використання розробленого ІКМ.

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

- Регіональний Центр експлуатації телекомунікаційної мережі України шляхом впровадження широкосмугового ІКМ;
- ПАТ “Укртелеком” шляхом впровадження нових керованих за частотою генераторів мікрохвильового блоку радіорелейної станції.

Очікуваний техніко-економічний ефект. При впровадженні результатів досліджень очікується збільшення дальності зв'язку та підвищення швидкості передачі інформації.

## 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:

- креслення конструкції керованого за частотою генератора мікрохвильового блоку радіорелейної станції;
- електрична схема керованого за частотою генератора мікрохвильового блоку радіорелейної станції;
- нові результати комп'ютерного математичного моделювання мікрохвильової провідності діоду Ганна;
- економічну частину та розділ БЖД і ЦЗ;
- рекомендації щодо подальшого використання приладу.

## 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)

Режими роботи діода Ганна  
Плакат

ВНТУ ФІРЕН  
ТКСТЬ МКР 2019

Додаток В  
(обов'язковий)

Конструкція мікрохвильового керованого  
за частотою генератора на діоді Ганна  
Плакат

Додаток Д  
(обов'язковий)

Електрична схема мікрохвильового керованого  
за частотою генератора на діоді Ганна  
Плакат

Додаток Е  
(обов'язковий)

Результати модельного дослідження  
мікрохвильової провідності діоду Ганна

Плакат

ВНТУ ФІЗИКЕН  
ТКСТЬ МКР 2019

Додаток Ж  
(обов'язковий)

Будова мікрохвильових генераторів на діодах Ганна

Плакат

ВНТУ ФІЗИКА  
ТКСТЬ МКР 2019



Додаток К  
(обов'язковий)

Діапазонні властивості мікрохвильового  
генератора на діоді Ганна  
Плакат

ВНТУ ФІЗИКЕН  
ТКСТЬ МКР 2019

Додаток Л  
(довідниковий)

Програма розрахунку мікрохвильової провідності структури Діода Ганна

Исходные параметры

$$\begin{aligned}
 K &:= 1.38 \cdot 10^{-23} & q &:= 1.602 \cdot 10^{-19} & T &:= 300 & \mu_0 &:= 0.8 & P &:= 0.1 & m &:= 9.1 \cdot 10^{-31} \\
 t &:= 0.07 \cdot \mu_0 \cdot \frac{m}{q} & D &:= \mu_0 \cdot K \cdot \frac{T}{q} & \tau &:= 8 \cdot 10^{-12} & E_p &:= 3.5 \cdot 10^5 & C &:= (P + 1) \cdot (P)^{-1} \\
 N_0 &:= 8 \cdot 10^{21} & \chi &:= \left( \frac{t}{\tau} \right) & S &:= 10^{-8} & L &:= 4 \cdot 10^{-6} & \epsilon_a &:= 12.5 & \epsilon_0 &:= 8.85 \cdot 10^{-12} \\
 & & & & & & & & \epsilon &:= \epsilon_0 \cdot \epsilon_a
 \end{aligned}$$

Расчетные соотношения

$$D(z) := D \cdot (1 + C \cdot z^2) \cdot (1 + z^2)^{-2} \quad \rho_0 := N_0 \cdot q \quad U_p := L \cdot E_p \quad \mu_{pl}(z) := \frac{\mu_0}{1 + z^2}$$

$$U_0(z) := \frac{\mu_0 \cdot z \cdot E_p}{(1 + z^2)} \quad \omega(a) := 2 \cdot \pi \cdot a \quad y(a) := \omega(a) \cdot \tau$$

$$\mu_{al}(a, z) := \frac{\mu_{pl}(z) \cdot [1 - z^4 + y(a)^2 \cdot [1 - \chi \cdot (1 + z^2)] \cdot \chi \cdot z^2 + 1]}{[y(a)^2 + (1 + z^2)^2] \cdot (y(a)^2 \cdot \chi^2 + 1)}$$

$$\mu_{rl}(a, z) := \mu_{pl}(z) \cdot \frac{y(a) \cdot [2 \cdot z^2 - \chi \cdot [1 + z^2 + y(a)^2 \cdot (1 - \chi \cdot z^2)]]}{[y(a)^2 + (1 + z^2)^2] \cdot (y(a)^2 \cdot \chi^2 + 1)}$$

$$v_a(a, z) := \frac{z^2 \cdot (1 + z^2) + \frac{y(a)^2 + (1 + z^2)^2}{(2 \cdot y(a))^2 + (1 + z^2)^2} \cdot [z^2 \cdot (1.75 + 2.5 \cdot z^2) - (0.75 + 2 \cdot y(a)^2)]}{[z^4 - (1 + y(a))^2]}$$

$$\mu_a(a, x1, z) := \mu_{al}(a, z) \cdot (1 - v_a(a, z) \cdot x1^2)$$

$$\sigma_a(a, x1, z) := \rho_0 \cdot \mu_a(a, x1, z)$$

$$v_r(a, z) := \frac{4 \cdot (z^4 - 1) - 9 \cdot [(1 + z^2)^2 + y(a)^2] + \frac{13 \cdot (1 + z^2)^2 \cdot [y(a)^2 + (1 + z^2)^2]}{(2 \cdot y(a))^2 + (1 + z^2)^2}}{16 \cdot y(a)^2}$$

$$\mu_r(a, x1, z) := \mu_{rl}(a, z) \cdot (1 - v_r(a, z) \cdot x1^2)$$

$$\sigma_r(a, x1, z) := \rho_0 \cdot \mu_r(a, x1, z)$$

$$\alpha_0(a, x_1, z) := -\frac{\sigma a(a, x_1, z)}{\varepsilon \cdot U_0(z)}$$

$$\beta_0(a, x_1, z) := \frac{\omega(a)}{U_0(z)} + \frac{\sigma r(a, x_1, z)}{\varepsilon \cdot U_0(z)}$$

$$m(a, x_1, z) := 1 - 4 \cdot D(z) \cdot \frac{\alpha_0(a, x_1, z)}{U_0(z)}$$

$$n(a, x_1, z) := \frac{4 \cdot D(z) \cdot \beta_0(a, x_1, z)}{U_0(z)}$$

$$a_1(a, x_1, z) := \frac{U_0(z)}{2 \cdot D(z)} \cdot \left( 1 - \sqrt{\frac{\sqrt{m(a, x_1, z)^2 + n(a, x_1, z)^2} + m(a, x_1, z)}{2}} \right)$$

$$a_2(a, x_1, z) := \frac{U_0(z)}{2 \cdot D(z)} \cdot \left( 1 + \sqrt{\frac{\sqrt{m(a, x_1, z)^2 + n(a, x_1, z)^2} + m(a, x_1, z)}{2}} \right)$$

$$b_1(a, x_1, z) := \frac{U_0(z)}{2 \cdot D(z)} \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{m(a, x_1, z)^2 + n(a, x_1, z)^2} - m(a, x_1, z)}{2}}$$

$$b_2(a, x_1, z) := -\left( \frac{U_0(z)}{2 \cdot D(z)} \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{m(a, x_1, z)^2 + n(a, x_1, z)^2} - m(a, x_1, z)}{2}} \right)$$

$$\gamma_1(a, x_1, z) := a_1(a, x_1, z) - b_1(a, x_1, z) \cdot i \quad \gamma_2(a, x_1, z) := a_2(a, x_1, z) - b_2(a, x_1, z) \cdot i$$

$$\text{Geo}_1(a, x_1, z) := \text{Re} \left[ \frac{S}{L} \left[ \sigma a(a, x_1, z) + i \cdot \sigma r(a, x_1, z) + \frac{i \cdot \omega(a) \cdot \varepsilon \cdot (e^{\gamma_2(a, x_1, z) \cdot L} - 1) \cdot (1 - e^{\gamma_1(a, x_1, z) \cdot L})}{L \cdot (e^{\gamma_2(a, x_1, z) \cdot L} - e^{\gamma_1(a, x_1, z) \cdot L})} \cdot \frac{\gamma_1(a, x_1, z) - \gamma_2(a, x_1, z)}{\gamma_1(a, x_1, z) \cdot \gamma_2(a, x_1, z)} \right] \right]$$

$$\text{Beo}_1(a, x_1, z) := \text{Im} \left[ \frac{S}{L} \left[ \sigma a(a, x_1, z) + i \cdot \sigma r(a, x_1, z) + \frac{i \cdot \omega(a) \cdot \varepsilon \cdot (e^{\gamma_2(a, x_1, z) \cdot L} - 1) \cdot (1 - e^{\gamma_1(a, x_1, z) \cdot L})}{L \cdot (e^{\gamma_2(a, x_1, z) \cdot L} - e^{\gamma_1(a, x_1, z) \cdot L})} \cdot \left( \frac{\gamma_1(a, x_1, z) - \gamma_2(a, x_1, z)}{\gamma_1(a, x_1, z) \cdot \gamma_2(a, x_1, z)} \right) \right] \right]$$

$$\text{Geo}(a, x_1, z) := \text{Re} \left[ \frac{S}{L} \left[ \sigma a(a, x_1, z) + i \cdot \sigma r(a, x_1, z) + i \cdot \omega(a) \cdot \frac{\varepsilon}{\sigma a(a, x_1, z) + i \cdot \sigma r(a, x_1, z) + i \cdot \omega(a) \cdot \varepsilon} \cdot \frac{L}{S} \cdot (\text{Geo}_1(a, x_1, z) + i \cdot \text{Beo}_1(a, x_1, z)) \right] \right]$$

$$\text{Beo}(a, x_1, z) := \text{Im} \left[ \frac{S}{L} \left[ \sigma a(a, x_1, z) + i \cdot \sigma r(a, x_1, z) + i \cdot \omega(a) \cdot \frac{\varepsilon}{\sigma a(a, x_1, z) + i \cdot \sigma r(a, x_1, z) + i \cdot \omega(a) \cdot \varepsilon} \cdot \frac{L}{S} \cdot (\text{Geo}_1(a, x_1, z) + i \cdot \text{Beo}_1(a, x_1, z)) \right] \right]$$

$$a := 35000 \cdot 10^6$$

$$U := 0, 0.04 \dots 0.6$$

$$\text{Geo}_{1,3,4}(U) := \text{Geo}_1 \left( a, \frac{U}{U_p}, \frac{3.4}{U_p} \right)$$

$$\text{Beo}_{1,3,4}(U) := \text{Beo}_1 \left( a, \frac{U}{U_p}, \frac{3.4}{U_p} \right)$$

$$\text{Geo}_{1,3,6}(U) := \text{Geo}_1 \left( a, \frac{U}{U_p}, \frac{3.6}{U_p} \right)$$

$$\text{Beo}_{1,3,6}(U) := \text{Beo}_1 \left( a, \frac{U}{U_p}, \frac{3.6}{U_p} \right)$$

$$\text{Geo}_{1,3,2}(U) := \text{Geo}_1 \left( a, \frac{U}{U_p}, \frac{3.2}{U_p} \right)$$

$$\text{Beo}_{1,3,2}(U) := \text{Beo}_1 \left( a, \frac{U}{U_p}, \frac{3.2}{U_p} \right)$$

$$\text{Geo}_{1,3,0}(U) := \text{Geo}_1 \left( a, \frac{U}{U_p}, \frac{3.0}{U_p} \right)$$

$$\text{Beo}_{1,3,0}(U) := \text{Beo}_1 \left( a, \frac{U}{U_p}, \frac{3.0}{U_p} \right)$$

$$P(a, x_1, z) := -\text{Geo}_1(a, x_1, z) \cdot \frac{(x_1 \cdot U_p)^2}{2}$$

$$P1(U) := P\left(a, \frac{U}{U_p}, \frac{3.4}{U_p}\right) \quad P3(U) := P\left(a, \frac{U}{U_p}, \frac{3.6}{U_p}\right) \quad P5(U) := P\left(a, \frac{U}{U_p}, \frac{3.2}{U_p}\right)$$

$$P7(U) := P\left(a, \frac{U}{U_p}, \frac{3.0}{U_p}\right)$$

$$U := 0.4$$

$$a := 30 \cdot 10^9, 31 \cdot 10^9 \dots 70 \cdot 10^9$$

$$\underline{\text{Geo1}_{3,4}(a)} := \text{Geo1}\left(a, \frac{U}{U_p}, \frac{3.4}{U_p}\right)$$

$$\underline{\text{Beo1}_{3,4}(a)} := \text{Beo1}\left(a, \frac{U}{U_p}, \frac{3.4}{U_p}\right)$$

$$\underline{\text{Geo1}_{3,6}(a)} := \text{Geo1}\left(a, \frac{U}{U_p}, \frac{3.6}{U_p}\right)$$

$$\underline{\text{Beo1}_{3,6}(a)} := \text{Beo1}\left(a, \frac{U}{U_p}, \frac{3.6}{U_p}\right)$$

$$\underline{\text{Geo1}_{3,2}(a)} := \text{Geo1}\left(a, \frac{U}{U_p}, \frac{3.2}{U_p}\right)$$

$$\underline{\text{Beo1}_{3,2}(a)} := \text{Beo1}\left(a, \frac{U}{U_p}, \frac{3.2}{U_p}\right)$$

$$\underline{\text{Geo1}_{3,0}(a)} := \text{Geo1}\left(a, \frac{U}{U_p}, \frac{3.0}{U_p}\right)$$

$$\underline{\text{Beo1}_{3,0}(a)} := \text{Beo1}\left(a, \frac{U}{U_p}, \frac{3.0}{U_p}\right)$$