

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 ПАРАМЕТРИЧНИЙ
ПЕРЕТВОРЮВАЧ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ**

Виконав: студент 2-го курсу, групи РТ-18м
спеціальності 172 – Телекомунікації та
радіотехніка Освітня програма: Радіотехніка
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Патлатюк М. Р.
(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., професор каф. РТ
Осадчук О. В.
(прізвище та ініціали)

« ____ » _____ 2019 р.
Рецензент: к.т.н., доцент. каф. ТКСТБ

(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

“ 03 ” 10 2019 року

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

Патлатюку Миколі Руслановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Радіовимірювальний параметричний перетворювач оптичного випромінювання»

керівник роботи Осадчук Олександр Володимирович, д.т.н., професор

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

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

2. Строк подання студентом роботи 10 січня 2018 року

3. Вихідні дані до роботи: Розроблено радіовимірювальні прилади на основі оптичних перетворювачів з використанням біполярного і польового транзисторів для вимірювання зміни величини оптичної потужності від 20 мкВт/см² до 140 мкВт/см² з чутливістю від 90 Гц/мкВт/см² до 800 Гц/мкВт/см² для перетворювача з пасивною індуктивністю та від 0 мкВт/см² до 120 мкВт/см² з чутливістю від 0,3 кГц/мкВт/см² до 2,65 кГц/мкВт/см² для перетворювача з активною індуктивністю при похибці вимірювання 0,32% і амплітудою вихідного сигналу 5 В.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): аналіз сучасного стану розвитку приладів для вимірювання оптичної потужності; математичні моделі фотореактивного ефекту у напівпровідникових приладах; дослідження та розробка радіовимірювальних параметричних перетворювачів оптичного випромінювання; проектування радіо вимірювального приладу потужності оптичного випромінювання на основі частотного перетворювача; економічна частина, безпека життєдіяльності; висновки; перелік посилань; додатки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): пристрій для виявлення та діагностування джерел оптичного випромінювання; система контролю оптичного випромінювання; класифікація приладів для вимірювання; еквівалентна схема фотореактивного МОН–транзистора; електрична схема приладу; електрична схема приладу на основі біполярного та МОН–транзистора з двостороннім освітленням каналу; структурна схема радіовимірювального приладу 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 О. В.		
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 04 жовтня 2019 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
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.	Затвердження теми. Розробка технічного завдання	23.09.2019-02.10.2019	
4.	Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми	03.10.2019-20.10.2019	
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)

Патлатюк М. Р.

Керівник роботи

(підпис)

Осадчук О. В.

РЕФЕРАТ

УДК 621.397

Патлатюк М.Р. Радіовимірювальний параметричний перетворювач оптичного випромінювання. Магістерська кваліфікаційна робота. – Вінниця: ВНТУ, 2019. – 145 с. На українській мові. Бібліогр.: 94 назв; Табл. 14., Рис. 48.

У магістерській кваліфікаційній роботі розроблено радіовимірювальні прилади на основі оптичних перетворювачів з використанням біполярного і польового транзисторів для вимірювання зміни величини оптичної потужності від 20 до 140 мкВт/см² з чутливістю від 90 до 800 Гц/мкВт/см² для перетворювача з пасивною індуктивністю та від 0 до 120 мкВт/см² з чутливістю від 0,3 до 2,65 кГц/мкВт/см² для перетворювача з активною індуктивністю при похибці вимірювання 0,32% і амплітудою вихідного сигналу 5 В.

Розглянуто математичну модель фоточутливого МОН–транзистора, яка відрізняється від існуючих тим, що вона враховує зміну електрофізичних параметрів (концентрації носіїв заряду в каналі транзистора, імпедансу каналу) приладу від потужності оптичного випромінювання, яке діє як зі сторони затвору, так і зі сторони каналу, внаслідок чого збільшується квантова ефективність, що приводить до підвищення чутливості.

У результаті математичного моделювання отримано аналітичні вирази, які можуть бути використані для інженерного розрахунку рівняння чутливості і функції перетворення, вольт–амперних характеристик радіовимірювальних приладів на основі оптичних перетворювачів, що забезпечить вибір оптимального режиму їх живлення.

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 параметричного перетворювача оптичного випромінювання 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 охорони праці було розглянуто такі питання як безпека в надзвичайних ситуаціях, як технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення безпечної відстані при оптичному випромінюванні, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки при проведенні дослідження радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання, безпека у надзвичайних ситуаціях.

Ключові слова: фототранзистор, мультиплексор, від’ємний опір, вольт–амперної характеристики, фотодіод, діелектрик – напівпровідник.

ABSTRACT

M.R. Patlatyuk Radiometric parametric optical radiation converter. Master's qualification work. – Vinnitsa: VNTU, 2019. – 145p. In Ukrainian language. Bibliogr.: 94 titles; Tab. 14., Fig. 48.

In the master's qualification work radiometers were developed based on optical transducers using bipolar and field transistors to measure changes in optical power from 20 to 140 $\mu\text{W} / \text{cm}^2$ with a sensitivity from 90 to 800 $\text{Hz} / \mu\text{W} / \text{cm}^2$ for a converter with passive inductance 120 $\mu\text{W} / \text{cm}^2$ with a sensitivity of 0.3 to 2.65 $\text{kHz} / \mu\text{W} / \text{cm}^2$ for a converter with active inductance with a measurement error of 0.32% and an amplitude of the 5V output signal

A mathematical model of a photosensitive MOS transistor is considered, which differs from the existing ones in that it takes into account the change of electrophysical parameters (concentration of charge carriers in the transistor channel, channel impedance) of the device from the optical radiation power acting on both the gate side and the gate side causing quantum efficiency to increase, leading to increased sensitivity.

As a result of mathematical modeling, analytical expressions have been obtained that can be used to engineer the calculation of the sensitivity equation and the conversion function, the current–voltage characteristics of radiometers based on optical converters, which will provide the choice of the optimal mode of their power supply.

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 the radiometric parametric converter of optical radiation.

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 covered such issues as safety in emergency situations, such as technical solutions for occupational hygiene and industrial sanitation, determination of safe distance for optical radiation, technical solutions for industrial and fire safety in the study of the radiometric parametric transducer of optical radiation, safety in emergency .

Key words: phototransistor, multiplexer, negative resistance, voltage–current characteristics, photodiode, dielectric – semiconductor.

З М І С Т

ВСТУП	9
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗВИТКУ ПРИЛАДІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ОПТИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ	13
1.1 Прилади на основі оптоелектронних багатоелементних перетворювачів оптичного випромінювання	13
1.2 Застосування піроелектричних перетворювачів в радіовимірювальних приладах потужності оптичного випромінювання	25
1.3 Схемотехнічна реалізація піроелектричних перетворювачів інфрачервоного випромінювання	28
1.4 Класифікація приладів для вимірювання потужності оптичного випромінювання	31
1.5 Висновки до розділу	32
2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ФОТОРЕАКТИВНОГО ЕФЕКТУ У НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДАХ	33
2.1 Математична модель фотореактивного ефекту в діодних структурах та сонячних елементах	33
2.2 Математична модель фотореактивного ефекту в польових транзисторних структурах	43
2.3 Математична модель фотореактивного ефекту в МОН–транзисторних структурах з двостороннім освітленням каналу	51
2.4 Висновки до розділу.....	62
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИХ ПАРАМЕТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ	63
3.1 Визначення функції перетворення та рівняння чутливості вимірювального каналу приладу на основі оптичного перетворювача з біполярним, МОН–транзистором та з сонячною батареєю	63
3.2 Визначення функції перетворення та рівняння чутливості вимірювального каналу приладу на основі оптичного перетворювача з МОН–транзистором з двостороннім освітленням каналу	71
3.3 Висновки до розділу.....	76
4 ПРОЕКТУВАННЯ РАДІОВИМІРЮВАЛЬНОГО ПРИЛАДУ ПОТУЖНОСТІ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ОСНОВІ ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА	77
4.1 Аналіз безпровідних технологій для реалізації радіовимірювального приладу потужності оптичного випромінювання.....	77
4.2 Радіовимірювальний прилад потужності оптичного випромінювання.....	82
4.3 Висновки до розділу.....	85
5 АНАЛІЗ КОМЕРЦІЙНОГО ПОТЕНЦІАЛУ РОЗРОБКИ	

(ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АУДИТ РОЗРОБКИ) РАДІОВИМІРЮВАЛЬНОГО ПАРАМЕТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ	86
5.1 Визначення рівня комерційного потенціалу розробки радіо вимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання.....	86
5.2 Визначення рівня якості розробки радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання	88
5.3 Визначення конкурентоспроможності розробки радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання	90
5.4 Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної, дослідно-конструкторської та конструкторсько-технологічної роботи.....	91
5.4.1 Розрахунок витрат, що стосуються виконавців розробки радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання	91
5.5 Розрахунок загальних витрат на розробку радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання	96
5.6 Прогнозування витрат на виконання та впровадження радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання	96
5.7 Прогнозування комерційних ефектів від реалізації радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання	97
5.8 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та період їх окупності	98
5.8.1 Визначення абсолютної ефективності вкладених інвестицій у розробку радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання.....	98
5.9 Розрахунок відносної ефективності вкладених коштів в НДДКР радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання	99
5.10 Розрахунок терміну окупності коштів, вкладених в наукову розробку радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання.....	100
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	101
6.1 Гігієна праці та виробнича санітарія	101
6.1.1 Склад повітря робочої зони та мікроклімат	101
6.1.2 Виробниче освітлення.....	102
6.1.3 Виробничі віброакустичні коливання.....	104
6.1.4 Виробничі випромінювання.....	105
6.2 Технічні рішення щодо промислової та пожежної безпеки при проведенні дослідження	107
6.2.1 Безпека щодо організації робочих місць	107
6.2.2 Електробезпека.....	107
6.2.3 Пожежна безпека.....	108

6.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях.....	109
6.3.1 Дослідження стійкості роботи радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання в умовах дії іонізуючих випромінювань.....	110
6.3.2 Дослідження стійкості роботи радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання в умовах дії електромагнітного імпульсу.....	111
6.3.3 Розробка заходів по підвищенню стійкості роботи радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання в умовах дії електромагнітного імпульсу.....	114
ВИСНОВКИ.....	116
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	117
Додаток А (обов'язковий) Технічне завдання	124
Додаток Б (обов'язковий) Пристрій для виявлення та діагностування джерел оптичного випромінювання	130
Додаток В (обов'язковий) Система контролю оптичного випромінювання.....	132
Додаток Д (обов'язковий) Класифікація приладів для вимірювання	134
Додаток Е (обов'язковий) Еквівалентна схема фотореактивного МОН–транзистора	136
Додаток Ж (обов'язковий) Електрична схема приладу	138
Додаток К (обов'язковий) Електрична схема приладу на основі біполярного та МОН–транзистора з двостороннім освітленням каналу	140
Додаток Л (обов'язковий) Теоретична функція перетворення вимірювального каналу приладу	142
Додаток М (обов'язковий) Структурна схема радіовимірювального приладу потужності оптичного випромінювання.....	144

ВСТУП

Актуальність теми. Одним з ключових факторів у досягненні високої якості продукції та забезпеченні автоматизації технологічних процесів є оперативний контроль їх параметрів. Розвиток контрольно–вимірювальних систем, основою яких є перетворювачі, насамперед обумовлений швидким розвитком науково–технічного прогресу, а також удосконаленням технологій мікроелектроніки. Вдосконалення систем автоматичного контролю і управління різними об’єктами, процесами, в більшості визначається досягненням в області радіовимірювальних приладів на основі перетворювачів. На даний час виникла проблема перетворення сонячної енергії в енергію електричного поля, яку потрібно передавати на відстань. Важливим питанням є сприймання, обробка, зберігання і передача вимірних даних в інформаційні центри, які можуть бути віддаленими (іноді на великі відстані) від об’єкту вимірювання. Зокрема, це стосується метеорологічних вимірювань (сонячна радіація, інтенсивність УФ променів). Ефективно вирішити таку задачу можна за допомогою приладів для вимірювання оптичної потужності, до яких пред’являються жорсткі вимоги: вони повинні бути економічними, забезпечувати низьке енергоспоживання, мати мінімальні габарити і вагу, бути сумісними з сучасними ЕОМ, забезпечувати високу точність та чутливість вимірювання. Існуючі перетворювачі оптичної потужності не відповідають цим вимогам в повному обсязі, а саме, є низькочутливими. Так, чутливість подібних приладів варіює від $2 \cdot 10^{-7}$ В/мкВт/см² (Climartonics Co., USA) до $1,67 \cdot 10^{-5}$ В/мкВт/см² (Davis Instruments, USA), що недостатньо при подальшій обробці інформаційного сигналу. Тому виникає задача підвищення чутливості вимірювання оптичної потужності. Значного підвищення чутливості можна досягнути шляхом перетворення інформативного сигналу в частотний.

Одним із перспективних наукових напрямів в розробці приладів на основі оптичних перетворювачів є використання залежності реактивних властивостей транзисторних структур з від’ємним опором від дії оптичного випромінювання і створення на цій основі частотних перетворювачів оптичного випромінювання, що дозволяє значно підвищити чутливість запропонованих приладів. З другого боку, це дає можливість виготовляти фоточутливі перетворювачі у відповідності з мікроелектронною технологією, для підвищення їх точності, надійності і швидкодії. Крім того, об’єднання на одному кристалі вимірювального перетворювача сумісно з схемами обробки інформації дозволить створити “інтелектуальний” перетворювач. Використання

частоти, як інформативного параметра, характеризується підвищеною завадостійкістю передачі інформації, простотою і значною точністю перетворення в цифровий код, можливістю бездротової передачі на відстань, зручністю при комутації в багатоканальних інформаційно–вимірювальних системах.

Тому, стає очевидною необхідність розробки принципів роботи і теоретичних засад створення радіовимірювальних приладів на основі оптичних перетворювачів у системі вимірювання потужності оптичного випромінювання з дистанційною передачею результатів, а також необхідність розробки схем, конструкцій, експериментального дослідження параметрів, оцінювання їх метрологічних характеристик, розробки мікропроцесорної системи вимірювання величини потужності оптичного випромінювання та впровадження їх у виробництво.

Мета і задачі дослідження

Метою роботи є підвищення чутливості радіовимірювальних приладів на основі оптичних перетворювачів за рахунок перетворення електричного сигналу в частотний з використанням реактивних властивостей транзисторних структур з від’ємним опором.

Об’єктом дослідження є процес перетворення потужності оптичного випромінювання у частотний сигнал у чутливих напівпровідникових структурах.

Предмет дослідження – характеристики радіовимірювальних приладів на основі оптичних перетворювачів з частотним виходом на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від’ємним опором.

Для досягнення поставленої мети у дисертаційній роботі розв’язуються такі задачі:

- проаналізувати існуючі прилади і перетворювачі оптичного випромінювання та обґрунтувати переваги радіовимірювальних приладів на основі оптичних перетворювачів з частотним виходом по відношенню до існуючих;

- розглянути метод побудови радіовимірювальних приладів на основі оптичних перетворювачів з використанням транзисторних структур з від’ємним опором;

- розробити математичні моделі радіовимірювальних приладів на основі оптичних перетворювачів з частотним виходом, на основі яких отримати аналітичні залежності вольт–амперних характеристик, функції перетворення та рівняння чутливості вимірювального каналу приладу;

– виконати експериментальну перевірку математичних моделей і дослідити властивості радіовимірювальних приладів на основі оптичних перетворювачів від впливу оптичного випромінювання;

– розробити мікропроцесорну систему вимірювання потужності оптичного випромінювання з дистанційною передачею результатів із використанням радіовимірювальних приладів на основі оптичних перетворювачів з використанням транзисторних структур з від’ємним опором;

Методи дослідження

Методи дослідження ґрунтуються на використанні: рівнянь математичної фізики для удосконалення математичних моделей радіовимірювальних приладів на основі перетворювачів; основних положень теорії функції комплексної змінної для визначення функції перетворення та рівняння чутливості; теорії розрахунку нелінійних електричних кіл з використанням законів Кірхгофа для визначення повного опору радіовимірювальних приладів на основі оптичних перетворювачів з біполярним та польовим транзисторами, двома МОН–транзисторами, МОН та біполярним транзисторами.

Наукова новизна одержаних результатів

Наукова новизна роботи полягає в отриманні таких результатів:

1. Розглянуто метод вимірювання оптичної потужності на основі залежності реактивних властивостей транзисторних структур з від’ємним опором від оптичної потужності, який відрізняється від існуючих тим, що у вимірювальному каналі радіовимірювальних приладів відбувається перетворення потужності оптичного випромінювання у частоту.

2. Представлено математичні моделі радіовимірювальних приладів на основі оптичних перетворювачів для вимірювання потужності оптичного випромінювання, які відрізняються від існуючих тим, що в них враховано вплив оптичної потужності на елементи еквівалентних схем приладів на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від’ємним опором.

Практичне значення одержаних результатів

1. У результаті математичного моделювання отримані аналітичні вирази для визначення імпедансу каналу фоточутливого МОН–транзистора, які можуть бути використані для інженерного розрахунку параметрів первинних перетворювачів потужності оптичного випромінювання.

2. Розроблено радіовимірювальні прилади на основі оптичних перетворювачів з використанням біполярного і польового транзисторів для вимірювання зміни величини оптичної потужності від 20 мкВт/см² до 140 мкВт/см² з чутливістю від 90 Гц/мкВт/см² до 800 Гц/мкВт/см² для

перетворювача з пасивною індуктивністю та від 0 мкВт/см^2 до 120 мкВт/см^2 з чутливістю від $0,3 \text{ кГц/мкВт/см}^2$ до $2,65 \text{ кГц/мкВт/см}^2$ для перетворювача з активною індуктивністю при похибці вимірювання $0,32\%$ і амплітудою вихідного сигналу 5 В .

Особистий внесок здобувача

Основні положення і результати магістерської кваліфікаційної роботи отримані автором самостійно.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗВИТКУ ПРИЛАДІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ОПТИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Постійно зростаюча складність задач автоматизації в різних галузях сучасної науки і техніки при керуванні, контролі якості та діагностиці технічних і нетехнічних процесів обумовлює відповідне підвищення рівня вимог до параметрів вимірювальної апаратури, зокрема, первинних вимірювальних перетворювачів, які є складовою частиною вимірювальних приладів [2, 8]. Таким чином, велика потреба сучасної контрольно–вимірювальної техніки в створенні мініатюрних, чутливих інтегральних перетворювачів фізичних величин із параметрами, що задовольняють високому рівню вимог, поряд з умовою ефективного використання матеріальної, технологічної і елементної баз мікроелектроніки, слугує стимулюючим фактором при розробці приладів на основі інтегральних перетворювачів оптичного випромінювання.

Високий ступінь розвитку сучасних контрольно–вимірювальних приладів і систем визначається широким поширенням систем із засобами обчислювальної техніки, використанням мікропроцесорних засобів вимірювань з вбудованими цифровими блоками опрацювання і керування [8, 11, 12]. Конструктивне об'єднання інтегральних первинних вимірювальних перетворювачів з цифровими мікропроцесорними пристроями дозволяє здійснити їх інтелектуалізацію; крім зняття вимірюваної інформації відбувається її практично одночасне опрацювання, фільтрація, стиск і коригування [9, 13].

1.1 Прилади на основі оптоелектронних багатоелементних перетворювачів оптичного випромінювання

Використання приладів на основі оптоелектронних вимірювальних перетворювачів (ОЕВП) в автоматизованих системах управління є однією із істотних тенденцій розвитку сучасних технічних засобів інформатизації [13]. Завдяки унікальним властивостям оптичного випромінювання за допомогою ОЕВП можна розв'язувати багатofункціональні завдання управління з високими характеристиками по точності, швидкодії, надійності, пропускній здатності і практично необмеженими можливостями математичної і логічної обробки інформації [14, 15].

Координатні фоторезистори (фотопотенціометри) є тонкоплівковими багаточаровими структурами, які для одержання необхідного функціонального

перетворення мають профільований резистивний шар. Довжина чутливого шару фотопотенціометра може досягати декількох десятків міліметрів за розрізняючої здатності в десятки мікрометрів [16]. Сучасні фотопотенціометри мають недостатню часову і температурну стабільність, хоча є доволі надійними і технологічними. Координатні фотоприймачі, які працюють на поперечному фотоефекті, називаються диференційними. Вихідний сигнал такого фотоприймача дорівнює різниці сигналів із фоточутливих елементів і пропорційний до зміщення зображення щодо "нульового" положення. До таких фотоприймачів належать секторні чи квадратні фоторезистори і фотодіоди [17]. Загальний недолік розглянутих координатних фотоприймачів полягає у залежності координатної характеристики від розмірів і форми світлового зонда і від розподілу освітленості у зонді.

Прилади на основі багатоелементних перетворювачів оптичного випромінювання (БПОВ) характеризуються багатьма параметрами і характеристиками, які застосовуються для описання властивостей одноелементних фотоприймачів. Однак специфіка конструкторського виконання зумовила і ряд нових параметрів. Похибки багатоелементних перетворювачів оптичного випромінювання зумовлені нерегулярністю розміщення елементів, розкидом чутливості елементів і паразитними міжелементними зв'язками. До найбільш досконалих багатоелементних перетворювачів оптичного випромінювання належать пристрої із зарядовим зв'язком (ПЗЗ). Схеми управління ПЗЗ поділяють на дво-, три- і чотиритактні, їх детальний опис наведено у [18].

У роботі [19] наводиться розгляд багатоелементних фотоприймачів на основі фоторезисторів [20]. Можливі структури побудови багатоелементних приймачів на основі фоторезисторів наведені на рисунок 1.1. По своїм характеристикам і можливостям застосування в апаратурі наведені структури неоднакові. Причина – перехресні зв'язки між чутливими елементами, що проявляються при опитуванні структури. Перехресні зв'язки знижують порогові і погіршують часові характеристики структур.

Спрощена оцінка деяких найбільш перспективних фоторезистивних структур наведена в [21]. Найбільш поширеними матеріалами для отримання фотодіодних багатоелементних перетворювачів оптичного випромінювання слугують кремній та германій. За останні роки [22] отримані позитивні результати в розробці фотодіодів і багатоелементних структур на їх основі з застосуванням з'єднань групи $A^{III}B^V$: GaAs, GaAlAs, InAs, InSb, CdSe, що

функціонують при температурі 77 – 200 К. Отримані фотодіодні багатоелементні перетворювачі оптичного випромінювання з високими фотоелектричними параметрами на основі CdHgTe, PbSnTe, PbS, PbSe, PbTe [23]. В основному чутливість до потоку випромінювання фотодіодного елемента визначається характеристиками напівпровідникового матеріалу і структурою р–n переходу. Використання фотодіодних елементів в режимі накопичення дозволяє отримати більшу величину електричного сигналу, що виділяється на R_f , в порівнянні з режимом постійного струму. Однак режим накопичення заряду знижує швидкодію багатоелементних перетворювачів оптичного випромінювання. Вказана різниця в величині вихідного сигналу призводить до необхідності мати в кожному елементі в режимі постійного струму при виявленні порогових сигналів малошумові підсилювачі (порядку $0,01\text{мкВ} / \text{Гц}^{1/2}$).

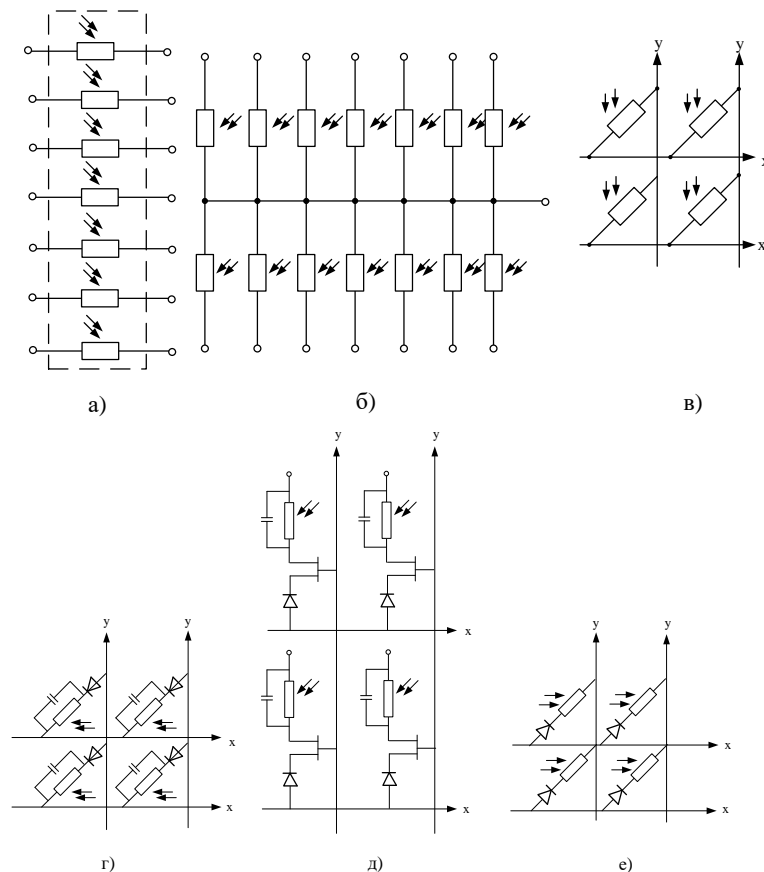


Рисунок 1.1 – Схематехнічні рішення фоторезистивних багатоелементних перетворювачів оптичного випромінювання

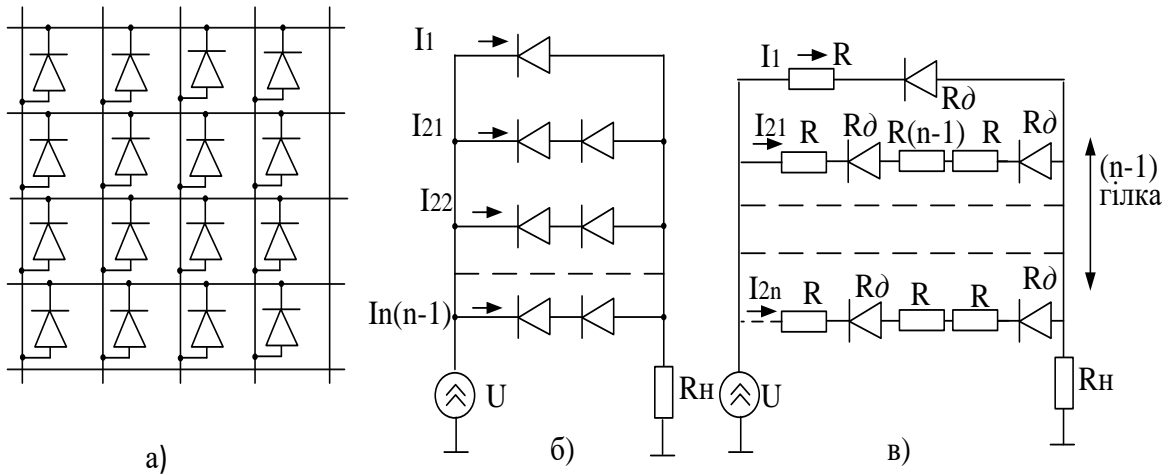


Рисунок 1.2 – Схема включення елементів в матрицю (а), спрощена еквівалентна схема опитування елемента в матриці (б, в)

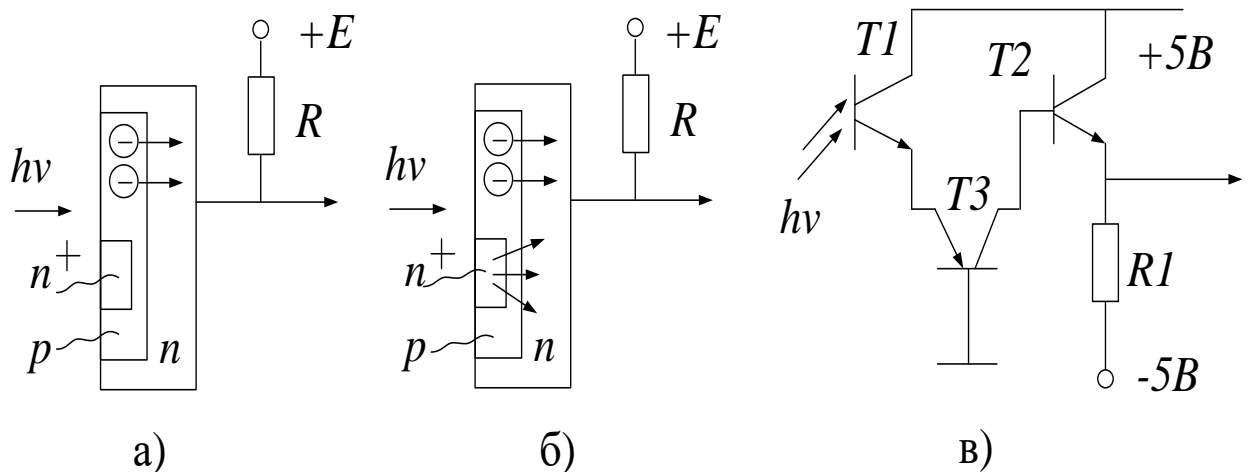


Рисунок 1.3 – Включення елемента по схемі "обриваної бази": а) фотодіодний режим; б) фототранзисторний режим; в) схема з підвищеною швидкодією

Включення фотодіодних елементів в матрицю показано на рисунку 1.2 а. Найбільший інтерес являє випадок двох освітлених елементів і опитування неосвітленого елемента, індекс якого співпадає з індексом стрічки одного із освітлених елементів, а індекс його стовпця з індексом стовпця другого освітленого елемента.

На теперішній час існують фототранзисторні багатоеlementні перетворювачі оптичного випромінювання як на основі біполярних, так і на основі уніполярних фототранзисторів. В реальних схемах фототранзисторні

елементи можуть підключатись не лише по схемі обірваної бази (рисунок 1.3), але і по схемі стабілізації режиму роботи фототранзистора (рисунок 1.4).

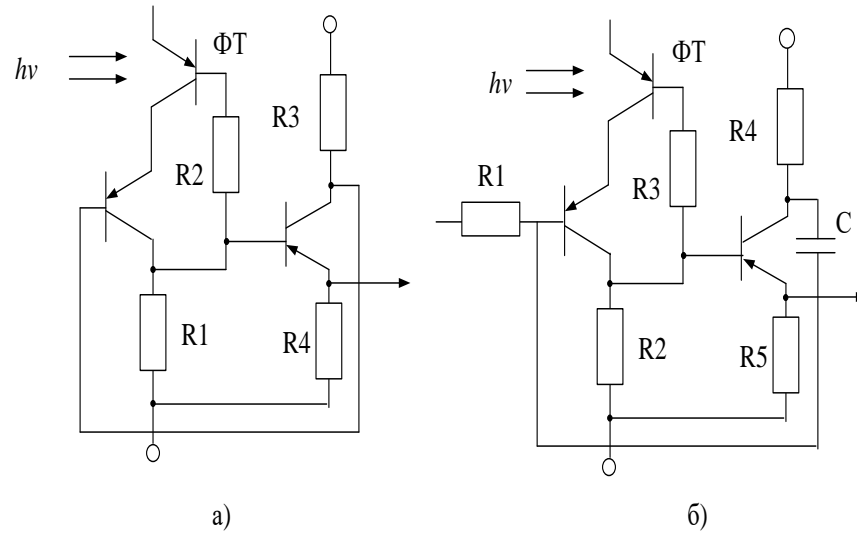


Рисунок 1.4 – Схеми стабілізації режиму роботи фототранзисторного елемента:
а) зворотній зв'язок по постійному струму; б) зворотній зв'язок по змінному струму

Матеріалами для виготовлення фототранзисторних багатоелементних перетворювачів оптичного випромінювання слугують германій, кремній і арсенід галія. Ця обставина обмежує область спектральної чутливості фототранзисторних елементів видимим і ближнім ІЧ-діапазоном спектру. Пояснюється це тим, що до теперішнього часу не вдалось отримати прилад з двома р–п переходами на інших фоточутливих матеріалах, що володіє скільки-небудь задовільними параметрами [24].

Таким чином, фізичні моделі фоторезистивних і фотодіодних елементів багатоелементних перетворювачів оптичного випромінювання дозволяють забезпечити виявлення оптичних сигналів в видимому та ближньому ІЧ-діапазоні довжин хвиль. Фізична модель фототранзисторного БПОВ показує, що цей діапазон для даного виду взаємодії дещо звужується.

Спосіб перетворення частоти оптичного випромінювання [25] характеризується тим, що опромінюють білим світлом прозорі частинки об'ємом близько 10^{-15} см³, активовані домішковими атомами з концентрацією порядку 10^{20} – 10^{21} см⁻³ і закріплені у вигляді моношару на прозорій підкладці (рисунок 1.5). Частинки можуть бути виконані з скла і закріплені на підкладці за допомогою оптично прозорого клею. При цьому підкладка може бути

виконана, зокрема, гнучкою. Недоліком є складність технологічної організації матеріалу чутливого елемента.

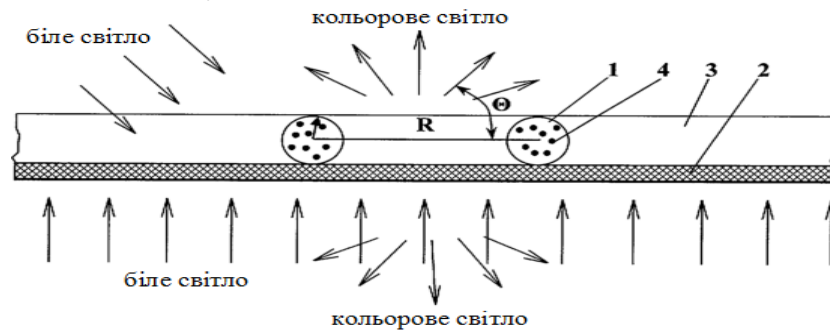


Рисунок 1.5 – Спосіб перетворення частоти оптичного випромінювання: 1 – частинки; 2 – непрозора підкладка; 3 – прозора підкладка; 4 – домішкові атоми

У роботі [26] розглянуто пристрій для дослідження оптичних параметрів об'єкта випромінювання. Він містить досліджуване і зразкове джерела випромінювання і монохроматор з приставленим до нього фотоприймачем. Пристрій містить надшвидкісний фотореєстратор, симетрично розташований відносно обох джерел випромінювання. При цьому зразкове джерело виконано з регульованою потужністю випромінювання та з відомим розподілом по спектру випромінювання, і в пристрої передбачені напівпрозоре дзеркало для можливості одночасного напрямку світлового потоку від зразкового джерела на фотореєстратор, монохроматор і лінза для проходження світлового потоку від досліджуваного джерела по тому ж шляху. Недоліком є необхідність застосування великої кількості додаткових пристроїв в процесі вимірювань.

Пристрій для прийому і випромінювання оптичних сигналів містить корпус, діелектричний хвилевід з оптично активного матеріалу, розділені між собою діелектричним шаром, і приймач випромінювання. При чому, з метою підвищення енергетичного потенціалу, корпус виконаний у вигляді аксікона з твірної типу гіперболи, за основу якого послідовно розміщені обмежені двома співвісними кільцевими відбивачами плоска діелектрична підкладка з змінними вздовж радіуса за законом формованої діаграми спрямованості показниками заломлення і прозорості та кільцевий хвилевід, до зовнішнього кільцевого відбивача якого підключено навантаження, поєднано через джерело живлення з катодом електронної гармати управління. Недоліком є складність реалізації.

У роботі [27] подано спосіб реєстрації оптичного випромінювання з взаємоподібними тимчасовими змінами інтенсивності шляхом вимірювання інтервалів часу, при реєстрації випромінювання з великою постійною

складовою, інтервали часу змінюють між початком зміни і більшістю фотонів, які з'являються за досліджуваній інтервал. Недоліком вищевказаного способу є неможливість реєстрації випромінювання з не великою постійною складовою.

Лавинний фотоприймач [28] містить напівпровідниковий шар з р–п–переходом і перетворювач спектрального складу падаючого випромінювання у вигляді люмінесцентного шару (рисунок 1.6). Між перетворювачем спектрального складу падаючого випромінювання і напівпровідниковим шаром виконаний шар оптично прозорого матеріалу з високим коефіцієнтом заломлення. Прилад забезпечує підвищення ефективності перетворення спектрального складу падаючого випромінювання без значних втрат чутливості фотоприймача шляхом зниження втрат, викликаних особливостями структури люмінесцентних шарів. Недоліком лавинного фотоприймача складність реалізації люмінесцентного шару.

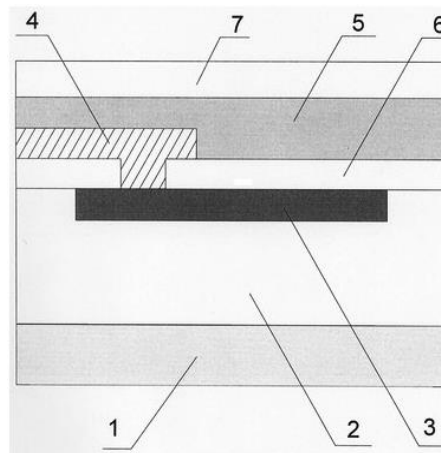


Рисунок 1.6 – Лавинний фотоприймач: 1, 5 – р-шар; 2, 7 – n-шар; 3 – люмінесцентний шар; 6 – оптично прозорий матеріал

У роботі [29] розглядається пристрій для виявлення та діагностування джерел оптичного випромінювання (рисунок 1.7) та наведена в додатку Б. Він містить панорамний дзеркальний об'єктив з числовою апертурою більше 0,5, кутове поле зору 360° по горизонту і не менше $-5^\circ \dots +25^\circ$ по вертикалі, від'ємну дисторсію не менше 50%, фотоприймальні пристрій (ФПП), блок аналізу сигналів, який виконаний з можливістю здійснення вимірювання амплітуд, тривалостей і періодів сигналів, випромінюваних джерелами оптичного випромінювання. Недоліком є складна оптична система.

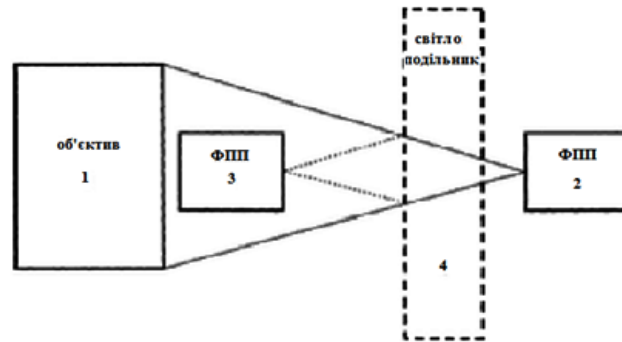


Рисунок 1.7 – Пристрій для виявлення та діагностування джерел оптичного випромінювання

Спосіб вимірювання енергії оптичного і НВЧ–випромінювання [30] включає введення випромінювання в герметичну комірку, заповнену поглинаючим випромінювання газом. Через цей газ пропускають акустичні сигнали, вимірюють викликану поглинанням випромінювання зміну швидкості проходження цих акустичних сигналів через поглинаючий газ, за величиною зміни швидкості акустичних сигналів визначають енергію оптичного та НВЧ–випромінювання. Недоліком є необхідність застосування поглинаючого газу та додаткового перетворення.

Пристрій для перетворення потоку оптичного випромінювання [31] має вхідний 6 і вихідний 8 краї, з'єднані безліччю вакуумованих або заповнених іншим газоподібним середовищем каналів транспортування оптичного випромінювання. Продовження вхідних 7 і вихідних 9 каналів за межі вхідного і вихідного торців орієнтовані таким чином, що в сукупності мають форму сприйнятого пристроєм вхідного і необхідного вихідного потоків оптичного випромінювання. При цьому один або обидва торці пристрою, за винятком вхідних і вихідних отворів каналів, мають непрозоре покриття, або стінки каналів і середовище між каналами непрозорі. Якщо продовження поздовжніх осей каналів з боку вхідного і вихідного торців перетинаються в точках, розташованих на продовженні подовжньої осі пристрою, воно здатне фокусувати потік оптичного випромінювання квазіточкового джерела. Якщо продовження поздовжніх осей каналів з боку одного з торців перетинаються в точці, розташованій на продовженні подовжньої осі пристрою, а продовження поздовжніх осей каналів з боку іншого торця паралельні подовжньої осі пристрою, він перетворює потік оптичного випромінювання квазіточкового джерела в квазіпаралельний (рисунок 1.8). Недоліком є складність оптичної системи пристрою.

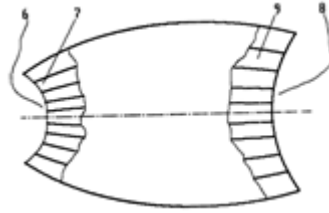


Рисунок 1.8 – Пристрій для перетворення потоку оптичного випромінювання

У роботі [32] розглянуто пристрій виявлення оптичного випромінювання (рисунок 1.9). Його перевага полягає в зниженні ймовірності похибки виявлення оптичного випромінювання від точкових джерел. Для цього в пристрій, що містить приймальну оптичну систему, $n \times r$ -елементний фотоприймач, $n \times r$ каналів обробки сигналів, кожен з яких складається з послідовно з'єднаних передпідсилювача і порогового пристрою, виходи кожних r з $n \times r$ каналів з'єднані з r -вхідною схемою «І», а виходи n r -вхідною схемою «І» з'єднані з n -вхідною схемою «АБО», додатково введені між приймальною оптичною системою та $n \times r$ – елементним фотоприймачем, які оптично зв'язані між собою оптична щілина, коліматор, диспергуючий елемент, вихідний об'єктив. Недоліком є складна структурна організація.

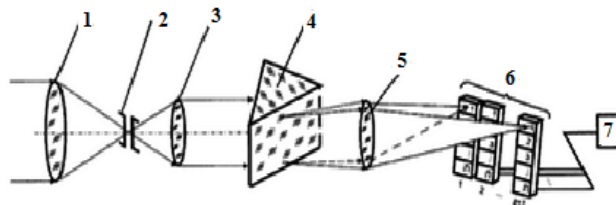


Рисунок 1.9 – Пристрій виявлення оптичного випромінювання: 1, 3 – об'єктив; 2 – оптична щілина; 4 – коліматор; 5 – диспергуючий елемент; 6 – $n \times r$ -елементний фотоприймач; 7 – приймальна оптична система

У роботі [33] розглянуто спосіб який включає вимірювання енергії випромінювання, яка надходить на рослини з виділенням тієї її частини, яка потенційно придатна для використання рослиною в процесі фотосинтезу з урахуванням ефективності кожної довжини хвилі в діапазоні 300–750 нм. Пристрій для визначення ексергії (максимальна робота потоку оптичного випромінювання) в рослинництві містить фотометр, в якому спектральна чутливість оптичного приймача подібна до спектральної ефективності фотосинтезу, джерело живлення та індикатор. Пристрій додатково містить

інтегратор, який сумує надходження на поверхню землі енергії оптичного випромінювання протягом усього вегетаційного періоду часу і складається з трьох блоків – блоку приймача оптичного випромінювання, блоку настройки і градування вимірвача і блоку інтегратора. Приймач оптичного випромінювання має косинусну насадку, діафрагму, світлофільтри, фотоелемент, попередній підсилювач і корпус, причому вихід блоку приймача оптичного випромінювання з'єднаний з входом блоку настройки і градування вимірвача, який з'єднаний з входом блоку інтегратора (рисунок 1.10). Недоліком є значна кількість структурних частин при реалізації цього способу.

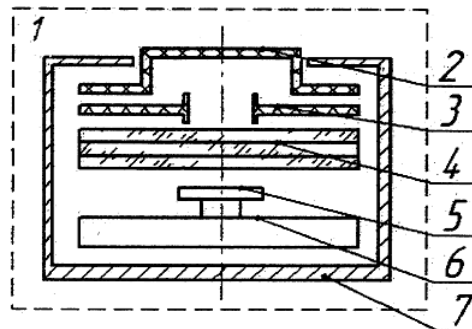


Рисунок 1.10 – Приймач оптичного випромінювання (1): 2 – косинусна насадка; 3 – діафрагма; 4 – світлофільтри, 5 – фотоелемент, 6 – попередній підсилювач; 7 – корпус

Перетворювач оптичного випромінювання і система контролю оптичного випромінювання з його використанням наведено в [34]. Перетворювач оптичного випромінювання виконаний у вигляді «сандвіч» структури шарів сегнетоелектрика і напівпровідника. Сегнетоелектрична плівка «сандвіч» структури виконана з поляризованого нелегованого матеріалу, а напівпровідникова плівка «сандвіч» структури виконана з уніполярного матеріалу, причому знак поверхневого заряду сегнетоелектричної плівки збігається зі знаком заряду основних носіїв напівпровідникової плівки. Система контролю оптичного випромінювання містить описаний вище перетворювач оптичного випромінювання, блок обробки інформації і джерело електричного живлення, один полюс якого приєднаний до сегнетоелектричної плівки. У зовнішньому електричному колі встановлено комутатор, контролер, фазовий дискримінатор і елемент І. Ділянки напівпровідникової плівки підключені до блоку обробки інформації через комутатор, другий полюс джерела живлення підключений через комутатор до електродів напівпровідникової плівки з

утворенням кола обнулення перетворювача (рисунок 1.11) та наведена в додатку В. Недоліком є технологічна складність реалізації «сандвіч» структури.

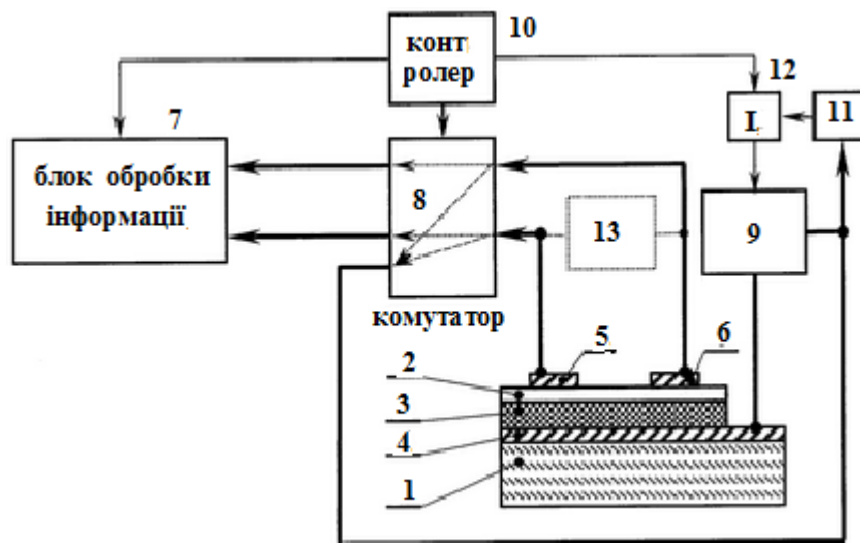


Рисунок 1.11 – Система контролю оптичного випромінювання: 1 – перетворювач оптичного випромінювання; 2 – шар сегнетоелектрика; 3 – шар напівпровідника; 4, 5, 6 – виводи; 7 – блок обробки інформації; 8 – комутатор; 9 – фазовий дискримінатор; 10 – контролер; 11 – коло обнулення датчика 12 – елемент I; 13 – джерело електричного живлення

Елемент забезпечений додатковим поглинаючим шаром з боку, протилежного випромінювання, у вигляді металевої плівки зі сплаву на основі нікелю. Поглинаючий шар покритий прозорим захисним плівковим покриттям, на якому по периферії приймального елемента розташовані секції термопар з рівними проміжками між ними. Холодні спаї термопар поміщені в термостат, всі елементи приймача розташовані в термостабілізованому корпусі. Пристрій забезпечений обмоткою заміщення, яка встановлена на периферії приймального елемента з боку випромінювання і виконано у вигляді з'єднаних груп електричних нагрівачів, розміщених на приймальному елементі навпаки зазначених проміжків між секціями термопар термобатарей. Не доміком є використання сапфіра у вигляді чутливого елемента.

Приймач оптичного випромінювання та пристрій на його основі наведено в роботах [35, 36]. Приймач оптичного випромінювання містить, принаймні, одну розташовану на прозорій підкладці гетероструктуру, укладену між двома світлопропускаючими анодним і катодним електродами і складається з двох шарів органічних напівпровідникових матеріалів з різною шириною

забороненої зони, шари гетероструктури виконані з матеріалів з максимумами спектрів поглинання, розташованими в області 450 нм і високим світлопропускання у видимій частині спектру. При цьому світлопропускання падаючого потоку випромінювання приймача оптичного випромінювання у видимій частині спектру становить не менше 30%. Недоліком є технологічна складність реалізації чутливого елемента.

У роботі [37] розглянуто приймач інфрачервоного випромінювання. Він відноситься до фоточутливих приладів, призначених для виявлення електромагнітного випромінювання, зокрема до охолоджуваних напівпровідником приймачів інфрачервоного випромінювання. Перевагами приладу є підвищення надійності, зменшення теплопритоків і електричних наводок при роботі приймача випромінювання. Приймач інфрачервоного випромінювання, містить кріостат, усередині якого на охолоджуваному утримувачі розташовано кристал з фоточутливих елементів і мультиплексор, до якого приєднані виводи управління, живлення та сигнальні виводи, підключені відповідно до блоків управління, живлення та обробки сигналів, розташовані зовні кріостата, мультиплексор включає в себе фотоперетворювачі, до яких приєднані виводи управління, виконані у вигляді волоконних світловодів, підключених до світлодіодів, які встановлено у блоці управління. Недоліком є необхідність застосування кріостату.

У роботі [38] розглянуто приймач інфрачервоного випромінювання (рисунок 1.12). Він містить закріплений в оправі колбу з вакуумом Дьюара з зовнішнім і внутрішнім входними вікнами, навпроти яких на охолоджуваному тримачі розташований на підкладці кристал з фоточутливих елементів. Причому основа тримача з'єднана з оправою, торець тримача забезпечений радіатором, виконаним з матеріалу, теплопровідність якого більше, ніж теплопровідність підкладки, а порожнину навколо тримача заповнено осушеним газом, температура кристалізації якого вище робочої приймача, при якій тиск насичених парів газу над його твердою фазою не перевищує 10 – 4 мм рт. ст. При робочій температурі порожнину заповнюють середовищем з тиском до 10 – 4 мм рт. ст., що сприяє зниженню теплопритоку до елементів конструкції, оскільки саме при такому вакуумі відбувається якісний перехід від конвективного теплообміну до випромінювального. Недоліком є складна структурна організація.

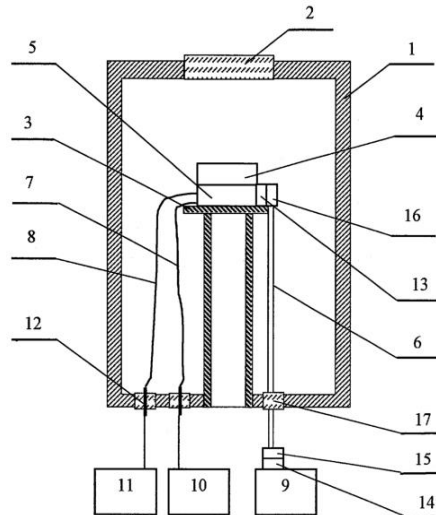


Рисунок 1.12 – Приймач інфрачервоного випромінювання

Приймач інфрачервоного випромінювання розглянуто у роботі [39]. У приймачеві біматеріальна консоль формується із плівок матеріалів з різними термічними коефіцієнтами розширення, тому при зміні потужності оптичного випромінювання незакріплена частина консолі зміщується щодо підкладки. Зчитування цього зміщення дозволяє проводити візуалізацію розподілу, що спостерігається. В якості елемента, що зчитує зсув незакріпленої частини консолі, застосований МОН–транзистор, затвор якого закріплений за консоль, а витік і стік розміщені в підкладці, за консоль також закріплені електроди для електростатичного управління вихідним положенням консолі щодо підкладки. Зазори між затвором, підкладкою і електродами електростатичного управління та підкладкою менші, ніж між консоллю й підкладкою. Перевагами приладу є підвищення чутливості приймача і можливість зменшення площі фоточутливої комірки. Недоліком є складність реалізації біматеріальної консолі.

1.2 Застосування піроелектричних перетворювачів в радіовимірювальних приладах потужності оптичного випромінювання

Піроелектричні кристали реагують на приріст власної температури, і, розглядаючи їх можливу роль в простих теплових колах, неважко уявити його як індикатор всіх трьох величин, що характеризують теплове коло.

1. Потіку інфрачервоного випромінювання, обумовленого безпосереднім конвективним або контактним теплообміном із зовнішнім джерелом або джерелом тепла на поверхні піроелектричного елемента. До потоку тепла за

допомогою використання відповідних поглиначів приводяться також потоки енергії найрізноманітнішої природи – електромагнітного випромінювання, потоків частинок, акустичних і ударних хвиль. Накопичення теплового потоку за деякий інтервал часу дозволяє визначити енергію потоку за цей період.

2. Теплового опору. У власне тепловому колі це теплопровідність і теплоємність середовища, що визначає тепловий потік між тепловим джерелом і стоком. Енергетичним еквівалентом теплового опору є властивості середовища розповсюдження цих потоків.

3. Температури.

Піроелектричний елемент дозволяє одержати інформацію про параметри теплового кола і відповідно про багаточисленні первинні величини, трансформовані в його параметри. Але цим не обмежуються корисні можливості піроелектричних елементів. Теплова дія на піроелектричний елемент може бути використана для отримання інформації про зміну стану самого піроелектричного елемента під якими–небудь іншими діями і таким опосередкованим способом – для визначення типу і рівню цих дій. Теплова дія в даному випадку виступає як допоміжне. Вона покликана визначити зміну властивостей піроелектричного елемента, що бере участь в перетворенні.

Тепер можна узагальнено охарактеризувати два класи піроелектричних перетворювачів:

- генераторні, в яких вихідний електричний сигнал дає інформацію про енергетичний потік і про пов'язану з ним вимірювану величину;
- параметричні, в котрих вихідний електричний сигнал дає інформацію про дію, що змінила властивості (параметри) піроелектричного елемента, що беруть участь у формуванні електричного сигналу.

У генераторних перетворювачах забезпечується постійність власних параметрів піроелектричного елемента \mathcal{V} і \mathcal{E} , а вихідна напруга несе інформацію про причини зміни середніх по об'єму параметрів піроелектричного елемента, що відображає зовнішню дію на нього.

У параметричних перетворювачах матеріал піроелектричного елемента підбирається за максимальною чутливістю параметрів \mathcal{V} або \mathcal{E} (а також і інших) до інформативної дії. Інформативною дією може бути накопичена доза проникаючої радіації, координата точки нагріву піроелектричного елемента, механічна деформація, абсолютна температура, перемикання доменної структури зовнішнім електричним полем і звичайно потужність оптичного

випромінювання та ін. За цих умов вихідна напруга вже несе інформацію тільки про перелічені дії.

Через малі потужності вихідних електричних сигналів піроелектричного елементу основна сфера їх застосування охоплює перетворювачі різних типів і в меншій ступені елементи автоматики іншого призначення: перетворювачі енергії, запам'ятовувачі пристрої і т.д. Розглянемо тепер в рамках уявлень про теплові кола багаточисленні первинні величини, які можуть бути виміряні (або детектовані) за допомогою генераторних піроелектричних перетворювачів.

Нанесення на піроелектричний елемент поглинаючого покриття дозволяє використовувати його нагрів для вимірювання потоку електромагнітного випромінювання і потоків частинок. У такий спосіб піроелектричний елемент може бути застосований для вимірювання всіх параметрів одиночного променя (потужність, спектр модуляції потужності, спектр випромінювання, просторові координати, поляризація) при довжинах хвиль випромінювання від жорсткого електромагнітного до дециметрового діапазону або для відтворення просторового розподілу потужності, тобто для отримання зображень.

За параметрами сприйнятого випромінювання можна охарактеризувати джерело, тобто, за інфрачервоним випромінюванням можна одержувати вимірювальну інформацію. Такі ж функції ці прилади виконують при взаємодії з потоками частинок – електронів, протонів, нейтронів, іонів і нейтральних атомів. Потоки акустичної енергії при частотах коливань від 10^{-2} до 10^8 Гц також вимірюються спеціалізованими піроприймачами з індикацією направленості і потужності цих потоків.

Виникають ситуації одночасної дії на об'єкт двох різнорідних потоків енергії. Так, наприклад, ударна хвиля впливає на об'єктне тіло не тільки конвективним, але променевим теплообміном. Піроелектричні перетворювачі дозволяють в таких випадках виміряти як загальну дію, так і її компоненти.

Використання піроелектричних елементів для вимірювання теплового опору середовища суттєво розширяє діапазон їх практичного використання. В цьому напрямку піроелектричні елементи дозволяють не тільки виміряти питому теплоємність і теплопровідність твердих, рідких і газоподібних тіл, але і, що особливо важливо, за цими характеристиками ідентифікувати компоненти рідких і газоподібних сумішей.

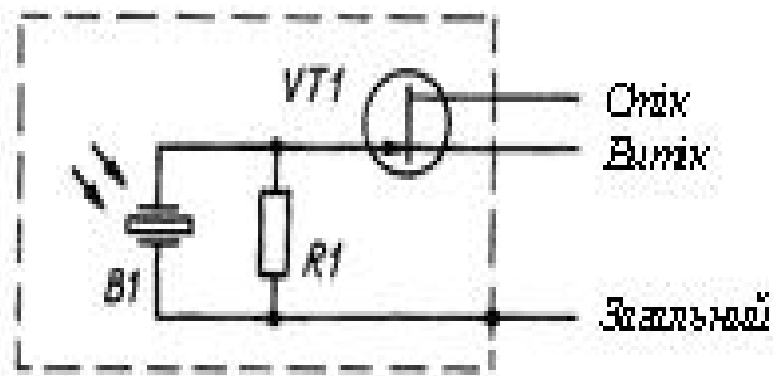
Енергетичним аналогом теплового опору є середовище розповсюдження названих вище енергетичних потоків, що змінює їх початкові параметри. Піроелектричні приймачі, що приймають потік, дозволяють одержувати інформацію про властивості середовищ, зокрема, для атмосфери – про її газовій

склад, вологість, для твердих тіл – про хімічний склад, структурних фазах, наявності дефектів і їх локалізації, в простих випадках – про розміри об'єктів.

1.3 Схемотехнічна реалізація піроелектричних перетворювачів інфрачервоного випромінювання

Піроелектричний ефект – генерація електричних зарядів в кристалах під впливом інфрачервоного випромінювання. Ефект схожий п'єзоелектричному, більш того, піроелектричні елементи, як правило, володіють і п'єзоелектричними властивостями.

Порівняно недавно такі речовини, що відносяться до класу сегнетоелектриків, вдалося синтезувати і створити на їхній основі чутливий перетворювач, його типова схема показана на рисуюнок 1.13.



Рисуюнок 1.13 – Типова схема перетворювача

Чутливим елементом В1 слугує своєрідний конденсатор – пластина з піроелектричного елементу з металевими обкладинками. На одну з обкладинок нанесений шар речовини, здатної поглинати електромагнітне випромінювання. У результаті поглинання енергії між обкладинками з'являється напруга строго певної полярності. Будучи прикладеним до ділянки затвор–витік вбудованого польового транзистора VT1, напруга викликає зміну опору його каналу. Вихідний сигнал знімають із зовнішнього резистора навантаження, включеного в коло стоку транзистора.

Через деякий час, незалежно від того, продовжує діяти на перетворювач оптичне випромінювання чи ні, конденсатор розрядиться через опір витіку R1

– вихідний сигнал спаде до нуля. Часто перетворювачі забезпечуються декількома чутливими елементами, з'єднаними послідовно з різною полярністю. Цим забезпечують нечутливість приладу до рівномірного фонового опромінювання і отримання знакозмінної вихідної напруги при переміщенні сфокусованого зображення об'єкту по чутливій поверхні перетворювача.

Як свідчать результати вимірювань, чутливість перетворювача зменшується практично пропорційно збільшенню частоти імпульсів випромінювання, що приймаються ним. Причина цьому – значна теплова інерційність чутливого елемента.

Перетворювачі, призначені для роботи при великих перепадах температури навколишнього середовища, оснащують двома чутливими елементами, включеними зустрічно послідовно, – робочим і компенсаційним. Компенсаційний елемент може бути закритий від зовнішнього потоку випромінювання, але знаходиться в однакових з робочим температурних умовах. Характеристика спектральної чутливості перетворювача визначає поглинаючу здатність матеріалу покриття пластини піроелектричного елемента в тому або іншому частотному інтервалі електромагнітного випромінювання. Остаточню її формують за допомогою оптичних фільтрів, що встановлюються перед чутливим елементом. Типові характеристики спектральної чутливості різних варіантів піроелектричних перетворювачів показані на рисунку 1.14.

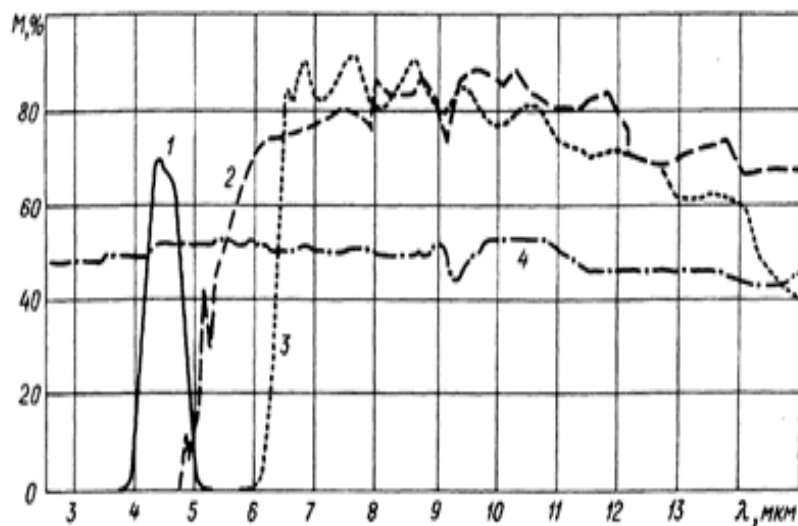


Рисунок 1.14 – Типові характеристики спектральної чутливості різних варіантів піроелектричних перетворювачів

Давачі з характеристикою 1 призначені для виявлення полум'я, 2 і 3 – найкращим чином підходять для фіксації руху людини. Характеристика 4 оптимальна для використання в дистанційних вимірюваннях потужності оптичного випромінювання.

Піроелектричні перетворювачі різного призначення випускають декілька фірм. Нижче буде детально описано виробу однієї з них – Murata Manufacturing Co (Японія). Основні технічні характеристики піроелектричних перетворювачів серії IRA фірми Murata представлені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні технічні характеристики піроелектричних перетворювачів

Характеристики і параметри	Характеристики піроелектричних перетворювачів				
	IRA–E420S1	IRA–E700ST0, IRA–E710ST0	IRA–E900ST1, IRA–E910ST1	IRA–E940ST1	IRA–E420QW1
Чутливість, мВ	3,4	4,3	3,3	3,3	3,4
Кут огляду (у двох перпендикулярних площинах), град	17x17	45x45	41x41	55x50	17x17
Вид спектральної характеристики	4	2	2	2	1
Напруга живлення, В	3...15	2...15	3...15	2...15	3...15
Температурний робочий інтервал °С	–25...+55	–40...+70	–25...+55	–25...+55	–25...+55
Температурний інтервал зберігання °С	–30...+100	–40...+85	–40...+85	–40...+85	–30...+100
Число чутливих елементів	1	2	4	2x2	1
Розміри чутливого елемента, мм	d=1,6	2x1	1,1x1,1	1,35x1	d=1,6
Розміри вікна в корпусі, мм	2,4	4,7 x3,7	4,7 x4,7	4,7 x4,7	2,4

У перетворювачів IRA–E710ST0, IRA–E910ST1, IRA–E420S1 і IRA–E420QW1 між выводами затвора і витоку, а також затвора і стоку польових транзисторів включені вбудовані блокувальні конденсатори. У корпусі IRA–E940ST1 розміщені два перетворювачі з двома чутливими елементами. Перетворювач має один загальний вивід і об'єднаний вивід стоку, виводи витоку транзисторів – розділені.

Отже, аналізуючи таблицю 1.1, легко побачити, що серед перетворювачів з одним чутливим елементом найбільш чутливими є IRA–E420QW1 та IRA–E420S1. Проте за видом спектральної характеристики IRA–E420QW1 підходить для виявлення полум'я, а IRA–E420S1 – оптимальний для вимірювання потужності оптичного випромінювання.

1.4 Класифікація приладів для вимірювання потужності оптичного випромінювання

Враховуючи вищенаведений аналіз літературних матеріалів, можна зробити висновок, що розробка радіовимірювальних приладів на основі оптико–частотних перетворювачів сумісних з персональним комп'ютером, який би характеризувався високою чутливістю, точністю, незначною похибкою, широким діапазоном вимірюваних потужностей і частот.

На рисунок 1.15 зображена уточнена класифікація приладів для вимірювання потужності оптичного випромінювання та наведена в додатку Д. Прилади у ній наведено за такими класифікаційними ознаками: вид ПВП; спосіб включення у вимірювальний канал; діапазон частот; рівень середніх значень.

На основі розглянутих літературних джерел можна зробити висновок, що частотні перетворювачі з від'ємним опором можна поділити на дві групи частотних перетворювачів в яких наявність від'ємного опору зумовлено внутрішніми фізичними процесами в самому напівпровіднику, чи дією зовнішніх зворотних зв'язків, тобто схмотехнічна реалізація.

Частотні перетворювачі з від'ємним опором бувають реалізовані фізично та реалізовані схмотехнічно. До того ж оптико–частотні перетворювачі поділяються також за видом вольт–амперної характеристики (ВАХ), а саме S–типу, N–типу, λ –типу.

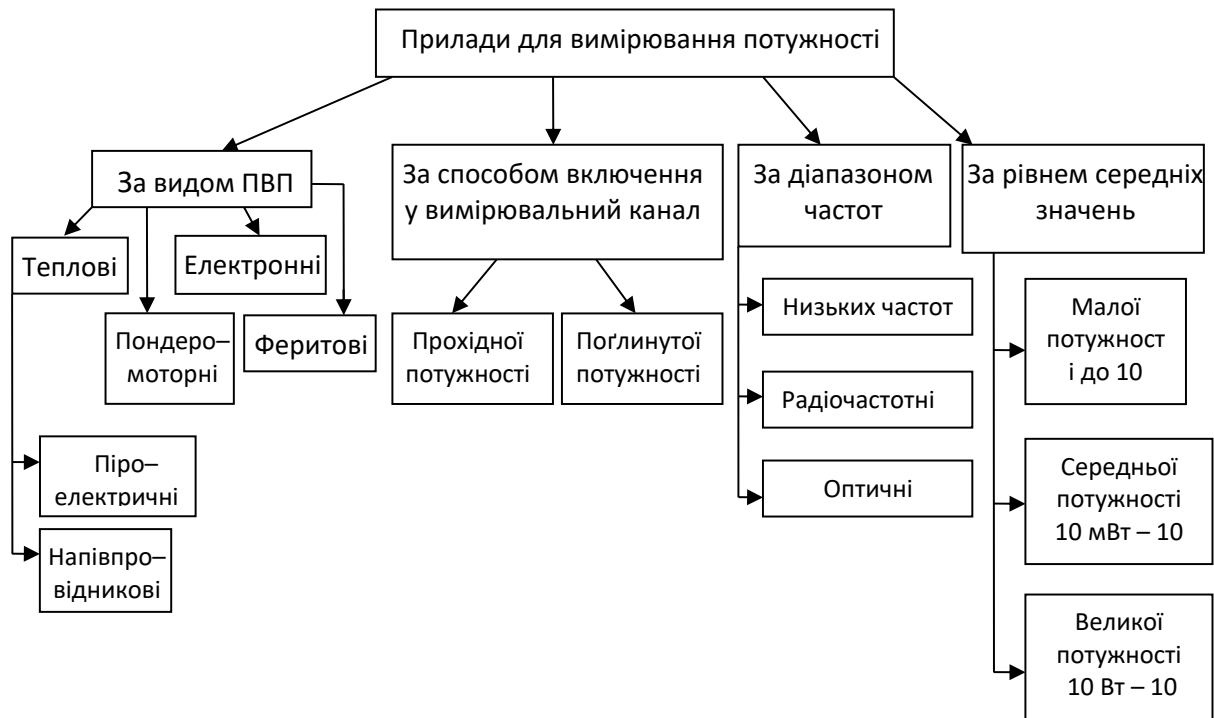


Рисунок 1.15 – Класифікація приладів для вимірювання

1.5 Висновки до розділу

1. На підставі аналізу сучасних приладів для вимірювання потужності оптичного випромінювання, доведено перспективність напрямку – розробку радіовимірювального приладу 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 приладів для вимірювання потужності оптичного випромінювання виявлено необхідність створення приладу, що усував би виявлені недоліки і характеризувався високою точністю і чутливістю, впровадження якого у виробництво можна було б вважати доцільним.
3. Для практичної реалізації та промислового виробництва радіовимірювального приладу потужності оптичного випромінювання на основі оптико–частотних перетворювачів необхідно в подальшому провести їх математичне моделювання, експериментальне дослідження та апробацію нових технічних рішень.

2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ФОТОРЕАКТИВНОГО ЕФЕКТУ У НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДАХ

На даному етапі науково–технічного прогресу відбувається інтенсивний розвиток напівпровідникових приладів для вимірювання потужності оптичного випромінювання. Завдяки використанню нових технологій мікроелектроніки забезпечується виготовлення мікроелектронних оптичних приладів, які мають високу чутливість до вимірювального параметру і нечутливість до інших зовнішніх факторів, а також характеризуються малим енергоспоживанням та повною інформативною сумісністю з мікропроцесорними засобами обробки інформації.

Вищенаведені переваги має частотний метод перетворення потужності оптичного випромінювання. І для реалізації даного методу необхідно проаналізувати фізичний механізм взаємодії оптичного випромінювання з напівпровідниковими приладами. Тому даний розділ присвячений аналізу фізичних явищ в напівпровідниках і напівпровідникових приладах, що дозволило обґрунтувати правомірність застосування їх фотореактивних властивостей для створення радіовимірювальних приладів на основі оптичних перетворювачів з частотним виходом.

2.1 Математична модель фотореактивного ефекту в діодних структурах та сонячних елементах

В якості фоточутливого елемента в приладі на основі оптичного перетворювача може використовуватися фотодіод, кремнієвий сонячний елемент. Кремній – найбільш вивчений напівпровідниковий матеріал, а виготовлені з нього сонячні елементи на основі гомогенного р–п переходу являються найпростішими фотоелектричними перетворювачами. Кремнієвий сонячний перетворювач був виготовлений в 1953 р. науковими співробітниками Bell Laboratories в період, коли вже відчувалась потреба в фотоелектричному перетворенні енергії. Починаючи з 1958 р., коли було вперше використано фотоелектричні сонячні перетворювачі в космосі, ціни на них почали падати, а ККД зріс до 15 – 17%, що відповідає сонячному спектру за межами земної атмосфери, тобто, при нульовій повітряній масі (AM0) [40]. На сьогоднішній день спостерігається тенденція покращення характеристик КСЕ, що робить актуальним їх використання в різних галузях промисловості.

Загальний світловий струм I_w у фотодіода, як і у сонячного елемента складається з двох частин:

$$I_w = I_T + I_\phi, \quad (2.1)$$

де I_T – темновий струм (струм при відсутності освітлення) – це струм, що проходить через фотодіод при вказаній напрузі на ньому при відсутності потоку випромінювання в діапазоні спектральної чутливості; I_ϕ – фотострум (додатковий струм через фотодіод, який виникає при його освітленні).

Поглинання фотонів у базовій області напівпровідникового діода, як і в активному, поглинаючому шарі сонячних елементів, супроводжується утворенням електронно–діркових пар і появою надлишкових носіїв заряду. Процеси дифузії, а також об’ємна та поверхнева рекомбінація носіїв заряду приводить систему зона провідності – валентна зона у рівноважний стан [41]. Надлишкова концентрація носіїв заряду дифундує до межі переходу, де відбувається їх розподіл електричним полем. Рівняння переносу встановлює взаємозв’язок між процесами генерації, рекомбінації, дифузії та дрейфу

Його розв’язок дозволяє отримати математичний вираз для повного фотоструму, що дозволяє визначити падіння напруги на базовій області діода. Оскільки в даному розділі розглядаються квазінейтральна область та збіднений шар, що розташовані по одну сторону переходу, то основна частина отриманих результатів справедлива як для сонячних елементів з гомогенним або гетерогенним переходом, так і для елементів з бар’єром Шотткі.

Розв’язок рівняння переносу розглянемо для звичайних граничних умов, коли система диференціальних рівнянь з граничними умовами є лінійною по відношенню до концентрації носіїв заряду і їх похідними. Наслідком цього є можливість підсумовування концентрації носіїв заряду, якщо діє, або відсутнє освітлення, а також світлових та темнових струмів. Якщо в базовій області діода існує електричне поле, то воно впливає на процес переносу неосновних носіїв заряду таким чином, що на хаотичний тепловий рух накладається направлений рух носіїв заряду з постійною швидкістю μE в електричному полі. Під час дії монохроматичного випромінювання на напівпровідник швидкість генерації носіїв заряду в одиниці об’єму визначається [42]

$$G(x, \lambda) = \alpha(\lambda) \Gamma(x), \quad (2.2)$$

де $\alpha(\lambda)$ – коефіцієнт поглинання світла; $\Gamma(x)$, – густина потоку фотонів.

Вираз (2.2) є справедливим за умови, коли процес генерації відбувається з участю одного фотона і квантовий вихід цього процесу дорівнює одиниці. Параметр $G(x, \lambda)$ залежить від коефіцієнта поглинання світла $\alpha(\lambda)$ і, відповідно, являється функцією енергії фотонів; при врахуванні всього випромінювання, яке міститься в сонячному спектрі в умовах АМ1,5, він досягає приблизно $10^{21} - 10^{22} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$. Процес рекомбінації надлишкових носіїв заряду описується згідно теорії Шоклі–Ріда. Швидкість об'ємної рекомбінації визначається через ефективний час життя неосновних носіїв заряду, яке не залежить від їх концентрації і координати в об'ємі напівпровідника. При виконанні умови $n_p \ll p_p$ швидкість рекомбінації

$$V(x) = \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n}, \quad (2.3)$$

де n_{p0} – концентрація неосновних носіїв заряду в умовах теплової рівноваги; n_p – концентрація неосновних носіїв заряду, які генеровані світлом.

Швидкість зміни n_p у часі визначається рівнянням

$$\frac{dn_p}{dt} = G(x) - V(x) = \alpha(\lambda)\Gamma(x) - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n}. \quad (2.4)$$

Тепер можна розглянути рівняння переносу носіїв заряду в напівпровіднику. Для цього необхідно врахувати, що густина струму складається з дрейфової і дифузійної частин:

$$\vec{J}_n = nq\mu\vec{E} + qD_n\nabla_n; \quad (2.5)$$

$$\vec{J}_p = pq\mu\vec{E} - qD_p\nabla_p. \quad (2.6)$$

Виконання умови збереження заряду у безкінечно малому об'ємі напівпровідника можна представити у вигляді:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \nabla\vec{J} = 0; \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \vec{J}_n / q = G_n - V_n; \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \vec{J}_p / q = G_p - V_p, \quad (2.9)$$

де $\vec{J} = \vec{J}_n + \vec{J}_p$; G_n, G_p – складові, які визначають швидкість генерації електронів і дірок.

Якщо у результаті міжзонних переходів генеруються електронно–діркові пари, то $G_n = G_p$. З умови нейтральності, коли $\rho = 0$ і $\partial \rho / \partial t = 0$, а також використовуючи (2.7)–(2.9), можна записати

$$V_n = V_p = \frac{n - n_0}{\tau_n} = \frac{p - p_0}{\tau_p}, \quad (2.10)$$

де n_0 і p_0 – концентрації носіїв за умови теплової рівноваги; n, p – концентрації електронів і дірок, які генеровані струмом; τ_n, τ_p – час їх життя.

Використовуючи вирази (2.5), (2.6) і (2.10), можна отримати одномірні рівняння переносу:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \mu_n E \frac{\partial n}{\partial x} + \mu_n n \frac{\partial E}{\partial x} - \frac{n - n_0}{\tau_n} + G_n(x); \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \mu_p E \frac{\partial p}{\partial x} + \mu_p p \frac{\partial E}{\partial x} - \frac{p - p_0}{\tau_p} + G_p(x), \quad (2.12)$$

де μ_n і μ_p – коефіцієнти рухливості електронів і дірок; D_n і D_p – коефіцієнти дифузії електронів і дірок; E – напруженість електричного поля в базовій області.

Вирази (2.11) і (2.12) можна значно спростити:

$$D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \mu_n E \frac{\partial n}{\partial x} - \frac{n - n_0}{\tau_n} = -G(x). \quad (2.13)$$

Розглянемо розв'язок рівняння неперервності (2.13) для напівпровідникового діода, на який діє оптичне випромінювання. Енергетична діаграма показана на рисунку 2.1.

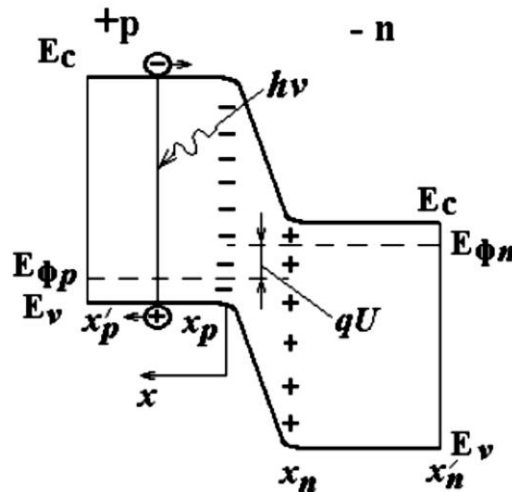


Рисунок 2.1 – Енергетична діаграма напівпровідникового діода, сонячного елемента у прямому режимі роботи

Будемо вважати, що все оптичне випромінювання поглинається у квазінейтральній області р-типу ($x_p \leq x \leq x'_p$). Під дією електричного поля надлишкові неосновні носії заряду ефективно залишають область, яка розташована поблизу межі збідненого шару ($x = x_p$), що відповідає умові, коли $x \rightarrow x_p$ і при нульовому зміщенні величина n_p наближається до n_{p0} . Якщо до р-n переходу прикладена пряма напруга U , то концентрація носіїв заряду, якщо $x = x_p$, згідно закону Шоклі, може бути подана у вигляді [43]

$$n_p = n_{p0} \exp(qU / kT).$$

Будемо вважати, що товщина шару поглинання значно більша за дифузійну довжину носіїв заряду та глибину проникнення світла для розглядуваної довжини хвилі світла, тобто $x'_p - x_p \gg L_n$ і $x'_p - x_p \gg \alpha^{-1}$. До цього також вважаємо, що електричне поле відсутнє в квазінейтральній р-області поглинання, тобто $E=0$. З врахуванням цих зауважень рівняння переносу (2.13) приймає вигляд

$$\frac{d^2 n_p}{dx^2} - \frac{n_p - n_{p0}}{D_n \tau_n} = -\frac{G(x)}{D_n}. \quad (2.14)$$

Величина $G(x)$ згідно теорії фотопровідності визначається

$$G(x) = G(0)e^{-\alpha x}, \quad (2.15)$$

де $G(0) = \alpha \Gamma$; $\Gamma = \Gamma(\lambda)$ – густина потоку фотонів монохроматичного випромінювання, якщо $x = x_p$.

Граничні умови мають під час розв'язання рівняння (2.14) вигляд:

$$n_p = n_p e^{\frac{qU_0}{kT}} \text{ при } x = x_p; \quad (2.16)$$

$$n_p = n_{p0} \text{ при } x = \infty. \quad (2.17)$$

З врахуванням (2.15) і $L_n^2 = D_n \tau_n$ рівняння (2.14) перетворюється до вигляду

$$\frac{d^2 n_p}{dx^2} - \frac{n_p - n_{p0}}{L_n^2} = -\frac{\alpha \Gamma}{D_n} e^{-\alpha x}. \quad (2.18)$$

Розв'язок рівняння (2.18) складається з двох частин відповідно для правої і лівої його складових. Спочатку розглянемо розв'язок для лівої частини рівняння (2.18), яке має вигляд

$$n_p - n_{p0} = A_1 e^{\frac{x}{L_n}} + A_2 e^{\frac{-x}{L_n}}, \quad (2.19)$$

де A_1 і A_2 визначаються з граничних умов (2.16) і (2.17). Розв'язок для правої частини рівняння має вигляд:

$$n_p - n_{p0} = -\frac{\alpha \Gamma(\lambda) e^{-\alpha x}}{D_n \left[\alpha^2 - \frac{1}{D_n \tau_n} \right]}. \quad (2.20)$$

Формула (2.20) визначає концентрацію неосновних носіїв заряду, яка обумовлена дією світла [44].

Спрощена еквівалентна схема сонячного елемента ідентична еквівалентній схемі фотодіода, яка зображена на рисунку 2.2.

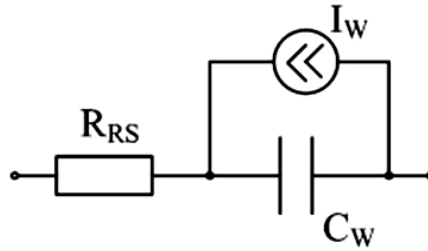


Рисунок 2.2 – Еквівалентна схема фотодіода

При дії світла на напівпровідник зростає його провідність. Величина фотоструму залежить від світлової провідності. Величина світлової провідності

$$\sigma_{cs} = q_n \mu_n \delta_n + q_p \mu_p \delta_p, \quad (2.21)$$

де δ_n, δ_p – надлишкові концентрації електронів і дірок, які створені світлом.

Провідність, викликана рівноважними носіями заряду, отримала назву темної. Повна провідність складається з темної і світлової провідностей

$$\sigma = q_n \mu_n (n_0 + \delta_n) + q_p \mu_p (p_0 + \delta_p) = \sigma_T + \sigma_{cs}. \quad (2.22)$$

Власне поглинання світла приводить до генерації електронів і дірок у рівних кількостях, тобто $\delta_n = \delta_p$.

Вираз для густини струму, який викликаний світловою провідністю, має вигляд

$$j_\phi = \sigma_{cs} E = q_n \Delta n \mu_n E, \quad (2.23)$$

де Δn – концентрація неосновних носіїв заряду, яка обумовлена дією світла; E – напруженість електричного поля.

Напруженість електричного поля E можна визначити так

$$E = \frac{U_{зв}}{x_{pn}}, \quad (2.24)$$

де $U_{зв}$ – зворотна напруга; x_{pn} – товщина p - n переходу.

Концентрація неосновних носіїв заряду Δn , яка обумовлена дією світла

$$\Delta n = n_p - n_{p0} = -\frac{\alpha \Gamma(\lambda) e^{-\alpha x}}{D_n \left[\alpha^2 - \frac{1}{D_n \tau_n} \right]} = -\frac{G(0) e^{-\alpha x}}{D_n \left[\alpha^2 - \frac{1}{D_n \tau_n} \right]}. \quad (2.25)$$

Підставляючи (2.25) і (2.24) в (2.23), отримаємо

$$j_\phi = -\frac{q_n \mu_n U_{зб} G(0) e^{-\alpha x}}{D_n x_{pn} \left[\alpha^2 - \frac{1}{D_n \tau_n} \right]}. \quad (2.26)$$

Величину фотоструму можна записати у вигляді

$$I_\phi = S_{pn} j_\phi = -\frac{S_{pn} q_n \mu_n U_{зб} G(0) e^{-\alpha x}}{D_n x_{pn} \left[\alpha^2 - \frac{1}{D_n \tau_n} \right]}, \quad (2.27)$$

де S_{pn} – площа $p-n$ переходу; x – глибина поглинання оптичного випромінювання.

Зв'язок між швидкістю оптичної генерації і потужністю випромінювання, що падає на одиницю поверхні описується рівнянням

$$P = E_\phi \cdot I_0 = \frac{hc}{\lambda} \cdot \frac{G(0)}{\alpha}.$$

Темновий струм фотодіода розраховується за формулою:

$$I_T = I_{нас} \left(\exp \frac{qU}{kT} - 1 \right), \quad (2.28)$$

де $I_{нас}$ – струм насичення; $U=0.2 \text{ В}$ – напруга на $p-n$ переході; $k=1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ – стала Больцмана; $T=300 \text{ К}$ – температура.

Струм насичення визначається за формулою:

$$I_{нас} = S_{pn} \frac{qD_p P_n}{L_p}, \quad (2.29)$$

де $D_p = 47 \text{ см}^2 / \text{с}$ – коефіцієнт дифузії дірок; $p_n = \frac{n_i^2}{n_n}$ – концентрація дірок в n -області; $L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = \sqrt{47 \cdot 5 \cdot 10^{-4}} = 0.15 \text{ см}$ – дифузійна довжина дірок; $S_{pn} = 0.009 \text{ см}^2$ – площа p - n переходу.

Таким чином, отримавши залежність струму фотодіода, сонячного елемента від дії світла, можна визначити еквівалентну схему фотодіода та сонячного елемента, параметри якої залежать від оптичного випромінювання.

Сонячний елемент – прилад для перетворення енергії сонячного випромінювання. Дослідження проводились із використанням тестового зразка кремнієвого сонячного елемента (КСЕ) розміром $5 \times 10 \text{ мм}$. На рисунку 2.3 схематично показаний поперечний переріз даного сонячного елемента на основі гомогенного p - n переходу в Si. Основою елемента являється пластина товщиною 200 – 500 мкм з монокристалу Si. Товщина шару n -типу становить 0,2 мкм; шар p -типу – 200 мкм, p^+ -шар – 0,5 мкм. Шар n -типу створюють дифузійним способом, потім наносять електричні контакти і просвітлююче покриття [45]. Перехід формується при дифузії атомів P з газоподібних дифузантів PH_3 , POCl . Оскільки в використовуваному спектральному діапазоні (від 0,35 до 1,1 мкм) коефіцієнт відбивання чистого кремнію приймає значення 33 – 54 %, на його поверхню необхідно наносити просвітлююче покриття. Оптимальне одношарове покриття знижує коефіцієнт відбивання в даному інтервалі приблизно до 10, а двошарове – до 3 %. В якості просвітлюючого покриття використано шар Si_3N_4 .

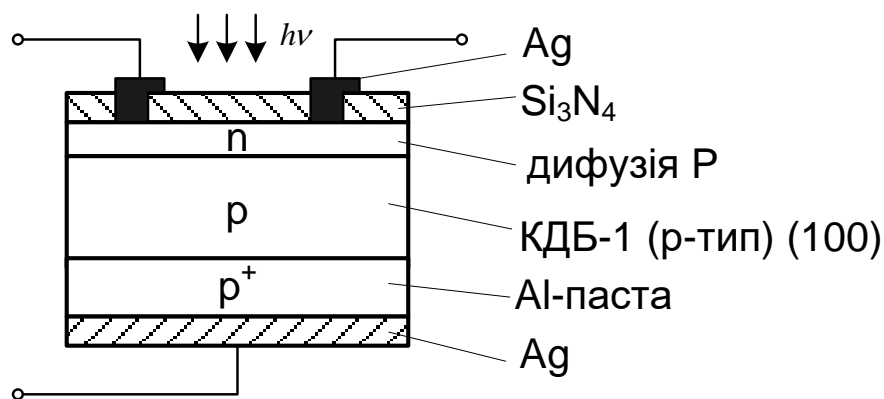


Рисунок 2.3 – Конструкція кремнієвого сонячного елемента

Величина встановленої фотоЕРС при освітленні переходу випромінюванням постійної інтенсивності описується рівнянням вольт–амперної характеристики

$$U = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph} - I}{I_s} + 1 \right),$$

де I_{ph} – фотострум; I_s – струм насичення; I – струм зовнішнього кола.

Рівняння вольт–амперної характеристики пояснює еквівалентна схема фотоелемента (рисунок 2.2), яка містить джерело струму

$$I_{ph} = SqN_0Q,$$

де S – площа фотоелемента, а коефіцієнт збирання Q – безрозмірний множник (<1), який показує, яка доля всіх створених світлом електронно–діркових пар (SN_0) збирається р–п переходом. Паралельно джерелу струму ввімкнено р–п перехід, струм через який має значення $I_s [e^{qU/kT} - 1]$. Перехід шунтує навантаження, и при збільшенні напруги струм через нього швидко зростає. В навантаження (опір R) відбирається струм I .

На рисунку 2.4 представлена експериментальна вольт–амперна характеристика кремнієвого сонячного елемента в темновому режимі та при різних потужностях оптичного випромінювання.

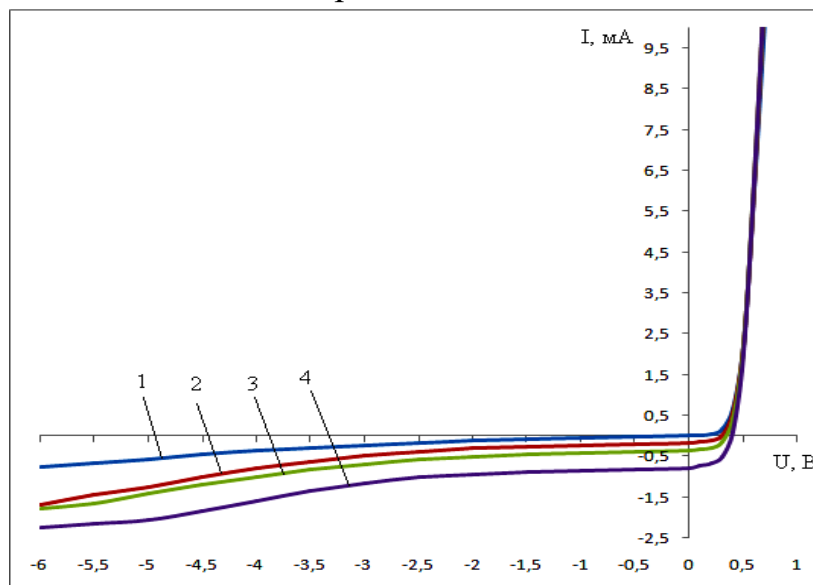


Рисунок 2.4 – Експериментальні вольт–амперні характеристики кремнієвого сонячного елемента при різних потужностях оптичного випромінювання: 1 – $0 \text{ мкВт} / \text{см}^2$; 2 – $32 \text{ мкВт} / \text{см}^2$; 3 – $70 \text{ мкВт} / \text{см}^2$; 4 – $150 \text{ мкВт} / \text{см}^2$

Максимальна потужність, яка знімається з 1 см^2 , дорівнює:

$$P = I_{ph} \cdot U = \xi I_{кз} U_{xx},$$

де ξ – коефіцієнт заповнення (показує, яку частину потужності, що дорівнює добутку $I_{кз} U_{xx}$, складає потужність, яка знімається з фотоперетворювача; в хороших елементів величина ξ може досягати 0,8); $I_{кз}$ – струм короткого замикання; U_{xx} – напруга холостого ходу.

Таким чином, кремнієвий сонячний елемент цілком придатні для широкого використання фотоелектричного метода перетворення сонячної енергії, і тому можуть використовуватись як фоточутливі елементи в частотних перетворювачах.

2.2 Математична модель фотореактивного ефекту в польових транзисторних структурах

Великий інтерес до польових транзисторів зі структурою МОН викликаний їх перспективністю для рішення ряду прикладних задач опто– та міроелектроніки. На сьогоднішній день МОН–фототранзистори виготовляються в двох основних варіантах. В першому використовується комбінація МОН–транзистора з фотодіодом, який одночасно є електродом витоку транзистора. Фотодіод може бути виконаний у вигляді дифузійного p – n –переходу або діода Шоткі. Електрод витоку з'єднаний з затвором транзистора (при необхідності – через джерело додаткового зміщення для вибору робочої точки). Оскільки струм через коло затвора не проходить, то фотодіод працює в режимі холостого ходу, коли фотонапруга, яку він розвиває, є максимальною

$$U_{\phi} \approx (kT/e) \ln(I_{\phi}/I_s + 1), \quad (2.30)$$

де I_s – зворотний струм p – n –переходу; I_{ϕ} – фотострум, що залежить від інтенсивності освітлення і параметрів діода.

Зміна потенціалу затвора призводить до зміни струму в колі сток – витік в відповідності з крутизною перехідної характеристики транзистора [46].

Другий варіант – власне МОН–фототранзистор – являє собою МОН–транзистор з напівпрозорим затворним електродом, через який відбувається

освітлення підзатворної області напівпровідника. При цьому змінюється порогова напруга формування інверсного каналу та крутизна прохідної характеристики. В змішаному режимі здійснюється фотогенерація носіїв як в фотодіоді витоку, так і в ОПЗ в підзатворній області [46]. Якщо напруга на затворі транзистора в темряві менше порогової, освітлення призводить до накопичення неосновних носіїв в приповерхневій області напівпровідника при розподілі пар нерівноважних носіїв заряду полем ОПЗ, а також до захвату основних нерівноважних носіїв заряду пастками границі розподілу діелектрик–напівпровідник. Обидва ці процеси сприяють прискоренню утворення інверсного каналу і виникненню провідності між виток і стоком МОН–фототранзистора. В відкритому стані МОН–фототранзистора освітлення призводить до збільшення концентрації рухливих носіїв в каналі. Для пояснення фізичного принципу роботи (фізичної моделі) фототранзистора можна використати зонну модель $p-n-p$ фототранзистора (рисунок 2.6, 2.7), оскільки під дією світла на базову область транзистора (рисунок 2.5) відбуваються ті ж самі складні фізичні процеси, що і в каналі МОН–транзистора [47].

При малих струмах напруженість електричного поля поза областю бар'єру в $p-n$ -переходах буде близька до нуля (горизонтальне положення границь зон на зонній моделі поза переходами), так що складова струму провідності дуже мала і нею можна знехтувати в порівнянні із дифузійною складовою. В цих умовах при знехтуванні дією пасток отримаємо наступні рівняння неперервності для електронів та дірок:

$$\frac{\partial \Delta n}{\partial t} = -\frac{\Delta n}{\tau_e} + g + D_e \frac{\partial^2 \Delta n}{\partial x^2}, \quad (2.31)$$

де Δn – концентрація електронів; τ_e – час життя електронів; g – крутизна вольт–амперної характеристики; D_e – коефіцієнт дифузії електронів.

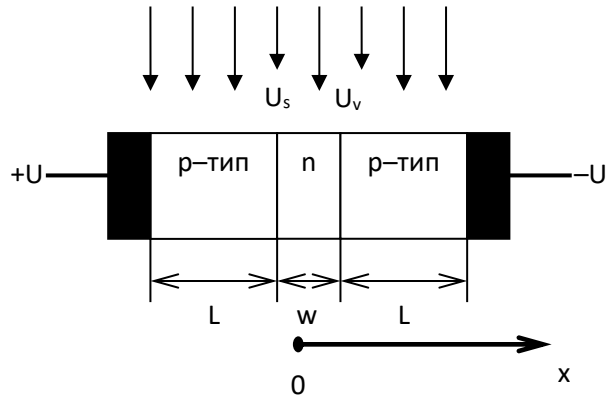


Рисунок 2.5 – Структура та спосіб освітлення $p-n-p$ фототранзистора

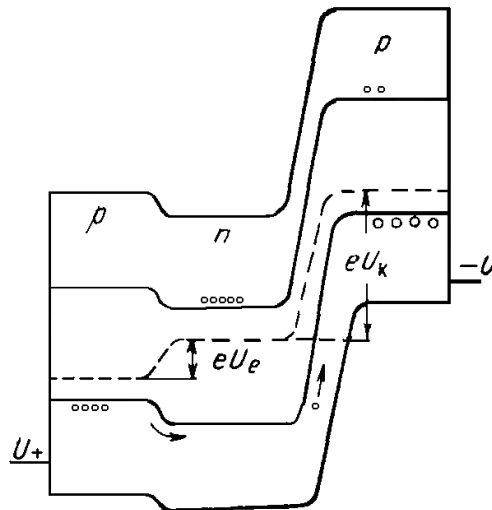


Рисунок 2.6 – Зонна модель $p-n-p$ фототранзистора в затемненому стані

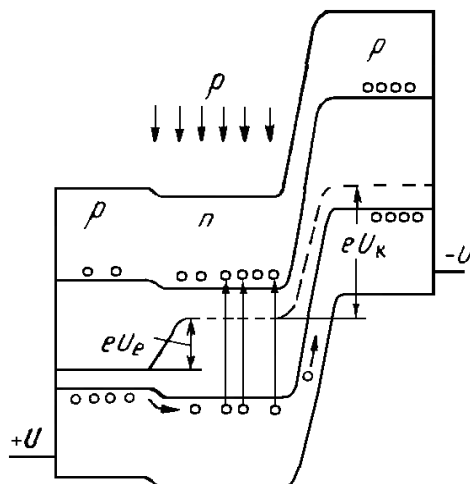


Рисунок 2.7 – Зонна модель $p-n-p$ фототранзистора при освітленні

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = -\frac{\Delta p}{\tau_h} + g + D_h \frac{\partial^2 \Delta p}{\partial x^2}, \quad (2.32)$$

де Δp – нерівноважна концентрація дірок; τ_h – час життя дірок; D_h – коефіцієнт дифузії дірок.

Для n -області можна записати наступні граничні умови:

$$p_1 = p_n \exp \frac{eU_e}{kT}, \text{ при } x=0, \quad (2.33)$$

$$p_2 = p_n \exp \frac{eU_k}{kT}, \text{ при } x=w. \quad (2.34)$$

де p_1, p_2 – концентрації дірок відповідно при $x=0$ та при $x=w$; p_n – рівноважна густина дірок в напівпровіднику; w – ширина каналу; U_e, U_k – поверхневі потенціали дірок в області витоку–стоку відповідно при $x=0$ та при $x=w$. Гранична умова для області витоку буде:

$$n_1 = n_p \exp \frac{eU_e}{kT} \text{ при } x=0, \quad (2.35)$$

а для стокової області

$$n_2 = n_p \exp \frac{eU_k}{kT} \text{ при } x=w. \quad (2.36)$$

Рішення для концентрації нерівноважних дірок Δp в n -області має вигляд

$$\Delta p = \frac{(p_1 - p_n) \operatorname{sh} \frac{w-x}{L_h} + (p_2 - p_n) \operatorname{sh} \frac{x}{L_h} + g \tau_h \left(\operatorname{sh} \frac{w}{L_h} - \operatorname{sh} \frac{w-x}{L_h} \operatorname{sh} \frac{w}{L_h} \right)}{\operatorname{sh} \frac{w}{L_h}}. \quad (2.37)$$

Таким чином, з врахуванням повної похідної від Δp знаходимо діркові струми в точках $x=0$ та $x=w$, що відповідають цьому розподілу концентрації дірок, будуть наступними:

$$I_{he} = -eD_h \left. \frac{d\Delta p}{dx} \right|_{x=0} = \frac{eD_h}{L_h} \left[(p_1 - p_n) \operatorname{cth} \frac{w}{L_h} - (p_2 - p_n) \operatorname{cosech} \frac{w}{L_h} \right] - egL_h \left(\operatorname{cth} \frac{w}{L_h} - \operatorname{cosech} \frac{w}{L_h} \right), \quad (2.38)$$

де I_{he} – дірковий струм в точці $x=0$; L_h – дифузійна довжина дірок в області n -типу; g – крутизна характеристики.

$$I_{hk} = -eD_h \left. \frac{d\Delta p}{dx} \right|_{x=w} = \frac{eD_h}{L_h} \left[(p_1 - p_n) \operatorname{cosech} \frac{w}{L_h} - (p_2 - p_n) \operatorname{cth} \frac{w}{L_h} \right] - egL_h \left(\operatorname{cosech} \frac{w}{L_h} - \operatorname{cth} \frac{w}{L_h} \right), \quad (2.39)$$

де I_{hk} – дірковий струм в точці $x=w$.

Обчислюючи аналогічним чином рівняння неперервності для концентрації нерівноважних електронів Δn , можна визначити величину електронного струму в переходах витоку та стоку:

$$I_{ev} = eD_e \left. \frac{d\Delta n}{dx} \right|_{x=0} = \frac{eD_e}{L_{ee}} \left[(n_1 - n_p) \operatorname{cth} \frac{L}{L_{ee}} \right] - egL_{ee} \left(\operatorname{cth} \frac{L}{L_{ee}} - \operatorname{cosech} \frac{L}{L_{ee}} \right), \quad (2.40)$$

$$I_{es} = eD_e \left. \frac{d\Delta n}{dx} \right|_{x=w} = \frac{eD_e}{L_{ek}} \left[(n_2 - n_p) \operatorname{cth} \frac{L}{L_{ek}} \right] + egL_{ek} \left(\operatorname{cth} \frac{L}{L_{ek}} - \operatorname{cosech} \frac{L}{L_{ek}} \right). \quad (2.41)$$

Підставивши в рівняння (2.38) – (2.41) граничні умови (2.33) – (2.36) і склавши електронні та діркові складові струмів в обох p - n -переходах, отримаємо вирази для повних струмів витока та стока:

$$I_v = (G_1 + G_3) \left[\exp\left(\frac{eU_e}{kT}\right) - 1 \right] - G_2 \left[\exp\left(-\frac{eU_k}{kT}\right) - 1 \right] - I_2 - I_3, \quad (2.42)$$

$$I_s = G_2 \left[\exp\left(\frac{eU_e}{kT}\right) - 1 \right] - (G_1 + G_4) \left[\exp\left(-\frac{eU_k}{kT}\right) - 1 \right] + I_2 + I_4, \quad (2.43)$$

де

$$G_1 = ep_n \frac{D_h}{L_h} \operatorname{cth} \frac{w}{L_h}, \quad (2.44)$$

$$G_2 = ep_n \frac{D_h}{L_h} \operatorname{cosech} \frac{w}{L_h}, \quad (2.45)$$

$$G_3 = en_p \frac{D_e}{L_{ee}} \operatorname{cth} \frac{L}{L_{ee}}, \quad (2.46)$$

$$G_4 = en_p \frac{D_e}{L_{ek}} \operatorname{cth} \frac{L}{L_{ek}}, \quad (2.47)$$

$$I_2 = egL_h \left(\operatorname{cth} \frac{w}{L_h} - \cos \operatorname{ech} \frac{w}{L_h} \right), \quad (2.48)$$

$$I_3 = egL_{ee} \left(\operatorname{cth} \frac{L}{L_{ee}} - \cos \operatorname{ech} \frac{L}{L_{ee}} \right), \quad (2.49)$$

$$I_4 = egL_{ek} \left(\operatorname{cth} \frac{L}{L_{ek}} - \cos \operatorname{ech} \frac{L}{L_{ek}} \right). \quad (2.50)$$

В приведених рівняннях: n_p – концентрацію електронів в р–області; p_n – концентрацію дірок в п–областях; L_h – дифузійна довжина дірок в області п–типу; L_{ee} – дифузійна довжина електронів в області витоку; L_{ek} – дифузійна довжина електронів в області стоку.

Оскільки прийmemo, що

$$I_V - I_S = 0. \quad (2.51)$$

Віднімаючи від рівняння (2.42) рівняння (2.43), отримуємо

$$(G_1 + G_3 - G_2) \left[\exp\left(\frac{eU_e}{kT}\right) - 1 \right] + (G_1 + G_4 - G_2) \cdot \left[\exp\left(-\frac{eU_k}{kT}\right) - 1 \right] - I_\delta = 0. \quad (2.52)$$

Струм $I_\phi = 2I_2 + I_3 + I_4$, що входить в рівняння (2.52), являється первинним фотострумом, який обумовлений рухом електронів та дірок, генерованих випромінюванням в внутрішній області і в зовнішніх областях в межах дифузійних довжин від обох р–п переходів.

Підведена напруга U розділяється, внаслідок чого

$$U = U_V + U_S. \quad (2.53)$$

Рівняння (2.54) і (2.55) складають систему двох рівнянь по відношенню U_V та U_S .

Розглянемо випадок, в якому напруга живлення значно більша від kT/e , що завжди має місце в практичних застосуваннях. В цьому випадку маємо також $\frac{eU_s}{kT} \gg 1$, а тому виразом експоненти в рівнянні (2.53), що включає U_s , можна знехтувати.

Визначаючи із спрощеного таким чином рівняння (2.52) доданок $\left[\exp^{eU_v/kT} - 1 \right]$ і підставляючи його в рівняння (2.42), отримуємо рівняння для повного струму, який протікає через освітлений фототранзистор:

$$I = I_v = I_s = I_T + I_F = (G_1 + G_3) \cdot \left(\frac{I_\phi}{G_1 + G_3 - G_2} + \frac{G_1 + G_4 - G_2}{G_1 + G_3 - G_2} \right) + G_2 - I_2 - I_3 \quad (2.54)$$

Враховуючи, що струми I_2, I_3 та I_4 дорівнюють нулю, що має місце, коли фототранзистор затемнений, отримуємо вираз для темного струму

$$I_T = (G_1 + G_3) \cdot \frac{G_1 + G_4 - G_2}{G_1 + G_3 - G_2} + G_2. \quad (2.55)$$

Віднімаючи від рівняння (2.54) рівняння (2.55), отримаємо вираз для результуючого фотоструму

$$I_F = I - I_T = \frac{G_1 + G_3}{G_1 + G_3 - G_2} I_\phi - I_2 - I_3. \quad (2.56)$$

Фотострум не залежить від прикладеної напруги до тих пір, поки виконується умова $U \gg \frac{kT}{e}$. Вводячи коефіцієнт підсилення транзистора по струму (в режимі короткого замикання)

$$\alpha = \frac{G_2}{G_1 + G_3},$$

можна переписати рівняння (2.26) в наступному вигляді:

$$I_F = \frac{1}{1-\alpha} I_\phi - I_2 - I_3 \approx \frac{1}{1-\alpha} I_\phi.$$

Звідси слідує, що первинний фотострум I_ϕ помножений на великий по величині коефіцієнт $(1-\alpha)^{-1}$, оскільки коефіцієнт α близький до одиниці.

Струм стоку МОН–фототранзистора дорівнює сумі струмів каналу I_k і струму зворотно–зміщеного переходу стік – підкладка I_{cn} . При освітленні структури значення цього струму збільшується на ξI , де ξ – фоточутливість зворотно–зміщеного переходу стік – підкладка. Струм в каналі

$$I_k = we\mu_p \frac{dU}{dx} \int_0^{d_k} p(y)dy, \quad (2.27)$$

де $\int_0^{d_k} p(y)dy$ – рухливий заряд на одиницю площі каналу, який визначається з рівняння нейтральності структури;

d_k – глибина каналу; w – ширина каналу.

При освітленні змінюється заряд Q_{OH} , обумовлений захватом носіїв, генерованих світлом на границі розподілу діелектрик – напівпровідник (на величину $\mp Q_t$, де верхній знак відповідає захвату дірок, а нижній – електронів), а також заряд шару збіднення ОПЗ Q_3 . Заряд рухомих дірок в каналі

$$Q_p(x) = -\sqrt{2\varepsilon_0\varepsilon_n e N_D [U(x) + \psi_{sn}]} + C_{\bar{a}} [U_\zeta - U(x) - \psi_{sn} - \phi_{i\bar{i}} - U_{\bar{a}\bar{i}}] \mp Q_t, \quad (2.58)$$

де ψ_{sn} – поверхневий електростатичний потенціал, що відповідає початку інверсії, який в темноті дорівнює $2\varphi_F$, а при освітленні $\psi_{sn} = 2\varphi_F - \Delta\varphi_F$ (де $\Delta\varphi_F$ – зміна квазірівнів Фермі за рахунок генерації нерівноважних носіїв $\Delta n, \Delta p$),

$$\Delta\varphi_{Fp} = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{\Delta p}{p_v} + 1\right); \quad \Delta\varphi_{Fn} = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{\Delta n}{n_v} + 1\right),$$

$$\Delta n, \Delta p = \int G_\phi e^{-Ky} \cdot \tau_{e\phi}(y) dy, \quad (2.59)$$

де G_ϕ – швидкість світлової генерації; $\tau_{ef}(y)$ – ефективний час життя носіїв заряду.

З (2.57), (2.58), проводячи інтегрування, отримуємо вольт–амперну характеристику МОН–фототранзистора:

$$I_S = \frac{C_\delta \mu_{ef} W}{L} \left\{ \begin{aligned} & U_{sv} \left[U_{sv} - \phi_{mn} - 2\phi_F + \Delta\phi_F - \frac{Q_{dn}}{C_\delta} \mp \frac{Q_t}{C_\delta} \right] - \\ & - \frac{U_{sv}^2}{2} - \frac{2}{3} \cdot \frac{(2\varepsilon_0 \varepsilon_n e N_D)^{1/2}}{C_\delta} \end{aligned} \right\} \times \left[(U_{sv} - U_{nv} + 2\phi_F - \Delta\phi_F)^{3/2} - (2\phi_F - \Delta\phi_F - U_{nv})^{3/2} \right]. \quad (2.60)$$

Порогова напруга відкриття транзистора з (2.60) при умові $I_S = 0$

$$U_{nop} = \phi_{mn} + 2\phi_F - \Delta\phi_F + U_{dn} \pm U_t + C_\delta^{-1} \times \left[2\varepsilon_0 \varepsilon_n e N_D (2\phi_F - \Delta\phi_F - U_{nv}) \right]^{1/2}. \quad (2.61)$$

Для типових значень C_δ і рівнів легування напівпровідника у випадку кремнієвих МОН–фототранзисторів останнім членом в (2.61) можна знехтувати. При цьому передбачається також мале значення U_{vs} ($|U_{vs}| \ll |U_s - U_{nop}|$) – так званий тріодний режим роботи МОН–фототранзистора, в якому струм стоку лінійно залежить від U_{vs} і інтенсивності освітлення. В цьому випадку вольт–амперної характеристики фототранзистора описується наближеним виразом:

$$I_S \approx -\frac{C_\delta \mu_{ef} W}{L} \left[U_{sv} (U_s - U_{nop}) - \frac{U_{sv}^2}{2} \right]. \quad (2.62)$$

При цьому вплив освітлення враховується зміною величини U_{nop} .

2.3 Математична модель фотореактивного ефекту в МОН–транзисторних структурах з двостороннім освітленням каналу

Розроблена математична модель оптичного перетворювача повинна враховувати ефекти, які виникають при взаємодії оптичного випромінювання з

напівпровідниковими приладами. В якості фоточутливого елемента в подібному оптичному перетворювачі може використовуватись МОН–транзистор з двостороннім освітленням каналу. тому необхідно отримати аналітичні вирази залежності еквівалентної ємності і динамічного опору коливального контура автогенератора від дії світла. Для отримання вищезначених залежностей необхідно розв’язати рівняння перенесення носіїв заряду в каналі транзистора під дією світла.

Відомі МОН–фототранзистори (МОНФТ) з напівпрозорим електродом, через який освітлюється підзатворна область. Відомо також, що електрод затвора тонкоплівкового МОН–фототранзистора можна виконувати непрозорим, а освітлення здійснювати через підкладку. До недоліків таких приладів відносяться невисока фоточутливість і ускладнена технологія [50].

У відомому фототранзисторі на основі МОН–структури, що містить напівпровідникову підкладку, одна із поверхонь якої є чутливою до випромінювання, з областями стоку, витоку і каналу, на якій сформовано шар діелектрика і електрод затвора, поверхня підкладки, вільна від діелектрика, являється чутливою до випромінювання і має над областю каналу пази [53].

З метою розширення функціональних можливостей (а саме: збільшення чутливості фототранзистора до випромінювання), у пропонованій конструкції МОН–фототранзистора, що містить підкладку з $p\text{-Si}$ ($N_D = 10^{17} \text{ см}^{-3}$), з напівпрозорим затворним електродом з Al , через який освітлюється підзатворна область, зі зворотної сторони підкладки під областю каналу виконані глибокі пази, площа перерізу кожного з яких задовольняє наступному співвідношенню: $A < S/n$, де S – площа каналу, n – число пазів. При цьому глибина пазів повинна бути такою, щоб виконувалася умова $ad \rightarrow 1$, де a – коефіцієнт поглинання, d – товщина пластини між дном пазу і діелектрика затвора (рисунок 2.8). Таким чином, освітлення здійснюється і через підкладку, і через затвор [56].

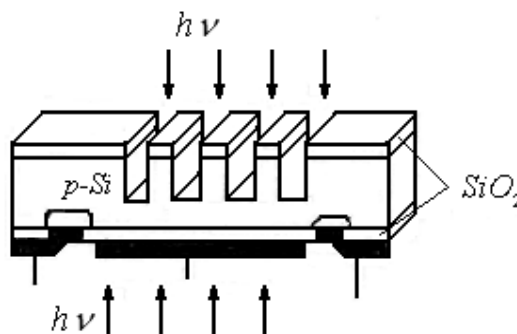


Рисунок 2.8 – Конструкція МОН–фототранзистора з двостороннім освітленням каналу

Даний МОН–фототранзистор працює таким чином. Між областю витоку і стоку прикладається напруга таким чином, щоб стоковий $p-n$ перехід був зміщений в зворотному напрямку, а витоковий $p-n$ перехід мав нульове чи невелике додатне зміщення. Напруга між затвором і підкладкою повинна дорівнювати або бути більшою порогової. При цьому величини напруг стік–витік і на зворотно зміщених переходах область стік–підкладка і область витік–підкладка повинні бути значно меншими, ніж зміщення між областю затвора і підкладкою. В результаті освітлення одночасно всіх пазів випромінюванням з довжиною хвилі, що відповідає внутрішньому фотоефекту в напівпровіднику, на виході приладу з’являється сигнал. Якщо освітлюється лише один із пазів, то сигнал на виході виявляється набагато меншим свого максимального рівня і може бути прийнятим в якості логічного нуля. При повному затемненні всіх пазів сигнал на виході також дуже малий і відповідає нульовому рівню.

Для забезпечення достатньої чутливості фототранзистора до випромінювання необхідно, щоб при даній кількості пазів площа їх поперечного перерізу була максимальна і щоб своїм нижнім торцем вони якомога ближче прилягали до верхньої межі індукованого каналу.

Для того, щоб запобігти розсіюванню світла на пазах, мінімальний діаметр кожного паза і мінімальна відстань між сусідніми пазами не менше, ніж на порядок повинна перевищувати довжину хвилі випромінювання.

Для покращення світлопередачі внутрішня поверхня пазу може бути покрита плівкою, що просвітлюється, а самі пази можуть бути заповнені прозорими діелектричними матеріалами.

Фототранзистор працює наступним чином. Під впливом освітлення через пази в область каналу відбувається генерація нерівноважних пар носіїв заряду. При умові невисокого рівня інжекції генеровані світлом носії заряду за рахунок дифузії переміщуються до витокового і стокового $p-n$ переходів. Після стокового переходу основні носії (електрони в напівпровіднику p -типу) втягуються в область стоку, а неосновні носії залишаються в області між витоком і стоком, створюючи додатній об’ємний заряд. Цей заряд зменшує висоту потенційного бар’єру витокового переходу, збільшуючи рівень інжекції витокового переходу. Інжектвані основні носії переважно досягають стокового переходу і вихідний струм збільшується. Величина вихідного струму тим більша, чим більше число носіїв n -типу генерується під дією світла, тобто, при інших однакових умовах, чим більший об’єм напівпровідника буде освітлюватись.

Таким чином, максимальний вихідний струм буде мати місце при освітленні всіх пазів одночасно. Рівень вихідного струму можна регулювати, змінюючи величину потенційного затвору, тобто, змінюючи провідність індукованого каналу.

Вперше аналогічний спосіб освітлення був використаний у формувачах відеосигналів на основі ПЗЗ [58]. Прилади мали двократний вииграш по квантовій ефективності і стабільні характеристики в діапазоні $0,22 \div 2,5$ мкм.

Пристрій може бути використаний в якості МОН–фототранзистора, позиційно–чуттєвого фотоперетворювача, логічної оптоелектронної комірки, що реалізує логічну операцію “I”. При реалізації логічної операції “I” в оптоелектронних пристроях пази освітлюються окремими оптичними зондами.

Наявність освітлення одного з пазів відповідає надходженню на вхід логічного нуля. Величина вихідного сигналу пропорційна кількості освітлюваних пазів (рисунок 2.9).

Наявність вихідного сигналу високого рівня приймається як наявність вихідної одиниці, а малого рівня – вихідного нуля. Як показали дослідження, струм стоку залежить від номера освітлюваного пазу, що співпадає з висновками роботи [59] по координатно–чутливих дослідженнях МОН структур. Параметрами МОН–фототранзистора у процесі експлуатації можна регулювати потенціалом затвору кількістю освітлюваних пазів і інтенсивністю освітлення (рисунок 2.10 – 2.11). На рисунку 2.11 коефіцієнт fotocутливості $K_i = (p_i - p) / p$, де p_i і p – повна і рівноважна концентрація носіїв у каналі.

Використовуючи відому спектральну чутливість приладу, його можна також застосовувати як оптичний компаратор для порівняння спектрального складу вхідних оптичних сигналів однакової інтенсивності.

Коли напруга на затворі МОН–транзистора нижча порогової, і границя з окисом знаходиться в умовах слабкої інверсії, то прилад працює в підпороговій області і струм стоку називається підпороговим струмом [60]. Передпороговий режим роботи для МОН–транзистора особливо важливий при використанні їх в низьковольтних напівпровідникових приладах з малим енергоспоживанням, і в цьому ж режимі польова структура характеризується найбільшою відносною fotocутливістю.

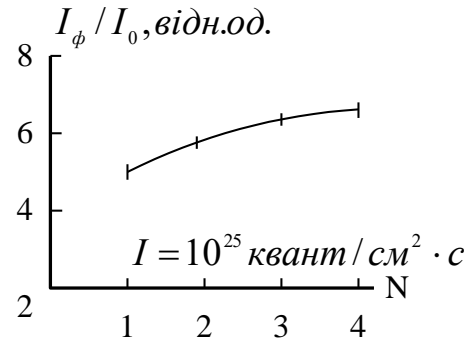


Рисунок 2.9 – Залежність відношення фотоструму до темного струму від кількості освітлювальних пазів N

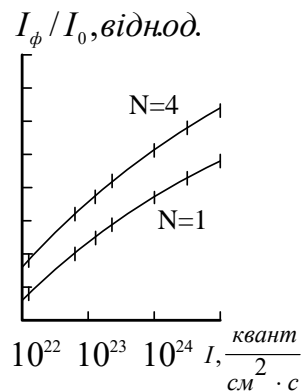


Рисунок 2.10 – Залежність відносного струму від інтенсивності випромінювання і кількості освітлюваних пазів

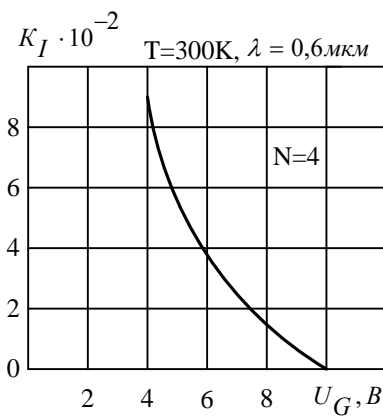


Рисунок 2.11 – Залежність коефіцієнта фоточутливості від напруги на затворі

При слабкій інверсії для струму каналу основною компонентою являється дифузійна складова [60]. Розглянемо одномірне рівняння неперервності для n -

каналу, що записане в дифузійному наближенні з використанням загальноприйнятих позначень:

$$\frac{dn}{dt} = G_0 - \frac{1}{q} \frac{dj_n}{dx} - \frac{n-n_0}{\tau_n}, \quad (2.63)$$

$$j_n = -qD_n \frac{dn}{dx}, \quad (2.64)$$

де G_0 – темп фотогенерації при стаціонарному освітленні.

Для розв'язання системи рівнянь (2.63), (2.64) граничні умови при відсутності постійного зміщення на стоці можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned} n(0) &= n_0 \exp[\beta(\psi_s + \xi_B)], \\ n(L) &= n_0 \exp[\beta(\psi_s + \xi_c)], \end{aligned} \quad (2.65)$$

де $\beta = q/kT$; ξ_A, ξ_c – величини фото-ЕРС на р-п переходах витоку та стоку відповідно; L – довжина каналу; ψ_s – поверхневий потенціал, який пов'язаний з напругою на затворі U_z (в фотогальванічному режимі рівному ξ_A) і ефективним рівнем фотогенерації $\xi = \Delta n/n_i = \Delta p/n_i$ наступним співвідношенням:

$$U_z - U_{fb} = \psi_s + \frac{\varepsilon_s \varepsilon_0 \phi_s}{\beta C_0 L_{Di}^* |\varphi_s|} F(\phi_s, \phi_F^*), \quad (2.66)$$

де $\phi_s = \beta \psi_s$; $\phi_F^* = [\ln(\xi + e^{\phi_F}) - \ln(\xi + e^{-\phi_F})]/2$; $L_{Di}^* = \left(\frac{\varepsilon_s \varepsilon_0 kT}{2q^2 n_i^*} \right)^{1/2}$;

$n_i^* = n_i \exp\left\{ \left[\ln(\xi + e^{\phi_F}) + \ln(\xi + e^{-\phi_F}) \right] / 2 \right\}$;

ϕ_F – потенціал Фермі; U_{fb} – потенціал плоских зон; L_{Di}^* – ефективне значення дебаївського радіуса екранування; C_0 – питома ємність діелектрика; n_i – концентрація носіїв у власному напівпровіднику; $\varepsilon_s, \varepsilon_0$ – діелектрична проникність напівпровідника і вакуума відповідно.

В режимі слабкої інверсії справедливе наближення:

$$F(\phi_s, \phi_F^*) \approx \sqrt{(\phi_s - 1)e^{\phi_F^*}}. \quad (2.67)$$

Підставляючи вираз (2.67) в (2.66), отримуємо вираз для ψ_s :

$$\psi_s = U_3 - U_{fb} + \sqrt{\frac{\varepsilon_s \varepsilon_0}{\beta^2 C_0 L_{Di}^*} (\beta U_3 - 1) \exp\left(\frac{\phi_F^*}{2}\right)}. \quad (2.68)$$

Представляючи нерівноважну концентрацію дірок у вигляді суми $n = n_0 + n_1 \exp(j\omega t)$, переходимо до системи рівнянь для змінної складової в режимі малого сигналу:

$$\frac{d^2 n_1}{dx^2} - \frac{n_1}{l_n} = 0, \quad (2.69)$$

$$j_{n1} = -qD_n \frac{dn_1}{dx}, \quad (2.70)$$

де $l_n = L_n / (1 + j\omega\tau_n)^{1/2}$; L_n – дифузійна довжина електрона.

Використаємо вираз $u = U_0 + u_1 \exp(j\omega t)$, тоді (враховуючи, що $u_1 < kT/q$) граничні умови перетворяться наступним чином

$$\begin{aligned} n_1(0) &= \beta u_1 n_{p0} \exp[\beta(\psi_s + \xi_B)], \\ n_1(L) &= \beta u_1 n_{p0} \exp[\beta(\psi_s + \xi_C)]. \end{aligned} \quad (2.71)$$

Рішення рівняння (2.69) з граничними умовами (2.71) знаходиться наступним чином

$$n_1(x) = Ae^{-x/l_n} + Be^{x/l_n} \quad (2.72)$$

де A і B – константи, які визначаються з граничних умов. Підстановка (2.71) в (2.72) призводить до таких співвідношень

$$\begin{aligned}
 A &= \beta u_1 n_{p0} \exp[\beta(\psi_s + \xi_B)] \left[1 - \frac{\exp \beta(\xi_C - \xi_B) - \exp(-L/l_n)}{2 \operatorname{sh}(L/l_n)} \right], \\
 B &= \beta u_1 n_{p0} \exp[\beta(\psi_s + \xi_B)] \left[\frac{\exp \beta(\xi_C - \xi_B) - \exp(-L/l_n)}{2 \operatorname{sh}(L/l_n)} \right],
 \end{aligned} \tag{2.73}$$

звідки отримуємо

$$\begin{aligned}
 n_1(x) &= \beta u_1 n_{p0} \exp[\beta(\psi_s + \xi_B)] \times \\
 &\times \left[\left(\frac{\exp \beta(\xi_C - \xi_B) - \exp(-L/l_n)}{2 \operatorname{sh}(L/l_n)} \right) \operatorname{sh}\left(\frac{x}{l_n}\right) + \exp\left(-\frac{x}{l_n}\right) \right].
 \end{aligned} \tag{2.74}$$

Підставляючи (2.74) в (2.70), маємо

$$\begin{aligned}
 j_{n1} &= -q D_n \frac{u_1}{l_n} \beta n_0 \exp[\beta(\psi_s + \xi_B)] \times \\
 &\times \left[\left(\exp \beta(\xi_C - \xi_B) - \exp(-L/l_n) \right) \operatorname{cth}\left(\frac{L}{l_n}\right) - e^{-L/l_n} \right].
 \end{aligned} \tag{2.75}$$

Імпеданс каналу визначається наступним виразом

$$\begin{aligned}
 Z_k &= \frac{u_1}{(A_0 j_{n1})} = \frac{2 l_n \beta}{a_T C_0 \mu_n Z} \left(\frac{N_D}{n_i} \right) \sqrt{\beta \psi_s} \exp[-\beta(\xi_C + \xi_B)] \times \\
 &\times \left[\left(\exp \beta(\xi_C - \xi_B) - \exp(-L/l_n) \right) \operatorname{cth}\left(\frac{L}{l_n}\right) - \exp(-L/l_n) \right]^{-1}.
 \end{aligned} \tag{2.76}$$

Тут $A_0 = -\frac{Z}{\beta} \left(\frac{\varepsilon_s}{2q N_D \psi_s} \right)^{1/2}$ – ефективна поперечна площа каналу;
 $a_T = \sqrt{2\varepsilon_s} / (L_D C_0)$ – безрозмірний параметр, який характеризує МОН–структуру;
 N_D – концентрація донорної домішки; Z – ширина каналу; μ_n – рухливість носіїв (електронів) в каналі; L_D – дебаївський радіус екранування.

Виділяючи дійсну та уявну частини виразу (2.76), отримуємо остаточні співвідношення для активної і реактивної компонент імпедансу каналу МОН–транзистора:

$$R = F_k \sqrt{\beta \psi_s} \exp[-\beta(\psi_s + \xi_B)] \left[\frac{Ma - Nb}{(a^2 + b^2)(M^2 + N^2)} \right], \tag{2.77}$$

$$X = -F_k \sqrt{\beta \psi_s} \exp[-\beta(\psi_s + \xi_B)] \left[\frac{Na + Mb}{(a^2 + b^2)(M^2 + N^2)} \right], \tag{2.78}$$

$$\text{де } F_k = \frac{2L_n\beta}{a_T C_0 \mu_n Z} \left(\frac{N_D}{n_i} \right)^2, \quad a = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\sqrt{1 + \omega^2 \tau_n^2} + 1 \right)^{1/2}, \quad b = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\sqrt{1 + \omega^2 \tau_n^2} - 1 \right)^{1/2},$$

$$M = m \left[C_k - e^{\beta(\xi_c - \xi_g)} \right] - n D_k + C_k, \quad N = n \left[C_k - e^{\beta(\xi_c - \xi_g)} \right] + m D_k + D_k,$$

$$m = \left[sh(2aL / L_n) \right] / \left\{ 2 \left[sh^2(aL / L_n) + \cos^2(bL / L_n) \right] \right\},$$

$$n = \left[\sin(2bL / L_n) \right] / \left\{ 2 \left[sh^2(aL / L_n) + \cos^2(bL / L_n) \right] \right\},$$

$$C_k = \exp(-aL / L_n) \cos(-bL / L_n), \quad D_k = \exp(-aL / L_n) \sin(-bL / L_n).$$

В області низьких частот при $\omega\tau_n \ll 1$ ($a=1, b=\omega\tau_n/2 \ll 1$) величини $R_{HЧ}$ і $X_{HЧ}$ визначаються рівностями:

$$R_{HЧ} = \frac{F_k \sqrt{\beta\psi_s} \exp[-\beta(\psi_s + \xi_g)]}{th(L / L_n) \left\{ \exp(-L / L_n) - \exp[\beta(\xi_c - \xi_g)] \right\} + \exp(-L / L_n)}, \quad (2.79)$$

$$X_{HЧ} = -F_k \sqrt{\beta\psi_s} \exp[-\beta(\psi_s + \xi_B)]. \quad (2.80)$$

В області високих частот при $\omega\tau_n \gg 1$ маємо $a=b=\sqrt{\omega\tau_n/2} \gg 1$ і $aL / L_n = bL / L_n \gg 1$. Остання рівність для довгих каналів виконується завжди, а для коротких – починаючи з деяких значень частоти, при яких довжина дифузії неосновних носіїв заряду за півперіод сигналу становиться менше довжини каналу (тобто, при $L_n \ll L\sqrt{\omega\tau_n/2}$). В цьому випадку рівняння (2.77) і (2.78) набуде вигляду:

$$R_{вч} = F_k \sqrt{\frac{2\beta\psi_s}{\omega\tau_n}} \frac{[\sin(\omega\tau_n) - sh(\omega\tau_n)] [sh^2(\omega\tau_n/2) + \cos^2(\omega\tau_n/2)]}{\exp[\beta(\psi_s + \xi_c)] [\sin^2(\omega\tau_n) + sh^2(\omega\tau_n)]}, \quad (2.81)$$

$$X_{вч} = F_k \sqrt{\frac{2\beta\psi_s}{\omega\tau_n}} \frac{[\sin(\omega\tau_n) + sh(\omega\tau_n)] [sh^2(\omega\tau_n/2) + \cos^2(\omega\tau_n/2)]}{\exp[\beta(\psi_s + \xi_c)] [\sin^2(\omega\tau_n) + sh^2(\omega\tau_n)]}. \quad (2.82)$$

Повна модель фотореактивного МОН–транзистора потребує також врахування впливу малосигнальних параметрів активної зони кристалу, фотодіодних структур витоку і стоку, а також паразитних параметрів корпусу.

На рисунку 2.12 представлена еквівалентна схема даного пристрою, в якій використані наступні позначення: L_C, L_3, L_G – індуктивності виводів кристалу;

$R_{s(c)}$ – фотозалежний опір р–п переходу витік (стік) – підкладка; $C_{s(c)}$ – фотоємність витоку (стоку), решта позначень традиційні [148] та наведена в додатку Е.

Оскільки залежність малосигнальної провідності фотодіода аналогічна відомому виразу для звичайного р–п переходу, то параметри освітлених областей витоку і стоку можна апроксимувати наступним чином:

$$R_{s(c)} = \frac{a}{\beta I_{\phi}^{s(c)} (a^2 + b^2)}, \quad (2.83)$$

$$C_{s(c)} = S_{s(c)} \sqrt{\frac{q \varepsilon_s \varepsilon_0 N_A}{2 [\phi_k - \xi_{s(c)}]} + \beta I_{\phi}^{s(c)} (a^2 + b^2)} / \omega b, \quad (2.84)$$

де ϕ_k – контактна різниця потенціалів; $S_{s(c)}$ – площа р–п переходу витоку (стоку); N_A – концентрація акцепторної домішки; R – коефіцієнт відбивання оптичного випромінювання; $I_{\phi}^{s(c)} = q(1-R)\eta P_{sun}/h\nu$ – фотострум на витоці (стоці); η – квантовий вихід; $h\nu$ – енергія кванта світлового потоку; P_{sun} – потужність випромінювання.

На рисунку 2.13 показані теоретичні залежності активної і реактивної компонент імпедансу фотореактивного МОН–транзистора від густини світлового потоку і напруги на затворі при параметричній зміні частоти змінного сигналу.

Рівняння (2.83) і (2.84) записані для випадку, коли постійне зміщення на структурі витік–стік відсутнє. Справа в тім, що прикладання тягучого поля до легованих областей МОН–транзистора різко знижує ефективне значення перестройки еквівалентної реактивності за рахунок ефекту збільшення вільних носіїв. Кількісну оцінку цього явища можна отримати, вводячи в граничні умови (2.65) і вирази (2.83) і (2.84) відповідні різниці потенціалів.

В якості вихідних даних використані параметри транзистора типу КП301, який виготовлений по планарно–епітаксіальній технології (табл. 2.1).

Розрахунок вхідного імпедансу еквівалентної схеми, що представлена на рисунку 2.11, виконувався на основі розв'язку рівнянь контурних струмів методом Гауса з використанням персонального комп'ютера.

Таким чином, отримавши залежність імпедансу каналу МОН–фототранзистора від потужності світлового потоку, можна визначити еквівалентну схему МОН–фототранзистора, параметри якої залежать від

оптичного випромінювання. Це буде враховано в подальшому розгляді еквівалентної схеми фоточутливого перетворювача.

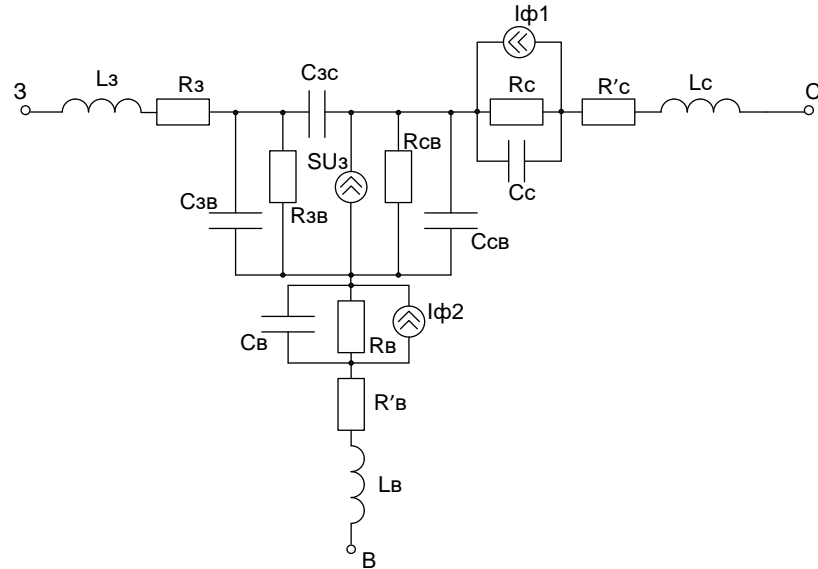
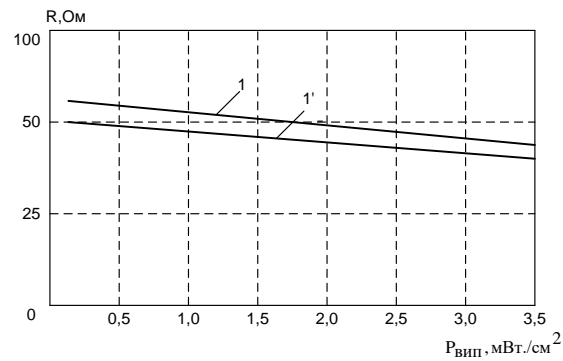
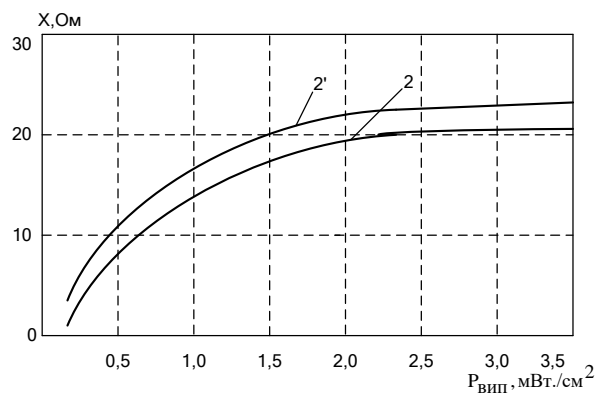


Рисунок 2.12 – Еквівалентна схема фотореактивного МОН–транзистора



а)



б)

Рисунок 2.13 – Теоретичні залежності активної (а) і реактивної (б) компонент імпедансу МОН–транзистора від потужності світлового потоку і напруги на затворі ($U_3 = 0$: 1 – 100 МГц; 2 – 900 МГц, $U_3 = 5В$: 1' – 100 МГц; 2' – 900 МГц)

Таблиця 2.1 – Параметри напівпровідникової структури, що використовується при розрахунку імпедансу фотореактивного МОН–транзистора

Найменування параметра, од. вимірювання	Значення
Довжина каналу L , м	$3 \cdot 10^{-6}$
Ширина каналу z , м	$2 \cdot 10^{-3}$
Концентрація акцепторної домішки N_A , cm^{-3}	$1 \cdot 10^{24}$
Концентрація донорної домішки N_D , cm^{-3}	$3 \cdot 10^{21}$
Рухливість носіїв в каналі $\mu_n, \text{cm}^2 / \text{Vs}$	0,14
Дифузійна довжина електрона L_n , м	$1.8 \cdot 10^{-4}$
Коефіцієнт поглинання оптичного випромінювання α, cm^{-1}	$6 \cdot 10^6$
Товщина підзатворного діелектрика d , м	$0,24 \cdot 10^{-6}$
Час життя неосновних носіїв заряду τ_n , с	$1 \cdot 10^{-5}$
Відносна діелектрична проникність напівпровідника (Si), ϵ_S	12
Відносна діелектрична проникність діелектрика (SiO_2) ϵ_{SiO_2}	4
Власна концентрація носіїв n_i, cm^{-3}	$1,6 \cdot 10^{16}$

2.4 Висновки до розділу

1. Розглянуто математичні моделі фотодіода, сонячного елемента, які відрізняються від існуючих тим, що враховано вплив оптичного випромінювання на повний опір базової області діода, що дає можливість отримати залежність його складових від потужності оптичного випромінювання.

2. Розглянуто математичну модель фоточутливого МОН–транзистора, яка відрізняється від існуючих тим, що вона враховує зміну електрофізичних параметрів (концентрації носіїв заряду в каналі транзистора, імпедансу каналу) приладу від потужності оптичного випромінювання, яке діє як зі сторони затвору, так і зі сторони каналу, внаслідок чого збільшується квантова ефективність, що приводить до підвищення чутливості.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИХ ПАРАМЕТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

3.1 Визначення функції перетворення та рівняння чутливості вимірювального каналу приладу на основі оптичного перетворювача з біполярним, МОН–транзистором та з сонячною батареєю

Для подальшого розширення робочого діапазону, підвищення чутливості і надійності роботи фоточутливого приладу, а також для ефективного вирішення проблеми дистанційного вимірювання потужності оптичного випромінювання пропонується прилад [76], схема якого показана на рисунку 3.1., та наведена в додатку Ж.

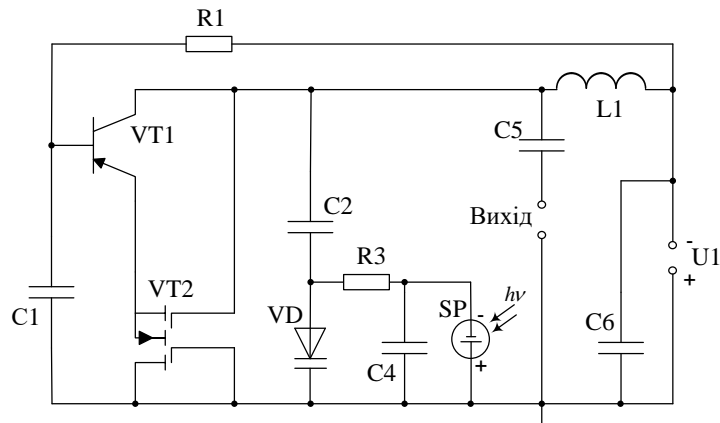


Рисунок 3.1 – Електрична схема приладу на основі біполярного транзистора та двозатворного МОН–транзистора з сонячною батареєю

Принцип дії приладу на основі оптичного перетворювача ґрунтується на зміні оптичної потужності, що приймається сонячною батареєю SP. Таким чином змінюється вихідна напруга на сонячній батареї, яка призводить до зміни ємності варикапа VD, що в свою чергу змінює ємнісну складову повного опору на електродах стік–колектор двозатворного МОН–транзистора VT2 і біполярного транзистора VT1, а це викликає ефективну зміну резонансної частоти коливального контуру, який утворений паралельним включенням повного опору з ємнісним характером на електродах стік–колектор та пасивної індуктивності L1.

В приладі на рисунку 3.1 сонячна батарея є чутливим елементом, який перетворює сонячну енергію в електричну енергію. Однак можливий інший варіант конструкторсько–технологічного рішення реалізації приладу для

вимірювання оптичної потужності з використанням сонячної батареї в якості альтернативного автономного джерела живлення оптичного перетворювача [54]. Адже на сьогоднішній день енергетичні ресурси землі підходять до свого закінчення. Тому необхідно здійснювати пошук нових принципів реалізації приладів, що відрізняються багатofункціональністю, малим споживанням енергії, високою чутливістю тощо. Прилад на основі оптичного перетворювача з автономним живленням на основі сонячної батареї дозволяє ефективно виконати ті умови, які диктує сьогоднішня ситуація в світі. Тому що при такій реалізації виникає можливість одночасного вимірювання потужності оптичного випромінювання і живлення приладу на основі оптичного перетворювача за допомогою сонячної батареї.

Але існує певний недолік, а саме: при використанні сонячної батареї як джерела живлення в перетворювачі на основі біполярного та двозатворного МОН–транзистора можливо вимірювати оптичну потужність, починаючи з певного мінімального значення, при якому спрацьовує перетворювач, а не з нульового значення оптичної потужності, як це виконується в приладі, зображеному на рисунку 3.1. Таким чином, на основі вищесказаного для досліджень обрано прилад на основі біполярного транзистора та двохзатворного МОН–транзистора з сонячною батареєю в якості чутливого елемента.

Для визначення основних параметрів, що характеризують роботу приладу на основі оптичного перетворювача (рисунок 3.1), необхідно розрахувати повний опір на електродах стік–колектор транзистора VT2 і VT1 згідно з еквівалентною схемою приладу для змінного струму (рисунок 3.2). Для проведення розрахунків схему на рисунку 3.2 перетворено у зручнішу (рисунок 3.3).

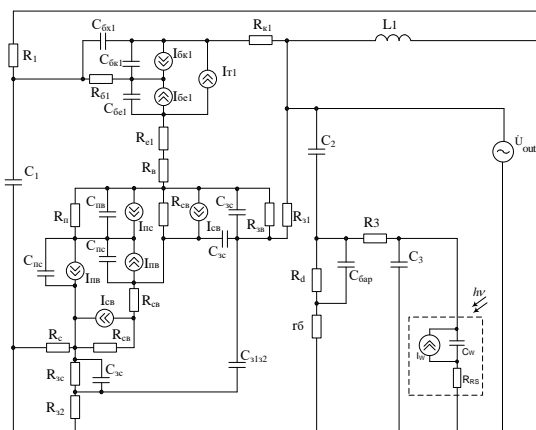


Рисунок 3.2 – Еквівалентна схема приладу з сонячною батареєю по змінному струму

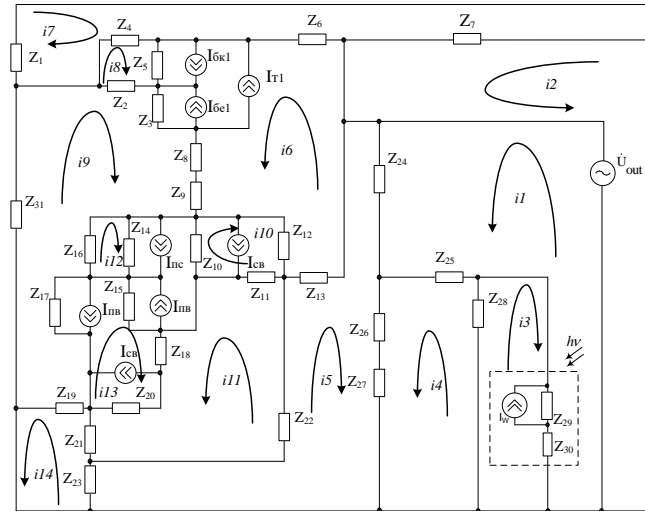


Рисунок 3.3 – Перетворена еквівалентна схема приладу з сонячною батареєю

В еквівалентній схемі на рисунку 3.2 використано наступні позначення: де R_1 – опір резистора R_1 на схемі рисунок 3.2; $R_{\delta 1}$, $R_{\kappa 1}$, R_{e1} – об’ємний опір бази, колектора і емітера біполярного транзистора $VT1$ відповідно; R_g , R_c , R_{s1} та R_{s2} – об’ємні опори витоку, стоку та першого і другого затворів двозатворного МОН–транзистора $VT2$ відповідно; R_n – опір підкладки МОН–транзистора $VT2$; R_{ce} – об’ємний опір стік–витік транзистора $VT2$; R_{ze} – об’ємний опір затвор–витік транзистора $VT2$; R_{s1} – об’ємний опір затвору транзистора $VT2$; R_c – опір р–п переходу стоку транзистора $VT2$; R_{zc} – опір затвор–стік транзистора $VT2$; C_1 , C_2 , C_3 – ємності конденсаторів C_1 , C_2 та C_3 на схемі рисунок 3.24; C_w – ємність сонячної батареї; $C_{\delta\kappa 1}$, $C_{\delta e1}$ – ємність переходу база–колектор та база–емітер транзистора $VT1$ відповідно; $C_{\delta\kappa 1}$ – ємність між зовнішнім виводом бази і колектора біполярного транзистора $VT1$; C_{nb} – ємність підкладка–витік МОН–транзистора $VT2$; C_{nc} – ємності підкладка–стік транзистора $VT2$; C_{zc} – ємності затвор–стік МОН–транзистора $VT2$; C_{ze} – ємність затвор–витік транзистора $VT2$; C_{s1s2} – ємність між першим і другим затвором транзистора $VT2$; $C_{\text{бар}}$ – бар’єрна ємність р–п переходу варікапа VD ; R_d – опір р–п переходу варікапа VD ; r_d – омичний опір бази варікапа VD ; R_{RS} – опір сонячної батареї; R_3 – опір резистора R_3 на схемі рисунку 3.2.

Для визначення функції перетворення необхідно знайти залежність частоти генерації від величини потужності оптичного випромінювання.

Система рівнянь Кірхгофа, складена на основі еквівалентної схеми (рисунок 3.3), має вигляд

$$\begin{cases}
 \dot{U}_{out} = (Z_{24} + Z_{25} + Z_{29} + Z_{30})i_1 + Z_{24}i_5 - Z_{25}i_4 + (Z_{29} + Z_{30})i_3 + Z_{29}^2 w, \\
 \dot{U}_{out} = Z_7 i_2 + Z_7 i_7, \\
 0 = (Z_{28} + Z_{29} + Z_{30})^3_3 + Z_{28}i_4 + (Z_{29} + Z_{30})i_1 + Z_{29}^2 w, \\
 0 = (Z_{26} + Z_{27} + Z_{28} + Z_{25})^3_4 + (Z_{26} + Z_{27})i_5 - Z_{25}i_1 + Z_{28}^3_3, \\
 0 = (Z_{23} + Z_{22} + Z_{13} + Z_{24} + Z_{26} + Z_{27})^3_5 + Z_{23}i_{14} + Z_{22}^3_{11} + Z_{13}i_6 + Z_{24}i_1 + \\
 + (Z_{26} + Z_{27})^3_4, \\
 0 = (Z_6 + Z_5 + Z_3 + Z_8 + Z_9 + Z_{12} + Z_{13})^3_6 + Z_6^3_7 + Z_5^3_8 + \\
 + (Z_5 + Z_3)(I_{\dot{a}\dot{a}1} - I_{\dot{a}\dot{e}1} + I_{\dot{o}1}) + Z_3^3_9 + (Z_8 + Z_9)^3_9 + Z_{12}^3_{10} - Z_{12}I_{\dot{n}\dot{a}} + Z_{13}^3_5, \\
 0 = (Z_1 + Z_7 + Z_6 + Z_4)^3_7 + Z_7^3_2 + Z_6^3_6 - Z_4^3_8, \\
 0 = (Z_4 + Z_5 + Z_2)^3_8 - Z_4^3_7 + Z_5^3_6 + Z_5(I_{\dot{a}\dot{a}1} - I_{\dot{a}\dot{e}1} + I_{\dot{o}1}) - Z_2^3_9, \\
 0 = (Z_2 + Z_3 + Z_8 + Z_9 + Z_{16} + Z_{17} + Z_{19} + Z_{31})^3_9 - Z_2^3_8 + Z_3^3_6 + \\
 + Z_3(I_{\dot{a}\dot{a}1} - I_{\dot{a}\dot{e}1} + I_{\dot{o}1}) + (Z_8 + Z_9)^3_6 - Z_{16}^3_{12} - Z_{17}I_{\dot{r}\dot{a}} - Z_{17}^3_{13} + Z_{19}^3_{14}, \\
 0 = (Z_{10} + Z_{12} + Z_{11})^3_{10} + (Z_{10} - Z_{12} - Z_{11})I_{\dot{n}\dot{a}} + (Z_{10} + Z_{11})^3_{11} + Z_{12}^3_6, \\
 0 = (Z_{10} + Z_{14} + Z_{15} + Z_{18} + Z_{20} + Z_{21} + Z_{22} + Z_{11})^3_{11} + (Z_{10} + Z_{11})^3_{10} + \\
 + (Z_{10} - Z_{11})I_{\dot{n}\dot{a}} + Z_{14}^3_{12} + (Z_{15} + Z_{18} + Z_{20})^3_{13} + (Z_{14} + Z_{15})(I_{\dot{r}\dot{a}} - I_{\dot{r}\dot{n}}) - \\
 - Z_{20}I_{\dot{n}\dot{a}} - Z_{21}^3_{14} + Z_{22}^3_5, \\
 0 = (Z_{14} + Z_{16})^3_{12} + Z_{14}^3_{11} + Z_{14}(I_{\dot{r}\dot{a}} - I_{\dot{r}\dot{n}}) - Z_{16}^3_9, \\
 0 = (Z_{15} + Z_{18} + Z_{20} + Z_{17})^3_{13} + (Z_{15} + Z_{18} + Z_{20})^3_{11} + Z_{15}(I_{\dot{r}\dot{a}} - I_{\dot{r}\dot{n}}) - \\
 - Z_{20}I_{\dot{n}\dot{a}} + Z_{17}I_{\dot{r}\dot{a}} - Z_{17}^3_9, \\
 0 = (Z_{19} + Z_{23} + Z_{21})^3_{14} + Z_{19}^3_9 - Z_{21}^3_{11} + Z_{23}^3_5,
 \end{cases} \quad (3.1)$$

де $Z_1 = R_1$; $Z_2 = R_{\dot{a}1}$; $Z_3 = -j / (\omega C_{\dot{a}\dot{a}1})$; $Z_4 = -j / (\omega C_{\dot{a}\dot{o}1})$; $Z_6 = R_{\dot{e}1}$; $Z_7 = j\omega L_1$;

$Z_5 = -j / (\omega C_{\dot{a}\dot{e}1})$; $Z_8 = R_{\dot{e}1}$; $Z_9 = R_{\dot{a}}$; $Z_{10} = R_{\dot{c}\dot{a}}$; $Z_{11} = -j / (\omega C_{\dot{c}\dot{n}})$; $Z_{13} = R_{\dot{r}1}$; $Z_{16} = R_n$;

$Z_{12} = \frac{R_{\dot{c}\dot{a}}}{1 + \omega^2 R_{\dot{c}\dot{a}}^2 C_{\dot{c}\dot{n}}^2} - j \frac{\omega R_{\dot{c}\dot{a}}^2 C_{\dot{c}\dot{n}}}{1 + \omega^2 R_{\dot{c}\dot{a}}^2 C_{\dot{c}\dot{n}}^2}$; $Z_{14} = -j \frac{1}{\omega C_{\dot{r}\dot{a}}}$; $Z_{15} = -j \frac{1}{\omega C_{\dot{r}\dot{n}}}$; $Z_{18} = R_{\dot{n}\dot{a}}$;

$Z_{17} = -j / (\omega C_{\dot{r}\dot{n}})$; $Z_{19} = R_c$; $Z_{20} = R_{\dot{n}\dot{a}}$; $Z_{23} = R_{\dot{r}2}$; $Z_{22} = -j / (\omega C_{\dot{c}1\dot{c}2})$; $Z_{25} = R_3$;

$Z_{21} = \frac{R_{\dot{c}\dot{n}}}{1 + \omega^2 R_{\dot{c}\dot{n}}^2 C_{\dot{c}\dot{n}}^2} - j \frac{\omega R_{\dot{c}\dot{n}}^2 C_{\dot{c}\dot{n}}}{1 + \omega^2 R_{\dot{c}\dot{n}}^2 C_{\dot{c}\dot{n}}^2}$; $Z_{24} = -j / (\omega C_2)$; $Z_{27} = r_6$; $Z_{28} = -j / (\omega C_3)$;

$Z_{26} = \frac{R_d}{1 + \omega^2 R_d^2 C_{\dot{a}\dot{a}\dot{d}}^2} - j \frac{\omega R_d^2 C_{\dot{a}\dot{a}\dot{d}}}{1 + \omega^2 R_d^2 C_{\dot{a}\dot{a}\dot{d}}^2}$; $Z_{29} = -j / (\omega C_w)$; $Z_{30} = R_{RS}$; $Z_{31} = -j / (\omega C_1)$.

На основі системи рівнянь (3.1) за допомогою програмного пакету Matlab 9.3. розрахована активна та реактивна складові повного опору, теоретичні та

експериментальні залежності яких від потужності оптичного випромінювання показані на рисунку 3.4 та рисунку 3.5.

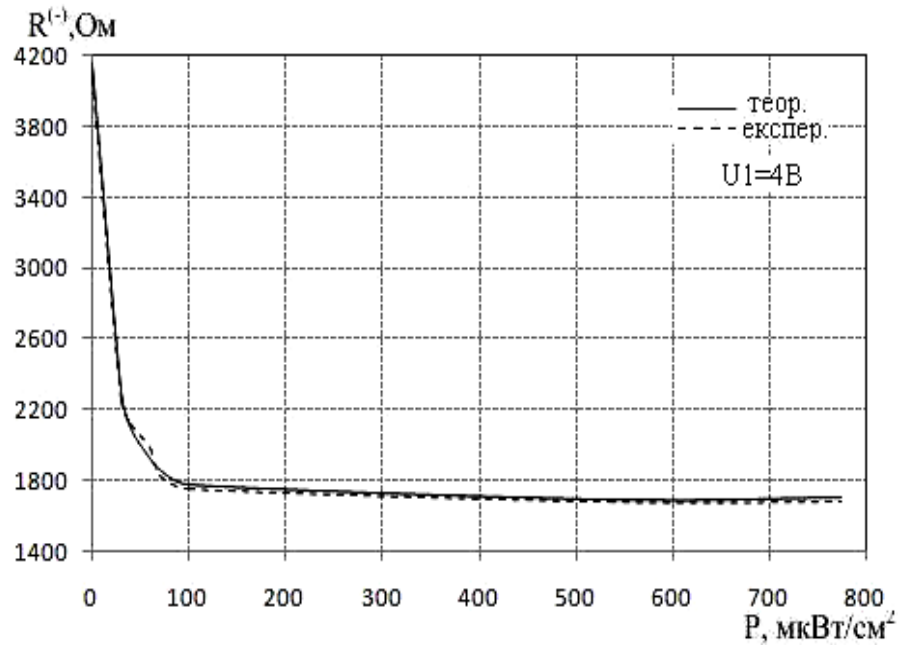


Рисунок 3.4 – Теоретична та експериментальна залежність активної складової повного опору від потужності оптичного випромінювання

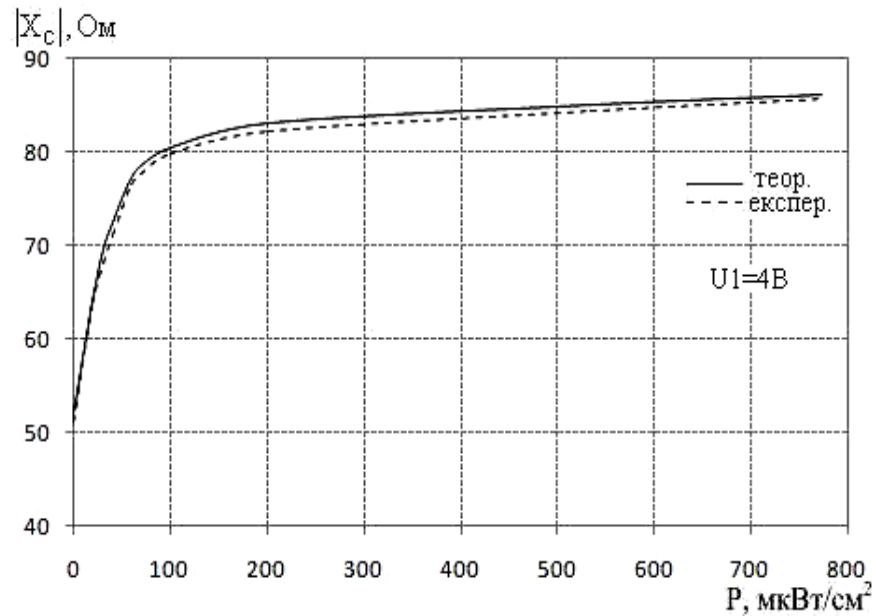


Рисунок 3.5 – Теоретична та експериментальна залежність реактивної складової повного опору від потужності оптичного випромінювання

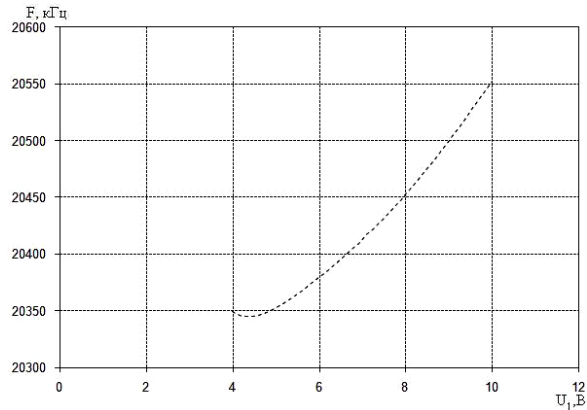


Рисунок 3.6 – Експериментальна залежність частоти генерації вимірювального каналу приладу з сонячною батареєю від напруги живлення

З рисунку 3.4 та рисунку 3.5 видно, що зі збільшенням оптичної потужності активна складова повного опору зменшується, а реактивна – збільшується.

На рисунку 3.6 подана експериментальна залежність частоти генерації оптичного перетворювача з сонячною батареєю від напруги живлення U_1 . З рисунка 3.6 видно, що в діапазоні напруги живлення від 4 до 10 В генератор стабільно генерує, тому режим роботи приладу на основі оптичного перетворювача слід обирати у даному діапазоні.

На рисунку 3.7 представлені результати досліджень сонячної батареї ($U=7,2$ В, $I=450$ мА). Як видно, в діапазоні зміни оптичної потужності від 0 до $774 \text{ мкВт}/\text{см}^2$ напруга на сонячній батареї змінюється в межах 0 – 6,4 В. Проведені дослідження впливу вихідної напруги сонячної батареї на частоту генерації вимірювального каналу приладу показали, що цей вплив відбувається по майже лінійному закону (рисунок 3.8).

Основною характеристикою вимірювального каналу приладу на основі перетворювача (рисунок 3.9) є функція перетворення, на основі якої мікроконтролерна вимірювальна система визначає значення оптичної потужності. Для визначення функції перетворення необхідно знайти залежність частоти генерації від потужності падаючого випромінювання.

На рисунку 3.9 подана експериментальна та теоретична залежність частоти генерації вимірювального каналу приладу з сонячною батареєю від зміни потужності оптичного випромінювання.

Як видно з рисунка 3.9, частота генерації збільшується зі збільшенням потужності оптичного випромінювання, а на ділянці від 0 до $80 \text{ мкВт}/\text{см}^2$ спостерігається більша крутість характеристики залежності частоти генерації

від зміни оптичної потужності, також з рисунок 3.9 видно, що експериментальні та теоретичні залежності мають добрий збіг.

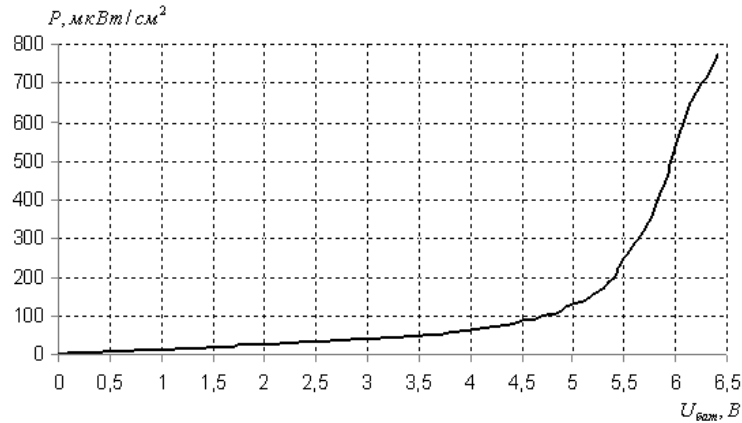


Рисунок 3.7 – Залежність вихідної напруги сонячної батареї від потужності оптичного випромінювання

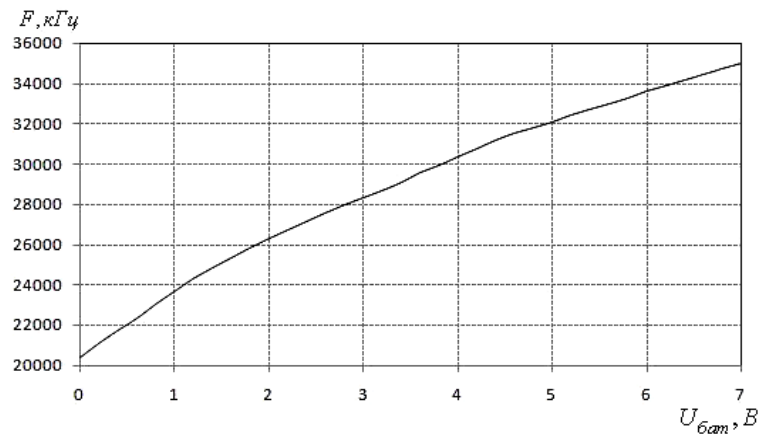


Рисунок 3.8 – Залежність частоти генерації вимірювального каналу приладу від вихідної напруги на сонячній батареї ($U_1 = 4В$)

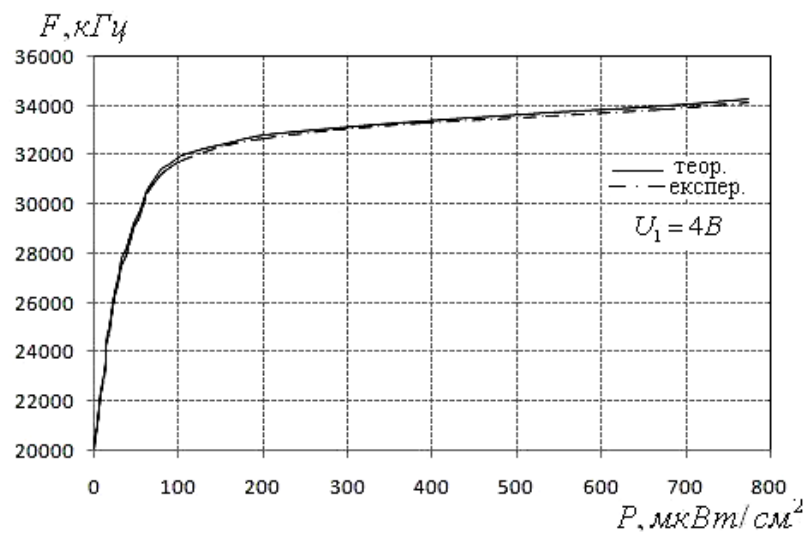


Рисунок 3.9 – Теоретична та експериментальна функція перетворення вимірювального каналу приладу

Залежність частоти генерації від потужності оптичного випромінювання визначається по контуру зворотного струму згідно еквівалентної схеми (рисунок 3.3) на основі теорії стійкості Ляпунова. Функція перетворення вимірювального каналу приладу на основі біполярного та двозатворного МОН-транзистора з сонячною батареєю описується виразом (3.2), а чутливість вимірювального каналу приладу – виразом (3.3):

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\sqrt{D} - (L_1 B - AR_d^2 C_{\bar{o}ap}^2(P) - BR_d^2 C_{\bar{o}ap}(P))}{2L_1 BR_d^2 C_{\bar{o}ap}^2(P)}}; \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} S_P^F = & \frac{1}{8} \sqrt{2} \left[\left\{ \frac{1}{2} (2D_1 \left(L_1 \left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{\bar{o}\kappa 1} C_{\bar{o}e1} C_{3c} C_{3132} - 2R_d^2 C_{\bar{o}ap}(P) A \left(\frac{\partial}{\partial P} C_{\bar{o}ap}(P) \right) - R_d^2 C_{\bar{o}ap}^2(P) \times \right. \right. \right. \\ & \times \left. \left(\left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{\bar{o}e1} C_{3c} C_{3132} + \left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{\bar{o}\kappa 1} C_{3c} C_{3132} + \left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{\bar{o}\kappa 1} C_{\bar{o}e1} C_{3132} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{\bar{o}\kappa 1} C_{\bar{o}e1} C_{3c} \right) - R_d^2 B \left(\frac{\partial}{\partial P} C_{\bar{o}ap}(P) \right) - R_d^2 C_{\bar{o}ap}(P) \left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{\bar{o}\kappa 1} C_{\bar{o}e1} C_{3c} C_{3132} \right) + \\ & + 4L_1 \left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{\bar{o}\kappa 1} C_{\bar{o}e1} C_{3c} C_{3132} R_d^2 C_{\bar{o}ap}^2(P) A + 8L_1 BR_d^2 C_{\bar{o}ap}(P) A \left(\frac{\partial}{\partial P} C_{\bar{o}ap}(P) \right) + 4L_1 BR_d^2 C_{\bar{o}ap}^2(P) \times \\ & \times \left(\left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{\bar{o}e1} C_{3c} C_{3132} + \left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{\bar{o}\kappa 1} C_{3c} C_{3132} + \left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{\bar{o}\kappa 1} C_{\bar{o}e1} C_{3132} + \right. \\ & \left. + \left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{\bar{o}\kappa 1} C_{\bar{o}e1} C_{3c} \right) \right] / \sqrt{D_2} - L_1 \left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{\bar{o}\kappa 1} C_{\bar{o}e1} C_{3c} C_{3132} + 2R_d^2 C_{\bar{o}ap}(P) A \left(\frac{\partial}{\partial P} C_{\bar{o}ap}(P) \right) + \\ & + R_d^2 C_{\bar{o}ap}^2(P) \left(\left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{\bar{o}e1} C_{3c} C_{3132} + \left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{\bar{o}\kappa 1} C_{3c} C_{3132} + \left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{\bar{o}\kappa 1} C_{\bar{o}e1} C_{3132} + \right. \\ & \left. + \left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{\bar{o}\kappa 1} C_{\bar{o}e1} C_{3c} \right) + R_d^2 B \left(\frac{\partial}{\partial P} C_{\bar{o}ap}(P) \right) + R_d^2 C_{\bar{o}ap}(P) \left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{\bar{o}\kappa 1} C_{\bar{o}e1} C_{3c} C_{3132} \Big/ \\ & / L_1 BR_d^2 C_{\bar{o}ap}^2(P) - (\sqrt{D_2} - D_1) \left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) / L_1 BC_w(P) R_d^2 C_{\bar{o}ap}^2(P) - \\ & - 2(\sqrt{D_2} - D_1) \left(\frac{\partial}{\partial P} C_{\bar{o}ap}(P) \right) / L_1 BR_d^2 C_{\bar{o}ap}^3(P) \Big/ \pi \sqrt{(\sqrt{D_2} - D_1) / L_1 BR_d^2 C_{\bar{o}ap}^2(P)}, \end{aligned} \quad (3.3)$$

де $B = C_{\bar{o}\kappa 1} C_{\bar{o}e1} C_{3c} C_w(P) C_{3132}$; $D = (L_1 B - AR_d^2 C_{\bar{o}ap}^2(P) - BR_d^2 C_{\bar{o}ap}(P))^2 + 4AL_1 BR_d^2 C_{\bar{o}ap}^2(P)$;

$A = C_{\bar{o}e1} C_{3c} C_w(P) C_{3132} + C_{\bar{o}\kappa 1} C_{3c} C_w(P) C_{3132} + C_{\bar{o}\kappa 1} C_{\bar{o}e1} C_w(P) C_{3132} +$
 $+ C_{\bar{o}\kappa 1} C_{\bar{o}e1} C_{3c} C_w(P) + C_{\bar{o}\kappa 1} C_{\bar{o}e1} C_{3c} C_{3132}$;

$D_1 = L_1 \hat{A} - R_d^2 \tilde{N}_{\hat{a}\hat{a}\hat{d}}^2(P) A - R_d^2 \tilde{N}_{\hat{a}\hat{a}\hat{d}}(P) B$; $D_2 = (L_1 B - R_d^2 C_{\bar{o}ap}^2(P) A - R_d^2 C_{\bar{o}ap}(P) B)^2 + 4L_1 BR_d^2 C_{\bar{o}ap}^2(P) A$.

Графік залежності чутливості від величини потужності оптичного випромінювання представлений на рисунку 3.10. З рисунка 3.10 видно, що зі зміною потужності оптичного випромінювання від 0 до 774 мкВт/см², чутливість змінюється від 320 до 7,6 кГц/мкВт/см².

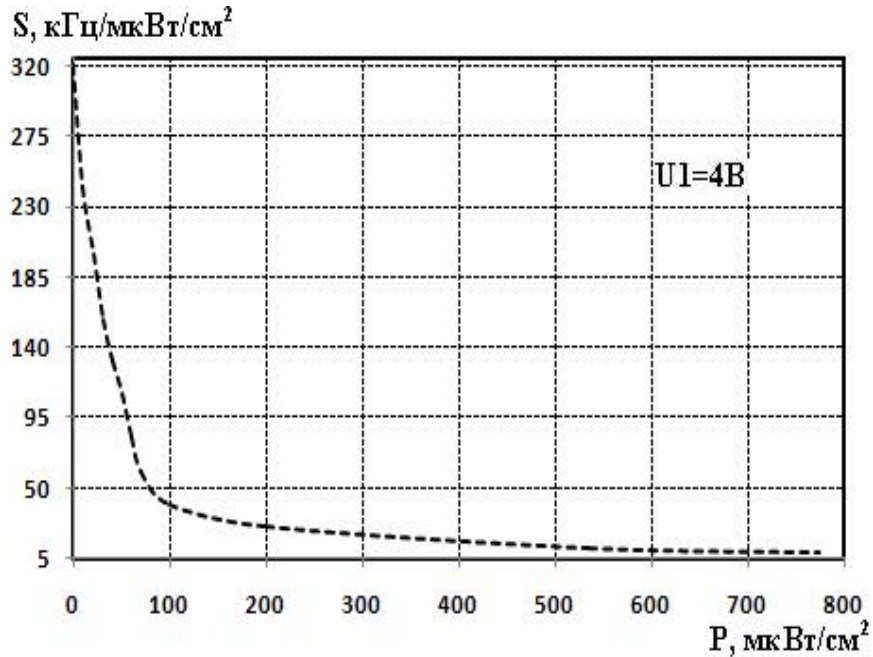


Рисунок 3.10 – Залежність чутливості вимірювального каналу приладу від зміни величини потужності оптичного випромінювання

Експериментальні дослідження проводились при напрузі живлення 4 В, при якій існує найменша зміна частоти генерації в діапазоні від 20⁰С до 80⁰С.

3.2 Визначення функції перетворення та рівняння чутливості вимірювального каналу приладу на основі оптичного перетворювача з МОН–транзистором з двостороннім освітленням каналу

Для подальшого підвищення чутливості до вимірювання оптичної потужності пропонується прилад, електрична схема якого показана на рисунку 3.11., та наведена в додатку К. Прилад на основі оптичного перетворювача містить біполярний транзистор та МОН–транзистор з двостороннім освітленням каналу, який є фоточутливим елементом. На електродах колектор–стік запропонованої структури існує від’ємний опір, що відповідає спадаючій ділянці на вольт–амперній характеристиці. Фоточутливий

прилад живиться від джерела постійної напруги U_1 (напруга живлення) і U_2 (напруга керування).

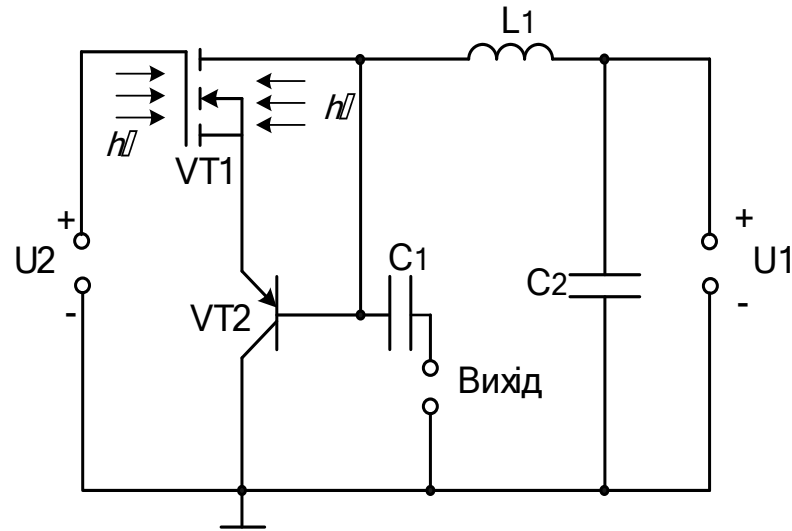


Рисунок 3.11 – Електрична схема приладу на основі біполярного та МОН–транзистора з двостороннім освітленням каналу [49, 62]

Для визначення основних параметрів, що характеризують роботу приладу на основі оптичного перетворювача (рисунок 3.11), необхідно розрахувати повний опір на електродах стік–колектор транзистора VT1 і VT2 згідно з еквівалентною схемою приладу для змінного струму (рисунок 3.12). Для проведення розрахунків схему на рисунок 3.12 перетворено у зручнішу (рисунок 3.13).

В еквівалентній схемі на рисунок 3.13 використані наступні позначення:

$$Z_1 = R'_c + j\omega L_c; \quad Z_2 = \frac{R_{c\hat{a}}}{1 + \omega^2 R_{c\hat{a}}^2 C_{c\hat{a}}^2} - j \frac{\omega R_{c\hat{a}}^2 C_{c\hat{a}}}{1 + \omega^2 R_{c\hat{a}}^2 C_{c\hat{a}}^2}; \quad Z_3 = -j / (\omega C_{c\hat{a}}); \quad Z_6 = R'_c + j\omega L_c; \quad Z_7 = j\omega L_1;$$

$$Z_9 = R'_a + j\omega L_a; \quad Z_4 = \frac{R_{c\hat{a}}}{1 + \omega^2 R_{c\hat{a}}^2 C_{c\hat{a}}^2} - j \frac{\omega R_{c\hat{a}}^2 C_{c\hat{a}}}{1 + \omega^2 R_{c\hat{a}}^2 C_{c\hat{a}}^2}; \quad Z_5 = \frac{R_c}{1 + \omega^2 R_c^2 C_c^2} - j \frac{\omega R_c^2 C_c}{1 + \omega^2 R_c^2 C_c^2};$$

$$Z_8 = \frac{R_{\hat{a}}}{1 + \omega^2 R_{\hat{a}}^2 C_{\hat{a}}^2} - j \frac{\omega R_{\hat{a}}^2 C_{\hat{a}}}{1 + \omega^2 R_{\hat{a}}^2 C_{\hat{a}}^2}; \quad Z_{10} = R'_a + j\omega L_a; \quad Z_{11} = R_a; \quad Z_{12} = \frac{R_{\hat{e}}}{1 + \omega^2 R_{\hat{e}}^2 C_{\hat{e}}^2} - j \frac{\omega R_{\hat{e}}^2 C_{\hat{e}}}{1 + \omega^2 R_{\hat{e}}^2 C_{\hat{e}}^2};$$

$$Z_{13} = R'_e + j\omega L_e; \quad Z_{15} = R'_e + j\omega L_e; \quad \alpha = \alpha_1 - j\alpha_2; \quad Z_{14} = \frac{R_e}{1 + \omega^2 R_e^2 C_e^2} - j \frac{\omega R_e^2 C_e}{1 + \omega^2 R_e^2 C_e^2}.$$

Для визначення функції перетворення необхідно знайти залежність частоти генерації від величини потужності оптичного випромінювання. Система рівнянь Кірхгофа, складена на основі еквівалентної схеми (рисунок 3.13), описується виразом (3.4).

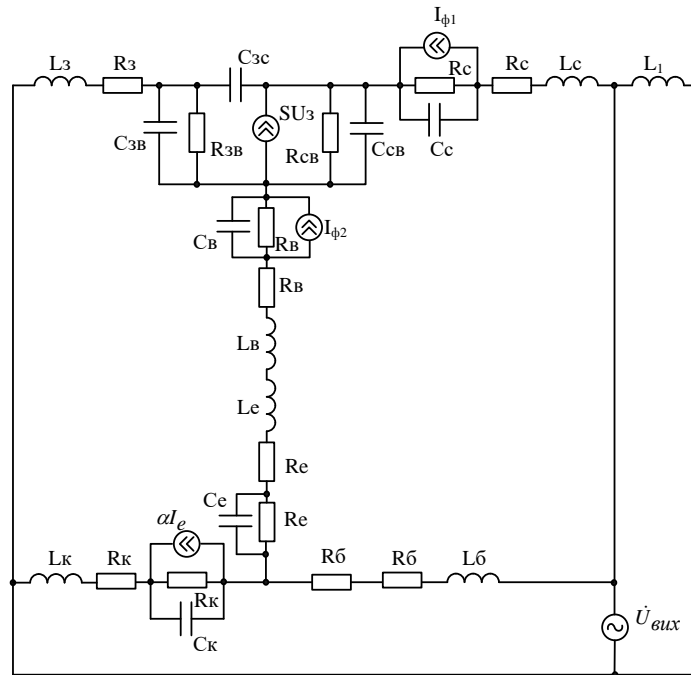


Рисунок 3.12 – Еквівалентна схема приладу на основі МОН–транзистора з двостороннім освітленням каналу по змінному струму

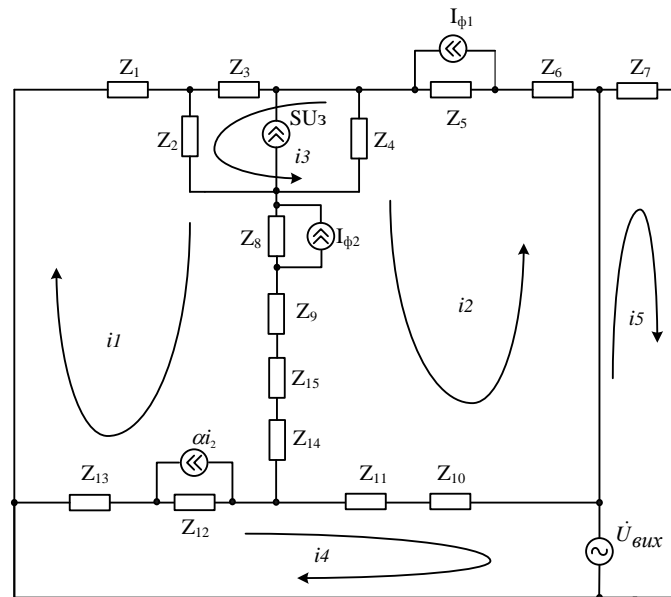


Рисунок 3.13 – Перетворена еквівалентна схема приладу на основі МОН–транзистора з двостороннім освітленням каналу

$$\begin{cases}
\dot{U}_{\dot{a}\dot{e}\dot{o}} = Z_7 i_5, \\
\dot{U}_{\dot{a}\dot{e}\dot{o}} = (Z_{13} + Z_{12} + Z_{11} + Z_{10}) i_4 + Z_{12} a i_2 - (Z_{13} + Z_{12}) i_1 + (Z_{10} + Z_{11}) i_2, \\
0 = (Z_4 + Z_8 + Z_9 + Z_{15} + Z_{14} + Z_{11} + Z_{10} + Z_6 + Z_5) i_2 + Z_8 I_{\delta 2} + \\
+ (Z_8 + Z_9 + Z_{14} + Z_{15}) i_1 + (Z_{10} + Z_{11}) i_4 + Z_4 S U_{\zeta} - Z_4 i_3 - Z_5 I_{\delta 1}, \\
0 = (Z_1 + Z_2 + Z_8 + Z_9 + Z_{15} + Z_{14} + Z_{12} + Z_{13}) i_1 + Z_2 i_3 + Z_2 S U_{\zeta} + Z_8 I_{\delta 2} + \\
(Z_8 + Z_9 + Z_{15} + Z_{14}) i_2 - Z_{12} a i_2 - (Z_{12} + Z_{13}) i_4, \\
0 = (Z_3 + Z_2 + Z_4) i_3 + Z_2 i_1 + (Z_3 + Z_2 - Z_4) S U_{\zeta} - Z_4 i_2,
\end{cases} \quad (3.4)$$

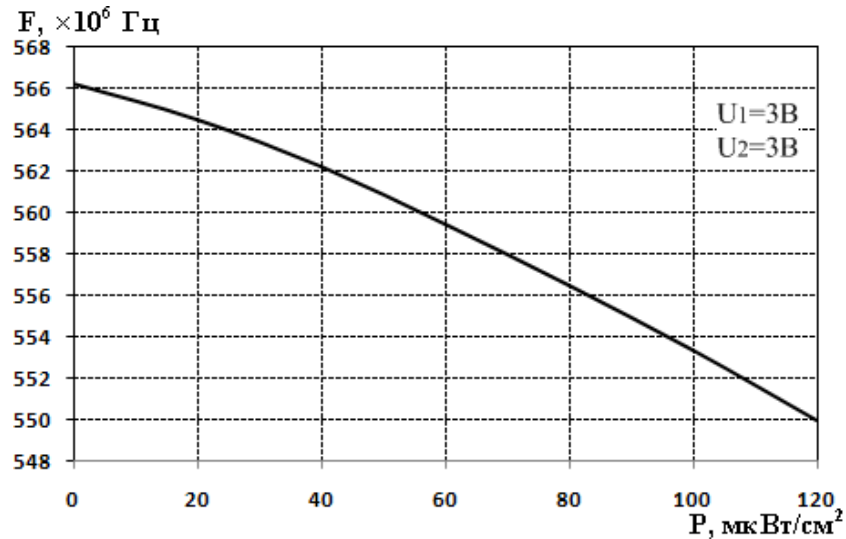
Функція перетворення вимірювального каналу приладу на основі біполярного та МОН–транзистора з двостороннім освітленням описується виразом (3.5), а чутливість вимірювального каналу приладу – виразом (3.6):

$$F = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{R_c^2(\mathcal{D}) C_c(\mathcal{D}) (C_{\zeta\bar{n}} + \tilde{N}_{\bar{n}}(\mathcal{D})) - L_1 C_{\zeta\bar{n}} + \sqrt{\dot{A}_2^2 + 4\dot{A}_1}}{2\dot{A}_1}}; \quad (3.5)$$

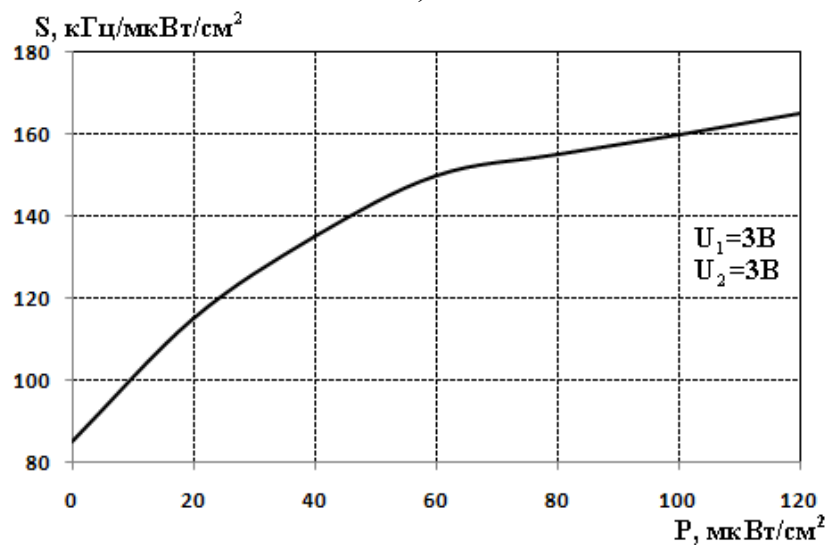
$$\begin{aligned}
S_P^F = & \frac{1}{8} \sqrt{2} \left[\left\{ 2A_3 \left(\frac{\partial}{\partial \mathcal{D}} R_c(P) \right) + A_4 \left(\frac{\partial}{\partial \mathcal{D}} \tilde{N}_c(P) \right) + R_c^2(P) \tilde{N}_c(P) \left(\frac{\partial}{\partial \mathcal{D}} \tilde{N}_c(P) \right) + \right. \right. \\
& + \frac{1}{2} \left(2\dot{A}_2 \left(-2\dot{A}_3 \left(\frac{\partial}{\partial \mathcal{D}} R_c(P) \right) - A_4 \left(\frac{\partial}{\partial \mathcal{D}} \tilde{N}_c(P) \right) - R_c^2(P) \tilde{N}_c(P) \left(\frac{\partial}{\partial \mathcal{D}} \tilde{N}_c(P) \right) \right) + 8\dot{A}_1 R_c(P) \times \right. \\
& \times \left. \left. \left(\frac{\partial}{\partial \mathcal{D}} R_c(P) \right) + 8\dot{A}_1 \tilde{N}_c(P) \left(\frac{\partial}{\partial \mathcal{D}} \tilde{N}_c(P) \right) \right) \right] / \sqrt{\dot{A}_2^2 + 4\dot{A}_1} \Bigg\} / \dot{A}_1 - \frac{2(-\dot{A}_2 + \sqrt{\dot{A}_2^2 + 4\dot{A}_1}) \left(\frac{\partial}{\partial \mathcal{D}} R_c(P) \right)}{\dot{A}_1 R_c(P)} \\
& - \frac{2(-\dot{A}_2 + \sqrt{\dot{A}_2^2 + 4\dot{A}_1}) \left(\frac{\partial}{\partial \mathcal{D}} \tilde{N}_c(P) \right)}{\dot{A}_1 \tilde{N}_c(P)} \Bigg] / \left[\pi \sqrt{\frac{-\dot{A}_2 + \sqrt{\dot{A}_2^2 + 4\dot{A}_1}}{\dot{A}_1}} \right], \quad (3.6)
\end{aligned}$$

де $A_1 = L_1 \tilde{N}_{\zeta\bar{n}} R_c^2(P) \tilde{N}_c^2(P)$; $A_2 = L_1 C_{\zeta\bar{n}} - R_n^2(\mathcal{D}) C_{\bar{n}}(\mathcal{D}) (C_{\zeta\bar{n}} + C_{\bar{n}}(\mathcal{D}))$;
 $A_3 = R_n(\mathcal{D}) C_{\bar{n}}(\mathcal{D}) (C_{\zeta\bar{n}} + C_{\bar{n}}(\mathcal{D}))$; $A_4 = R_n^2(\mathcal{D}) (C_{\zeta\bar{n}} + C_{\bar{n}}(\mathcal{D}))$.

На рисунку 3.14 показані графічні залежності функції перетворення вимірювального каналу приладу та залежність чутливості від зміни величини оптичної потужності та наведена в додатку Л.



а)



б)

Рисунок 3.14 – Теоретична функція перетворення вимірювального каналу приладу (а) та залежність чутливості вимірювального каналу приладу від зміни величини потужності оптичного випромінювання (б)

З рисунок 3.14 а видно, що зі збільшенням оптичної потужності від 0 до 120 мкВт/см² частота генерації зменшується від 566,2 МГц до 550 МГц, причому напруга живлення та напруга керування 3 В. З рисунок 3.14 б видно, що зі зміною потужності оптичного випромінювання від 0 до 120 мкВт/см², чутливість змінюється від 85,2 до 165,1 кГц/мкВт/см².

3.3 Висновки до розділу

1. Розглянуто математичні моделі радіовимірювальних приладів на основі оптичних перетворювачів з використанням біполярного та польового транзисторів, в яких враховано залежність параметрів нелінійних еквівалентних схем приладів на основі оптичних перетворювачів від зміни потужності оптичного випромінювання, що дало змогу отримати рівняння функції перетворення потужності оптичного випромінювання в частоту і рівняння чутливості.

2. У результаті математичного моделювання отримано аналітичні вирази, які можуть бути використані для інженерного розрахунку рівняння чутливості і функції перетворення, вольт–амперних характеристик радіовимірювальних приладів на основі оптичних перетворювачів, що забезпечить вибір оптимального режиму їх живлення.

4 ПРОЕКТУВАННЯ РАДІОВИМІРЮВАЛЬНОГО ПРИЛАДУ ПОТУЖНОСТІ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ОСНОВІ ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

4.1 Аналіз безпроводних технологій для реалізації радіовимірювального приладу потужності оптичного випромінювання

Швидке застосування мікропроцесорних технологій, постійне зниження вартості безпроводних рішень і покращення їх експлуатаційних характеристик дозволяє відмовитися від дротових мереж в інформаційно–вимірювальних системах. Бездротові мережі відрізняються більш гнучкою архітектурою, потребують менше затрат при їх установці та обслуговуванні. Важливим аспектом є стандартизація протоколу передачі даних, що робить вимірювальну систему відкритою і сумісною з іншими приладами.

З 2004 року для високонадійних, рентабельних, енергоекономічних бездротових систем, використовується ZigBee на основі механізму передачі даних IEEE 802.15.4 [75 – 76].

Крім вищезгаданої технології, нині поширені такі три види стандартів для побудови бездротових вимірювальних мереж [76]: IEEE 802.11 – Wireless Local Area Network (WLAN – бездротові локальні вимірювальні мережі); IEEE 802.15 – Wireless Personal Area Network (WPAN – бездротові персональні вимірювальні мережі); IEEE 802.16 – Broadband Wireless Local Access (WLAN – бездротовий широкосмуговий доступ).

Бездротова персональна вимірювальна мережа WPAN є локальною мережею з малим радіусом дії (15–20 м) і призначена для заміни кабельних з'єднань між персональними комп'ютерами, а також для зв'язку з різними периферійними приладами [76]. Проте деякі WPAN–мережі можуть працювати на дальності до 100 м (ZigBee, Bluetooth). Першим стандартом здатний реалізовувати такі задачі став IEEE 802.15.1. Стандарт базується на специфікації Bluetooth v1.x і визначає фізичний рівень (PHY layer) і рівень доступу до середовища (MAC layer). Далі було створено стандарт, який забезпечує взаємодію пристроїв класів 802.11 і 802.15. Коли виникла потреба в створенні стандарту, який би дозволив створити бездротовий канал даних з пропускнуою здатністю в десятки і сотні Мбіт/с був розроблений IEEE 802.15.3[75].

Всі вищезгадані стандарти дуже добре підходять для передачі великих об'ємів інформації (голоса, даних, відео) з великою швидкістю (від 1 до 200 Мбіт/с). Прилади на їх основі можуть працювати в автономному режимі (від батарей і акумуляторів) на дальності від 10 до 100 м. Ці стандарти дозволяють замінити дротові з'єднання в приладах з якими ми працюємо кожен день (комп'ютери, вимірювальні мережі). Однак існує велика кількість специфічних систем (різні сенсори, системи збору інформації та ін.) в яких неможливо зі стовідсотковою ефективністю використовувати вищезгадані технології. Саме для реалізації таких задач був створений IEEE 802.15.4 (ZigBee) для низькошвидкісних WPAN-мереж. Очевидно, що бездротові мережі короткого радіуса дії будуть взаємодіяти між собою.

Порівняльні характеристики стандартів класу 802.15 та 802.11b наведено в таблиці 1 [76]. Виходячи з характеристик наведених в таблиці 4.1 близькими є технології ZigBee і Bluetooth. Відповідно області їхнього застосування також подібні – бездротові прилади домашнього та промислового призначення, включаючи системи дистанційного управління і комп'ютерну периферію та ін. Однак на відміну від Bluetooth ZigBee розроблено для приладів ключовою вимогою до яких є низьке енергоспоживання. Періоди активності приладів виконаних за технологією ZigBee можуть бути дуже малими, що забезпечує тривалий термін служби батарей.

Крім того, стандарти Wi-Fi і Bluetooth занадто дорогі для організації на їхній основі великих мереж різних приладів в масштабах підприємства, а стандарт IEEE 802.15.4 (ZigBee) дозволяє розробляти бездротові інтерфейси з мінімальними затратами, що забезпечується простотою схемотехніки, мінімальною кількістю зовнішніх пасивних елементів, програмним забезпеченням стека, що використовує відведений під нього об'єм пам'яті високоефективно (табл. 4.1).

Стандарт IEEE 802.15.4 (ZigBee) дозволяє створювати мережі з багатокомірковою топологією, обслуговуючи ще більшу кількість вузлів, так збільшується дальність зв'язку без додаткових затрат на підсилення потужності.

Таблиця 4.1 - Порівняння стандартів

Стандарт	802.15.4 ZigBee		802.15.1 Bluetooth	802.15.3 High Rate WPAN, WiMedia	802.15.3 a* UWB	802.11b Wi-Fi
Застосування	Моніторинг, управління, мережі сенсорів, домашня, промислова автоматика		Голос, дані, заміна дротів	Потокове мультимедіа, заміна дротів аудіо/відеосистем		Дані, відео, LAN
Переваги	Ціна, енергозбереження, розміри мережі		Ціна, енергозбереження, передача голосу, перескоки частоти	Висока швидкість, енергозбереження		Швид- кість, гнуч-кість
	менш завантажені діапазони		глобаль ний діапазон			
Частота, ГГц	0,868	0,915	2,4		3,1–10,6	2,4
Макс. швидкість	20 Кбіт/с	40 Кбіт/с	250 Кбіт/с	1 Мбіт/с	22 Мбі т/с (дод 11,3 3,44, 55 Мбі т/с)	11 Мбіт/с
Вих. поту- жність, дБм	0		0 (клас 3) 4 (клас 2) 20 (клас 1)	0	<20 (110 Мбіт/с) <24 (200 Мбіт/с)	20
Дальність, м	10–100		10 (клас 3) 100(клас 1)	5–50	10 (110 Мбіт/с) 4 (200 Мбіт/с)	100
Чутливість, дБм	-92	-85	-70	-75	-	-76
Срок служби батареї, днів	100–100+		1–7	більше 1000		0,5–5
Розмір мережі	65536 (16-бітні адреси), 2 ⁵⁴ (64-бітні адреси),		мастер +7	до 127		32

Технологія ZigBee призначення для передачі великих об'ємів інформації як Wi-Fi чи Bluetooth. Однак для передачі, наприклад, даних з сенсорів, об'єм яких не перевищує десятків байт, не потребує високих швидкостей – в цьому випадку обов'язкові високі показники за енергоспоживанням, ціною і надійністю. Більшість приладів ZigBee будуть працювати за таким алгоритмом:

прилад знаходиться в «сплячому» стані весь час, забезпечуючи оптимальний режим енергоспоживання. Типові часові затримки при цьому складають 30 мс для підключення нового пристрою до мережі, 15 мс для переходу з «сплячого» стану в активний, 15 мс для доступу в канал. Так можна продовжити строк служби батареї до 10 років або більше, в залежності від типу вимірювальної системи і тривалості робочого циклу, при чому струм при передачі складає приблизно 15 – 30 мА, а в «сплячому» режимі – 2 мкА.

Стандарт IEEE 802.15.4 для бездротових низькошвидкісних персональних вимірювальних мереж (WPAN) визначає фізичний рівень РНУ і рівень доступу до середовища MAC [76]. Рівень РНУ забезпечує доступ до фізичного середовища поширення радіосигналу: задає тип модуляції, швидкість та інші параметри сигналу, безпосередньо виконує прийом і передачу. Рівень MAC здійснює додавання і видалення з мережі пристроїв, контролює доставку пакетів даних, забезпечує автоматичне підтвердження прийому даних, реалізує механізми доступу до каналу передачі, підтримує 128-бітне AES-шифрування та інші функції. Специфікація стеку ZigBee визначає мережевий рівень, рівень безпеки і доступу до вимірювальної системи і може використовуватися разом з системами на базі стандарту IEEE 802.15.4 для забезпечення сумісності пристроїв. Ключові функції РНУ рівня включають в себе контроль енергії, якості зв'язку, аналіз каналів [75].

Доступ до середовища здійснюється в частотних діапазонах ISM (Industrial, Scientific and Medical діапазони 900—929 МГц та 2,4—2,4835 ГГц), фізичний рівень використовує двійкову фазову маніпуляцію (BPSK) на частотах 868/915 МГц і офсетну квадратурну фазову маніпуляцію зі зміщенням (O-QPSK) на частоті 2,4 ГГц. Для доступу до каналу використовується механізм множинного доступу до середовища з контролем несучої і попередженням колізій (CSMA-CA). Даний механізм базується на визначенні стану каналу зв'язку перед початком передачі дозволяє суттєво скоротити зіткнення, які викликані передачею даних одночасно декількома пристроями. Стандарт IEEE 802.15.4 заснований на напівдуплексній передачі даних (пристрій може або приймати або передавати дані), що дозволяє використовувати метод CSMA-CA тільки для попередження колізій, а не для їх виявлення.

Дальність поширення сигналу зазвичай складає 30–50 м, однак при використанні зовнішніх підсилювачів потужності, малошумлячих підсилювачів та узгодженої антени дальність може скласти 100 м, без суттєвих втрат в швидкості. Для Zigbee про дальність може становити 1500 м, але це потребує встановлення окремого обладнання, що збільшує ціну приладу. Пропускна

здатність напряму залежить від обраної частоти. Максимальна швидкість передачі, рівна 250 КБіт/с досягається в діапазоні 2,4 ГГц (16 каналів з кроком 5 МГц). Для частот 868 МГц (1 канал) і 902–928 МГц (10 каналів з кроком 2 МГц) швидкості передачі рівні відповідно 20 КБіт/с і 40 КБіт/с (рисунок 4.1).

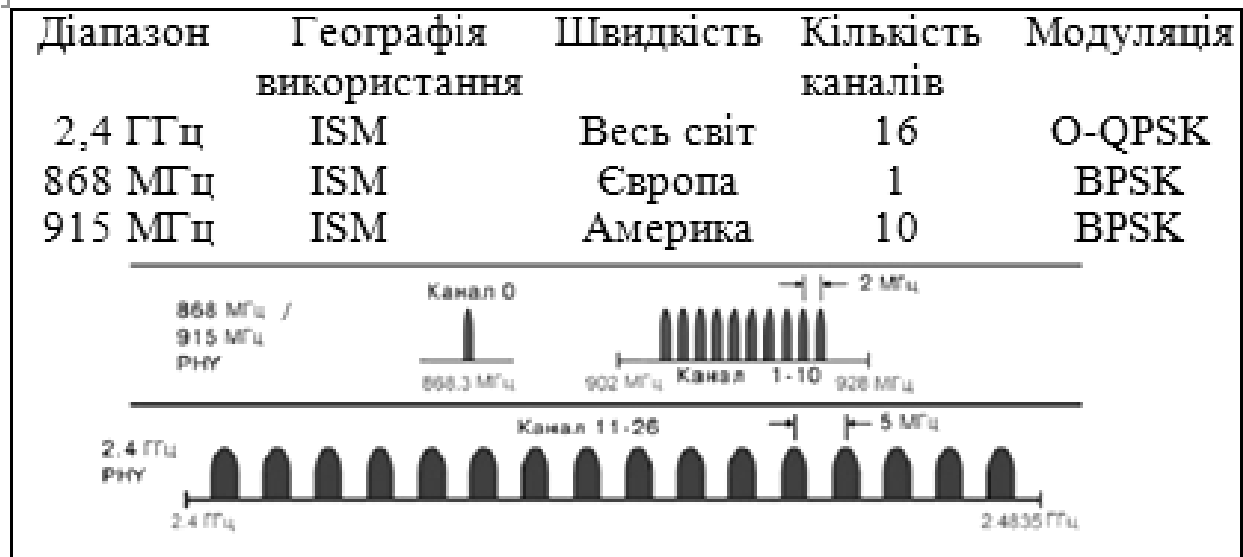


Рисунок 4.1 – Коротка характеристика стандарту IEEE 802.15.4

Одним з небагатьох недоліків діапазону 2,4 ГГц є певна насиченість його спектру абонентами різного походження (мікрохвильові печі, бездротові телефони на частотах 2,4 ГГц, Bluetooth та 802.lib). Перевага субгігерцових діапазонів полягає в меншій насиченості і дещо збільшеній дальності передачі при рівних умовах при зіставленні з діапазоном 2,4 ГГц. Однією з основних переваг стандарту IEEE 802.15.4 є простота установки і обслуговування подібних пристроїв. Вартість вимірювальних систем на основі стандарту ZigBee/802.15.4 нижча за вартість Bluetooth починається з 40 грн. і знижується до 16 грн. (в ціну входить мікроконтролер, радіотрансівер, програмний стек). Однак все залежить від переліку елементів схеми.

Враховуючи все вищезгадане, доцільно буде спроектувати радіовимірювальний прилад потужності оптичного випромінювання (рисунок 4.1) з використанням пристроїв стандарту IEEE 802.15.4. Центральні частоти каналів при цьому будуть визначатися за формулою:

$$F_c = (2405 + (k - 11)), \text{ МГц} \quad (4.1)$$

де $k = 11, 12 \dots 26$. Так визначимо центральні частоти кожного з шістнадцяти каналів: $F_1 = 2405, F_2 = 2410, F_3 = 2415, F_4 = 2420, F_5 = 2425,$
 $F_6 = 2430, F_7 = 2435, F_8 = 2440, F_9 = 2445, F_{10} = 2450, F_{11} = 2455, F_{12} = 2460,$
 $F_{13} = 2465, F_{14} = 2470, F_{15} = 2475, F_{16} = 2480$ МГц.

4.2 Радіовимірювальний прилад потужності оптичного випромінювання

Прилад вимірювання потужності оптичного випромінювання, на сучасному етапі, повинен бути реалізований на основі мікроконтролера. Процес його реалізації складається з таких етапів: апаратне забезпечення; програмування і прошивка мікроконтролера; програмне забезпечення для персонального комп'ютера. Таким чином, основними частинами приладу для вимірювання потужності оптичного випромінювання буде оптико–частотний перетворювач, що складається з піроелектричного чутливого елемента та частотного перетворювача, частотомір на основі мікроконтролера, перетворювач рівня для інтерфейсу RS–232, перетворювач інтерфейсу USB–RS232.

Основне завдання мікроконтролера – підрахунок імпульсів з частотного перетворювача за командою ПК і передача їх по інтерфейсу RS232. Робоча частота мікроконтролера задається кварцовим резонатором 8 МГц. Для підключення мікроконтролера до ПК по послідовному інтерфейсу використовується спеціалізована схема на двох транзисторах замість поширеного в такому випадку застосування мікросхеми MAX232. Для передачі даних використовується вбудований в мікроконтролер апаратний USART (універсальний синхронно–асинхронний приймач–передавач). На рис. 4.2. зображена структурна схема радіовимірювального приладу потужності оптичного випромінювання, та наведена в додатку М.

На схемі використано такі позначення: Р – потужність оптичного випромінювання; ОЧП – оптико–частотний перетворювач; МК – мікроконтролер; ПР – перетворювач рівня для інтерфейсу RS–232; П – перетворювач інтерфейсу USB–RS232; MUX – мультиплексор; ПК – персональний комп'ютер

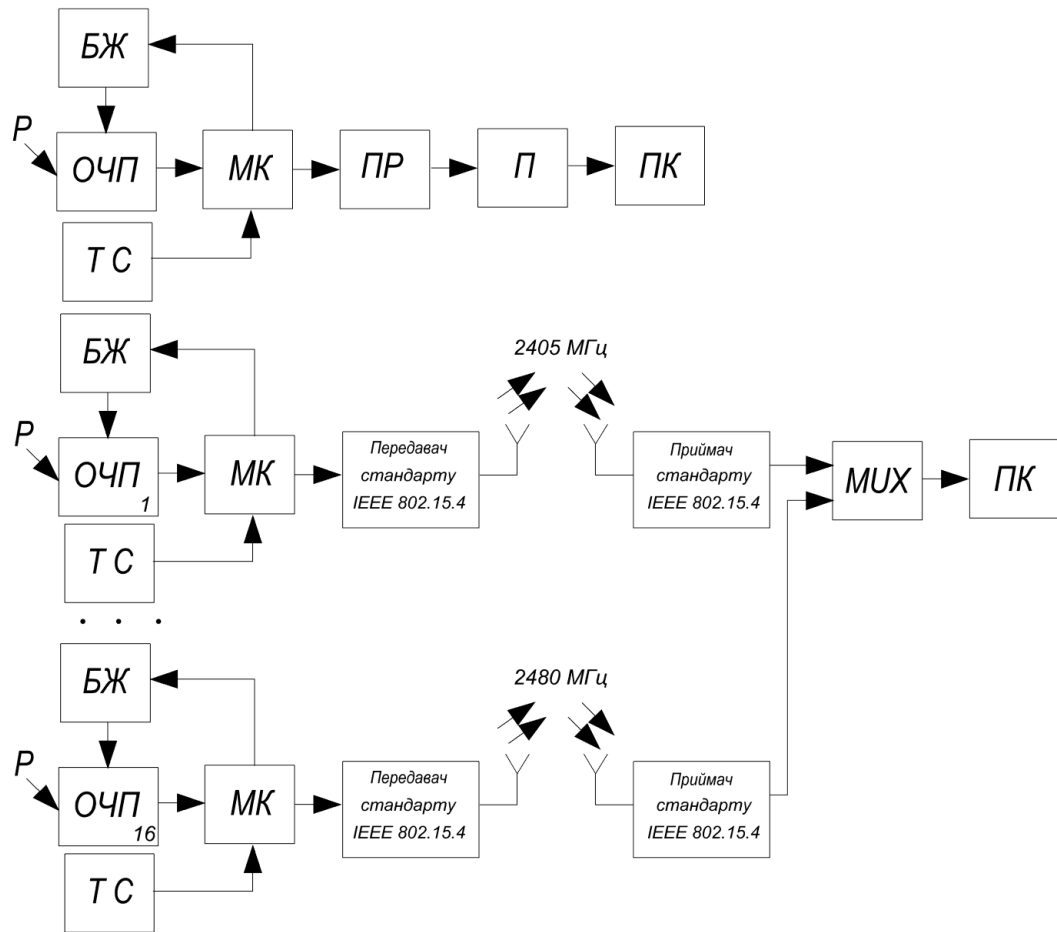


Рисунок 4.2 – Структурна схема радіовимірювального приладу потужності оптичного випромінювання

Також в багатоканальному приладі для вимірювання потужності оптичного випромінювання використано передавач і приймач стандарту IEEE 802.15.4 на частоті 2,4 ГГц за допомогою яких сигнал передається по радіоканалу і приймається в іншій частині простору, що дозволяє вимірювати потужність оптичного випромінювання в декількох віддалених місцях одночасно і спостерігати її на дисплей персонального комп'ютера та зберігати виміряну інформацію у файл. Основні особливості багатоканального приладу для вимірювання потужності оптичного випромінювання це покращена точність і чутливість вимірювання потужності оптичного випромінювання за рахунок використання частотного перетворювача; інтеграція з USB інтерфейсом персонального комп'ютера; живлення від ПК; зберігання виміряних даних у спеціальній файл баз даних; передача інформативного сигналу на відстань, що дозволяє повністю виключити похибку оператора при вимірюваннях.

Для порівняння з існуючими приладами була створена таблиця 4.2.

Таблиця 4.2 – Характеристики радіовимірювальних оптичних приладів

Характеристики радіовимірювальних оптичних приладів	Вимірювач оптичної потужності Yokogawa (ANDO) AQ2160-01	Вимірювач потужності Haktronics Photom 591	Мультиметр оптичний Haktronics Photom 230/235	Тестер оптичний «Рубин-021»	Радіовимірювальний прилад потужності оптичного випромінювання
Чутливість	-33 дБм	-26 дБм; -33 дБм	-33 дБм	-33 дБм	11,2 кГц/мВт
	0,5	2,5 – 0,5	0,5	0,5	11,2
Діапазон вимірюваних потужностей, мВт	$10^{-7} - 3,2$	$10^{-8} - 10$	$10^{-7} - 3$ при $\lambda=1310$, 1550 нм – $10^{-6} - 3$ при $\lambda=820$, 850 нм	$10^{-7} - 2$	$10^{-7} - 10^{-6}$
Діапазон робочих довжин хвиль	750–1700 нм	900–1650 нм	820–1550 нм	1250–1700 нм	1–15 мкм
Границі допустимої похибки, %	5	5	5	10	0,54
Точність, мВт	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-6}
Споживана потужність, мВт	120	150	150	120	10
Робочий діапазон частот, Гц	$270, 2 \cdot 10^3$	$270, 10^3, 2 \cdot 10^3$	$270, 2 \cdot 10^3$	$270, 10^3, 2 \cdot 10^3$	$10^5 - 10^9$

Проаналізувавши таблицю 4.2 можна побачити, що радіовимірювальний прилад потужності оптичного випромінювання має кращу чутливість, ширший діапазон вимірюваних потужностей, меншу граничну похибку, більшу точність вимірювання, а також ширший робочий діапазон частот. Зрозуміло, що чим більша чутливість і точність вимірювань і менша похибка, тим краще працює прилад. Широкий діапазон вимірюваних потужностей дозволяє вимірювати різні значення інформативного параметру і є додатковою перевагою приладу.

4.3 Висновки до розділу

Розглянуто систему радіовимірювальних перетворювачів оптичної потужності для високонадійних, рентабельних, енергоекономічних бездротових інформаційно-вимірювальних систем на основі ZigBee стандарту передачі даних IEEE 802.15.4.

5 АНАЛІЗ КОМЕРЦІЙНОГО ПОТЕНЦІАЛУ РОЗРОБКИ (ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АУДИТ РОЗРОБКИ) РАДІОВІМІРЮВАЛЬНОГО ПАРАМЕТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

5.1 Визначення рівня комерційного потенціалу розробки радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання

Метою проведення технологічного аудиту є оцінювання комерційного потенціалу розробки радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання, 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 параметричного перетворювача оптичного випромінювання будемо здійснювати за 12-ю критеріями згідно рекомендацій.

Результати оцінювання комерційного потенціалу розробки радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання заносимо до таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 - Результати оцінювання комерційного успіху розробки радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання

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	3	2	3
2	3	3	4
3	4	2	2

Продовження таблиця 5.1.

4	3	3	3
5	2	4	3
6	3	3	4
7	4	2	3
8	3	2	2
9	2	2	3
10	3	3	3
11	4	4	3
12	3	3	2
Сума балів	37	33	35
Середньоарифметична сума балів, СБ	35		

За даними таблиці 5.1 робимо висновок щодо рівня комерційного потенціалу розробки радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання. 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 параметричного перетворювача оптичного випромінювання – вище середнього.

5.2 Визначення рівня якості розробки радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання

Оцінювання рівня якості розробки радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання проводиться з метою порівняльного аналізу і визначення найбільш ефективного, з технічної точки зору, варіанта інженерного рішення.

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

Абсолютний рівень якості розробки радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання 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 параметричного перетворювача оптичного випромінювання

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

Із врахуванням коефіцієнтів вагомості відповідних параметрів можна визначити абсолютний рівень якості інноваційного рішення за формулою [77]:

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

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 параметричного перетворювача оптичного випромінювання становитиме – 4,5 бали.

Одночасно визначаємо відносний рівень якості радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання, 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 параметричного перетворювача оптичного випромінювання та товару-конкурента

Параметри	Варіанти		Відносний показник якості	Коефіцієнт вагомості параметра
	Базовий (конкурент)	Новий		
Точність оптичного випромінювання	2	3	1,5	0,4
Кількість вимірювальних каналів	2	4	2	0,1
Діапазон вимірювання	10	30	3	0,4
Відносна похибка	3	5	0,6	0,1

Відносний рівень якості радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання визначаємо за формулою:

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

За розрахунками відносний рівень якості радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання становитиме – 2,06.

Це означає, що наша розробка краща за якістю майже вдвічі краща від товару-аналога.

5.3 Визначення конкурентоспроможності розробки радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання

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 параметричного перетворювача оптичного випромінювання і товару-конкурента

Параметри	Варіанти		Відносний показник якості	Коефіцієнт вагомості параметра
	Базовий (конкурент)	Новий		
Точність оптичного випромінювання	2	3	1,5	0,4
Кількість вимірювальних каналів	2	4	2	0,1
Діапазон вимірювання	10	30	3	0,4
Відносна похибка	3	5	0,6	0,1
Ціна за продукт, тис. грн.	10000	5600	0,56	-

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

$$K = \frac{I_{т.п.}}{I_{е.п.}} = \frac{2,06}{0,56} = 3,68, \quad (5.3)$$

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

$$I_{е.п.} = \frac{P_{Неі}}{P_{Беі}} = \frac{5600}{10000} = 0,56, \quad (5.4)$$

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

Згідно розрахунків загальний показник конкурентоспроможності – 3,68 . Це означає, що наша розробка радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання більш конкурентна майже в тричі краща 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 параметричного перетворювача оптичного випромінювання

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

$$Z_0 = \frac{M}{T_p} \cdot t, \quad (5.4)$$

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 5.5.

Таблиця 5.5 – 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	455	5	2275
Консультанти	5000	227	5	1135
Всього:				5685

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:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n t_i \cdot C_i, \quad (5.5)$$

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:

$$C_i = \frac{M_m \cdot K_i}{T_p \cdot T_{zm}}, \quad (5.6)$$

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 5.5.1

Таблиця 5.5.1 - Величина тарифних коефіцієнтів робітників

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 5.6 – Заробітна плата робітників

Найменування робіт	Трудоємність, н-год.	Розряд роботи	Погодинна тарифна ставка	Тариф. коеф.	Величина, грн.
Налагоджувальні	3	4	30	1,27	90
Складальні	2	4	30	1,27	60
Механічні	1	3	28	1,18	28
Заготівельні	4	2	26	1,09	104
Всього					252

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:

$$Зд = 0,1 \cdot (Зр + Зо) = 0,1 \cdot (5685 + 252) = 593,7 \text{ грн.} \quad (5.7)$$

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%).

$$\begin{aligned} \text{Нзп} &= 0,22 \cdot (Зр + Зо + Зд) = 0,22 \cdot (5685 + 252 + 593,7) = \\ &= 1437 \text{ грн.} \end{aligned} \quad (5.8)$$

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 [78]:

$$A = \frac{Ц \cdot \text{На}}{100} \cdot \frac{T}{12'}$$

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 $N_a = (10...25)\%$; T – термін, використання обладнання, приміщень тощо, місяці.

Таблиця 5.7 - Амортизаційні відрахування

Найменування	Ціна, грн.	Норма амортизації, %	Термін використання, м.	Сума амортизації
ПК+панель оператора	7000	20	2	233
ПЛК	10000	20	2	333
Інше обладнання	9000	10	1	75
Всього				641

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

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

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

Таблиця 5.8 - 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 K , що були використані під час виконання даного етапу роботи, розраховуються за формулою:

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

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

Таблиця 5.9 - Комплектуючі, що використані на розробку

Найменування матеріалу	Ціна за одиницю, грн.	Витрачено	Вартість, грн.
Фотодіод	30	3	90
Оптичний тракт	100	1	100
Корпус	200	1	200
Тумблер	15	1	15
Панель оператора	2000	1	2000
Операційний підсилювач	2	1	2
Інтерфейс	70	2	140
Джерело напруги	20	1	20
Всього, з урахуванням коефіцієнта транспортних витрат		2824	

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.

$Ve=2662$ 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_B можна прийняти як (100...300)% від суми основної заробітної плати розробників та робітників, які були виконували дану роботу, тобто:

$$I_B = 2 \cdot (Z_o + Z_p) = 2 \cdot (5685 + 252) = 11874 \text{ грн.} \quad (5.9)$$

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

$$B = 26028 \text{ грн.}$$

5.5 Розрахунок загальних витрат на розробку радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання

Загальна вартість всієї наукової роботи визначається за $V_{\text{заг}}$ формулою:

$$V_{\text{заг}} = \frac{I_B}{\alpha} = \frac{11874}{0,6} = 19790 \text{ грн,} \quad (5.10)$$

де α – частка витрат, які безпосередньо здійснює виконавець даного етапу роботи, у відн. одиницях [78].

5.6 Прогнозування витрат на виконання та впровадження радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання

Прогнозування загальних витрат Z_B на виконання та впровадження радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання здійснюється за формулою:

$$Z_B = \frac{V_{\text{заг}}}{\beta} = \frac{19790}{0,5} = 39580 \text{ грн,} \quad (5.11)$$

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 параметричного перетворювача оптичного випромінювання

З метою прогнозування комерційних ефектів від реалізації радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання складемо таблицю вихідних показників, за рахунок яких і відбудуватиметься отримання комерційного ефекту.

Таблиця 5.10 – Вихідні дані для прогнозування комерційного ефекту від реалізації радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання [79]

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

Величина зростання ціни реалізації радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання, грн. – 4400 грн.

Кількість продукції, що випускалась до впровадження радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання – 100 шт.

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

$$\Delta \Pi_i = \sum_1^n (\Delta \text{Ц}_0 \cdot N + \text{Ц}_0 \cdot \Delta N)_i \cdot \rho \cdot \gamma \cdot \left(1 - \frac{v}{100}\right) \quad (5.12)$$

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; C_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_1 протягом першого року складе:

$$\Delta\Pi_1 = 82684 \text{ грн.}$$

Збільшення чистого прибутку підприємства Π_2 протягом другого року (відносно базового року, тобто року до впровадження результатів наукової розробки) складе:

$$\Delta\Pi_2 = 469530 \text{ грн.}$$

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

$$\Delta\Pi_3 = 499060 \text{ грн.}$$

5.8 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та період їх окупності

5.8.1 Визначення абсолютної ефективності вкладених інвестицій у розробку радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання

Для цього користуються формулою:

$$E_{абс} = (ПП - PV), \quad (5.13)$$

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

У свою чергу, приведена вартість всіх чистих прибутків ПП розраховується за формулою [80]:

$$ПП = \sum_1^T \frac{\Delta\Pi}{(1+\tau)^t} \quad (5.14)$$

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”.

$$ПП = 539470 \text{ грн.},$$

$$E_{абс} = 539470 - 39580 = 485489 \text{ грн.}$$

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 параметричного перетворювача оптичного випромінювання [81].

5.9 Розрахунок відносної ефективності вкладених коштів в НДДКР радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання

Для цього користуються формулою:

$$E_v = \sqrt[T]{1 + \frac{E_{абс}}{PV}} - 1 \quad (5.15)$$

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

$$E_v = 2,6$$

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

$$\tau = d + f, \quad (5.16)$$

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

$$E_B = 2,6 \geq \tau = 0,2 + 0,1 = 0,3.$$

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

5.10 Розрахунок терміну окупності коштів, вкладених в наукову розробку радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання

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

$$\text{Ток} = \frac{1}{E_B} = \frac{1}{2,6} = 0,4 \text{ роки.} \quad (5.17)$$

Оскільки Ток $< 3 \dots 5$ -ти років, то фінансування даної наукової розробки радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання є доцільним.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Забезпечення захисту працюючих під час трудового процесу від небезпечних та шкідливих виробничих факторів, які справляють негативний вплив на життя, здоров'я та працездатність людини, гарантування належних умов праці є важливими аспектами охорони праці, як складової безпеки життєдіяльності.

У цьому розділі проводиться аналіз небезпечних, шкідливих [82] та уражаючих для людини і навколишнього довкілля чинників, які утворюються при проведенні дослідження радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання. Тут розглядаються, в тому числі, технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення безпечної відстані при оптичному випромінюванні, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки при проведенні дослідження, безпека у надзвичайних ситуаціях.

6.1 Гігієна праці та виробнича санітарія

6.1.1 Склад повітря робочої зони та мікроклімат

Визначаємо для приміщення для проведення дослідження радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання, категорію важкості робіт за фізичним навантаженням – легка Іб.

Згідно із [83] допустимі показники температури, відносної вологості та швидкості руху повітря у робочій зоні для холодного та теплого періодів року наведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Нормовані допустимі параметри мікроклімату в приміщенні

Період року	Категорія робіт	Температура повітря, °С для робочих місць		Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
		постійних	непостійних		
Холодний	Іб	20-24	17-25	75	≤0,2
Теплий		21-28	19-30	60 при 27°С	0,1-0,3

Для опромінення менше 25% поверхні тіла працівника, допустима інтенсивність теплового опромінення складає 100 Вт/м².

Вміст шкідливих речовин в повітрі робочої зони не повинен перевищувати гранично допустимих концентрацій (ГДК) у повітрі робочої зони та підлягає систематичному контролю з метою запобігання можливості перевищення ГДК, значення яких для роботи з ЕОМ наведено в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – ГДК шкідливих речовин [85]

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

При роботі з ЕОМ джерелом зараження повітря є також іонізація молекул речовин, що містяться в повітрі. Рівні позитивних та негативних іонів мають відповідати [85] і приведені у таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – Число іонів в 1 см³ повітря приміщення під час роботи на ЕОМ

Рівні	Мінімально необхідні	Оптимальні	Максимально допустимі
позитивний	400	1500-3000	50000
негативний	600	3000-5000	50000

З метою забезпечення нормованих параметрів мікроклімату і складу повітря робочої зони запропоновано такі заходи:

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

6.1.2 Виробниче освітлення

Для створення гігієнічних раціональних умов на робочих місцях великі вимоги пред'являються щодо якісних та кількісних параметрів освітлення.

З точки зору задач зорової роботи в приміщенні, де проводиться робота з дослідження радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання, згідно [84] визначаємо, що вони відносяться до IV розряду зорових робіт. Приймаємо контраст об'єкта з фоном – великий та характеристику фону – середню, яким відповідає підрозряд зорових робіт *г*.

Нормовані значення коефіцієнта природного освітлення (КПО) та мінімальні значення освітленості при штучному освітленні приведені в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 – Нормовані значення КПО та мінімальні освітленості при штучному освітленні

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

Оскільки приміщення розташоване в місті Вінниця (друга група забезпеченості природним світлом), а світлові проєми розташовані за азимутом 315°, то за таких умов КЕО визначатиметься за виразом [84,85]

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

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

m_N – коефіцієнт світлового клімату;

N – порядковий номер групи забезпеченості природним світлом.

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

$$e_{N,6} = 1,5 \cdot 0,9 = 1,4 (\%);$$

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

З метою встановлення нормативних значень показників освітлення передбачено такі заходи:

1) за недостатнього природного освітлення у світлий час доби доповнення штучним за допомогою люмінесцентних ламп з утворенням системи суміщеного освітлення;

2) застосування загального штучного освітлення у темний час доби.

6.1.3 Виробничі віброакустичні коливання

Зважаючи на те, що при використанні пристроїв крім усього іншого устаткування застосовується обладнання, робота якого супроводжується шумом та вібрацією, потрібно передбачити шумовий та вібраційний захист.

Визначено, що приміщення, в якому відбувається робота з дослідження радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання може мати робочі місця із шумом та вібрацією, що створюється вентиляторами блоку живлення комп'ютера та кулерами мікропроцесора, відеокарти.

Для запобігання травмуванню працюючих під дією шуму він підпадає під нормування. Головним нормативом стосовно промислового шуму, що діє в нашій країні, є [86], згідно з яким нормовані рівні звукового тиску, рівні звуку і еквівалентні рівні шуму на робочих місцях в промислових приміщеннях не мають бути більшими ніж значення, що приведені в таблиці 6.5.

Таблиця 6.5 – Нормовані рівні шуму 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 6.6 для локальної вібрації.

Таблиця 6.6 – Нормовані рівні віброприскорення [87]

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

Для покращення віброакустичного клімату у приміщенні передбачено такі заходи:

- 1) оздоблення стін спеціальними перфорованими плитами, панелями з метою шумопоглинання;
- 2) передбачено використовувати в приміщенні штори із щільної тканини.

6.1.4 Виробничі випромінювання

Проведений аналіз умов праці показав, що приміщення, де проводиться робота з дослідження може містити лазерні випромінювання.

Відповідно до [92] 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 6.7.

Таблиця 6.7 – 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 δ 1800	$10^{-10} < t \delta 1$	$H_{ГДР} = 2 \cdot 10^4 \cdot \sqrt[5]{t}$
	$1 < t \delta 10^2$	$E_{ГДР} = 2 \cdot 10^4 / \sqrt[5]{t}$
	$t > 10^2$	$E_{ГДР} = 5 \oplus 10^2$
1800 < λ δ 2500	$10^{-10} < t \delta 3$	$H_{ГДР} = 7 \cdot 10^3 \cdot \sqrt[5]{t}$
	$3 < t \delta 10^2$	$E_{ГДР} = 5 \cdot 10^3 / \sqrt{t}$
	$t > 10^2$	$E_{ГДР} = 5 \oplus 10^2$
2500 < λ δ 10 ⁵	$10^{-10} < t \delta 10^{-1}$	$H_{ГДР} = 2,5 \cdot 10^3 \cdot \sqrt[5]{t}$
	$10^{-1} < t \delta 1$	$H_{ГДР} = 5 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{t}$
	$1 < t \delta 10^2$	$E_{ГДР} = 5 \cdot 10^3 / \sqrt{t}$
	$t > 10^2$	$E_{ГДР} = 5 \oplus 10^2$

Для забезпечення нормованих показників лазерного випромінювання у приміщенні передбачено такі заходи:

- 1) захист відстанню;
- 2) фарбування поверхонь приміщення для забезпечення коефіцієнта відбиття світла не більше 0,4.

Вихідні дані: потужність лазера $W = 0,2$ Вт, тривалість опромінення $t = 6$ с, кут розсіювання променя $\varphi = 0,05$ рад.

В якості засобу захисту працюючих від лазерного випромінювання вибираємо захист відстанню.

Безпечну відстань L можна розрахувати за формулою:

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

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 $\lambda = 1800 \dots 2500$ нм і тривалості опромінення від 3 до 100 с визначається за формулою:

$$E = 5 \cdot 10^3 / \sqrt{t} \quad [\text{Вт/м}^2]. \quad (6.3)$$

Підставивши у формулу (6.3) відоме значення тривалість опромінення, отримаємо гранично допустима щільність потужності:

$$E = 5 \cdot 10^3 / \sqrt{6} = 2041,24 \quad (\text{Вт/м}^2).$$

Використовуючи формулу (6.2) визначимо безпечну відстань

$$L = \frac{1,2}{0,05} \sqrt{\frac{0,2}{2041,24}} = 0,24 \quad (\text{м}).$$

Небезпечну зону слід чітко відокремити дисциплінарним бар'єром.

6.2 Технічні рішення щодо промислової та пожежної безпеки при проведенні дослідження

Сучасний етап розвитку техніки, автоматизації розробок та досліджень характеризується широким використанням на робочому місці ЕОМ. Наявність великої кількості прикладних програм сприяє тому, що ЕОМ є основним робочим інструментом інженера в галузі радіотехніки.

6.2.1 Безпека щодо організації робочих місць

Розміщення робочих місць, оснащених ЕОМ виконується в приміщеннях з одnobічним розміщенням вікон, що неодмінно повинні бути обладнані сонцезахисним пристроями: жалюзями та шторами [88].

При розміщенні робочих місць у приміщеннях з джерелами небезпечних та шкідливих промислових чинників, вони повинні розташовуватися в абсолютно ізольованих кабінетах з природним освітленням та організованою вентиляцією. Площа одного робочого місця має складати не менше 6,0 м², об'єм – не менше як 20 м³, а висота – не менше 3,2 м [89].

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

6.2.2 Електробезпека

Причинами ураження електричним струмом у цьому приміщенні можуть бути: робота під напругою під час проведення ремонтних робіт, несправність устаткування, випадкове торкання до металевих частин, що опинилися під напругою чи струмоведучих частин. У відповідності до [90] це приміщення належить до приміщень з підвищеною небезпекою ураження електричним струмом в наслідок наявності високої (понад 75 %) відносної вологості. Через це безпека використання електрообладнання має забезпечуватись рядом заходів, що включають застосування ізоляції струмоведучих частин, захисних блокувань, захисного заземлення та ін [91].

6.2.3 Пожежна безпека

Згідно [92] приміщення, в якому проводиться робота з дослідження радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання, відноситься до категорії пожежної небезпеки Б. Це приміщення відноситься до 2-го ступеня вогнестійкості, в якому приміщення знаходяться в будівлі з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону із застосуванням листових і плитних негорючих матеріалів.

Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій приміщення, що розглядається наведені в таблиці 6.7.

Таблиця 6.7 – Значення мінімальних меж вогнестійкості приміщення [92]

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 – $M \leq 25$ см – для горизонтальних конструкцій; $M \leq 40$ 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. Вибираємо, що приміщення, в якому проводиться робота з дослідження, має бути оснащено двома вогнегасниками, пожежним щитом, а також ємністю з піском [93].

Таблиця 6.8 – Протипожежні норми проектування будівель і споруд [94]

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 евакуиходу	Відстань між будівлями та спорудами, м, при ступені їх вогнестійкості			Найбільша кількість поверхів	Площа поверху в межах пожежного відсіку, м ² , для числа поверхів		
			до 1	2-3	4-5		I,II	III	IV,V		1	2	3 і більше
до 15	Б	2	40	25	15	45	9	9	12	6	н.о.	–	–

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

6.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях

Дослідження стійкості роботи радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій

Проведемо дослідження стійкості роботи радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання в умовах дії найімовірніших надзвичайних ситуацій для таких приладів і систем – це вплив іонізуючих випромінювань та електромагнітного імпульсу. Зосередимо нашу увагу на цих факторах впливу з врахуванням можливості застосування телекомунікаційних мереж вимірювальних приладів в особливий період.

Серед потенційно небезпечних виробництв особливе місце посідають радіаційно-небезпечні об'єкти. Вони являють небезпеку для людей, навколишнього природного середовища, телекомунікаційних та радіо електронних приладів і систем. Радіоактивне випромінювання діючи на матеріали і деталі такої апаратури і систем призводить до суттєвих змін в їх роботі. Дія іонізуючих випромінювань залежить від виду випромінювання, дози радіації, природи опромінюваної речовини та умов навколишнього середовища.

Матеріали, які використовуються в електронних елементах (метали, неорганічні матеріали, напівпровідники, діелектрики, смоли та різні органічні сполуки), з яких виготовляються радіоелементи по різному реагують на

іонізуючі випромінювання. Найбільш чутливі до радіації метали, оскільки їм властива висока концентрація вільних носіїв.

Конструювання апаратури і систем стійких до іонізуючого опромінення, передбачає вибір матеріалів та елементної бази, а також конструктивних рішень, які зменшують вплив радіації. В елементах систем радіація викликає оборотні і необоротні процеси, внаслідок яких можуть бути порушення роботи елементів схеми, що призведе до пошкодження апаратури.

Електромагнітні імпульси діють на електронні системи, викликаючи в них оборотні і необоротні зміни. Електромагнітний імпульс являє собою велику небезпеку для електронної апаратури. Слід пам'ятати про те, що захист апаратури від механічних впливів не захищає від ЕМІ.

Апаратура, виконана на напівпровідникових і інтегральних схемах, що працюють на малих струмах і напругах особливо схильна до ЕМІ. Це відбувається тому, що така апаратура схильна до впливу зовнішніх електричних і магнітних полів. ЕМІ пробиває ізоляцію, випалює елементи електросхем радіоапаратури, викликає коротке замикання в радіо пристроях, іонізацію діелектриків. ЕМІ може впливати на пам'ять ЕОМ, повністю або частково стираючи її.

При дії електромагнітного імпульсу на апаратуру найбільша напруга наводиться на вхідних ланцюгах. ЕМІ ушкоджує транзистори, викликає іскріння в між контактних з'єднаннях і деяких областях провідної поверхні. У транзисторів спостерігається залежність: чим вище коефіцієнт посилення транзистора, тим менше його електрична міцність. Для резисторів типу МЛТ і прецизійних гранична напруга біля 1 кВ. Великі струми, обумовлені прикладеним імпульсом напруги, проходячи через конденсатор, в місцях підвищеного опору можуть викликати нагрів шару металізації і його вигорання, порушити контакти між обкладками і основами.

6.3.1 Дослідження стійкості роботи радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання в умовах дії іонізуючих випромінювань

Критерієм стійкості роботи перетворювача в умовах дії іонізуючих випромінювань приймається максимальне значення експозиційної дози ($D_{e,gr}$) або потужність дози (r_{gr}), при яких можуть виникнути зворотні зміни параметрів елементів, але робота радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання ще не порушується.

Вихідними даними для оцінки є максимальне значення потужності дози через одну годину після аварії $p_{1\max}$ Р/год; коефіцієнт послаблення радіації виробничими приміщеннями $K_{\text{посл}}=5$.

Приймаємо $p_{1\max}=6,32$ Р/год, $K_{\text{посл}}=5$; $t_{\text{п}}=1$ год; $t_{\text{рmax}}=40000$ год.

Оцінка проводиться в наступній послідовності.

1. Аналізується схема пристрою спектрального аналізу і визначаються елементи від яких залежить його робота. В нашому випадку це мікросхеми, транзистори, конденсатори, резистори. Для кожного елементу визначається максимальна допустима експозиційна доза ($D_{\text{гр},i}$). Дані заносимо в таблицю 6.9. Аналізуємо дані і за мінімальним значенням $D_{\text{гр},i}$ визначається границя стійкості роботи пристрою перетворювача.

Таблиця 6.9 – Граничні дози опромінення елементів радіовимірювального перетворювача потужності оптичного випромінювання

№	Елементи радіовимірювального перетворювача	$D_{\text{зві}}, \text{P}$	$D_{\text{звк}}, \text{P}$	$D_{\text{гр}}, \text{P}$
1	Мікросхеми	10^5	10^4	10^4
	Діоди	10^4		
2	Конденсатори	10^7	10^7	
	Резистори	10^7		

2. Визначається можлива експозиційна доза опромінення радіовимірювального перетворювача потужності оптичного випромінювання в заданих умовах протягом експлуатаційного терміну:

$$D_M = \frac{2 \cdot P_{1\max} \cdot (\sqrt{t_{\text{к}}} - \sqrt{t_{\text{п}}})}{K_{\text{посл}}} = \frac{2 \cdot 6,32 \cdot (\sqrt{40000} - \sqrt{1})}{5} = 503,07 [P].$$

3. Граничне значення експозиційної дози ($D_{\text{гр},\text{min}}$) порівнюється з D_M , що очікується на об'єкті, і робиться висновок про стійкість роботи радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання. Оскільки $D_{\text{гр},\text{min}} > D_M$ то перетворювач досить стійкий до радіації.

4. Розраховується допустимий час безпечної роботи радіовимірювального перетворювача температури в заданих умовах:

$$t_k = t_\delta = \left(\frac{D_{ep.min} \cdot K_{посл} + 2 \cdot p_{1.max} \cdot \sqrt{t_{п}}}{2p_{1.max}} \right)^2 = \left(\frac{10^4 \cdot 5 + 2 \cdot 6,32 \sqrt{1}}{2 \cdot 6,32} \right)^2 = 3956,696 \text{ [год]}.$$

Отже, допустимий час роботи радіовимірювального перетворювача температури в умовах впливу іонізуючих випромінювань більший часу морального старіння апаратних засобів.

6.3.2 Дослідження стійкості роботи радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання в умовах дії електромагнітного імпульсу

Початкові дані: $E_B = 11,79$ кВ/м, $U_{ж} = 220, 12$ В.

Дослідження по стійкості роботи радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання ведеться в такій послідовності:

1. Визначається горизонтальна складова напруженості електричного поля $E_{Г} = 10^{-3} \cdot E_B = 10^{-3} \cdot 11,79 \cdot 10^3 = 11,79$ (В/м);

2. Система розподіляється на окремі функціональні ділянки: система живлення, блок перетворення. На кожній ділянці визначається максимальна довжина вертикальної і горизонтальної струмопровідної частини l_B і $l_{Г}$. На ділянці системи живлення максимальна довжина не екранованої вертикальної і горизонтальної струмопровідної частини $l_{B,ж} = 0,13$ м, $l_{Г,ж} = 0,11$ м. На ділянці блоку перетворення $l_{B,м} = 0,17$ м, $l_{Г,м} = 0,21$ м.

3. Для кожної ділянки визначаються можливі наведені напруги у струмопровідних частинах.

На ділянці системи живлення:

$$U_{B,ж} = E_{Г} \cdot l_{B,ж} = 11,79 \cdot 0,13 = 1,53 \text{ (В)}.$$

$$U_{Г,ж} = E_B \cdot l_{Г,ж} = 11,79 \cdot 10^3 \cdot 0,11 = 1296,9 \text{ (В)}.$$

На ділянці блоку перетворення:

$$U_{B,м} = E_{Г} \cdot l_{B,м} = 11,79 \cdot 0,17 = 2,004 \text{ (В)}.$$

$$U_{Г,м} = E_B \cdot l_{Г,м} = 11,79 \cdot 10^3 \cdot 0,21 = 2475,9 \text{ (В)}.$$

4. Визначається допустиме коливання напруги живлення

$$U_D = U_{ж} + \frac{U_{ж} \cdot N}{100} \text{ (В)}, \quad (6.4)$$

На ділянці системи живлення:

$$U_{ДЖ} = U_{Ж} + \frac{U_{Ж} \cdot N}{100} = 220 + \frac{220}{100} \cdot 5 = 231 [В].$$

На ділянці блоку перетворення:

$$U_{ДМ} = U_{М} + \frac{U_{М} \cdot N}{100} = 12 + \frac{12}{100} \cdot 5 = 12,6 [В].$$

5. Визначаються коефіцієнти безпеки

$$K_{БВ} = 20 \cdot \lg \frac{U_{Д}}{U_{В}},$$

$$K_{БГ} = 20 \cdot \lg \frac{U_{Д}}{U_{Г}}. \quad (6.5)$$

Для ділянки живлення:

$$K_{БВЖ} = 20 \cdot \lg \frac{U_{ДЖ}}{U_{ВЖ}} = 20 \cdot \lg \frac{231}{1,08} = 46,63 \geq 40 (\text{дБ});$$

$$K_{БГЖ} = 20 \cdot \lg \frac{U_{ДЖ}}{U_{ГЖ}} = 20 \cdot \lg \frac{231}{1760} = -17,63 \leq 40 (\text{дБ});$$

Для ділянки блоку:

$$K_{БВМ} = 20 \cdot \lg \frac{U_{ДМ}}{U_{ВМ}} = 20 \cdot \lg \frac{12,6}{0,272} = 33,31 \leq 40 (\text{дБ});$$

$$K_{БГМ} = 20 \cdot \lg \frac{U_{ДМ}}{U_{ГМ}} = 20 \cdot \lg \frac{12,6}{336} = -28,6 \leq 40 (\text{дБ});$$

6. Результати розрахунків заносимо в таблицю 6.10

Таблиця 6.10 Результати розрахунку коефіцієнтів безпеки радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання

Ділянка	$U_{Д}, В$	$E_{В}, В/м$	$E_{Г}, В/м$	$U_{В}, В$	$U_{Г}, В$	$K_{БВ}$	$K_{БГ}$
Живлення	231	16000	16	1,08	1760	46,63	-17,63
Блок перетворення	12,6	16000	16	0,272	336	33,31	-28,6

7. Дані таблиці аналізуємо і робимо висновок

Коефіцієнти безпеки менше 40 дБ, тому необхідно застосовувати заходи по підвищенню стійкості роботи радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання, серед яких найдієвіший це екранування.

6.3.3 Розробка заходів по підвищенню стійкості роботи радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання в умовах дії електромагнітного імпульсу

Визначається перехідне гасіння енергії електричного поля екраном (А, дБ). Для сталевого екрану визначається за допомогою формули [92]

$$A = 5,2 \cdot t \cdot \sqrt{f} \text{ [дБ]}, \quad (6.6)$$

де t – товщина стінки екрану, см;

f – частота $f=15000$ Гц.

Для ділянки живлення

$$A_{ГЖ}=40-(-17,63)=47,63 \text{ (дБ)},$$

$$t_{\text{жс}} = \frac{A_{ГЖ}}{5,2\sqrt{f}} = \frac{47,63}{5,2\sqrt{15000}} = 0,074 \text{ (см)}.$$

Для ділянки блоку

$$A_{ВМ}=40-33,31=6,69 \text{ [дБ]},$$

$$t_1 = \frac{A_{ГЖ}}{5,2\sqrt{f}} = \frac{6,69}{5,2\sqrt{15000}} = 0,01 \text{ (см)};$$

$$A_{ГМ}=40-(-28,6)=68,6 \text{ [дБ]},$$

$$t_2 = \frac{A_{ГЖ}}{5,2\sqrt{f}} = \frac{68,6}{5,2\sqrt{15000}} = 0,11 \text{ (см)}.$$

В даному підрозділі була оцінена стійкість роботи радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання в умовах дії

іонізуючих випромінювань і електромагнітного імпульсу. В умовах дії іонізуючих випромінювань час роботи пристрою в цілому перевищив заданий час. В умовах дії електромагнітного імпульсу коефіцієнт безпеки для вертикальних струмопровідних частин дільниці живлення системи був більший за 40 дБ, в цьому випадку пристрій досить стійкий. Для горизонтальних струмопровідних частин дільниці живлення і для блоку перетворення коефіцієнт безпеки був менший за 40 дБ. Після застосування сталевого екрану не менше 1,1мм коефіцієнт безпеки став не менше 40 дБ і радіовимірний перетворювач температури став стійким до ЕМІ і може працювати без збоїв.

Висновки до розділу

Під час виконання цього розділу було розглянуто такі питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях, як технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення безпечної відстані при оптичному випромінюванні, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки при проведенні дослідження радіовимірального параметричного перетворювача оптичного випромінювання, безпека у надзвичайних ситуаціях.

ВИСНОВКИ

В результаті аналізу сучасних приладів для вимірювання потужності оптичного випромінювання виявлено необхідність створення приладу, що усував би виявлені недоліки і характеризувався високою точністю і чутливістю, впровадження якого у виробництво можна було б вважати доцільним.

Для практичної реалізації та промислового виробництва радіовимірювального приладу потужності оптичного випромінювання на основі оптико–частотних перетворювачів необхідно в подальшому провести їх математичне моделювання, експериментальне дослідження та апробацію нових технічних рішень.

Розглянуто математичну модель фоточутливого МОН–транзистора, яка відрізняється від існуючих тим, що вона враховує зміну електрофізичних параметрів (концентрації носіїв заряду в каналі транзистора, імпедансу каналу) приладу від потужності оптичного випромінювання, яке діє як зі сторони затвору, так і зі сторони каналу, внаслідок чого збільшується квантова ефективність, що приводить до підвищення чутливості.

У результаті математичного моделювання отримано аналітичні вирази, які можуть бути використані для інженерного розрахунку рівняння чутливості і функції перетворення, вольт–амперних характеристик радіовимірювальних приладів на основі оптичних перетворювачів, що забезпечить вибір оптимального режиму їх живлення.

Розрахунки на економічність приладу показали, що його впровадження у виробництво є економічно ефективним. Оскільки Ток < 3...5-ти років, то фінансування даного наукового дослідження фоточутливих пристроїв на основі квантових ям 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 охорони праці було розглянуто такі питання як безпека в надзвичайних ситуаціях, як технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення безпечної відстані при оптичному випромінюванні, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки при проведенні дослідження радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання, безпека у надзвичайних ситуаціях.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Викулин И. М. Полупроводниковые датчики / И. М. Викулин, В. И Стафеев. – М. : Советское радио, 1975. – 104 с.
2. Викулин И. М. Физика полупроводниковых приборов / И. М. Викулин, В. И Стафеев. – М. : Радио и связь, 1990. – 263 с.
3. Мікроелектронні перетворювачі фізичних величин : навчальний посібник / [за ред. З. Ю. Готри]. – Львів : Ліга-Прес, 2002. – Т. 1. – 475 с.
1. Костенко В. Л. Специализированные сети на основе твердотельных датчиков / В. Л. Костенко, С. О. Жаровцев, Г. А. Чигаев // Технология и конструирование в электронной аппаратуре (ТКЭА). – 2008. – № 2. – С. 14–16.
2. Кошовий М. Д. Пристрої та системи для вимірювання тиску / М. Д. Кошовий, Т. Г. Рожнова // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2005. – № 3. – С. 157–158.
3. Створення мікроелектронних датчиків нового покоління для інтелектуальних систем : монографія / [за ред. Я. І. Лепіха]. – Одеса : Астропринт, 2010. – 296 с.
4. Напівпровідникові оптичні та акустoeлектронні перетворювачі і системи : монографія / [за ред. С. В. Ленкова]. – Одеса : Астропринт, 2009. – 256 с.
5. Вимірювання температури: теорія та практика / [А. Т. Луцик, О. П. Гук, О. І. Лах, Б. І. Стадник]. – Л. : Бескід БІТ, 2006. – 559 с.
6. Осадчук В. С. Температурні та оптичні мікроелектронні частотні перетворювачі / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. Г. Вербицький. – Вінниця : Універсум–Вінниця, 2001. – 195 с.
7. Осадчук В. С. Индуктивный эффект в полупроводниковых приборах / Владимир Степанович Осадчук. – К. : Вища школа, 1987. – 155 с.
8. Осадчук В. С. Перетворювачі вологості / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик. – Вінниця : Універсум–Вінниця, 2003. – 208 с.
9. Осадчук В. С. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця : Універсум–Вінниця, 1999. – 275 с.
10. Осадчук В. С. Перетворювачі тиску і магнітного поля / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця : Універсум–Вінниця, 2005. – 207 с.
11. Осадчук В. С. Мікроелектронні перетворювачі температури з частотним виходом / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Н. С. Кравчук. – Вінниця : Універсум–Вінниця, 2007. – 162 с.
12. Осадчук В. С. Генератори електричних коливань на основі транзисторних структур з від'ємним опором / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, А. О. Семенов. – Вінниця : Універсум–Вінниця, 2009. – 184 с.

13. Осадчук А. В. Фоточувствительные преобразователи на основе структур с отрицательным сопротивлением / Александр Владимирович Осадчук. – Винница : Континент, 1998. – 129 с.
14. Осадчук О. В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором / Олександр Володимирович Осадчук. – Вінниця : Універсум–Вінниця, 2000. – 302 с.
15. Интеллектуальні перетворювачі: особливості та проблеми проектування / В. О. Романов, В. М. Груша, Д. М. Артеменко [та ін.] // Комп'ют. засоби, мережі та системи : зб. наук. пр. – 2008. – № 7. – С. 146–152.
16. Морозовская А. Н. Наноразмерность материалов в современных микросистемных технологиях / А. Н. Морозовская, Г. С. Свечников // *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*. – 2010. – Т. 1 (7), – № 3. – С. 14–26.
17. Шарапов В. М. Преобразователи с пьезотрансформаторами в схемах электрических фильтров верхней частоты / В. М. Шарапов, В. В. Туз, Ж. В. Сотула и др. / Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2010. – № 2. – С. 96–99.
18. Шварц Ю. М. Микроэлектронные термодиодные перетворювачі и их применение в экстремальной электронике / Ю. М. Шварц, М. М. Шварц / *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. – 2005. – № 3. – С. 30–33.
19. Аш Ж. Датчики измерительных систем: в 2 т. / Ж. Аш. – М. : Мир, 1992. – Т1. – 424 с.
20. Виглеб Г. Датчики / Г. Виглеб – М. : Мир, 1989. – 196 с.
21. Касимов Ф. Д. Магнитокоммутируемая микросхема и датчик измерения скорости ветра на ее основе / Ф. Д. Касимов, Р. А. Ибрагимов, Н. М. Свихнушин / *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. – 2009. № 2. – С. 21–24.
22. Пат. 2002017607 США, МКИ G 01J 5/00. Domain engineered ferroelectric optical radiation detector having multiple domain regions for acoustic dampening / Lehman J. H., Aust J. A. (США). – № 0849959 ; заявл. 04.05.2001 ; опубл. 14.02.2002. – 19 с.
23. Новицкий П. В. Цифровые приборы с частотными датчиками / П. В. Новицкий, В. Г. Кноринг, В. С. Гутников. – М. : Энергия, 1970. – 424 с.
24. Поляков Ю. А. Синтез и оптимизация газовых перетворювачов раннего обнаружения малых концентраций водорода / Ю. А. Поляков, А. Е. Иванов, Д. Г. Кабанов // *Технологии техносферной безопасности*. – 2010. – № 4 (32).
25. 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.

26. Геролд Г. Современные интеллектуальные измерительные преобразователи / Г. Геролд // Экспресс-информация: Контрольно-измерительная техника. – М. : ВИНТИ, – 1990. – № 28. – С. 1–8.
27. Бабаян Р. Р. Преобразователи неэлектрических величин с частотным выходом / Р. Р. Бабаян // Приборы и системы управления. – 1996. – № 11. – С. 24–27.
28. Физика твердого тела: энциклопедический словарь: в 2 т. / под ред. В. Г. Барьяхтара ; Национальная академия наук Украины. – К. : Наукова думка, 1998. – 648 с.
29. Литвин І. С. Оптоелектронні перетворювачі для попередньої обробки інформації в системах управління // Вісн. Держ. ун-ту «Львівська політехніка». – 1998. – № 325. – С. 97–100.
30. Грязин Г. Н. Оптико-электронные системы для обзора пространства. – Л. : Машиностроение, 1988. – 218 с.
31. Техническое зрение роботов / В. И. Мошкин, А. А. Петров, В. С. Титов и др. ; под общ. ред. Ю. Г. Якушенкова. – М. : Машиностроение, 1990. – 272 с.
32. Физические основы создания многоэлементных полупроводниковых приемников излучения / В. В. Данилов, В. В. Жук, А. Ю. Липинский, А. Н. Рудякова // Вісник Донецького університету. Природничі науки, – 2005. – Вип. 2. – С. 135–156.
33. А. Г. Швец. Некоторые аспекты схемотехники оптикоэлектронных перетворювачов / А. Г. Швец, И. М. Паренко // Sensor Electronics and Microsystem Technologies. – 2006. – № 4. – С. 24–27.
34. У. Томпкинс. Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с компьютерами IBM PC / У. Томпкинс, Дж. Уэбстер. – М. : Мир, 1992. – 592 с.
35. 63. Трищенко М. А. Фотоприемные устройства и ПЗС. Обнаружение слабых оптических сигналов. – М. : Радио и связь, 1992. – 400 с.
36. У. Тсанг. Техника оптической связи : Фотоприемники / : У. Тсанг. – М. : Мир, 1988. – 526 с.
37. Бусурин В. И. Волоконно-оптические датчики : физические основы, вопросы расчета и применения / В. И. Бусурин, Ю. Р. Носов. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
38. А. с. 911173 СССР, МКИ G 01J 1/44. Фотодатчик / В. М. Гладаревский, Я. А. Вакулюк, И. К. Дзус, М. И. Коновал – № 2947257/18–25 ; заявл. 27.06.80 ; опубл. 07.03.82, Бюл. № 9. – 3 с.
39. Добровольский Ю. Г. Кремниевый термостатический р-і-п фотодиод / Ю. Г. Добровольский // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2003. – № 4. – С. 39–41.

40. Охлаждители Пельте повышенной надежности для фотоприемников / А. А. Ащеулов, И. С. Романюк, Ю. Г. Добровольский [и др.] // Прикладная физика. – 2003. Вып. 2. – С. 114–117.
41. Пат. 39347А УКРАЇНА, МПК 6 H01L 31/06. Фотоэлектричний приймач лазерного випромінювання / А. А. Ащеулов, Ю. Г. Добровольський, І. С. Романюк, заявник та патентовласник Чернів. держ. унів. ім. Ю. Федьковича. – № 2000052887 ; заявл. 22.05.2000 ; опубл. 15.06.2001, Бюл. № 5.
42. Пат. 87584 УКРАЇНА, МКІ G 01 J 1/44. Мікроелектронний перетворювач оптичної потужності / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. М. Ільченко, С. В. Барабан, заявник та патентовласник Вінн. нац. техн. ун–т. – № a200712812 ; заявл. 19.11.2007 ; опубл. 27.07.2009 ; Бюл. № 14.
43. Долманов И. Н. Полупроводниковые приборы с резонансным туннелированием электронов / И. Н. Долманов, В. И. Толстыхин, В. Г. Еленский / Зарубежная радиоэлектроника. – 1990. – № 7. – С. 66–89.
44. Патент США № 5939742, МПК5 H01L 31/062. Field-effect photo-transistor / Aristides A. Yiannoulos. – № 08/798327 ; заявл. 10.02.1997 ; опубл. 17.08.1999.
45. Integration of a Resonant Tunneling Diode and an Optical Communications Laser / Slight T. J., Ironside C. N., Stanley C. R. [та інш.] // IEEE Photonics Technology Letters. – 2006. – V. 18. № 14. – P. 1518–1520.
46. Andrés Cuevas. The early history of bifacial solar cells / Andrés Cuevas // Proc. 14th Photovoltaic Science and Engineering Conf., Bangkok, – 2004. – P. 719–722.
47. 81. Hunter Fanney A. Building integrated photovoltaic test facility/ Hunter Fanney A., Dougherty Brian P. // International Solar Energy Conference, Proceedings of Solar 2000: Solar Powers Life, Share the Energy (Madison, Wisconsin, USA). – 2000. – P. 1–9.
48. Smestad G. Luminescence and current–voltage characteristics of solar cells and optoelectronic devices / Smestad G., Ries H. // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 1992. – V. 25. – P. 51–71.
49. Пат. 36423 УКРАЇНА, МКІ 6 G01J 5/24. Фотоприймальний пристрій / О. Б. Шевчук, заявник та патентовласник Укр. держ. акад. зв'язку ім. О. С. Попова. – № 99126859 ; заявл. 16.12.99 ; опубл. 16.04.2001, Бюл. № 3/Пат. 85367 УКРАЇНА, МПК 6 H01G 9/20. Фоточутливий пристрій / Ю. Ю. Бачеріков, заявник та патентовласник Інст. фізики напівпров. ім. В. Є. Лашкарьова НАНУ. – № 2004032273 ; заявл. 29.03.2004 ; опубл. 26.01.2009, Бюл. № 2.
50. Пат. 2296303 РФ, МПК G01J 1/44. Photoreceiver / А. Н. Червяков, Ю. И. Зеленюк, Л. Н. Костяшкин, В. П. Семенов, С. Ф. Стрепетов, заявитель и патентообладатель Федер. гос. унит. предпр. «Гос. Рязанский приборн. завод». – № 2005134336/28 ; заявл. 07.11.2005 ; опубл. 27.03.2007, Бюл. № 9.

51. Пат. 2244365 РФ, МПК H01L 31/09. Фотоприемное устройство / А. В. Гусаров, Е. Б. Володин, И. Ю. Ларцев, О. В. Смолин, Е. В. Сусов, заявитель и патентообладатель Федер. гос. унит. предпр. «Альфа». – № 2003135570/28 ; заявл. 09.12.2003 ; опубл. 10.01.2005, Бюл. № 1.
52. Пат. 40236 УКРАЇНА, МКИ G 01K 7/01. Мікроелектронний вимірювач температури / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, заявник та патентовласник Він. нац. техн. унів. – № 2000106038 ; заявл. 26.10.2000 ; опубл. 16.07.2001, Бюл. № 6.
53. Носов Ю. Р. Фотоприемники в оптоэлектронике / Ю. Р. Носов. – М. : ЦНИИ «Электроника», 1986. – С. 24–42.
54. Бабичев Г. Г. Преобразователь давления с частотным выходом на основе однопереходных тензотранзисторов / Г. Г. Бабичев [и др.] // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2004. – № 3. – С. 48–51.
55. Викулин И. М. Фотоприемник на основе однопереходного и полевого фототранзисторов / И. М. Викулин, Ш. Д. Курмашев, В. А. Мингалев // Sensor Electronics and Microsystem Technologies. – 2006. – № 4. – С. 28–30.
56. Викулин И. М. Многофункциональный перетворювач с цифровой индикацией / И. М. Викулин, С. В. Ильин, В. А. Мингалев // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2003. – № 6. – С. 46–47.
57. Пат. 40903 УКРАЇНА, МКИ G 01R 27/26. Фоточутливий гіраторний вимірювальний перетворювач / П. А. Молчанов, А. В. Бурехін, П. С. Муляр, заявник та патентовласник Він. нац. техн. унів. – № 2000105974 ; заявл. 23.10.2000 ; опубл. 15.08.2001, Бюл. № 7.
58. Малахов Б. А. К вопросу об эффекте фотостимулированной генерации колебаний тока в полупроводниковой структуре / Б. А. Малахов, Г. В. Степанов // Письма в ЖЭТФ. – 1984. – Т. 39. № 3. – С. 138–140.
59. Иллис Б. Г. Инжекционная неустойчивость в полупроводниковых структурах с р–п переходом / Б. Г. Иллис, О. Д. Кнаб, В. Д. Фролов // IX Всесоюзная конференция по физике полупроводников : тезисы докладов. – Кишинев, 1988. – Ч. 1. – С. 111–112.
60. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы : теория и эксперимент / А. Фаренбрух, Р. Бьюб; под ред. М. М. Колтуна. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 280 с.
61. Верещагин И. К. Введение в оптоэлектронику / И. К. Верещагин, Л. А. Косяченко, С. М. Кокин. – М. : Высшая школа, 1991. – 191 с.
62. Зуев В. А. Фотоэлектрические МОН–приборы / В. А. Зуев, В. Г. Попов. – М. : Радио и связь. – 1983. – 160 с.

63. . Зи С. Физика полупроводниковых приборов : в 2 кн. Кн. 2 / С. Зи. – М. : Мир, 1984. – 456 с.
64. Гусев В. Г. Электроника / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. – М. : Высш. школа, 1982. – 495 с.
65. Разевиг В. Д. Применение программ P-CAD и Pspice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ / В. Д. Разевиг. – М. : Радио и связь, 1992. – Вып. 2: Модели компонент аналоговых устройств. – 72 с.
66. Mathew X. Photovoltaics, Solar Energy Materials / X. Mathew // Solar Energy Materials & Solar Cells. – 2009. – № 1. – С. 1.
67. Ферри Д. Электроника ультрабольших интегральных схем / Д. Ферри, Л. Эйкерс, Э. Гринич. – М. : Мир, 1991. – 327 с.
68. Березин А. С. Технология и конструирование интегральных микросхем: Учебное пособие для вузов / А. С. Березин, О. Р. Мочалкина. – М. : Радио и связь, 1992. – 320 с.
69. Коледов Л. А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок / Л. А. Коледов. – М. : Радио и связь, 1989. – 400 с.
70. Chu F. Chemische Sensoren : Grundlagen, Trends und Anwendungen / F. Chu, K. Zucholl // Technische Rundschau. – 1988. – № 42. – P. 154–159.
71. Сысоева С. Актуальные технологии и применение датчиков автомобильных систем активной безопасности. Часть 1. Новые технологии и применение датчиков автомобильных систем помощи водителю / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2006. – № 8.
72. Корнеев В. В., Киселев А. В. Современные микропроцессоры / В. В. Корнеев, А. В. Киселев. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб. : БХВ-Петербург, 2003. – 448 с.
73. Мирский Г. Я. Электронные измерения / Г. Я. Мирский. – М. : Радио и связь, 1986. – 440 с.
74. Сысоева С. Датчики. Актуальные технологии и применения датчиков автомобильных систем активной безопасности. Часть 3. Элементная база датчиков света и цвета / С. Сысоева // Компоненты и технологии. 2006. № 10.
75. Шалимов Ю. Н. Современная альтернативная энергетика с точки зрения экономики и экологии / Ю. Н. Шалимов, А. Л. Гусев, Г. А. Мхиторян, [и др.] // Альтернативная энергетика и экология. – 2010. – № 10. – С. 114–139.
76. Козловський В. О. Основи підприємництва. Курс лекцій. Част. 1. / В. О. Козловський – Вінниця : ВНТУ, 2005. – 196 с.
77. Козловський В. О. Основи підприємництва. Курс лекцій. Част. 2 / В. О. Козловський – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 184 с.

78. Козловський В. О. Інноваційний менеджмент : Навчальний посібник / В. О. Козловський – Вінниця : ВНТУ, 2007. – 210 с.
79. 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.
80. Козловський В. О., Лесько О. Й. Інноваційний менеджмент: Практикум / В. О. Козловський, О. Й. Лесько. – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 166 с.
81. ГОСТ 12.0.003-74.ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
82. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
83. ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення.
84. Пособие по расчету и проектированию, естественного, искусственного и совмещенного освещения НИИСФ – М.: Стройиздат. 1985. – 384 с.
85. ДСН 3.3.6-037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
86. ДСН 3.3.6.03999. Державні санітарні норми виробничої та загальної вібрацій.
87. ГОСТ 12.2.032-78. ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
88. Березюк О. В. Охорона праці. Підсумкова державна атестація спеціалістів, магістрів в галузях електроніки, радіотехніки, радіоелектронних апаратів та зв'язку : навчальний посібник / О. В. Березюк, М. С. Лемешев. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 104 с.
89. ДНАОП 0.00-1.21-98 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. – К. : Держнаглядохоронпраці, 1998. – 382 с.
90. ДБН В.2.5-27-2006. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд.
91. ДБН В.1.1.7-2002. Пожежна безпека об'єктів будівництва.
92. НАПБ Б.03.001-2004. Типові норми належності вогнегасників.
93. СНиП 2.09.02-85. Противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений.
94. 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 параметричний перетворювач оптичного
випромінювання
08–36.МКР.008.00.000 ТЗ

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

Розробив студент гр. РТ–18м д/в
_____ Патлатюк М.Р.
“ ____ ” _____ 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 підвищення чутливості радіовимірювальних приладів на основі оптичних перетворювачів за рахунок перетворення електричного сигналу в частотний з використанням реактивних властивостей транзисторних структур з від’ємним опором.

Об’єктом дослідження є процес перетворення потужності оптичного випромінювання у частотний сигнал у чутливих напівпровідникових структурах.

Предмет дослідження – характеристики радіовимірювальних приладів на основі оптичних перетворювачів з частотним виходом на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від’ємним опором.

Основними завданнями роботи є:

- проаналізувати існуючі прилади і перетворювачі оптичного випромінювання та обґрунтувати переваги радіовимірювальних приладів на основі оптичних перетворювачів з частотним виходом по відношенню до існуючих;
- розглянути метод побудови радіовимірювальних приладів на основі оптичних перетворювачів з використанням транзисторних структур з від’ємним опором;
- розробити математичні моделі радіовимірювальних приладів на основі оптичних перетворювачів з частотним виходом, на основі яких отримати аналітичні залежності вольт–амперних характеристик, функції перетворення та рівняння чутливості вимірювального каналу приладу;
- виконати експериментальну перевірку математичних моделей і дослідити властивості радіовимірювальних приладів на основі оптичних перетворювачів від впливу оптичного випромінювання;
- розробити мікропроцесорну систему вимірювання потужності оптичного випромінювання з дистанційною передачею результатів із використанням

радіовимірювальних приладів на основі оптичних перетворювачів з використанням транзисторних структур з від'ємним опором;
– дослідження питань охорони праці.

3. ДжЕРЕЛА РОЗРОБКИ

1. Осадчук В. С. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця : Універсум–Вінниця, 1999. – 275 с.
2. Осадчук В. С. Перетворювачі тиску і магнітного поля / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця : Універсум–Вінниця, 2005. – 207 с.
3. Осадчук В. С. Мікроелектронні перетворювачі температури з частотним виходом / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Н. С. Кравчук. – Вінниця : Універсум–Вінниця, 2007. – 162 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 Патлатюк Микола Русланович

5 ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ МКР

Розглянуто метод вимірювання оптичної потужності на основі залежності реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором від оптичної потужності, який відрізняється від існуючих тим, що у вимірювальному каналі радіовимірювальних приладів відбувається перетворення потужності оптичного випромінювання у частоту.

Представлено математичні моделі радіовимірювальних приладів на основі оптичних перетворювачів для вимірювання потужності оптичного випромінювання, які відрізняються від існуючих тим, що в них враховано вплив оптичної потужності на елементи еквівалентних схем приладів на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором.

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	РозробленеТЗ	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 схему фотореактивного МОН–транзистора.
- Розроблено електричну схему приладу на основі біполярного транзистора та двозатворного МОН–транзистора з сонячною батареєю.
- Розроблено електричну схему приладу на основі біполярного та МОН–транзистора з двостороннім освітленням каналу.
- Розроблено структурну схему радіовимірювального приладу потужності оптичного випромінювання.
- Результати комп'ютерного моделювання радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання.
- Проведено результати дослідження радіовимірювального параметричного перетворювача оптичного випромінювання.
- Проведено результати моделювання перетворювача оптичного випромінювання.
- 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 приладу на основі біполярного транзистора та двозатворного МОН–транзистора з сонячною батареєю;
- схему фотореактивного МОН–транзистора;

- структурну схему радіовимірювального приладу потужності оптичного випромінювання;
- дослідження питань охорони праці.

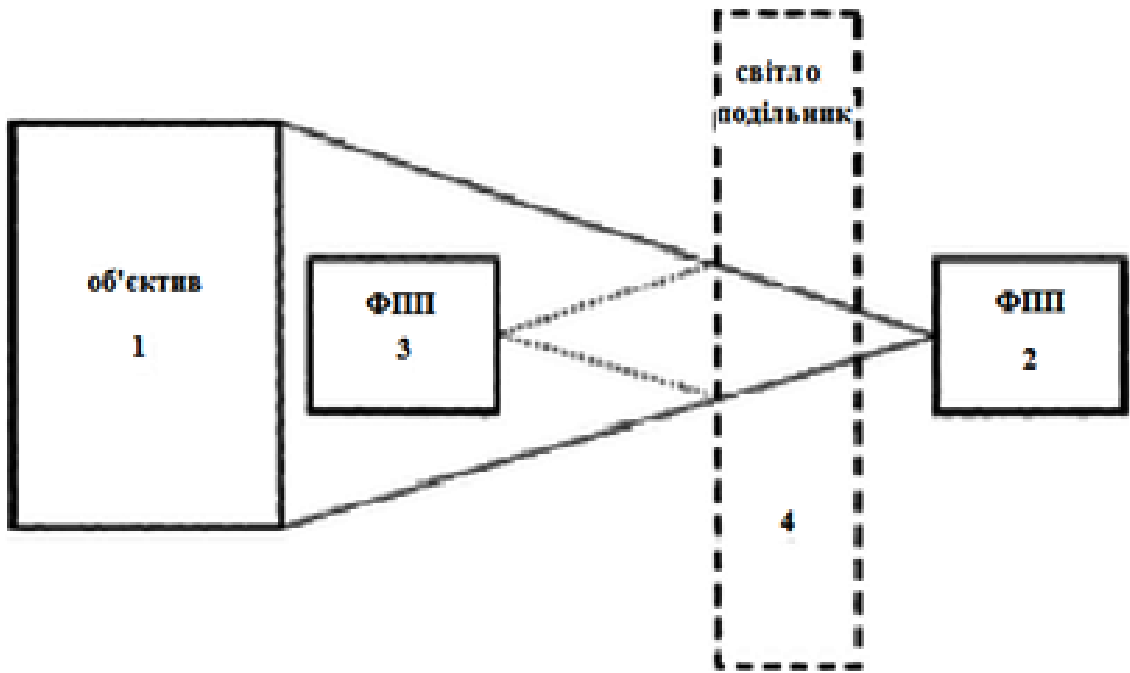
11. ВИМОГИ ЩОДО ТЕХНІЧНОГО ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ З ОБМЕЖЕНИМ ДОСТУПОМ

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

Додаток Б
(обов'язковий)

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПАРАМЕТРИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ
ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ**

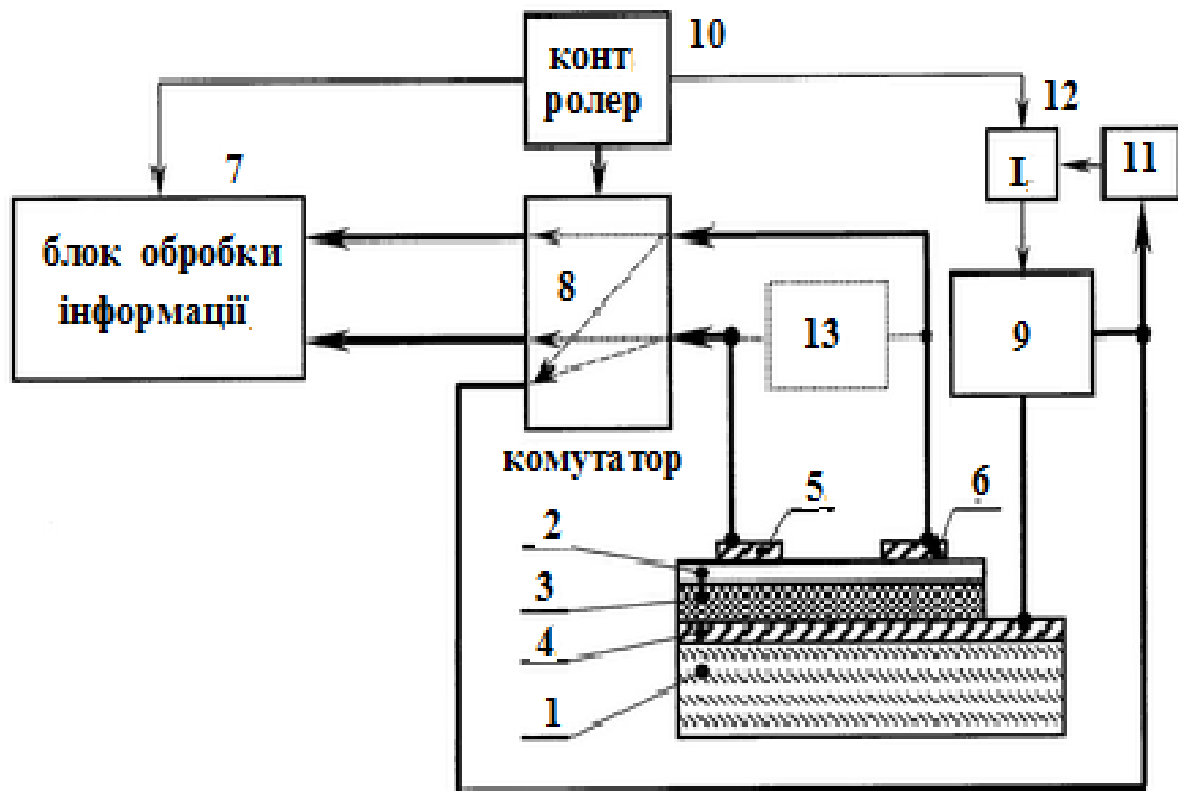
Пристрій для виявлення та діагностування
джерел оптичного випромінювання



Додаток В
(обов'язковий)

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПАРАМЕТРИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ
ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ**

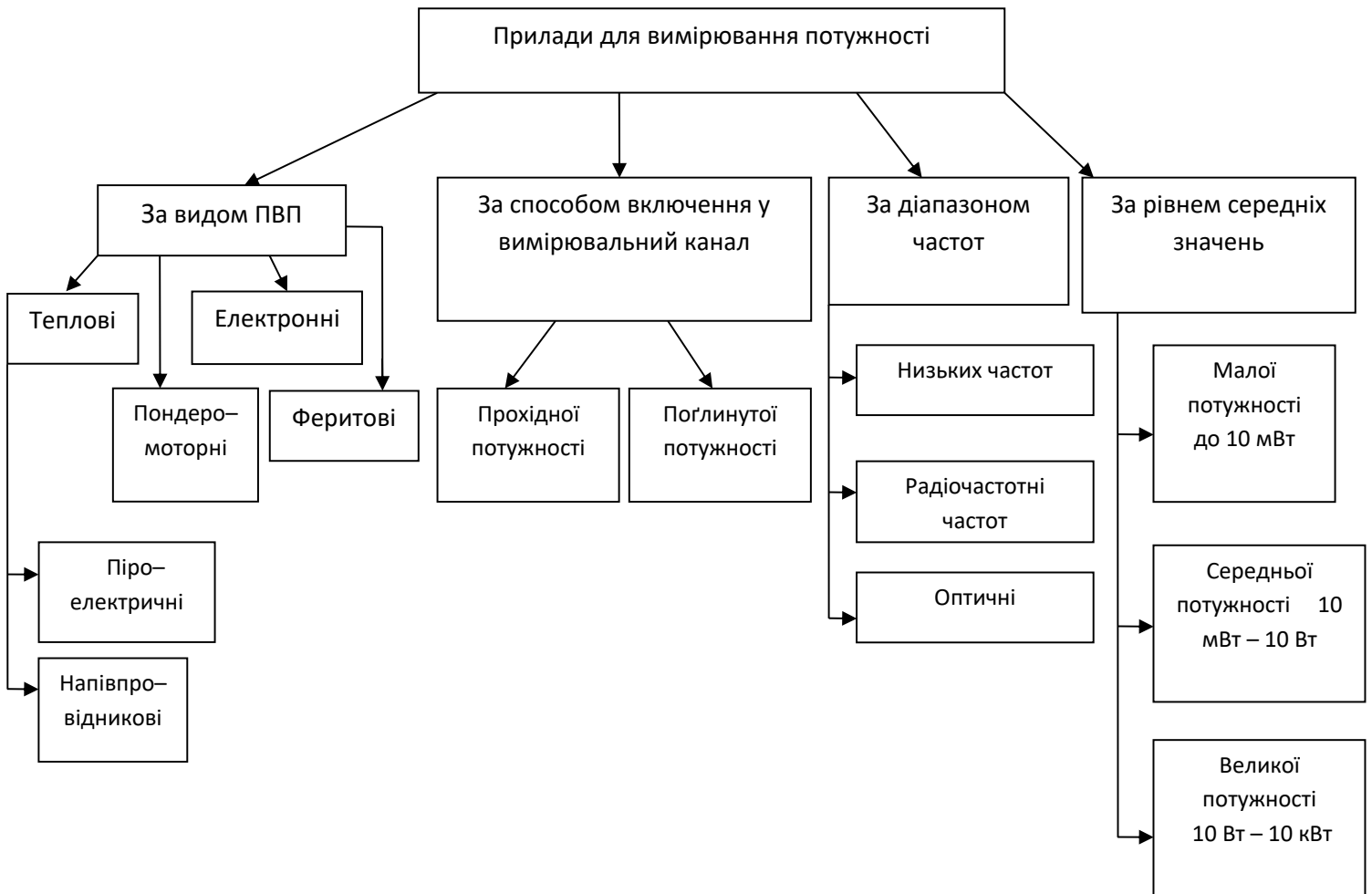
Система контролю оптичного випромінювання



Додаток Д
(обов'язковий)

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПАРАМЕТРИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ
ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ**

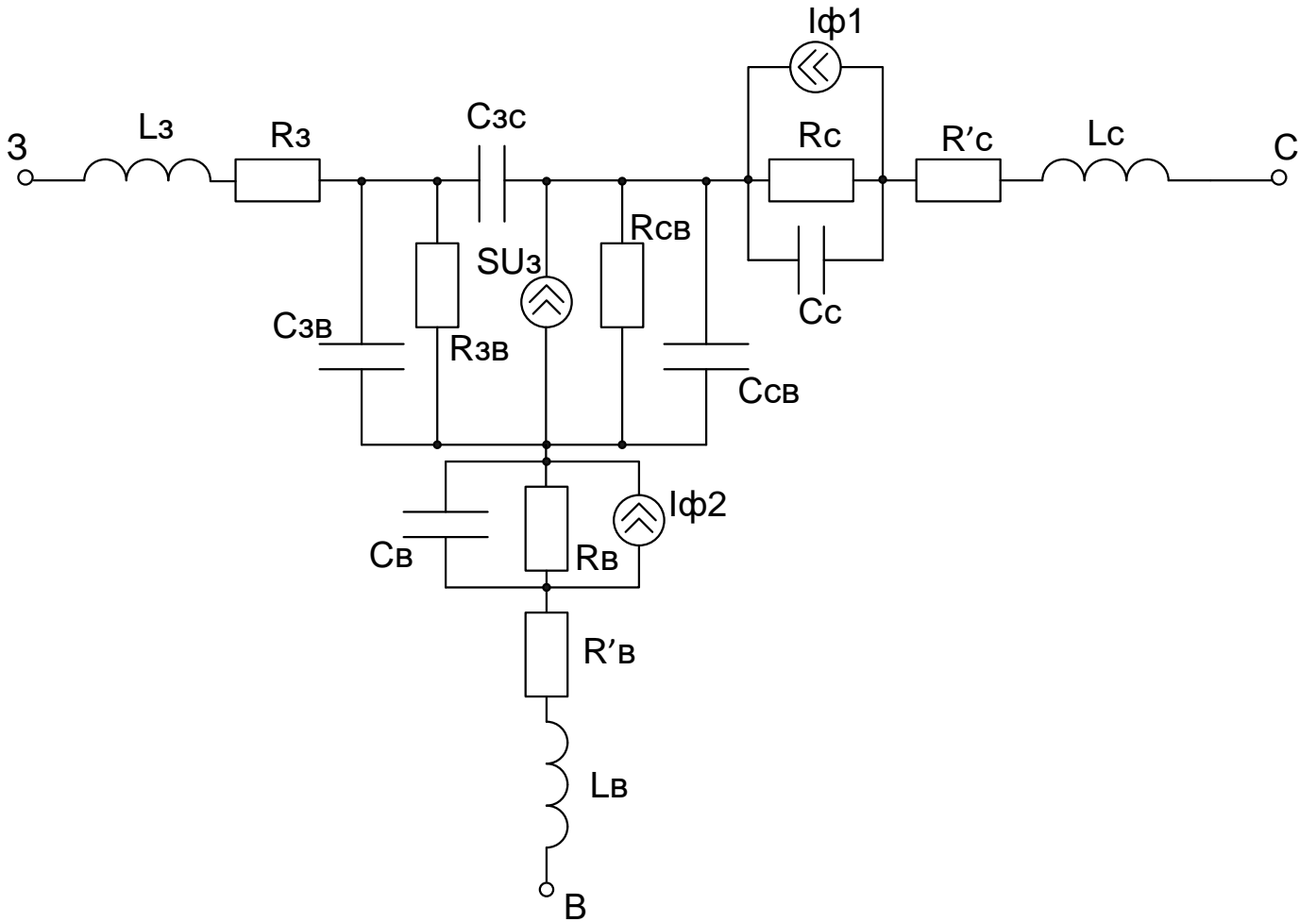
Класифікація приладів для вимірювання



Додаток Е
(обов'язковий)

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПАРАМЕТРИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ
ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ**

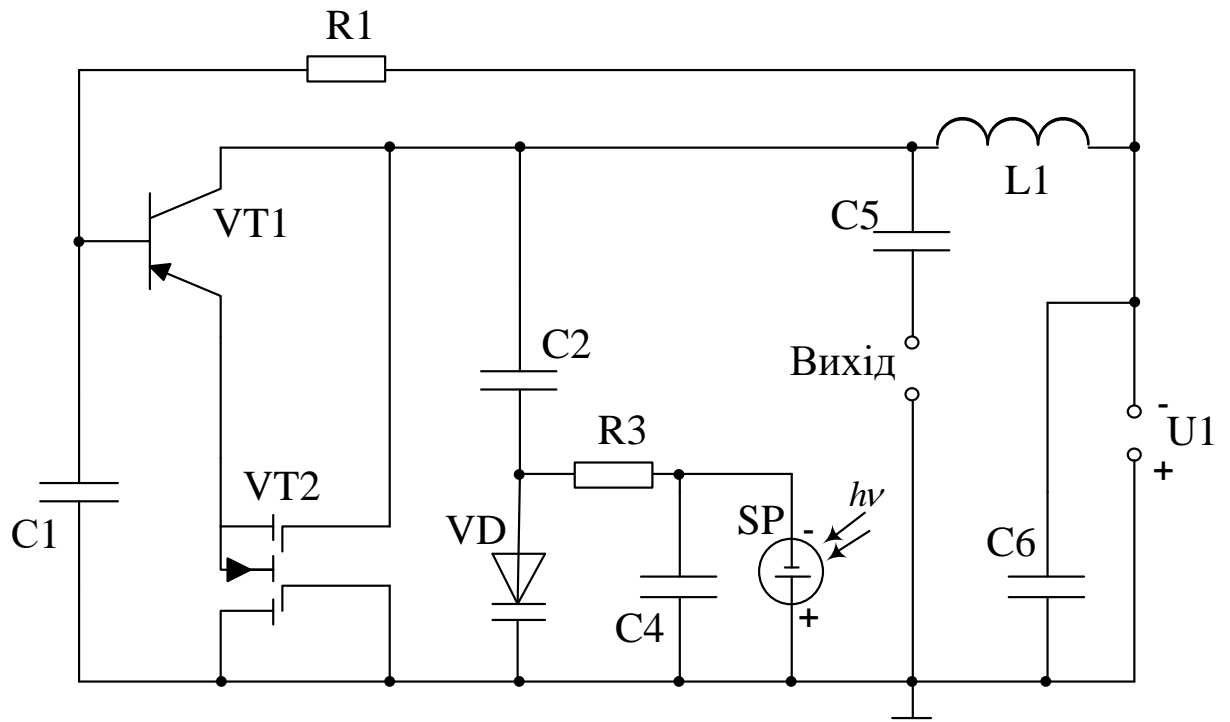
Еквівалентна схема фотореактивного МОН–транзистора



Додаток Ж
(обов'язковий)

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПАРАМЕТРИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ
ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ**

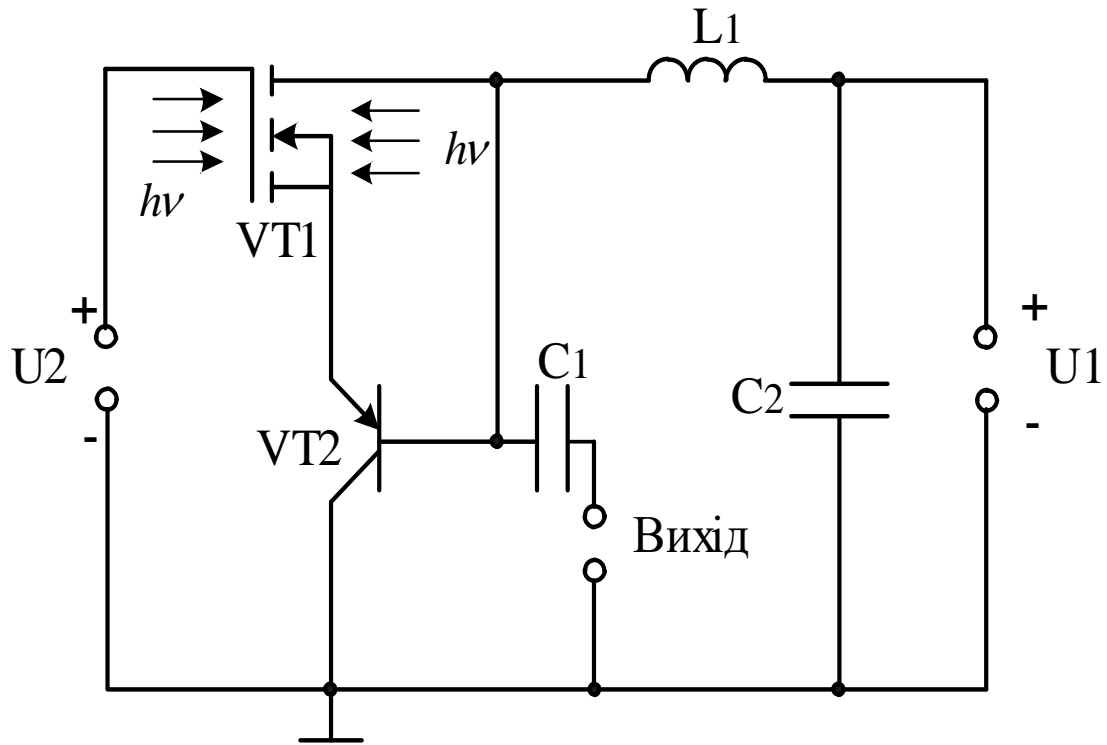
Електрична схема приладу на основі біполярного транзистора та двозатворного
МОН–транзистора з сонячною батареєю



Додаток К
(обов'язковий)

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПАРАМЕТРИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ
ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ**

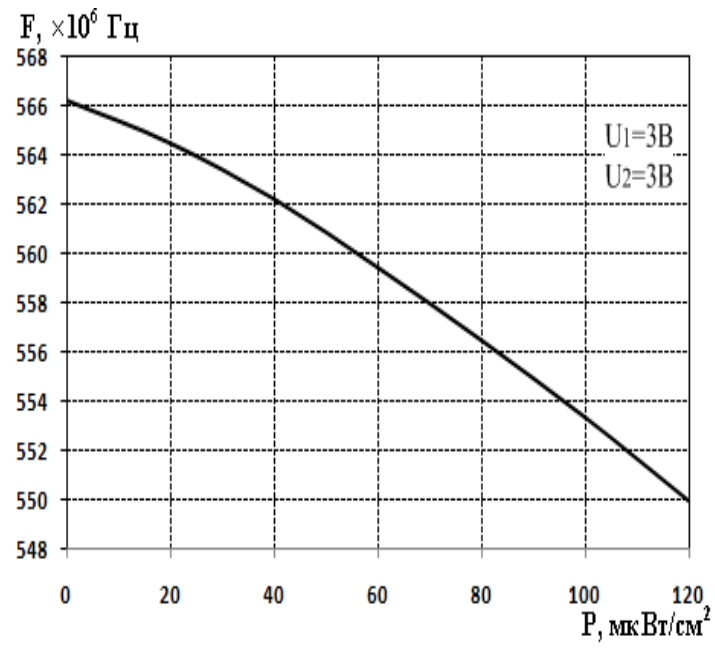
Електрична схема приладу на основі біполярного та МОН–транзистора з
двостороннім освітленням каналу



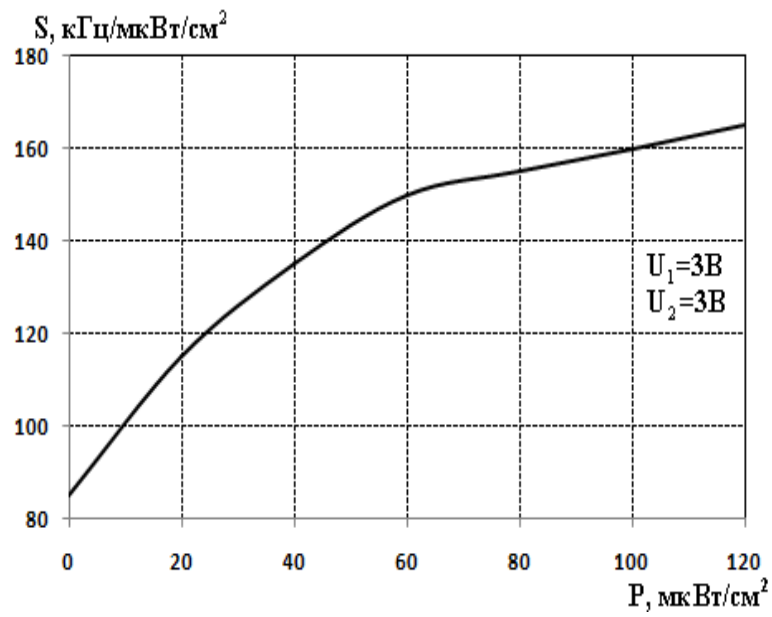
Додаток Л
(обов'язковий)

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПАРАМЕТРИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ
ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ**

Теоретична функція перетворення вимірювального каналу приладу (а) та залежність чутливості вимірювального каналу приладу від зміни величини потужності оптичного випромінювання (б)



а)



б)

Додаток М
(обов'язковий)

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПАРАМЕТРИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ
ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ**

Структурна схема радіовимірювального приладу потужності оптичного
випромінювання

