**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**
**ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**
**ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ**
**ім. Ю. М. Потебні**

**Кафедра електроніки, інформаційних систем**
**та програмного забезпечення**
(повна назва кафедри )

# Кваліфікаційна робота

*перший(бакалаврський)*
(рівень вищої освіти )

на тему *«Розробка пожежного сповіщувача для електронних пристроїв»*

Виконав: студент (ка) *4* курсу, групи *6.1763-с2*
спеціальності *153 (176) Мікро- та наносистемна техніка*
(код і назва спеціальності)
освітньої програми *Мікро- та наносистемна техніка*
(код і назва освітньої програми)
*Бельмега С.В.*
(ініціали та прізвище)

Керівник *професор кафедри ЕІСПЗ, доцент, к.т.н. Ніконова З.А.*
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент *інженер-конструктор Конструкторського бюро Колосова Григор'єва І.К.*
'(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя

2026

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**
**ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**
**ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ**
**ім. Ю. М. Потебні**

Кафедра електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
(перший (бакалаврський) рівень
Спеціальність 153 (176) Мікро- та наносистемна техніка
(назва)
Освітня програма Мікро- та наносистемна техніка
(шифр)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**
Завідувач кафедри Т. В.Критська
«03» червня 2026 року

**З А В Д А Н Н Я**
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА ЗДОБУВУЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ**

*Бельмезі Сергію Васильовичу*
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи *Розробка пожежного сповіщувача для електронних пристроїв*
керівник кваліфікаційної роботи бакалавра *Ніконова З.А., к.т.н.,доцент*
( прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від «*23» 12. 2025 р. № 1830-с*
2. Строк подання студентом кваліфікаційної роботи бакалавра *03.06.2026р.*
3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи бакалавра*: пожежний сповіщувач: фотодіод, живлення від батареї 9В; незначні габаритні розміри; звукова та світлова індикація.*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *1 Фотодіод. Параметри та характеристики 2 Розробка пожежного датчика на основі фотодіода для захисту побутових електроприладів 3 Охорона праці та техногенна безпека*

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

*Л1 Структурна схема пожежного сповіщувача Л2 Схема електрична принципова Л3 Топологія друкованої плати пожежного датчика*

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи бакалавра

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата завдання прийняв |
|---|---|---|
| I | *Ніконова З.А.* | *23.02.2026* |
| II | *Ніконова З.А.* | *13.05.2026* |
| III | *Ніконова З.А.* | *30.05.2026* |
| | | |
| | | |

7. Дата видачі завдання *20.10.2025р.*

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра | строк виконання етапів кваліфікаційної роботи бакалавра | Примітка |
|---|---|---|---|
| 1 | *Аналіз літератури за темою кваліфікаційної роботи* | *03.11.25 - 30.12.25* | |
| 2 | *Написання першого розділу* | *05.01. -23.02.* | |
| 3 | *Розробка структурної схеми пожежного сповіщувача* | *24.02. -06.04.* | |
| 5 | *Розробка схеми електричної принципової датчика* | *07.04. -01.05.* | |
| 6 | *Розробка топології друкованої плати* | *02.05. -13.05.* | |
| 7 | *Розділ охорони праці та техногенної безпеки* | *14.05. -21.05.* | |
| 8 | *Оформлення пояснювальної записки, виконання креслень* | *22.05. -30.05.* | |

студент _____ *Бельмега С.В.*
( підпис ) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи (проекту) _____ *Ніконова З.А.*
( підпис ) (прізвище та ініціали)

**Нормоконтроль пройдено**

Нормоконтролер _____ *Верьовкін Л. Л.*
( підпис ) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота містить 61 сторінку, 15 рисунків, 2 таблиці, 20 джерел літератури.

Об’єкт дослідження – фотоприймальні пристрої, датчики ІЧ випромінювання.

Мета роботи – розробка пожежного датчика на основі фотодіода для захисту електронних приладів.

Задачі роботи: провести аналіз конструкцій та принципу роботи пожежних датчиків; розробити схему електричну принципову пожежного сповіщувача; розробити топологію друкованої плати.

Методика досліджень – моделювання приладу за допомогою програмного забезпечення Every Circuit, розробка топології печатної плати за допомогою Sprint Layout.

Короткий виклад результатів досліджень – розроблено багатофункціональний пожежний датчик на базі кремнієвого pin- фотодіода, що має світлову, звукову індикацію та незначні габаритні розміри.

Прогнозні пропозиції – запропонований пристрій може використовуватися як пожежний сповіщувач побутової електронної апаратури, в системі світлової сигналізації, як датчик переривання променю, в системах сигналізація відкриття проходу.

ФОТОДІОД, ДАТЧИК, PIN-ФОТОДІОД, ПОЖЕЖА, КРЕМНІЙ, СХЕМА, ТОПОЛОГІЯ

Кваліфікаційна робота виконана на кафедрі електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення в період з 03.11.2025 по 29.05.2026 р.

Зміст

ВСТУП ..... 6

1 ФОТОДІОД. ПАРАМЕТРИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ ..... 7

1.1 Фотоефект як фізична основа роботи фотодіода ..... 7

1.2 Напівпровідникові передумови створення фотодіода ..... 9

1.3 Визначення, будова та принцип дії фотодіода ..... 10

1.4 Основні електричні та оптичні характеристики фотодіодів ..... 12

1.5 Класифікація фотодіодів та особливості їх функціонування ..... 14

1.6 Матеріали для виготовлення фотодіодів ..... 16

1.7 Переваги та основні напрямки використання фотодіодів ..... 17

2. РОЗРОБКА ПОЖЕЖНОГО ДАТЧИКА НА БАЗІ ФОТОДІОДА ДЛЯ ЗАХИСТУ ПОБУТОВИХ ЕЛЕКТРОПРИЛАДІВ ..... 20

2.1 Пожежний датчик і його місце в системі пожежної сигналізації ..... 20

2.2 Класифікація пожежних датчиків ..... 21

2.2.1 Теплові пожежні сповіщувачі ..... 23

2.2.2 Димові пожежні сповіщувачі ..... 24

2.2.3 Газові сповіщувачі ..... 26

2.2.4 Комбіновані та інтелектуальні сповіщувачі ..... 26

2.3 Розробка структурної схеми пожежного сповіщувача на основі фотодіода ..... 27

2.4 Розробка схеми електричної принципової пожежного сповіщувача ..... 30

2.5 Моделювання блоку підсилення ..... 33

..... 34

2.6 Розробка топології друкованої плати пожежного сповіщувача..... 35

..... 38

3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА..... 40

3.1 Вимоги до безпеки праці..... 40

3.2 Вимоги до промсанітарії..... 43

3.3 Вимоги до пожежної безпеки..... 46

3.4 Вимоги електробезбеки..... 49

3.4.1 Загальні вимоги..... 49

3.4.2 Організаційні заходи..... 51

3.4.3 Розрахунок електромережі на здатність відключення при аварійному режимі роботи електрообладнання..... 52

3.4.4 Технічні заходи..... 53

3.4.5 Номенклатура видів захисту..... 55

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ..... 57

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАННОЇ ЛІТЕРАТУРИ..... 58

# ВСТУП

Фотодіод є одним із базових елементів сучасної оптоелектроніки, що забезпечує перетворення світлового випромінювання в електричний сигнал. Розвиток фотодіодів став можливим завдяки послідовному накопиченню знань про природу світла, електронні властивості твердих тіл і механізми взаємодії фотонів з речовиною. Розвиток квантової теорії, фізики напівпровідників та технології p–n-переходів привів до появи фотодіода як високочутливого, швидкодійного й технологічно зручного фотоприймача.

У сучасних системах пожежної сигналізації застосовуються різні типи пожежних датчиків і сповіщувачів: теплові, димові, полум’яні, газові, комбіновані, аспіраційні, лінійні та адресно-аналогові. Кожен із цих класів орієнтований на виявлення певної фізичної ознаки пожежі: підвищення температури, появу аерозольних частинок диму, інфрачервоного або ультрафіолетового випромінювання полум’я, зміну складу повітря тощо. Вибір конкретного типу визначається пожежним навантаженням, типом приміщення, умовами експлуатації, висотою стелі, наявністю пилу чи пари, а також вимогами нормативних документів.

Особливу зацікавленість сьогодні викликають оптичні димові сповіщувачі на основі фотодіодів. Саме вони стали домінуючим рішенням у багатьох цивільних, комерційних і частково промислових системах завдяки високій чутливості до тліючих осередків, відсутності радіоактивних компонентів, малій споживаній потужності та можливості реалізації складних алгоритмів цифрової обробки сигналу. У таких пристроях фотодіод виконує роль чутливого приймача оптичного випромінювання, а поява диму змінює умови проходження або розсіювання світла в оптичній камері, що й фіксується електронною схемою. Тож достатньо актуальним є питання створення пожежного датчика на фотодіоді.

# 1 ФОТОДІОД. ПАРАМЕТРИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ

## 1.1 Фотоефект як фізична основа роботи фотодіода

Фотоефектом називають явище взаємодії електромагнітного випромінювання з речовиною, унаслідок якого під дією світла змінюється електронний стан матеріалу (рис.1.1). У класичному формулюванні розрізняють зовнішній та внутрішній фотоефект. Зовнішній фотоефект полягає у вильоті електронів з поверхні речовини під дією фотонів достатньої енергії. Внутрішній фотоефект не супроводжується виходом електронів у вакуум; натомість у матеріалі збільшується концентрація вільних носіїв заряду або виникає електрорушійна сила. Саме внутрішній фотоефект лежить в основі роботи більшості напівпровідникових фотоприймачів, включаючи фотодіоди (рис.1.2). За даними енциклопедичних та технічних джерел, світло з енергією, достатньою для подолання бар'єра або ширини забороненої зони, здатне створювати носії заряду, що далі можуть бути відокремлені внутрішнім електричним полем приладу. [1]

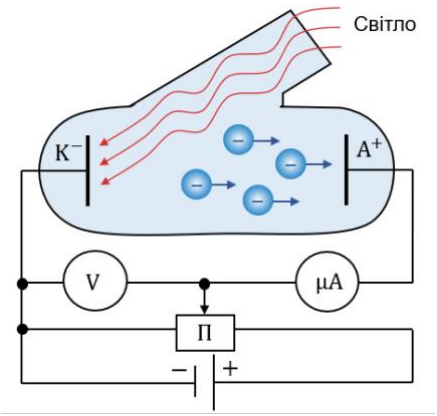



Рисунок 1.1 -Механізм фотоефекту [2]

Пояснення фотоефекту стало важливим етапом становлення квантової фізики. Досліди показали, що енергія фотоелектронів визначається частотою світла, а не лише його інтенсивністю, що неможливо було узгодити з хвильовою моделлю світла в її класичному вигляді. Квантове трактування, запропоноване А. Ейнштейном на основі ідей М. Планка, розглядало світло як потік квантів — фотонів з енергією $E = hv$. Якщо ця енергія перевищує роботу виходу або енергетичний поріг напівпровідника, фотон здатний перевести електрон у стан провідності. Для напівпровідникових приладів це означає утворення електрон-діркових пар, що надалі й забезпечують фотострум. [3]

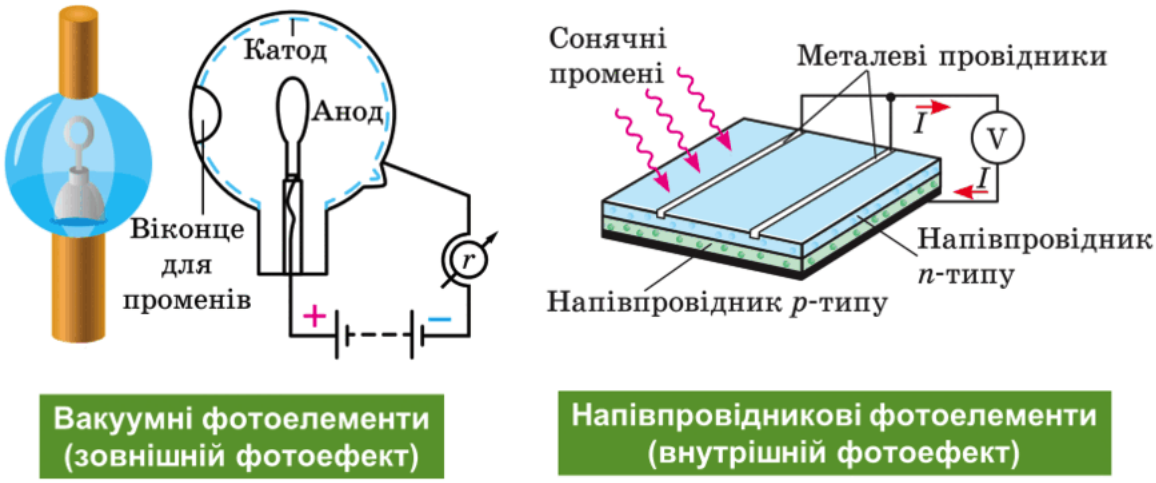



Рисунок 1.2 -Застосування зовнішнього та внутрішнього фотоефекту

Для фотодіода принципово важливим є саме внутрішній фотоефект у напівпровіднику. Коли фотон поглинається кристалом, його енергія може бути використана для переведення електрона із валентної зони в зону провідності. У результаті утворюється пара носіїв заряду: електрон і дірка. Якщо цей процес відбувається в області збіднення p–n-переходу або поблизу неї, внутрішнє електричне поле швидко розділяє носії, спричиняючи виникнення фотоструму. Таким чином, фотодіод можна розглядати як прилад, у якому

фізика фотопоглинання безпосередньо пов’язана з електричними властивостями напівпровідникового переходу. [2–4]

## 1.2 Напівпровідникові передумови створення фотодіода

У напівпровіднику електрони можуть перебувати у валентній зоні або в зоні провідності, а між цими зонами існує заборонена зона. Ширина забороненої зони визначає спектральний діапазон чутливості матеріалу: фотони з меншою енергією, ніж ширина забороненої зони, не створюють істотної кількості носіїв заряду. Саме тому матеріал фотодіода є ключовим фактором, що визначає робочий спектр — від ультрафіолету до ближнього або середнього інфрачервоного діапазону. У кремнії чутливість найкраще проявляється у видимій та ближній ІЧ-області, тоді як InGaAs, Ge, InSb або інші сполуки використовують для довших хвиль. [5]

Вирішальне значення для фотодіода має p–n-перехід. При контакті p- і n-областей виникає область збіднення, де утворюється внутрішнє електричне поле. Це поле перешкоджає подальшій дифузії основних носіїв та одночасно створює умови для ефективного розділення фотогенерованих електронів і дірок. Якщо світло поглинається в області переходу або на відстані, з якої носії можуть дифундувати до переходу, то вони вносять вклад у фотострум. Отже, ефективність фотодіода визначається не лише коефіцієнтом поглинання, а й геометрією структури, товщиною чутливого шару, рекомбінаційними втратами та напруженістю електричного поля (рис.1.3). [6]

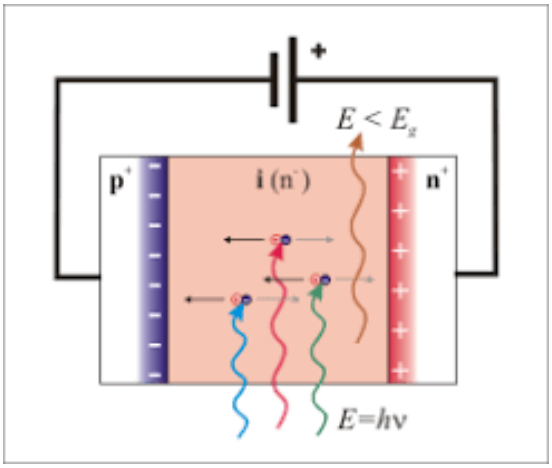



Рисунок 1.3 -Принцип роботи фотодіода

У напівпровідникових фотоприймачах важливу роль відіграють також домішки, дефекти, поверхневі стани й технологія пасивації. Домішкове легування дозволяє формувати області з потрібним типом провідності та керувати електричними параметрами переходу. Однак надмірна кількість дефектів збільшує темновий струм, рівень шуму та погіршує чутливість при слабкому освітленні. Саме тому еволюція фотодіодів пов’язана не тільки з фізичними ідеями, а й з удосконаленням технології вирощування кристалів, фотолітографії, контролю домішок і формування контактів. [7]

## 1.3 Визначення, будова та принцип дії фотодіода

Фотодіодом називають напівпровідниковий фоточутливий прилад, який перетворює падаюче випромінювання в електричний струм або напругу. Основою фотодіода є тонка напівпровідникова структура з p–n-, p–i–n- або спорідненим переходом, де поглинання фотонів призводить до генерації електрон-діркових пар. [2–4]

Конструктивно типовий фотодіод складається з фоточутливої області, напівпровідникового переходу, металевих контактів і захисного корпусу або

вікна для підведення світла. Для зменшення оптичних втрат часто застосовують антивідбивні покриття. Геометрія освітлюваної поверхні підбирається відповідно до задачі: невеликі площі забезпечують меншу ємність і вищу швидкодію, а більші площі — зручніше збирання світла, але ціною зростання паразитної ємності та зниження граничної частоти. [8]

Робота фотодіода можлива у двох основних режимах: фотогальванічному та фотопровідному (рис.1.4). У фотогальванічному режимі зовнішнє зворотне зміщення не подається; прилад генерує напругу самостійно, що характерно для сонячних елементів і точних малошумних вимірювань. У фотопровідному режимі на фотодіод подають зворотне зміщення. Це розширює область збіднення, зменшує час проходження носіїв і знижує ємність переходу, завдяки чому підвищуються швидкодія та лінійність. Саме тому для оптичного зв'язку, вимірювальної техніки та високошвидкісних систем зазвичай застосовують фотопровідний режим. [7]

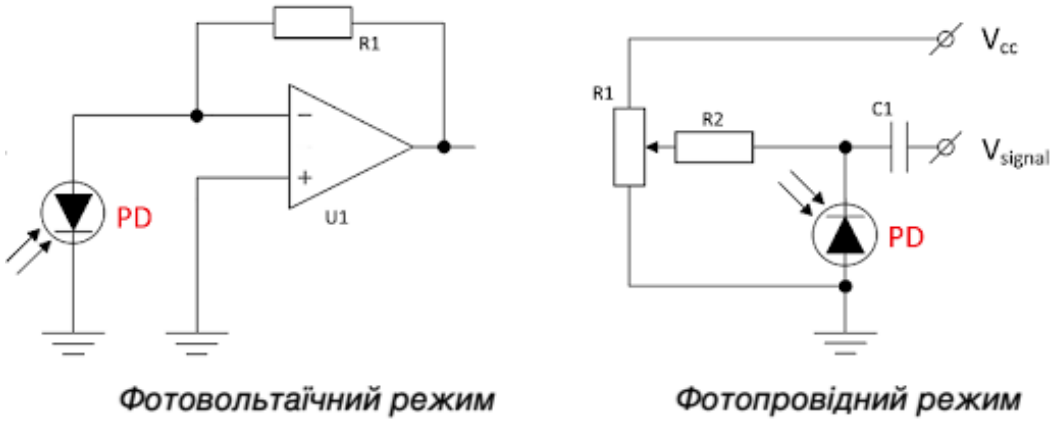



Рисунок 1.4- Режими роботи фотодіоду

Сумарний струм фотодіода складається з темнового струму та фотоструму. Темновий струм існує навіть за відсутності освітлення і пов'язаний з тепловою генерацією носіїв. Фотострум, навпаки, виникає під

дією світла та в широкому діапазоні зазвичай є пропорційним потужності оптичного випромінювання.

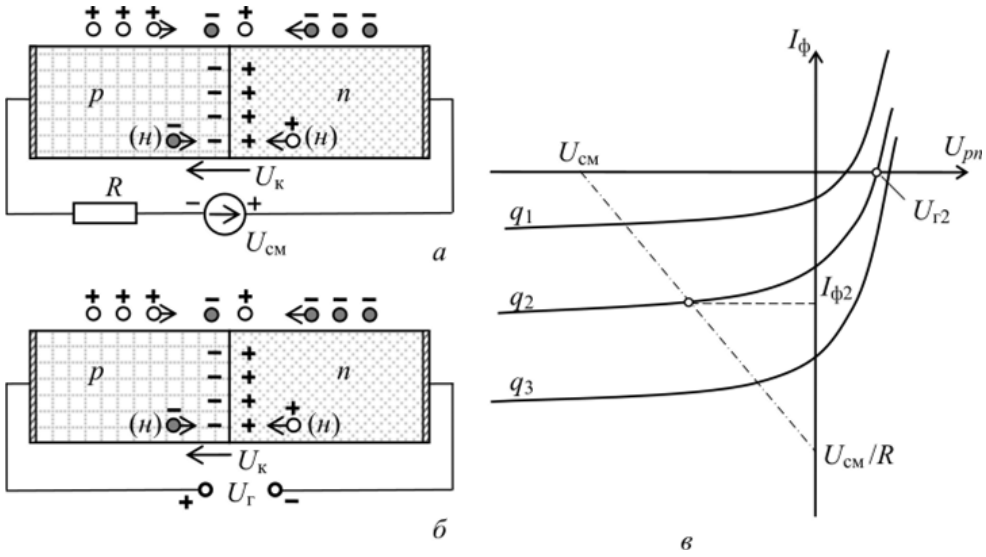



Рисунок 1.5- Фотодіодний (а) і фотогальванічні (б) режими напівпровідника з р-п-переходом і його вольт-амперні характеристики при різних значеннях потоку оптичного випромінювання (в)

Така близька до лінійної залежність є однією з найважливіших причин широкого використання фотодіодів у фотометрії та системах передавання інформації. [9]

## 1.4 Основні електричні та оптичні характеристики фотодіодів

Серед найважливіших параметрів фотодіода виділяють спектральну чутливість, квантову ефективність, темновий струм, ємність переходу, шум, час відгуку, смугу пропускання, шум-еквівалентну потужність та лінійність. Кожен з цих параметрів відображає певний аспект якості фотоприймача і визначає його придатність до конкретної задачі. [2–4]

Спектральна чутливість, або фоточутливість, зазвичай виражається в А/Вт і показує, який фотострум утворюється при падінні на прилад оптичної потужності певної довжини хвилі (рис.1.6).

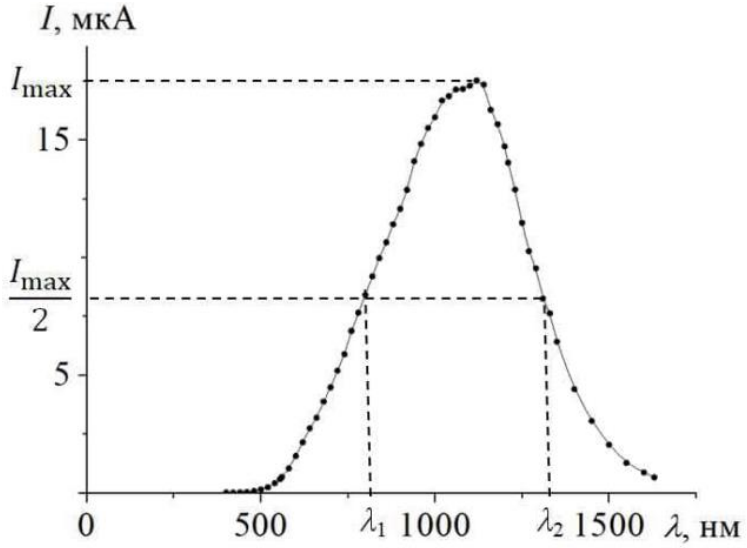



Рисунок 1.6 -Спектральна характеристика кремнієвого фотодіода

Вона залежить від матеріалу, конструкції переходу та втрат на відбиття і рекомбінацію. Тісно пов’язаною характеристикою є квантова ефективність — частка фотонів , що реально створюють носії заряду, які дають внесок у струм. У технічній документації на кремнієві фотодіоди наводиться співвідношення між квантовою ефективністю та фоточутливістю, що дозволяє порівнювати прилади між собою на різних довжинах хвиль. [6]

Темновий струм є критично важливим для детектування слабких сигналів. Він формує один із головних джерел шуму та обмежує мінімальний рівень оптичної потужності, який можна надійно виміряти. Темновий струм суттєво залежить від температури, якості кристалу та прикладеної зворотної напруги. Для високочутливих систем часто вживають заходів щодо його

зниження: охолодження, оптимізацію площі чутливої зони, покращення технології переходу та використання схем компенсації. [3]

Швидкодія фотодіода визначається часом дрейфу і дифузії носіїв, а також паразитною ємністю приладу та параметрами зовнішнього кола. Чим менша ємність переходу і чим сильніше електричне поле в області збіднення, тим швидше фотодіод реагує на зміну освітленості. Саме тому низькоємнісні PIN-фотодіоди й лавинні фотодіоди широко використовуються у високошвидкісних приймачах. Технічні матеріали Hamamatsu вказують, що PIN-фотодіоди в режимі зворотного зміщення придатні для оптоволоконного зв’язку та інших застосувань, де потрібна смуга понад десятки мегагерц. [2]

Окремої уваги заслуговує шум. У фотодіодах спостерігаються дробовий шум, тепловий шум кола, шум підсилювача та шум, пов’язаний з темновим струмом. Для порівняння чутливості різних приладів використовують поняття шум-еквівалентної потужності та питомої детективності. На практиці ж вибір фотодіода майже завжди є компромісом між швидкодією, площею, спектральним діапазоном, рівнем шуму та вартістю системи. [10]

## 1.5 Класифікація фотодіодів та особливості їх функціонування

Найпростішим різновидом є p–n-фотодіод. Це базова структура, у якій фотогенеровані носії розділяються внутрішнім полем p–n-переходу. Такі прилади підходять для багатьох загальних задач, але поступаються спеціалізованим структурам за швидкодією або чутливістю.

Широко застосовуються PIN-фотодіоди, де між p- та n-областями вводять власний або слабколегований i-шар. Цей шар розширює область збіднення, збільшує об’єм поглинання світла та зменшує ємність переходу. У результаті PIN-фотодіод поєднує високу швидкодію, хорошу лінійність і

достатню чутливість, що робить його стандартним вибором для волоконно-оптичного зв’язку, лазерних систем, енкодерів та вимірювальних приладів. [10]

Лавинний фотодіод, або APD, працює при значному зворотному зміщенні, близькому до пробою. За цих умов первинні фотогенеровані носії прискорюються настільки, що спричиняють ударну іонізацію та внутрішнє помноження заряду. Це забезпечує внутрішнє підсилення сигналу та вищу чутливість порівняно з PIN-фотодіодом, особливо при слабких сигналах. Водночас APD потребує стабільного високовольтного живлення, є більш чутливим до температури та характеризується вищими шумами помноження. За технічними джерелами Hamamatsu й RP Photonics, APD мають високу чутливість і хороший S/N, але поступаються PIN-структурам за простотою експлуатації. [11]

Окремий клас становлять Шотткі-фотодіоди, у яких використовується метал-напівпровідниковий перехід. Їх перевагами є мала ємність і надзвичайно висока швидкодія, що робить їх корисними у швидкісних оптоелектронних та мікрохвильових застосуваннях. Однак спектральні та шумові характеристики таких структур залежать від конкретного матеріалу й технології виготовлення.

Існують також спеціалізовані варіанти: УФ-фотодіоди, ІЧ-фотодіоди, фотодіодні масиви, позиційно-чутливі фотодіоди, однофотонні лавинні діоди та інтегровані матричні структури. Кожен різновид виник як відповідь на конкретний інженерний запит: реєстрація окремих фотонів, сканування спектра, визначення координати світлової плями, робота на великій довжині хвилі чи висока стійкість до радіації. [6]

## 1.6 Матеріали для виготовлення фотодіодів

Матеріал фотодіода визначає не лише спектральний діапазон чутливості, а й рівень шуму, швидкодію, температурну стабільність та технологічну сумісність із мікроелектронікою. Найпоширенішим матеріалом залишається кремній. Кремнієві фотодіоди добре працюють у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах, відзначаються високою надійністю, відносно низькою вартістю та добре відпрацьованою технологією виробництва. Тому саме кремній домінує в побутових, промислових і наукових системах, де не потрібна чутливість на довших хвилях. [3]

Для ближньої ІЧ-області телекомунікаційних вікон широко застосовують германій і сполуку InGaAs. InGaAs-фотодіоди особливо важливі для довжин хвиль близько 1,3 та 1,55 мкм, де працюють оптоволоконні лінії зв’язку. Вони забезпечують високу швидкодію й добру чутливість, але є дорожчими у виготовленні. Для середнього ІЧ-діапазону використовують вузькозонні матеріали, такі як InSb, HgCdTe та інші спеціалізовані напівпровідники, часто із застосуванням охолодження. [5]

Для ультрафіолетового діапазону розробляють структури на основі широкозонних матеріалів, зокрема SiC, GaN та споріднених сполук. Такі прилади важливі для полум’яних датчиків, космічної техніки, екологічного моніторингу та біомедичних систем. Розширення спектральних меж фотодіодів є одним із ключових напрямів сучасної оптоелектроніки, оскільки воно напряму пов’язане з розвитком нових напівпровідникових матеріалів, гетероструктур та нанорозмірних технологій.

## 1.7 Переваги та основні напрямки використання фотодіодів

Серед основних переваг фотодіодів слід відзначити компактність, високу надійність, мале енергоспоживання, хорошу лінійність, можливість інтеграції з електронікою та високу швидкодію. Порівняно з фоторезисторами фотодіоди зазвичай забезпечують швидший відгук і кращу відтворюваність характеристик. Порівняно з фотопомножувачами вони мають менші розміри, не потребують високовольтних вакуумних систем і краще підходять для масового виробництва.

Разом із тим фотодіоди мають низку обмежень. Їх сигнал часто малий і потребує малошумного підсилення. Спектральний діапазон жорстко визначається матеріалом, а темновий струм і шум можуть істотно обмежувати чутливість. Лавинні структури складніші в експлуатації через високу напругу й температурну залежність коефіцієнта підсилення. Для довгохвильового ІЧ-діапазону фотодіоди часто потребують дорогих матеріалів або охолодження. Тому вибір конкретного типу приладу завжди має спиратися на вимоги до швидкодії, чутливості, вартості, спектра та умов експлуатації.

Фотодіоди застосовуються практично в усіх галузях, де необхідно виявляти, вимірювати або перетворювати світлове випромінювання. Одним із найважливіших напрямів є волоконно-оптичний зв’язок. Тут PIN- та APD-фотодіоди виконують роль приймачів модульованого оптичного сигналу, перетворюючи його на електричні імпульси. Від їхньої швидкодії, чутливості та шумових характеристик прямо залежить швидкість передавання даних і чутливість оптичного приймача. [8]

Не менш важливими є вимірювальні та наукові застосування: фотометрія, радіометрія, спектрофотометрія, лазерна діагностика, системи контролю потужності випромінювання, експериментальна фізика. Завдяки майже лінійній залежності фотоструму від потужності світла фотодіоди зручні для точних вимірювань. Вони використовуються також у частинкових

детекторах, сцинтиляційних системах, медичних оптичних приладах і різноманітних лабораторних сенсорах. [12]

У промисловості фотодіоди входять до складу енкодерів, систем автоматизації, бар'єрних датчиків, оптопар, датчиків присутності, сканерів штрихкодів, систем контролю полум'я та безпеки. У побутовій техніці вони застосовуються в ІЧ-приймачах дистанційного керування, оптичних мишах, CD/DVD-системах, камерах та автоматичних системах освітлення.

У медицині фотодіоди використовують у пульсоксиметрах, фотоплетизмографії, біоаналітичних системах, томографічних установках і приладах контролю випромінювання. У транспорті та робототехніці дедалі важливішими стають лавинні фотодіоди та однофотонні діоди, що використовуються в далекомірних системах, LiDAR-комплексах і тривимірному скануванні. Таким чином, фотодіод є не вузькоспеціалізованим елементом, а універсальною платформою для широкого спектра оптоелектронних рішень. [13]

Сучасний розвиток фотодіодів відбувається в кількох напрямах. Перший напрям пов'язаний із розширенням спектрального діапазону та підвищенням квантової ефективності завдяки новим матеріалам, гетероструктурам, наноструктурованим поверхням і вдосконаленим антивідбивним покриттям. Другий напрям — зменшення шуму та темнового струму, що особливо важливо для слабкосигнальних систем і квантових вимірювань.

Третім ключовим напрямом є інтеграція фотодіодів з мікроелектронікою, фотонними інтегральними схемами та мікромеханічними системами. Це дозволяє створювати компактні модулі з вбудованим підсиленням, обробкою сигналу та цифровим інтерфейсом. Четвертий напрям — розвиток однофотонних лавинних діодів та матриць для задач квантової комунікації, ToF-вимірювань і високочутливої візуалізації.

Таким чином метою кваліфікаційної роботи є розробка пожежного датчика на основі фотодіода для захисту побутових електроприладів.

Задачі роботи:

- розробка структурної схеми пристрою
- розробка схеми електричної принципової
- розробка топології друкованої плати пожежного датчика.

# 2. РОЗРОБКА ПОЖЕЖНОГО ДАТЧИКА НА БАЗІ ФОТОДІОДА ДЛЯ ЗАХИСТУ ПОБУТОВИХ ЕЛЕКТРОПРИЛАДІВ

Системи пожежної сигналізації є однією з ключових складових комплексного протипожежного захисту будівель, споруд, виробничих об’єктів, складів, транспортної інфраструктури та житлових приміщень. Їх головне завдання полягає у якомога ранньому виявленні ознак загоряння і передаванні тривожного сигналу до приймально-контрольного обладнання або безпосередньо до людей, які перебувають в небезпечній зоні. Чим раніше виявлено пожежу, тим більше часу залишається для евакуації людей, локалізації осередку загоряння та зменшення матеріальних збитків.

## 2.1 Пожежний датчик і його місце в системі пожежної сигналізації

Пожежний датчик або пожежний сповіщувач - це технічний засіб, призначений для автоматичного виявлення ознак пожежі та формування відповідного повідомлення. Конструктивно типовий сповіщувач містить чутливий елемент, вузол обробки сигналу, схеми самоконтролю, індикатор стану, корпус із захистом від зовнішніх впливів та інтерфейс для підключення до шлейфу або адресної лінії (рис.2.1).

За способом роботи пожежні сповіщувачі поділяють на порогові та адресно-аналогові. Порогові формують повідомлення «Пожежа» після досягнення певного граничного значення контрольованого параметра. Адресно-аналогові не лише передають тривогу, а й надають системі числову інформацію про поточний рівень сигналу, що дає змогу адаптивно

налаштовувати чутливість, вести історію забруднення, реалізовувати компенсацію дрейфу та зменшувати кількість хибних спрацьовувань.

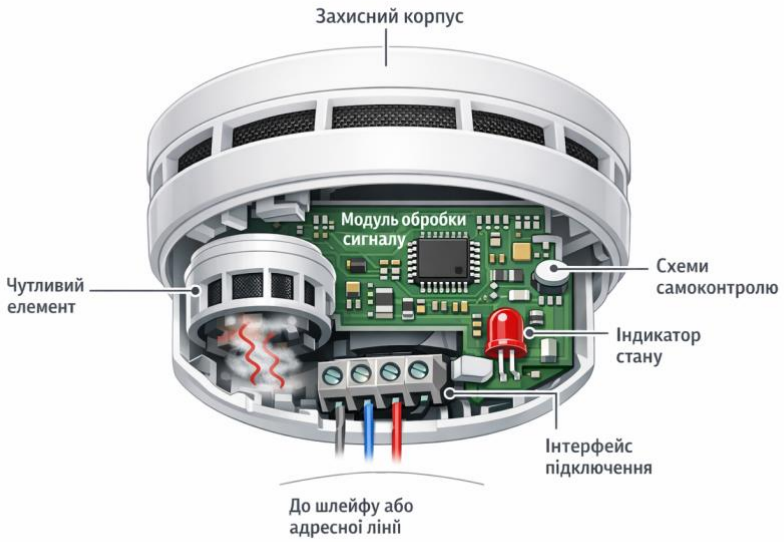



Рисунок 2.1- Конструкція пожежного сповіщувача [14]

Ефективність системи залежить не тільки від характеристик окремого датчика, а й від правильності його розміщення. Для цього враховують геометрію приміщення, конвекційні потоки, вентиляцію, тип можливого горіння, наявність локальних джерел пари або пилу. Нормативні документи серії EN 54 та настанови щодо проєктування систем пожежної сигналізації розглядають ці питання як критично важливі для забезпечення потрібної швидкості виявлення пожежі.

## 2.2 Класифікація пожежних датчиків

Узагальнено пожежні сповіщувачі можна класифікувати за фізичною ознакою, яку вони контролюють. Найпоширенішими є теплові, димові, полум’яні та комбіновані пристрої. Окрему групу утворюють аспіраційні

системи, в яких повітря примусово відбирається по трубопроводах із контрольованої зони та аналізується високочутливим сенсором у центральному блоці.

Таблиця 2.1-Класифікаціця пожежних сповіщувачів

| Тип сповіщувача | Контрольована ознака | Переваги | Обмеження |
|---|---|---|---|
| Тепловий | Температура або швидкість її зростання | Простота, стійкість до пилу, низька вартість | Пізніше виявлення на ранній стадії пожежі |
| Димовий | Аерозольні частинки диму | Раннє виявлення більшості пожеж | Чутливість до пилу, аерозолів, забруднення |
| Полум’яний | УФ/ІЧ випромінювання полум’я | Швидке виявлення відкритого полум’я | Може реагувати на сторонні джерела випромінювання |
| Газовий | CO, CO2, H2 та інші продукти горіння | Добре працює для тліючих процесів | Потребує ретельного підбору сенсора |
| Комбінований | Декілька ознак одночасно | Вища достовірність, менше хибних тривог | Складніша схема та вища ціна |

Теплові датчики доцільні там, де димові можуть часто давати небажані спрацьовування; полум’яні корисні для просторих технологічних зон з ризиком швидкого утворення полум’я; димові залишаються найбільш

універсальним засобом раннього виявлення пожеж у приміщеннях загального призначення.

### 2.2.1 Теплові пожежні сповіщувачі

Теплові сповіщувачі реагують на перевищення заданої температури або на швидкість її наростання. За цією ознакою їх поділяють на максимальні, диференційні та максимально-диференційні. Максимальні пристрої спрацьовують, коли температура довкілля перевищує встановлений поріг. Диференційні реагують на надто швидке підвищення температури за певний проміжок часу. Комбіновані об’єднують обидва принципи.




Рисунок 2.2 -Принцип роботи теплових сповіщувачів [15]

Перевагою теплових датчиків є конструктивна простота, стабільність роботи в умовах запиленості або присутності аерозолів, а також відносно невисока вартість.

Недоліком є те, що вони часто виявляють пожежу пізніше, ніж димові сповіщувачі, оскільки температура повітря на рівні стелі зростає вже після того, як процес горіння набув розвитку. Тому теплові датчики частіше використовують у кухнях, майстернях, гаражах, технічних приміщеннях та в середовищах, де димові сенсори можуть працювати нестабільно.

### 2.2.2 Димові пожежні сповіщувачі

Димові сповіщувачі виявляють аерозольні частинки, що утворюються під час термічного розкладу матеріалів або горіння (рис.2.3). Саме дим найчастіше з’являється на ранніх стадіях пожежі, коли ще немає значного підвищення температури та відкритого полум’я. Тому димові датчики широко застосовуються в офісах, житлових будинках, готелях, архівах, лікарнях, навчальних закладах та на інших об’єктах, де пріоритетом є раннє виявлення загрози.

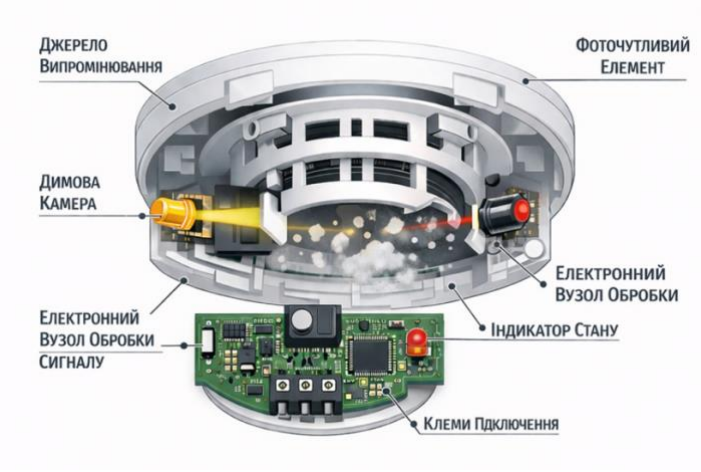



Рисунок 2.3 -Конструкція димового сповіщувача [16]

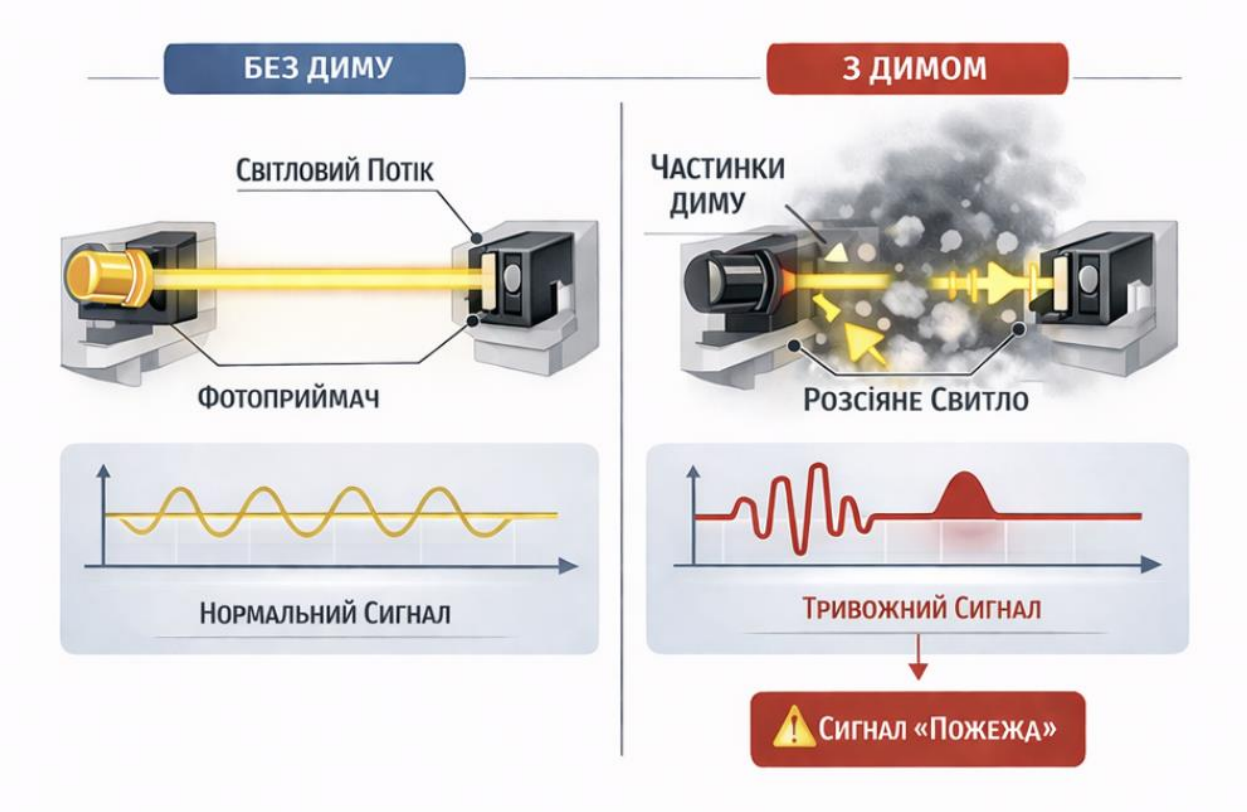



Рисунок 2.4 -Принцип роботи оптичних сповіщувачів

За принципом роботи димові сповіщувачі поділяють на іонізаційні, оптичні точкові, оптичні лінійні та аспіраційні. Іонізаційні історично були дуже поширені, але їх застосування поступово скорочується через наявність радіоактивного джерела, особливості утилізації та зміщення ринку в бік безпечніших і більш гнучких оптичних рішень. Оптичні димові сповіщувачі, особливо на основі світлодіода і фотодіода, нині є основою більшості сучасних систем раннього виявлення диму (рис. 2.4).

Оптичні димові сповіщувачі працюють за двома базовими схемами: на розсіюванні світла та на ослабленні світлового променя. У точкових датчиках найчастіше реалізується схема розсіювання: в чистому повітрі випромінювання не потрапляє на фотодіод, а при появі димових частинок частина світла розсіюється і реєструється приймачем. У лінійних датчиках

використовують оптичний промінь між передавачем і приймачем або відбивачем; дим зменшує інтенсивність променю, що викликає спрацювання.

### 2.2.3 Газові сповіщувачі

Полум’яні сповіщувачі виявляють характерне ультрафіолетове або інфрачервоне випромінювання відкритого полум’я. Вони особливо корисні там, де пожежа може розвиватися дуже швидко: на нафтобазах, у фарбувальних камерах, на об’єктах з горючими рідинами або газами, у високих ангарах. Такі датчики мають високу швидкодію, але потребують правильної орієнтації та захисту від завад, наприклад сонячного випромінювання, зварювання або гарячих технологічних процесів.

Газові пожежні сповіщувачі реагують на продукти термічного розкладу і горіння, зокрема оксид вуглецю. Вони корисні для виявлення тліючих процесів, де виділення диму може бути незначним, а концентрація газів - достатньою для детекції. У сучасних комбінованих пристроях газовий канал часто поєднують із оптичним або тепловим, що підвищує достовірність виявлення та зменшує кількість хибних тривог. [15]

### 2.2.4 Комбіновані та інтелектуальні сповіщувачі

Тенденцією останніх років є перехід від одноканальних датчиків до мультисенсорних рішень. У таких пристроях в одному корпусі можуть бути поєднані оптичний димовий сенсор, тепловий сенсор, газовий канал, а іноді й декілька оптичних каналів із різними довжинами хвиль. Мікроконтролер аналізує форму сигналів, швидкість зміни параметрів і співвідношення між

каналами, що дозволяє відрізняти реальні ознаки пожежі від пари, пилу чи кухонних аерозолів.

Інтелектуальні алгоритми корисні насамперед для зменшення хибних спрацьовувань, які є серйозною проблемою експлуатації пожежної сигналізації. Часті помилкові тривоги знижують довіру до системи, ускладнюють обслуговування і можуть призвести до ігнорування реальної небезпеки. Саме тому фотодіодні оптичні канали в сучасних пристроях дедалі частіше доповнюються спектральним аналізом, компенсацією забруднення та цифровими фільтрами. [14]

## 2.3 Розробка структурної схеми пожежного сповіщувача на основі фотодіода

Під пожежними сповіщувачами на основі фотодіодів зазвичай розуміють оптичні димові датчики, в яких приймачем світлового сигналу є фотодіод. Такі сповіщувачі ще називають фотоелектричними або оптичними. Їх робота базується на взаємодії світлового випромінювання з димовими частинками. У ролі джерела світла найчастіше використовується інфрачервоний або видимий світлодіод, а фотодіод перетворює оптичний сигнал на електричний струм, пропорційний освітленості.

Фотодіод у пожежних сповіщувачах використовують тому, що він має високу швидкодію, малий рівень шуму, компактні розміри, низьке енергоспоживання і добре поєднується з мікроконтролерною обробкою сигналів. Важливо й те, що сучасні фотодіоди можна інтегрувати разом з оптичним трактом та аналоговим фронтендом у дуже компактні сенсорні модулі.

На основі аналізу конструкцій оптичних пожежних сповіщувачів розроблена структурна схема пристрою, що складається з наступних блоків: фотоприймач, блок підсилення та порівняння, блок керування реле, блок живлення, генератор та підсилювач звукового сигналу, реле, гучномовець та зовнішній пристрій (рис. 2.5).

Блок фотоприймача сприймає світлове випромінювання (основу складає фотодіод), перетворює світло в електричний сигнал і передає первинний слабкий сигнал для підсилення.

Блок підсилювач / компаратор обробляє слабкий сигнал від фотоприймача, порівнювати його з пороговим рівнем та, за необхідності, відсікає малі коливання та випадкові завади.

Блок керування реле приймає сигнал від компаратора і керує ввімкненням реле, фіксує стан тривоги після спрацювання та запускає звукову сигналізацію.

Реле є виконавчим електромеханічним елементом, що електрично розділяє керуючу частину схеми та силове коло, вмикати додаткові пристрої при спрацюванні сигналізації.

Навантаження -це зовнішній пристрій, який вмикається контактами реле. В якості навантаження можна використовувати: лампу, сирену, дзвінок або інший сигнальний чи виконавчий пристрій.

Генератор звукового сигналу- формує електричний звуковий сигнал певної частоти або типу сирени

Підсилювач звукового сигналу підсилює сигнал від генератора до рівня, достатнього для роботи гучномовця. Гучномовець подає звукове оповіщення про спрацюванні системи.

Блок живлення забезпечує стабільну роботу пристрою, знижує та стабілізує напругу, зменшує вплив пульсацій і перешкод.

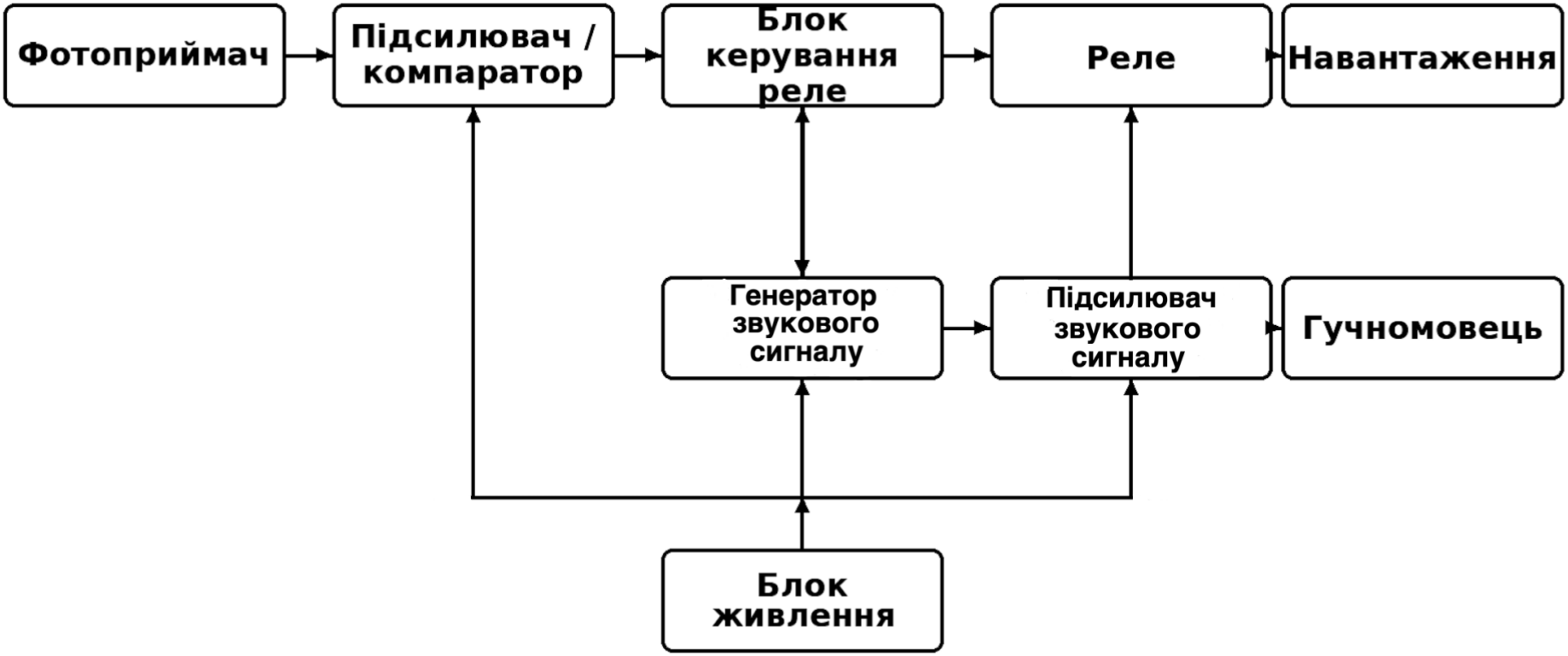



Рисунок 2.5 -Структурна схема пожежного сповіщувача

## 2.4 Розробка схеми електричної принципової пожежного сповіщувача

На основі структурної схеми (рис. 2.5) розроблена схема електрична принципова (рис.2.6). пожежного сповіщувача, що допоможе зберегти побутові електронні пристрої (комп'ютер, телевізор). У випадку появи іскри або пожежі в секції живлення приладу він миттєво відключає живлення. Схема використовує фотоелектричні властивості фотодіодів для виявлення пожежі.

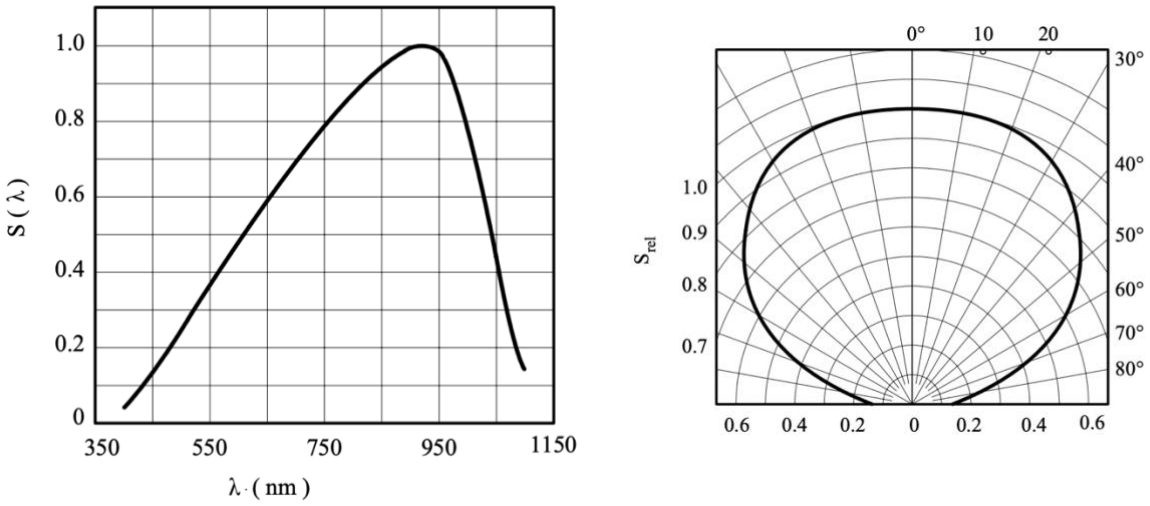
В якості джерела живлення використовується IC3 — 7809-лінійний стабілізатор позитивної напруги, яка забезпечує фіксований вихід у 9В, що забезпечує живлення основної частини схеми. C1, C2 — фільтруючі конденсатори, які згладжують пульсації та стабілізують живлення.

Фотодіод D1 змінює свій струм залежно від освітлення. Подвійний операційний підсилювач IC 741 використовується як тригер Шмідта з гістерезисом. Він перетворює вхідні сигнали напруги від фотодіода у сформований вихідний сигнал. Резистори R1 та R2 утворюють дільник напруги, щоб подати половину напруги живлення (4,5 вольта) на інвертуючий вхід (вивід 2) IC1. Резистор R3 з'єднує вихід IC1 з його інвертуючим входом. Фотодіод підключено між переходом дільника R1-R2 та неінвертуючим входом (вивід 3) мікросхеми IC1. У режимі очікування (в темряві) напруга на фотодіоді дорівнюватиме нулю, а вихідний сигнал IC1 залишається низьким. Коли спалахує іскра або пожежа, фотодіод проводить струм і рівень вихідного сигналу збільшується. Вихідний сигнал IC1 залишається високим протягом кількох секунд після того, як фотодіод стає непровідним і будь-яка незначна зміна напруги на інвертуючому вході не має значення.

У схемі передбачена можливість ручного скидання тривоги після спрацювання (S1 — PUSH-TO-OFF) звукова та світлова індикація.

В якості фотодіода пропонується BPW34 від компанії Vishay — це високошвидкісний кремнієвий PIN-фотодіод із високою чутливістю до випромінювання. Він виконаний у мініатюрному пласкому пластиковому

корпусі для поверхневого монтажу або монтажу в отвори (THT) і призначений для детектування видимого та ближнього інфрачервоного світла.




а б

а- відносна спектральна чутливість у порівнянні з довжиною хвилі

б- відносна світлова чутливість проти кутового зміщення

Рисунок 2.6 – Основні характеристики фотодіода [12]

- Спектральний діапазон: від 430 нм до 1100 нм.
- Пік чутливості: приблизно 900 нм (інфрачервона область).
- Світлочутлива площа: 7,5 мм².
- Кут половинної чутливості: ± 65°.
- Темновий струм: типово 2 нА, максимум 30 нА.
- Максимальна зворотна напруга: 60 В.
- Ємність діода: 25-70 пФ.

Запропонована схема може також використовуватися як світлова сигналізація, проста охоронна система, датчик переривання променю, сигналізація відкриття проходу.

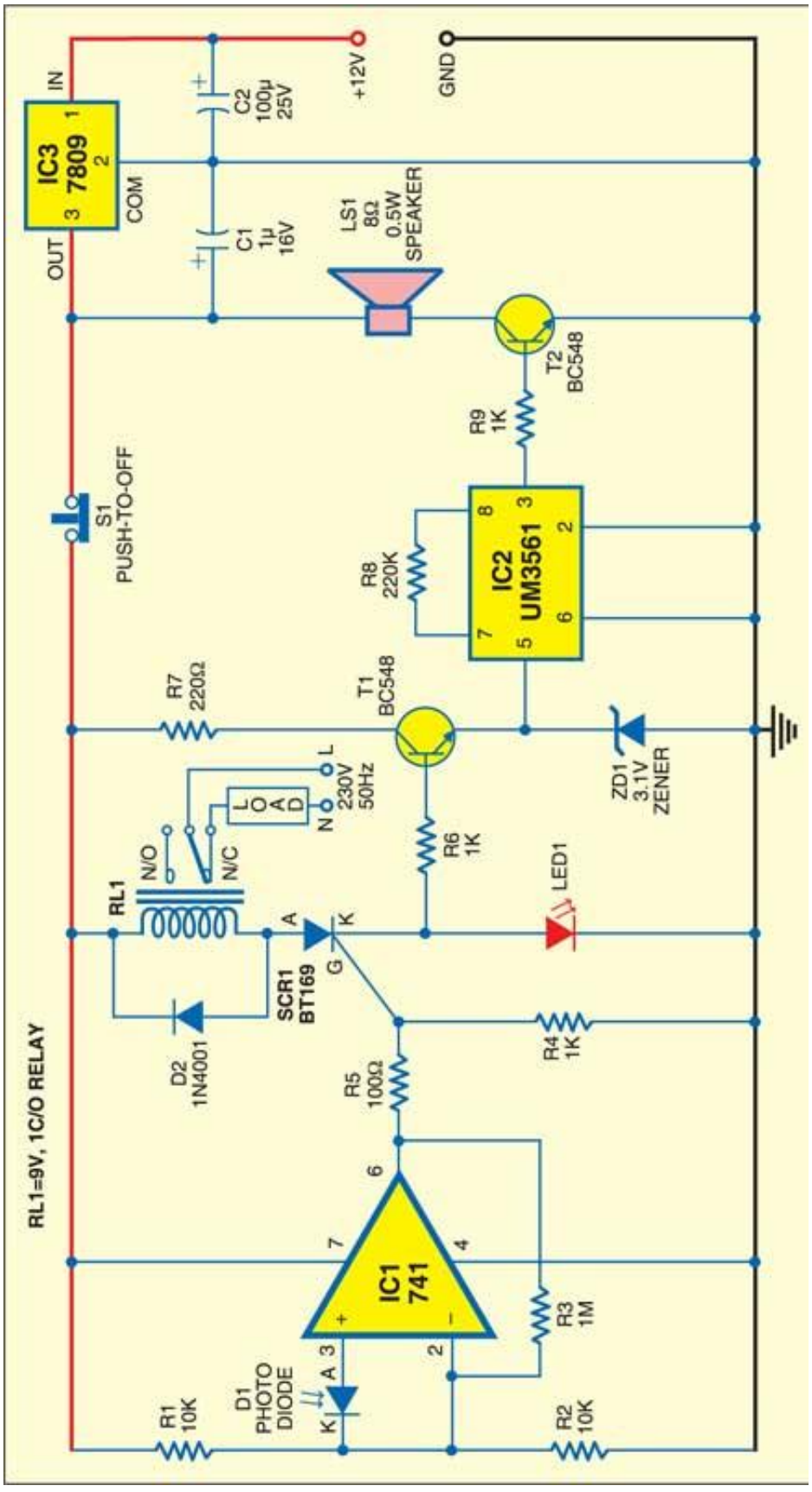



Рисунок 2.6 -Схема електрична принципова пожежного сповіщувача на основі фотодіода

## 2.5 Моделювання блоку підсилення

Для перетворення вхідного сигналу напруги від фотодіода у сформований вихідний сигнал застосовується мікросхема 741, що представляє собою компаратор із позитивним зворотним зв'язком, який використовується для перетворення довільного вхідного сигналу в чіткий прямокутний імпульс. Головною особливістю схеми є гістерезис, що забезпечує завадостійкість за рахунок наявності двох різних порогів спрацьовування.

Графік залежності вихідної напруги від вхідної для інвертуючого тригера Шмідта, що демонструє петлю гістерезису, наведено на рис. 2.7

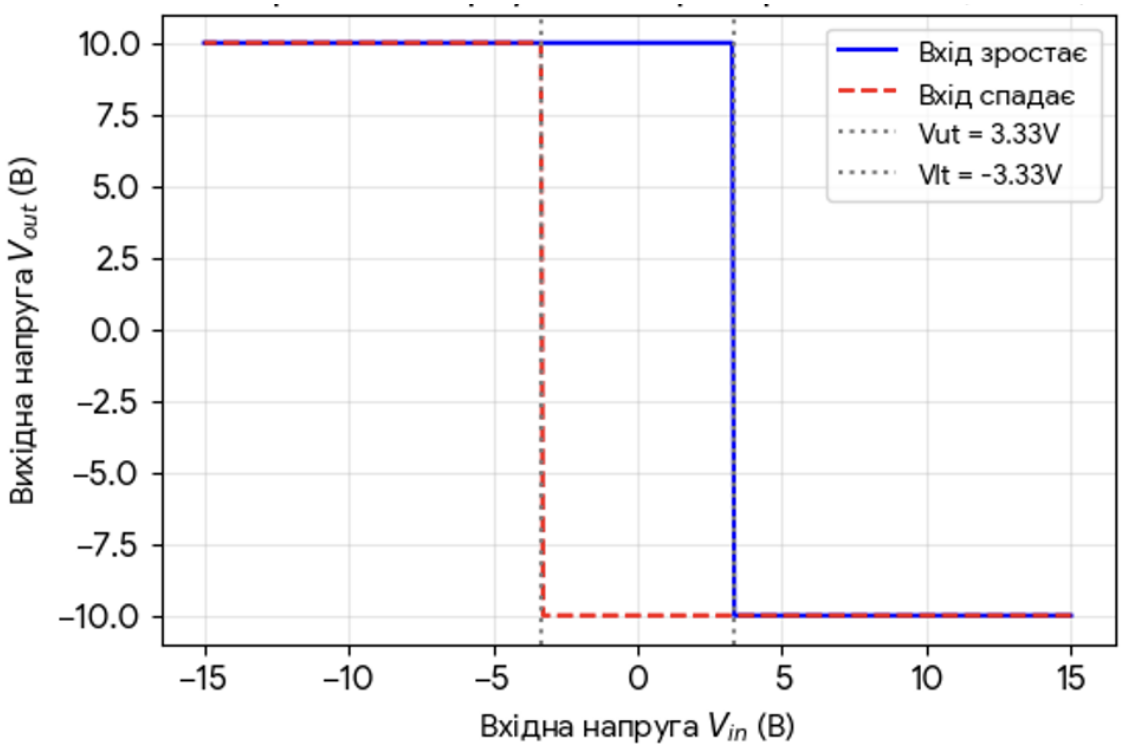



Рисунок 2.7 -Гістерезис інвертуючого тригера Шмідта (IC 741)

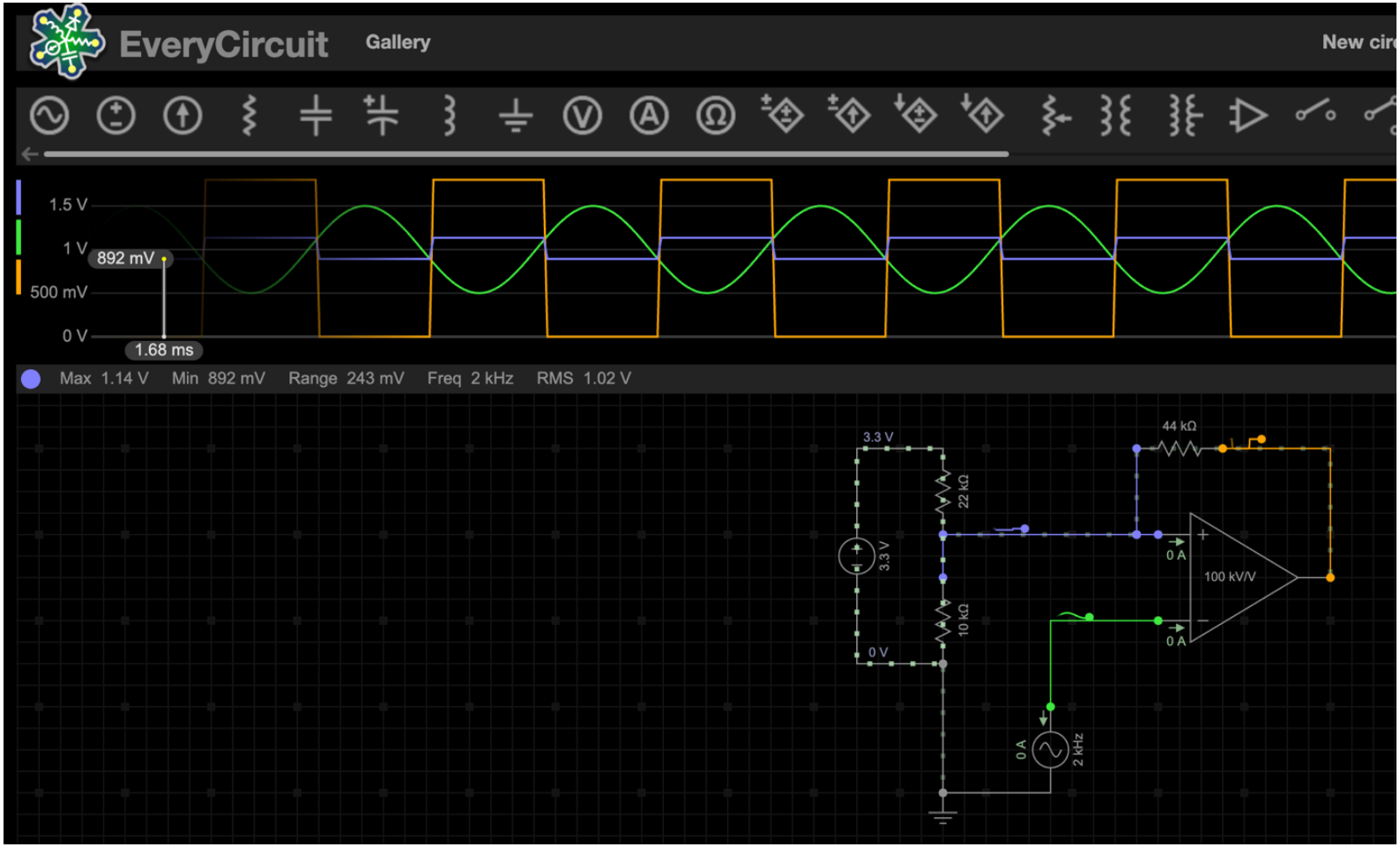



Рисунок 2.8- Моделювання роботи тригера Шмідта в програмному середовищі Every Circuit

## 2.6 Розробка топології друкованої плати пожежного сповіщувача

Висока складність сучасних схем приводить до необхідності автоматизації задач розміщення елементів друкованої плати (ДП), трасування провідників, розрахунку теплових режимів, електромагнітної взаємодії компонентів на друкованій платі.

Задача розміщення і трасування зводиться до перебору (повного або часткового) можливих варіантів розміщення елементів, що з'єднуються, і вибору оптимального. Критерієм оптимальності є мінімальна сума довжин усіх розташованих на платі друкованих провідників (або в якості критерія використовуються більш складні цільові функції).

Основні правила конструювання друкованих плат

1. Максимальний розмір сторони ДП не повинний перевищувати 500 мм. Це обмеження визначається вимогами міцності і щільності монтажу.
2. Для спрощення компонування блоків і уніфікації розмірів ДП, рекомендуються наступні співвідношення розмірів сторін ДП: 1:1, 2:1, 3:1, 4:1, 3:2, 5:2 і т.д.
3. Вибір матеріалу ДП, способу її виготовлення, класу щільності монтажу повинні здійснюватися на стадії ескізного проектування, тому що ці характеристики визначають багато електричних параметрів пристрою.
4. При розбивці схеми на шари варто прагнути мінімізації числа шарів, це диктується економічними розуміннями.
5. По краях плати варто передбачати технологічну зону шириною 1,5-2,0 мм. Розміщення настановних і інших отворів, а також друкованих провідників у цій зоні не допускається.
6. Всі отвори повинні розташовуватися у вузлах координатної сітки. У крайньому випадку хоча б перший вивід мікросхеми повинний розташовуватися у вузлі координатної сітки.

7. На друкованій платі повинний бути передбачений паз, що орієнтує, або зрізаний лівий кут, або технологічні базові отвори, необхідні для правильної орієнтації плати.
8. Друковані провідники варто виконувати мінімально короткими.
9. Прокладка поруч провідників вхідних і вихідних ланцюгів небажана. Це необхідно враховувати, щоб уникнути паразитних наведень.
10. Провідники найбільш високочастотних ланцюгів прокладаються в першу чергу і мають, завдяки цьому, найменш коротку довжину.
11. Провідники, що заземлюють, варто виготовляти максимально широкими.

Конструювання друкованих плат

Основною метою процесу конструювання є створення пристрою для об'єднання групи ЕРЕ у функціональний вузол із забезпеченням необхідних механічних і електричних параметрів у заданому діапазоні експлуатаційних характеристик при мінімальних витратах.

Для цього необхідно: вибрати тип ДП; визначити клас точності; установити габаритні розміри і конфігурацію; вибрати матеріал підстави для ДП; розмістити начіпні елементи; визначити розміри елементів малюнка; розмістити їх на платі і здійснити трасування; забезпечити автоматизацію процесів виготовлення і контролю плати, процесів зборки, пайки і контролю вузлів; виготовити конструкторську документацію.

У залежності від припустимих відхилень визначені чотири класи точності ДП. Значення основних конструктивних параметрів по класах точності приведені в табл. 2.1

Таблиця 2.1 – Основні конструктивні параметри друкованих плат

| Параметр | Клас точності | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Мінімальне значення номінальної ширини провідника, *t,* мм | 0,60 | 0,45 | 0,25 | 0,15 |
| Номінальна відстань між провідниками, *S,* мм | 0,60 | 0,45 | 0,25 | 0,15 |
| Гарантійний пасок, *b,* на зовнішньому шарі, мм | 0,30 | 0,20 | 0,10 | 0,05 |
| Те ж, на внутрішньому шарі, мм | 0,15 | 0,10 | 0,05 | 0,03 |
| Відношення діаметра отвору до товщини плати | ≥ 0,50 | ≥0,50 | ≥0,33 | ≥0,33 |
| Допуск на отвір Δd, мм, без металізації, d ≤ 1 мм | ±0,10 | ±0,10 | ±0,05 | ±0,05 |
| Те ж, d > 1 мм | ±0,15 | ±0,15 | ±0,10 | ±0,10 |
| Допуск на отвір Δd, мм, з металізацією, d ≤ 1 мм | +0,10<br>– 0,15 | + 0,10<br>– 0,15 | + 0,05<br>– 0,10 | + 0,05<br>– 0,10 |
| Те ж, d > 1 мм | + 0,15<br>– 0,20 | + 0,15<br>– 0,20 | + 0,10<br>– 0,15 | + 0,10<br>– 0,15 |
| Допуск на ширину провідника Δ*t,* мм, без покриття | ±0,15 | ±0,10 | + 0,03<br>– 0,05 | ±0,03 |
| Те ж, з покриттям | + 0,25<br>– 0,20 | + 0,15<br>– 0,10 | + 0,10<br>– 0,08 | ±0,05 |
| Допуск на розташування отворів *δd,* мм, при розмірі плати менш 180 мм | 0,20 | 0,15 | 0,08 | 0,05 |

Габаритні розміри, конфігурацію і місця кріплення ДП вибирають у залежності від настановних розмірів, елементної бази, експлуатаційних характеристик і з урахуванням класу точності.

Збільшення розмірів ДП веде до підвищення похибок при їх виготовленні. Відхилення від прямокутності, наявність пазів і вирізів збільшують трудомісткість виготовлення.

Відповідно до вимог в програмному середовищі Sprint-Layout виконано топологію друкованої плати пожежного сповіщувача (рис. 2.9). Габаритні розміри складають 182 х117 мм.

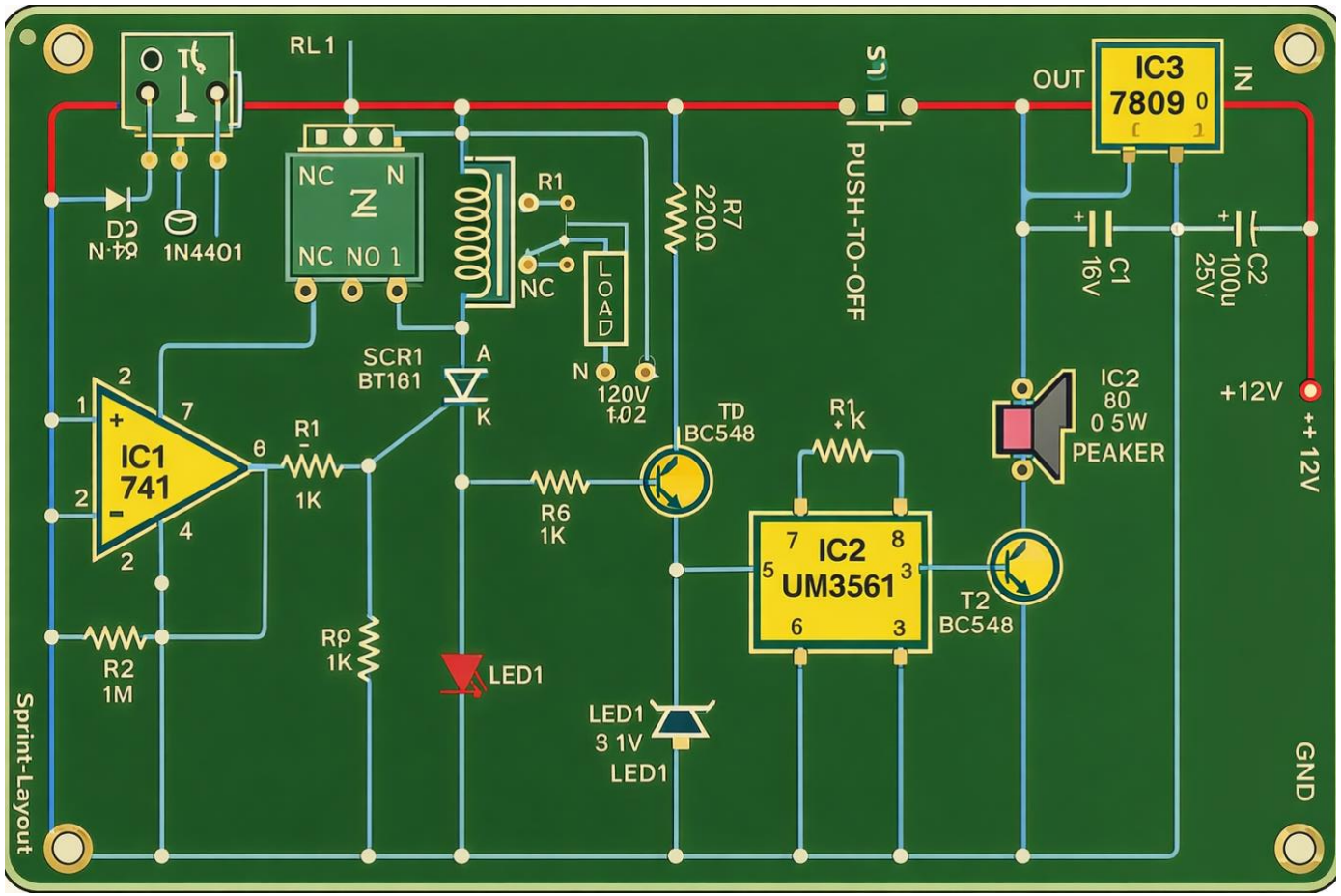



Рисунок 2.9- Топологія друкованої плати пожежного сповіщувача

# 3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

Правова основа законодавства, що регулює охорону праці в Україні, складається з Конституції України Законів України, таких як "Про охорону праці", “Про охорону здоров'я”, “Про пожежну безпеку”, ”Про використання ядерної енергії та радіаційний захист", "Про забезпечення санітарного та епідеміологічного благополуччя населення", а також Кодексу законів про працю України (КЗПП). Основним законодавчим документом у галузі охорони праці є Закон України "Про охорону праці", який поширює свою дію на всі підприємства, установи та організації незалежно від форм власності та видів їх діяльності, а також на всіх громадян, які працюють або залучені до праці на цих підприємствах.

Навчання та систематичне підвищення рівня знань працівників та населення України з питань охорони праці є одним з основних принципів державної політики в галузі охорони праці. Це є фундаментальною основою безпеки та необхідною умовою для удосконалення управління охороною праці та забезпечення ефективної профілактичної роботи щодо запобігання аварій та травматизму на виробництві.

## 3.1 Вимоги до безпеки праці

Умови праці охоплюють всі фактори виробничого середовища, які впливають на здоров'я та працездатність людини під час виконання роботи.

Згідно з вимогами ГОсТ 12.3.002-75 "Процеси виробничі" та факторами виробничого середовища, виробниче середовище, яке забезпечує здорові та працездатні умови праці, головним чином залежить від вибору технологічного процесу, матеріалів та устаткування, розподілу навантаження між людиною та устаткуванням, режиму праці та відпочинку, естетичної організації середовища та професійного добору працюючих. Організація умов праці повинна враховувати вплив небезпечних та шкідливих виробничих факторів, які можуть призвести до травм та інших раптових різких погіршень здоров'я або захворювань, зниження працездатності.

Згідно з ГОсТ 12.0.003-74, шкідливі та небезпечні виробничі фактори поділяються на чотири групи: фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні, кожна з яких поділяється на підгрупи. Для попередження травм та професійних захворювань від впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів на підприємствах приймаються заходи для їхнього попередження та усунення, а також зниження ступеня впливу на працюючих.

Організація та поліпшення умов праці на робочому місці є одним з найважливіших резервів продуктивності праці та економічної ефективності виробництва, а також подальшого розвитку самого працюючого. Це є проявом соціального та економічного значення організації та поліпшення умов праці.

Для захисту від дотику до струмоведучих частин електроустановок використовують захисні засоби, такі як ізоляція, огородження, блокування, електрозахисні засоби, сигналізація та плакати. Ізоляція проводів характеризується її опором, опір ізоляції проводів від землі та корпусів електроустановок створює безпечні умови для обслуговуючого персоналу.

Огородження застосовуються суцільні та сітчасті, вони повинні бути вогнестійкими. суцільні огородження (кожухи та кришки) застосовуються в електроустановках напругою до 1000 В та вище.

Блокування застосовується в електроустановках напругою вище 250 В, у яких часто виробляються роти на струмоведучих частинах, що обгороджуються..

До електрозахисних засобів відносять:

- ізолюючі засоби;
- переносні покажчики напруги і струмовимірювальні кліщі.

При обслуговуванні електроустановок важливо використовувати сигналізацію, яка привертає увагу працівників та попереджає їх про можливі небезпеки.

Радіоелектронне устаткування використовує радіотехнічні пристрої, електронні, іонні, напівпровідникові та квантові пристрої.

При монтажі радіо схем необхідно дотримуватися певних правил безпеки, таких як уникання дотику до струмоведучих частин схеми, не застосовувати проводи з ушкодженою ізоляцією для з'єднання блоків та пристроїв, не робити пайку та установку деталей в устаткуванні, що знаходиться під напругою, не вимірювати напруги та струми переносними пристроями з неізольованими проводами та щупами, не підключати блоки та пристрої до устаткування, що знаходиться під напругою, не замінювати запобіжники у включеному устаткуванні та не працювати на високовольтних установках без захисних засобів.

Для виміру параметрів електричної схеми за допомогою контрольно-вимірювальної апаратури можна витягати блоки налагоджуваного устаткування з корпуса, відкривати дверцята, знімати огородження в місцях підключення вимірювальної апаратури, замикати накоротко блокування. При цьому необхідно дотримуватися вимог безпеки:

1. усі підготовчі роботи, приєднання вимірювальної апаратури повинні вироблятися після зняття напруги і перевірки відсутності залишкових зарядів;

2. до подачі напруги металеві корпуси устаткування і вимірювальної апаратури повинні бути заземлені (занулені). Якщо заземлення вносить перекручування (наведення), то допускається робота без заземлення, але з застосуванням тимчасових огороджень, що застерігають плакатів і захисних засобів;
3. місце розташування і підключення контрольно-вимірювальної апаратури в електричні ланцюги з напругою вище 1000 В варто відгородити і вивісити попереджувальні плакати, залишивши лише доступ до органам управління.[17]

## 3.2 Вимоги до промсанітарії

При виборі місця для будівництва підприємств необхідно враховувати комплекс санітарно-технічних заходів, які забезпечать сприятливі умови для працівників та навколишнього середовища, включаючи житлові та лісові масиви.

Промислові підприємства, які виділяють в атмосферу дим, пил, гази та хімічні сполуки, повинні бути розташовані відносно інших підприємств та житлових масивів з підвітряної сторони.

Місце для будівництва промислового підприємства повинно відповідати санітарним вимогам щодо прямого сонячного опромінення та природного провітрювання, а також бути розташоване якнайближче до енергетичних комунікацій.

У проектах підприємств необхідно передбачати відсутність або мінімальне виділення в повітряне середовище, атмосферу та стічні води шкідливих та неприємно пахнуть речовин, а також мінімальне утворення

шуму, вібрації, ультразвуку, електромагнітних хвиль радіочастот, що іонізує випромінювання та статичної електрики.

У приміщеннях з віконними прорізами необхідно передбачати кватирки, фрамуги та стулки для провітрювання. На підприємствах повинні бути побутові приміщення такі як гардеробні, умивальні, душові, убиральні, кімнати особистої гігієни жінок, курильні, санпропускники тотальні.

Для спуску фекально-господарських та виробничих вод на кожн підприємстві обладнані каналізаційні пристрої. санітарні вимоги до виробничих приміщень встановлюються з урахуванням шкідливих речовин, що виділяються при технологічних процесах, згідно з ДсТУ та ГОсТ.

Шкідливими називаються речовини, які можуть викликати виробничі травми та профзахворювання при контакті з організмом людини в разі порушення вимог безпеки.

Шкідливі речовини підрозділяються на чотири класи небезпеки: надзвичайно небезпечні, високо-небезпечні, помірковано небезпечні та мало-небезпечні.

Гранично припустимі концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони визначаються так, щоб вони не могли викликати захворювань.

Шкідливі речовини підрозділяються на токсичні,о дратують та канцерогенні, і можуть бути у виді зваженого пилу, диму та туману.

При плануванні технологічних процесах варто розміщати устаткування і робочі місця з однорідними шкідливими виробничими факторами на одній ділянці. Виробничі меблі й устаткування повинні відповідати технологічному значенню.

При плануванні технологічних процесів виробництва, важливо розміщувати устаткування та робочі місця з однорідними шкідливими виробничими фактами на одній ділянці. Виробничі меблі та устаткування повинні відповідати технологічному значенню. Метеорологічні умови, такі як

температура, вологість повітря та теплове випромінювання, мають значний вплив на людину та можуть призвести до захворювань. Оптимальні та припустимі метеорологічні умови для робочої зони приміщення встановлюються згідно з Державними стандартами та ГОсТами, з урахуванням часу року та ваги виконуваних робіт.

Природне та штучне висвітлення виробничих приміщень повинні відповідати вимогам сНіП 11-4-79. Для будинків, розташованих у III та IV кліматичних районах, повинні бути передбачені сонце-захисні пристрої. У приміщеннях з недостатнім природним світлом та без природного світла повинні застосовуватися установки штучного ультрафіолетового опромінення відповідно до сН 245-71.

Для місцевого освітлення варто застосовувати світильники, установлені на верстатах та відрегульовані так, щоб освітленість у робочій зоні була не нижче значень, встановлених у додатку V. Для місцевого освітлення повинні використовуватися світильники з не просвічуваними відбивачами із захисним кутом не менш 30°. Крім того, повинні бути передбачені заходи для зниження відбитого блиску. Чищення скла, віконних прорізів та світлових ліхтарів повинні проводитися не рідше двох разів у рік.

Чищення ламп та освітлювальної арматури для інструментальних цехів повинні проводитися не рідше двох разів у рік, а для інших виробничих приміщень — не рідше чотирьох разів у рік.

При розробці технологічних процесів, проектуванні, виготовленні та експлуатації машин, важливо прийняти всі необхідні заходи для зниження шуму. Боротьба з шумом в джерелі його виникнення є найбільш дієвим способом боротьби з шумом. Боротьба з шумом в джерелі його виникнення – це найбільш дієвий спосіб боротьби з шумом.

Шум є одним з найбільш шкідливих виробничих факторів, який може впливати на здоров'я працівників та якість виробництва. Для зниження шуму

використовуються різні методи. Один них - створення мало-шумних механічних передач та розробка способів зниження шуму в підшипникових вузлах та вентиляторах. Ще один метод - зниження шуму за допомогою звукопоглинання та звукоізоляції. Для цього об'єкт, який випромінює шум, розташовують у кожусі, внутрішні стін якого покриваються звукопоглинальним матеріалом. Також можна використовувати звукоізольовану стіну або перегородку, щоб ізолювати шумо-випромінювальний об'єкт від основного, менш шумного приміщення.

Для захисту працівників від шкідливих виробничих факторів, таких як пил токсичних металів, необхідно забезпечити їх спецодягом, спецвзуттям та запобіжними пристосуваннями відповідно до діючих типових галузевих норм. Робітника службовці цехів і ділянок обробки різанням повинні мати спецодяг, який систематично очищається від осілого пилу, провітрюється, зберігається в металевих шафах стирається не рідше одного разу в тиждень. Для захисту шкірного покриву від впливу ЗОР і пилу токсичних металів застосовуються дерматологічні захисні засоби, такі як профілактичні пасти, мазі та креми. [18]

## 3.3 Вимоги до пожежної безпеки

Для забезпечення безпеки електроустаткування, включаючи можливість їх застосування, монтаж, наладку та експлуатацію, необхідно дотримуватись вимог чинних правил улаштування електроустаткувань (ПУЕ), Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕ), Правил техніки безпеки під час експлуатації електроустаткування споживачів (ПТБ) та інших нормативних документів.

Будівельна частина електроустаткувань повинна відповідати протипожежним вимогам будівельних норм та ПУЕ Відстань від повітряних

ліній електропередач до будівель і споруд, які містять вибухопожежні та пожежнобезпечні приміщення, до вибухо- і пожежобезпечних зон зовнішніх установок, а також займистих та близьких частин будівель і споруд, що виступають, місце зберігання горючих матеріалів, повинна відповідати нормам, визначеним ПУЕ.

Телефонні апарати, сигнальні пристрої до них, електричні годинники, радіоприймачі та інші подібні споживачі електроенергії можуть використовувати у вибухонебезпечних зонах згідно з класом захисту.

Телефонні апарати, сигнальні пристрої до них, електричні годинники, радіоприймачі та інші подібні споживачі електроенергії можуть використовуватись у вибухонебезпечне вибухозахисту - ступень захисту - класу зони.

Плавкі вставки запобіжників повинні бути калібровані із зазначенням на клеймі номінального струму вставки (клеймо ставиться заводом-виробником або електротехнічною лабораторією Застосування саморобних не каліброваних плавких вставок забороняється.

Налектродвигуни, світильники, інші електричні машини, апарати обладнання, встановлені у вибухонебезпечних або пежонебезпечних зонах, повинні бути нанесені знаки, що вказують їх ступінь захисту згідно з чинними стандартами.

Для з'єднання, відгалуження та окінцювання проводів і кабелів можна використовувати різні методи, такі як пресування,варювання, паяння або затискачі (гвинтові, болтові тощо).ажливо, щоб місце з'єднання проводів і кабелів, а також з'єднувальні та відгалужуванні затискачі мали мінімальний перехідний опір. Тимчасові електромережі не дозволяються.

Влаштування та експлуатація тимчасових електромереж не дозволяється**.**

Первинні засоби пожежегасіння включають вогнегасники та пожежний інвентар, такі як покривала з негорючої грубововняної тканини або повсті,

ящики з піском, бочки і пожежні відра, совкові лопати, а також пожежний інструмент, такий як гаки, сокири тощо. Для визначення видів та кількості первинних засобів пожежегасіння слід враховувати фізико-хімічні та пожежонебезпечні властивості горючих речовин, їх взаємодію з вогнегасними речовинами, а також розміри площ виробничих приміщень, відкритих майданів та установок. Необхідну кількість первинних засобів пожежегасіння визначають окремо для кожного поверху та приміщення, а також для закритих та відкритих установок. Якщо в одному приміщенні знаходиться декілька різних за характером небезпекою виробництв, не відділених одне від одного протипожежними стінами, усі ці приміщення забезпечують вогнегасниками, протипожежним інвентарем та іншими видами засобів пожежегасіння.

Покривала можуть мати різні розміри, але мінімальний розмір повен бути не менше 1 м х 1 м. Вони призначені для гасіння локальних осередків пожеж у разі займання речовин, горіння яких може відбуватися без доступу повітря. У місцях застосування та зберігання легкозаймистих та горючих речовин розміри покривал можуть бути збільшені до розмірів 2 м х1,5 м, 2 м х 2 м. Покрала слід застосовувати для гасіння речовин класів “А”, “В”, “О”, (Е).

Бочки з водою встановлюються у виробничих та складських приміщеннях, спорудах у разі відсутності внутрішнього протипожежного водогону та за наявності горючих матеріалів.

Вибір вогнегасників залежить від кількох факторів, таких як їх вогнегасна спроможність, гранична площа, клас горючих матеріалів та категорії приміщень за вибухопожежною та пожежною небезпекою. Класифікація вогнегасників включає клас А для пожеж твердих речовин, клас В для пожеж горючих рідин або твердих речовин, клас с для пожеж газів, клас D для пожеж металів та сплавів та клас Е для пожеж, пов'язаних з горінням електроустановок.

Виріб типу вогнегасника (пересувний чи переносний) залежить від розмірів можливих осередків пожеж. У разі збільшених розмірів рекомендується використовувати пересувні вогнегасники. При роботі з радіоелектронним устаткуванням рекомендується використовувати вуглекислотні вогнегасники типу ВВ.

Також необхідно враховувати кліматичні умови експлуатації будівель та споруд, вибираючи вогнегасник з відповідною температурною межею використання. Якщо на об'єкті можливі комбіновані осередки пожеж, то перевага у виборі вогнегасника віддається більш універсальному в цій області застосування.[16]

## 3.4 Вимоги електробезбеки

### 3.4.1 Загальні вимоги

Небезпечний і шкідливий вплив на людей електричного струму, електричної дуги та електромагнітних полів проявляється через ураження електричним струмом у вигляді електротравм і професійних захворювань.

ступінь небезпечного і шкідливого впливу на людину електричного струму, електричної дуги та електромагнітних полів залежить від:

- величини та властивостей (видів) напруги, струму;
- тривалості впливу електричного струму чи електромагнітного поля на організм людини;
- шляху струму через тіло людини;
- частоти електричного струму;
- умов довкілля.

Основні вимоги щодо безпеки електроустаткування та оцінювання його відповідності встановлено в.

Вимоги електробезпеки до конструкції та будови електроустаткування різних видів установлюють у стандартах та технічних умовах на електротехнічні вироби.

Правила безпечного експлуатування електроустановок встановлює спеціально уповноважений центральний орган виконавчої влади з нагляду за промисловою безпекою, охороною праці та гірничого нагляду.

Загальні вимоги захисту від ураження електричним струмом – згідно з ДсТУ IEc 61140.

Гранично допустимі значення напруг дотику та струмів в електроустаткованні – згідно з ДсТУ IEc 61140.

Вимоги електробезпеки під час впливу електричних полів промислової частоти – згідно з ГОсТ 12.1.002, під час впливу електромагнітних полів радіочастот – згідно з ГОсТ 12.1.006.

Електробезпека забезпечується:

- конструкцією електроустаткування;
- організаційними та технічними заходами;
- технічними способами та засобами захисту.

Електроустаткування та його частини повинні відповідати вимогам безпеки та бути відтворені так, щоб ті, хто працює, не наражалися на небезпечний і шкідливий вплив електричного струму та електромагнітних полів.

До роботи з електроустаткованням допускають працівників, які пройшли інструктаж і навчання безпечних методів праці, здали іспити на перевірку знань правил безпеки та охорони праці й інструкцій відповідно до посад, які вони обіймають, стосовно роботи, яку виконують, з присвоєнням

відповідної групи з електробезпеки згідно з, та які не мають медичних протипоказань. [17]

### 3.4.2 Організаційні заходи

Затвердження переліку робіт, які виконують за нарядами та розпорядженнями і впорядку поточної експлуатації.

Надання прав і затвердження списків осіб, відповідальних за безпечне виконання робіт:

- видавання нарядів, розпоряджень;
- керівників робіт;
- допускачів;
- наглядачів;
- проведення оперативних перемикань;
- видавання дозволів на підготовку робочих місць і на допуск до роботи;
- одноособове оглядання електроустановок;
- працівників, які виконують роботи в порядку поточної експлуатації.

Надання зазначених вище прав виконують після перевірки знань.

Під час виконання робіт за нарядами та розпорядженнями має бути виконано:

- видавання нарядів, розпоряджень;
- видавання дозволу на підготовку робочих місць та на допуск до роботи;
- підготовку робочого місця і допуск до роботи;
- нагляд під час виконання робіт;
- переведення на інше робоче місце;
- оформлення перерв у роботі та її закінчення.

Роботи на струмовідних частинах електроустаткування, які перебувають під напругою, та поблизу них виконують згідно з вимогами нормативно-правових актів з охорони праці.

3.4.3 Розрахунок електромережі на здатність відключення при аварійному режимі роботи електрообладнання

Струм короткого замикання визначається за формулою [18]:

$$I_{\text{к.з}} = \frac{U_{\text{ф}}}{(R_{\text{ф}}+R_{\text{н}}+Z_{\text{т}})} \quad (3.1)$$

де $U_{\text{ф}}$ — фазова напруга мережі, становить 220 В; $R_{\text{ф}}$ — опір фазового проводу, становить ≈ 1,6 Ом; $R_{\text{н}}$ — опір нульового проводу, становить ≈ 1,6 Ом; $Z_{\text{т}}$ — розрахунковий опір трансформатора, становить 0,1 Ом;

Підставимо значення у формулу (3.1), остаточно отримаємо:

$$I_{\text{к.з}} = \frac{220}{1{,}6+1{,}6+0{,}12} \approx 66{,}26 \quad (3.2)$$

Для надійного спрацювання автоматів струмового захисту необхідно, щоб виконувалась умова:

$$I_{\text{к.з}} \geq 1{,}4 \cdot I_{\text{авт.макс}}$$

Відповідно, струм відключення автомату $I_{\text{авт.}}$ повинен бути не більше:

$$I_{\text{авт.макс.}} = \frac{I_{\text{к.з}}}{1{,}4} = \frac{66{,}26}{1{,}4} \approx 47{,}32 \quad (3.3)$$

Мережа в робочому приміщенні обладнана автоматом струмового захисту, розрахованого на струм $I_{\text{авт.}}$ = 15 А. Таким чином, струм короткого замикання при виникненні аварійної ситуації в ( $I_{\text{к.з}}/I_{\text{авт.}}$ = 66,26 / 15 ≈ 4,42)

рази перевищує номінальний струм спрацювання автомату, що задовольняє встановленим нормам.

Напругу дотику до зануленого обладнання визначають за формулою:

$$U_{\text{дот.}} = I_{\text{к.з.}} \cdot R_{\text{н}} = 66.26 \cdot 1.6 \approx 106.01 \text{ В} \qquad (3.4)$$

Напруга дотику ($U_{\text{дот.}} < U_{\text{доп}} = 500$ В) за час спрацювання автоматів струмового захисту ($t < 0{,}1$ с) не перевищує допустимого значення, що відповідає вимогам ГОсТ 12.1.038-88.[19]

Підключення обладнання виконано у відповідності з вимогами ПБЕ та ПУЕ. Додаткових заходів щодо підвищення рівня електробезпеки в робочому приміщені впроваджувати не потрібно.

### 3.4.4 Технічні заходи

Технічні заходи захисту, які забезпечують електробезпеку, встановлюють з урахуванням:

a) номінальної напруги, виду та частоти струму електроустаткування;
b) способу електропостачання (від стаціонарної мережі, від автономного джерела живлення електроенергією);
c) типу заземлення системи;
d) виду виконання електроустаткування (стаціонарні, пересувні, переносні);
e) умов довкілля:
   - особливо небезпечні приміщення,
   - приміщення підвищеної небезпеки,
   - приміщення без підвищеної небезпеки, на відкритому повітрі;

f) можливості зняття напруги зі струмовідних частин, на яких або поблизу яких має проводитися робота;

g) характеру можливого дотику людини до елементів кола струму:
   - однофазний (однополюсний) дотик,
   - двофазний (двополюсний) дотик,
   - дотик до металевих неструмовідних частин, що опинилися під напругою;

h) можливості наближення до струмовідних частин, що перебувають під напругою, на відстань, меншу за допустиму, чи попадання в зону розтікання струму;

i) видів робіт: монтування, налагодження, випробування, експлуатування електроустаткування, які виконують у зоні його розташування, а також у зоні повітряних ліній електропередавання.

Вимоги щодо безпеки під час користування електроустаткованням побутового призначення повинні міститися в інструкціях виробників з експлуатації, що додаються до виробів [20].

Під час проведення робіт зі зняттям напруги в електроустаткованні, що працює, повинно бути виконано:

- проведення необхідних вимкнень і вжиття заходів, що унеможливлюють помилкове або самочинне ввімкнення комутаційної апаратури;
- вивішення заборонних плакатів на приводах ручного і на ключах дистанційного керування комутаційною апаратурою;
- перевіряння відсутності напруги на струмовідних частинах, які треба заземлити для захисту людей від ураження електричним струмом;
- установлення заземлення (увімкнення заземлювальних ножів, установлення переносних заземлень), вивішення вказівних плакатів;
- огородження, за потреби, робочого місця або струмовідних частин, що залишилися під напругою, і вивішення на огородженнях плакатів щодо

безпеки. Залежно від місцевих умов струмовідні частини огороджують до чи після їх заземлення.

### 3.4.5 Номенклатура видів захисту

Для забезпечення захисту від випадкового дотику до струмовідних частин застосовують такі види захисту:

- основне (робоче) ізолювання струмовідних частин (захисне ізолювання);
- додаткове, посилене, подвійне ізолювання струмовідних частин;
- захисні оболонки;
- захисні огорожі (тимчасові або стаціонарні);
- безпечне розташування струмовідних частин;
- ізолювання робочого місця;
- мала напруга;
- захисне вимкнення;
- попереджувальна сигналізація (звукова, світлова тощо);
- блокування;
- встановлення знаків безпеки;
- електрозахисні засоби;

- засоби індивідуального захисту.

Для запобігання ураженню електричним струмом під час дотику до металевих неструмовідних частин, які можуть бути під напругою внаслідок пошкодження ізоляції, застосовують окремо або в поєднанні такі види захисту:

- захисне заземлення;
- автоматичне вимкнення живлення;
- зрівнювання потенціалів;
- обладнання класу ізоляцією;
- захисний електричний поділ кіл;
- ізолювальні (непровідні) приміщення, зони, майданчики;
- системи наднизької напруги (безпечної, захисної);
- вирівнювання потенціалів.

Технічні види захисту застосовують окремо або в поєднанні один з одним так, щоб було забезпечено оптимальний захист.

Вимоги до технічних видів захисту встановлюють у стандартах і технічних умовах.

# ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Проведено аналіз конструкцій та принципів роботи пожежних датчиків, визначено їх недоліки та переваги, виходячи з яких було визначено мету та задачі роботи.

Розроблено структурну і принципову електричну схеми пожежного датчика на базі кремнієвого PIN-фотодіода, що реагує на виникнення іскри або пожежі в секції живлення приладу та миттєво відключає живлення. В приладі передбачено також світлове та звукове сповіщення.

Застосування фотодіоду у схемі сповіщувача забезпечує високу швидкодію, малий рівень шуму, компактні розміри, низьке енергоспоживання. Проведено розрахунок та моделювання блоку підсилення в програмі Every Circuit, що підтвердило коректність роботи приладу. Побудовано топологію друкованої плати пожежного датчика в середовищі Sprint Layout. Габаритні розміри складають182 х117 мм.

Виконано розрахунок електромережі на здатність відключення при аварійному режимі роботи електрообладнання у виробничому приміщенні.

Запропонований прилад може використовуватися для захисту комп’ютерів, телевізорів від загоряння.

# ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАННОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Encyclopaedia Britannica. Photoelectric effect. URL: https://www.britannica.com/science/photoelectric-effect/Applications (дата звернення: 17.03.2026).
2. Hamamatsu Photonics. Si photodiodes: Technical note. URL: https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/si_pd_kspd9001e.pdf (дата звернення: 20.03.2026).
3. Thorlabs. Photodiodes and Photoconductors Tutorial. URL: https://www.thorlabs.com/photodiodes-and-photoconductors-tutorials (дата звернення: 25.03.2026).
4. Encyclopaedia Britannica. Photodiode. URL: https://www.britannica.com/technology/photodiode (дата звернення: 17.04.2026).
5. RP Photonics Encyclopedia. Photodetectors. URL: https://www.rp-photonics.com/photodetectors.html (дата звернення: 27.04.2026).
6. Hamamatsu Photonics. Avalanche photodiodes (APDs). URL: https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/optical-sensors/apd.html (дата звернення: 17.05.2026).
7. Hamamatsu Photonics. Si APD: Technical note. URL: https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/si-apd_kapd9007e.pdf (дата звернення: 17.05.2026).
8. Encyclopaedia Britannica. Avalanche photodiode. URL: https://www.britannica.com/technology/avalanche-photodiode (дата звернення: 20.05.2026).

9. Бондаренко І. М., Бородін О. В., Галат О. Б., Карнаушенко В. П. Твердотільна електроніка, навч. посіб. Харків: ХНУРЕ, 2020. – 236 с.
10. Kukurudziak M. S. 1064 nm wavelength pin photodiode with low influence of periphery on dark currents. Journal of nano- and electronic physics. 2022. Vol. 14, No. 1. P. 01023-1-01023-4.
11. Kukurudziak M. S., Maistruk E. V., Yatskiv R., Koziarskyi I. P., & Koziarskyi D. P. Silicon p-i-n photodiode with reduced crystallographic defect density and structured surface. Journal of Physics D: Applied Physics. 2025. Vol. 58, No. 16. P. 165106.
12. Основи радіометрії та фотометрії : монографія / Л. А. Назаренко, В. М. Сорокін. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2014. 352 с.
13. Кравченко В.О., Лисенко В.В. Електроніка та мікросхемотехніка: методичні вказівки до самостійної роботи. Суми, 2024. 84 с.
14. Nikonova Z., Nebesniuk O., Nikonova A. The ways of increasing the efficiency of photoelectric transducers. Європейський вектор модернізації економіки в умовах сталого розвитку промислового регіону: монографія/ під заг. ред. д.е.н., проф. Метеленко Н. Г. Київ: Інтерсервіс, 2021. С.163-169.
15. Електронні пристрої та технології для промисловості, енергозбереження та екологічних напрямів: монографія/ під заг. ред. д.т.н., проф. Критської Т.В. Одеса: Олді +. 2023. 154 с.
16. Дружинін А.О. Твердотільна електроніка. Фізичні основи і властивості напівпровідникових приладів: навч. посібник / А.О. Дружинін. Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2019. 332 с.
17. Виробнича санітарія та гігієна. URL: https://pidru4niki.com/15060913/bzhd/virobnicha_sanitariya_gigiyena (дата звернення: квітень 2026 р.).

18. Про затвердження правил пожежної безпеки в Україні. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0252-15/ed20230407#Text (дата звернення: травень 2026 р.).

19. ДБН В 1.1-7:2016 Пожежна безпека. Загальні вимоги [Чинний від 01.06.2017] Вид. офіц. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2017, 38 с.

20. Основи охорони праці: навч. посіб. / Р.М. Івах та ін. 4-те вид. Київ: Кондор, 2010. 464 с.