

Вінницький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра радіотехніки

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

**Пояснювальна записка
до магістерської кваліфікаційної роботи**

«Магістр»

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

**на тему: РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ
ОПТИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ**

**Виконав: студент 2-го курсу, групи РТ-18м
спеціальності 172 – Телекомунікації та
радіотехніка Освітня програма: Радіотехніка**

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Швець І. М.

(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., професор каф. РТ

Осадчук В.С.

(прізвище та ініціали)

« » _____ 2019 р.

Рецензент: асистент каф. ТКСТБ

Макогон В. І.

(прізвище та ініціали)

« » _____ 2019 р.

Вінниця ВНТУ - 2019 рік

Вінницький національний технічний університет

Факультет Інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем

Кафедра Радіотехніки

Освітньо-кваліфікаційний рівень Магістр

Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри РТ

д.т.н., професор О.В. Осадчук

“ ___ ” _____ 2019 року

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

Швець Ігорю Михайловичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Радіовимірвальний пристрій для визначення оптичної потужності»

керівник роботи Осадчук Володимир Степанович, д.т.н., професор

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ ___ ” _____ 2019 року № _____

2. Строк подання студентом роботи 17 грудня 2019 року

3. Вихідні дані до роботи: напруга живлення від 4.5-12В, струм споживання від 1,5-25мА; діапазона вимірювання оптичної потужності від 300 мВт до 600 мВт; вихідна частота від 0,45 МГц до 2,7 МГц; температурний діапазон від 0 до+50⁰.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): аналіз сучасних радіовимірвальних пристроїв для визначення потужності оптичного випромінювання; теоретичні основи піроелектричного ефекту; розробка математичної моделі радіовимірвального пристрою для визначення оптичної потужності; експериментальне дослідження радіовимірвального пристрою для визначення оптичної потужності; економічна частина, безпека життєдіяльності; висновки; перелік посилань; додатки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): структурна схема пристрою; схема оптичного перетворювача фізичних величин; схема однокристалльної та двокристалльної системи; схема електрична принципова; електрична схема радіовимірвального перетворювача оптичної потужності; блок–схема методики проведення вимірювань потужності оптичного випромінювання.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	д.т.н., професор Осадчук В. С.		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	к.т.н., доцент Березюк О. В.		
Економічна частина	к.т.н., доцент Адлер О. О.		

7. Дата видачі завдання 23 вересня 2019 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	П ри- мітка
1.	Огляд літературних джерел. Вибір та узгодження теми МКР	02.09.2019-15.09.2019	
2.	Аналіз літературних джерел. Попередня розробка основних розділів	16.09.2019-22.09.2019	
3.	Розробка технічного завдання	23.09.2019-25.09.2019	
4.	Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми	26.09.2019-20.10.2019	
5.	Електричні розрахунки. Експериментальне дослідження	21.10.2019-29.10.2019	
6.	Розділ моделювання	30.10.2019-03.11.2019	
7.	Розробка графічної частини МКР	04.11.2019-10.11.2019	
8.	Аналіз економічної ефективності розробки	11.11.2019-15.11.2019	
9.	Охорона праці (ОП)	16.11.2019-22.11.2019	
10.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	23.11.2019-27.11.2019	
11.	Нормоконтроль	28.11.2019-29.11.2019	
12.	Попередній захист МКР, доопрацювання, рецензування МКР	02.12.2019-06.12.2019	
13.	Захист МКР ЕК	09.12.2019-17.12.2019	

Студент

_____ (підпис)

Швець І. М.

Керівник роботи

_____ (підпис)

Осадчук В. С.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.397

Швець І.М. Радіовимірювальний пристрій для визначення оптичної потужності. Магістерська кваліфікаційна робота. – Вінниця: ВНТУ, 2019. – 137с. На українській мові. Бібліогр.: 104. назв; Рис. 48.; Табл. 17.

В магістерській кваліфікаційній роботі розроблено і досліджено математичні моделі піроелектричного кристалу та транзисторних структур, які дозволяють враховувати зміну активної та реактивної складових повного опору від дії потужності оптичного випромінювання, а також дозволяють дослідити її вплив на активну і реактивну складові повного опору.

Проведено аналіз похибок пристрою та розрахунок інфрачервоного ефекту від його впровадження.

Удосконалено аналітичні вирази для розрахунку повного опору частотного перетворювача, які, на відміну від існуючих дозволяють визначити залежність активної і реактивної складової повного опору від дії потужності оптичного випромінювання.

Розроблені радіовимірювальні пристрої потужності оптичного випромінювання мають оптимальні метрологічні характеристики (чутливість 11,2 кГц/мВт, сумарна похибка 0,18 %), сумісні з цифровими системами обробки інформації та можуть бути виготовлені за стандартною груповою інтегральною технологією. Всі промодельовані схеми забезпечують високу чутливість від 8,5 до 11,2 кГц/мВт.

Розрахунки на економічність приладу показали, що його впровадження у виробництво є економічно ефективним. Оскільки Ток < 3...5-ти років, то фінансування даної наукової розробки радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності є доцільним. При запровадженні у виробництво виробник отримає прибуток. Аналізуючи ринок можна розраховувати на значний попит на наш виріб. Підтвердженням цьому є технічні параметри даного пристрою, які кращі за параметри аналога.

В розділі ОП розглянуті такі питання як безпека в надзвичайних ситуаціях, як технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення потужності лазера за заданою безпечною відстанню, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки при проведенні розробки радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності, безпека в надзвичайних ситуаціях.

Ключові слова: радіовимірювальні пристрої, оптичний перетворювач, термочутливі елементи, МОН–транзистори.

ABSTRACT

Shvets I.M. Radiometer for determining optical power. Master's qualification work. - Vinnitsa: VNTU, 2019. -137s. In Ukrainian language. Bibliogr .: 104. titles; Fig. 48.; Tab. 17.

In master's qualification work mathematical models of pyroelectric crystal and transistor structures have been developed and studied, which allow to take into account the change of active and reactive components of full resistance from the action of power of optical radiation, and also allow to investigate its influence on active and reactive components of full resistance.

The analysis of errors of the device and calculation of the economin-infrared effect from its introduction is carried out. Analytical expressions for calculating the total impedance of the frequency converter, which, unlike the existing ones, allow to determine the dependence of the active and reactive component of the total impedance on the action of the power of optical radiation.

The developed optical radiation power measuring devices have optimal metrological characteristics (sensitivity 11.2 kHz / mW, total error of 0.18%), are compatible with digital information processing systems and can be manufactured using standard group integrated technology. All simulated circuits provide high sensitivity from 8.5 to 11.2 kHz / mW.

Calculations on the efficiency of the device showed that its introduction into production is cost effective. Since the Current is <3... 5 years, it is advisable to finance this scientific development of a radiometer to determine optical power. When introduced into production, the manufacturer will profit. Analyzing the market we can count on a significant demand for our product. Confirmation of this is the technical parameters of this device, which are better than the parameters of the analogue.

In the section OP covers such issues as safety in emergency situations, such as technical solutions for occupational hygiene and industrial sanitation, determination of laser power at a given safe distance, technical solutions for industrial and fire safety in carrying out the development of a radiometric device for determining optical power, safety in emergency situations.

Key words: radiometers, optical sensor, thermosensitive elements, MON–transist

З М І С Т

ВСТУП	9
1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ	13
1.1 Засоби для вимірювання потужності оптичного випромінювання	14
1.2 Пристрій вимірювання поляризаційних параметрів оптичного випромінювання	20
1.3 Висновки до розділу.....	28
2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПІРОЕЛЕКТРИЧНОГО ЕФЕКТУ	29
2.1 Математична модель піроелектричного кристалу	29
2.2 Процес перетворення інфрачервоного випромінювання в електричний сигнал.....	30
2.3 Однокристална схема піроелектричного приймача	31
2.4 Висновки до розділу.....	35
3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РАДІОВИМІРЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ	36
3.1 Переваги використання частотних перетворювачів на транзисторних структурах в радіовимірювальних приладах	36
3.2 Математична модель частотного перетворювача на основі біполярної транзисторної структури	37
3.3 Математична модель радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності на основі біполярної транзисторної структури та активного індуктивного елемента	45
3.4 Аналіз чутливості радіовимірювальних приладів на основі радіовимірювального перетворювача оптичної потужності	52
3.5 Висновки до розділу.....	52
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІОВИМІРЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ	53
4.1 Методика проведення вимірювань потужності оптичного випромінювання.....	53
4.2 Експериментальне дослідження вольт–амперної характеристики радіовимірювального перетворювача оптичної потужності.....	55
4.3 Експериментальне дослідження повного комплексного опору частотних перетворювачів.....	55
4.4 Експериментальне дослідження залежності частоти генерації від напруги живлення радіовимірювального перетворювача оптичної потужності.....	58
4.5 Експериментальне дослідження залежності частоти генерації	

від потужності оптичного випромінювання радіовимірювального перетворювача оптичної потужності.....	59
4.6 Аналіз похибки вимірювання потужності оптичного випромінювання.....	60
4.7 Висновки до розділу.....	65
5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	66
5.1 Визначення рівня комерційного потенціалу розробки радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності	66
5.2 Визначення рівня якості розробки радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності	67
5.3 Визначення конкурентоспроможності розробки радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності	70
5.4 Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної, дослідно-конструкторської та конструкторсько-технологічної роботи.....	71
5.4.1 Розрахунок витрат, що стосуються виконавців розробки радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності	71
5.5 Розрахунок загальних витрат на розробку радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності	76
5.6 Прогнозування витрат на виконання та впровадження радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності	76
5.7 Прогнозування комерційних ефектів від реалізації радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності	77
5.8 Визначення абсолютної ефективності вкладених інвестицій у розробку радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності	78
5.9 Розрахунок відносної ефективності вкладених коштів в НДДКР радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності.....	79
5.10 Розрахунок терміну окупності коштів, вкладених в наукову розробку радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності.....	80
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	81
6.1 Гігієна праці та виробнича санітарія.....	81
6.1.1 Мікроклімат та склад повітря робочої зони.....	81
6.1.2 Виробниче освітлення.....	83
6.1.3 Виробничі віброакустичні коливання.....	84
6.1.4 Виробничі випромінювання.....	85
6.2 Технічні рішення з промислової та пожежної безпеки при проведенні розробки радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності.....	87
6.2.1 Безпека щодо організації робочих місць.....	87
6.2.2 Електробезпека.....	87
6.2.3 Пожежна безпека.....	88
6.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях.....	89

6.3.1	Визначення області працездатності радіовимірювального пристрою в умовах дії іонізуючих випромінювань.....	90
6.3.2	Визначення області працездатності радіовимірювального перетворювача для визначення оптичної потужності в умовах дії електромагнітного імпульсу.....	91
6.4	Розробка заходів по підвищенню безпеки роботи радіовимірювального перетворювача для визначення оптичної потужності в умовах надзвичайних ситуацій.....	92
	ВИСНОВКИ.....	94
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	95
	Додаток А (обов'язковий) Технічне завдання	104
	Додаток Б (обов'язковий) Структурна схема пристрою.....	110
	Додаток В (обов'язковий) Схема оптичного перетворювача фізичних величин.....	112
	Додаток Д (обов'язковий) Схема однокристалльної та двокристалльної системи.....	114
	Додаток Е (обов'язковий) Схема електрична принципова.....	116
	Додаток Ж (обов'язковий) Електрична схема радіовимірювального перетворювача оптичної потужності.....	118
	Додаток К (обов'язковий) Блок–схема методики проведення вимірювань потужності оптичного випромінювання.....	120
	Додаток Л (обов'язковий) Експериментальні дослідження вольт–амперної характеристики радіовимірювального перетворювача оптичної потужності.....	122
	Додаток М (обов'язковий) Лістинги програм в середовищі Matlab для розрахунку параметрів радіовимірювальних пристроїв для визначення оптичної потужності.....	126

ВСТУП

Актуальність тем. Важливим різновидом пристроїв є такі, що вимірюють параметри оптичного випромінювання, адже, потужність оптичного випромінювання у значній мірі впливає на перебіг технологічних процесів. Для вимірювань потужності оптичного випромінювання в даний час використовуються напівпровідникові перетворювачі, що виконані у вигляді мікросхем, інфрачервоні перетворювачі, волоконно–оптичні системи та інші. Вони знаходять широке застосування у вимірювальних пристроях, промислових установках, системах керування та управління, медичній апаратурі, комп'ютерній техніці, засобах зв'язку та волоконно–оптичних системах передачі інформації, сонячних батареях [1]. Таким чином, основним інформативним параметром є потужність оптичного випромінювання, тобто фізична величина, що визначається відношенням енергії випромінювання до часу переносу, який істотно перевищує період коливань [2].

Існуючим радіовимірювальним пристроям потужності оптичного випромінювання притаманні такі недоліки: невелике абсолютне значення вихідного сигналу та повна шкала його зміни. Крім того, передатна характеристика перетворювачів є нелінійною [2]. Тому в тих випадках, коли необхідно забезпечити високу точність вимірювань, необхідно здійснити підсилення сигналу, лінеаризацію передатної характеристики, компенсацію початкового зміщення та похибок, які виникають у зв'язку зі зміною потужності оптичного випромінювання навколишнього середовища та часового дрейфу. Ефективно виконувати подібні перетворення можна тільки з використанням засобів цифрової обробки даних.

На даний час існує стійка тенденція щодо зменшення вартості радіовимірювальних пристроїв обробки інформації, зокрема, на основі мікропроцесорних систем, внаслідок чого первинні вимірювальні перетворювачі поступово набувають визначальної ролі з точки зору вартості інформаційно–вимірювальної системи [3].

Подальшим розвитком наукових досліджень цього напрямку для поліпшення метрологічних параметрів радіовимірювальних пристроїв є застосування реактивних властивостей транзисторних структур. У пристроях, побудованих на таких структурах, значно підвищується чутливість, розширюється діапазон вимірюваних величин, поліпшується надійність та стабільність параметрів. Використання частотного принципу роботи пристроїв

виключає застосування аналого–цифрових перетворювачів для обробки інформації, що знижує собівартість пристроїв та інформаційно–вимірювальних систем на їхній основі.

Таким чином, широке застосування напівпровідникових матеріалів, групової інтегральної технології та розробка на їх основі радіовимірювальних первинних вимірювальних перетворювачів, сумісних з цифровими пристроями останнього покоління, є основним напрямком розвитку сучасної, в тому числі і радіовимірювальної техніки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Основний зміст роботи складають результати наукових розробок та експериментальних досліджень, які проводилися протягом 2016–2019 років відповідно плану наукових досліджень Вінницького національного технічного університету та Міністерства освіти і науки в рамках прикладних держбюджетних науково–дослідних робіт.

Мета і задачі дослідження

Метою роботи є покращення метрологічних параметрів, таких як чутливість та точність вимірювання потужності оптичного випромінювання на основі радіовимірювального пристрою з від'ємним диференційним опором.

Об'єктом дослідження є процес перетворення оптичного випромінювання в частотний сигнал у транзисторних структурах з від'ємним диференційним опором.

Предметом дослідження є метрологічні характеристики та параметри радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності та піроелектричного частотного перетворювача завдяки реактивним властивостям транзисторних структур.

Для досягнення поставленої мети в магістерській кваліфікаційній роботі розв'язуються наступні завдання:

1. Аналіз сучасних радіовимірювальних пристроїв з метою обґрунтування їхніх переваг для вимірювання потужності оптичного випромінювання на основі піроелектричного кристалу та транзисторних структур.

2. Дослідження властивостей піроелектричного кристалу і транзисторних структур та розробка їх математичної моделі, які дозволяють враховувати зміну активної та реактивної складових повного опору від дії потужності оптичного випромінювання, а також дозволяють дослідити її вплив на активну і реактивну складові.

3. Експериментальна перевірка математичних моделей піроелектричного кристалу та транзисторних структур для створення на їхній основі радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності.

3. Отримання аналітичних виразів для розрахунку повного опору радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності.

Методи дослідження ґрунтуються на використанні: основних положень теорії функції комплексної змінної; диференціального та інтегрального числення; методів розрахунку лінійних електричних кіл з використанням матричного апарату; теорії ймовірності; персонального комп'ютера на заключних етапах аналізу та синтезу.

Наукова новизна одержаних результатів

Наукова новизна роботи полягає в отриманні таких результатів:

1. Удосконалено метод вимірювання потужності оптичного випромінювання на основі піроелектричного елемента та реактивних властивостей транзисторних структур, який базується на використанні залежності імпедансу напівпровідникових структур від впливу потужності оптичного випромінювання, що дозволяє значно підвищити чутливість його вимірювання.

2. Удосконалено математичну модель процесів, що перебігають в радіовимірювальному пристрої для визначення оптичної потужності, яка, на відміну від існуючих, дає можливість врахувати вплив на активну і реактивну складові повного опору, що дозволяє оцінити дію зовнішніх інформаційних параметрів на елементи нелінійних еквівалентних схем.

3. Удосконалено аналітичні вирази для розрахунку повного опору радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності, які на відміну від існуючих, дозволяють встановити залежність активної і реактивної складової повного опору від дії потужності оптичного випромінювання.

Практичне значення одержаних результатів

1. Математичні моделі, отримані в роботі, можуть бути використані для інженерного розрахунку повного імпедансу транзисторних структур, функції перетворення та чутливості пристроїв.

2. Розроблено радіовимірювальний пристрій для визначення оптичної потужності який має метрологічні характеристики (чутливість 10,5 кГц/мВт, сумарна похибка 0,21 %), сумісний з цифровими системами обробки інформації та може бути виготовлений за стандартною групою інтегральною технологією. Максимальна чутливість перетворювача на біполярній

транзисторній парі становить 15 кГц/мВт при амплітуді вихідного сигналу до 20 В.

3. Розробка радіовимірювального пристрою потужності оптичного випромінювання на основі частотного принципу роботи дозволяє значно знизити вартість систем контролю та управління, повною мірою реалізувати переваги радіовимірювальних пристроїв.

Особистий внесок здобувача

Основні положення і результати магістерської кваліфікаційної роботи отримані автором самостійно.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

У сучасному житті електронні пристрої та системи виконують різні корисні функції. Для налаштування параметрів електронних пристроїв проводять вимірювання магнітних, електричних та електромагнітних величин. Проведення таких вимірювань необхідно для характеристики роботи радіотехнічних і електронних систем. З цією метою використовують радіовимірювальні пристрої (електронні вимірювальні пристрої, електронні засоби вимірювань) – велика група засобів вимірювань, призначених для визначення електричних, магнітних і електромагнітних величин, які характеризують роботу радіотехнічних та електронних пристроїв і систем. Історично радіовимірювальні пристрої з'явилися в результаті розвитку електротехнічних вимірювань, тому межа між групами радіовимірювальних і електровимірювальних пристроїв розмита.

Для вимірювання параметрів в сучасних електронних та радіотехнічних системах використовується широкий спектр апаратури, орієнтованої на вирішення певних завдань. Особливо виділяють радіовимірювальні пристрої потужності оптичного випромінювання.

Вимірювачі потужності – радіовимірювальні пристрої, призначені для визначення потужності електричного струму або електромагнітного сигналу. Цей вимірювач електричної потужності, в залежності від діапазону частот і основного призначення, може бути низькочастотним, оптичним або радіочастотним. В залежності від приналежності до класу аналогових або цифрових пристроїв, вимірювачі потужності мають різну конструкцію. В аналогових пристроях встановлені дві котушки, одна з яких підключається послідовно, а друга – паралельно навантаженню. У цифрових моделях котушки замінені датчиками, інформація з яких передається на вбудоване в ватметр вимірювальний пристрій, які в свою чергу, передають дані на друк або на екран пристрою. Дані пристрої в основному використовуються у промислових установках, системах управління, медичній апаратурі, комп'ютерній техніці, засобах зв'язку та волоконно–оптичних системах передачі інформації.

Радіовимірювальні пристрої, використовуються для обслуговування сучасних електронних систем, повинні бути практичні, функціональні і володіють високою точністю і чутливістю. Таким чином, за допомогою цих

вимірювальних пристроїв підтримуються в робочому стані складні електронні та електротехнічні системи.

1.1 Засоби для вимірювання потужності оптичного випромінювання

Пристрій для декодування сигналу інфрачервоного випромінювання (ІНФРАЧЕРВОНЕ) (рисунок 1.1) та наведена в додатку Б. [58, 69] містить приймач інфрачервоного випромінювання, в якому є формувач імпульсу, схему зняття сигналу "СКИДАННЯ", цифровий пристрій послідовного типу та комбінаційну схему.

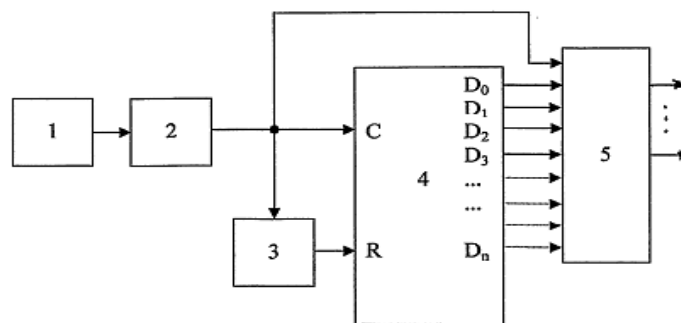


Рисунок 1.1 – Структурна схема пристрою декодування сигналу інфрачервоне випромінювання: 1 – приймач інфрачервоне випромінювання; 2 – формувач імпульсу; 3 – схему зняття сигналу "СКИДАННЯ"; 4 – цифровий пристрій послідовного типу; 5 – комбінаційна схема

Вихід приймача з'єднаний із входом формувача імпульсу, вихід формувача імпульсу з'єднаний із входом схеми зняття сигналу "СКИДАННЯ" входом синхронізації цифрового пристрою послідовного типу та входом комбінаційної схеми, вихід схеми зняття сигналу "СКИДАННЯ" під'єднано до входу скидання цифрового пристрою, виходи цифрового пристрою послідовного типу під'єднано до входів комбінаційної схеми, виходи комбінаційної схеми є виходами пристрою. Недоліком даного пристрою є складна методика вимірювань.

У роботах [49, 12, 21] описано оптичний перетворювач фізичних величин (рисунок 1.2) та наведена в додатку В. Він містить оптично зв'язані джерело випромінювання, фотоприймач, активний елемент, виконаний із халькогенідного склоподібного напівпровідника. Причому корпус містить прозорі для світлового потоку (створеного джерелом випромінювання) вхідне і вихідне вікна, бокові сторони корпусу розміщені під кутом до активного

елементу і мають дзеркальну внутрішню поверхню. Активний елемент виготовлений у вигляді полірованої плоско-паралельної пластини або товстої плівки, напиленої із об'ємного халькогенідного склоподібного напівпровідника $(\text{GeS}_2)_x (\text{M}_2\text{S}_3)_{1-x}$, де $\text{M} - \text{Bi}, \text{Sb}$ при $0,8 \leq x \leq 1,0$, в якого показник заломлення чутливий до зміни температури та освітлення, запам'ятовує максимальне значення зміни показника заломлення і розміщений разом з нагрівником на робочому елементі перпендикулярно до потоку випромінювання. Перед фотоприймачем розміщена фокусуєча лінза і/або параболічне дзеркало, джерело випромінювання працює в неперервному або імпульсному режимі.

Недоліком даного пристрою є складність реалізації халькогенідного склоподібного напівпровідника.

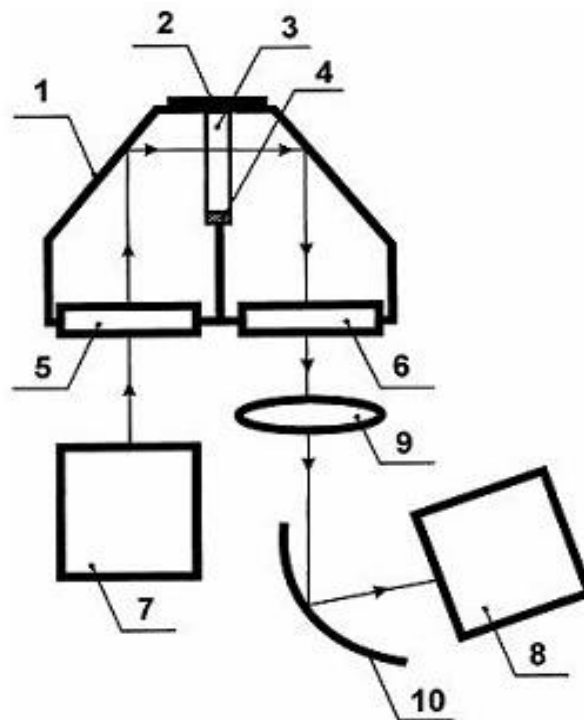


Рисунок 1.2 – Схема оптичного перетворювача фізичних величин: 1 – корпус; 2 – робочий елемент; 3 – активний елемент; 4 – нагрівник; 5, 6 – вхідне і вихідне вікна; 7 – джерело випромінювання; 8 – фотоприймач; 9 – фокусуєча лінза; 10 – параболічне дзеркало

Оптичний перетворювач розглянуто в джерелі [80, 122]. Перший пристрій Пельт'є Re1 і другий пристрій Пельт'є Re2 з'єднані послідовно, у той час як обхідне коло B для відволікання надлишкового струму I3 відносно Re2

підключено до другого пристрою Пельтьє Pe_2 паралельно, так що струм накачування I_1 з струмо-контролюючої секції А встановлює Pe_1 на своїй оптимальній робочій точці, і надлишковий струм I_3 у відношенні другого пристрою Пельтьє Pe_2 через струм накачування I_1 буде переадресовано в обхідне коло В, щоб другий пристрій Пельтьє Pe_2 був готовий для експлуатації на своїй оптимальній робочій точці. Крім того, перший і другий пристрої Пельтьє Pe_1 , Pe_2 складені один на одного, і всі пристрої Пельтьє Pe_1 , Pe_2 керуються однією струмоконтролюючою секцією А з метою досягнення меншого розміру (рисунок 1.3).

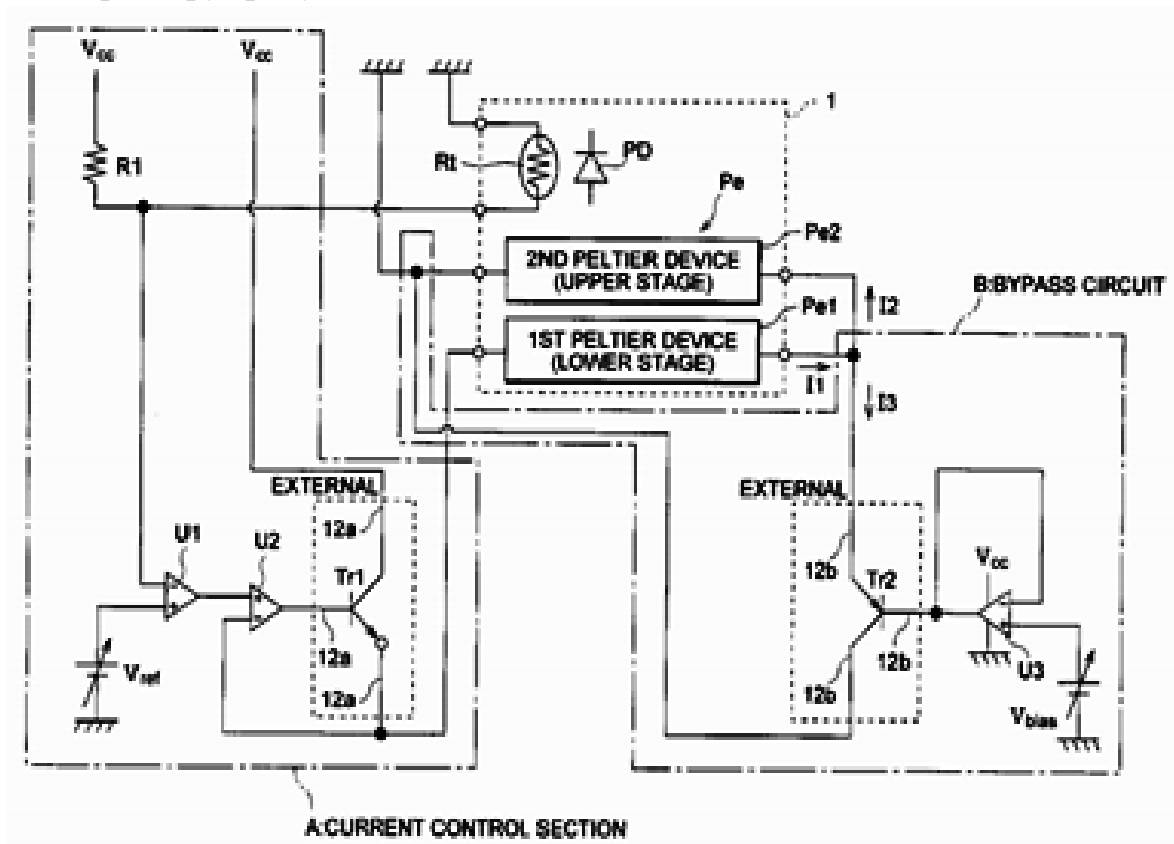


Рисунок 1.3 – Схема оптичного перетворювача

Недоліком пристрою є складність схемотехнічної реалізації.

Спосіб виявлення джерел інфрачервоного випромінювання розглянуто в [21]. Він включає в себе прийом та перетворення, за допомогою фотоприймача, інфрачервоного випромінювання в електричний сигнал у вигляді суміші корисного сигналу і маскуючого шуму, підсилення, квазіоптимальну фільтрацію і детектування. Причому, квазіоптимальну фільтрацію здійснюють шляхом нормалізації маскуючого шуму, для чого послідовно проводять

широкосмугову фільтрацію, обмеження амплітуди маскуючих шумових викидів та їх вузько смугову фільтрацію з подальшим амплітудним детектуванням при зростаючому рівні амплітудної селекції отриманої суміші відфільтрованого сигналу і нормалізованого маскуючого шуму. Після чого усереднюють частоти маскуючих шумових викидів, що перевищують вибраний рівень амплітудної селекції, зіставляють одержані значення середніх частот маскуючих шумових викидів з еталонними значеннями і за результатом порівняння судять про наявність джерел інфрачервоного випромінювання. Недоліком є необхідність застосування маскуючого шуму, підсилювача і квазіоптимальної фільтрації.

Піроелектричний детектор інфрачервоного випромінювання (рисунок 1.5) описано в [42, 55], який має, щонайменше, два чутливі елемента з піроелектричного матеріалу, розміщених на підкладці в герметичному корпусі з вікнами для інфрачервоного випромінювання. До того ж, один з чутливих елементів захищений від падаючого інфрачервоного випромінювання і електрично з'єднаний з прийомним чутливим елементом так, щоб орієнтації поляризації піроелектричних шарів були направлені протилежно.

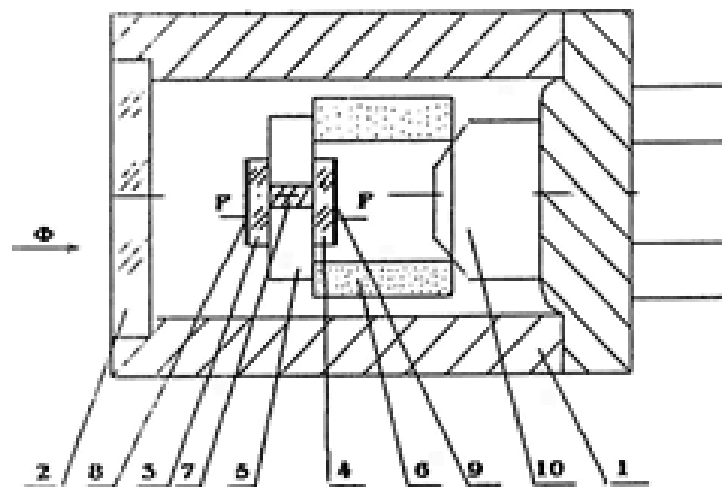


Рисунок 1.5 – Варіант конкретного виконання піроелектричного детектора інфрачервоного випромінювання: 1 – герметичний корпус; 2 – вікно для проходження потоку інфрачервоного випромінювання Φ , 3, 4 – чутливі піроелектричні елементи; 5 – жорстка діелектрична підкладка; 6 – демпферна підставка; 7 – електрод, що з'єднує чутливі елементи; 8, 9 – електроди прийомного і компенсуючого елементів з'єднані з електронною схемою 10 і наступною системою реєстрування і оброблення сигналів

При цьому чутливість компенсуючого і приймального елементів співпадає, а виходи підключені до електронної схеми. Приймальний і компенсуючий

чутливі елементи розміщені на жорсткій підкладці так, щоб вплив акустичних механічних коливань різних частот був ідентичним для прийомного і компенсуючого елементів, зокрема, прийомний і компенсуючий елементи розміщені на протилежних сторонах підкладки геометрично один під одним. При цьому жорстка підкладка закріплена на з'єднаній з корпусом демпферній підставці, наприклад, у вигляді фігурного циліндра. Недоліком пристрою є необхідність застосування двох чутливих елементів.

У роботі [53] розглянуто оптичний вимірювальний апарат, його будова така. Оптичний перетворювач з'єднаний з електрооптичним перетворювачем та з вимірювальним колом через оптичну лінію затримки і хвилевід. Вимірні величини є незалежними від характеристик загасання оптичної лінії затримки отримуються якщо оптичний перетворювач містить суматор, який приймає світлові імпульси з хвилеводу і з оптичної лінії затримки, які потрапляють в тіло перетворювача. Дзеркало, яке розташоване збоку від перетворювача (на яке світло не потрапляє випадково) відбиває світлові імпульси назад в суматор, який відправляє світлові імпульси назад в хвилевід і оптичну лінію затримки. Недоліком є складність і громіздкість конструкції при використанні оптичної лінії затримки та хвилеводу.

У роботі [54] описано вимірювач потужності оптичного імпульсного випромінювання. Підвищення чутливості в широкому спектральному інтервалі досягається шляхом використання в чутливому елементі у вигляді паралелепіпеда з монокристала ніобату літію в якості легуючого металу міді або нікелю в межах 1–3 % в розплаві. Коефіцієнт перетворення досягається 90 і 106 В/мВт на довжинах хвиль 1,06 і 0,35 мкм відповідно. Недоліком є низька чутливість.

У роботі [55] представлено вимірювач потоку оптичного випромінювання (рисунок 1.6). Пристрій містить послідовно з'єднані фотодіод і резистор, два інвертуючих підсилювача, охоплених зворотним зв'язком, причому вхід першого підсилювача з'єднаний з виходом резистора, а також регульоване джерело напруги, фіксатор нуля і чотири додаткових резистора. Зворотній зв'язок підсилювачів утворено відповідно першим і другим додатковими резисторами, включеними між входом і виходом підсилювачів, при цьому інший вивід ланцюга фотодіод – резистор з'єднаний з виходом регульованого джерела напруги. Перші виходи третього і четвертого додаткових резисторів з'єднані між собою і з входом другого підсилювача, а їхні другі виходи з'єднані

відповідно з виходом регульованого джерела напруги і виходом першого підсилювача, вихід другого підсилювача з'єднаний з входом фіксатора нуля.

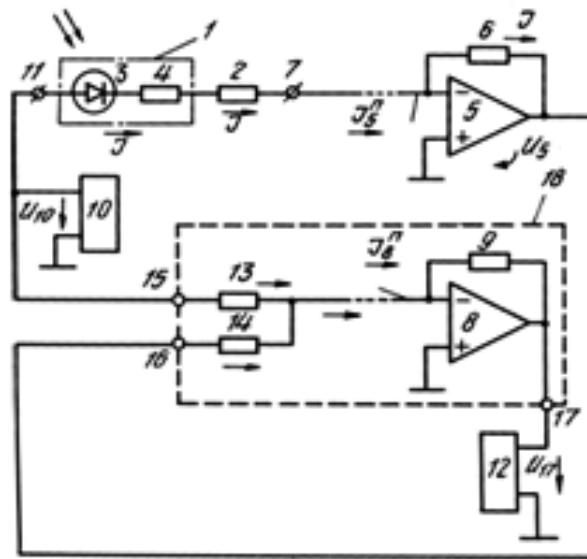


Рисунок 1.6 – Вимірювач потоку оптичного випромінювання: 1 – фотодіод; 2, 4, 6, 9, 13, 14 – резистори; 5, 8 – операційні підсилювачі; 7, 11, 15, 16 – клеми; 10, 12 – джерела живлення

Недоліком є недостатня точність вимірювання потужності оптичного випромінювання.

Вимірювач потужності випромінювання імпульсних оптичних квантових генераторів [56] містить двопроменевий інтерферометр з двома глухими і двома напівпрозорими дзеркалами. У першій оптичній гілці (сигнальній) послідовно встановлені магнітооптична комірка Коттона–Мутона і схрещений нікель, а в другій (опорній) послідовно встановлені фазова пластинка, фотометричний клин і напівхвилева пластинка. З входом інтерферометра Рождественского через поляроїд з'єднаний одночастотний одномодовий оптичний квантовий генератор безперервної дії. Випромінювання вимірюваного імпульсного оптичного квантового генератора через чвертьхвильову пластину і діафрагму опромінює магнітооптичну комірку Коттона–Мутона в напрямку, перпендикулярному розповсюдженню в ній лазерного випромінювання від одночастотного одномодового оптичного квантового генератора безперервної дії. Вихід інтерферометра Рождественского з'єднаний з входом фотодетектора на з'єднанні «кадмій–ртуть–телур», охолоджуваному рідким азотом, електричний вихід якого підключений до входу спектроаналізатора. Недоліком є складність реалізації пристрою та складний механізм роботи.

В [57] описується напівпровідниковий модулятор оптичного випромінювання з функціями фотоперетворювача. Він містить оптичний елемент, наприклад, з електрооптичного матеріалу, напівпровідникову пластину з наскрізними каналами і р–п переходами, виконаними плоскими і / або планарними, що виходять на бічну поверхню каналів. У каналах, у тому числі виконаних під нахилом до площини напівпровідникової пластини і тих, що перетинаються один з одним, є один або декілька оптично пов'язаних зі світловодами оптичних елементів, що змінюють свої оптичні характеристики під дією електричного поля, створюваного р–п переходами в залежності від амплітуди і частоти напруги живлення. Пристрій забезпечує можливість інтеграції оптичних систем з напівпровідниковими пристроями як у частині модуляції оптичного сигналу електричним полем р–п–переходів, так і в частині управління напівпровідниковими пристроями оптичним випромінюванням шляхом впливу безпосередньо на р–п–перехід. Недоліком є недостатня точність.

1.2 Пристрій вимірювання поляризаційних параметрів оптичного випромінювання

Пристрій розглянуто у роботі [58]. Він містить послідовно встановлені по ходу досліджуваного оптичного випромінювання (розташовані під кутом Брюстера) два світлових подільники, площини падіння яких ортогональні. По ходу відбитого випромінювання від кожного світлових подільника послідовно встановлені змішувальна пластинка, формуюча оптика і фотоприймач. По ходу опорного оптичного випромінювання від джерела лінійно–поляризованого випромінювання опорного послідовно встановлені формуюча оптика, змішувальна пластинка канал другого світлових подільника, обертач площини поляризації на 90° і змішувальна пластинка каналу першого світлових подільника. Недоліком є складна оптична система.

У роботі [59] розглянуто елемент для детектування електромагнітного випромінювання (рисунок 1.7), зокрема інфрачервоного, модуль формування оптичного інфрачервоного зображення, що включає такий елемент, і спосіб для його реалізації. Пристрій відноситься до області детектування електромагнітного випромінювання, зокрема інфрачервоного випромінювання. Елемент містить замкнутий простір (5) з вакуумом або низьким тиском, названий первинним замкненим простором, одна зі сторін (3) якого складається

з вікна (4), що є прозорим для детектованого випромінювання, причому, щонайменше, один детектор (6) розташований всередині згаданого замкнутого простору, по суті навпаки прозорого вікна (4); а також газопоглинач (13), призначений, щоб підтримувати вакуум усередині згаданого замкнутого простору (5) на заданому рівні, розташований всередині вторинного замкнутого простору, розташованого зовні первинного замкнутого простору (5), і вільно сполучається з останнім.

Недоліком є складність створення замкнутого простору з вакуумом або низьким тиском.

У роботі [60] показано тепловий приймач оптичного випромінювання (рисунок 1.8).

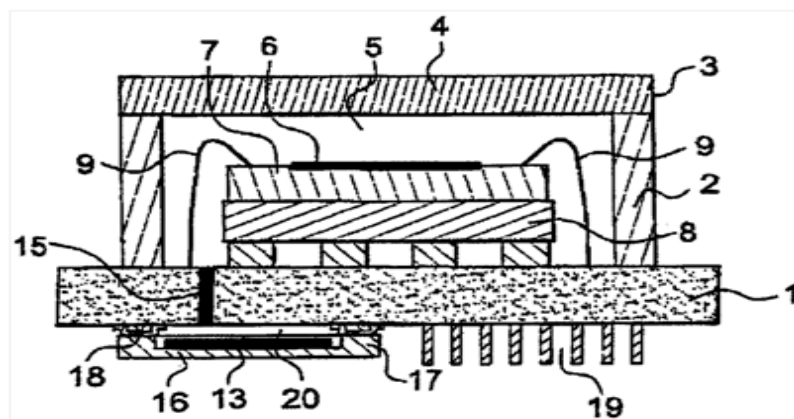


Рисунок 1.7 – Елемент для детектування електромагнітного випромінювання, зокрема інфрачервоного випромінювання: 4 – вікно; 5 – замкнутий простір з вакуумом; 6 – детектор; 13 – газопоглинач

Він містить корпус, виконаний у вигляді сплющеного прямокутного металоскляного тіла, що складається з основи (яка містить виводи), які електрично з'єднані з контактними площадками, розташованими по периметру підкладки, і кришки з вікном. Термочутливі елементи орієнтовані на площині приймальної площадки у вигляді мозаїки з елементів, розташованих по концентричних колах з радіусами, що збільшуються з кожним наступним колом на однакову величину від центру кола, рівну подвоєному розміру елемента, в порівнянні з попередньою. При цьому термочутливі елементи кожного кола розташовані на рівновіддаленій відстані один від одного, а мінімально допустима відстань між сусідніми елементами дорівнює розміру елемента. Поза приймальною площадкою розташований компенсаційний елемент. Недоліком є незначна швидкодія теплового приймача оптичного випромінювання.

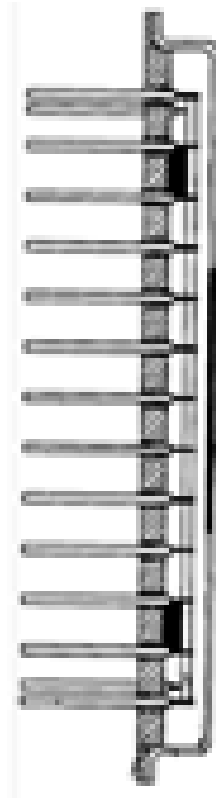


Рисунок 1.8 – Тепловий приймач оптичного випромінювання

В [61] описано пристрій для вимірювання інтенсивності оптичного випромінювання (рисунок 1.9). Він містить фоточутливий напівпровідниковий елемент, НВЧ-вимірювач для вимірювання відбитої від фоточутливого напівпровідникового елемента НВЧ-хвилі і магніт, причому фоточутливий напівпровідниковий елемент поміщений між полюсами магніту. Недоліком є складна структурна організація та не сумісність з персональним комп'ютером.

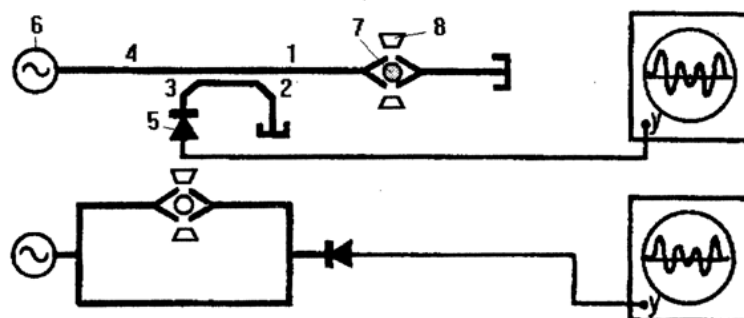


Рисунок 1.9 – Пристрій для вимірювання інтенсивності оптичного випромінювання: 1, 2, 3, 4 – вимірювальна лінія; 5 – фоточутливий напівпровідниковий елемент; 6 – генератор; 7, 8 – магніт

В [62] розглянуто оптичний елемент для трансформації потоку світлового випромінювання і оптичний перетворювач на його основі. Оптичний елемент (ВЕ) 1 для трансформації потоку світлового випромінювання включає тришаровий перетворюючий модуль (ПМ) і відбивач 2 випромінювання. Профілі функціональних шарів (ФС) 4, 8 ПМ мають форму клинів з кутами при одній з вершин їх основ 5, 10, близькими або рівними 45 або 90°. Проміжний ФС 6 пов'язаний з гранню 7 зовнішнього ФС 4 і виконаний завтовшки, сумірною з довжиною хвилі трансформованого випромінювання. Сполучення ФС 8 з проміжним ФС 6 здійснено за межі 9. Відбивач 2 сформований на межі 11 ФС 8. ФС просторово орієнтовані так, що сформований ними тришаровий ПМ має форму чотиригранної призми, основами якої є основи 5 і 10 ФС 4 і 8. Параметри і просторова орієнтація структур відбивача 2 обрані з умови забезпечення відбиття випромінювання у напрямку до основи 5 або 10, відповідному ФС 4 або 8 (рисунок 1.10).

Недоліком є складність виготовлення такого оптичного елементу.

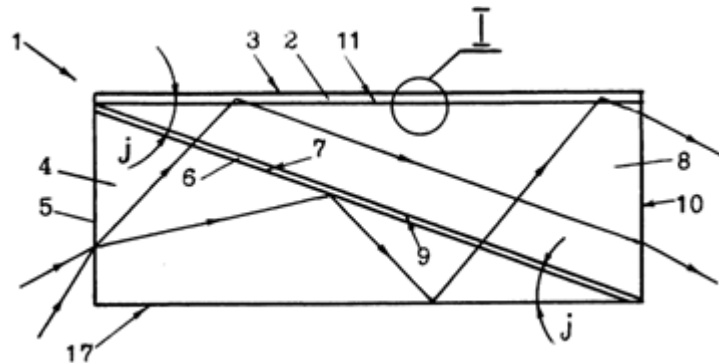


Рисунок 1.10 – Оптичний перетворювач для трансформації потоку світлового випромінювання

Пристрій для перетворення енергії оптичного випромінювання і енергії електромагнітних хвиль в енергію електричного струму розглядається в [63,64]. Він складається з засобів перетворення енергії вихідного джерела в енергію електромагнітних коливань, перетворювача енергії з засобами підведення енергії до перетворювача, пристроїв перетворення енергії активних елементів, перетворювача електроенергії, блоку управління роботою пристрою. При чому, він містить антену для прийому оптичного випромінювання з пристроєм параметричного перетворення оптичного випромінювання, підключеним до блоку джерела вторинного електроживлення електронних пристроїв, і антену для прийому електромагнітних хвиль радіодіапазону з коливальним контуром з гетеродином, засоби перетворення енергії вихідного джерела в енергію

електромагнітних коливань є послідовно включені випрямляч, смуговий фільтр, стабілізатор напруги, помножувач напруги з ємнісним накопичувачем та імпульсний перетворювач напруги, вихід якого підключений до засобів підведення енергії до перетворювача, які виконані як котушка запалювання і свічки запалювання, з'єднані між собою комутаційною схемою високої напруги. Перетворювач, виконаний у вигляді двох газодинамічних генераторів, з'єднаних між собою через ресивер, кожен з яких містить вихровий нагнітальний інжектор, предіонізаційний канал, камеру згорання, в якій розташована свічка запалювання, сопловий газодинамічний канал, прямий трирезонаторний клістрон з електродами як пристроями перетворення енергії активних елементів перетворювача в електроенергію, вихровий витяжний ежектор, електроди підключені до інвертора електричного струму, один з виходів якого підключений до блоку джерела вторинного електроживлення електронних пристроїв (рисунок 1.11). Недоліком є велика кількість структурних блоків у складі пристрою.

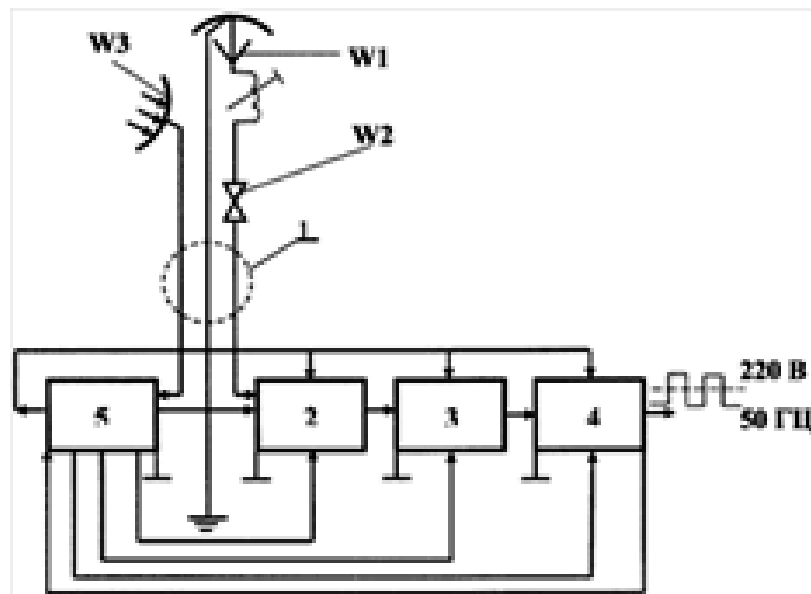


Рисунок 1.11 – Пристрій для перетворення енергії оптичного випромінювання і енергії електромагнітних хвиль в енергію електричного струму: 1 – засоби перетворення енергії вихідного джерела в енергію електромагнітних коливань; 2 – перетворювач енергії з засобами її підведення до перетворювача; 3 – пристрій перетворення енергії активних елементів; 4 – перетворювач електроенергії; 5 – блок управління роботою пристрою

У роботах [65, 66] розглянуто приймальний пристрій теплового потоку оптичного випромінювання досліджуваного об'єкта, що містить приймач з

перетворювачем теплового потоку в електричний сигнал, підсилювач і реєструючий пристрій, при цьому приймач включає растровий пристрій фасеточного типу у вигляді пакета горизонтально розташованих плоскопаралельних пластин, розміщеного в корпусі–каркасі у вигляді паралелепіпеда і у вигляді усіченої піраміди (рисунок 1.12).

При цьому, растровий пристрій фасеточного типу виконано у вигляді пакета плоскопаралельних горизонтально розташованих пластин, додатково забезпечено вертикально розташованими під кутом 90° пластинами з утворенням квадратних комірок, а сторона квадратної комірки дорівнює відстані між горизонтально розташованими пластинами, а загальна – довжині вертикально розташованої пластини дорівнює висоті растрового пристрою. При цьому вертикально розташовані пластини забезпечені прорізами, за допомогою яких здійснюють кріплення на горизонтально розташовані пластини, закріплені герметиком в місці стику пластин, що утворюють квадратну комірку. Недоліком є незначна швидкодія та низька точність.

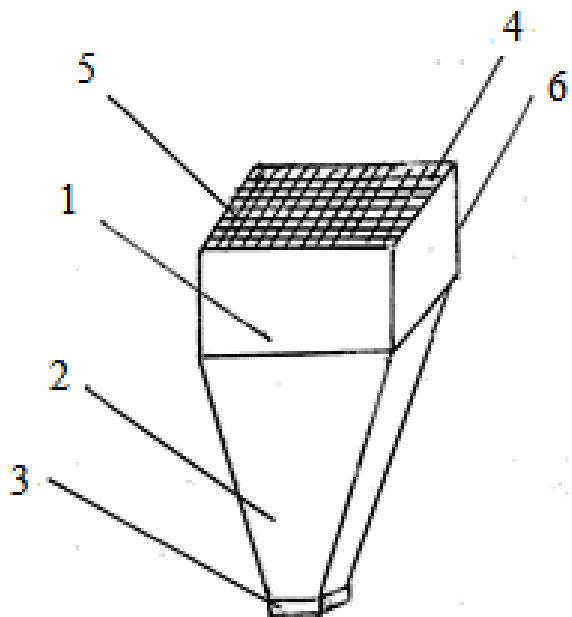


Рисунок 1.12 – Приймальний пристрій теплового потоку оптичного випромінювання досліджуваного об'єкта: 1 – корпус–каркас; 2 – растровий пристрій; 3 – реєструючий пристрій; 4 – приймач; 5 – перетворювач теплового потоку в електричний сигнал, 6 – підсилювач

Спосіб вимірювання енергетичних характеристик потужного оптичного випромінювання [67] включає поглинання оптичного випромінювання і реєстрацію теплового відгуку поглинаючого елемента, при цьому поглинання

оптичного випромінювання здійснюють на матеріалі з X -областю спектра для ізотерм випромінювальної здатності, а реєстрацію теплового відгуку поглинаючого елемента проводять на довжині хвилі в X -області спектра з тимчасовою затримкою, яка визначається співвідношеннями $\tau_s = \tau_i / \tau_s \geq h^2 / a$, де τ_i – тривалість імпульсу випромінювання, a – коефіцієнт температуропровідності матеріалу поглинального елемента, h – товщина поглинального елемента (рисунок 1.13). Недоліком є недостатня точність.

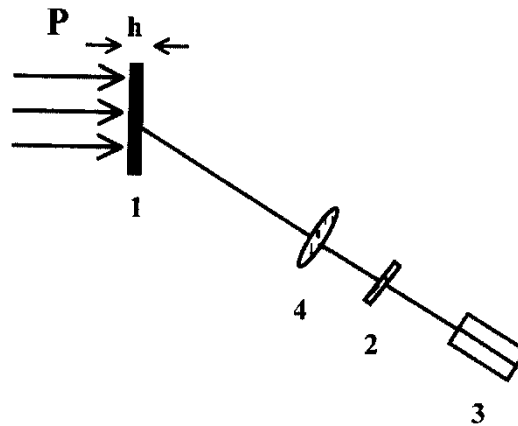


Рисунок 1.13 – Пристрій для реалізації способу вимірювання енергетичних характеристик потужності оптичного випромінювання: 1 – матеріал з X -областю спектра; 2 – обтюратор; 3 – приймач; 4 – лінза

У роботах [68, 69] розглянуто відеоконвертор. Він містить матрицю фотоелементів, по порядку з'єднаних з шинами зчитування через МОН-транзистори, затвори яких підключені до реєстру вибірки рядків, шини з'єднані через транзистори зв'язку, затвори яких підключені до шини управління зв'язком, з вузлом зчитування, що зчитує з транзистора, затвор якого підключений до шини управління його зарядовою ємністю, зчитує з діода, сполученого з затвором транзисторів вибірки і зберігання, при цьому джерело транзистора перезарядки підключено до шини живлення, а затвор – до шини управління перезарядженням, витік транзистора з'єднаний зі стоком транзистора поелементної вибірки рядка, причому стік транзистора підключений до шини вихідного сигналу, підключеного до навантажувального опору. Недоліком є складна структурна організація.

Спосіб вимірювання інтенсивності розсіяного оптичного випромінювання [70] заснований на використанні явища оптичної інтерференції. Зображення досліджуваної ділянки поверхні об'єкту проектується на приймач ПЗЗ-

відеокамери, де інтерферують з опорним пучком, фаза якого лінійно змінюється у часі (рисунок 1.14). Недоліком є складна структурна організація.

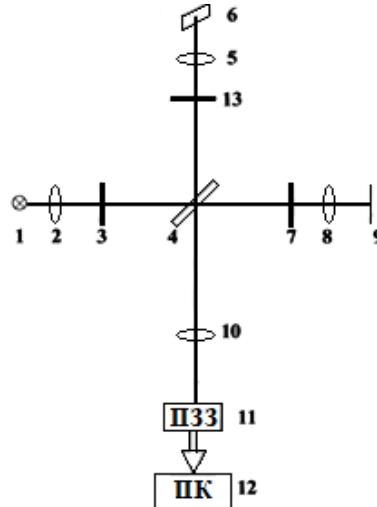


Рисунок 1.14 – Ілюстрація способу вимірювання інтенсивності розсіяного оптичного випромінювання

Координатно-чутливий автономний приймач оптичного випромінювання [71] включає скляну підкладку, фоточутливу АФН-плівку (аномальної фотонапруги) з напівпровідникового матеріалу і металеві контакти та напівпровідникові з'єднання у вигляді сходинкоподібної АФН-плівки з поступовим збільшенням товщини сходинок починаючи з 1 мкм (рисунок 1.15).

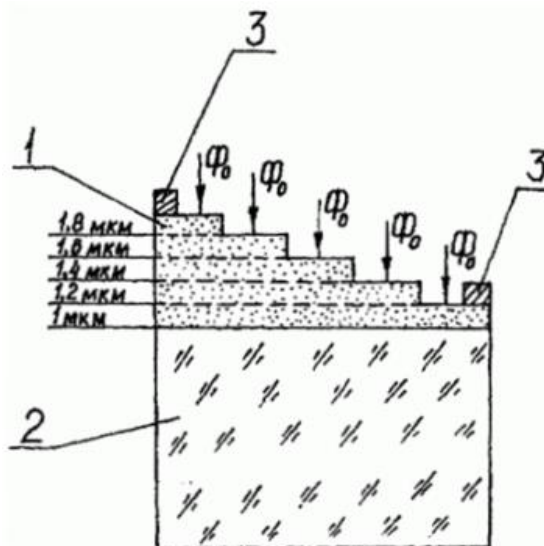


Рисунок 1.15 – Координатно-чутливий автономний приймач оптичного випромінювання: 1 – АФН-плівка; 2 – скляна підкладка; 3 – металеві контакти

1.3 Висновки до розділу

1. На підставі аналізу сучасних пристроїв для вимірювання потужності оптичного випромінювання, доведено перспективність напрямку – розробку радіовимірювального пристрою на основі оптико–частотних перетворювачів, які могли б характеризуватися оптимальними метрологічними показниками і бути технологічно сумісними з цифровими пристроями обробки інформації.

2. В результаті аналізу сучасних пристроїв для вимірювання потужності оптичного випромінювання виявлено необхідність створення пристрою, що усував би виявлені недоліки і характеризувався високою точністю і чутливістю, впровадження якого у виробництво можна було б вважати доцільним. При цьому перетворювачі типу «потужність оптичного випромінювання – частота» дозволяють вирішити проблеми узгодження аналогових перетворювачів з системами цифрової обробки даних.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПІРОЕЛЕКТРИЧНОГО ЕФЕКТУ

2.1 Математична модель піроелектричного кристалу

Піроелектричні кристали використовуються для вимірювання потужності оптичного випромінювання. Піроелектричні матеріали мають ненульову спонтанну поляризацію (P) при рівноважних умовах і ця поляризація є функцією температури матеріалу [73]:

$$\Delta P = \gamma \Delta T, \quad (2.1)$$

де γ – пірокоефіцієнт ($176 \text{ мкКл}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ для LiTaO_3) і ΔT – зміна температури. Коли піроелектричний елемент зазнає зміни оптичного випромінювання, зміна поляризації створює електричне поле, яке здатне прискорювати заряджені частинки до сотень КеВ. Доведено, що цей ефект є досить сильним, щоб створити компактні джерела рентгенівських променів, електронів, іонів і нейтронів.

Піроелектричні кристали часто розглядаються як дві грані, розміщені перпендикулярно до осі поляризації. Ці грані іменуються додатною і від'ємною. При кімнатній температурі спонтанна поляризація від'ємної грані є негативною, а спонтанна поляризація додатної є позитивною. Піроелектричний ефект змушує поляризацію зменшуватися при нагріванні кристалу. Якщо кристал нагрівати в той час як він був розміщений в атмосфері, вільні заряди будуть накопичуватися на поверхні кристала, щоб приховати зміну поляризації. Нагрівання кристала призведе до виникнення некомпенсованого додатного заряду на від'ємній поверхні (і некомпенсований від'ємний заряд на додатній поверхні). Зворотній ефект виникає при охолодженні. Величина цього заряду визначається:

$$Q = S\gamma\Delta T, \quad (2.2)$$

де Q – поверхневий заряд, S – площа поверхні. Збільшення заряду під час фази охолодження створює електричне поле. Зі зростанням електричного поля, може мати місце тунельний ефект, спричинюючи емісію електронів з від'ємної поверхні при охолодженні.

2.2 Процес перетворення інфрачервоного випромінювання в електричний сигнал

Під час перетворення вхідного інфрачервоного випромінювання в електричний сигнал в піроелектричному елементі можна виділити три основних етапи.

1. Термічне перетворення – інфрачервоне випромінювання потрапляє на піроелектричний елемент через вхідне вікно або інфрачервоний фільтр з коефіцієнтом передачі. Потік випромінювання $\Delta\Phi$ поглинається і стає причиною зміни температури ΔT в піроелектричному елементі.

2. Термоелектричне перетворення, при якому внаслідок піроелектричного ефекту у кристалі піроелектричного елементу зміна температури ΔT приводить до зміни концентрації зарядів ΔQ на його електродах.

3. Електричне перетворення – електричний заряд ΔQ перетворюється в електричний сигнал за допомогою попереднього підсилення сигналу U .

На рисунок 2.1 зображено три основні етапи перетворення в піроелементі [76], починаючи від ІЧ вхідного вікна перетворювача до отримання електричного сигналу.

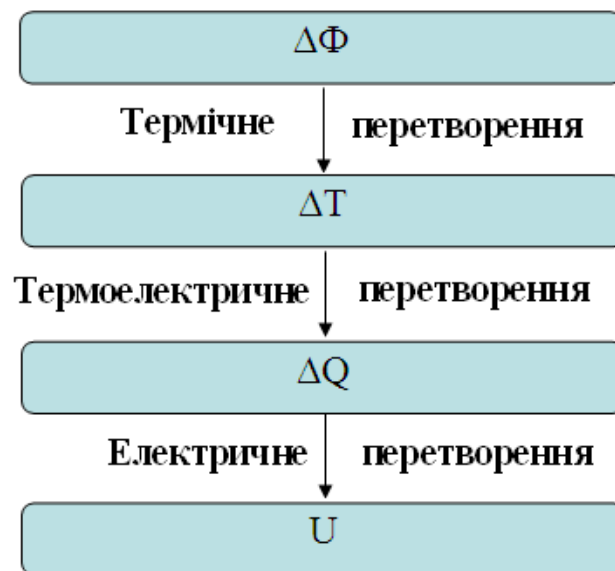


Рисунок 2.1 – Три основні етапи перетворення в піроелементі

2.3 Однокристална схема піроелектричного приймача

Є два поширених різновидів піроелектричних вимірювачів: одно- і двокристалні. У монокристалній системі, одна грань кристала заземлена, а інша цільова електрично рухлива і розміщена навпроти заземленої [46]. Заземлена і цільова поверхні розділені щілиною вакууму або газу низького тиску, як показано на рисунку 2.2 (а). У двокристалній системі заземлена цільова поверхня замінена на інший кристал (вони стикаються протилежно), як показано на рисунку 2.2 (б), та наведена в додатку Д. Під протилежним стиканням, мається на увазі, що від'ємна грань одного з кристалів знаходиться навпроти додатної грані іншого кристала.

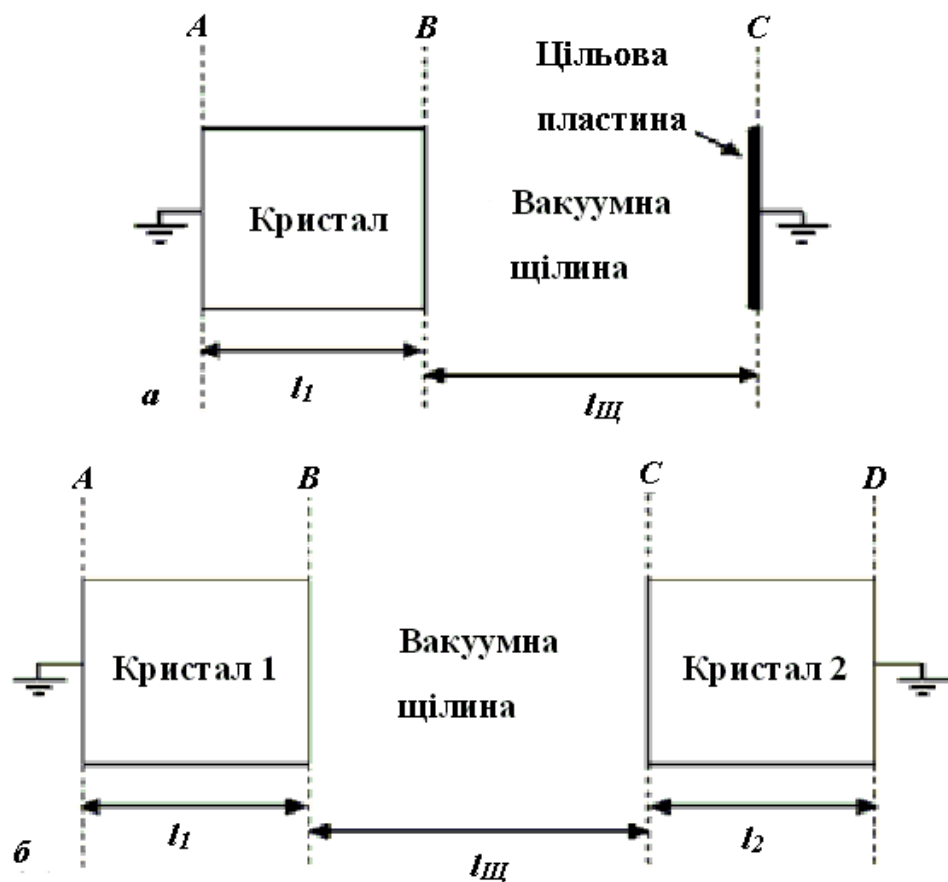


Рисунок 2.2 – Схема однокристалної системи (а), схема двокристалної системи (б)

Рисунок одного кристала піроелектричного вимірювача показано на рисунку 2.2 (а). На рисунку визначаються три площини (А, В, і С).

Коли кристал на рисунок 2.2 (а) зазнає зміни оптичного випромінювання, повний заряд, який розвивається на поверхні В (Q_B) визначається формулою (2.2). У результаті, існує різниця потенціалів через кристал, щілину і присутнє електричне поле. Отже, заряджені частинки (наприклад, електрони або іони), що присутні в щілині, будуть прискорені. Напрямок електричного поля в щілині (і знак заряду на поверхні В) залежить від орієнтації осі поляризації (убік або від В) причому кристал повинен бути нагрітим або охолодженим.

Оскільки кристал, і щілина є діелектриками, ця система може бути замінена моделлю з двох конденсаторів з'єднаних паралельно, причому поверхня В є спільною для обох конденсаторів. Еквівалентну схему наведено на рисунок 2.3.

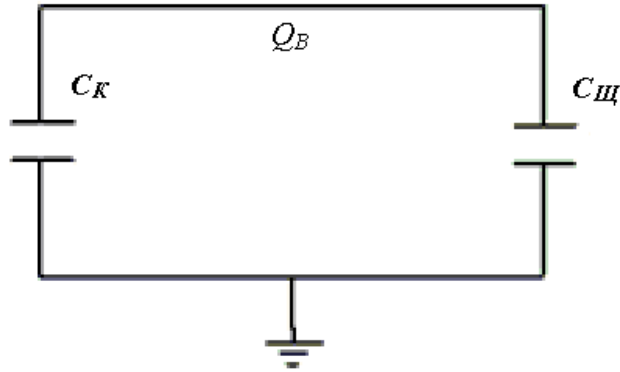


Рисунок 2.3 - Еквівалентна схема для однокристалльної системи

Еквівалентна ємність (без урахування крайових полів) цієї системи має вигляд:

$$C_E = C_K + C_{\text{Щ}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_K S}{l_1} + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{Щ}} S}{l_{\text{Щ}}}, \quad (2.3)$$

де ε_0 , ε_K , і $\varepsilon_{\text{Щ}}$ – діелектричні проникності вільного простору, піроелектричного кристалу і щілини, відповідно (якщо щілина – вакуум, $\varepsilon_{\text{Щ}} = 1$, однак, ми залишимо цей показник у рівнянні). Потенціал на конденсаторі визначається:

$$U = \frac{Q}{C}. \quad (2.4)$$

Оскільки C_K і $C_{Ш}$ на рисунок 2.3, паралельні, напруги на обох цих конденсаторах мають бути однакові ($U_K = U_{Ш}$). Таким чином, напруга вздовж щілини визначається:

$$U = \frac{Q_B}{C_E} = \frac{S\gamma\Delta T}{\frac{\epsilon_0\epsilon_K S}{l_1} + \frac{\epsilon_0\epsilon_{Ш} S}{l_{Ш}}} = \frac{\gamma\Delta T}{\epsilon_0 \left(\frac{\epsilon_K}{l_1} + \frac{\epsilon_{Ш}}{l_{Ш}} \right)}. \quad (2.5)$$

У багатьох випадках $C_K \gg C_{Ш}$, тому рівняння (2.5) можна спростити:

$$U = \frac{Q_B}{C_K} = \frac{\gamma\Delta T l_1}{\epsilon_0\epsilon_K}. \quad (2.6)$$

При цьому напруженість електричного поля в щілині визначається:

$$E_{Ш} = \frac{U}{l_{Ш}} = \frac{\gamma\Delta T}{\epsilon_0 \left(\frac{l_1\epsilon_K}{l_1} + \frac{l_{Ш}}{l_1} \right)}. \quad (2.7)$$

Варто зазначити, що зображення поверхні піроелектричного кристала, як конденсатора, не є відходом від дійсності, оскільки опір поверхні деяких піроелектричних елементів нижчий, ніж у більшості конденсаторів і проявляє металеві властивості.

Отже, отримано вираз для потенціалу на кристалі і поля в щілині. Цього досить для аналізу однокристалльної системи.

Враховуємо, що заряд на поверхні А та С не дорівнює нулю (хоча вони заземлені). Представляючи, що конденсатор заряджається зарядом Q , це означає, що заряд $+Q$ на одній пластині і заряд $-Q$ на іншій, тому позначення Q у рівнянні (2.6) неявно посилається на абсолютне значення Q . Поверхню піроелектричного кристала з площини В можна розглядати як дві пластини, одна конденсатора C_K , інша від конденсатора $C_{Ш}$. Повний заряд генерований піроелектричним кристалом (Q_B) розподіляється між цими двома пластинами. Частина заряду Q_B , яка пов'язана з конденсатором кристала є рівною і протилежною за знаком заряду (Q_A) на площині А (заземленої частини

кристала) та інша частина заряду Q_B (що пов'язана з конденсатором щілини) є рівною і протилежною за знаком заряд (Q_C) на площині С (заземлена цільова поверхня). Це проілюстровано на рисунок 2.4.

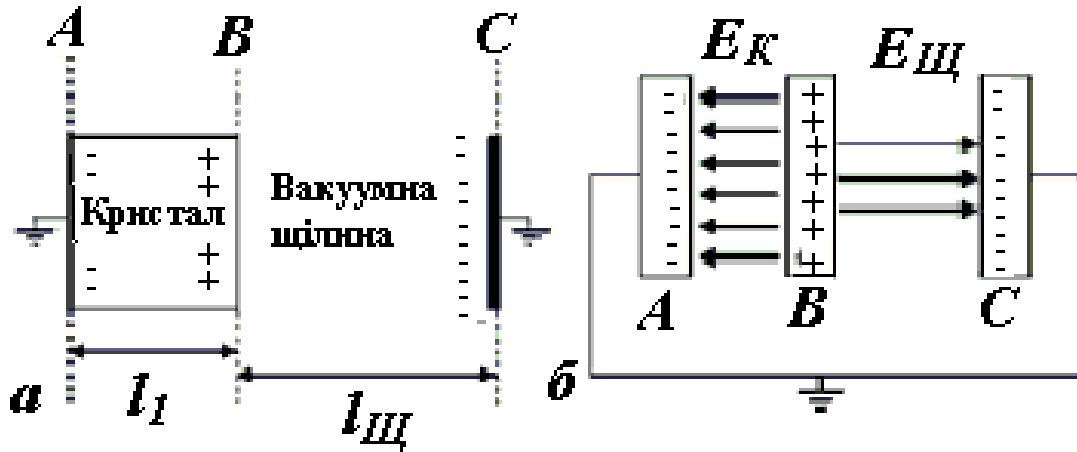


Рисунок 2.4 – (а) Схема однокристалльної системи з прикладом розподілу зарядів. Область, яка містить заряди поблизу площини В істотно збільшена. (б) Ескіз еквівалентних конденсаторів (а) показано в збільшеному вигляді на площині, В і С, не в масштабі

Звідси випливає, що:

$$Q_B = Q_A + Q_C. \quad (2.8)$$

Варто підкреслити, що значення Q_A та Q_C не обов'язково однакові, а їх відношення визначається відношенням ємностей щілини і кристалу,

$$\frac{Q_A}{Q_C} = \frac{\epsilon_K l_{щ}}{\epsilon_{щ} l_1}. \quad (2.9)$$

Використовуючи рівняння (2.8) і (2.9), можуть бути отримані вирази для Q_A та Q_C :

$$Q_A = \frac{Q_B}{1 + \frac{\epsilon_{щ} l_1}{\epsilon_K l_{щ}}}, \quad Q_C = \frac{Q_B}{1 + \frac{\epsilon_K l_{щ}}{\epsilon_{щ} l_1}}. \quad (2.10)$$

Достовірність рівнянь (2.9) і (2.10) може бути перевірено через розрахунок потенціалів між кристалом і щілиною за допомогою рівнянь (2.4) і (2.10) та відповідні ємності кристала і щілини; при цьому обидва потенціали еквівалентні рівнянню (2.5) кристалічної системи.

2.4 Висновки до розділу

1. В результаті аналізу основних фізичних процесів та математичних перетворень в піроелектричних матеріалах доведено перспективність напрямку – розробка радіовимірювального пристрою на основі піроелектричних перетворювачів, які характеризувалися б оптимальними метрологічними показниками і бути технологічно сумісними з цифровими пристроями обробки інформації.

2. Представлені рівняння можуть бути використані для прогнозування потенціалу та поля в ідеалізованому однокристальному піроелектричному перетворювачі.

3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РАДІОВИМІРЮВАЛЬНОГО ПРИБОРУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ

3.1 Переваги використання частотних перетворювачів на транзисторних структурах в радіовимірювальних приладах

Генераторні перетворювачі з від'ємним диференційним опором і вихідним частотним сигналом є основою для побудови радіовимірювальних приладів. Це зумовлено тим, що частотні перетворювачі поєднують у собі простоту і універсальність від аналогових приладів та точність і завадостійкість, які характерні для перетворювачів з кодовим виходом [30].

Частотні перетворювачі з від'ємним диференційним опором мають такі переваги.

1. Більша точність і чутливість вимірювання у порівнянні з амплітудними перетворювачами з шифраторами. Це пов'язано з тим, що частотній модуляції властива висока завадостійкість.

2. Стабільність, яка полягає в тому, що зразкові міри частоти (у вигляді кварцового генератора) стабільніші ніж зразкові міри електричної напруги (у вигляді напівпровідникових стабілізаторів напруги). Пояснюється це об'єктивними особливостями амплітудо–модульованих та частотно–модульованих сигналів.

3. Відсутність помилок через нечутливість частотно–модульованого сигналу до паразитних ЕРС, перехідних опорів і взаємовпливу каналів у комутаторах, що забезпечує можливість спрощення комутаторів.

4. Простота обробки інформації, яка включає в себе точне інтегрування за часу вихідного сигналу підсумовувальним лічильником електричних імпульсів (ідеальний інтегратор).

5. Велика вихідна потужність (визначає стабільність частоти генерації), яка зумовлює високу добротність. Наприклад, похибки під час використання реостатних, індуктивних і п'єзоелектричних амплітудних перетворювачів дорівнюють 0,02; 0,1; 1,0; 10 % їхні потужності вихідних сигналів відповідні похибкам 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-5} , 10^{-7} Вт.

6. Простота схеми частотного перетворювача та відсутність вимог за прецизійністю до її складових елементів.

7. Низька вартість частотного перетворювача та вимірювального приладу на його основі.

3.2 Математична модель частотного перетворювача на основі біполярної транзисторної структури

Вирішити проблему вимірювання потужності оптичного випромінювання дозволяє пристрій зображений на рисунок 3.1, та наведений в додатку Е. Принцип дії частотного перетворювача ґрунтується на дії потужності оптичного випромінювання, що приймається фотоелектричним, інфрачервоним сенсором, так змінюється вихідна напруга на сенсорі, що приводить до зміни ємнісної складової повного опору на електродах колектор–колектор структури біполярних транзисторів, що викликає зміну резонансної частоти коливального контуру.

В момент часу, коли на електродах колектор–колектор структури біполярних транзисторів виникає від’ємний диференційний опір, який приводить до виникнення електричних коливань в контурі (контур утворений паралельним включенням повного опору з ємнісним характером на електродах колектор–колектор структури біполярних транзисторів $VT1$, $VT2$ та пасивною індуктивністю L_1). При наступній дії зміни потужності оптичного випромінювання, яке приймається сенсором, змінюється ємнісна складова повного опору на електродах колектор–колектор структури біполярних транзисторів, а це викликає зміну резонансної частоти коливального контуру.

Враховуючи еквівалентну схему заміщення піроелектричного чутливого елемента $BK1$ розглянуту в попередньому розділі перетворимо схему рисунок 3.1 до схеми виду рисунок 3.2.

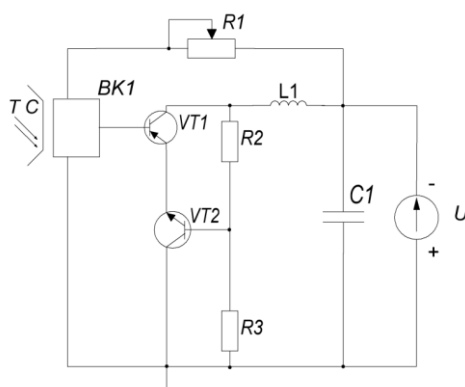


Рисунок 3.1 – Електрична схема частотного перетворювача на основі біполярної транзисторної структури

На рис. 3.2. зображена електрична схема частотного перетворювача на основі біполярної транзисторної структури з врахуванням еквівалентної схеми

заміщення піроелектричного сенсора, та наведена в додатку Ж.

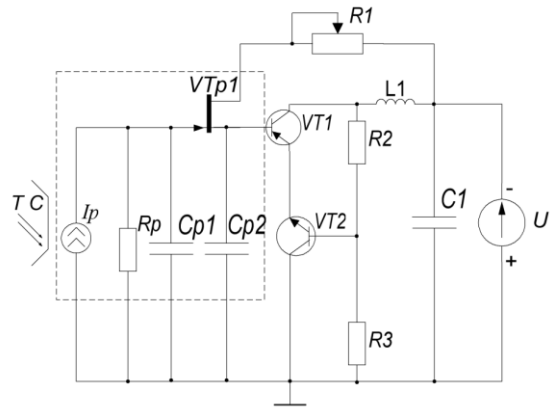


Рисунок 3.2 – Електрична схема частотного перетворювача на основі біполярної транзисторної структури з врахуванням еквівалентної схеми заміщення піроелектричного сенсора

Щоб вивчити роботу частотного перетворювача в динамічному режимі необхідно отримати залежність активної та реактивної складової комплексного опору електродів колектор–колектор структури, представимо схему пристрою, враховуючи еквівалентні схеми транзисторів, отримавши схему на рисунок 3.3.

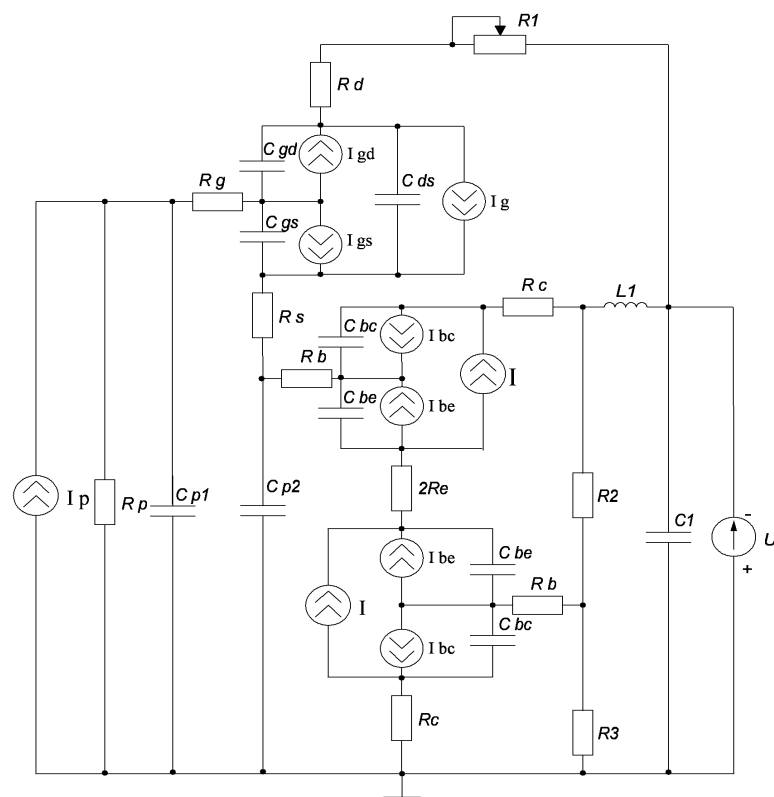


Рисунок 3.3 – Еквівалентна схема частотного перетворювача на основі біполярної транзисторної структури

Проведемо математичне моделювання схеми (рисунок 3.3) використовуючи метод змінних станів. Адже саме цей метод характеризується наступними перевагами: дає можливість скласти систему диференціальних рівнянь кола в найбільш компактній і раціональній формі; кількість рівнянь відповідає порядку кола; кожне рівняння з їх системи є рівнянням першого порядку; число рівнянь отриманих методом змінних станів часто виявляється меншим ніж число рівнянь, що отримуються при розрахунку кола іншими методами. Для зручності розрахунків перетворену еквівалентну схему частотного перетворювача подано на рисунок 3.4.

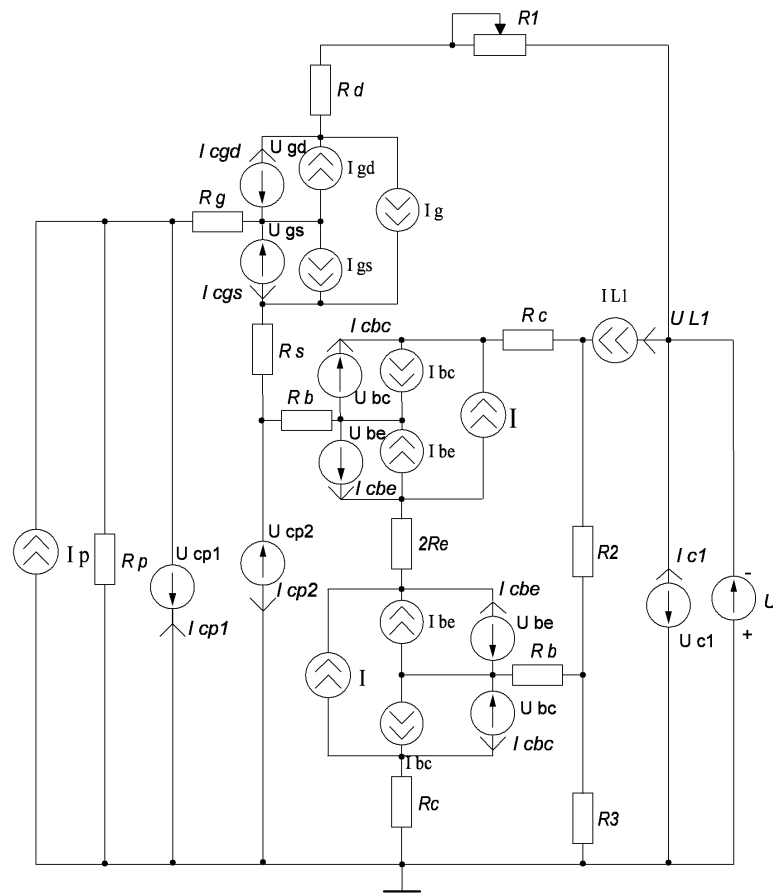


Рисунок 3.4 – Перетворена еквівалентна схема частотного перетворювача на основі біполярної транзисторної структури

Проведемо розрахунок даної схеми на основі методу змінних станів, склавши і розв'язавши систему диференціальних рівнянь.

$$\begin{aligned}
L \frac{di_L(t)}{dt} &= \frac{U_L(t) - U(t) + U_1(t)}{R_2}, \\
C_{GD} \frac{dU_{GD}(t)}{dt} &= I_G(t) + \frac{1}{R_D + R_1} \cdot U_D(t), \\
C_{GS} \frac{dU_{GS}(t)}{dt} &= \frac{1}{R_S} \cdot U_S(t) - I_G(t), \\
C_{BC} \frac{dU_{BC}(t)}{dt} &= I(t) - \frac{1}{R_C} \cdot U_C(t), \\
C_{BE} \frac{dU_{BE}(t)}{dt} &= \frac{1}{R_E} \cdot U_E(t) - I(t), \\
C_1 \frac{dU_1(t)}{dt} &= \frac{1}{R_3} \cdot U_3(t) + \frac{1}{2R_E} \cdot U_E(t) - \frac{1}{R} \cdot U(t) - \frac{1}{R_D + R_1} \cdot U_D(t), \\
C_{P1} \frac{dU_{P1}(t)}{dt} &= - \left(I_P(t) + \frac{1}{R_P} \cdot U_P(t) + \frac{1}{R_S} \cdot U_S(t) + \frac{1}{R_D + R_1} \cdot U_D(t) \right), \\
C_{P2} \frac{dU_{P2}(t)}{dt} &= \frac{1}{R_3} \cdot U_3(t) + \frac{1}{R_C} \cdot U_C(t) + \frac{1}{2R_E} \cdot U_E(t), \tag{3.1}
\end{aligned}$$

де $R_1, R_2, R_3, R_P, R_E, R_B, R_C, R_D, R_G, R_S$ – резистори, що характеризують опір ПЧЕ, емітера, бази, колектора, стоку, затвору і витоків відповідно; $C_{P1}, C_{P2}, C_1, C_{BE}, C_{BC}, C_{GD}, C_{GS}$ – конденсатори, що характеризують ємність переходів ПЧЕ, база–емітер, база–колектор, затвор–стік, затвор–витік; $I = \frac{I_{BE} - I_{BC}}{Q}$, $I_P, I_{BE}, I_{BC}, I_{GD}, I_{GS}, I_L$ – струми ПЧЕ, база–емітер, база–колектор, затвор–стік, затвор–витік і котушки індуктивності; $L = L_1$ – котушка індуктивності; $U, U_{BE}, U_{BC}, U_{GD}, U_{GS}, U_{P1}, U_{P2}, U_{C1}$ – напруга живлення та напруга на

відповідних конденсаторах. Струми база–емітер I_{BE} і база–колектор I_{BC} описуються виразами [67]:

$$I_{BE} = I_S \exp\left(\frac{U_{BE}}{NE \cdot V_t} - 1\right), \quad (3.2)$$

$$I_{BC} = I_S \exp\left(\frac{U_{BC}}{NC \cdot V_t} - 1\right), \quad (3.3)$$

$$I_S = I_{SS} \exp\left(\frac{U_{jS}}{NS \cdot V_t} - 1\right), \quad (3.4)$$

де Q – заряд в базі; $V_t = kT/q$; I_{SS} – зворотний струм р–п переходу підкладки; U_{BE} – напруга база–емітер; U_{BC} – напруга база–колектор; U_{jS} – контактна різниця потенціалів переходу колектор–підкладка; NE – коефіцієнт не ідеальності емітерного переходу; NC – коефіцієнт неідеальності колекторного переходу; NS – коефіцієнт не ідеальності переходу підкладки.

Система рівнянь (3.1) розв’язана у середовищі Maple 13. Система розв’язків матиме наступний вигляд (3.5). Використавши отриману систему рівнянь, визначимо вираз для активної складової повного опору частотного перетворювача.

Вираз для активної складової повного опору частотного перетворювача, що матиме вигляд:

$$R = \frac{U_1(t)}{U_{PI}(t)} \cdot R_P, \quad (3.5)$$

$$i_L(t) = \frac{t(U_L + U + U_1)}{LR_2},$$

$$U_{GD}(t) = \frac{t(U_D + I_G R_D + I_G R_1)}{C_{GD}(R_D + R_1)},$$

$$U_{GS}(t) = \frac{t(0,5U_S - I_g R_S)}{C_{GS}R_S},$$

$$U_{BC}(t) = \frac{t(IR_C - U_C)}{C_{BC}R_C},$$

$$U_{BE}(t) = \frac{t(0,5U_E - IR_E)}{C_{BE}R_E},$$

$$R = - \frac{C_P R_{P2} R_S (0,5U_E R_3 R + U_3 R_E R - U_D R_3 R_E R (R_D + R_1) - U R_3 R_E)}{C_1 R_3 R_E R (2U_P R_S + U_D R_P R_S (R_D + R_1) + U_S R_P)} . \quad (3.7)$$

Відомо, що [30]:

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} . \quad (3.8)$$

Графічні залежності відповідно формул (3.7), (3.8) наведено на рис.3.5 та рис.3.6.

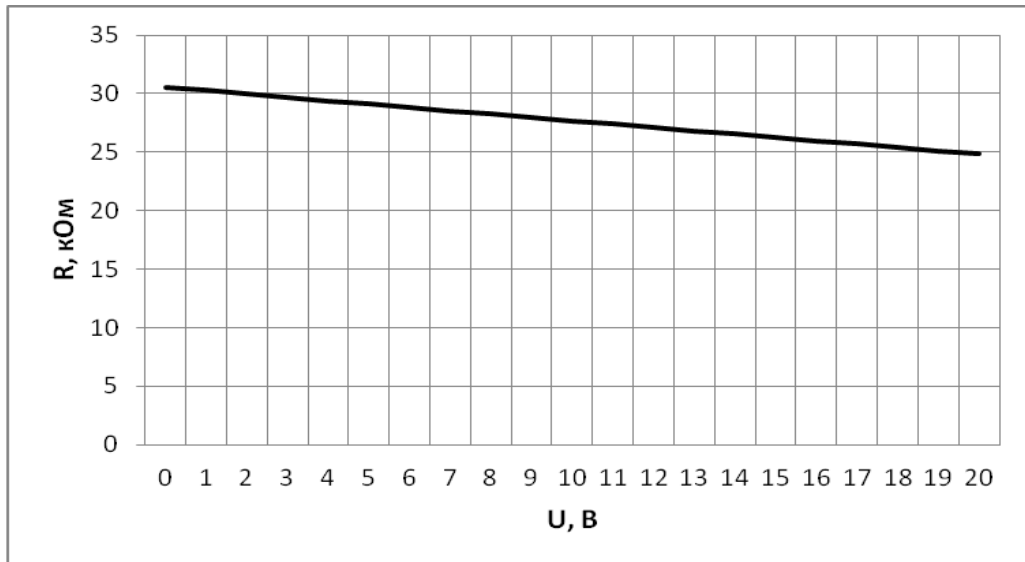


Рисунок 3.5 – Теоретична залежність активної складової повного комплексного опору від напруги живлення для частотного перетворювача на основі структури з біполярних транзисторів

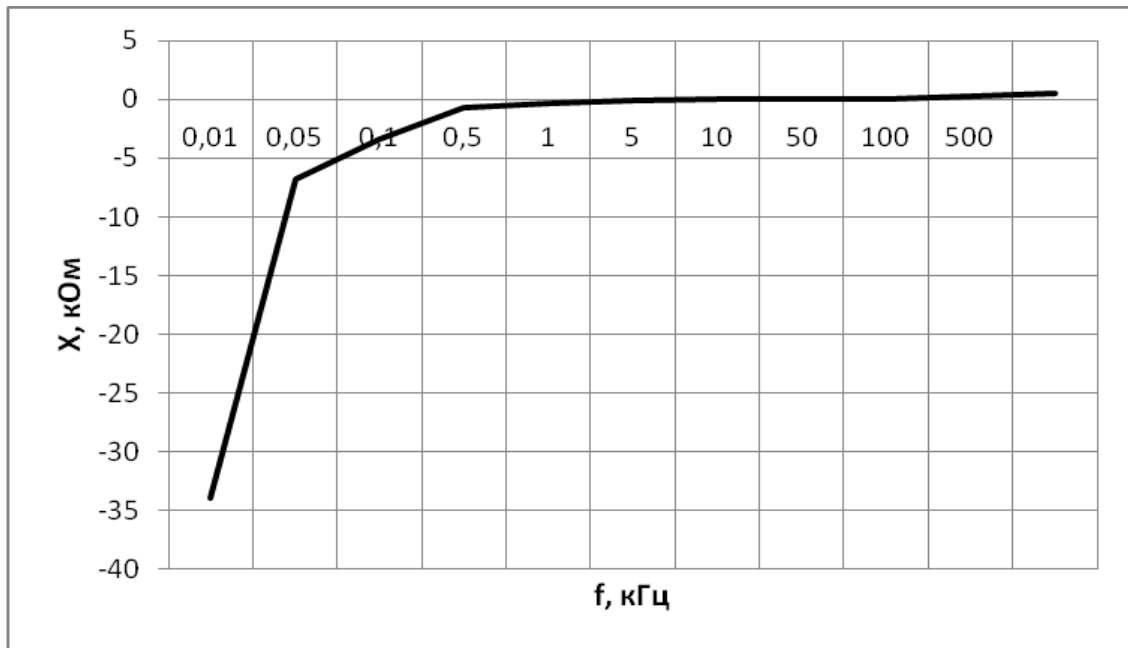


Рисунок 3.6 – Теоретична залежність реактивної складової повного комплексного опору від частоти для частотного перетворювача на основі структури з біполярних транзисторів

З рисунку 3.5 випливає, що теоретична залежність активної складової повного комплексного опору від напруги живлення для частотного перетворювача з біполярної транзисторної структури практично пряма з не великим спадом при зростанні напруги живлення. Опір змінюється від 30 кОм до 25 кОм при зміні напруги живлення від 0,5 В до 20 В.

З рисунку 3.6 можна зробити висновок, що теоретична залежність реактивної складової повного комплексного опору від частоти для частотного перетворювача з біполярної транзисторної структури має ємнісний характер і приймає значення від -35 кОм на частотах нижче 1 кГц. На частотах від 1 кГц до 1 МГц реактивна складова близька до нуля, оскільки ємнісна та індуктивна складова на цих частотах дуже малі. На частотах вище 1 МГц опір має індуктивний характер, зростаючи приймає значення до 40 кОм.

Враховуючи, що радіовимірювальний перетворювач визначення оптичної потужності є послідовним коливальним контуром, котрий можна представити з'єднанням еквівалентної ємності та пасивної індуктивності і реактивний опір пристрою визначається виразами [68]:

$$X = X_L - X_C, \quad (3.9)$$

$$X_C = X_L - \sqrt{Z^2 - R^2}, \quad (3.10)$$

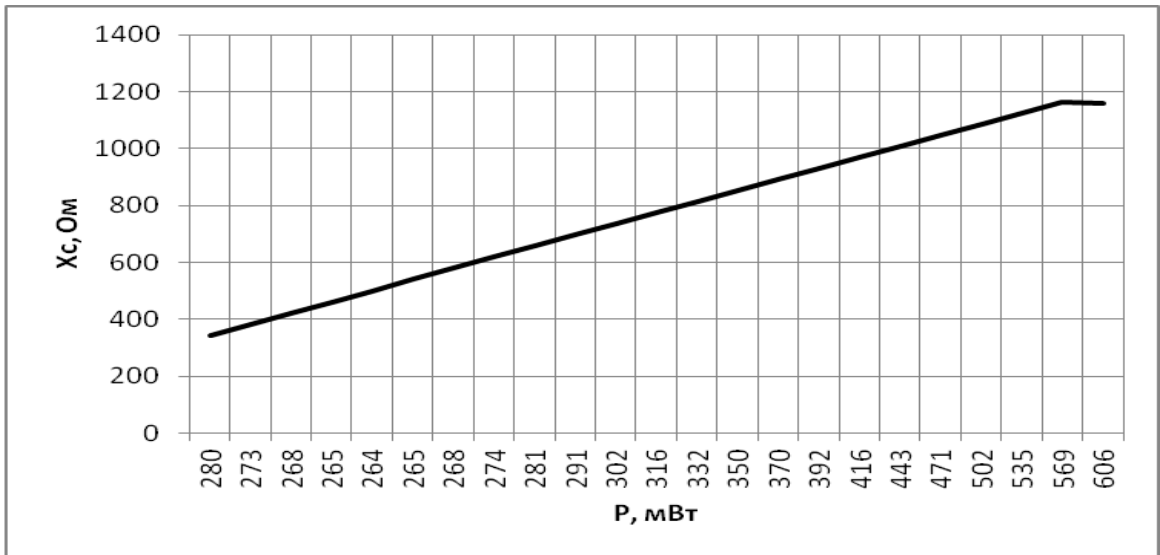


Рисунок 3.7 – Теоретична залежність ємнісної складової повного опору від потужності випромінювання для частотного перетворювача на основі біполярної транзисторної структури

Функція перетворення в загальному вигляді описується виразом (3.11):

$$F = \left[2\pi(LC_{EKB}(P))^{1/2} \right]^{-1}. \quad (3.11)$$

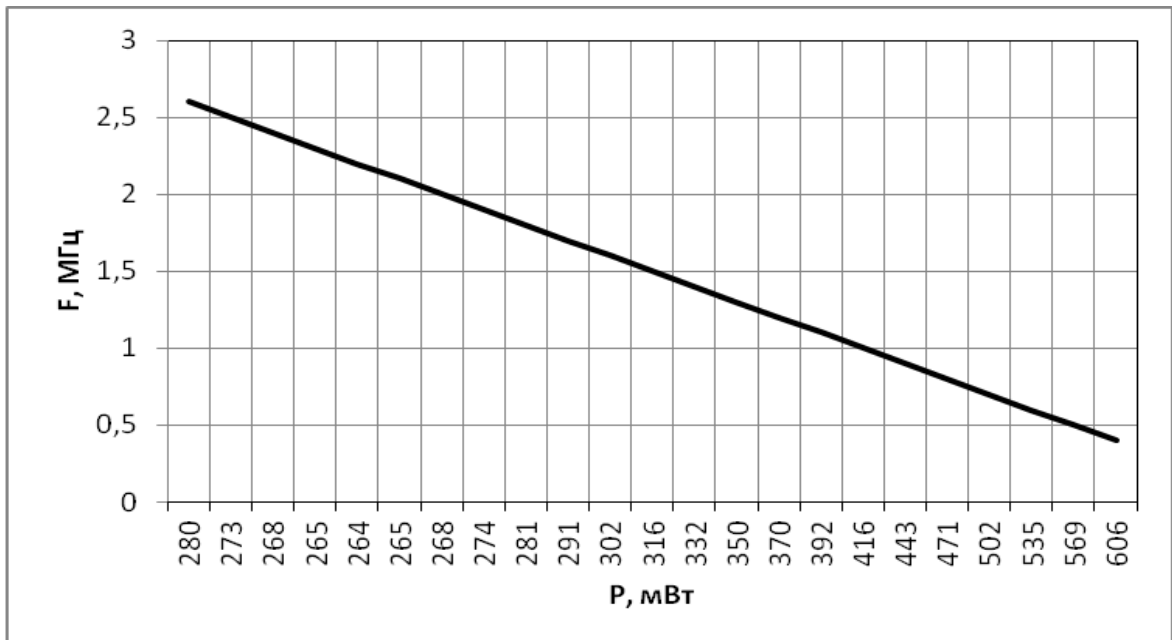


Рисунок 3.8 – Теоретичний графік функції перетворення для частотного перетворювача на основі біполярної транзисторної структури

На рисунок 3.8 зображено теоретичний графік функції перетворення для частотного перетворювача, який спадає прямопропорційно зменшенню випромінювання. Частота приймає значення від 0,35 до 2,56 МГц при потужності випромінювання від 265 мВт до 600 мВт.

3.3 Математична модель радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності на основі біполярної транзисторної структури та активного індуктивного елементу

Розглянемо математичну модель радіовимірювального перетворювача оптичної потужності на основі біполярної транзисторної структури та активного індуктивного елементу (рисунок 3.9) та наведена в додатку Ж. Враховуючи еквівалентну схему заміщення піроелектричного чутливого елемента ВК1 розглянуту в попередньому розділі перетворимо схему рисунок 3.9 до схеми представленої на рисунку 3.10.

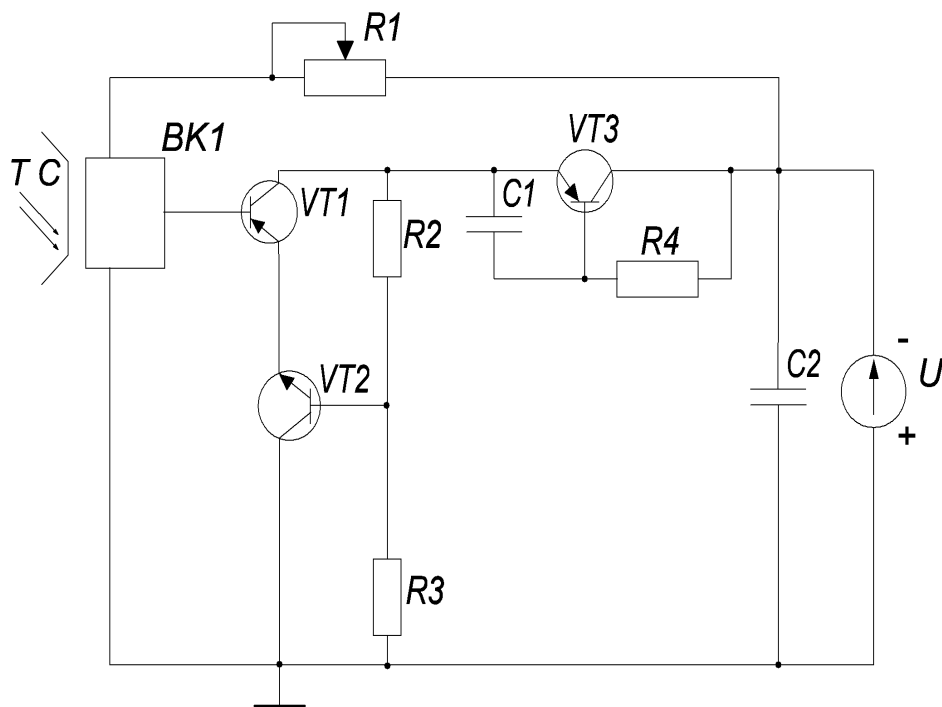


Рисунок 3.9 – Електрична схема радіовимірювального перетворювача оптичної потужності на основі біполярної транзисторної структури з активним індуктивним елементом

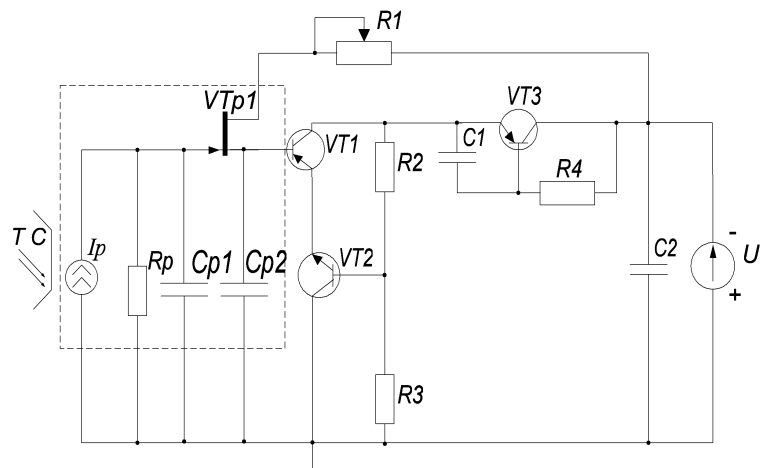


Рисунок 3.10 – Електрична схема радіовимірювального перетворювача оптичної потужності на основі біполярної транзисторної структури з активним індуктивним елементом з врахуванням еквівалентної схеми заміщення піроелектричного сенсора

Для вивчення роботи радіовимірювального перетворювача оптичної потужності в динамічному режимі необхідно отримати залежність активної та реактивної складової комплексного опору електродів колектор–колектор структури. Щоб це здійснити представимо схему пристрою враховуючи еквівалентні схеми транзисторів, отримавши схему на рисунок 3.11.

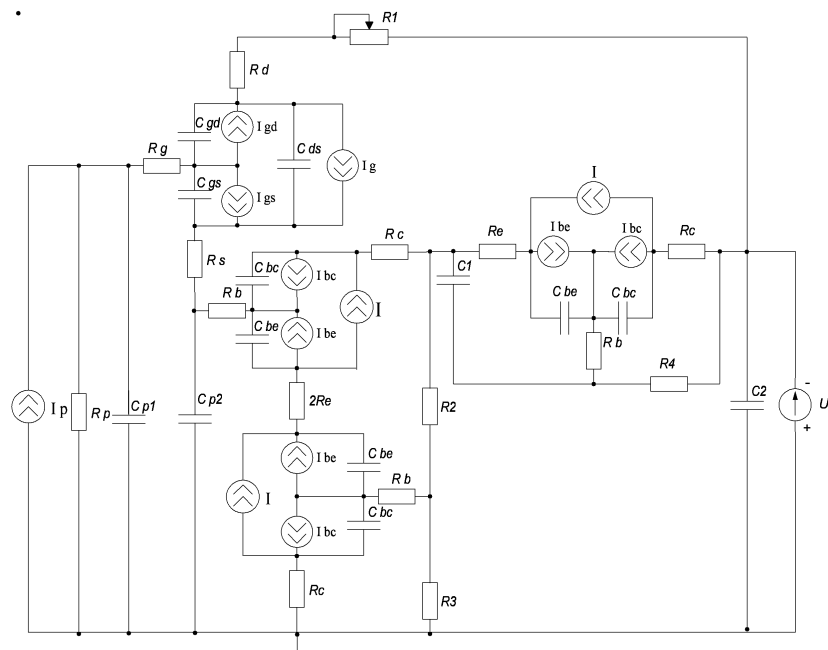


Рисунок 3.11 – Еквівалентна схема радіовимірювального перетворювача оптичної потужності на основі біполярної транзисторної структури з активним індуктивним елементом

Проведено математичне моделювання схеми (рисунок 3.11) використовуючи метод змінних станів. Для зручності розрахунків перетворену еквівалентну схему радіовимірювального перетворювача оптичної потужності представлено на рисунку 3.12.

Проведемо розрахунок даної схеми на основі методу змінних станів, склавши і розв'язавши систему диференціальних рівнянь. Причому $R_1, R_2, R_3, R_p, R_e, R_b, R_c, R_d, R_g, R_s$ – резистори, що характеризують опір ПЧЕ, емітера, бази, колектора, стоку, затвору і витоків відповідно; $C_{p1}, C_{p2}, C_1, C_{be}, C_{bc}, C_{gd}, C_{gs}$ – конденсатори, що характеризують ємність переходів ПЧЕ, база–емітер, база–колектор, затвор–стік, затвор–витік; $I = \frac{I_{BE} - I_{BC}}{Q}$, $I_p, I_{BE}, I_{BC}, I_{GD}, I_{GS}, I_L$ – струми ПЧЕ, база–емітер, база–колектор, затвор–стік, затвор–витік і котушки індуктивності; $L = L_1$ – котушка індуктивності; $U, U_{BE}, U_{BC}, U_{GD}, U_{GS}, U_{p1}, U_{p2}, U_{c1}$ – напруга живлення та напруга на відповідних конденсаторах.

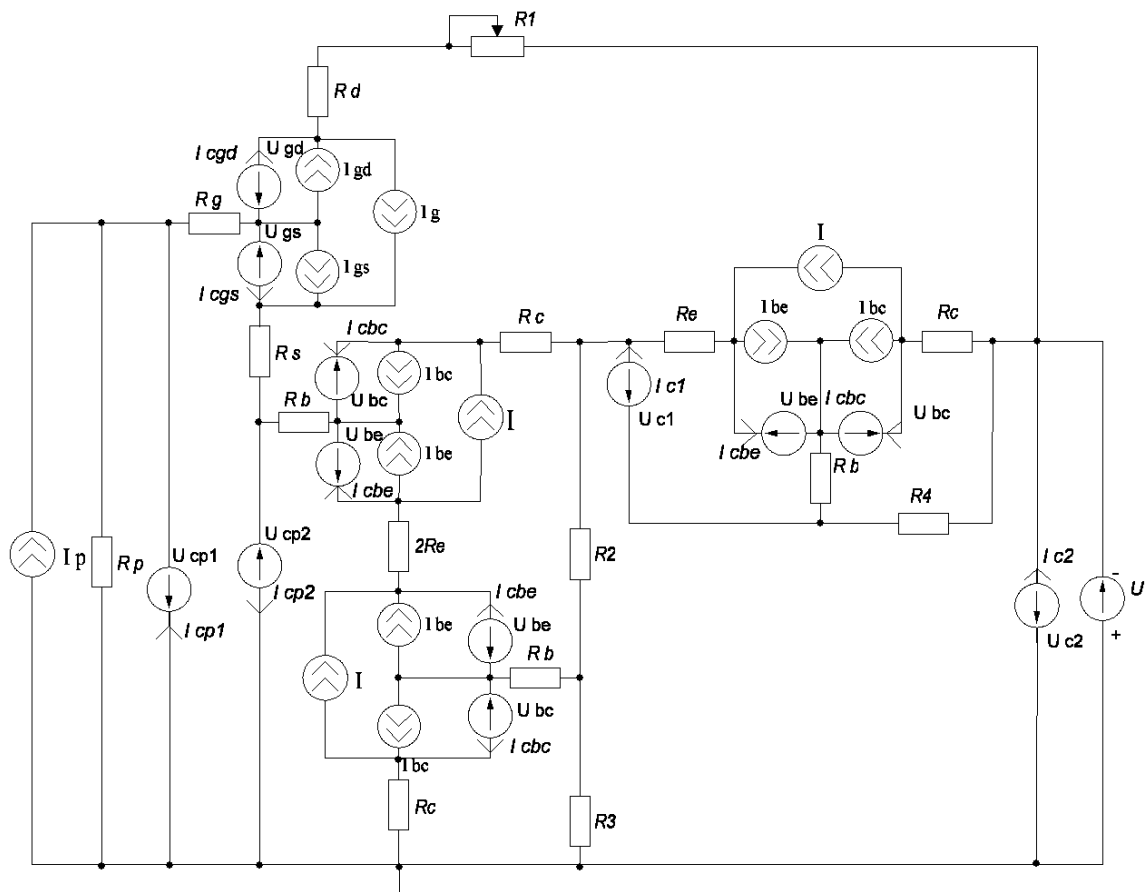


Рисунок 3.12 – Перетворена еквівалентна схема радіовимірювального перетворювача оптичної потужності на основі біполярної транзисторної структури з активним індуктивним елементом

Струми база–емітер I_{BE} і база–колектор I_{BC} описуються виразами (3.2), (3.3), (3.4).

$$\begin{aligned}
 C_{GD} \frac{dU_{GD}(t)}{dt} &= I_G(t) + \frac{1}{R_D + R_1} \cdot U_D(t), \\
 C_{GS} \frac{dU_{GS}(t)}{dt} &= \frac{1}{R_S} \cdot U_S(t) - I_G(t), \\
 C_{BC} \frac{dU_{BC}(t)}{dt} &= I(t) - \frac{1}{R_C} \cdot U_C(t), \\
 C_{BE} \frac{dU_{BE}(t)}{dt} &= \frac{1}{R_E} \cdot U_E(t) - I(t), \\
 C_1 \frac{dU_1(t)}{dt} &= \frac{1}{R_E} \cdot U_E(t) - \frac{1}{R_2} \cdot U_2(t) - \frac{1}{R_C} \cdot U_C(t), \\
 C_2 \frac{dU_2(t)}{dt} &= \frac{1}{R} \cdot U(t) + \frac{1}{R_4} \cdot U_4(t) - \frac{1}{R_C} \cdot U_C(t) - \frac{1}{R_1} \cdot U_D(t), \\
 C_{P1} \frac{dU_{P1}(t)}{dt} &= - \left(I_P(t) + \frac{1}{R_P} \cdot U_P(t) + \frac{1}{R_S} \cdot U_S(t) + \frac{1}{R_D + R_1} \cdot U_D(t) \right), \\
 C_{P2} \frac{dU_{P2}(t)}{dt} &= \frac{1}{R_3} \cdot U_3(t) + \frac{1}{R_C} \cdot U_C(t) + \frac{1}{2R_E} \cdot U_E(t),
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

Розв'яжемо отриману систему рівнянь у середовищі Maple 13. Система розв'язків матиме такий вигляд.

$$U_{GD}(t) = \frac{t(U_D + I_G R_D + I_G R_1)}{C_{GD}(R_D + R_1)},$$

$$U_{GS}(t) = \frac{t(0,5U_S - I_g R_S)}{C_{GS} R_S},$$

$$\begin{aligned}
U_{BC}(t) &= \frac{t(IR_C - U_C)}{C_{BC}R_C}, \\
U_{BE}(t) &= \frac{t(0,5U_E - IR_E)}{C_{BE}R_E}, \\
U_1(t) &= \frac{t}{C_1} \left(\frac{U_E R_2 R_C - U_2 R_E R_C - U_C R_2 R_E}{R_E R_2 R_C} \right), \\
U_2(t) &= \frac{t}{C_2} \left(\frac{UR_4 R_1 R_C + U_4 R R_1 R_C - U_C R_4 R_1 R - U_D R_4 R R_C}{R R_4 R_1 R_C} \right), \\
U_{P1}(t) &= \frac{-t(2U_P R_S + U_D R_P R_S (R_D + R_1) + U_S R_P)}{C_P R_P R_S}, \\
U_{P2}(t) &= \frac{t(U_3 R_C R_E + U_C R_3 R_E + U_E R_3 R_C)}{C_{P2} R_3 R_C R_E}.
\end{aligned} \tag{3.13}$$

Розв'язавши систему рівнянь (3.13), отримаємо вираз для активної складової повного опору радіовимірювального перетворювача оптичної потужності, що матиме вигляд:

$$R = \frac{U_2(t)}{U_{P1}(t)} \cdot R_P, \tag{3.14}$$

$$R = - \frac{R_{P^2} C_P R_S (U \cdot 1R + U_4 \cdot 1R_4 - U_C \cdot 1R_C - U_D \cdot 1R_1)}{C_2 (2U_P R_S + U_D R_P R_S (R_D + R_1) + U_S R_P)}. \tag{3.15}$$

Графічна залежність активної складової повного опору визначено згідно формули (3.15) представлено на рис.3.13.

З рисунку 3.13 видно, що теоретична залежність активної складової повного комплексного опору від напруги живлення для частотного

перетворювача з біполярної транзисторної структури пряма з спадом при зростанні напруги живлення. Опір змінюється від 23,4 кОм до 19,8 кОм при зміні напруги живлення від 0,5 В до 19,5 В.

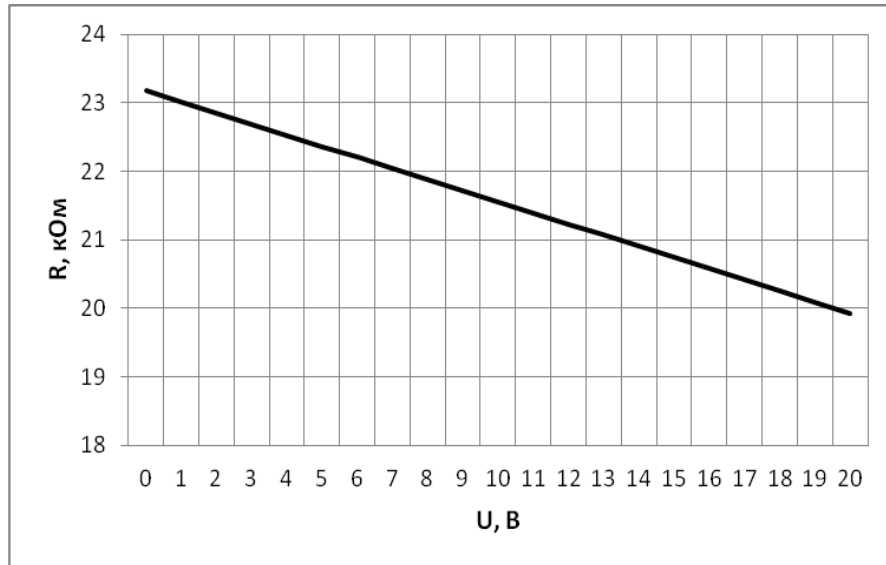


Рисунок 3.13 – Теоретична залежність активної складової повного комплексного опору від напруги живлення для радіовимірювального перетворювача оптичної потужності з біполярної транзисторної структури з активним індуктивним елементом

Графічна залежність реактивної складової повного опору розрахована відповідно до формули (3.8) наведено на рис.3.14.

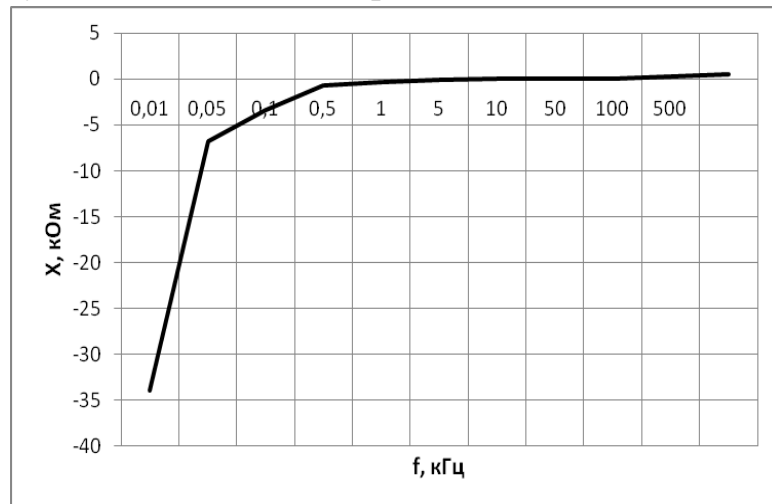


Рисунок 3.14 – Теоретична залежність реактивної складової повного комплексного опору від частоти для радіовимірювального перетворювача оптичної потужності з біполярної транзисторної структури з активним індуктивним елементом

З рисунку 3.14 видно, що теоретична залежність реактивної складової повного комплексного опору від частоти для частотного перетворювача з біполярної транзисторної структури має ємнісний характер і приймає значення від -35 кОм на частотах нижче 1 кГц. На частотах від 1 кГц до 1 МГц реактивна складова близька до нуля, оскільки ємнісна та індуктивна складова на цих частотах дуже малі. На частотах вище 1 МГц опір має індуктивний характер, зростаючи приймає значення до 40 кОм.

Величина індуктивності активного індуктивного елементу буде дорівнювати:

$$L = C_1 \cdot R_4^2. \quad (3.16)$$

Функція перетворення в загальному вигляді описується рівняннями:

$$F = \left[2\pi(LC_{EKB}(P))^{1/2} \right]^{-1}. \quad (3.17)$$

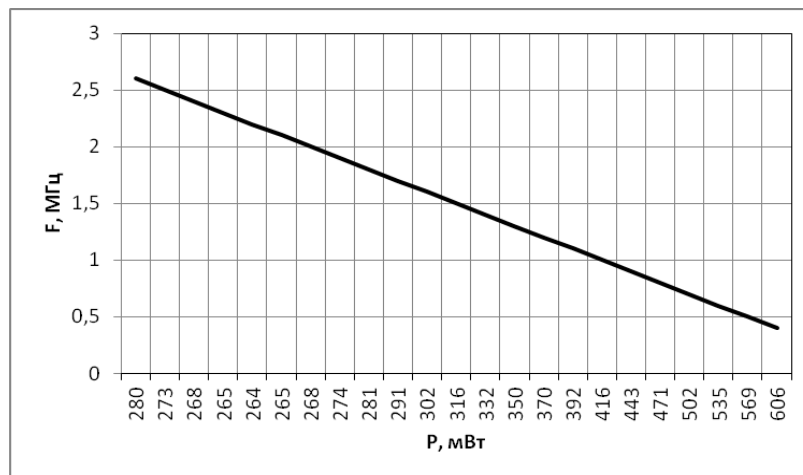


Рисунок 3.15 – Теоретичний графік функції перетворення для радіовимірювального перетворювача оптичної потужності з біполярної транзисторної структури з активним індуктивним елементом

На рисунку 3.15 наведено теоретичний графік функції перетворення для частотного перетворювача, який спадає прямопропорційно зменшенню випромінювання. Частота приймає значення від $0,46$ МГц до $2,65$ МГц при потужності випромінювання від 290 мВт до 600 мВт.

3.4 Аналіз чутливості радіовимірювальних приладів на основі радіовимірювального перетворювача оптичної потужності

Одна з найбільш важливих характеристик радіовимірювальних приладів це чутливість. Чутливість – властивість засобу вимірювання, що визначається відношенням вихідного сигналу цього пристрою до зміни вимірюваної величини, що його викликає.

Чутливість визначиться за формулою:

$$S_P^F = \frac{P}{F} \cdot \frac{dF}{dP} = -0,5 \frac{P}{C_{EKB}(P)} \cdot \frac{dC_{EKB}(P)}{dP} .$$

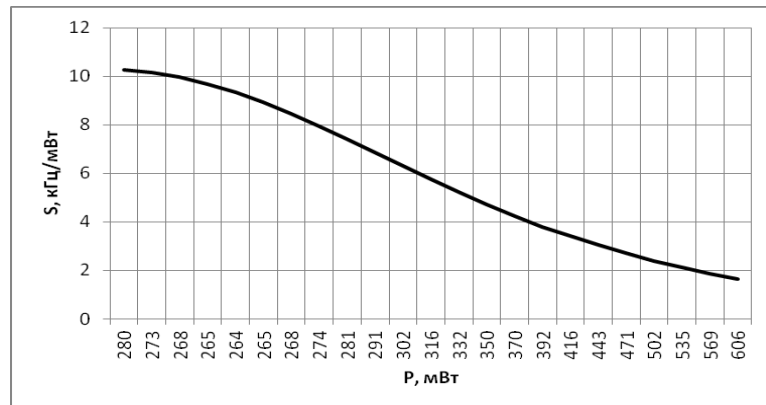


Рисунок 3.16 – Теоретична залежність чутливості від потужності випромінювання для частотного перетворювача на основі біполярної транзисторної структури

3.5 Висновки до розділу

1. Здійснено побудову математичної моделі перетворювача на основі транзисторної структури, що складається з структури біполярних транзисторів.

2. Представлено еквівалентні схеми пристрою, враховуючи еквівалентні схеми транзисторів, в результаті чого було отримано еквівалентні та спрощені еквівалентні схеми частотних перетворювача.

3. Визначено аналітичні вирази для функції перетворення і чутливості. Отже, в нашому випадку чутливість складає до 15 кГц/мВт, а у відомих приладів для вимірювання потужності оптичного випромінювання 4 мВ, проте часто раціональніше вимірювати чутливість в кГц/мВт, оскільки еталонну одиницю вимірювання в 1 Гц іноді легше отримати ніж 1 мВ.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІОВИМІРЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ

4.1 Методика проведення вимірювань потужності оптичного випромінювання

На рис. 4.1. зображена вимірювальна установка, окрім радіовимірювального перетворювача оптичної потужності, містить джерело живлення, джерело подачі напруги керування, джерело оптичного випромінювання, частотомір, осцилограф, амперметр, вольтметр, та контролюючий потужність оптичного випромінювання прилад ОМЗ-65 та наведена в додатку К. Ватметр поглинутої потужності оптичний.

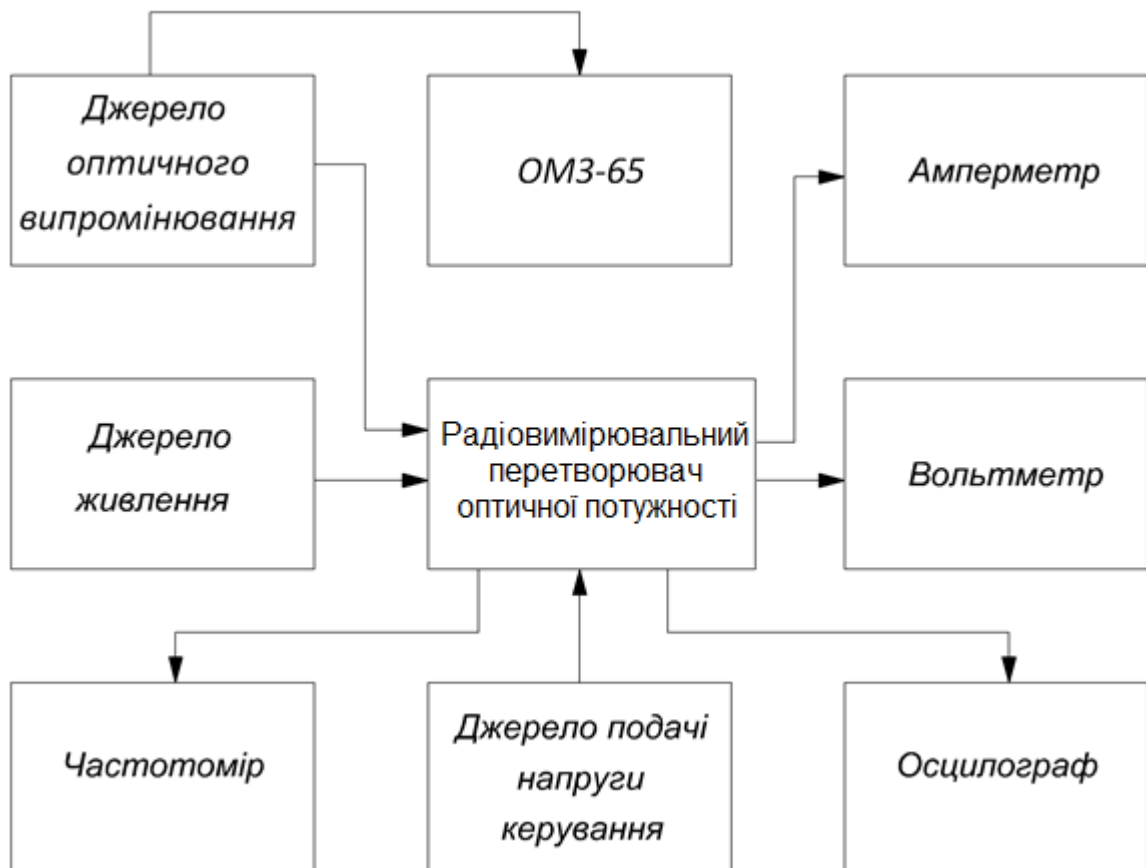


Рисунок 4.1 – Блок-схема методики проведення вимірювань потужності оптичного випромінювання

Вимірювання відбуваються наступним чином. Джерело оптичного випромінювання створює відповідне випромінювання, яке, в свою чергу,

вимірюється ватметром поглинутої оптичної потужності для підтвердження точності та визначення похибки вимірювань. В той же час, спрацьовує оптико–частотний перетворювач, що вимірює потужність оптичного випромінювання. Джерело живлення та джерело подачі наруги керування використовуються для забезпечення роботи схеми. Частотомір необхідний для вимірювання частоти на виході частотного перетворювача, адже вимірювана потужність оптичного випромінювання пропорційно до частоти. Осцилограф допомагає налаштувати перетворювач на необхідну чутливість та контролювати сигнал на його виході. Вольтметр та амперметр потрібні для вимірювання напруги і струму відповідно.

4.2 Експериментальне дослідження вольт–амперної характеристики радіовимірювального перетворювача оптичної потужності

Існує потреба в теоретичному і практичному доведенні того, що на електродах колектор–колектор біполярних транзисторів та електродах емітер–затвор біполярного і двозатворного польового МДН транзисторів є від'ємний диференційний опір, що відповідає спадаючій ділянці вольт–амперної характеристики (ВАХ), тому в результаті досліджень була отримана: ВАХ радіовимірювального перетворювача оптичної потужності на основі структури, що складається з структури біполярних транзисторів (рисунок 4.2) та наведена в додатку Л.1. та ВАХ частотного перетворювача на основі структури, що складається з структури біполярного та двозатворного польового МДН транзисторів (рисунок 4.3) та наведена в додатку Л.2.

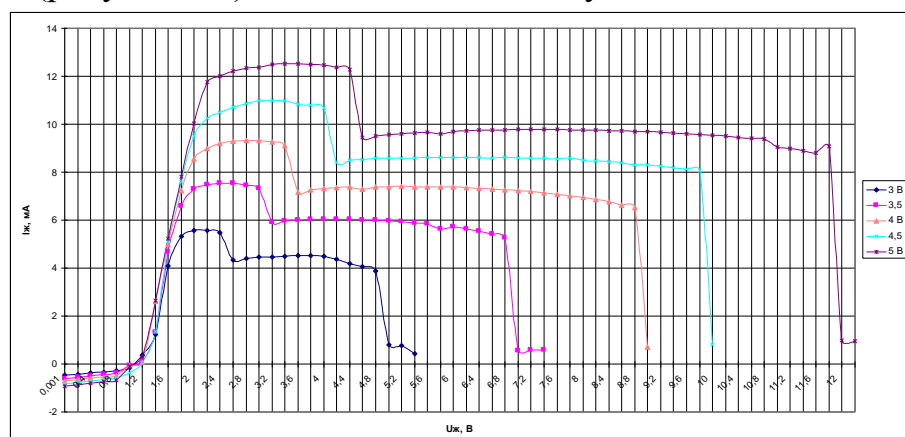


Рисунок 4.2 – ВАХ частотного перетворювача на основі структури на основі структури біполярних транзисторів при різних напругах живлення та керування

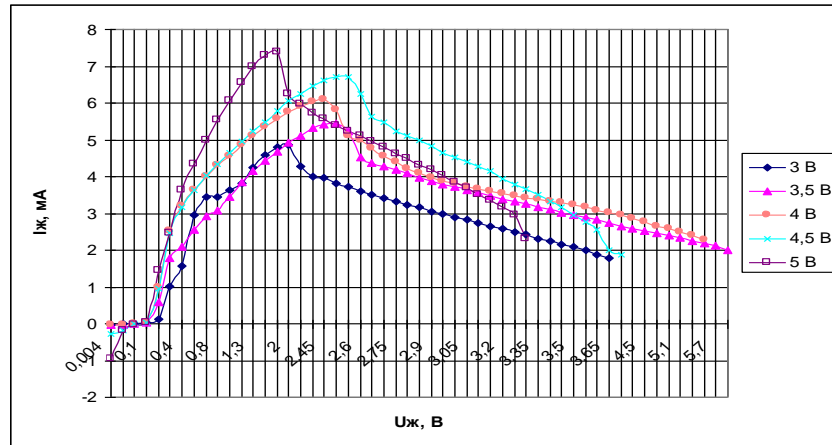


Рисунок 4.3 – ВАХ частотного перетворювача на основі структури на основі біполярного та двозатворного польового МДН транзисторів

4.3 Експериментальне дослідження повного комплексного опору частотних перетворювачів

Експериментальні дослідження для частотного перетворювача на основі структури, що складається з структури біполярних транзисторів показали, що активна складова повного комплексного опору кола приймає від'ємне значення, що подано на рисунок 4.4., та наведена в додатку Л.3. В свою чергу, а реактивна складова повного комплексного опору кола має ємнісний характер (рисунок 4.5).

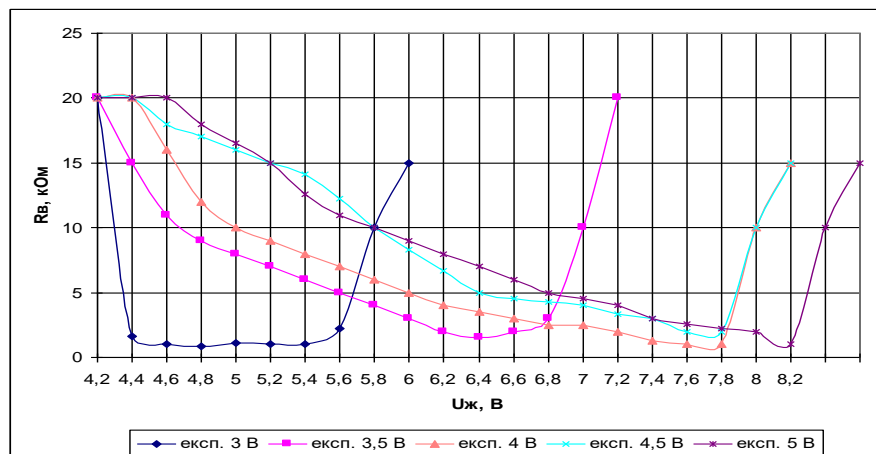


Рисунок 4.4 – Експериментальні (при різних напругах керування 3 В; 3,5 В; 4 В; 4,5 В; 5 В) залежності активної складової повного комплексного опору від напруги живлення для частотного перетворювача з структури біполярних транзисторів

Як видно з рисунку 4.4, експериментальна залежність активної складової повного комплексного опору від напруги живлення має вигляд кривої, що спадає, а потім знов зростає. Рисунок 4.5 показує, що зі збільшенням напруги живлення реактивна складова повного комплексного опору поступово зменшується (приблизно до рівня 4 кОм).

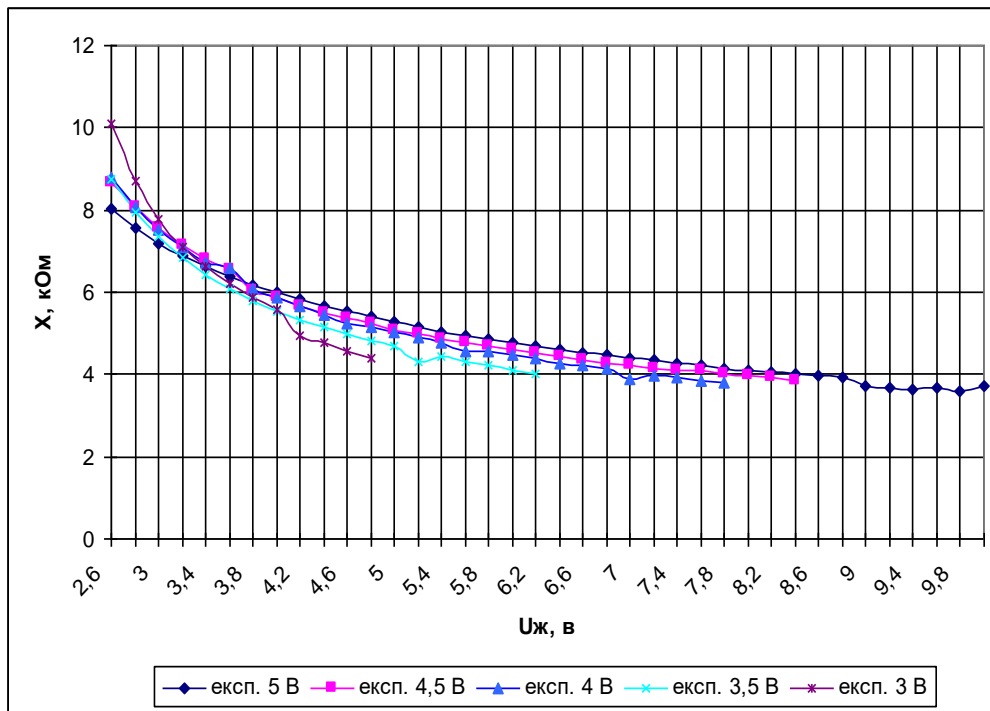


Рисунок 4.5 – Експериментальні (при різних напругах керування 3 В; 3,5 В; 4 В; 4,5 В; 5 В) залежності реактивної складової повного комплексного опору від напруги живлення для частотного перетворювача з структури біполярних транзисторів

Теоретичні та експериментальні дослідження для радіовимірювального перетворювача оптичної потужності на основі структури, що складається з структури біполярного та двозатворного польового МДН транзисторів показали, що активна складова повного комплексного опору кола приймає від'ємне значення, що подано на рисунку 4.6. , та наведена в додатку Л.4. В свою чергу, реактивна складова повного комплексного опору кола має ємнісний характер (рисунку 4.7).

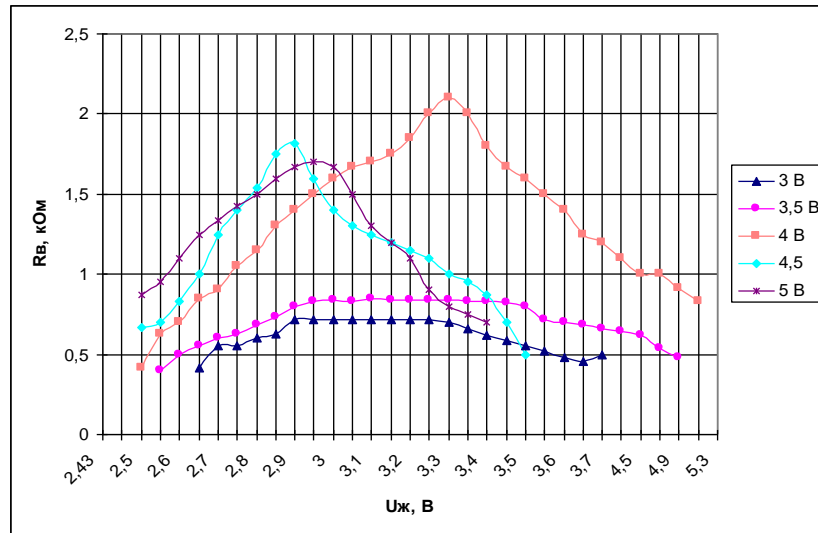


Рисунок 4.6 – Експериментальні (при різних напругах керування 3 В; 3,5 В; 4 В; 4,5 В; 5 В) залежності активної складової повного комплексного опору від напруги живлення для частотного перетворювача з структури біполярного та двозатворного польового МДН транзисторів

Як видно з рисунку 4.6 експериментальна залежність активної складової повного комплексного опору від напруги живлення має вигляд кривої, що зростає, а потім спадає.

На рисунку 4.7 показано, що зі збільшенням напруги живлення реактивна складова повного комплексного опору поступово зменшується (приблизно до рівня 1 кОм).

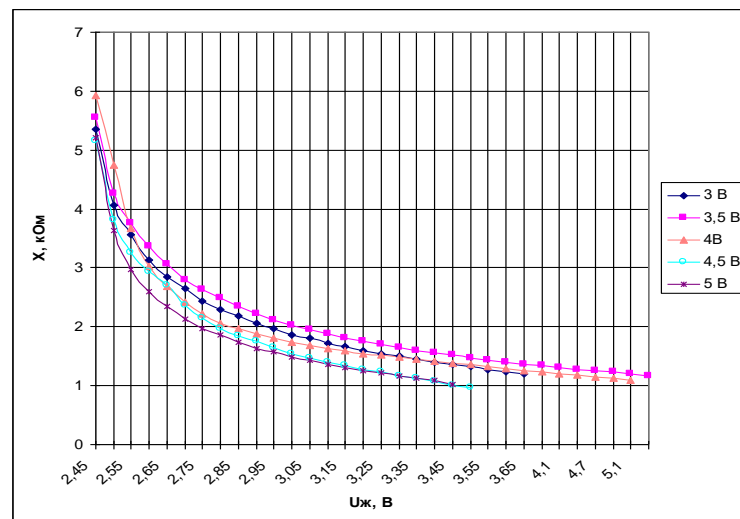


Рисунок 4.7 – Експериментальні (при різних напругах керування 3 В; 3,5 В; 4 В; 4,5 В; 5 В) залежності реактивної складової повного комплексного опору від напруги живлення для частотного перетворювача з структури біполярного та двозатворного польового МДН транзисторів

4.4 Експериментальне дослідження залежності частоти генерації від напруги живлення радіовимірювального перетворювача оптичної потужності

Підключення пасивної індуктивності до виводів колектор–колектор на основі структури, що складається з структури біполярних транзисторів, при від'ємних значеннях повного комплексного опору (при компенсації втрат енергії в коливальному контурі), дозволяє створити генератор електричних коливань. При дії зміни оптичного випромінювання на сенсор здійснюється зміна активної та реактивної складової повного комплексного опору, що в свою чергу, змінює частоту генерації. Експериментальна залежність частоти генерації від напруги живлення представлена на рисунку 4.8 і має практично лінійний характер.

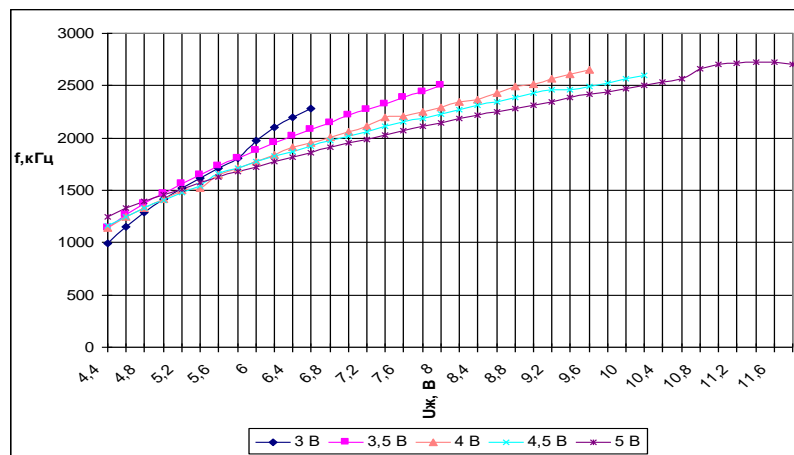


Рисунок 4.8 – Експериментальна залежність частоти генерації від напруги живлення для радіовимірювального перетворювача оптичної потужності на основі структури біполярних транзисторів

Підключення пасивної індуктивності до виводів емітер–затвор на основі структури, що складається з структури біполярного та двозатворного польового МДН транзисторів, при від'ємних значеннях повного комплексного опору (при компенсації втрат енергії в коливальному контурі), дозволяє створити генератор електричних коливань. При дії оптичного випромінювання на перетворювач здійснюється зміна активної та реактивної складової повного комплексного опору, що в свою чергу, змінює частоту генерації. Експериментальна залежність частоти генерації від напруги живлення представлена на рисунку 4.9 і має практично лінійний, але зростаючий характер.

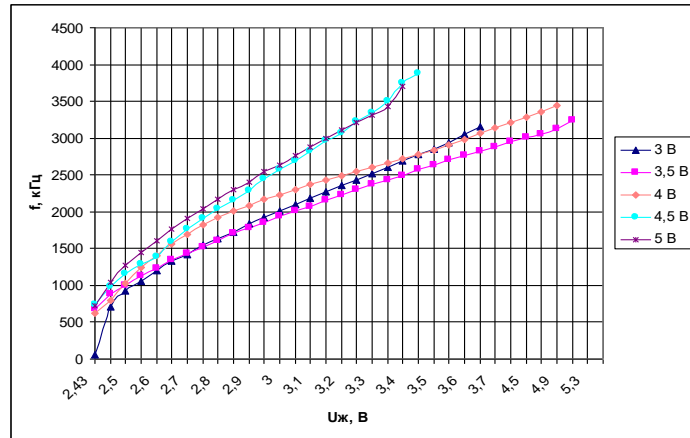


Рисунок 4.9 – Експериментальна залежність частоти генерації від напруги живлення для радіовимірювального перетворювача оптичної потужності на основі структури біполярного та двозатворного польового МДН транзисторів

4.5 Експериментальне дослідження залежності частоти генерації від потужності оптичного випромінювання радіовимірювального перетворювача оптичної потужності

На рисунку 4.10 подано експериментальну залежність частоти генерації від оптичного випромінювання частотного перетворювача з структури біполярних транзисторів, що має практично лінійний характер. Причому, частота змінюється в межах від 0,43 до 3,2 МГц, а потужність випромінювання від 255 мВт до 625 мВт.

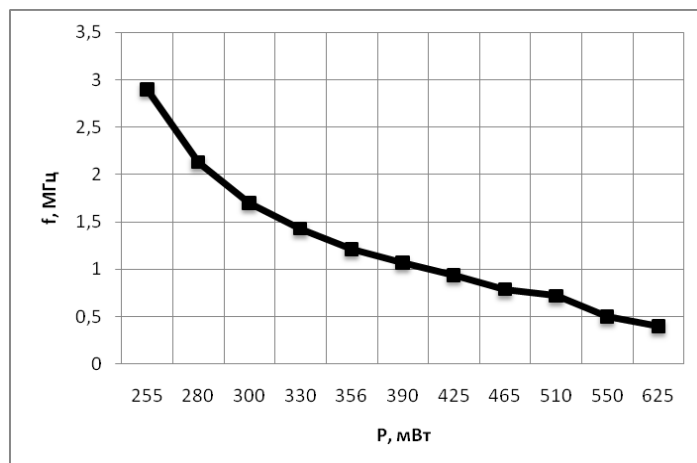


Рисунок 4.10 – Експериментальна залежність частоти генерації від оптичного випромінювання для радіовимірювального перетворювача оптичної потужності на основі структури біполярних транзисторів

4.6 Аналіз похибки вимірювання потужності оптичного випромінювання

Достовірність інформації про властивості досліджуваного об'єкту визначаються як вибором величин, які характеризують об'єкт, так і похибкою, яка існує при вимірюванні цих величин.

Вибір величин, які необхідно виміряти, здійснюється на основі знань про досліджуваний об'єкт, які отримуються у результаті проведених раніше досліджень. Дійсно, при вимірюванні параметрів сигналів необхідно заздалегідь встановити чи є даний сигнал імпульсним або неперервним, детермінованим або випадковим. Результатом такого дослідження є віднесення сигналу до одного із класів, після чого стає відомою сукупність величин, які характеризують цей клас. Числові значення цих параметрів і підлягають вимірюванню [86].

Якщо сигнал детермінований (наприклад, періодичний), то за допомогою вольтметрів різного типу можна виміряти середнє, середньовипрямлене, ефективне або пікове значення цього сигналу, за допомогою частотоміра – частоту, за допомогою відповідних аналізаторів – амплітудно–частотний, фазочастотний спектр тощо [87].

Якщо сигнал є випадковим, то він описується за допомогою таких характеристик, як закони розподілу ймовірності його миттєвих значень, кореляційною функцією або енергетичним спектром, вимірювання кожного із цих параметрів потребує застосування спеціальних приладів.

Наведені міркування свідчать про важливість знань про особливості досліджуваного об'єкту у виборі методів і засобів вимірювання і про необхідність узгодження властивостей об'єкта із властивостями використаних при його дослідженні приладів. Недотримання цієї умови є причиною зниження достовірності отриманої при вимірюванні інформації [86].

Другою важливою причиною, яка впливає на достовірність інформації є існування похибок вимірювання. Похибки існують при будь-якому вимірюванні. Виходячи з практичних потреб, вирішують яку необхідно отримати точність. З цього можна зробити висновок, що вимірювання характеризуються не тільки результатом, який є числовим значенням вимірюваної величини, а також похибкою, яка при цьому отримана. Причин появи похибок є багато і вони мають різну природу [87]:

– із самим вимірюваним об'єктом – недостатніми знаннями властивостей об'єкта, існуванням перешкоджаючих компонентів (шуми, завади) у складі досліджуваного сигналу тощо;

– з недосконалістю методів і засобів вимірювання (так звані методичні і апаратні або інструментальні похибки) – відхиленням параметрів схем від номіналу за рахунок старіння, прогріву тощо, існуванням шумів, які виникають в самих приладах;

– з впливом умов проведення вимірів і зміною невимірюваних параметрів об'єкта (температура, тиск, вологість в приміщенні, існування вібрації, зовнішніх електромагнітних і магнітних полів, нестабільність джерел живлення);

– з суб'єктивними (особистими) якостями експериментатора, які виникають з послабленням уваги, які також залежать від його тренуваності, ступенем стомлення тощо. До цього відносяться причини, які призводять до появи грубих помилок (промахів);

– з недосконалістю систем передачі розміру одиниці вимірювання від еталона до робочого приладу.

Розглянемо докладніше джерела появи похибок. Зауважимо, що похибки вимірювального каналу радіовимірювального приладу потужності оптичного випромінювання, складаються з похибок чутливого елемента, частотного перетворювача і частотоміра.

В загальному вигляді похибка вимірювального каналу визначиться виразом [86]:

$$\delta = \sqrt{\delta_{\text{ЧЕ}}^2 + \delta_{\text{ЧП}}^2 + \delta_{\text{Ч}}^2} . \quad (4.1)$$

де $\delta_{\text{ЧЕ}}, \delta_{\text{ЧП}}, \delta_{\text{Ч}}$ – відносні похибки чутливого елемента, частотного перетворювача та частотоміра відповідно. Підставивши складові частини вказаних похибок та використавши потрібний довірчий інтервал, отримаємо значення гранично допустимої систематичної складової основної похибки вимірювального каналу.

Умовно вважаючи чутливий елемент конденсатором можна розглядати той факт, що похибки чутливого елемента в основному зумовлені температурними впливами на його ємність, через розширення матеріалу. Для обчислення похибки чутливого елемента скористаємось обчисленням відносної

температурної зміни ємності чутливого елемента при сталій величині потужності оптичного випромінювання [86]:

$$\delta_{\text{чЕ}} = \frac{S_{C_T} \cdot \Delta T}{C_H} 100. \quad (4.2)$$

де S_{C_T} – зміна ємності при одиничній зміні температури, пФ/К;

C_H – номінальна ємність (при 293 К).

Розрахунок S_{C_T} проведемо за формулою [86]:

$$S_{C_T} = \frac{C_{T2} - C_{T1}}{T_2 - T_1} \left(\frac{\Phi}{K} \right), \quad (4.3)$$

де C_{T2}, C_{T1} – ємність температурах T_2, T_1 ,



Вважаючи короткочасні зміни температури $\Delta T = \pm 1^\circ\text{C}$, отримаємо:

$$S_{C_T} = \frac{C_{T2} - C_{T1}}{\Delta T} \left(\frac{\Phi}{K} \right)$$

Перейдемо до визначення повної похибки в процесі вимірювання потужності оптичного випромінювання, яка виникає в частотному перетворювачі.

Похибка часової міри це неточність визначення проміжку часу за який проводиться підрахунок. Головною складовою похибки міри є нестабільність кварцового генератора. Похибка, яка вноситься через нестабільність генератора з кварцовим частото-задаючим елементом складає $\delta_{\text{чМ}} = 10^{-6} - 10^{-7}$.

Похибка розрядності δ_p впливає з обмежень дискретного цифрового представлення інформації і визначається величиною мінімального значущого розряду за формулою [87]:

$$\delta_p = 2^{-n} \cdot 100,$$

де n – кількість розрядів. При використанні 16-бітного лічильника становить 16. Отже:

$$\delta_p = 2^{-16} \cdot 100 = 0,0015.$$

Похибка квантування δ_k в електронно-лічильних частотомірах не перевищує абсолютне значення одного імпульсу молодшого розряду лічильника [87], а її відносне значення визначається за формулою:

$$\delta_k = \frac{1}{f_\Gamma \cdot T_{ВИМ}} \cdot 100,$$

де f_Γ – частота вимірюваного сигналу, Гц, $T_{ВИМ}$ – час вимірювання. Отже:

$$\delta_k = \frac{1}{300000 \cdot 0,1} \cdot 100 = 0,0003.$$

Крім того, залежність похибки квантування від вимірюваної потужності оптичного випромінювання представлено на рисунку 4.11, та наведена в додатку Л.5.

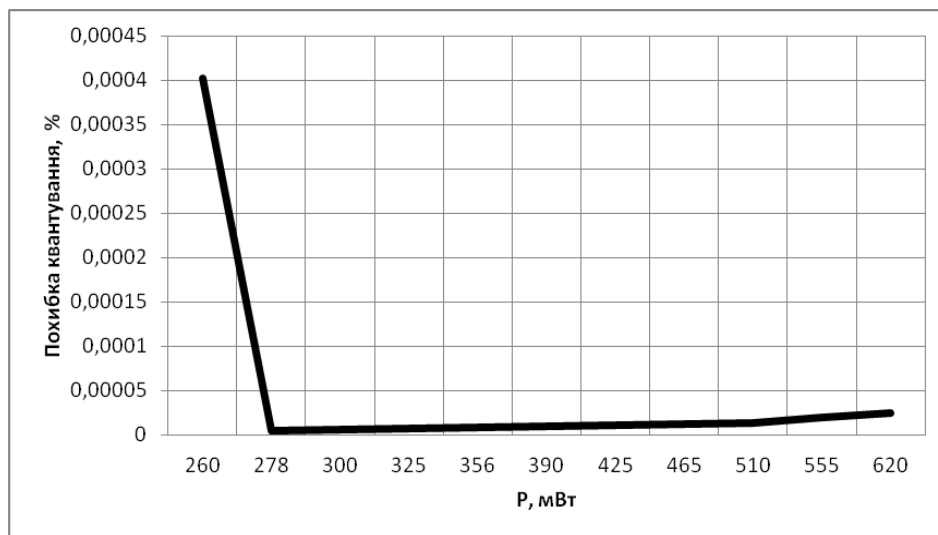


Рисунок 4.11 – Залежність похибки квантування від вимірюваної потужності оптичного випромінювання

Сумарна похибка частотоміра визначиться:

$$\delta_{\text{ч}} = \sqrt{\delta_{\text{чМ}}^2 + \delta_{\text{р}}^2 + \delta_{\text{к}}^2} .$$

де $\delta_{\text{чМ}}, \delta_{\text{р}}, \delta_{\text{к}}$ – відносні похибки часової міри, розрядності та квантування відповідно. Підставивши складові частини вказаних похибок отримаємо:

$$\delta_{\text{ч}} = \sqrt{(10^{-6})^2 + (15 \cdot 10^{-6})^2 + (3 \cdot 10^{-6})^2} = 15 \cdot 10^{-6} \approx 0,0015$$

Результуюча похибка визначиться виразом (4.1):

$$\delta = \sqrt{(50 \cdot 10^{-5})^2 + (172,9 \cdot 10^{-5})^2 + (1,5 \cdot 10^{-5})^2} = 179,99 \cdot 10^{-5}$$

$$\delta = 0,18$$

Таблиця 4.1 Похибки радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності

Вид похибки	Значення похибки
Чутливого елементу	0,05%
Нестабільність ЧП	$1,2 \cdot 10^{-6}$
Зміни амплітуди генератора між двома калібруваннями	0,06%
Установки режиму живлення транзисторної структури	0,16%
Температурна залежність ЧП	0,022%
Девіація параметрів джерела живлення	0,0083%
Температурна залежність ЧП	0,022%
Похибка квантування	0,0003%
Похибка розрядності	0,0015%
Сумарна похибка	0,18%

4.7 Висновки до розділу

1. Проведено експериментальне дослідження вольт–амперної характеристики радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності, а також доведено наявність на електродах колектор–колектор біполярних транзисторів від'ємного опору, що відповідає спадаючій ділянці вольт–амперної характеристики. Визначено, що активна складова повного комплексного опору приймає від'ємне значення, а реактивна – ємнісний характер та їх залежності від напруги живлення для обох оптико–частотних перетворювачів.

2. Здійснено експериментальне дослідження залежності частоти генерації від напруги живлення радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності. Визначено, що підключення пасивної індуктивності до виводів колектор–колектор структури біполярних транзисторів, при від'ємних значеннях повного комплексного опору (при компенсації втрат енергії в коливальному контурі), дозволяє створити генератор електричних коливань. При дії зміни оптичного випромінювання на перетворювач здійснюється зміна активної та реактивної складової повного комплексного опору, що в свою чергу, змінює частоту генерації. Проведено експериментальне дослідження залежності частоти генерації від оптичного випромінювання радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності.

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1 Визначення рівня комерційного потенціалу розробки радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності

Метою проведення технологічного аудиту є оцінювання комерційного потенціалу розробки радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності, створеної в результаті науково-технічної діяльності. В результаті оцінювання можна буде зробити висновок щодо напрямів (особливостей) організації подальшого її впровадження з врахуванням встановленого рейтингу.

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

Оцінювання комерційного потенціалу розробки радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності будемо здійснювати за 12-ю критеріями згідно рекомендацій.

Результати оцінювання комерційного потенціалу розробки радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності заносимо до таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 - Результати оцінювання комерційного успіху розробки радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності

Критерії	Експерти		
	д.т.н., професор Семенов А.О.	д.т.н., професор Осадчук О.В.	к.т.н., доцент Гаврілов Д.В.
	Бали, виставлені експертами		
1	2	2	3
2	3	3	2
3	4	4	3
4	4	2	3
5	4	3	3
6	4	4	3
7	3	3	2
8	3	3	3

Продовження таблиця 5.1.

9	3	4	4
10	2	3	3
11	3	3	3
12	2	3	3
Сума балів	37	37	35
Середньоарифметична сума балів, СБ	36		

За даними таблиці 5.1 робимо висновок щодо рівня комерційного потенціалу розробки радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності. При цьому користуємося рекомендаціями, наведеними в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Рівні комерційного потенціалу розробки

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

Таким чином, робимо висновок, щодо рівня комерційного потенціалу нашої розробки радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності – вище середнього.

5.2 Визначення рівня якості розробки радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності

Оцінювання рівня якості розробки радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності проводиться з метою порівняльного аналізу і визначення найбільш ефективного, з технічної точки зору, варіанта інженерного рішення.

Рівень якості – це кількісна характеристика міри придатності певного виду продукції для задоволення конкретного попиту на неї при порівнянні з відповідними базовими показниками за фіксованих умов споживання [87].

Абсолютний рівень якості розробки радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності знаходимо обчисленням вибраних для її вимірювання показників, не порівнюючи їх із відповідними показниками аналогічних виробів. Для цього необхідно визначити зміст основних функцій, які повинні реалізовувати розробка, вимоги замовника до неї, а також умови, які характеризують експлуатацію, визначають основні параметри, які будуть використані для розрахунку коефіцієнта технічного рівня виробу. Система параметрів, прийнята до розрахунків, повинна достатньо повно характеризувати споживчі властивості інноваційного товару (його призначення, надійність, економічне використання ресурсів, стандартизація тощо).

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

Таблиця 5.3 – Основні параметри радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності [87]

Параметри	Абсолютне значення параметра			Коефіцієнт вагомості параметра
	Краще +5...+4	Середнє +3	Гірше +1...+2	
Точність вимірювання оптичної потужності	4			0,6
Кількість вимірювальних каналів		3		0,1
Діапазон вимірювання	5			0,2
Відносна похибка	4			0,1

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

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

де R_{ni} – числове значення i -го параметра інноваційного рішення, n – кількість параметрів інноваційного рішення, що прийняті для оцінювання, a_i – коефіцієнт вагомості відповідного параметра (сума коефіцієнтів вагомості всіх параметрів повинна дорівнювати 1).

Отже, абсолютний рівень якості радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності становитиме – 4,1 бали.

Одночасно визначаємо відносний рівень якості радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності, що виробляється (проектується), порівнюючи її показники з абсолютними показниками якості найліпших вітчизняних та зарубіжних аналогів (товарів-конкурентів) (табл. 5.4).

Таблиця 5.4 – Основні параметри радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності та товару-конкурента

Параметри	Варіанти		Відносний показник якості	Коефіцієнт вагомості параметра
	Базовий (конкурент)	Новий		
Точність вимірювання оптичної потужності	3	4	1,3	0,6
Кількість вимірювальних каналів	3	3	1	0,1
Діапазон вимірювання	8	25	3,1	0,2
Відносна похибка	4	5	0,8	0,1

Відносний рівень якості радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності визначаємо за формулою [88]:

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

За розрахунками відносний рівень якості радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності становитиме – 1,58. Це означає, що наша розробка краща за якістю на 58% від товару-аналога.

5.3 Визначення конкурентоспроможності розробки радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності

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

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

Таблиця 5.5 – Нормативні, технічні та економічні параметри радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності і товару-конкурента

Параметри	Варіанти		Відносний показник якості	Коефіцієнт вагомості параметра
	Базовий (конкурент)	Новий		
Точність вимірювання оптичної потужності	3	4	1,3	0,6
Кількість вимірювальних каналів	3	3	1	0,1
Діапазон вимірювання	8	25	3,1	0,2
Відносна похибка	4	5	0,8	0,1
Ціна за продукт, тис. грн.	10000	8500	0,85	-

Загальний показник конкурентоспроможності розробки (К) з урахуванням вищезазначених груп показників визначаємо за формулою [89]:

$$K = \frac{I_{т.п.}}{I_{е.п.}} = \frac{1,58}{0,85} = 1,86, \quad (5.3)$$

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

$$I_{е. п.} = \frac{P_{Hei}}{P_{Bei}} = \frac{8500}{10000} = 0,85, \quad (5.4)$$

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

Згідно розрахунків загальний показник конкурентоспроможності – 1,86 . Це означає, що наша розробка радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності більш конкурентна на 94% від товару-аналога.

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

5.4.1 Розрахунок витрат, що стосуються виконавців розробки радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності

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

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

де M – місячний посадовий оклад конкретного розробника (інженера, дослідника, науковця тощо), грн.

У 2019 році величини окладів (разом з встановленими доплатами і надбавками) рекомендується брати в межах (5000...10000) грн. за місяць; T_p – число робочих днів в місяці; приблизно $T_p = (21...23)$ дні; t – число робочих днів роботи розробника (дослідника).

Зроблені розрахунки зводимо до таблиці 5.6.

Таблиця 5.6 – Заробітна плата розробників

Посада	Місячний посадовий оклад, грн.	Оплата за робочий день, грн.	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн.
Керівник	10000	455	5	2275
Інженер-програміст	5000	227	5	1135
Консультанти	5000	227	5	1135
Всього:				4545

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

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

де t_i – норма часу (трудомісткість) на виконання конкретної роботи, годин;
 n – число робіт по видах та розрядах; C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, який виконує дану роботу. C_i визначається за формулою:

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

де M_m – розмір мінімальної заробітної плати за місяць, грн.; в 2019 році мінімальна заробітна плата становить – 4173 грн., K_i – тарифний коефіцієнт робітника відповідного розряду, T_p – число робочих днів в місяці; приблизно $T_p = 21 \dots 23$ дні; T_{zm} – тривалість зміни, зазвичай $T_{zm} = 8$ годин.

Величина чинних тарифних коефіцієнтів робітників відповідних розрядів для бюджетної сфери наведена в таблиці [90]:

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

Таблиця 5.7 – Заробітна плата робітників

Найменування робіт	Трудомісткість, н-год.	Розряд роботи	Погодинна тарифна ставка	Тариф. коеф.	Величина, грн.
Налагоджувальні	3	4	30,1	1,27	90
Складальні	2	4	30,1	1,27	60
Механічні	1	3	27,9	1,18	28
Заготівельні	4	2	25,8	1,09	103
Всього					281

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

$$Зд = 0,1 \cdot (Зр + Зо) = 0,1 \cdot (4545 + 281) = 482,6 \text{ грн.} \quad (5.8)$$

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

де Зо – основна заробітна плата розробників, грн.; Зр – основна заробітна плата робітників, грн.; Зд – додаткова заробітна плата всіх розробників та робітників, грн.; β – ставка єдиного внеску на загальнообов’язкове державне соціальне страхування, % (приймаємо для 1-го класу професійності ризику 22%).

$$\begin{aligned} \text{Нзп} &= 0,22 \cdot (Зр + Зо + Зд) = 0,22 \cdot (4545 + 281 + 482,6) = \\ &= 1168 \text{ грн.} \end{aligned} \quad (5.9)$$

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

Дані відрахування розраховують по кожному виду обладнання, приміщенням тощо.

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

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

де Ц – загальна балансова вартість всього обладнання, комп'ютерів, приміщень тощо, що використовувались для виконання даного етапу роботи, грн.; На – річна норма амортизаційних відрахувань. Для нашого випадку можна прийняти, що На = (10...25)%; Т – термін, використання обладнання, приміщень тощо, місяці.

Таблиця 5.8 - Амортизаційні відрахування

Найменування	Ціна, грн.	Норма амортизації, %	Термін використання, м.	Сума амортизації
ПК + панель оператора	9000	20	2	300
ПЛК	15000	20	2	500
Інше обладнання	8000	10	1	67
Всього	867			

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

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

де N_i – кількість матеріалу і-го виду, шт.; C_i – ціна матеріалу і-го виду, грн.; K_i – коефіцієнт транспортних витрат, $K_i = (1,1 \dots 1,15)$; n – кількість видів матеріалів.

Таблиця 5.9 - Матеріали, що використані на розробку

Найменування матеріалу	Ціна за одиницю, грн.	Витрачено	Вартість, грн.
Флюс ФКСН	4	0,05	0,2
Каніфоль	11	0,3	3,3
Припій ПОС-61	500	0,1	50
Всього, з урахуванням коефіцієнта транспортних витрат	59		

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

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

де N_i – кількість комплектуючих i -го виду, шт.; C_i – ціна комплектуючих i -го виду, грн.; K_i – коефіцієнт транспортних витрат, $K_i = (1,1 \dots 1,15)$; n – кількість видів комплектуючих.

Таблиця 5.9 - Комплектуючі, що використані на розробку

Найменування матеріалу	Ціна за одиницю, грн.	Витрачено	Вартість, грн.
Світлодіод	30	3	90
Оптичний тракт	100	1	100
Корпус	200	1	200
Тумблер	15	1	15
Діоди стану	2	2	4
Панель оператора	2000	1	2000
Інтерфейси	70	2	140
Джерело напруги	20	1	20
Всього, з урахуванням коефіцієнта транспортних витрат			2826

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

$$Ve = V \cdot P \cdot \Phi \cdot K_p, \text{ грн}$$

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

Потужність обладнання складає – 0,5 кВт.

Кількість годин роботи складає – 700 годин.

Коефіцієнт викор. потужності -0,9.

$V_e = 2662$ грн.

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

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

$$I_v = 2 \cdot (Z_o + Z_p) = 2 \cdot (4545 + 281) = 9652 \text{ грн.} \quad (5.10)$$

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

$$V = 22542 \text{ грн.}$$

5.5 Розрахунок загальних витрат на розробку радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності

Загальна вартість всієї наукової роботи визначається за V заг формулою:

$$V_{zag} = \frac{I_v}{\alpha} = \frac{9652}{0,7} = 13789 \text{ грн,} \quad (5.11)$$

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

5.6 Прогнозування витрат на виконання та впровадження радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності

Прогнозування загальних витрат ZV на виконання та впровадження радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності здійснюється за формулою:

$$ЗВ = \frac{Взаг}{\beta} = \frac{13789}{0,5} = 27577 \text{ грн,} \quad (5.12)$$

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

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

5.7 Прогнозування комерційних ефектів від реалізації радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності

З метою прогнозування комерційних ефектів від реалізації радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності складемо таблицю вихідних показників, за рахунок яких і відбудуватиметься отримання комерційного ефекту.

Таблиця 5.10 – Вихідні дані для прогнозування комерційного ефекту від реалізації радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності

Рік реалізації розробки	1	2	3
Кількість од. реалізації, шт.	200	500	700

Величина зростання ціни реалізації радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності, грн. – 1500 грн.

Кількість продукції, що випускалась до впровадження радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності – 350 шт.

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

$$\Delta\Pi_i = \sum_1^n (\Delta Ц_0 \cdot N + Ц_0 \cdot \Delta N) i \cdot \rho \cdot \gamma \cdot \left(1 - \frac{\nu}{100}\right) \quad (5.13)$$

де $\Delta\Pi_0$ – покращення основного оціночного показника від впровадження результатів розробки у даному році. Зазвичай таким показником може бути ціна одиниці нової розробки; N – основний кількісний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році до впровадження результатів наукової розробки; ΔN – покращення основного кількісного показника діяльності підприємства від впровадження результатів розробки; $Ц_0$ – основний оціночний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році після впровадження результатів наукової розробки; n – кількість років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки; λ – коефіцієнт, який враховує сплату податку на додану вартість. У 2018 р. ставка податку на додану вартість дорівнює 20%, а коефіцієнт – 0,8333. З 2014 року ставка податку на додану вартість встановлена на рівні 17%, а коефіцієнт – 0,8547; ρ – коефіцієнт, який враховує рентабельність продукту. Рекомендується приймати – 0,2...0,3; ν – ставка податку на прибуток. У 2018 році – 21%, у 2013 році – 19%, а з 2014 року – 16%.

Збільшення чистого прибутку підприємства Π_i протягом першого року складе:

$$\Delta\Pi_1 = 46404 \text{ грн.}$$

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

$$\Delta\Pi_2 = 254530 \text{ грн.}$$

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

$$\Delta\Pi_3 = 284060 \text{ грн.}$$

5.8 Визначення абсолютної ефективності вкладених інвестицій у розробку радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності

Для цього користуються формулою:

$$E_{абс} = (ПП - PV), \quad (5.14)$$

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

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

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

де $\Delta\Pi$ – збільшення чистого прибутку у кожному із років, протягом яких виявляються результати виконаної та впровадженої НДДКР, грн.; t – період часу, протягом якого виявляються результати впровадженої НДДКР, роки; τ – ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований рівень інфляції в країні; для України цей показник знаходиться на рівні 0,1; t – період часу (в роках) від моменту отримання чистого прибутку до точки „0”.

$$ПП = 350043 \text{ грн.},$$

$$E_{абс} = 350043 - 27577 = 165596 \text{ грн.}$$

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

5.9 Розрахунок відносної ефективності вкладених коштів в НДДКР радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності

Для цього користуються формулою:

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

де $E_{абс}$ – абсолютна ефективність вкладених інвестицій, грн.; PV – теперішня вартість інвестицій $PV = ЗВ$, грн.; $T_{ж}$ – життєвий цикл наукової розробки, роки.

$$E_B = 1,2$$

Далі, розрахована величина E_B порівнюється з мінімальною (бар'єрною) ставкою дисконтування, що дорівнює [91]:

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

де d – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2018 році в Україні $d = (0,14...0,2)$; f – показник, що характеризує ризикованість вкладень; зазвичай, величина $f = (0,05...0,1)$, але може бути і значно більше.

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

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

5.10 Розрахунок терміну окупності коштів, вкладених в наукову розробку радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності

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

$$\text{Ток} = \frac{1}{E_B} = \frac{1}{1,2} = 0,83 \text{ роки.} \quad (5.18)$$

Оскільки $\text{Ток} < 3...5$ -ти років, то фінансування даної наукової розробки радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності є доцільним.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Завдання реалізації системи управління охороною праці – всестороння підтримка виконання вимог, що цілком усунуть, нейтралізують чи зменшують до нормованих значень вплив на працівників шкідливих і небезпечних факторів виробничого середовища, забезпечують безпечні санітарно-гігієнічні та ергономічні вимоги.

У даному розділі наводиться аналіз небезпечних, шкідливих та уражаючих для людини і навколишнього середовища факторів, які виникають при проведенні розробки радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності. Тут висвітлюються, зокрема, технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення потужності лазера за заданою безпечною відстанню, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки при проведенні розробки, безпека у надзвичайних ситуаціях.

Під час розробки даного пристрою на працюючих впливають ті чи інші небезпечні та шкідливі виробничі фактори (НШВФ) фізичної та психофізіологічної груп згідно [92]. Фізичні небезпечні і шкідливі виробничі фактори: підвищена або понижена температура повітря робочої зони, підвищений рівень шуму на робочому місці, підвищений рівень статичної електрики, недостатність або відсутність природного освітлення, недостатня освітленість робочої зони, пряма або відбита блискучість, підвищена яскравість світла. Психофізіологічні НШВФ: нервово-психічні перевантаження: розумове перенапруження, монотонність праці, перенапруження аналізаторів.

6.1 Гігієна праці та виробнича санітарія

6.1.1 Мікроклімат та склад повітря робочої зони

Вибираємо для приміщення, в якому проводяться роботи з розробки радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності, категорію важкості робіт за фізичним навантаженням – легка Іа.

Згідно із [93] допустимі показники температури, відносної вологості та швидкості руху повітря в робочій зоні для теплого та холодного періодів року наведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Нормовані допустимі показники мікроклімату в приміщенні [93]

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

Перепад температури повітря вздовж висоти робочої зони для всіх категорій робіт допускається до 3°С. Для опромінення менше 25% поверхні тіла людини, нормована інтенсивність теплового опромінення складає 100 Вт/м².

Вміст шкідливих речовин в повітрі робочої зони не повинен перевищувати гранично допустимих концентрацій (ГДК), що використовуються при проектуванні виробничих приміщень (будівель), обладнання, технологічних процесів, вентиляцій, для контролю за якістю виробничого середовища. ГДК шкідливих речовин, що утворюються в даному виробничому приміщенні наведено в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин в повітрі робочої зони

Назва речовини	Параметр	Значення	Клас небезпеки
Пил нетоксичний	ГДК, мг/м ³	0,15	4
Іони n ⁺ , n ⁻	число іонів в 1 см ³ повітря	50000	–

З метою забезпечення нормованих показників мікроклімату і чистоти повітря робочої зони передбачено такі заходи:

- 1) у приміщенні має бути встановлена система опалення для холодного і кондиціонування для теплого періодів року;
- 2) здійснювати вологе прибирання кожного дня;
- 3) припливно-витяжна система вентиляції, а при несприятливих погодних умовах кондиціонування.

6.1.2 Виробниче освітлення

Для забезпечення гігієнічних раціональних умов на робочих місцях великі вимоги висуваються щодо якісних та кількісних параметрів освітлення.

З погляду задач зорової роботи в приміщенні, в якому проводяться роботи з розробки радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності, згідно [94] знаходимо, що вони відповідають III розряду зорових робіт. Вибираємо контраст об'єкта з фоном – великий, а характеристику фону – середню, яким відповідає підрозряд Γ .

Нормовані значення коефіцієнта природного освітлення (КПО) і мінімальні значення освітленості для штучного освітлення наведені в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – Нормативні значення коефіцієнта природного освітлення та мінімальні освітленості при штучному освітленні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізн., мм	оряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фону	Освітленість при штучному освітленні, ЛК			КПО, %	
						комбіноване		загальне	Природне освітлення (бокове)	Суміщене освітлення (бокове)
						всього	у т. ч. від загального			
Високої точності	0,3-0,5	III	Γ	великий	середній	400	200	200	2	1,2

Так як приміщення розташоване в місті Вінниця (друга група забезпеченості природним світлом), а вікна орієнтовані за азимутом 135° , то за таких обставин КЕО розраховується за виразом [94, 95]

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

де e_H – табличне значення КЕО, %;

m_N – коефіцієнт світлового клімату;

N – номер групи забезпеченості природним світлом.

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

$$e_{N,6} = 2 \cdot 0,85 = 1,7 (\%);$$

$$e_{N,c} = 1,2 \cdot 0,85 = 1,02 (\%).$$

Для забезпечення нормативних значень показників освітлення запропоновано такі заходи: за недостатнього природного освітлення у світлий час доби доповнення штучним за допомогою газорозрядних ламп з утворенням системи суміщеного освітлення; застосування штучного освітлення в темний час доби.

6.1.3 Виробничі віброакустичні коливання

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

Встановлено, що приміщення, де відбувається робота з розробки радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності може мати робочі місця із шумом та вібрацією, який створюється електродвигунами вентиляційної системи.

З метою запобігання травмуванню працівників під дією шуму та вібрації вони підлягає нормуванню. Головним нормативом з питань виробничого шуму, що діє на території України, є [96], згідно з яким нормовані рівні звукового тиску, рівні звуку і еквівалентні рівні шуму на робочих місцях в виробничих приміщеннях не мають бути більшими ніж значення, які приведені в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 – Нормовані рівні звукового тиску і еквівалентні рівні звуку

Рівні звукового тиску в дБ в октавних полосах з 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

Норми виробничих вібрацій наведені в таблиці 6.5 для 3-ї категорії (технологічна) типу "в".

Таблиця 6.5 – Нормовані рівні віброприскорення [97]

Гранично допустимі рівні віброприскорення, дБ, в октавних полосах з середньо-геометричними частотами, Гц						Коректовані рівні віброприскорення, дБА
2	4	8	16	31,5	63	
36	33	33	39	45	51	33

Для забезпечення допустимих показників віброакустичних коливань в приміщенні запропоновано такі заходи:

- 1) завчасне здійснення профілактичного ремонту;
- 2) застосування в конструкціях устаткування віброізоляції та акустичних екранів.

6.1.4 Виробничі випромінювання

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

Відповідно до [98] регламентуються гранично допустимі рівні (ГДР) для кожного режиму роботи лазера і його спектрального діапазону. Граничні дози при однократному впливі на очі і шкіру прямого чи розсіяного лазерного випромінювання наведені в таблиці 6.6.

Для забезпечення допустимих показників лазерного випромінювання в приміщенні передбачено такі заходи: захист відстанню; фарбування поверхонь приміщення для забезпечення коефіцієнта відбиття світла не більше 0,4.

В якості засобу захисту працюючих від лазерного випромінювання вибираємо захист відстанню. Безпечна відстань $L = 0,45$ м, тривалість опромінення $t = 7$ с, кут розсіювання променя $\varphi = 0,02$ рад.

Безпечну відстань L можна розрахувати за формулою:

$$L = \frac{1,2}{\varphi} \sqrt{\frac{W}{E}} \quad [\text{м}], \quad (6.2)$$

звідки

$$W = E \left(\frac{\varphi L}{1,2} \right)^2 \quad [\text{Вт}], \quad (6.3)$$

Таблиця 6.6 – Граничні дози при однократному впливі на очі і шкіру прямого чи розсіяного лазерного випромінювання

Довжина хвилі λ , нм	Тривалість опромінення t , с	$H_{ГДР}$, Дж/м ² ; $E_{ГДР}$, Вт/м ²
1400 < λ < 1800	$10^{-10} < t < 1$	$H_{ГДР} = 2 \cdot 10^4 \cdot \sqrt[5]{t}$
	$1 < t < 10^2$	$E_{ГДР} = 2 \cdot 10^4 / \sqrt[5]{t}$
	$t > 10^2$	$E_{ГДР} = 5 \oplus 10^2$
1800 < λ < 2500	$10^{-10} < t < 3$	$H_{ГДР} = 7 \cdot 10^3 \cdot \sqrt[5]{t}$
	$3 < t < 10^2$	$E_{ГДР} = 5 \cdot 10^3 / \sqrt{t}$
	$t > 10^2$	$E_{ГДР} = 5 \oplus 10^2$
2500 < λ < 10 ⁵	$10^{-10} < t < 10^{-1}$	$H_{ГДР} = 2,5 \cdot 10^3 \cdot \sqrt[5]{t}$
	$10^{-1} < t < 1$	$H_{ГДР} = 5 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{t}$
	$1 < t < 10^2$	$E_{ГДР} = 5 \cdot 10^3 / \sqrt{t}$
	$t > 10^2$	$E_{ГДР} = 5 \oplus 10^2$

де W – потужність лазера, Вт;

E – гранично допустима щільність потужності, Вт/м²;

φ – кут розсіювання променя, рад.

Гранично допустима щільність потужності для хвилі з довжиною $\lambda=1800\dots2500$ нм і тривалості опромінення від 3 до 100 с визначається за формулою:

$$E = 5 \cdot 10^3 / \sqrt{t} \quad [\text{Вт/м}^2]. \quad (6.4)$$

Підставивши у формулу (6.4) відоме значення тривалість опромінення, отримаємо гранично допустиму щільність потужності:

$$E = 5 \cdot 10^3 / \sqrt{7} = 1889,82 \quad (\text{Вт/м}^2).$$

Використовуючи формулу (6.3) визначимо потужність лазера

$$W = 1889,82 \left(\frac{0,02 \cdot 0,45}{1,2} \right)^2 = 0,106 \text{ (Вт)}.$$

6.2 Технічні рішення з промислової та пожежної безпеки при проведенні розробки радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності

6.2.1 Безпека щодо організації робочих місць

Конструкція робочого місця, взаємне розташування його елементів та його розміри мають відповідати антропометричним, психофізіологічним та фізіологічним характеристикам працівника, а також характеру праці [98].

Площа одного робочого місця повинна складати не менше 6,0 м², об'єм приміщення – не менше як 20 м³, висота – не менше 3,2 м [99].

Інтер'єр приміщень потрібно оздоблювати дифузно-віддзеркалювальними матеріалами з коефіцієнтом відбиття: стелі 0,7-0,8; стін 0,4-0,5; підлоги 0,2-0,3. Поверхня підлоги має бути гладкою, не слизькою, без вибоїн, мати антистатичні властивості, зручною для вологого прибирання. Не дозволяється використовувати під час оздоблення інтер'єру полімери, які забруднюють повітря шкідливими хімічними речовинами та сполуками.

6.2.2 Електробезпека

У середині приміщення, де проводиться робота з розробки радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності, особливу увагу потрібно приділити уникненню загрози ураження електричним струмом. Згідно [100] дане приміщення належить до приміщень із підвищеною небезпекою ураження електричним струмом в наслідок наявності значної (більше 75 %) відносної вологості. Тому безпека використання електрообладнання має гарантуватись комплексом заходів, що включають застосування ізоляції струмовідних частин, захисних блокувань, захисного заземлення тощо [101].

6.2.3 Пожежна безпека

Відповідно до [102] приміщення, в якому проводиться робота з розробки радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності, відноситься до категорії пожежної небезпеки В. Дане 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 будівельних конструкцій приміщення, що розглядається наведені в таблиці 6.7.

Таблиця 6.7 – Значення мінімальних меж вогнестійкості приміщення [102]

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; M1 – M δ 25 см – для горизонтальних конструкцій; M δ 40 см – для вертикальних і похилих конструкцій; M2 – M > 25 см – для горизонтальних конструкцій; M > 40 см – для вертикальних і похилих конструкцій, nn – не нормується.

В таблиці 6.8 приведено протипожежні норми проектування будівель і споруд.

Таблиця 6.8 – Протипожежні норми проектування будівель і споруд [103]

Об'єм приміщення, тис. м ³	Категорія пожежної небезпеки	Ступінь вогнестійкості	Відстань, м, при щільності людського потоку в загальному проході, осіб/м ²			Кількість людей на 1 м ширини евакуаційного ходу	Відстань між будівлями та спорудами, м, для ступеня їх вогнестійкості:			Найбільша кількість поверхів	Максимально допустима площа поверху, м ² , для кількості поверхів		
			0 1	-3	-5		I,II	III	IV,V		1	2	3 і більше
до 15	В	2	100	60	40	110	9	9	12	8	н.о.	н.о.	н.о.

Примітки: н.о. – не обмежується, н.н. – не нормується.

Встановлюємо, що приміщення, де проводиться робота з розробки, має бути обладнане двома вогнегасниками, пожежним щитом, ємністю з піском [103].

6.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях

Визначення області працездатності радіовимірювального пристрою в умовах надзвичайних ситуацій.

Вплив різних загрозливих чинників надзвичайних ситуацій може загрожувати роботі розроблювального пристрою і цим вплинути на роботу систем в складі яких вони застосовуються.

В РЕА, зокрема в радіовимірювальному пристрої застосовуються елементи, до складу яких входять такі матеріали: метали, неорганічні матеріали, провідники і різноманітні органічні сполуки (діелектрики, смоли і т.д.). Серед цих матеріалів метали найбільш чутливі до впливу іонізуючих випромінювань, оскільки їм властива висока концентрація вільних носіїв.

Іонізуючі випромінювання в радіоелектронній апаратурі, викликають зворотні і незворотні процеси, внаслідок яких можуть відбуватися порушення роботи електричних елементів, що призводять до виходу з пристрою. Проходячи через елементи РЕА, потік гамма-випромінювань створює в них вільні носії електричних зарядів, який призводить до спрацьовування пристрою. При великих дозах випромінювання втрачають

працездатність комплектуючі елементи систем радіоелектроніки і електроавтоматики. В транзисторах змінюється обернений струм і коефіцієнт підсилення, у конденсаторах знижуються напруги пробоя та опір стікання, змінюється провідність і внутрішній нагрів; руйнується електрична ізоляція дротів з полімерних матеріалів. В органічних дієтричних матеріалах змінюються електрична провідність, діелектрична проникність і тангенс кута втрат. Неорганічні матеріали менш чутливі до впливу іонізуючих випромінювань. [98]

Найбільш піддаються впливу електромагнітного імпульсу (ЕМІ) системи управління і сигналізації. ЕМІ ушкоджують напівпровідникові прилади, резистори, конденсатори. ЕМІ має велику небезпеку для апаратури, добре захищеної від впливу інших загрозливих чинників. Слід також пам'ятати, що механічний захист апаратури не захищає від впливу ЕМІ. Апаратура може бути знищена навіть знаходячись у надійних спорудах [98].

6.3.1 Визначення області працездатності радіовимірювального пристрою в умовах дії іонізуючих випромінювань

Приймаючи до уваги елементну базу, що використовується для реалізації розроблювального радіовимірювального пристрою, складається таблиця потужностей експозиційної дози опромінення для кожного елемента $P_{зв.i}$, що викликають початок зворотних змін (таблиця 6.9).

Таблиця 6.9 – Потужності експозиційних доз кожного елемента радіовимірювального пристрою

Елементи радіоелектронної системи	$P_{зв.i}$, Р/год	$P_{зв.}$, Р/год
Інтегральні мікросхеми	10^3	10 ³
Транзистори	10^4	
Діоди	10^4	
Конденсатори	10^7	
Мікросхеми	10^5	
Резистори	10^8	

Елементом, який найбільшою мірою піддається впливу випромінюванням, тобто елементи із мінімальним значенням $P_{зв} = 10^3$ Р/год є інтегральні

мікросхеми. Критерієм стійкості роботи радіовимірювального пристрою є значення рівня іонізуючих випромінювань:

$$P_{гр} = K_{над} \cdot P_{зв} \cdot K_{посл},$$

де $P_{зв}$ - рівень радіації, який відповідає початку зворотних змін у пристрої;

$K_{над}$ - коефіцієнт надійності ($K_{над} = 0,9 \div 0,95$);

$K_{посл}$ - коефіцієнт послаблення (для мобільних систем $K_{осл} = 2$).

$$P_{гр} = 0,93 \cdot 10^3 \cdot 2 = 1860 \text{ Р/год.}$$

Таким чином, розроблювальний радіовимірювальний пристрій буде працювати з потрібною надійністю в межах зміни потужності дози від 0 до $1,8 \cdot 10^3 \text{ Р/год}$, а допустимий час його безвідмовної роботи може скласти [99]:

$$t_{дон} = \left(\frac{D_{зр} \cdot K_{осл} + 2 \cdot P_1 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot P_1} \right)^2 = \left(\frac{10^6 \cdot 2 + 2 \cdot 1,8 \cdot 10^3}{2 \cdot 1,8 \cdot 10^3} \right)^2 = 28467 (\text{год})$$

Це більш ніж достатньо для таких складних умов роботи радіоелементів.

6.3.2 Визначення області працездатності радіовимірювального перетворювача для визначення оптичної потужності в умовах дії електромагнітного імпульсу

В якості показника стійкості електронних систем або їх окремих елементів до впливу ЕМІ можна прийняти коефіцієнт безпеки, що визначається відношенням гранично допустимої напруги (струму) до наведеної, тобто створеної самим ЕМІ в даних умовах [101]:

$$K_B = 20 \lg \frac{U_d}{U_{в(г)}} \geq 40 (\text{дБ}),$$

де U_d - допустиме коливання напруги живлення (в даному пристрої використовується 5В контур ($U_{ж} = 5 \text{ В} \pm 5\%$);

$U_{в(г)}$ - напруга наведена за рахунок електромагнітного імпульсу у вертикальних чи горизонтальних струмопровідних частинах.

Допустиме коливання напруги живлення визначається за формулою [103]:

$$U_d = U_{ж} + \frac{U_{ж}}{100} * N = 5 + \frac{5}{100} = 5,25(B).$$

Визначається напруга наведення у горизонтальних провідниках U_r :

$$U_r = \frac{U_d}{\frac{40}{10^{20}}} = \frac{5,25}{100} = 0,05(B)$$

Тоді вертикальна складова напруженості електричного поля визначається з виразу:

$$U_r = E_b * l_r$$

$$E_r = U_r / l_r = 0,05 / 0,75 = 0,07 (B/m)$$

де: l_b - максимальна довжина струмопровідної частини $l_b = 0,75$ м.

Отже, радіовимірювального пристрій для визначення оптичної потужності має бути працездатним при умові, що $E_r \leq 0,07$ В/м, або E_b в межах від 0 до 70 В/м.

6.4 Розробка заходів по підвищенню безпеки роботи радіовимірювального перетворювача для визначення оптичної потужності в умовах надзвичайних ситуацій

Дослідження, які були проведені як у нашій країні, так і за кордоном, показали, що зміна параметрів радіоелектронних пристроїв може відбуватися в широкому діапазоні при потоках іонізуючих випромінювань. Тому в багатьох випадках при експлуатації виникає необхідність вживати додаткові заходів по підвищенню радіаційної стійкості радіовимірювального перетворювача для визначення оптичної потужності.

Головними заходами щодо підвищення радіаційної стійкості є: застосування в апаратурі радіаційностійких елементів і матеріалів, спеціальних радіаційних екранів або активного захисту від впливу потоків заряджених частинок. При імпульсному впливі іонізуючих випромінювань, крім перерахованих способів використовують: застосування схем, мало критичних до змін електричних параметрів; зниження напруги живлення на аноді і збільшення від'ємної напруги зсуву сіток газорозрядних приладів; застосування пристроїв, які містять

додаткові радіотехнічні схеми на період впливу радіації; збільшення відстані між елементами, які знаходяться під навантаженням і інші.

В захисті від іонізуючого опромінення використовують алюмінієві сплави, леговані елементами з високим атомним номером (лантаноїдами і рідкоземельними елементами), сплави на основі тугоплавких і рідкоземельних елементів і багатошарові матеріали.

Аналізуючи вищенаведені розрахунки, можна зробити висновок, що електричні кола радіовимірювального перетворювача для визначення оптичної потужності будуть зберігати працездатність при значеннях іонізуючих випромінювань від 0 до $1,8 \cdot 10^3$ Р/с, також розраховано термін безпечної роботи пристрою 28467 год.

Найкращим серед заходів по підвищенню стійкості роботи перетворювача від дії ЕМІ є повне укриття апаратури у екранованому металевим екраном приміщенні. Але прилад може експлуатуватись на транспортних засобах, то бажані інші заходи по захисту, такі як струмопровідні сітки та плівкові покриття вікон, стільникові металічні конструкції для повітрозбірників та вентиляційних отворів і контактні пружинні прокладки, що розміщуються по периметру дверей і люків. Для захисту від проникнення електромагнітного імпульсу в апаратуру через різні кабельні вводи використовується перехід від електричних до волоконно-оптичних систем зв'язку, на які практично не має вплив ЕМІ. Також для захисту кабельних вводів є встановлення в конструкції вбудованих зенерівських діодів.

Досить важливе значення має захист вводів до споруд таких як: електричних ліній зв'язку включаючи електромережу, водопровідні й опалювальні труби, по яким можливе проникнення наведеного ЕМІ. При оцінці стійкості роботи електротехнічних і електронних систем було визначено, що безпечна робота розроблювального пристрою можлива при умові $E_v \leq 70$ В/м.

Висновки до розділу

Під час виконання цього розділу було опрацьовано такі питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях, як технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення потужності лазера за заданою безпечною відстанню, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки при проведенні розробки радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності, безпека в надзвичайних ситуаціях.

ВИСНОВКИ

В магістерській кваліфікаційній роботі в науковому плані розроблено і досліджено математичні моделі піроелектричного кристалу та транзисторних структур, які дозволяють враховувати зміну активної та реактивної складових повного опору від дії потужності оптичного випромінювання, а також дозволяють дослідити її вплив на активну і реактивну складові повного опору.

В практичному плані виконано експериментальну перевірку математичних моделей піроелектричного кристалу та транзисторних структур і створено на їхній основі радіовимірювальний пристрій потужності оптичного випромінювання, що дозволяє підвищити чутливість та точність вимірювання. Проведено аналіз похибок пристрою та розрахунок економінфрачервоного ефекту від його впровадження.

Удосконалено математичну модель процесів, що перебігають в оптико-частотних перетворювачах під дією потужності оптичного випромінювання, яка, на відміну від існуючих, дає можливість врахувати її вплив на активну і реактивну складові повного опору, що дозволяє оцінити дію зовнішніх інформаційних параметрів на елементи нелінійних еквівалентних схем.

Удосконалено аналітичні вирази для розрахунку повного опору частотного перетворювача, які, на відміну від існуючих дозволяють визначити залежність активної і реактивної складової повного опору від дії потужності оптичного випромінювання.

Розроблені радіовимірювальні пристрої потужності оптичного випромінювання мають оптимальні метрологічні характеристики (чутливість 11,2 кГц/мВт, сумарна похибка 0,18 %), сумісні з цифровими системами обробки інформації та можуть бути виготовлені за стандартною груповою інтегральною технологією. Всі промодельовані схеми забезпечують високу чутливість від 8,5 до 11,2 кГц/мВт.

Розрахунки на економічність приладу показали, що його впровадження у виробництво є економічно ефективним. Оскільки Ток < 3...5-ти років, то фінансування даної наукової розробки радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності є доцільним. При запровадженні у виробництво виробник отримає прибуток. Аналізуючи ринок можна розраховувати на значний попит на наш виріб. Підтвердженням цьому є технічні параметри даного пристрою, які кращі за параметри аналога.

В розділі ОП розглянуті такі питання як безпека в надзвичайних ситуаціях, як технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення потужності лазера за заданою безпечною відстанню, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки при проведенні розробки радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності, безпека в надзвичайних ситуаціях.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Виглеб Г. Датчики. – М.: Мир, 1989. – С. 186.
2. А.А. Поскачей, Е.П. Чубаров. Оптико–электронные системы измерения. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 246 с.
3. Викулин И. М. Полупроводниковые датчики / И. М. Викулин, В. И. Стафеев. – М.: Советское радио, 1975. – 104 с.
4. Викулин И. М. Физика полупроводниковых приборов / И. М. Викулин, В. И. Радио и связь, 1990. – 263 с.
5. Мікроелектронні перетворювачі фізичних величин: навчальний посібник / [за ред. З. Ю. Готри]. – Львів: Ліга–Прес. – Т. 1. – 2002. – 475 с.
6. Мікроелектронні перетворювачі фізичних величин: навчальний посібник / [за ред. З. Ю. Готри]. – Львів: Ліга–Прес. – Т. 2. – 2003. – 592 с.
7. Мікроелектронні перетворювачі фізичних величин: навчальний посібник / [за ред. З. Ю. Готри]. – Львів: Ліга–Прес. – Т. 3. Книга 2. – 2007. – 364 с.
8. Костенко В. Л. Специализированные сети на основе твердотельных гаков / В. Л. Костенко, С. О. Жаровцев, Г. А. Чигаев // Технология и Жуирование в электронной аппаратуре (ТКЭА). — 2008. – № 2. – С. 14–16.
9. Измерительные преобразователи на основе комбинированных твердотельных структур / [Костенко В. Л., Швец Е. Я., Киселёв Е. Н., Омельчук Н. А.]–Запорожье: «ЗГИА», 2001. – 101 с.
10. Ж. Аш. Датчики измерительных систем. В 2–х книгах. – М.: Мир, 1992. – 424 с.
11. Носов Ю. Р. Оптоэлектроника. – М.: Советское радио, 1977. – 230 с.
12. Schaumburg H. Sensoren. Т. 3. В. G. Teubner Stuttgart, 1992. – 583.
13. Мирский Г. Я. Электронные измерения / Шрамков Е. Г. – М.: Радио и связь, 1986. – 439 с.
14. Боженко Л. І. Метрологія, стандартизація, сертифікація та акредитація / Боженко Л. І. – Львів: Афіша, 2004. – 324 с.
15. Яцук В. О. Методи підвищення точності вимірювань: підручник / Яцук В. О., Малахівський П. С. – Львів: «Бескид Біт», 2008. – 368 с.
16. Нефедов В. И. Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах: учебник для вузов / Нефедов В. И., Хахин В. И., Федорова Е. В. и др.; под. ред. Нефедова В. И. – М.: Высшая школа, 2001. – 383 с.

17. Кухарчук В. В. Елементи теорії контролю динамінфрачервонених параметрів електричних машин / В. В. Кухарчук. – Вінниця: Універсум–1998. – 125 с. – ISBN 966–7199–29–0.
18. Створення мікроелектронних датчиків нового покоління для інтелектуальних систем. Монографія / [за ред. Я. І. Лепіха]. – Одеса: Астропринт, 2010. – 296 с. – ISBN 978–966–190–310–3.
19. Напівпровідникові оптичні та акустоелектронні перетворювачі і системи, Монографія / [за ред. С. В. Ленкова]. – Одеса: Астропринт, 2009. – 256 с. – ISBN 06–190–283–0.
20. Вимірювання температури: теорія та практика / [Луцик А. Т., Гук О. П., Гук О. І., Стадник Б. І.]. Львів: Бескід БІТ, 2006. – 559 с. – ISBN 966–8450–25–6.
21. Осадчук В. С. Температурні та оптичні мікроелектронні частотні перетворювачі / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. І. Вербицький. – Вінниця: Універсум – Вінниця, 2001. – 195 с. – ISBN 966–641–037–0.
22. Осадчук В. С. Индуктивный эффект в полупроводниковых приборах / В. С. Осадчук. – К.: Вища школа, 1987. – 155 с.
23. Осадчук В. С. Перетворювачі вологості / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В Крилик. – Вінниця : Універсум–Вінниця, 2003. – 208 с. – ISBN 966–641–055–9.
24. Осадчук В. С. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця: Універсум–Вінниця, 1999. – 275 с.
25. Осадчук В. С. Перетворювачі тиску і магнітного поля / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця : Універсум–Вінниця, 2005. – 207 с. – ISBN 966–641–121–0.
26. В.С. Осадчук. Мікроелектронні перетворювачі оптичного випромінювання з частотним виходом / В. С. Осадчук, О.В. Осадчук, Н.С. Кравчук. – Вінниця: Універсум–Вінниця, 2007. – 163 с.
27. О.В. Осадчук. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором. – Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2000. – 302 с.
28. Новицкий П. В. Цифровые приборы с частотными датчиками / П. В. Новицкий, В. І. Кноринг, В. С. Гутников. – М: Энергия, 1970. – 424 с.
29. Амеличев В. В. Конструктивно–технологическая оптимизация интегральных преобразователей физических величин / В. В. Амеличев, А. Ю. Павлов, А. И. Погалов, Ю. А. Чаплыгин / Нано– и микросистемная техника. – 2007. №3. – С. 14–17. – ISSN 1813–8586.

30. М. В. Деундяк. Аналіз радіовимірювальних пристроїв потужності оптичного випромінювання / [М. В. Деундяк, О. В. Осадчук, О. В. Деундяк]: MATERIÁLY VIII MEZINÁRODNÍ VĚDECKO–PRAKTICKÁ KONFERENCE «VĚDECKÉ POKROK NA PŘELOMU TYSYACHALETY – 2012» (Praha, 27.05.2012 – 05.06.2012). – Praha: Publishing House «Education and Science», 2012. – С. 17–24.
31. Пат. 33239 Україна, МПК⁷ G01K 5/00. Оптичний перетворювач температури з частотним виходом / Осадчук В.С., Осадчук О.В., Деундяк В.П., Деундяк М.В.; заявник і власник Вінницький національний технічний університет. – № u200802333; заявл. 22.02.08; опубл. 10.06.08, Бюл № 11.
32. Пат. 34893 Україна, МПК⁷ G01K 11/00. Оптико–частотний перетворювач температури / Осадчук В.С., Осадчук О.В., Деундяк В.П., Деундяк М.В.; заявник і власник Вінницький національний технічний університет. – № u200804109; заявл. 01.04.08; опубл. 26.08.08, Бюл № 16.
33. Пат. 35498 Україна, МПК⁷ G01K 11/00. Оптико–частотний температурний перетворювач / Осадчук В.С., Осадчук О.В., Деундяк В.П., Деундяк М.В.; заявник і власник Вінницький національний технічний університет. – № u200804009; заявл. 01.04.08; опубл. 25.09.08, Бюл № 18.
34. Пат. 59006 Україна, МПК⁷ G01K 11/12 (2006.01). Світловодний оптико–частотний перетворювач температури / Осадчук В.С., Осадчук О.В., Деундяк В.П., Деундяк М.В.; заявник і власник Вінницький національний технічний університет. – № u201015587; заявл. 23.12.10; опубл. 26.04.11, Бюл № 8.
35. Оптико–частотний температурний перетворювач / [В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, В.П. Деундяк, М.В. Деундяк.] // Вісник Хмельницького національного університету. – 2009. № 2. – С. 168–174.
36. О.В. Осадчук. Експериментальне дослідження оптико–частотних перетворювачів температури / О.В. Осадчук, В.П. Деундяк, М.В. Деундяк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. № 6. – С. 239 – 244.
37. О.В. Осадчук. Математична модель радіовимірювального пристрою з оптико–частотним перетворювачем на основі біполярної транзисторної структури / О.В. Осадчук, В.П. Деундяк, М.В. Деундяк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. №2. – С. 196 – 201.

38. О.В. Осадчук. Метод змінних станів для створення математичних моделей радіовимірювальних пристроїв / [О.В. Осадчук, М.В. Деундяк.] // Збірник наукових статей за матеріалами III-ого Всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю 2011. – С . 387 – 390.
39. М. В. Деундяк. Верифікація вимірювачів фазових зсувів інтегровального типу / М. В. Деундяк, В. Д. Рудик. Міжнародний науково-технічно-інфрачервоний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічно-інфрачервоних процесах» №2, 2007. – С . 93–98.
40. О.В. Осадчук. Математична модель чутливого елемента у вигляді піроелектрика для радіовимірювального пристрою на основі оптико-частотного температурного перетворювача / О.В. Осадчук, В.П. Деундяк, М.В. Деундяк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2011. . № 2 – С. 193–198.
41. Пат. 38407 Україна, МПК⁷ G05D 27/02. Пристрій для декодування сигналу інфрачервоного випромінювання / Чорній Р. І.; Чорній Р. І., UA. – № 4; заявл. 29.06.2000; опубл. 15.05.2001. – 5 с.
42. Пат. 36529 Україна, МПК⁷ G01K 11/00. Оптичний перетворювач фізичних величин / Кабацій В. М.; Мигалина Ю. В.; Кабацій М. М.; Мукачівський технологічно-інфрачервоний інститут, UA. – № 20; заявл. 06.06.2008; опубл. 27.10.2008. – 8 с.
43. Пат. 6326610 США, МПК⁷ H01J 7/24. Optical sensor including temperature control / Satoru Muramatsu; Hidetaka Suzuki; Hamamatsu Photonics K.K. (Японія). – № 09/309277; заявл. 11.05.1999; опубл. 04.12.2001. – 13 с.
44. Пат. 38407 Україна, МПК⁷ G05D 27/02. Пристрій для декодування сигналу інфрачервоного випромінювання / Чорній Р. І.; Чорній Р. І., UA. – № 4; заявл. 29.06.2000; опубл. 15.05.2001. – 5 с.
45. Пат. 95584 Україна, МПК⁷ G01J 1/10. Пристрій для декодування сигналу інфрачервоного випромінювання / Антоненко Є. О.; Карпов О. І.; Катрич В. О.; Ярмольчук С. А.; Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, UA. – № 15; заявл. 17.09.2010; опубл. 10.08.2011. – 8 с.
46. Пат. 28580 Україна, МПК⁷ G01J 5/10. Піроелектричний детектор інфрачервоного випромінювання / Склярєнко С. К.; Інститут фізики Національної академії наук України, UA. – № 5; заявл. 05.11.1997; опубл. 16.10.2000. – 3 с.
47. Пат. 4740081 США, МПК⁷ G01B 9/02. Optical measuring apparatus/ Gerhard Martens; Thomas Helzel (Fed. Rep. of Germany); U. S. Philips Corporation. – № 09; заявл. 18.05.1986; опубл. 26. 04. 1988. – 13 с.

48. Пат. 2386933 Российская Федерация, МПК⁷ G01J1/20 (2006.01), G01J11/00 (2006.01). Измеритель мощности излучения импульсных оптических квантовых генераторов / Меньших О. Ф. (RU); Меньших О. Ф. (RU). – № 2008138733/28; заявл. 29.09.2008; опубл. 20.04.2010, Бюл. № 8.
49. Пат. 2368926 Российская Федерация, МПК⁷ G02F1/015 (2006.01). Полупроводниковый преобразователь оптического излучения / Монахов А. Ф.; Монахов А. А.; Монахов А. Ф.; Монахов А. А. – № 2007108897/28; заявл. 12.03.2007; опубл. 27.09.2009, Бюл. № 18.
50. Пат. 2422783 Российская Федерация, МПК⁷ G01J4/04 (2006.01). Устройство измерения поляризационных параметров оптического излучения / Козирацкий А. Ю.; Козирацкий Ю. Л.; Кулешов П. Е.; Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Военный авиационный инженерный университет" (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации (RU). – № 2009112920/28; заявл. 06.04.2009; опубл. 27.06.2011, Бюл. № 12.
51. Пат. 2386157 Российская Федерация, МПК⁷ G02F1/00 (2006.01), G01J5/00 (2006.01). Элемент для детектирования электромагнитного излучения, в частности инфракрасного излучения, модуль формирования оптического инфракрасного изображения, включающий такой элемент, и способ для его реализации / Тинн Себастьян (FR); Юлис (FR). – № 2005126694/28; заявл. 27.02.2007; опубл. 10.04.2010, Бюл. № 8.
52. Пат. 2397458 Российская Федерация, МПК⁷ G01J5/20 (2006.01). Тепловой приемник оптического излучения / Олейник А. С.; Федоров А. В. (RU); Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Саратовский государственный технический университет" (СГТУ) (RU). – № 2009129746/28; заявл. 03.08.2009; опубл. 20.08.2010, Бюл. № 16.
53. Пат. 95192 Российская Федерация, МПК⁷ H02J17/00 (2006.01) H04R23/00 (2006.01). Устройство для преобразования энергии оптического излучения и энергии электромагнитных волн в энергию электрического / Кожелупенко А. В. (UA); Кожелупенко В. Д. (MD); Кожелупенко А. В. (UA); Кожелупенко В. Д. (MD);. – № 2009137829/22, заявл. 12.10.2009; опубл. 10.06.2010, Бюл. № 12.
54. Пат. 97832 Российская Федерация, МПК⁷ G01S3/78 (2006.01). Приемное устройство теплового потока оптического излучения исследуемого объекта / Куприн В. А. (RU); Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Челябинский государственный университет"

(ГОУВПО "ЧелГУ") (RU);. – № 2009149545/22, заявл. 30.12.2009; опубл. 20.09.2010, Бюл. № 16.

55. Пат. 2246779 Российская Федерация, МПК⁷ H01L31/09. Координатно-чувствительный приемник оптического излучения / Рахимов Н.Р. (RU); Серьезнов А.Н. (RU); ФГУП Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С.А. Чаплыгина (RU);. – № 2003132158/28, заявл. 03.11.2003; опубл. 20.02.2005, Бюл. № 4.

56. Пат. 2270983 Российская Федерация, МПК⁷ G01J3/30 (2006.01). Устройство для исследования оптических параметров объекта излучения / Омаров О. А. (RU); Эльдаров Ш. Ш. (RU); Рамазанова Аида Алиевна (RU); Дагестанский государственный университет (RU). – № 2004118478/28, заявл. 18.06.2004; опубл. 27.02.2006, Бюл. № 4.

57. Пат. 2315393 Российская Федерация, МПК⁷ H01L31/0232 (2006.01). Лавинный фотоприемник с расширенным спектральным диапазоном регистрации оптического излучения / Головин В. М. (RU); Мусиенко Ю. В. (RU); МакНалли Дэвид (FR); Головин В. М. (RU); Мусиенко Ю. В. (RU); МакНалли Дэвид (FR). – № 2006109981/28, заявл. 29.03.2006; опубл. 20.01.2008, Бюл. № 22.

58. Пат. 31389 УКРАЇНА, МКІ G 01 K 7/00. Пристрій для вимірювання оптичного випромінювання / Ю.М. Шварц (УКРАЇНА). – 974871; Заявлено 19.08.98; Опубл. 15.12.2000, Бюл. № 7.

59. Пат. 34184 УКРАЇНА, МКІ G 01 K 7/22. Вимірювач оптичного випромінювання / О.В. Бойко, О.З. Готра, З.Ю. Готра, І.Є. Лопатинський (УКРАЇНА). – 99063236; Заявлено 11.06.99; Опубл. 15.02.2001, Бюл. № 1.

60. А.с. 1052887 СССР, МКИ G 01 K 7/22. Датчик температуры / А.И. Дрожжин, А.П. Ермаков (СССР). – 3398723; Заявлено 24.02.82; Опубл. 07.11.83, Бюл. № 41.

61. Пат. 42808 УКРАЇНА, МКІ G 01 K 7/01. Напівпровідниковий датчик оптичного випромінювання / В.С. Голуб (УКРАЇНА). – 97063128; Заявлено 26.06.97; Опубл. 15.11.2001, Бюл. № 10.

62. Пат. 27570 УКРАЇНА, МКІ G 01 K 7/16. Перетворювач оптичного випромінювання / А.О. Дружинін, І.П. Островський, Ю.Р. Когут (УКРАЇНА). – u200705987 Заявлено 30.05.2007; Опубл. 12.11.2007.

63. Пат. 41659 УКРАЇНА, МКІ G 01 K 7/32. Вимірювач магнітного поля і оптичного випромінювання / С.С. Варшава, Р.І. Байцар, М.П. Гінгін, П.Г.

Столярчук (УКРАЇНА). – 2000127515; Заявлено 26.12.2000; Опубл. 17.09.2001, Бюл. № 8.

64. Пат. 5513235 США, МПК⁷ G01K 7/32. Integrated circuit thermometer/ James M. Douglass, Gary V. Zanders, Robert D. Lee; Dallas Semiconductor Corporation (США). – № 327736; заявл. 24.10.1994; опубл. 30.03.1996. – 6 с.

65. Пат. 5237867 США, МПК⁷ G01F 1/68. Thin-film air flow sensor using temperature-biasing resistive element / Charles R. Cook, Jr.; Siemens Automotive L.P. (США). – № 546477; заявл. 29.07.1990; опубл. 24.07.1993. – 10 с.

66. Пат. 5258736 США, МПК⁷ H01C7/10. Temperature sensor or temperature sensor arrangement made from glass ceramic and bonding film resistors / Klaus Kristen, Herwig Scheidler; Schott Glaswerke (Німеччина). – № 731774; заявл. 18.07.1991; опубл. 02.11.1993. – 6 с.

67. Пат. 5133606 США, МПК⁷ G01K 1/00; G01K 7/00. Electronic clinical thermometer / Robert Zaragoza, Thomas V. McLinden, James A. O'Connell; Becton, Dickinson and Company (США). – № 674814; заявл. 15.03.1991; опубл. 28.07.1992. – 5 с.

68. Пат. 4791398 США, МПК⁷ H01C 3/04; H01C 7/02. Thin film platinum resistance thermometer with high temperature diffusion barrier / Fred C. Sittler, Adrian C. Toy; Rosemount Inc. (США). – № 829279; заявл. 13.02.1986; опубл. 13.12.1988. – 3 с.

69. Пат. 39534 УКРАЇНА, МКІ G 01 K 7/16. Пристрій для виміру оптичного випромінювання / В.І. Локарев, Я.Б. Волянська (УКРАЇНА). – 2000105619; Заявлено 03.10.2001; Опубл. 15.06.2001, Бюл. 5.

70. Пат. 40299 УКРАЇНА, МКІ G 01 K 7/001. Мікроелектронний пристрій для виміру оптичного випромінювання / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук (УКРАЇНА). – 2000116706; Заявлено 27.11.2000; Опубл. 16.07.2001, Бюл. № 6.

71. Пат. 5987992 США, МПК⁷ COIN 29/00. Ultrasonic sensor with temperature compensation capacitor / Koichi Watanabe, Chitaka Ochiai, Junshi Ohta; Masaharu Kota; Murata Manufacturing Co., Ltd. (Японія). – № 09/309277; заявл. 13.01.1998; опубл. 23.11.1999. – 9 с.

72. Пат. 6326610 США, МПК⁷ H01J 7/24. Optical sensor including temperature control / Satoru Muramatsu; Hidetaka Suzuki (JP); Hamamatsu Photonics K.K. (Японія). – № 09/309277; заявл. 11.05.1999; опубл. 04.12.2001. – 13 с.

73. Пат. 9808 УКРАЇНА, МКІ G 01 K 7/22. Датчик оптичного випромінювання / С.С. Варшава, Л.М. Пелех, А.М. Чекаєв, К.С. Щербай (УКРАЇНА). – 4913128; Заявлено 20.02.91; Опубл. 30.09.96, Бюл. № 3.

74. Пат. 37329 УКРАЇНА, МКІ G 01 K 5/62. Пристрій для вимірювання оптичного випромінювання / Б.І. Стадник, І.Є. Лопатинський, В.О. Дольніков, Р.Я. Мاستило (УКРАЇНА). – 97126100; Заявлено 17.12.97; Опубл. 15.05.2001, Бюл. № 4.
75. Пат. 15278 УКРАЇНА, МКІ G 01 K 11/12. Пристрій для вимірювання оптичного випромінювання / М.М. Чернякова, Ю.Р. Войцехов, Ю.Ю. Войцехов (УКРАЇНА). – 94053077; Заявлено 24.05.94; Опубл. 30.06.96, Бюл. № 3.
76. Пат. 28039 УКРАЇНА, МКІ G 01 K 11/00. Дистанційний датчик оптичного випромінювання / В.М. Касацій, Ю.В. Мигалина, Б.Я. Хом'як (УКРАЇНА). – u200707418; Заявлено 02.07.2007; Опубл. 26.11.2007.
77. Пат. 4301682 США, МПК⁷ G01J 5/16. Infrared thermometer in making stress-degree measurements for irrigation purposes / Charles E. Everest; Charles E. Everest (США). – № 69269; заявл. 24.08.1979; опубл. 24.12.1981. – 8 с.
78. А. В. Осадчук. Фоточувствительные преобразователи на основе структур с отрицательным сопротивлением / А. В. Осадчук. – Винница:Континент, 1998. – 130с.
79. В. В. Пасынков. Материалы электронной техники / В. В. Пасынков, В. С. Сорокин. – Санкт – Петербург. – 2001. – 367 с.
80. В. К. Новик. Низкотемпературное пироэлектричество / В. К. Новик, Н. Д. Гаврилова. М.: Физика твердого тела. – 2000. – Т. 42. Вып. 6.
81. Н. И. Коротких, Н. Н. Матвеев, А. С. Сидоркин. Пироэлектрические свойства полиэтиленоксида. Москва, Физика твердого тела, 2009, том 51, вып. 6.
82. А. Сергеев. Пироэлектрические датчики ИК излучения / А. Сергеев. М.: Радио №7. – 2004.
83. Н. Н.S. Changa. Pyroelectric effect enhancement through product property under open circuit condition / Н. Н.S. Changa, Z. Huang. journal of applied physics. –2009. –9с.
84. Гариянов С. А. Полупроводниковые приборы с отрицательным сопротивлением / Гариянов С. А., Абезгауз И. Д. – М.:Энергия, 1970. – 320 с.
85. Метрологія и радиоизмерения в телекоммуникационных системах: Учебное пособие / [под. ред. В.Ф. Нефедова]. – М.: Высшая школа. 2001, 383 с.
86. Метрологія та вимірювальна техніка / [В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, В. П. Долгополов, Л. В. Грумінська]. Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця. –2004, –252с.
87. Козловський В. О. Основи підприємництва. Курс лекцій. Част. 1. / В. О. Козловський – Вінниця : ВНТУ, 2005. – 196 с.
88. Козловський В. О. Основи підприємництва. Курс лекцій. Част. 2 / В. О. Козловський – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 184 с.
89. Козловський В. О. Інноваційний менеджмент : Навчальний посібник / В. О. Козловський – Вінниця : ВНТУ, 2007. – 210 с.

90. Козловський В. О., Лесько О. Й. Бізнес-планування: Навчальний посібник / В. О. Козловський, О. Й. Лесько [2-е вид., доп. та переробл.] – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, ВНТУ, 2008. – 241 с.
91. Козловський В. О., Лесько О. Й. Інноваційний менеджмент: Практикум / В. О. Козловський, О. Й. Лесько. – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 166 с.
92. ГОСТ 12.0.003-74.ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
93. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
94. Пособие по расчету и проектированию, естественного, искусственного и совмещенного освещения НИИСФ – М.: Стройиздат. 1985. – 384 с.
95. ДСН 3.3.6-037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
96. ДСН 3.3.6.03999. Державні санітарні норми виробничої та загальної вібрацій.
97. ГОСТ 12.2.032-78. ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
98. 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.
99. ДНАОП 0.00-1.21-98 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. – К. : Держнаглядохоронпраці, 1998. – 382 с.
100. ДБН В.2.5-27-2006. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд.
101. ДБН В.1.1.7-2002. Пожежна безпека об'єктів будівництва.
102. НАПБ Б.03.001-2004. Типові норми належності вогнегасників.
103. СНиП 2.09.02-85. Противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений.
104. СанПиН 5804-91. Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров.

Додаток А
(обов'язковий)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри РТ ВНТУ,
д.т.н., професор
_____ О.В. Осадчук
“ _____ ” _____ 2019 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ
на виконання магістерської кваліфікаційної роботи
Радіовимірювальний пристрій для визначення оптичної потужності
08-36.МКР.014.00.000 ТЗ

Керівник роботи:
_____ д. т. н., професор Осадчук В.С.
“ _____ ” _____ 2019 р.

Розробив студент гр. РТ-18м д/в
_____ Швець І.М.
“ _____ ” _____ 2019 р.

Вінниця ВНТУ 2019

1. ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Робота проводиться на підставі наказу ректора по Вінницькому національному технічному університету № 254 « 02 » 10 2019р. та індивідуального завдання на магістерську кваліфікаційну роботу.

Дата початку роботи: “ 02 ” вересня 2019 р.

Дата закінчення: “ 17 ” грудня 2019 р.

2. МЕТА І ПРИЗНАЧЕННЯ МКР

Метою роботи є покращення метрологічних параметрів чутливості та точності вимірювання потужності оптичного випромінювання на основі радіовимірювального пристрою з від’ємним диференціальним опором.

Об’єктом дослідження є процес перетворення оптичного випромінювання в частотний сигнал у транзисторних структурах з від’ємним диференціальним опором.

Предметом дослідження є метрологічні характеристики та параметри радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності та піроелектричного частотного перетворювача завдяки реактивним властивостям транзисторних структур.

Основними завданнями роботи є:

- аналіз сучасних радіовимірювальних пристроїв з метою обґрунтування їхніх переваг для вимірювання потужності оптичного випромінювання на основі піроелектричного кристалу та транзисторних структур;
- дослідження властивостей піроелектричного кристалу і транзисторних структур та розробка їх математичної моделі, які дозволяють враховувати зміну активної та реактивної складових повного опору від дії потужності оптичного випромінювання, а також дозволяють дослідити її вплив на активну і реактивну складові;
- експериментальна перевірка математичних моделей піроелектричного кристалу та транзисторних структур для створення на їхній основі радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності;
- отримання аналітичних виразів для розрахунку повного опору радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності;
- дослідження питань охорони праці.

3. Джерела розробки

1. Осадчук В. С. Температурні та оптичні мікроелектронні частотні перетворювачі / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. Г. Вербицький. – Вінниця: Універсум – Вінниця, 2001. – 195 с. – ISBN 966–641–037–0.
2. Осадчук В. С. Индуктивный эффект в полупроводниковых приборах / В. С. Осадчук. – К.: Вища школа, 1987. – 155 с.
3. Осадчук В. С. Перетворювачі вологості / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик. – Вінниця : Універсум–Вінниця, 2003. – 208 с.
4. Козловський В. О. Основи підприємництва. Курс лекцій. Част. 1. / В. О. Козловський – Вінниця : ВНТУ, 2005. – 196 с.
5. Козловський В. О. Основи підприємництва. Курс лекцій. Част. 2 / В. О. Козловський – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 184 с.
6. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
7. ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення.
8. ДСН 3.3.6-037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.

4. Виконавець

Вінницький національний технічний університет, кафедра радіотехніки,
студент групи РТ-18м д/в Швець Ігор Михайлович

5. Вимоги до виконання МКР

1. Удосконалено метод вимірювання потужності оптичного випромінювання на основі піроелектричного елемента та реактивних властивостей транзисторних структур, який базується на використанні залежності імпедансу напівпровідникових структур від впливу потужності оптичного випромінювання, що дозволяє значно підвищити чутливість його вимірювання.

2. Удосконалено математичну модель процесів, що перебігають в радіовимірювальному пристрої для визначення оптичної потужності, яка, на відміну від існуючих, дає можливість врахувати вплив на активну і реактивну складові повного опору, що дозволяє оцінити дію зовнішніх інформаційних параметрів на елементи нелінійних еквівалентних схем.

3. Удосконалено аналітичні вирази для розрахунку повного опору радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності, які, на відміну від існуючих, дозволяють встановити залежність активної і реактивної складової повного опору від дії потужності оптичного випромінювання.

6. ЕТАПИ МКР І ТЕРМІНИ ЇХ ВИКОНАННЯ

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Термін виконання		Очікувані результати	Звітна документація
1.	Огляд літературних джерел. Вибір та узгодження теми МКР	02.09.2019	15.09.2019	Проведено огляд літературних джерел. Вибрана тема	Узгодження теми МКР по кафедрі
2.	Аналіз літературних джерел. Попередня розробка основних розділів	16.09.2019	22.09.2019	Проведений аналіз літературних джерел по даній тематиці. Підготовлений матеріал основних розділів	Вступ
3.	Затвердження теми. Розробка технічного завдання	23.09.2019	02.10.2019	Розроблене ТЗ	Наказ ВНТУ про затвердження тем. Додаток А
4.	Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми	03.10.2019	20.10.2019	Проведений аналіз. Розроблені схеми пристрою	Вступ Розділ 1-2 Звіт по переддипломній практиці
5.	Електричні розрахунки. Експериментальне дослідження	21.10.2019	29.10.2019	Проведені розрахунки та дослідження	Розділ 3
6.	Розділ моделювання	30.10.2019	03.11.2019	Проведено моделювання	Результати моделювання
7.	Розробка графічної частини МКР	04.11.2019	10.11.2019	Плакати. Структурні та електричні схеми	Графічна частина
8.	Аналіз економічної ефективності розробки	11.11.2019	15.11.2019	Економічна частина	Розділ 5
9.	Охорона праці (ОП)	16.11.2019	22.11.2019	Частина БЖД	Розділ 6
10.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	23.11.2019	27.11.2019	Оформлена документація	ПЗ та графічна частина
11.	Нормоконтроль	28.11.2019	29.11.2019	Підпис нормоконтроля	Оформлена ПЗ та графічна частина
12.	Попередній захист МКР, доопрацювання, рецензування МКР	02.12.2019	06.12.2019	Позитивні відзиви	Відзив. Рецензія
13.	Захист МКР ЕК	09.12.2019	17.12.2019	Позитивний захист	Протокол ЕК

7. ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОРЯДОК РЕАЛІЗАЦІЇ МКР

В результаті виконання роботи буде зроблено:

- Розроблено структурну схему пристрою декодування сигналу інфрачервоне випромінювання.
- Розроблено пристрій для вимірювання інтенсивності оптичного випромінювання.
- Розроблено оптичний перетворювач для трансформації потоку світлового випромінювання.
- Результати комп'ютерного моделювання радіовимірювального пристрою.
- Проведено результати дослідження радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності.
- Проведено результати моделювання радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності.

Очікуваний економічний ефект. При впровадженні результатів досліджень та розробки очікується покращення характеристик розроблюваного пристрою.

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 роботи повинна містити:

- електричну схему радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності;
- структурну схему радіовимірювального пристрою;
- математичну модель радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності.

- результати комп'ютерного моделювання радіовимірювального пристрою для визначення оптичної потужності.
- дослідження питань охорони праці.

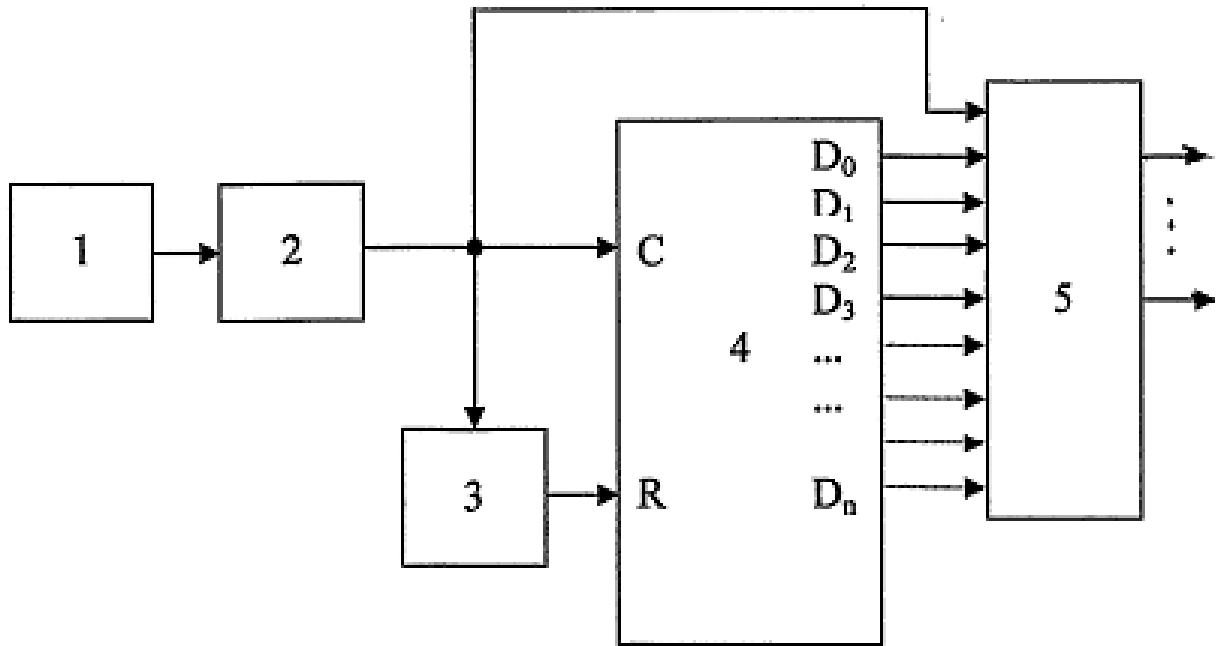
11. ВИМОГИ ЩОДО ТЕХНІЧНОГО ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ З ОБМЕЖЕНИМ ДОСТУПОМ

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

Додаток Б
(обов'язковий)

**РАДІОВІМІРЮВАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИЧНОЇ
ПОТУЖНОСТІ**

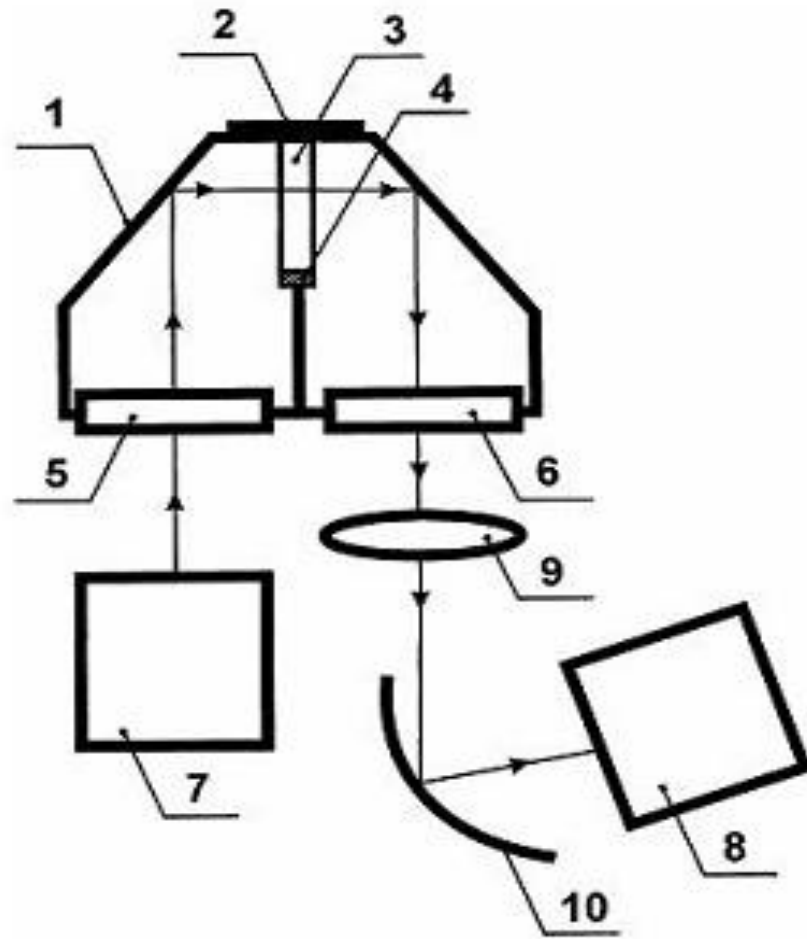
Структурна схема пристрою



Додаток В
(обов'язковий)

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИЧНОЇ
ПОТУЖНОСТІ**

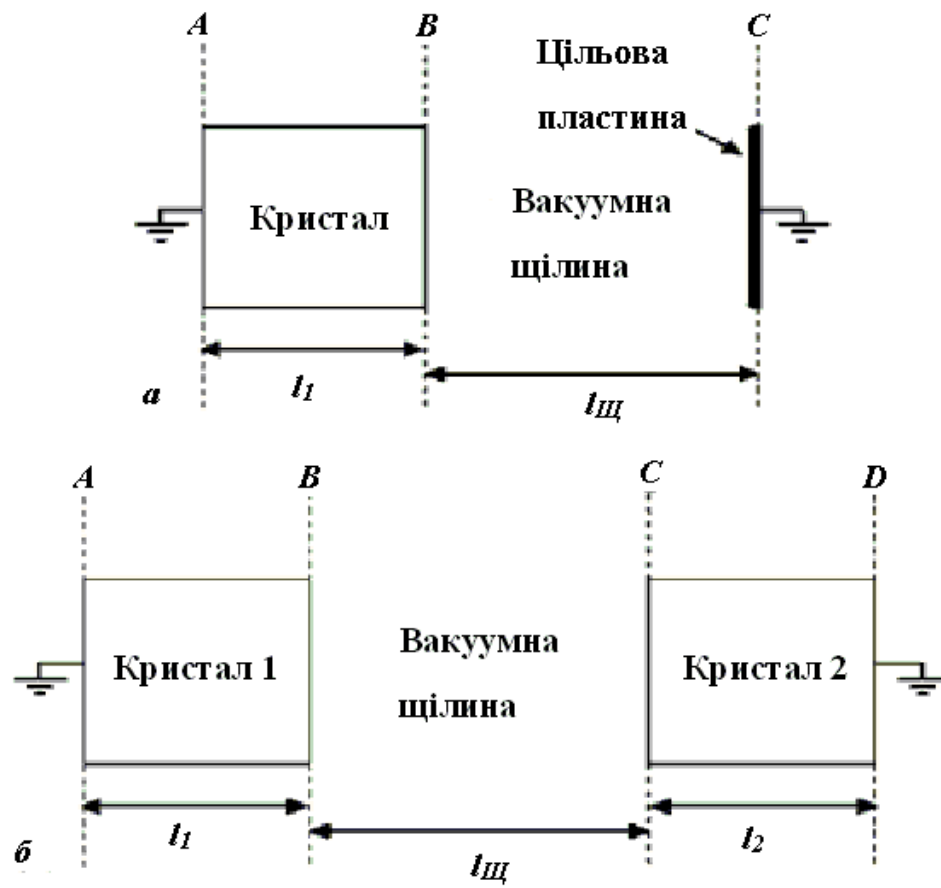
Схема оптичного перетворювача фізичних величин



Додаток Д
(обов'язковий)

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИЧНОЇ
ПОТУЖНОСТІ**

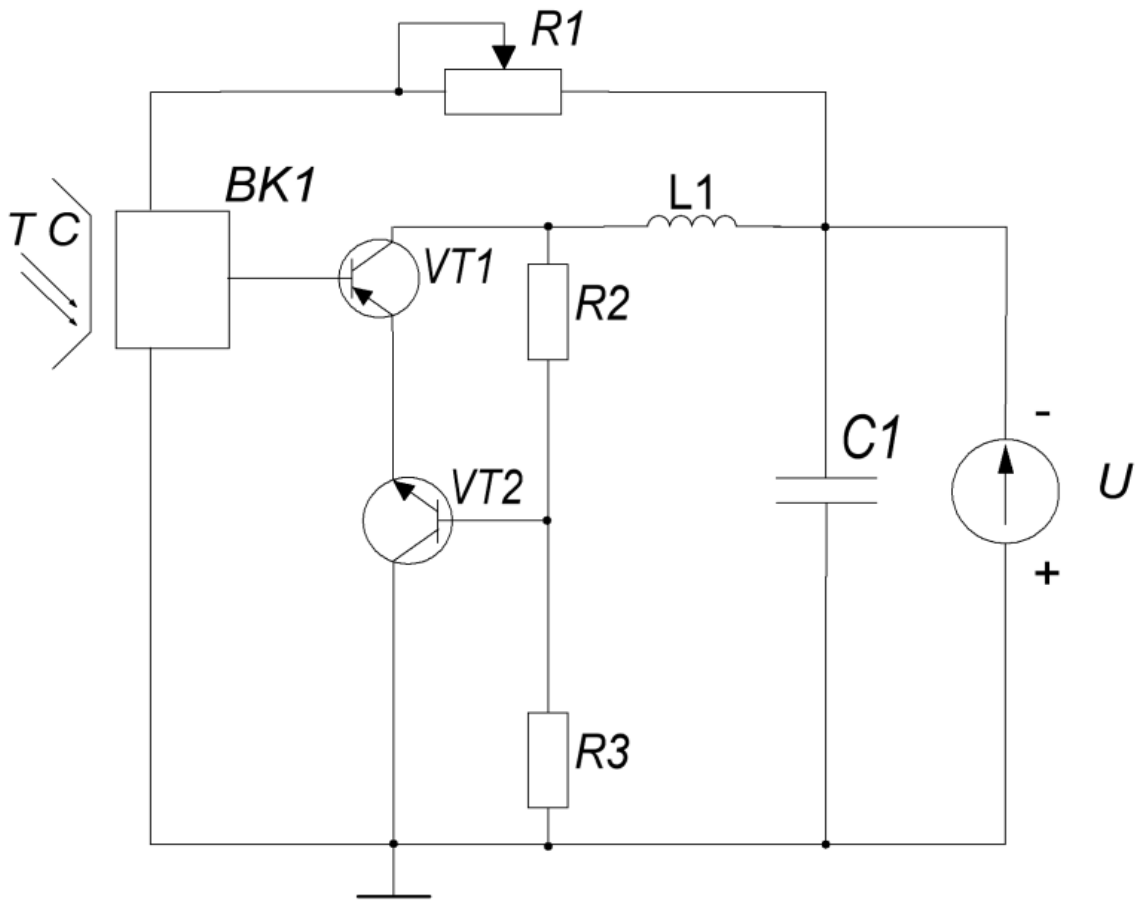
Схема однокристалльної та двокристалльної системи



Додаток Е
(обов'язковий)

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИЧНОЇ
ПОТУЖНОСТІ**

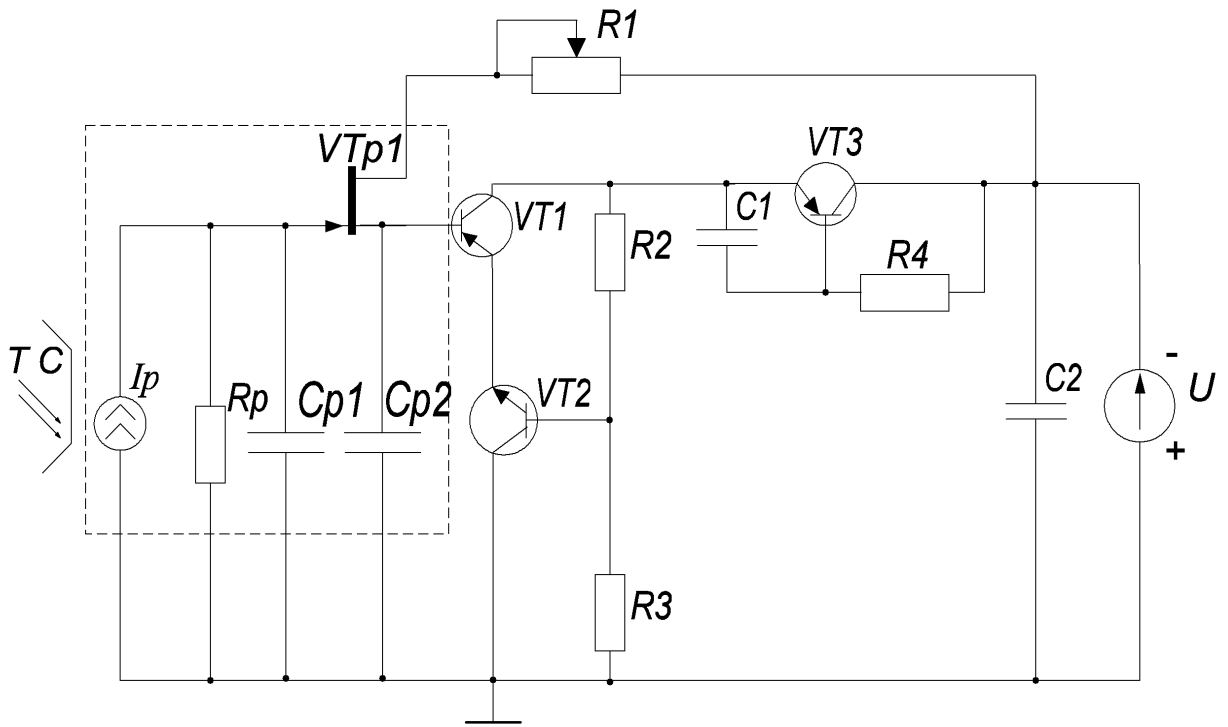
Схема електрична принципова



Додаток Ж
(обов'язковий)

**РАДІОВІМІРЮВАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИЧНОЇ
ПОТУЖНОСТІ**

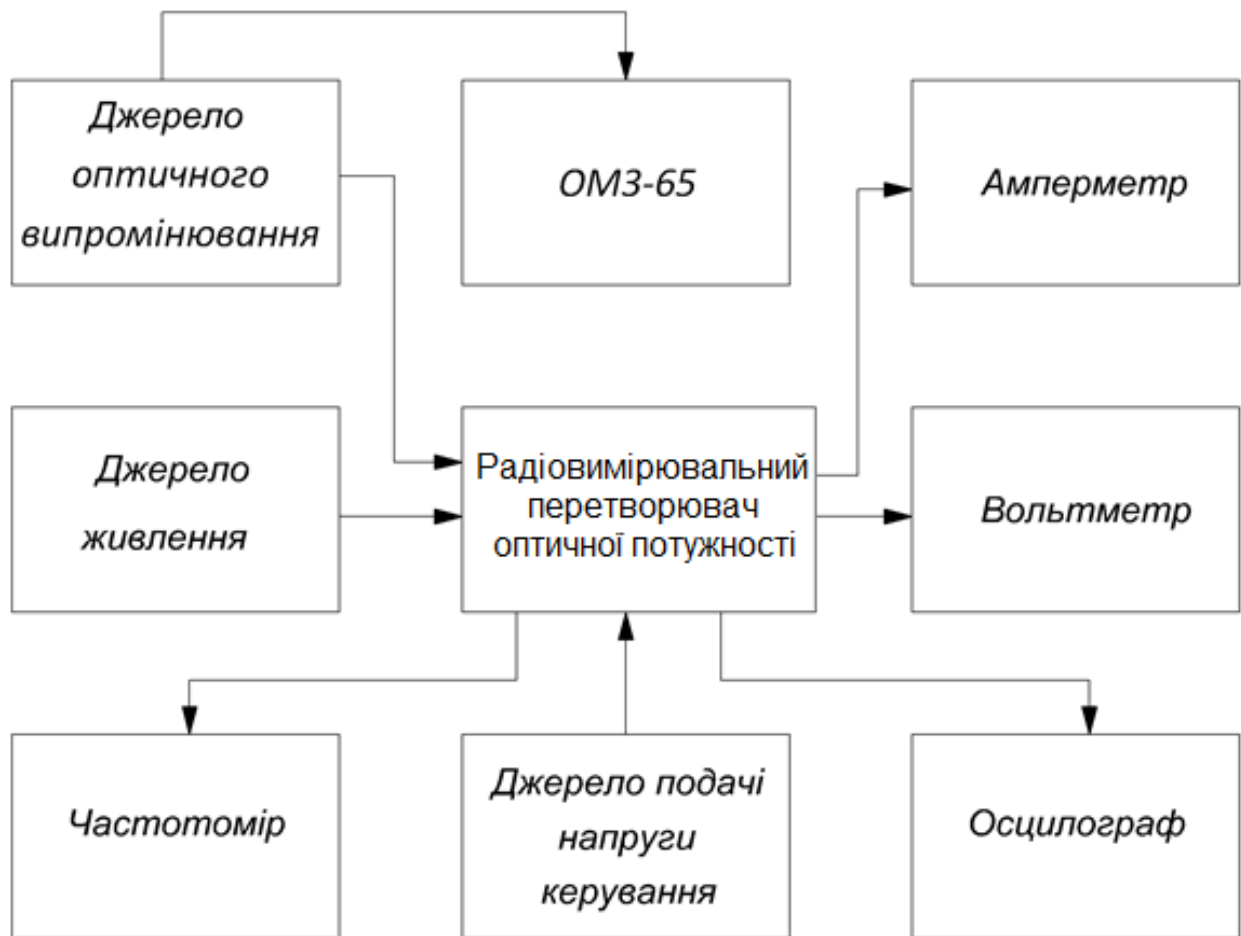
Схема електрична принципова радіовимірювального перетворювача оптичної
потужності



Додаток К
(обов'язковий)

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИЧНОЇ
ПОТУЖНОСТІ**

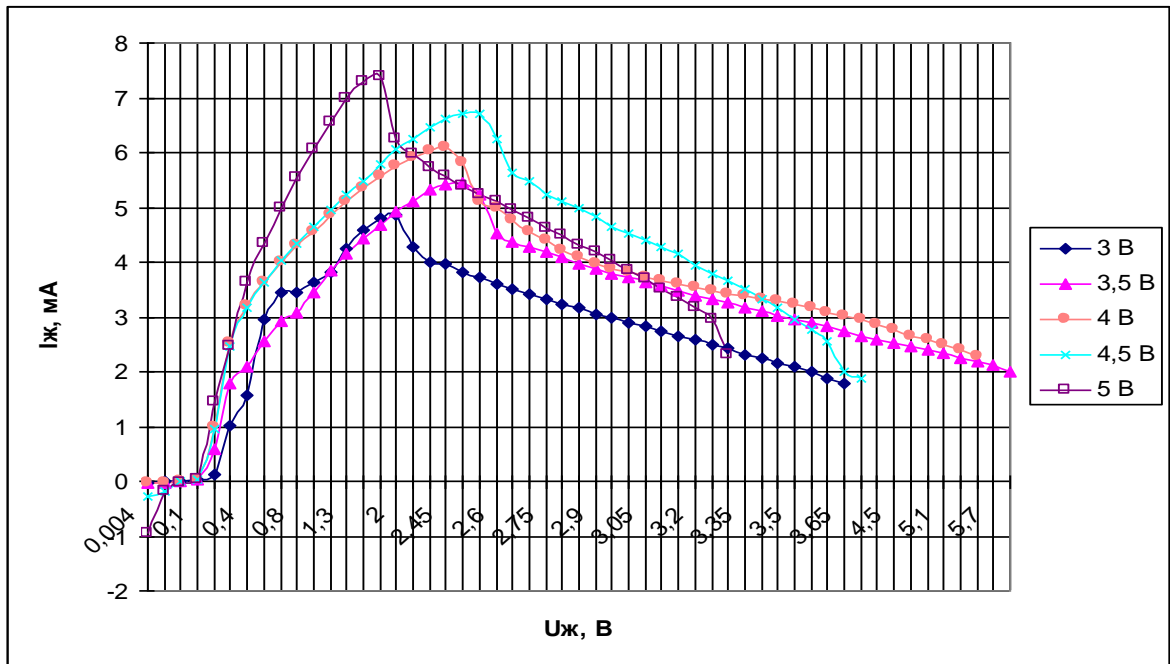
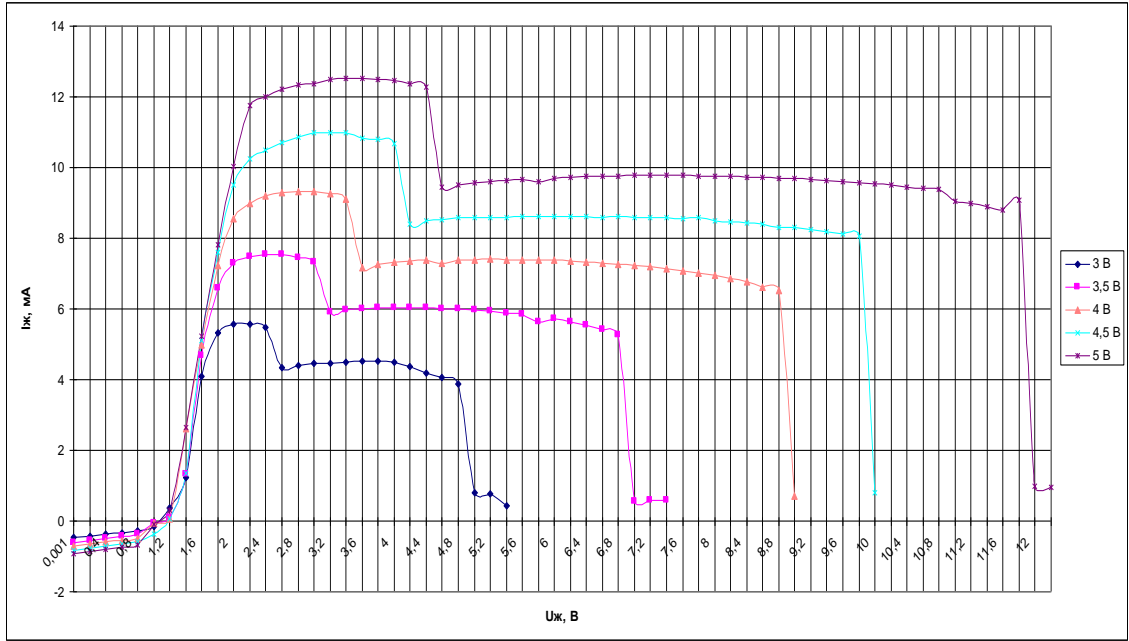
Блок–схема методики проведення вимірювань потужності оптичного
випромінювання

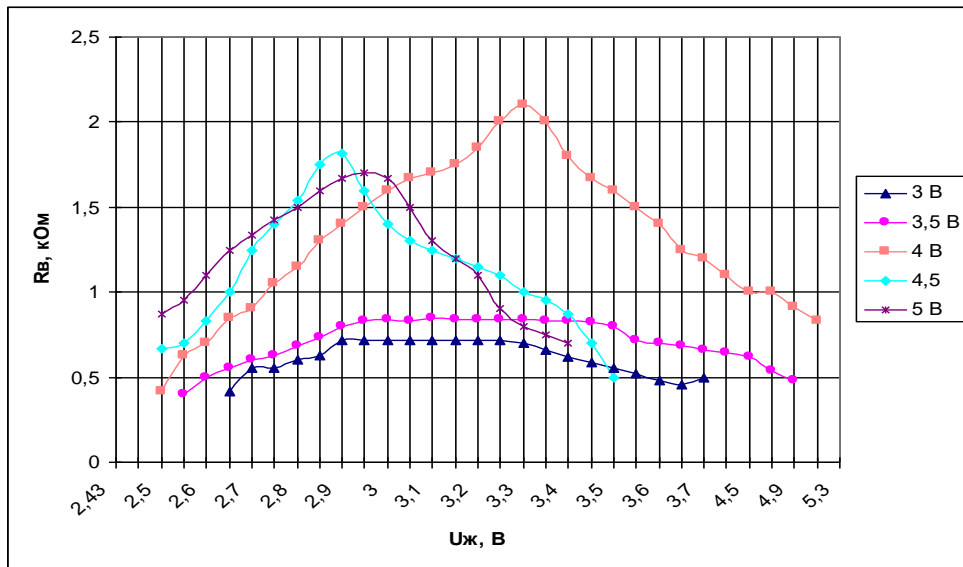
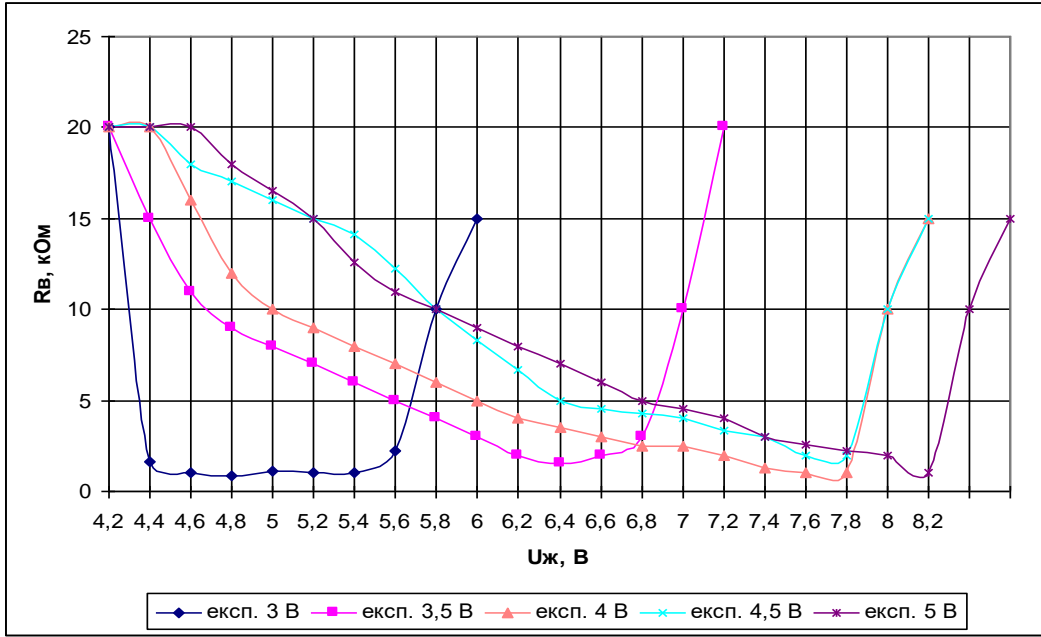


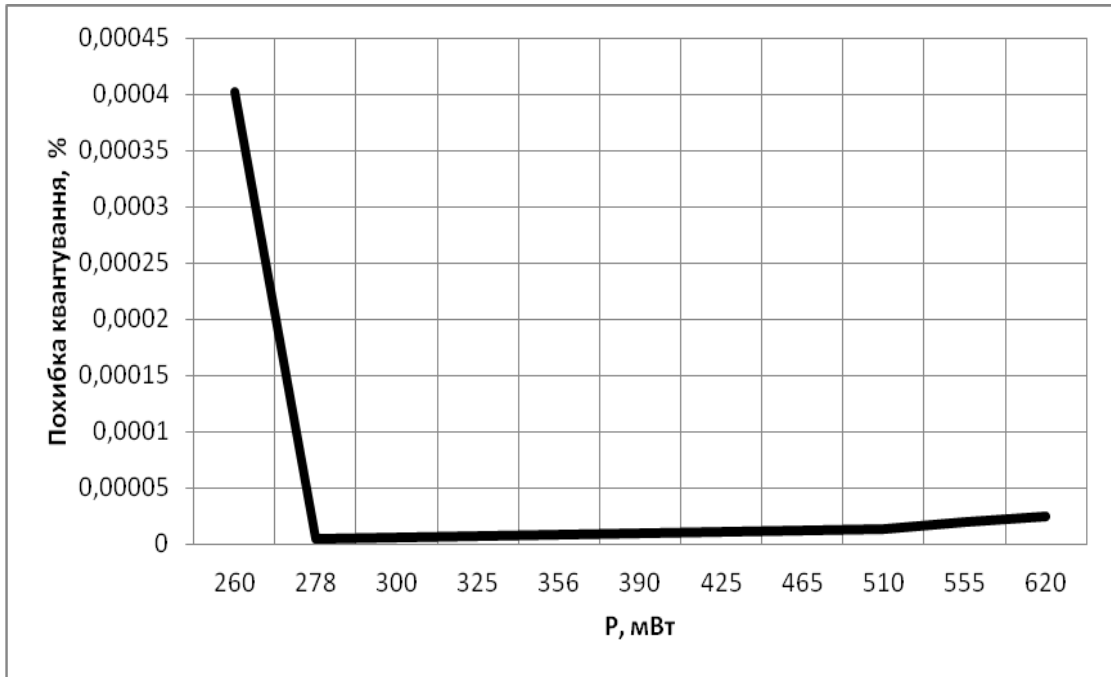
Додаток Л
(обов'язковий)

**РАДІОВІМІРЮВАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИЧНОЇ
ПОТУЖНОСТІ**

Експериментальні дослідження вольт–амперної характеристики
радіовимірювального перетворювача оптичної потужності







Додаток М

Лістинги програм в середовищі Matlab для розрахунку параметрів радіовимірювальних пристроїв для визначення оптичної потужності

```

clear
echo off
clc
disp(' ');
disp('
');
disp('
');
disp('
');
disp('
');
disp('
');
disp('
');
disp('
');
disp('
');
disp(' ');
%
%    константы
%
i0=2.4e-14; tp=1e-5;   pi=0.09;
ec=0.05;  lp=2.3e-2;  rrs=0.09;
l=8e-4;   fk=4.1206e12; li=0.1e-9;
z=1.5e-2;  fk1=2.2986e15; ls=0.1e-9;
zz=1e-2;  rzi=1e8;   lz=0.1e-9;
bt=0.02586; czs=1e-12;  ckor=0.5e-12;
Vfb=-1.25; rrz=0.09;   czs=0.091e-12;
czi=3e-12; cs=0.707107; i=sqrt(-1);
%
disp('        введите переменные');
%
u1 = input(' начальное напряжение { B } ');
%
u2 = input(' конечное напряжение { B } ');
%
if (u2<u1) break
end
%
du = input(' шаг изменения напряжения { B } ');
%
if (du>(u2-u1)) break
end
%
ift1 = input(' фототок начальный { A } ');

```

```

%
ift2 = input(' фототок конечный { A } ');
%
if (ift2<ift1) break
end
%
dift1 = input(' шаг изменения фототока { A } ');
%
if (dift1>(ift2-ift1)) break
end
%
f=input(' значение частоты { Гц }');
%
uz2=input(' значение напряжения питания { В }');
%
S1=input(' значение крутизны { A/B }');
%
clc
disp('expect ...');
S2=S1;
uz1=u1;
j=1;
%
% формулы
%
for uz1=uz1:du:u2,
uz1=uz1
ift=ift1;
xi=1;
for ift=ift1:dift1:ift2,
ift=ift
ei=bt*log(1+ift/i0);
ec=ei*75/100;
w=2*pi*f;
Z1=rrz-i*w*lz;
qq=(w*czi*rzi)^2;
R2=rzi/(1+qq);
X2=w*czi*rzi*rzi/(1+qq);
Z2=R2-i*X2;
Z3=-i*1/(w*ckor);
Z4=-i*1/(w*czs);
sa=sqrt(1+w*w*tp*tp);

```

```

sa1=cs*sqrt(sa+1);
sb1=cs*sqrt(sa-1);
bb1=sb1*1*lp;
aa1=sa1*1*lp;
ck1=exp(-aa1);
ck2=cos(-bb1);
ck=ck1*ck2;
dk1=sin(-bb1);
dk=ck1*dk1;
nk=sin(2*bb1);
nk1=cos(bb1);
nk2=nk1*nk1;
nk3=exp(aa1)/2-exp(-aa1)/2;
nk4=nk3*nk3;
nk5=2*(nk4+nk2);
mk=exp(2*aa1)/2-exp(-2*aa1)/2;
mkk=mk/nk5;
nkk=nk/nk5;
ckd=ck-exp(bt*(ec-ei));
m=mkk*ckd-nkk*dk+ck;
n=nkk*ckd-mkk*dk+dk;
ps=uz1+Vfb-2769.23*(sqrt(1+0.0278*(bt*uz1-bt*Vfb-1))-1);
xxr1=sqrt(bt*ps)*exp(-bt*(ps+ei));
xr=fk*xxr1;
pp=sa1*sa1+sb1*sb1;
xr1=pp*(m*m+n*n);
kl1=(m*sa1-n*sb1)/xr1;
kl2=(n*sa1+m*sb1)/xr1;
RSI=xr*kl1;
XSI=-xr*kl2;
Z5=RSI-i*XSI;
xxr2=fk1*xxr1;
RSSI=xxr2*kl1;
XSSI=-xxr2*kl2;
Z15=RSSI-i*XSSI;
ssg=bt*ift*pp;
rs=sa1/ssg;
gg=sqrt(8.496e-12/(2*(0.8-ec)));
cc1=5.25e-4*gg;
gg1=ssg/(w*sb1);
csp=cc1+gg1;
cc2=3.5e-4*gg;

```


$csp1=cc2+gg1;$
 $ww=(w*rs*csp)^2;$
 $R6=rs/(1+ww);$
 $X6=(w*csp*rs*rs)/(1+ww);$
 $Z6=R6-i*X6;$
 $ww1=(w*rs*csp1)^2;$
 $R16=rs/(1+ww1);$
 $X16=(w*csp1*rs*rs)/(1+ww1);$
 $Z16=R16-i*X16;$
 $Z7=Z1; Z10=Z1; Z9=Z6; Z8=Z3; Z11=Z1; Z12=Z2;$
 $Z14=Z4; Z17=Z7; Z18=Z8; Z19=Z16; Z20=Z10; Z13=Z3;$
 $a12=0; a13=0; a14=0; a15=0; a16=0; a21=0; a23=0; a24=0;$
 $a26=0; a27=0; a29=0; a31=0; a32=0; a35=0; a36=0; a38=0;$
 $a39=0; a41=0; a42=0; a47=0; a48=0; a49=0; a51=0; a53=0;$
 $a57=0; a58=0; a59=0; a61=0; a62=0; a63=0; a67=0; a68=0;$
 $a69=0; a72=0; a74=0; a75=0; a76=0; a83=0; a84=0; a85=0;$
 $a86=0; a92=0; a93=0; a94=0; a95=0; a96=0;$
 $a11=Z17+Z16+Z14+Z11;$
 $a17=-Z17-Z16;$
 $a18=Z11;$
 $a19=-Z14;$
 $a22=Z8+Z13;$
 $a25=-Z8;$
 $a28=-Z13;$
 $a33=Z3+Z18;$
 $a34=Z3;$
 $a37=Z18;$
 $a43=Z3;$
 $a44=Z1+Z2+Z3+Z9+Z10;$
 $a45=Z9+Z10;$
 $a46=Z2;$
 $a52=-Z8;$
 $ZZ1=Z5*S1*Z2;$
 $a54=Z10+Z9-ZZ1;$
 $a55=Z5+Z6+Z7+Z8+Z9+Z10;$
 $a56=-Z5-ZZ1;$
 $a64=Z2+ZZ1;$
 $a65=-Z5;$
 $a66=Z2+Z4+Z5+ZZ1;$
 $a71=-Z16-Z17;$
 $a73=Z18;$
 $a77=Z15+Z16+Z17+Z18+Z19+Z20;$

$$ZZ2=Z15*S2*Z12;$$

$$a78=Z20+Z19-ZZ2;$$

$$a79=-Z15-ZZ2;$$

$$a81=Z11;$$

$$a82=-Z13;$$

$$a87=Z19+Z20;$$

$$a88=Z11+Z12+Z13+Z19+Z20;$$

$$a89=Z12;$$

$$a91=-Z14;$$

$$a97=-Z15;$$

$$a98=Z12+ZZ2;$$

$$a99=Z12+Z14+Z15+ZZ2;$$

$$b1=uz1+Z16*ift;$$

$$b2=0; b6=0; b9=0;$$

$$b3=uz2;$$

$$b4=Z9*ift;$$

$$b5=Z9*ift-Z6*ift;$$

$$b7=Z19*ift-Z16*ift;$$

$$b8=Z19*ift;$$

$$DD=[a11 a12 a13 a14 a15 a16 a17 a18 a19;$$

$$a21 a22 a23 a24 a25 a26 a27 a28 a29;$$

$$a31 a32 a33 a34 a35 a36 a37 a38 a39;$$

$$a41 a42 a43 a44 a45 a46 a47 a48 a49;$$

$$a51 a52 a53 a54 a55 a56 a57 a58 a59;$$

$$a61 a62 a63 a64 a65 a66 a67 a68 a69;$$

$$a71 a72 a73 a74 a75 a76 a77 a78 a79;$$

$$a81 a82 a83 a84 a85 a86 a87 a88 a89;$$

$$a91 a92 a93 a94 a95 a96 a97 a98 a99];$$

$$\text{delta}=\text{det}(DD);$$

$$DDx=[b1 a12 a13 a14 a15 a16 a17 a18 a19;$$

$$b2 a22 a23 a24 a25 a26 a27 a28 a29;$$

$$b3 a32 a33 a34 a35 a36 a37 a38 a39;$$

$$b4 a42 a43 a44 a45 a46 a47 a48 a49;$$

$$b5 a52 a53 a54 a55 a56 a57 a58 a59;$$

$$b6 a62 a63 a64 a65 a66 a67 a68 a69;$$

$$b7 a72 a73 a74 a75 a76 a77 a78 a79;$$

$$b8 a82 a83 a84 a85 a86 a87 a88 a89;$$

$$b9 a92 a93 a94 a95 a96 a97 a98 a99];$$

$$\text{deltax}=\text{det}(DDx);$$

$$I1=\text{deltax}/\text{delta};$$

$$MZ=uz2/I1$$

$$MR(xi,j)=\text{real}(MZ);$$

```
MX(xi,j)=imag(MZ);
MC(xi,j)=1/(MX(xi,j)*w);
ML(xi,j)=MX(xi,j)/w;
MQ(xi,j)=(atan(MX(xi,j)/MR(xi,j)))*180/pi;
F0(xi,j)=1/(2*pi*sqrt(5.5113e-11*real(ML(xi,j))));
Up(xi,j)=real(I1)*1/(w*80e-12);
xi=xi+1;
end
j=j+1;
end
disp('Трёхмерные зависимости параметров');
pause
mesh(MR)
title('R = R ( IFT,U )')
pause
mesh(MX)
title('X = X ( IFT,U )')
pause
mesh(MC)
title('C = C ( IFT,U )')
pause
end
```

```

clear
echo off
clc
disp(' ');
disp('
');
disp('
');
disp('
');
disp('
');
disp('
');
disp('
');
disp('
');
disp('
');
disp('
');
disp(' ');
%
%      константы
%
i0=2.4e-14; tp=1e-5;   pi=0.09;
ec=0.05;   lp=2.3e-2;   rrs=0.09;
l=8e-4;   fk=4.1206e12; li=0.1e-9;
z=1.5e-2;   fk1=2.2986e15; ls=0.1e-9;
zz=1e-2;   rzi=1e8;   lz=0.1e-9;
bt=0.02586; czs=1e-12;   ckor=0.5e-12;
Vfb=-1.25;   rrz=0.09;   czs=0.091e-12;
czi=3e-12;   cs=0.707107;   i=sqrt(-1);
%
disp('      введите переменные');
%
u1 = input(' начальное напряжение { B } ');
%
u2 = input(' конечное напряжение { B } ');
%
if (u2<u1) break
end
%
du = input(' шаг изменения напряжения { B } ');
%
if (du>(u2-u1)) break
end
%
f1 = input(' начальная частота { Гц } ');
%

```

```

f2 = input(' конечная частота { Гц } ');
%
if (f2<f1) break
end
%
df1 = input(' шаг изменения частоты { Гц } ');
%
if (df1>(f2-f1)) break
end
%
ift=input(' значение фототока { A }');
%
uz2=input(' значение напряжения питания { B }');
%
S1=input(' значение крутизны { A/B }');
%
clc
disp('expect ...');
S2=S1;
uz1=u1;
j=1;
%
% формулы
%
for uz1=uz1:du:u2,
    uz1=uz1
    f=f1;
    xi=1;
    for f=f1:df1:f2,
        f=f
        ei=bt*log(1+ift/i0);
        ec=ei*75/100;
        w=2*pi*f;
        Z1=rz-i*w*lz;
        qq=(w*csi*rzi)^2;
        R2=rzi/(1+qq);
        X2=w*csi*rzi*rzi/(1+qq);
        Z2=R2-i*X2;
        Z3=-i*1/(w*ckor);
        Z4=-i*1/(w*czs);
        sa=sqrt(1+w*w*tp*tp);
        sa1=cs*sqrt(sa+1);
    end
end

```

```

sb1=cs*sqrt(sa-1);
bb1=sb1*1*lp;
aa1=sa1*1*lp;
ck1=exp(-aa1);
ck2=cos(-bb1);
ck=ck1*ck2;
dk1=sin(-bb1);
dk=ck1*dk1;
nk=sin(2*bb1);
nk1=cos(bb1);
nk2=nk1*nk1;
nk3=exp(aa1)/2-exp(-aa1)/2;
nk4=nk3*nk3;
nk5=2*(nk4+nk2);
mk=exp(2*aa1)/2-exp(-2*aa1)/2;
mkk=mk/nk5;
nkk=nk/nk5;
ckd=ck-exp(bt*(ec-ei));
m=mkk*ckd-nkk*dk+ck;
n=nkk*ckd-mkk*dk+dk;
ps=uz1+Vfb-2769.23*(sqrt(1+0.0278*(bt*uz1-bt*Vfb-1))-1);
xxr1=sqrt(bt*ps)*exp(-bt*(ps+ei));
xr=fk*xxr1;
pp=sa1*sa1+sb1*sb1;
xr1=pp*(m*m+n*n);
kl1=(m*sa1-n*sb1)/xr1;
kl2=(n*sa1+m*sb1)/xr1;
RSI=xr*kl1;
XSI=-xr*kl2;
Z5=RSI-i*XSI;
xxr2=fk1*xxr1;
RSSI=xxr2*kl1;
XSSI=-xxr2*kl2;
Z15=RSSI-i*XSSI;
ssg=bt*ift*pp;
rs=sa1/ssg;
gg=sqrt(8.496e-12/(2*(0.8-ec)));
cc1=5.25e-4*gg;
gg1=ssg/(w*sb1);
csp=cc1+gg1;
cc2=3.5e-4*gg;
csp1=cc2+gg1;

```

$$\begin{aligned}
ww &= (w*rs*csp)^2; \\
R6 &= rs/(1+ww); \\
X6 &= (w*csp*rs*rs)/(1+ww); \\
Z6 &= R6-i*X6; \\
ww1 &= (w*rs*csp1)^2; \\
R16 &= rs/(1+ww1); \\
X16 &= (w*csp1*rs*rs)/(1+ww1); \\
Z16 &= R16-i*X16; \\
Z7 &= Z1; \quad Z10 = Z1; \quad Z9 = Z6; \quad Z8 = Z3; \quad Z11 = Z1; \quad Z12 = Z2; \\
Z14 &= Z4; \quad Z17 = Z7; \quad Z18 = Z8; \quad Z19 = Z16; \quad Z20 = Z10; \quad Z13 = Z3; \\
a12 &= 0; \quad a13 = 0; \quad a14 = 0; \quad a15 = 0; \quad a16 = 0; \quad a21 = 0; \quad a23 = 0; \quad a24 = 0; \\
a26 &= 0; \quad a27 = 0; \quad a29 = 0; \quad a31 = 0; \quad a32 = 0; \quad a35 = 0; \quad a36 = 0; \quad a38 = 0; \\
a39 &= 0; \quad a41 = 0; \quad a42 = 0; \quad a47 = 0; \quad a48 = 0; \quad a49 = 0; \quad a51 = 0; \quad a53 = 0; \\
a57 &= 0; \quad a58 = 0; \quad a59 = 0; \quad a61 = 0; \quad a62 = 0; \quad a63 = 0; \quad a67 = 0; \quad a68 = 0; \\
a69 &= 0; \quad a72 = 0; \quad a74 = 0; \quad a75 = 0; \quad a76 = 0; \quad a83 = 0; \quad a84 = 0; \quad a85 = 0; \\
a86 &= 0; \quad a92 = 0; \quad a93 = 0; \quad a94 = 0; \quad a95 = 0; \quad a96 = 0; \\
a11 &= Z17+Z16+Z14+Z11; \\
a17 &= -Z17-Z16; \\
a18 &= Z11; \\
a19 &= -Z14; \\
a22 &= Z8+Z13; \\
a25 &= -Z8; \\
a28 &= -Z13; \\
a33 &= Z3+Z18; \\
a34 &= Z3; \\
a37 &= Z18; \\
a43 &= Z3; \\
a44 &= Z1+Z2+Z3+Z9+Z10; \\
a45 &= Z9+Z10; \\
a46 &= Z2; \\
a52 &= -Z8; \\
ZZ1 &= Z5*S1*Z2; \\
a54 &= Z10+Z9-ZZ1; \\
a55 &= Z5+Z6+Z7+Z8+Z9+Z10; \\
a56 &= -Z5-ZZ1; \\
a64 &= Z2+ZZ1; \\
a65 &= -Z5; \\
a66 &= Z2+Z4+Z5+ZZ1; \\
a71 &= -Z16-Z17; \\
a73 &= Z18; \\
a77 &= Z15+Z16+Z17+Z18+Z19+Z20; \\
ZZ2 &= Z15*S2*Z12;
\end{aligned}$$

$a_{78}=Z_{20}+Z_{19}-ZZ_2;$
 $a_{79}=-Z_{15}-ZZ_2;$
 $a_{81}=Z_{11};$
 $a_{82}=-Z_{13};$
 $a_{87}=Z_{19}+Z_{20};$
 $a_{88}=Z_{11}+Z_{12}+Z_{13}+Z_{19}+Z_{20};$
 $a_{89}=Z_{12};$
 $a_{91}=-Z_{14};$
 $a_{97}=-Z_{15};$
 $a_{98}=Z_{12}+ZZ_2;$
 $a_{99}=Z_{12}+Z_{14}+Z_{15}+ZZ_2;$
 $b_1=uz_1+Z_{16}*ift;$
 $b_2=0; b_6=0; b_9=0;$
 $b_3=uz_2;$
 $b_4=Z_9*ift;$
 $b_5=Z_9*ift-Z_6*ift;$
 $b_7=Z_{19}*ift-Z_{16}*ift;$
 $b_8=Z_{19}*ift;$
 $DD=[a_{11} a_{12} a_{13} a_{14} a_{15} a_{16} a_{17} a_{18} a_{19};$
 $a_{21} a_{22} a_{23} a_{24} a_{25} a_{26} a_{27} a_{28} a_{29};$
 $a_{31} a_{32} a_{33} a_{34} a_{35} a_{36} a_{37} a_{38} a_{39};$
 $a_{41} a_{42} a_{43} a_{44} a_{45} a_{46} a_{47} a_{48} a_{49};$
 $a_{51} a_{52} a_{53} a_{54} a_{55} a_{56} a_{57} a_{58} a_{59};$
 $a_{61} a_{62} a_{63} a_{64} a_{65} a_{66} a_{67} a_{68} a_{69};$
 $a_{71} a_{72} a_{73} a_{74} a_{75} a_{76} a_{77} a_{78} a_{79};$
 $a_{81} a_{82} a_{83} a_{84} a_{85} a_{86} a_{87} a_{88} a_{89};$
 $a_{91} a_{92} a_{93} a_{94} a_{95} a_{96} a_{97} a_{98} a_{99}];$
 $\delta=\det(DD);$
 $DDx=[b_1 a_{12} a_{13} a_{14} a_{15} a_{16} a_{17} a_{18} a_{19};$
 $b_2 a_{22} a_{23} a_{24} a_{25} a_{26} a_{27} a_{28} a_{29};$
 $b_3 a_{32} a_{33} a_{34} a_{35} a_{36} a_{37} a_{38} a_{39};$
 $b_4 a_{42} a_{43} a_{44} a_{45} a_{46} a_{47} a_{48} a_{49};$
 $b_5 a_{52} a_{53} a_{54} a_{55} a_{56} a_{57} a_{58} a_{59};$
 $b_6 a_{62} a_{63} a_{64} a_{65} a_{66} a_{67} a_{68} a_{69};$
 $b_7 a_{72} a_{73} a_{74} a_{75} a_{76} a_{77} a_{78} a_{79};$
 $b_8 a_{82} a_{83} a_{84} a_{85} a_{86} a_{87} a_{88} a_{89};$
 $b_9 a_{92} a_{93} a_{94} a_{95} a_{96} a_{97} a_{98} a_{99}];$
 $\delta_{tax}=\det(DDx);$
 $I_1=\delta_{tax}/\delta;$
 $MZ=uz_2/I_1$
 $MR(x_{i,j})=\text{real}(MZ);$
 $MX(x_{i,j})=\text{imag}(MZ);$


```
MC(xi,j)=1/(MX(xi,j)*w);
ML(xi,j)=MX(xi,j)/w;
MQ(xi,j)=(atan(MX(xi,j)/MR(xi,j)))*180/pi;
FO(xi,j)=1/(2*pi*sqrt(5.5113e-11*real(ML(xi,j))));
Up(xi,j)=real(I1)/(w*8e-11);
xi=xi+1;
end
j=j+1;
end
disp('Трёхмерные зависимости параметров');
pause
mesh(MR)
title('R = R ( F,U )')
pause
mesh(MX)
title('X = X ( F,U )')
pause
mesh(MC)
title('C = C ( F,U )')
pause
mesh(ML)
title('L = L ( F,U )')
pause
end
```