**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 реєстратора фотонів потужного імпульсного лазерного випромінювання*

Виконав: студент IV курсу, групи 6.1532-с
спеціальності *G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка»*
(код і назва спеціальності)
освітньої програми Мікро- та наносистемна техніка
(код і назва освітньої програми)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)

В.С. Рубан
(ініціали та прізвище)

Керівник доцент кафедри ЕІСПЗ, доцент, к.ф.-м.н., Світанько М.В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент завідувач кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ, професор, д.т.н., Коваленко В.Л.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2025рік

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

Факультет _____ _____
Кафедра __*електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення*
Рівень вищої освіти _*перший бакалаврський*_____
Спеціальність *G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка»* (код і назва)

Освітня програма __*Мікро- та наносистемна техніка* _____
(код і назва)
Спеціалізація _____

**ЗАТВЕРДЖУЮ**
Завідувач кафедри _*ЕІСПЗ*____
_____*Критська Т.В.*_____
"___30_" травня 2025 року

**З А В Д А Н Н Я**
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

_____*Рубану Владиславу Сергійовичу*_____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проєкту) ___*Розробка реєстратора фотонів потужного імпульсного лазерного випромінювання*_____
_____
керівник роботи *Світанько Микола Вікторович, к.ф.-м.н., доцент*_____,
( прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від "*27" грудня 2024 року № 2029-с*_____

2 Строк подання студентом роботи ___*30 травня 2025 року*_____

3 Вихідні дані до роботи _ *200 – 1600 нм, 1Гц – 100 кГц, 1 – 5 мДж, 220 В, 3-32В*_____

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)*1. Вимірювачі енергетичних характеристик лазерного випромінювання 2. Розробка реєстратора фотонів потужного імпульсного лазерного випромінювання 3. Охорона праці та техногенна безпека при розробці електричних схем реєстратора фотонів потужного імпульсного лазерного випромінювання*

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)*1. Вимірювачі енергетичних характеристик лазерного випромінювання 2. Схема електрична мікроконтролерного блоку управління 3. Моделювання схеми мікроконтролерного блоку управління*

6 Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|---|---|---|---|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| *I* | *Світанько М.В., доцент* | *28.12.2024* | *28.12.2024* |
| *II* | *Світанько М.В., доцент* | *28.12.2024* | *28.12.2024* |
| *III* | *Світанько М.В., доцент* | *28.12.2024* | *28.12.2024* |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

7 Дата видачі завдання *28 грудня 2024 року*

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|---|---|---|---|
| *1* | *Літературний огляд* | *29.03.2025* | |
| *2* | *Розрахункова частина* | *26.04.2025* | |
| *3* | *Розробка заходів із охорони праці та техногенної безпеки* | *30.05.2025* | |
| *4* | *Розробка графічної частини роботи* | *30.05.2025* | |
| *5* | *Оформлення пояснювальної записки* | *30.05.2025* | |
| *6* | *Нормоконтроль* | *30.05.2025* | |
| *7* | *Попередній захист роботи* | *30.05.2025* | |

Студент _____ *Рубан В.С.*
( підпис ) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи (проекту) _____ *Світанько М.В.*
( підпис ) (прізвище та ініціали)

**Нормоконтроль пройдено**

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

# Реферат

Дипломна робота містить 60 сторінок, 22 рисунка, 4 таблиці, 26 джерело літератури.

Об’єкт дослідження – потужність лазерного випромінювання.

Мета роботи – розробка реєстратора фотонів потужного імпульсного лазерного випромінювання

Завдання роботи – розробити структурну схему реєстратора реєстратора фотонів потужного імпульсного лазерного випромінювання; розробити електричні схеми основних апаратурних блоків пристрою; провести моделювання роботи електричних схем пристрою.

Методика досліджень – моделювання пристрою за допомогою програмних забезпечень Proteus.

Короткий виклад результатів досліджень – розроблено труктурну схему реєстратора фотонів потужного імпульсного лазерного випромінювання; проведено моделювання роботи мікроконтролера STC89C52RC.

Результати впроваджень – макет електронного приладу пройшов випробовування на кафедрі ЕІСПЗ.

Прогнозні пропозиції – пропонується замінити реєструючий елемент (лавинний фотодіод) на Ge- pin діод.

ЛАЗЕРНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ, ОДНОФОТОННИЙ РЕЄСТРАТОР, ФОТОДІОД, МІКРОКОНТРОЛЕР.

Дипломну роботу виконано на кафедрі електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення з 28.12.2024 р. по 30.05.2025 р.

ЗМІСТ

Стор.

Вступ ……..6
1. Вимірювачі енергетичних характеристик лазерного випромінювання.. 7
1.1 Загальні властивості лазерного випромінювання ……..……7
1.1.1 Характеристика лазерного випромінювання……...7
1.1.2 Біологічна дія лазерного випромінювання……..8
1.1.3 Біологічна дія лазерного випромінювання…….….9
1.1.4 Вимоги безпеки при роботі з ОКГ……..10
1.2 Потужність лазерного випромінювання……...12
1.3 Вимірювання потужності лазерного випромінювання……13
1.4 Сучасні вимірювачі потужності лазерного випромінювання…….16
2. Розробка реєстратора фотонів потужного імпульсного лазерного випромінювання……..22
2.1 Структурна схема реєстратора фотонів потужного імпульсного лазерного випромінювання……22
2.2 Блок вимірювання потужності лазерного випромінювання ВП-2Н……23
2.3 Фотодіод реєстрації…….. 26
2.4 Мікроконтролерний блок управління реєструючими складовими пристрою…….……30
2.4.1 Блок живлення реєструючого каналу……...30
2.4.2 Драйвер керування польовим транзистором……33
2.5 Моделювання роботи мікроконтролерного блоку управління реєстратора фотонів потужного імпульсного лазерного випромінювання…37
2.5.1 Моделювання драйверу керування польовим транзистором……..37
2.5.2 Моделювання роботи мікроконтролера……39
2.6 Подальше удосконалення реєстратора фотонів потужного імпульсного лазерного випромінювання……40

3 Охорона праці та техногенна безпека при розробці електричних схем реєстратора фотонів потужного імпульсного лазерного випромінювання……43
3.1 Заходи зі зменшення впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів……44
3.2 Виробнича санітарія……45
3.3 Електробезпека……48
3.4 Пожежна безпека та техногенна безпека……..49
3.5 Розрахунок електромагнітного випромінювання від моніторів в приміщенні лабораторії……53
Висновки та рекомендації……56
Перелік посилань……..58

# Вступ

Лазерні прилади та системи складають на цей час велику кількість, серед яких важливо відзначити такі як: далекоміри, локатори, системи зв'язку, гіроскопи, інтерферометри, геодезичні прилади, широкий спектр медичних установок тощо.

Технічні характеристики лазерних приладів значною мірою визначаються властивостями лазера як джерела випромінювання. Тому при виборі конкретного лазера з усього їх різноманіття першорядне значення набуває знання параметрів і характеристик, що описують властивості лазера. Особливу увагу заслуговують параметри лазерного випромінювання, такі, як частота (довжина хвилі у вакуумі), поляризація, потужність (енергія), розбіжність і форма пучка, тривалість імпульсу.

Використання лазерів в приладах вимагає також знання законів поширення лазерного випромінювання в оптичних середовищах і його впливу на приймачі випромінювання.

Особливо актуальними є питання прицезійної реєстрації потужності лазерного випромінювання. Без знання точних кількісних оцінок цього параметра неможливо в подальшому оцінити властивості та поведінку багатьох ефектів, які виникають у речовинах під дією потужного лазерного випромінювання. Діапазон таких досліджень сягає від мікробіології до створення холодного термоядерного синтезу.

# 1. Вимірювачі енергетичних характеристик лазерного випромінювання

## 1.1 Загальні властивості лазерного випромінювання

### 1.1.1 Характеристика лазерного випромінювання

У даний час лазерна техніка знаходить дуже широке застосування. Зараз нараховується більше 200 галузей застосування ОКГ. Вони використовуються в системах передачі інформації, телебаченні, спектроскопії, в електронній та обчислювальній техніці, при забезпеченні термоядерних процесів, біології, медицині, у металообробці, металургії, при обробці твердих і надтвердих матеріалів, при зварювальних роботах, при збиранні мікросхем (зварювання металевих виводів і напівпровідникових матеріалів). За допомогою лазерного променю здійснюють проплав багатошарових матеріалів. Використовують ОКГ для приєднання резисторів, конденсаторів, виготовлення друкованих схем. Широко використовують ОКГ для одержання мікроотворів у надтвердих матеріалах.

Поряд з унікальними властивостями (спрямованість і величезна щільність енергії в промені) і перевагами перед іншим устаткуванням лазерні установки створюють певну небезпеку для здоров'я обслуговуючого персоналу.

Принцип дії лазерного випромінювання заснований на використанні змушеного (стимульованого) електромагнітного випромінювання, одержуваного від робочої речовини в результаті порушення його атомів

електромагнітною енергією зовнішнього джерела. Стимульоване випромінювання має такі якості:

1 – когерентність (сталість різниці фаз між коливаннями і монохроматичність — практично ширина смуги випромінювання 2 Гц);

2 – мала розбіжність променю (22'' – теоретична, 2' – практична);

3 – висока щільність потужності ($10^{14}$ Вт/см$^2$).

Випромінювання лазера з величезною щільністю потужності руйнує і випаровує матеріали. Одночасно в області падіння лазерного випромінювання на поверхню матеріалу в ньому створюється світловий тиск сотні тисяч мегапаскалей (мільйони атмосфер) (лазерний промінь – потік фотонів, кожний з яких має енергію й імпульс сили) до $10^6$ МПа. При цьому виникає температура до декількох мільйонів градусів К. При фокусуванні лазерного променю в газі відбувається утворення високотемпературної плазми, що є джерелом легкого рентгенівського випромінювання (1 нм) [1-5].

### 1.1.2 Біологічна дія лазерного випромінювання

Під біологічною ЛВ дією розуміють сукупність структурних, функціональних і біохімічних змін, що виникають у живому організмі. ЛВ впливають на весь організм – шкіру, внутрішні органи і особливо небезпечне для зору.

При дії лазерного випромінювання на біологічні об`єкти розрізняють термічний та ударний ефекти.

*Термічний ефект.* Ураження ЛВ подібне до теплового опіку: відбувається омертвляння тканин у результаті опіку. Прояв теплової дії: від опікових міхурів і випаровування поверхневих шарів до ураження внутрішніх органів.

*Ударний ефект***.** Причиною багатьох видів ураження ЛВ є ударні хвилі. Різке підвищення тиску поширюється спочатку з надзвуковою швидкістю, а потім сповільнюється. Ударна хвиля може виникнути як на поверхні тіла, так

і у внутрішніх органах. Поширення ударної хвилі в організмі приводить до руйнування внутрішніх органів без яких-небудь зовнішніх проявів.

Вплив ЛВ невеликої інтенсивності приводить до різних функціональних зрушень у серцево-судинній системі, ендокринних залозах, центральній нервовій системі. З'являється стомлюваність, великі стрибки артеріального тиску, головні болі і т.ін.

З локальних дій найбільше небезпечне ЛВ для очей. При $\lambda<0.4$ мкм і $\lambda>1.4$ мкм ЛВ являє небезпеку для рогівки очей і шкіри, а при значеннях $\lambda=0.4\text{-}1.4$ мкм – сітківки ока [6-8].

### 1.1.3 Нормування лазерного випромінювання

Нормування лазерного випромінювання здійснюється згідно з санітарними нормами і правилами СНиП 5804-91. За нормативами при проектуванні лазерної техніки має бути діючим принцип відсутності впливу на людину прямого, дзеркального та дифузного випромінювання.

При визначенні класу небезпеки лазерного випромінювання враховуються три спектральних діапазони (нм) : I – 18- 380, II – 380-1400, III – 140- $10^5$ [9,10].

Згідно з нормативами лазерне устаткування за ступенем небезпеки розділяється на 4 класи:

1 клас – повністю безпечні лазери, які не мають шкідливої дії на очі та шкіру;

2 клас – мають небезпеку для очей та шкіри при дії колімованим (прямим), тобто замкнутим у малому куті розповсюдження пучком; однак, дзеркальне або дифузне випромінювання таких лазерів безпечне для людини;

3 клас – це лазери, які діють у видимій межі спектру і являють небезпеку як для очей (прямим і дзеркальним випромінюванням на відстані 10 см від відбиваючої поверхні), так і шкіри (тільки прямий пучок);

4 клас – найбільш потужні лазери, які небезпечні при дифузному випромінюванні для очей і шкіри на відстані 10 см від дифузно відбиваючої поверхні.

Згідно СНиП 5804-91 регламентуються гранично допустимі рівні (ГДР) для кожного режиму роботи лазера і його спектрального діапазону і встановлюється для двох умов – одночасного та хронічного (того, що систематично повторюється) опромінювання [6-8].

### 1.1.4 Вимоги безпеки при роботі з ОКГ

Крім дії лазерного променю (прямого, дзеркально та дифузно відбитого) експлуатація ОКГ супроводжується комплексом інших шкідливих та небезпечних факторів:

1 – висока напруга зарядних пристроїв, що живлять батарею конденсаторів великої ємності;

2 – забруднення повітряного середовища хімічними речовинами, що утворюються при накачуванні (озон, оксид азоту) та при випаровуванні матеріалу мішені (оксид вуглецю, оксиди металів і ін.);

3 – УФ випромінювання імпульсних ламп і газорозрядних трубок (супутнє випромінювання);

4 – світлове випромінювання при роботі ламп накачування;

5 – рентгенівське випромінювання (супутнє вторинне);

6 – утворення часток високих енергій при опроміненні мішені ЛВ;

7 – іонізуюче випромінювання, використовуване для накачування;

8 – ЕМП, що утворюються при роботі генераторів ВЧ, УВЧ;

9 – шуми при роботі механічних затворів, насосів, шум ударних хвиль;

10 – токсичні рідини (робоче тіло в рідинних ОКГ), наприклад, оксиди хлору, фосфору та ін.

Таким чином, експлуатація лазерів потребує впровадження комплексу різноманітних захисних заходів [6-8].

Діючі ОКГ слід розміщати в окремих, спеціально виділених приміщеннях, які не повинні мати дзеркальних поверхонь. Поверхні приміщень повинні мати коефіцієнт відбивання не більш 0,4. Стіни, стеля і підлога повинні мати матову поверхню. У приміщенні повинна бути висока освітленість. Приміщення повинне обладнуватись загальнообмінною вентиляцією і місцевими відсмоктувачами. Забороняється проводити орієнтацію променю на вікна та двері. Строго обмежується доступ осіб до ОКГ. Установлюються попереджувальні знаки і система сигналізації про роботу ОКГ. Для запобігання ураження органів зору застосовують спеціальні окуляри зі світлофільтрами. Як матеріали для протилазерних окулярів використовують:

1 – поглинаючі стекла і пластмаси;

2 – відбиваючі діелектричні тонкоплівочні, що відбивають 90-95% падаючої світлової енергії (оксиди титану та ін.);

3 – комбіновані, що складаються з поглинаючих і відбиваючих матеріалів.

Поряд із захисними окулярами в лабораторіях з використання ОКГ необхідно виключити попадання лазерного випромінювання на відкриті ділянки шкіри. При щільності 50 Дж/см$^2$ у людини спостерігаються значні необоротні ушкодження відкритої шкіри. Для захисту шкіри застосовують фетровий одяг, шкіряні рукавички.

Для зменшення щільності відбитої (дифузійної) енергії необхідно підбирати колір фарбування стін. Так, темносиня олійна фарба відбиває тільки 16% хвиль довжиною 1,06 мкм і 12% хвиль 0,69 мкм. Низьке відбиття для хвиль довжиною 0,69 мкм має темно-зелене фарбування (15%). Для створення екрануючих штор рекомендують чорні щільні тканини, які не пропускають хвилі довжиною 1,06-0,69 мкм[6-8].

## 1.2 Потужність лазерного випромінювання

Енергія кванта випромінювання лазера визначається як різниця енергетичних рівнів в атомі активного середовища [6-10]:

$$hv = Em - En. \qquad (1.1)$$

Переходи можуть бути спонтанними і вимушеними. Останні виникають, коли на верхній перехід впливає зовнішня частота, що збігається з частотою переходу.

Потужність випромінювання $P$ (Дж/с = Вт) визначається енергією кванта s і кількістю випромінюваних фотонів $N$ в секунду. Тому, потужність лазерного випромінювання – це загальна кількість енергії, що випромінюється в одиницю часу, і визначається з умови рівності випромінювальної потужності $Рвипр$ і потужності втрат $Рвтр$ [6-10]:

$$Рвипр = Рвтр. \qquad (1.2)$$

Щільність потужності лазерного випромінювання – це потужність, віднесена до площі $S$ (Вт/м$^2$), на якій сконцентровано випромінювання.

Обчислення щільності потужності дає усереднене значення, оскільки не враховується розподіл випромінювання в поперечному перерізі лазерного пучка. У даному випадку об'єднуються такі групи параметрів як енергетичні і параметри пучків.

З наведених на експериментальних тривимірних графіках розподілів потужності різних мод лазерного випромінювання зрозуміло, що для конкретного застосування потрібна певна мода і щільність потужності (рис. 1.1) [6-10].

Така характеристика, як енергія, використовується при вивченні та вимірі імпульсного випромінювання, для чого необхідно вимірювати тривалість імпульса [6-10].

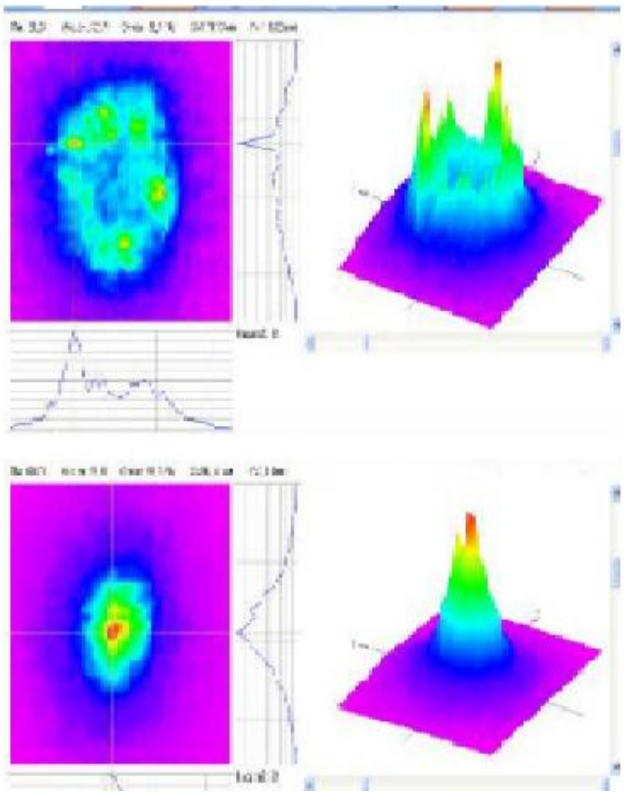


Рисунок 1.1.- Експериментальні тривимірні графіки розподілів потужності різних мод лазерного випромінювання

## 1.3 Вимірювання потужності лазерного випромінювання

Всі приймачі випромінювання поділяються на квантові (фотоелектронні помножувачі, фотодіоди) і теплові. Теплові приймачі засновані на перетворенні частини енергії падаючого випромінювання в теплову енергію, яка потім перетворюється в електричний сигнал. Перетворення відбувається за рахунок термоелектричного ефекту, зміни опору при нагріванні робочого тіла детектора (болометри), оптико-

акустичного ефекту, піроелектричного ефекту і ряду іншого. Термопари (термоелементи) були першими приймачами для виявлення і вимірювання інфрачервоного випромінювання. Основним елементом термопари є перехід на контакті між двома різними напівпровідниками з великим коефіцієнтом Зеєбека Θ [6-11].

Кращими елементами для приймача на основі термопари є матеріали з максимальним значенням термо-ЕРС, яка виникає через різницю температур між двома металами.

Термоелектричні приймачі засновані на виникненні термо-ЕРС при нагріванні спаю двох різнорідних металів: при поглинанні випромінювання, верхній шар (спай) набуває більш високу температуру щодо нижнього шару, електрони з нагрітого спаю будуть переходити в холодний і з'явиться дифузія електронів зверху вниз.

Надлишок електронів в холодній частині спаю створює негативний заряд, а в гарячій частині залишається позитивний некомпенсований заряд. Виникає термо-ЕРС, і з'являється струм. Якщо ланцюг провідників замкнути через опір навантаження *Rн*, то на ньому утворюється напруга *Uс*. Кількісно термо-ЕРС визначається співвідношенням [6-11]:

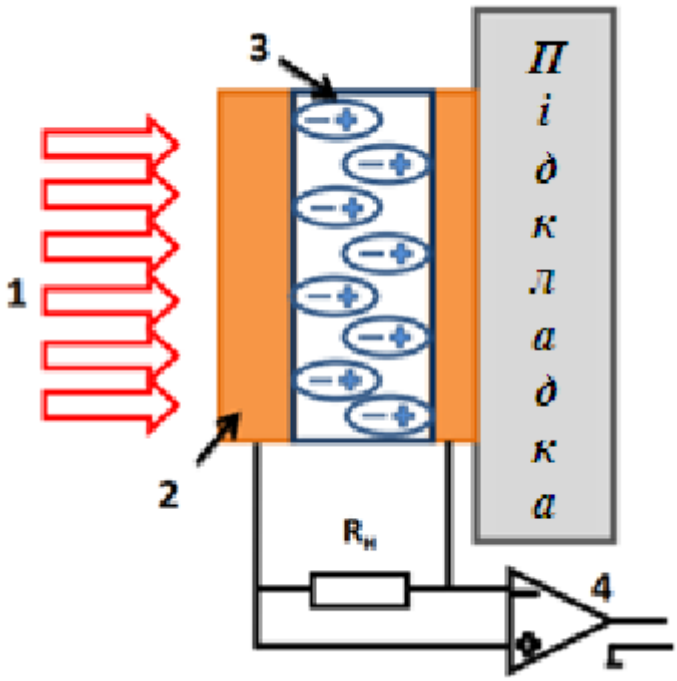
$$\Delta U_c = \alpha_T \Delta T, \qquad (1.3)$$

де $\alpha T$ – коефіцієнт термо-ЕРС, чисельно рівний різниці потенціалів, яка виникає при різниці температур спаїв в 1 К.

Постійна часу термопарних приймачів має діапазон від 10 мс до 5 мс. Ще одним поширеним типом теплових приймачів є піроелектричні приймачі, в основі яких лежать кристали сегнетоелектриків, в яких заряди виникають унаслідок змін температури під впливом променевої енергії. Їх дія заснована на зміні поляризації піроелектричного кристалу при зміні його температури.

При попаданні випромінювання 1 на поглинаюче покриття 2 (рисунок 1.2) відбувається нагрів піроелектричного матеріалу, дипольний момент змінюється, і на поверхні кристала з'являються електричні заряди 3. Ці

заряди викликають в ланцюзі навантаження *R*н електричний струм, напруга сигналу якого виявляється прямо пропорційною опору навантаження. Тому в піроелектричних приймачах опір навантаження вибирається не меншим, ніж 1 ГОм і використовуються диференціальні підсилювачі 4 з великим вхідним опором на польових транзисторах [6-11].




Риунок 1.2 - Схема піроелектричного приймача

Постійна часу піроелектричного приймача може досягати значення приблизно $10^{-7}$ с, а порогова чутливість приблизно $10^{-9}$ Вт/Гц$^{1/2}$. Для зменшення постійної часу всіх типів теплових приймачів необхідно домагатися мінімальної теплоємності робочого тіла приймача і його мінімальної теплопровідності. При роботі з тепловими приймачами доцільно застосовувати модуляцію світлового потоку. Сучасний піроелектричний вимірювач потужності, Coherent LabMax зображено на риунку 1.3 [6-11].




Рисунок 1.3 - Піроелектричний вимірювач потужності Coherent LabMax

## 1.4 Сучасні вимірювачі потужності лазерного випромінювання




Рисунок 1.4 - Вимірювач потужності лазерного випромінювання ІМЛІ-2

Вимірювач потужності лазерного випромінювання ІМЛІ-2 призначено для вимірювання вихідної потужності неперервних лазерів і середньої потужності імпульсних лазерів у видимому і близькому інфрачервоному діапазонах і може бути застосовано при атестації й

експлуатації медичних лазерних установок, для метрологічного забезпечення вимірювань енергетичних параметрів лазерів, що застосовуються в біології, техніці, наукових дослідженнях.

Таблиця 1.1 – харектеристики вимірювача потужності лазерного випромінювання ІМЛІ-2 [12]

| ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ | |
|---|---|
| Спектральний діапазон, мкм | 0,45...1,1 |
| Діапазон вимірюваних значень потужності лазерного випромінювання, мВт | 0,03…300 |
| Вхідна апертура, мм | 8 |
| Границя допустимої основної похибки вимірювача, % | ±10 |

**Оптичний вимірювач потужності Photodiode**

Основним вимірювальним обладнанням лазера є оптичний вимірювач потужності (або лазерний вимірювач потужності). Він вимірює потужність світла в промені (енергія, що передається за одиницю часу). Як правило, при отриманні імпульсної послідовності з високою частотою повторення пульсу, він відображає лише середню потужність. Інші інструменти, які називаються лічильниками світлової енергії, вимірюють імпульсну енергію [13].

Більшість лічильників потужності базуються на принципі теплових детекторів: вони перетворюють оптичну потужність в теплову потужність через абсорберні конструкції з чорними покриттями. Вони використовують термопіли для вимірювання отриманого підвищення температури (або, по суті, різниці температур між абсорбером і основою). Лічильник теплової потужності підходить для середньої потужності від 10 МВт до декількох кіловат. Точність теплового вимірювача потужності помірна, чутливість не залежить від довжини хвилі і відносно повільна. Типова схема вимірювання представлена на рисунку 1.5[13].

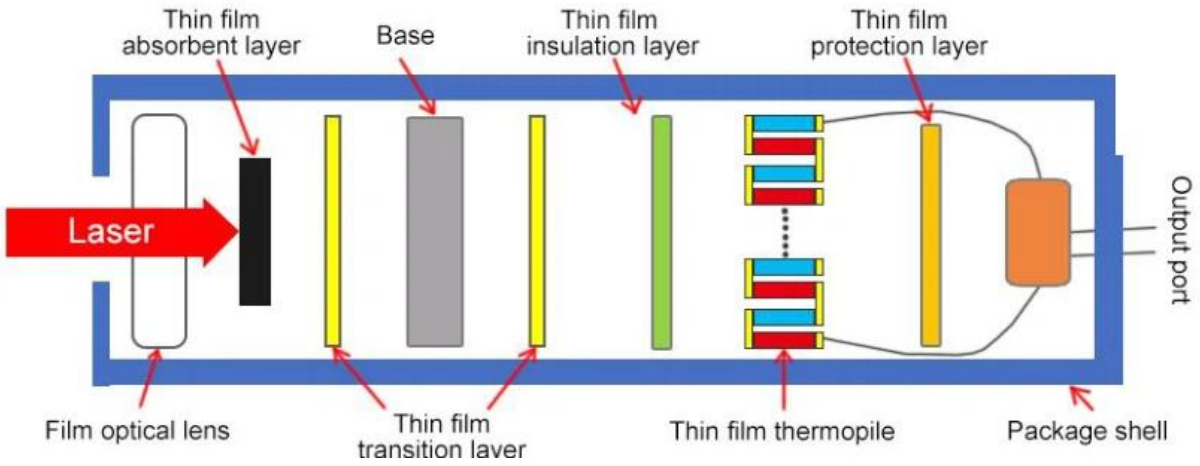



Рисунок 1.5 – Типова схема вимірювання потужності лазерного випромінювання

Оптичні лічильники потужності також можуть бути виготовлені з фотодіодів, які зазвичай базуються на кремнії, майже інфрачервоному германіумі та InGaAs, хоча останні дорогі. Коли лазер вказує на детекторі фотодіоду, струм, породжений світлом, пропорційний інтенсивності світла і залежить від довжини хвилі. Оптичний вимірювач потужності Photodiode може вимірювати потужність в діапазоні мікроват, або навіть нижче, і може використовувати відповідний атенюатор для вимірювання більш високої оптичної потужності. Але вони більш вразливі, ніж лічильники теплової енергії, тому що вони легше пошкоджується високою інтенсивністю світла.

Найбільш поширені специфікації лазерних лічильників потужності включають середню потужність, щільність потужності, енергію, щільність енергії, швидкість повторення і т.д. Виробники інструментів зазвичай радять користувачам досягти стабільної точки для зацікавленого лазера перед вимірюванням лазерної потужності, як правило, між 20 і 30 хвилинами, тому що характеристики оптичних елементів часто змінюються в міру досягнення балансу лазера. Інші рекомендації включають забезпечення того, щоб

промінь становить від 40% до 60% оптичної діафрагми приладу, оскільки занадто малий промінь збільшує можливість пошкодження детектора під час вимірювання [13].

На рисунку 1.6 преставлений оптичний вимірювач потужності Photodiode[13].




Рисунок 1.6 - Оптичний вимірювач потужності Photodiode

Вимірювач потужності FieldMaster FM ( рисунок 1.7.) [14]

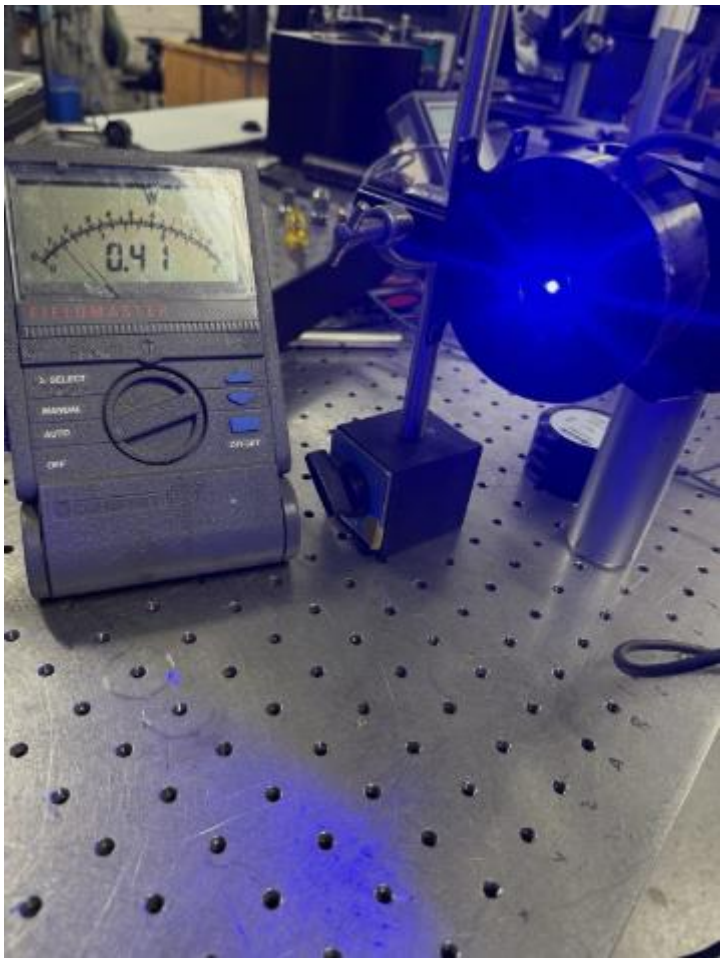



Рисунок 1.7 - Вимірювач потужності  FieldMaster FM

Отже, як показує аналіз проблеми вимірювання потужності лазерного випромінювання, наявні  у більшості систем вимірювачі, які усереднюють такий важливий параметр як потужність та енергія лазерного випромінювання. З цього випливає, що більш надійним способом оцінки енергетичних параметрів лазерного випромінювання може бути пофотонна реєстрація.

Тому, метою роботи є розробка реєстратора фотонів потужного імпульсного лазерного випромінювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно було виконати наступні завдання:

1) провести аналіз існуючих методів реєстрації потужного імпульсного лазерного випромінювання;

2) розробити структурну схему реєстратора фотонів потужного імпульсного лазерного випромінювання;

3) розробити електричні схеми основних апаратурних блоків пристрою;

4) провести моделювання роботи електричних схем пристрою за допомогою сучасних САПР;

5) розробити заходи щодо умов дотримання техніки безпеки та охорони праці робіт, що планується здійснити.

# 2. Розробка реєстратора фотонів потужного імпульсного лазерного випромінювання

## 2.1 Структурна схема реєстратора фотонів потужного імпульсного лазерного випромінювання

На рисунку 2.1 представлена структурна схема реєстратора фотонів потужного імпульсного лазерного випромінювання.

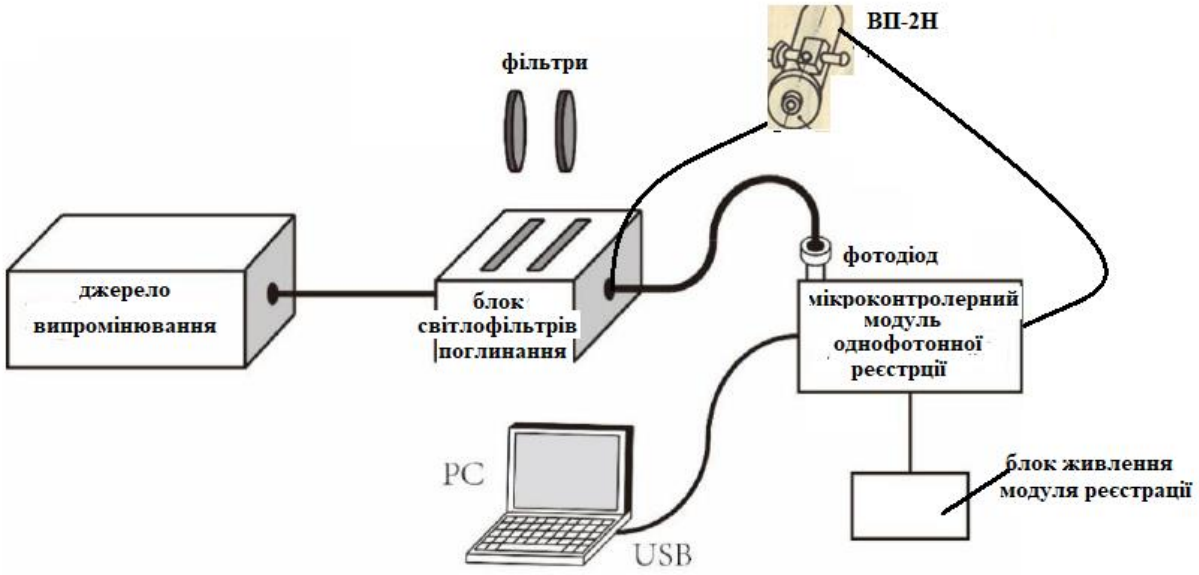



Рисунок 2.1 - Структурна схема реєстратора фотонів потужного імпульсного лазерного випромінювання

Структурна схема складається:

1) джерело випромінювання – лазер, що працює в імпульсному або безперервному режимі;

2) блок світлофільтрів – нейтральні світлофільтри марки НС, які поглинають потужне лазерне випромінювання (коефіцієнт поглиннання від 90 до 10 %);

3) блок вимірювання потужності лазерного випромінювання ВП-2Н;

4) фотодіод реєстрації – InGaAs лавинний фотодіод;

5) мікроконтролерний блок управління реєструючими складовими пристрою;

6) блок живлення мікроконтролерного блоку управління;

7) ПК – персональний комп’ютер для обробки сигналів та контролю параметрів реєстратора.

## 2.2 Блок вимірювання потужності лазерного випромінювання ВП-2Н

Для калібрування потужності вхідного випромінювання в системі реєстрації задіяний стандартний вимірювач середньої потужності та енергії лазерного випромінювання ВП-2Н (рисунок 2.2).

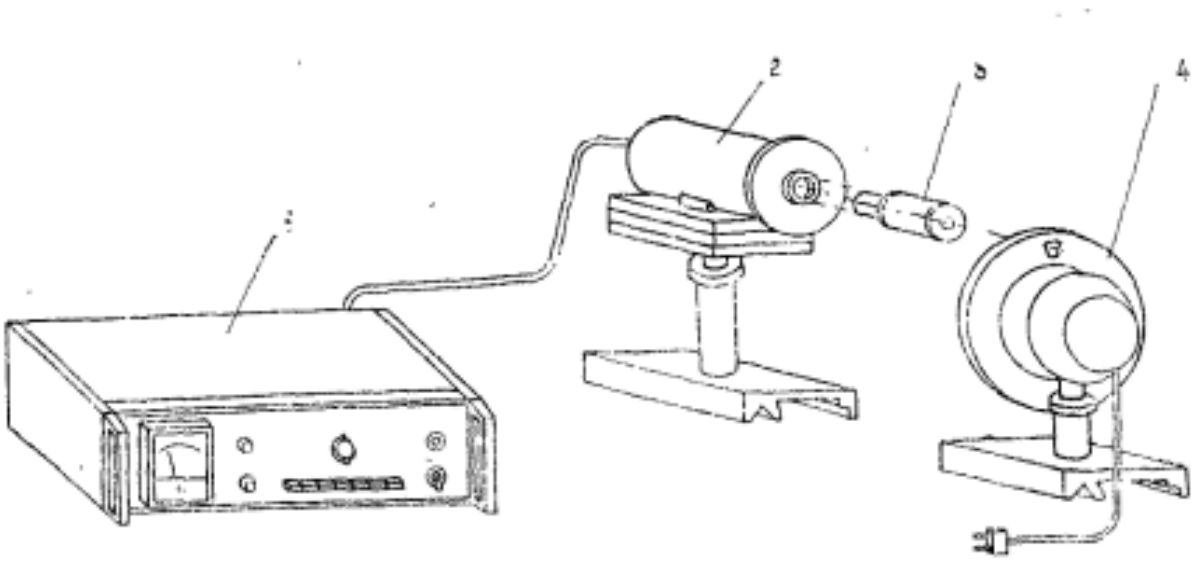



Рисунок 2.2 - Вимірювач середньої потужності та енергії лазерного випромінювання ВП-2Н: 1 – блок індикації, 2 – вимірювальна головка, 3 – візир, 4 – дисковий послаблювач потужності.

Принцип дії ВП-2Н заснований на реєстрації теплової енергії лазерного випромінювання за допомогою термоелемента (термопара) і подальшої її перетворення у термо- ЕРС для відображення за допомогою реєструючого пристрою. Електрична схема пристрою реєстрації ВП-2Н представлена на рисунку 2.3. Зовнішній вигляд ВП-2Н представлений на рисунку 2.4.

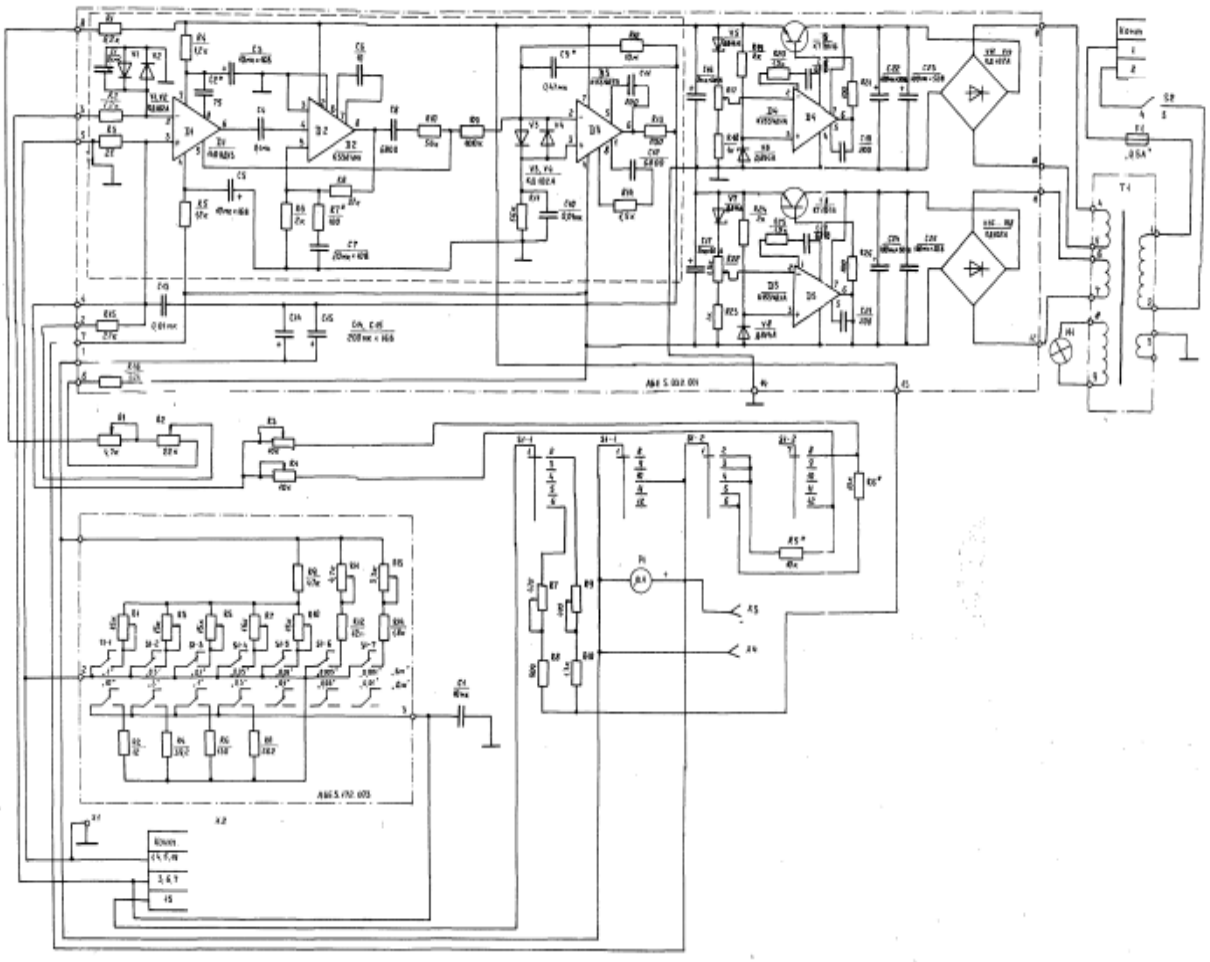


Рисунок 2.3 – Електрична схема пристрою реєстрації вимірювача потужності ВП-2Н



Рисунок 2.4 - Зовнішній вигляд ВП-2Н

ВП-2Н вимірює потужність в діапазоні 0,3 мВт – 10 Вт, діапазон енергії від 3 мДж до 10 Дж, діапазон довжин хвиль – 400 нм – 10600 нм.

Але для прицезійної фотонної реєстрації точність приладу недостатня, тому його призначення в схемі реєстрації – калібрування вхідного потоку енергії лазерного випромінювання.

Тому, для безпосередньої реєстрації фотонів використовуємо у якості приймального пристрою – лавинний фотодіод, який сполучений із мікроконтролерним блоком керування реєстратора.

## 2.3 Фотодіод реєстрації

У якості реєструючого елемента використовуємо лавинний фотодіод китайського виробництва фірми Sichuan Jiuzhou Optical Electronics [15].

Модуль детектора APD (лавинний фотодіод)-TIA з пігтейлом – 1,25 Гбіт/с або 2,5 Гбіт/с.

Цей модуль фотодетектора об'єднує InGaAs лавинний фотодіод (APD) та трансімпедансний підсилювач (TIA) в компактному корпусі з пігтейлом оптичного волокна. Він забезпечує детектування фотонів з високою пропускною здатністю та високою оптичною чутливістю. Цей модуль ідеально підходить для застосування в цифрових оптичних системах зв'язку.

Характеристики

- Висока швидкість передачі даних, до 2,7 Гбіт/с.
- Висока чутливість.
- Вбудований високошвидкісний малошумний TIA.
- Одне джерело живлення +3,3 В для TIA.
- Диференціальний вихід.
- Перевірена надійність у польових умовах.
- Високонадійний чіп InGaAs APD (сумісний з Telcordia GR-468).
- Широкий діапазон робочих температур -40~+85°C (опціонально).

Більш детальні характеристики фотодіода представлені у таблиці 2.1 [15]

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики фотодіода реєстрації [15]

| **Electro-optical Parameters** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Parameters** | **Symbol** | **Test Condition** | **Min.** | **Typ.** | **Max.** |
| Діапазон довжин хвиль (нм) | λ | | 1260 | - | 1620 |
| Пробивна напруга АПД (В) | VBR | Id=100μA | 33 | 38 | 46 |
| Робоча напруга АПД (В) | VAPD | Найкраща чутливість | | VBR-3 | |
| Напруга живлення TIA (В) | Vcc | | 3.0 | 3.3 | 3.6 |
| Робочий струм TIA (мА) | Icc | | | 44 | 59 |
| Чутливість (А/Вт) | R | λ=1550nm,M=1 | 0.9 | 1.0 | |
| Чутливість (дБм) | S | 2.5Gbps,ER=10dB, BPRS=$2^7$-1,BEM= $10^{-10}$,λ=1550nm | | -34 | |
| Низькочастотний граничний діапазон (кГц) | LF | | | 3 | 5 |
| Мала смуга пропускання сигналу (ГГц) | BW | M=9 | 1.65 | 2.05 | 2.5 |
| Вихідна амплітуда (мВ) | $V_{out}$ | Диференціал | | | 330 |
| Потужність насичення (дБм) | Psat | | -7 | | |

Електрооптичні параметри

| Параметр | **Min.** | **max.** | **Одиниці** |
|---|---|---|---|
| Прямий струм APD | | 2 | mA |
| Зворотний струм APD | | 3 | mA |
| Зворотна напруга APD | | VBR | V |
| Напруга живлення TIA | -0.7 | 5 | V |
| Робоча температура | -40 | 85 | ℃ |
| температура зберігання | -40 | 100 | ℃ |
| відносна вологість під час зберігання | | 85 | % |

На рисунку 2.5 представлений зовнішній вигляд фотодіода реєстрації [15].



Рисунок 2.5 - Фотодіод реєстрації

## 2.4 Мікроконтролерний блок управління реєструючими складовими пристрою

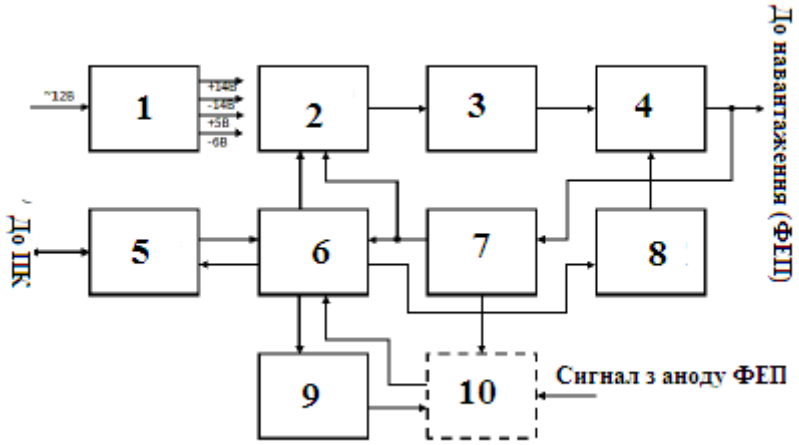
Для створення реєструючого каналу в роботі запропоновано використання фотоелектронного помножувача (ФЕП) – фотодіода. Фотоелектронний помножувач – це фотоелектричний приймач випромінювання, перетворюючий світловий сигнал в електричний. ФЕП широко використовуються для реєстрації слабких випромінювань (аж до рівня одиночних квантів [16]), оскільки володіють великим посиленням при низькому рівні власних шумів, а також для вивчення короткочасних процесів.

Завдяки простій конструкції і масовому випуску промисловістю фотоелектронні помножувачі є найбільш доступними фотоприймачами для реєстрації гранично слабких світлових потоків, вони не вимагають дорогої підсилювальної апаратури, в відмінність від напівпровідникових детекторів (наприклад – лавинних діодів), при цьому перевершуючи їх по багатьом параметрам. Але для їх роботи все ж необхідне певне устаткування, у тому числі джерела живлення, вартість яких залишається досить високою, частенько – більше вартості самих помножувачів. Альтернативою придбанню джерела живлення може бути його самостійне виготовлення.

### 2.4.1 Блок живлення реєструючого каналу

Існує безліч схем джерел для самостійного виготовлення [16]. На жаль, їм властиві деякі недоліки, головною з яких є необхідність регулювати вихідну напругу вручну, що недопустимо при загальній тенденції до автоматизації наукових експериментів.

Структурна схема пропонованого джерела живлення, вільного від цього недоліку, наведена на рисунку 2.6.




1 – джерело живлення;

2 – вузол захисту від перенапруги;

3 – драйвер польового транзистора;

4 – перетворювач напруги;

5 – інтерфейс RS-232/ RS–485;

6 – мікроконтролер;

7 – вимірювальний підсилювач;

8 – вузол включення перетворювача;

9 – ФНЧ;

10 – підсилювальний дискримінант.

Рисунок 2.6 - Структурна схема джерела живлення

Основним вузлом пристрою є мікроконтролер, що здійснює управління останніми вузлами і контроль їх роботи, а також – стабілізацію напруги. Мікроконтролер обмінюється інформацією з програмою, що управляє, на персональному комп'ютері за допомогою інтерфейсу RS-232/ RS–485, проте, може бути застосований і поширеніший USB, якщо використовувати мікросхему перетворювача USB-UART. Перетворювач напруги представляє собою імпульсне трансформаторне зворотньоходове джерело живлення з потроювачем напруги на виході. Оскільки вихідна напруга (до 2500 В) значно перевищує напругу, яка може бути виміряна за допомогою АЦП мікроконтролера безпосередньо, то застосовується вимірник підсилювання з

коефіцієнтом посилення менше одиниці (по модулю). Також, передбачена можливість підключення підсилювача-дискримінатора для рахунку фотонів (на схемі показаний умовно).

Конструктивно джерело виконано у вигляді двох блоків: блоку перетворювача і блоку управління, кожен з яких поміщений в окремий екранований відсік в корпусі пристрою.

Принципова електрична схема блоку перетворювача показана на рисунку 2.7.

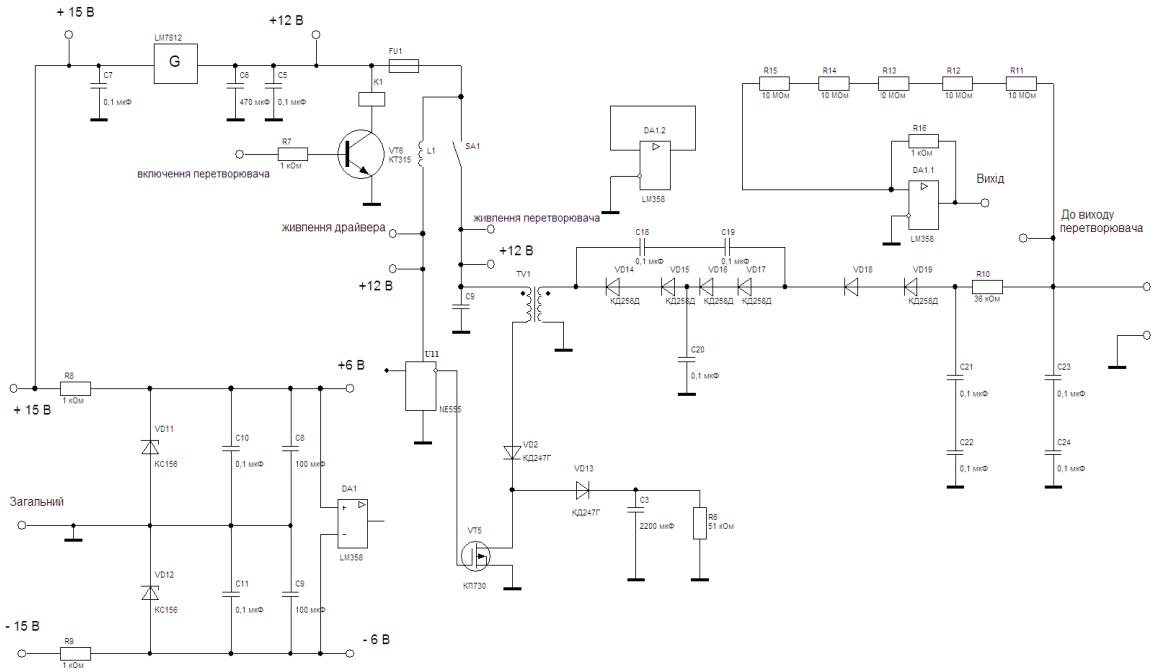



Рисунок 2.7 – Електрична принципова схема блоку перетворювача

Перетворювач складається з наступних вузлів: стабілізатора живлення вимірника підсилювача, стабілізатора живлення перетворювача напруги, вузла включення перетворювача напруги, вимірювального підсилювача, первинного ланцюга перетворювача напруги, помножувача (потроювача) напруги і вихідного фільтру.

Стабілізатор живлення вимірювального підсилювача – двополярний, є два параметричних стабілізатори напруги, виконані на резисторах R8 і R9 і

стабілітронах VD11 і VD12. Один - для стабілізації позитивної напруги, інший – для стабілізації негативної. Конденсатори С8-С11 виконують роль фільтрів.

Стабілізатор живлення перетворювача виконаний на мікросхемі LM7812. Роль фільтрів виконують конденсатори С5-С7. Вузол включення перетворювача напруги призначений для подачі живлення на високовольтний перетворювач по команді мікроконтролера. При подачі логічної «1» від контролера на базу транзистора VT6, він відкривається і подає живлення на обмотку реле, при цьому контакти реле замикаються і подають живлення на перетворювач. Запобіжник FU1 необхідний для захисту від перевантаження по споживаному струму. Котушка індуктивності L1 виступає в ролі фільтру живлення драйвера польового транзистора U1. Для перетворювача напруги був використаний високовольтний польовий транзистор VT5 типу IRF730. Ланцюг з діодів VD2 і VD13, резистора R6 і конденсатора С3 пригнічує власні коливання в трансформаторі Т1.

Випрямляч зібраний за однонапівперіодною схемою з потроєнням напруги (схема Кокрофта-Уолтона – [16]). Також присутній RC-фільтр, що складається з резистора R10 і конденсаторів С23 і С24. Вимірювальний підсилювач виконаний на операційному підсилювачі LM358 DA1.

### 2.4.2 Драйвер керування польовим транзистором

Для ефективнішого управління польовим транзистором і зниження теплових втрат запропоновано застосувати драйвер польового транзистора U1, конструктивно виконаний у вигляді субмодуля, встановлюваного на плату перетворювача. Використання драйвера дозволило понизити потужність, розсіювану на ключовому транзисторі настільки, що стала можливою його експлуатація без додаткового тепловідводу. Принципова

схема використовуваного драйвера польового транзистора приведена на рисунку 2.8.

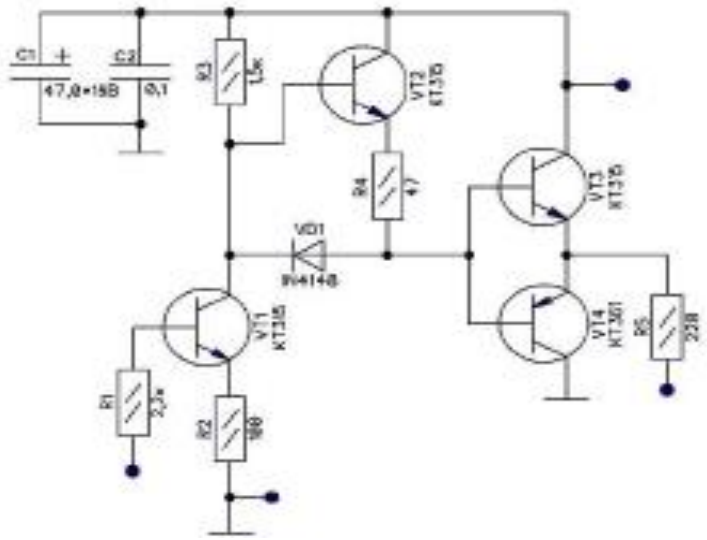



Рисунок 2.8 - Принципова схема драйвера польового транзистора

На вході драйвера знаходиться підсилювальний каскад, виконаний за схемою із загальним емітером на транзисторі VT1. Транзистор VT2 забезпечує поліпшення форми фронту імпульсу при закриванні транзистора VT1 (він прискорює зарядку ємності баз транзисторів вихідного каскаду в обхід резистора R3). На транзисторах VT3 і VT4 зібраний двотактний вихідний каскад, виконаний по схемі здвоєного емітерного повторювача.

Принципова схема блоку управління показана на рисунку 2.9.

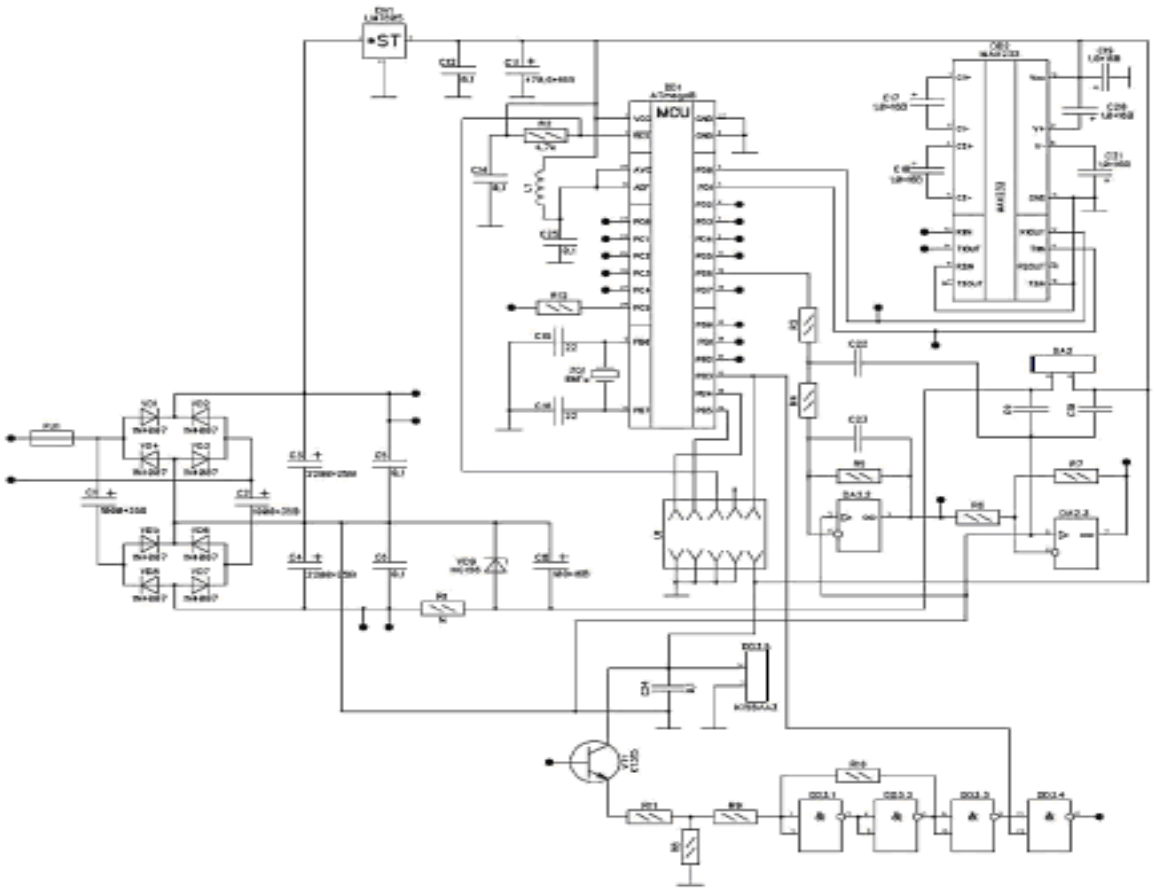



Рисунок 2.9 - Принципова схема блоку управління

У більш ранніх дослідженнях блок управління складався з джерела живлення, мікроконтролера AT89C52-24PI dip40 89C52 [17], інтерфейсу RS-232/RS–485 фільтру нижніх частот і вузла захисту від перенапруження [17].

Змінна напруга від мережевого трансформатора (на схемі не показаний) через запобіжник FU1 поступає на діодний міст, виконаний на діодах VD1-VD4 типу 1N4007.

Пульсації випрямленої напруги згладжуються фільтром, виконаним на конденсаторах C3 і C5. Для здобуття негативної напруги передбачений додатковий міст на діодах VD5-VD7 типу 1N4007 і згладжуючий фільтр на конденсаторі C4 і C6. На цей міст змінна напруга подається не безпосередньо, а через конденсатори C1 і C2. На стабілітроні VD7 типу КС156 і резисторі R1 виконаний параметричний стабілізатор напруги -6В для живлення операційного підсилювача. Для живлення мікросхем напруга +14В знижується стабілізатором на мікросхемі DA1 типу LM7805 до 5В.

Для зменшення перешкод АЦП від цифрової частини схеми застосований послідовний LC-фільтр живлення. Роль фільтру виконує дросель L1 і конденсатор C25.

Блок інтерфейсу RS-232/RS–485 складається з мікросхеми MAX232 в типовому включенні і призначений для зв'язку з комп'ютером.

На операційному підсилювачі DA2.1 виконаний фільтр нижніх частот з частотою зрізу 50 Гц, на DA2.2 - підсилювач з коефіцієнтом посилення Кп=-1. ФНЧ перетворить сигнал з широтно-імпульсною модуляцією в постійну напругу, яку можна використовувати для управління порогом дискримінації імпульсного підсилювача для фотодіода. Рахунок імпульсів, що поступають від підсилювача, також може здійснюватися мікроконтролером.

У схемі захисту від перенапруження застосований тригер Шмітта на двох елементах DD3.1 і DD3.2, елемент DD3.4 виконує роль вентиля (пропускає або не пропускає імпульси з контролера на драйвер польового транзистора залежно від стану, в якому знаходиться тригер). Коли напруга на виході вимірювального підсилювача, яке подається на базу транзистора VT1, перевищує певне значення, що задається співвідношенням резисторів, що входять в схему, тригер перемикається в одиничний стан, на виході елементу DD3.3 з'являється рівень логічного «0» і забороняє подачу імпульсів на перетворювач.

У розроблюваній системі ми пропонуємо замість мікроконтролера AT89C52-24PI dip40 89C52 використати мікроконтролер STC89C52RC. Цей мікроконтролер має більшу, ніж аналог, завадозахищеність, що особливо важливо при реєстрації потужних енергетичних сигналів [18].

На рисунку 2.10 представлена функціональна схема мікроконтролера STC89C52RC.

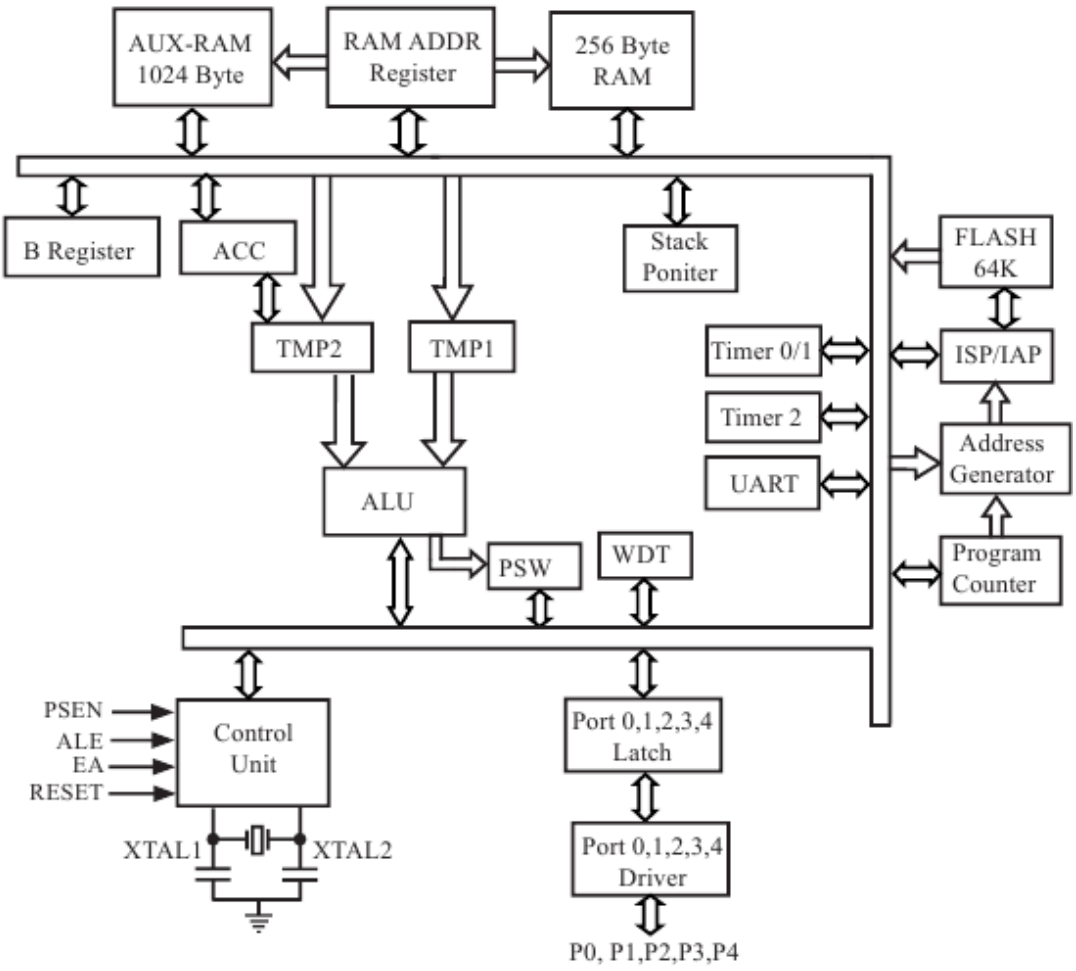


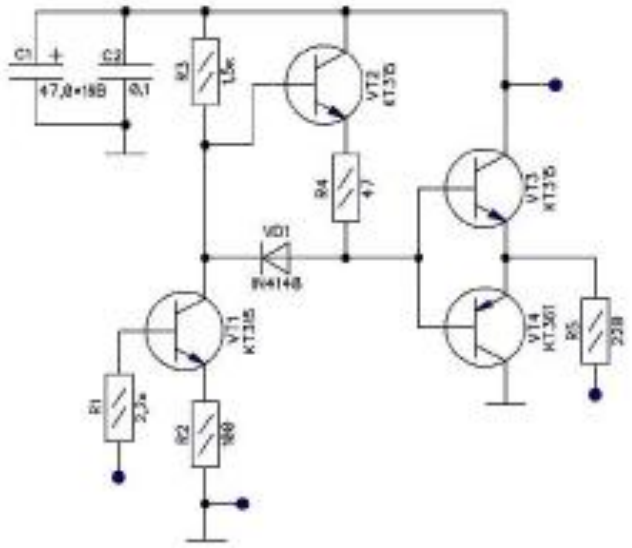

Рисунок 2.10 - Функціональна схема мікроконтролера STC89C52RC

## 2.5 Моделювання роботи мікроконтролерного блоку управління реєстратора фотонів потужного імпульсного лазерного випромінювання

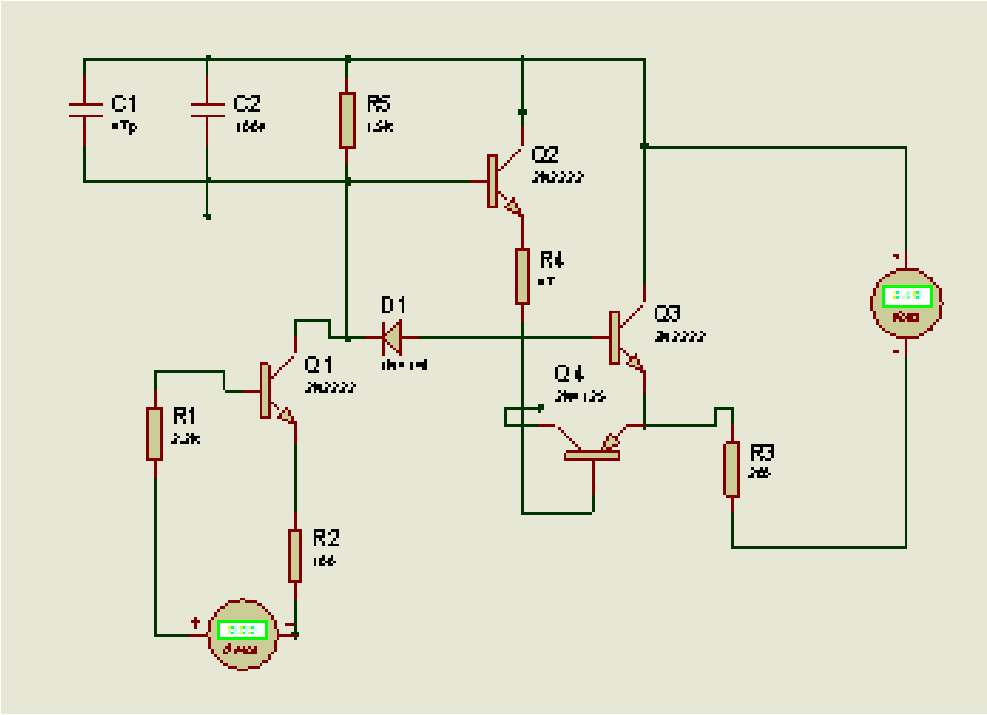
### 2.5.1 Моделювання драйверу керування польовим транзистором

Для підтвердження стабільної роботи блоку живлення в роботі було проведено моделювання драйверу керування польовим транзистором в середовищі Proteus [19].

Результати моделювання представлено на рисунку 2.11.




а)




б)

Рисунок 2.11 – Моделювання драйвером керування польовим транзистором: а – електрична схема; б – моделювання в редакторі драйвера в середовищі Proteus

### 2.5.2 Моделювання роботи мікроконтролера

На рисунку 2.12 представлена модель мікроконтролера STC89C52RC, зібрана в редакторі САПР Proteus [19].

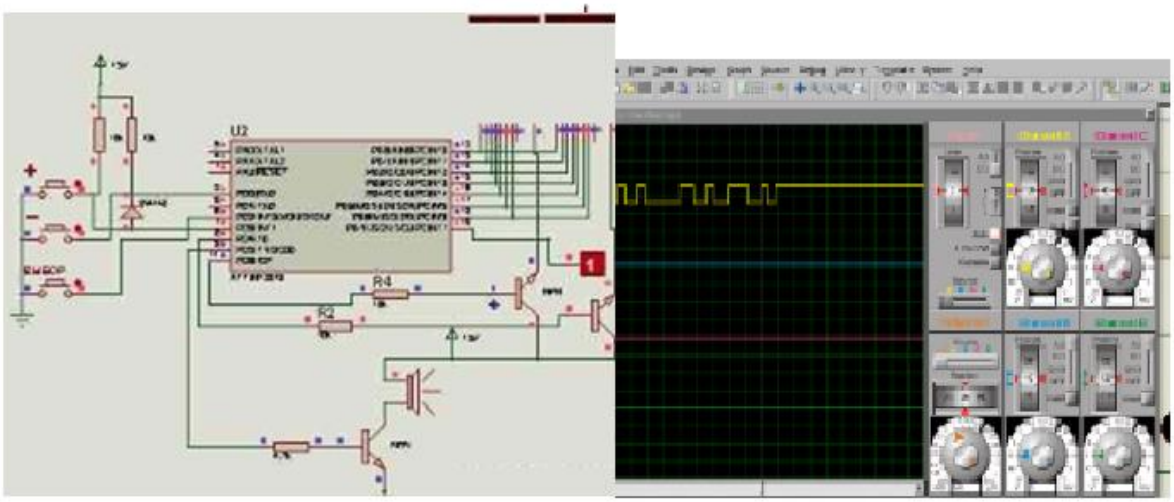



Рисунок 2.12 - Модель мікроконтролера STC89C52RC

Свідчення, зафіксовані на вимірювальних пристроях, показують стабільний режим роботи пристрою.

## 2.6 Подальше удосконалення реєстратора фотонів потужного імпульсного лазерного випромінювання

У подальшому в розроблюваній системі пропонується замінити реєструючий елемент (лавинний фотодіод) на Ge- pin діод [20].Це надасть системі реєстрації більш стійкий рівень реєстрації основного сигналу, порівняно із іншими датчиками. На рисунку 2.13 представлена структура Ge-pin діода [20].

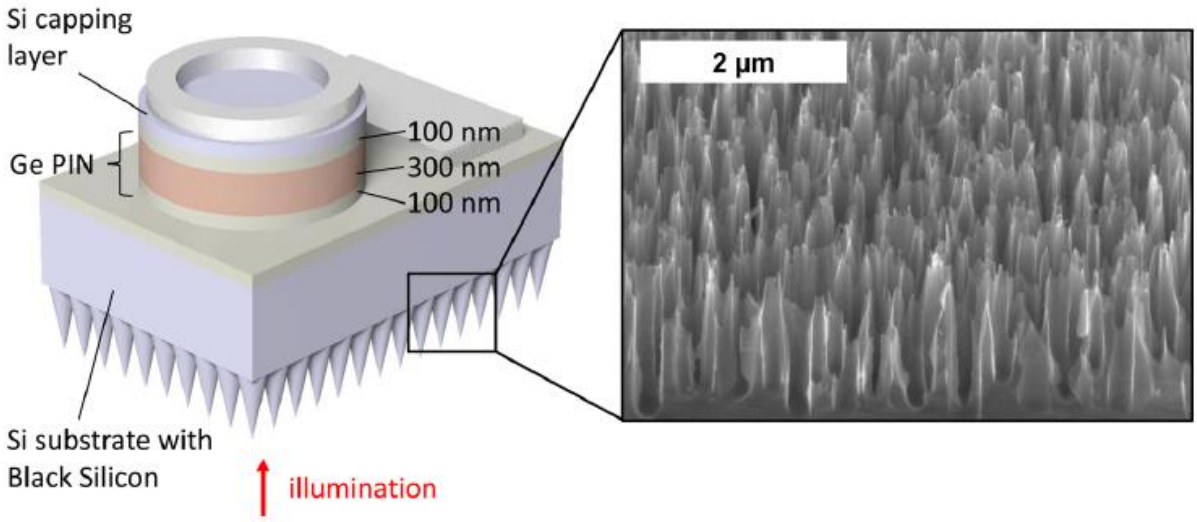



Рисунок 2.13 - Структура Ge- pin діода [20]

Отже, за результатами розділу можна зробити наступні висновки:

1) у більшості систем вимірювачі, які усереднюють такий важливий параметр як потужність та енергія лазерного випромінювання. З цього випливає, що більш надійним способом оцінки енергетичних параметрів лазерного випромінювання може бути пофотонна реєстрація;

2) розроблено структурну схему пристрою;

3) для калібрування потужності вхідного випромінювання в системі реєстрації задіяний стандартний вимірювач середньої потужності та енергії лазерного випромінювання;

4) для безпосередньої реєстрації фотонів використовуємо у якості приймального пристрою – лавинний фотодіод, який сполучений із мікроконтролерним блоком керування реєстратора;

5) у якості реєструючого елемента використовуємо лавинний фотодіод китайського виробництва фірми Sichuan Jiuzhou Optical Electronics;

6) основним вузлом контролюючого локу пристрою є мікроконтролер, що здійснює управління останніми вузлами і контроль їх роботи, а також – стабілізацію напруги. Мікроконтролер обмінюється інформацією з програмою, що управляє, на персональному комп'ютері;

7) у більш ранніх дослідженнях блок управління складався з джерела живлення, мікроконтролера AT89C52-24PI dip40 89C52;

8) у розроблюваній системі ми пропонуємо замість мікроконтролера AT89C52-24PI dip40 89C52 використати мікроконтролер STC89C52RC. Цей мікроконтролер має більшу, ніж аналог, завадозахищеність, що особливо важливо при реєстрації потужних енергетичних сигналів;

9) для підтвердження стабільної роботи блоку живлення в роботі було проведено моделювання мікроконтролера STC89C52RC в середовищі Proteus; свідчення, зафіксовані на вимірювальних пристроях, показують стабільний режим роботи пристрою;

10) у подальшому в розроблюваній системі пропонується замінити реєструючий елемент (лавинний фотодіод) на Ge- pin діод.Це надасть системі реєстрації більш стійкий рівень реєстрації основного сигналу порівняно із іншими датчиками.

# 3 Охорона праці та техногенна безпека при розробці електричних схем реєстратора фотонів потужного імпульсного лазерного випромінювання

Роботи, що проводяться в дослідницькій лабораторії, не представляють великої небезпеки, оскільки приміщення ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ належать до приміщень без підвищеної небезпеки. Проте використання електроустаткування може нести в собі ряд шкідливих і небезпечних для життя і здоров'я людей чинників, що працюють з ним. Основну небезпеку дослідницької лабораторії представляють використання електроприладів, які працюють при напрузі небезпечній для життя.

Дія електричного струму на живу тканину носить своєрідний характер. Проходячи через організм, електричний струм виробляє термічну, електролітичну і біологічну дію [21-26].

Міра небезпечної і шкідливої дії на людину електричного струму і електричної дуги залежить від роду і величини напруги струму, частоти струму, шляху струму через тіло організму, тривалість дії електричного струму, умов зовнішнього середовища.

У дослідницькій лабораторії існує можливість виникнення небезпеки при роботі з шкідливими речовинами в процесі моделювання плати пристрою. При монтажі електронних плат застосовують ацетон, спирт для знежирення і очищення від пилу мікросхеми, а також олово і каніфоль для припаювання ніжок напівпровідникового приладу до плати.

Спирт, ацетон викликає сухість шкіри. При систематичному вдиханні можливі захворювання сітківки ока. Також можливі нирково-психічні захворювання.

Каніфоль дратівливо діє на слизисті оболонки дихальних шляхів і на шкіру, що наводить до дерматитів.

При недостатній освітленості на робочому місці може виникнути зорова втома.

## 3.1 Заходи зі зменшення впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Тривала робота перед екраном монітора наводить до різних функціональних розладів організму, не говорячи вже про неймовірне навантаження на очі. Захворювання, викликані травмою навантажень, що повторюються, не виявляються відразу, це нездужання, що поступово накопичуються. У цьому їх небезпека. В основному страждають кисті, зап'ястя, плечі, шийна область [21-26].

У виникненні хвороб такого роду найчастіше винні: погана ергономіка робочих місць, дуже високо розташована клавіатура, непідходяще крісло, незнання основних правил роботи за комп'ютером. Правила, що стосуються освітлення в приміщенні і на робочому місці, мікроклімату, розташування клавіатури прості:

- повна тривалість робочого часу, проведеного за екраном монітора із захисним екраном, для дорослого користувача не повинна перевищувати 4 години за 8-годинний робочий день;

- не рекомендується працювати на клавіатурі безперервно більше 30 хвилин, кожну годину необхідно робити п'ятихвилинну перерву, а кожні дві години - 15-хвилинний, причому краще покинути робоче місце, влаштувати розминку для пальців, зробити просту гімнастику для очей;

- для устаткування робочого місця краще використовувати спеціальні столи і стільці, що дають можливість регулювати положення всіх вузлів, - висоти столу, полички для клавіатури, крісла користувача;

- висоту клавіатури слід відрегулювати так, щоб кисть розташовувалася прямо;

- спина має бути пряма, кут між стегнами і хребтом - теж прямий, для чого слід підібрати таке крісло, спинка якого здатна підтримувати спину користувача.

- монітор слід розташувати так, щоб нижній рівень екрану знаходився на 20…25 см нижче за рівень очей, а рівень верхньої кромки розташовувався на висоті лоба, від екрану монітора до очей має бути не менше 75…120 см.

- відстань між столами з комп'ютерами - не менше 1,5 метрів, між моніторами - не менше 2,2 метрів.

- екран комп'ютера краще розташувати під прямим кутом по відношенню до вікон, які необхідно завісити або закрити жалюзі.

## 3.2 Виробнича санітарія

У виробничих приміщеннях, в яких робота на відеотерміналах і персональних комп'ютерах є допоміжною, температура, відносна вологість і швидкість руху повітря на робітниках повинні відповідати санітарним нормам мікроклімату виробничих приміщень, що діють [21].

У виробничих приміщеннях, в яких робота на відеотерміналах і персональних комп'ютерах є основною (диспетчерські, операторські, розрахункові, кабінети і пости управління, зали обчислювальної техніки і ін.) повинні забезпечуватися оптимальні параметри мікроклімату відповідно до таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Оптимальні норми мікроклімату для приміщень з відеотерміналами і персональними комп'ютерами

| Період року | Категорія робіт | Температура повітря, °С (не більше) | Відносна вологість повітря, % | Швидкість руху повітря, м/с |
|---|---|---|---|---|
| Холодний | Легка – 1а | 22-24 | 40-60 | 0.1 |
| | Легка – 1б | 21-23 | 40-60 | 0.1 |
| Теплий | Легка – 1а | 23-25 | 40-60 | 0.1 |
| | Легка – 1б | 22-24 | 40-60 | 0.2 |

До категорії 1а відносяться роботи, вироблювані сидячи і що не вимагають фізичної напруги, при яких витрата енергії складає до 120 ккал/ч. До категорії 1б відносяться роботи, вироблювані сидячи, стоячи або пов'язані з ходьбою і такі, що супроводжуються деякою фізичною напругою, при яких витрата енергії складає від 120 до 150 ккал/ч

При монтажі компонентів на плату і формуванні топологічного рисунка струмопровідного шару виникає потенційна небезпека небажаної дії на організм речовин, що обертаються в технологічному процесі, і матеріалів. Всі речовини, що забруднюють повітря, надають шкідливу дію, якщо вони потрапляють в організм в кількостях, що перевищують деяку порогову величину (ГДК). У виробництві плат застосовують певні речовини, які шкідливі для організму. Клас небезпеки шкідливих речовин встановлюється залежно від гранично допустимої концентрації речовин в повітрі робочої зони. Це та концентрація яка переноситься без відхилень від нормального полягання в перебігу робочого дня при щоденному диханні. Згідно СН 245-71 встановлюють чотири класи шкідливих речовин: 1-й клас – речовини надзвичайно небезпечні; 2-й клас – речовини високо небезпечні; 3-й клас – речовини помірно небезпечні; 4-й клас – речовини мало небезпечні. Дія токсичних речовин виявляється в гострих і хронічних отруєннях.

При монтажі електронних плат застосовують ацетон, спирт для знежирення і очищення від пилу, а також олово і каніфоль для припаювання ніжок напівпровідникового приладу до плати.

У таблиці 3.2 [21-26] приведені гранично допустимі концентрації небезпечних речовин, вживаних при монтажі елементів, згідно СН 245-71.

Таблиця 3.2 - Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин в повітрі робочої зони

| Речовини | ГДК, мг/м$^3$ |
|---|---|
| Ацетон | 30 |
| Каніфоль | 150 |
| Олово | 90 |
| Спирт | 1000 |

Спирт, ацетон викликає сухість шкіри. При систематичному вдиханні можливі захворювання сітківки ока. Також можливі нервово-психічні захворювання.

Каніфоль дратівливо діє на слизисті оболонки дихальних шляхів і на шкіру, що наводить до дерматитів.

Основні засоби техніки безпеки – герметизація апаратури і устаткування, наявність припливний витяжній вентиляції в приміщенні проведення робіт і витяжна шафа для проведення експериментальних досліджень, виготовлення печатних плат і монтажу компонентів паянням (рис. 3.1).

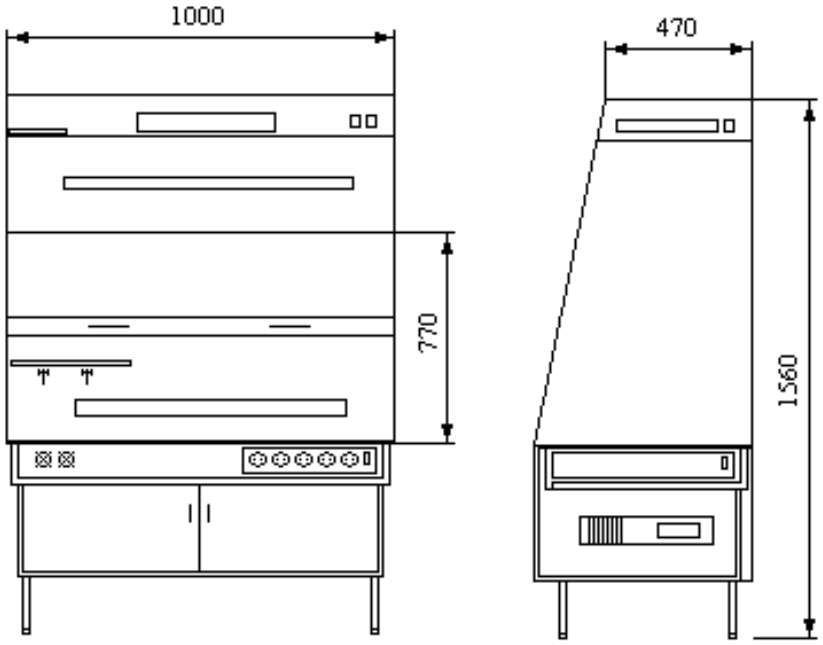



Рисунок 3.1 – Витяжна шафа для проведення експериментальних досліджень, виготовлення печатних плат і монтажу компонентів паянням

## 3.3 Електробезпека

Дія електричного струму на організм людини може бути теплова, хімічна і біологічна. При дії електричного струму на організм людини можуть бути два види поразки: електричні удари і електричні травми. Часто ці види супроводять один одному [21-26].

Захистом від дотику до струмопровідних частин електроустановок є ізоляція дротів, обгороджування, блокування і захисні засоби. Захистом від напруги, що з'явилася на корпусах електроустановок в результаті порушення ізоляції, є захисне заземлення, занулення і захисне відключення.

Захисне заземлення влаштовується в мережах з ізольованою нейтраллю. Воно є навмисним з'єднанням із землею неструмопровідних металевих частин електроустановок.

Захисне заземлення необхідне для зниження напруги відносно землі до безпечної величини на металевих корпусах електроустановок, що нормально не знаходяться під напругою, але що виявилися під таким в результаті пошкодження ізоляції.

При зниженні напруги на корпусах відносно землі струм, що проходить через людину, що стосується корпусу, знижується до безпечної величини (10 мА).

На ділянці проведення експерименту в лабораторії застосовується електроустаткування до 220 В. Електроживлення здійснюється від розподільних щитів за допомогою комутуючих автоматів, що виробляють захист того або іншого об'єкту.

Приміщення відноситься до приміщень без підвищеної безпеки.

Відповідно до ПЗП приміщення лабораторії відносять до класу по пожежобезпеці П-11 а. Міра захисту електроустаткування 1 Р44.

Прокладка сполучних дротів здійснюється в трубах, що забезпечує надійний захист від механічних пошкоджень дротів [21-26].

## 3.4 Пожежна безпека та техногенна безпека

Приміщення, де виробляється травлення печатних плат, відноситься до вибухонебезпечного, оскільки водень, що виділяється при травленні, з атмосферним киснем утворює вибухонебезпечну суміш. Проте це може статися лише при відключенні вентиляції, тобто при аваріях. Отже, приміщення відноситься до класу В-Іа. По мірі пожежної безпеки дане виробництво згідно СНіП 11-90-81 може бути віднесене до категорії Д, оскільки характеризується наявністю речовин, що лише не згорають, і матеріалів в холодному стані [21,22].

Характерними причинами виникнення пожеж в лабораторії є необережне поводження з вогнем, порушення технологічних процесів, неправильні

електропроводки і устаткування, неправильне користування електричними приладами і ін.

Основні будівельні конструкції будівлі, в якій знаходиться лабораторія, виконані з тих, що не згорають і важко згорають матеріалів, що цегельних і виштукатурюють. Отже, вогнестійкість будівлі має 2 рівень. Для евакуації людей на випадок пожежі, згідно СНіП 11-90-81, в лабораторії є два евакуаційні виходи, розташованих в протилежних кінцях приміщення ділянки. Ширина дверей і сходів рівна 1,6 м, що відповідає нормі.

Відстань від найбільш видаленого робочого місця до найближчого виходу – 15 м. Швидкість просування людей при евакуації – 16 м/хв [25].

Згідно ПУЕ, будівля, в якій знаходиться лабораторія по захисту від блискавки, відноситься до категорії С і захищається від прямих ударів блискавок, і від занесення високих потенціалів через землю, тобто підземні металеві комунікації, їх приєднують при введенні в захищаємий об'єкт до заземлення електроустаткування. Отже, грозозахист засновано на стержневих громовідводах.

Для попередження пожеж в лабораторії необхідно створити строгий протипожежний режим. Створюється загально об'єктова і лабораторна інструкція по ПБ, проводиться первинний протипожежний інструктаж при на робочому місці; створюється план протипожежних заходів і евакуації людей на випадок пожежі.

Як вогнегасні речовини можна застосовувати воду, вуглекислоту, хімічну і повітряно-механічну піну. Для гасіння вогнищ усередині будівлі на майданчиках сходових кліток, в коридорах і отворі встановлюють пожежні крани, які розміщені в шафках, де знаходиться і рукав з протипожежним стволом. Для гасіння пожежі горючих матеріалів, що починається, а також горючих рідин використовується ручний пінний вогнегасник ОХП-10. Для гасіння пожеж електроустановок використовується вуглекислий вогнегасник ОУ-2, ОУ-5, ОУ-8, в кількості двох вогнегасників на кожну установку. Існують пожежна електрична сигналізація, яка забезпечує прямий зв'язок пожеж-

ної охорони з охоронним об'єктом. У даній будівлі застосовують звукову систему сигналізації.

Визначимо технічні і організаційні заходи в лабораторії того, що труїть печатних плат. До технічних заходів відносяться протипожежні заходи, вживані лабораторії:

- територію лабораторії необхідно постійно містити в чистоті, горюче сміття повинне систематично віддалятися на спеціально відведені ділянки і у міру накопичення вивозитися;

- всі струмопровідні частини, розподільні пристрої, рубильники і інші пускові апарати вмонтовуються на негорючих підставах (мармур, текстоліт, гетинакс, азбест, і тому подібне);

- вимір опору ізоляції електромережі проводиться не рідше два раз на рік. Несправні ділянки знеструмлюються і замінюються новими;

- вся електрична апаратура, встановлена в лабораторії, виконується вибухозахищеною;

- для усунення можливості проникнення пари і газів з цеху в сусідні приміщення виводи дротів крізь стіни робляться із застосуванням фарфорових трубок, отвори яких закриваються кислотностійкою мастикою;

- куріння в приміщенні строго забороняється;

- на випадок виникнення пожежі необхідно передбачити можливість евакуації людей. Евакуаційні дороги повинні забезпечувати евакуацію всіх людей, що знаходяться в приміщенні лабораторії протягом необхідного часу. Число евакуаційних доріг не менше два. Кількість та розміри евакуаційних виходів з будівель і приміщень, їхні конструктивні й планувальні рішення, умови освітленості, забезпечення незадимленості, протяжність шляхів евакуації, їх облицювання (оздоблення) повинні відповідати протипожежним вимогам будівельних норм.

- евакуаційні шляхи і виходи повинні утримуватися вільними, нічим не захаращуватися і в разі виникнення надзвичайної ситуації забезпечувати безпеку під час евакуації всіх людей, які перебувають у приміщеннях будівель

та споруд, двері на дорогах евакуації навішуються так, щоб відкривалися по направленню виходу з будівлі;

- мінімальна ширина дверей на дорогах евакуації не менше 0,8 м;

- висота переходу на дорогах евакуації не менше 2 м;

- пристрій гвинтових сходів і змінних рівнів на дорогах евакуації не допускається;

- схема евакуації людей ретельно розробляється і вивішується на видних місцях;

- весь трудовий колектив проходить навчання заходам пожежної безпеки.

- у разі розміщення технологічного, експозиційного та іншого обладнання в приміщеннях повинні бути забезпечені евакуаційні проходи до сходових кліток та інших шляхів евакуації відповідно до будівельних норм.

Не допускається:

- влаштовувати на шляхах евакуації пороги, виступи, турнікети, розсувні, підйомні двері, такі двері, що обертаються, та інші пристрої, які перешкоджають вільній евакуації людей;

- захаращувати шляхи евакуації (коридори, проходи, сходові марші і площадки, вестибюлі, холи, тамбури тощо) меблями, обладнанням, різними матеріалами та готовою продукцією, навіть якщо вони не зменшують нормативну ширину;

- забивати, заварювати, замикати на навісні замки, болтові з'єднання та інші запори, що важко відчиняються зсередини, зовнішні евакуаційні двері будівель;

Для оптимального здійснення евакуації з будівель та споруд різного призначення створюються відповідні комісії. Вони скеровуються з Міністерства з надзвичайних ситуацій України.

Основними завданнями комісій з евакуації відповідних суб'єктів господарської діяльності є: розроблення планів евакуації, на випадок виникнення надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру; організація та

проведення у евакуації; установи чи організації щодо забезпечення проведення евакозаходів; визначення основних напрямів роботи щодо проведення евакозаходів; підготовка і перепідготовка особового складу евакокомісії.

Забезпечення техногенної безпеки є складовою частиною виробничої та іншої діяльності суб'єктів господарювання. Забезпечення техногенної безпеки покладається на відповідних посадових осіб, керівників і уповноважених ними осіб, якщо інше не передбачено відповідними нормативно-правовими або цивільно-правовими актами. Заходи щодо забезпечення техногенної безпеки враховуються органами архітектури, замовниками, забудовниками, проектними та будівельними організаціями при проектуванні та забудові населених пунктів, будівництві, розширенні, реконструкції та технічному переоснащенні потенційно небезпечних об'єктів, установ та організацій.

Відповідні заходи, які обумовлюють стан захищеності населення і об'єктів від негативних наслідків надзвичайних ситуацій техногенного характеру, повинні виконуватись як окремі розділи або визначатись у розділах інженерно-технічних заходів цивільного захисту та техногенної безпеки до проектів планування та забудови проектів (робочих проектів) ПНО або ОПН, їх будівель та споруд, погоджених зі спеціально уповноваженим центральним органом виконавчої влади з питань цивільного захисту і затверджених у порядку, установленому спеціально уповноваженим центральним органом виконавчої влади з питань будівництва і архітектури.

## 3.5 Розрахунок електромагнітного випромінювання від моніторів в приміщенні лабораторії

При роботі з ЕОМ на електронно-променевій трубці накопичується статичний заряд. Особливо великий його вплив у момент включення і ви-

ключення. При цьому напруженість поля інтенсивно зростає до максимуму, а потім з часом зменшується до умовної стабілізації.

Величина електростатичного поля визначається за формулою [21]:

$$E = \frac{(V_E + V_K)}{r} \tag{3.1}$$

де – E – напруженість електростатичного поля, $V_E$ – потенціал екрану, $V_K$ – потенціал користувача, r – відстань до монітора.

Згідно з [4], розраховуємо напруженість електростатичного поля при $V_E$=11 кВ, $V_K$=0,9 кВ на відстані від 0,3 м до 0,7 м.

Розрахунки виконано за допомогою редактора Microsoft Excel. В таблиці 3.3 представлено результати розрахунку залежності напруженості електростатичного поля E від відстані до монітора r

Таблиця 3.3 – Залежність напруженості електростатичного поля E від відстані до монітора r

| № п/п | E, кВ/м | r, м |
|---|---|---|
| 1 | 39,67 | 0,3 |
| 2 | 29,75 | 0,4 |
| 3 | 23,80 | 0,5 |
| 4 | 19,83 | 0,6 |
| 5 | 17,00 | 0,7 |

Побудуємо залежність напруженості електростатичного поля від відстані до монітора (рис. 3.2)

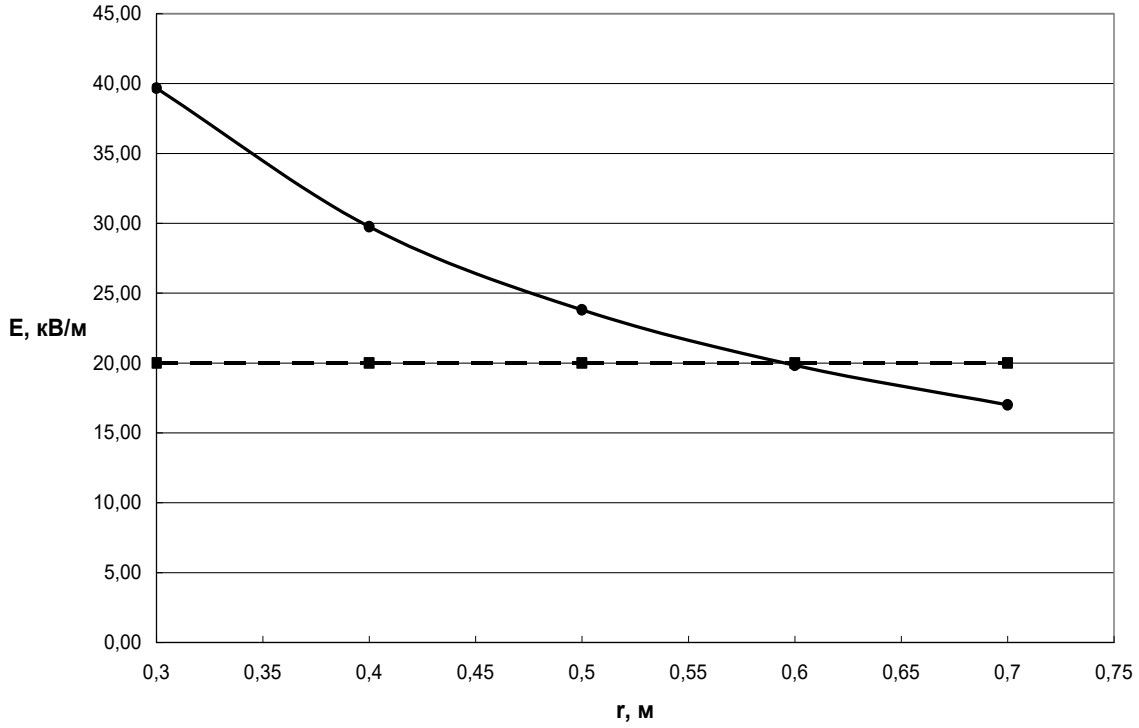



Рисунок 3.2 – Залежність напруженості електростатичного поля від відстані до монітора

Згідно з [23], допустимі рівні напруженості електростатичних полів не повинні перевищувати 20 кВ/м протягом години.

За результатами розрахунку визначено за допомогою графічної залежності, що допустима відстань від монітора не повинна бути менше, ніж 0,6 м.

# Висновки та рекомендації

Отже, за результатами виконання роботи можна зробити наступні висновки:

1) у більшості систем вимірювачі, які усереднюють такий важливий параметр як потужність та енергія лазерного випромінювання. З цього випливає, що більш надійним способом оцінки енергетичних параметрів лазерного випромінювання може бути пофотонна реєстрація;

2) розроблено структурну схему пристрою;

3) для калібрування потужності вхідного випромінювання в системі реєстрації задіяний стандартний вимірювач середньої потужності та енергії лазерного випромінювання;

4) для безпосередньої реєстрації фотонів використовуємо у якості приймального пристрою – лавинний фотодіод, який сполучений із мікроконтролерним блоком керування реєстратора;

5) у якості реєструючого елемента використовуємо лавинний фотодіод китайського виробництва фірми Sichuan Jiuzhou Optical Electronics;

6) основним вузлом контролюючого локу пристрою є мікроконтролер, що здійснює управління останніми вузлами і контроль їх роботи, а також – стабілізацію напруги. Мікроконтролер обмінюється інформацією з програмою, що управляє, на персональному комп'ютері;

7) у більш ранніх дослідженнях блок управління складався з джерела живлення, мікроконтролера AT89C52-24PI dip40 89C52;

8) у розроблюваній системі ми пропонуємо замість мікроконтролера AT89C52-24PI dip40 89C52 використати мікроконтролер STC89C52RC. Цей мікроконтролер має більшу, ніж аналог,

завадозахищеність, що особливо важливо при реєстрації потужних енергетичних сигналів;

9) для підтвердження стабільної роботи блоку живлення в роботі було проведено моделювання мікроконтролера STC89C52RC в середовищі Proteus; свідчення, зафіксовані на вимірювальних пристроях, показують стабільний режим роботи пристрою;

10) у подальшому в розроблюваній системі пропонується замінити реєструючий елемент (лавинний фотодіод) на Ge- pin діод. Це надасть системі реєстрації більш стійкий рівень реєстрації основного сигналу порівняно із іншими датчиками.

Як рекомендації щодо розроблюваного пристрою можна відмітити наступне:

1) система може бути використана в подальших розробках лазерних систем, систем квантової інформаційної електроніки;

2) макетний варіант системи може бути використаний в лабораторному практикумі та при проведенні практичних занять кафедри електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення.

# Перелік посилань

1. Мачехін Ю. П., Гнатенко О. С., Семенець В. В., Курський Ю. С., Неофітний М. В. Лазерні, оптико-електронні прилади та системи. Ч. 1. Лазерна інформаційно-вимірювальна техніка для задач військового призначення: монографія. Харків, 2019. 156 с.

2. Laskin A. V., Bae H., Laskin V. V., Ostrun A. Beam shaping of focused beams for microprocessing applications: conference paper. Icaleo 2014. Paper P 136.

3. Dickey F. M. Laser Beam Shaping. // Optics and Photonics News. 2003. Vol. 14, Issue 4. P. 30 – 35.

4. Yadroitseva I., Shishkovsky I., Bertranda P., Smurova I. Manufacturing of fine-structured 3D porous filter elements by selective laser melting. // Applied Surface Science. 1 March 2009. Vol. 255. Issue 10. P. 5523 – 5527.

5. Laskin A., Faidel D., Laskin V. Optics to Control Thermal Effects in Selective Laser Melting. // SPIE, Photonics West Proc. 2018. Vol. 10523. id. 105231912.

6. Andrianov A. V., Kim A. V., Khazanov E. A. A method for measuring the amplitude and phase of ultrashort laser pulses using self-modulation in a Kerr medium and spectral interferometry. // Kvantovaya Elektronika. 2017. Vol. 47, № 3. P. 236 – 244.

7. P. Kohns, J. Schirmer, A. Muravski, S. Yakoverko et al. Birefringence Measurements of Liquid Crystals and an application: An Achromatic waveplate Liq. Crys. 1996. Vol. 21. P. 841 – 846.

8. Gnatenko A. S., Machechin Y. P. Generation mode stability of a fiber ring laser // Telecommunications and Radio Engineering. 2015. Vol. 74, №7. P. 641– 647

9. Gnatenko A. S., Machechin Y. P., Vasko K. O. Providing control of the polarization inside the resonator fiber ring laser // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Радіофізика та електроніка. Київ. 2015. Вип. 1(23). С. 20 – 23.

10. Gnatenko A. S., Machechin Y. P., Obozna V. P. Investigation of the properties of electrically controlled phase plates for use in laser technology // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. 2017. Vol. 16, № 1, 2. P. 88 – 92.

11. Мачехін Ю. П., Гнатенко О. С. Лазерні, оптико-електронні прилади та системи. Ч. 2. Параметри лазерного випромі-нювання. Харків «Факт», 2021. 145 с.

12. Вимірювач потужності лазерного випромінювання ИМЛИ-2 Національний науковий центр «Інститут метрології» веб-сайт. URL: http : // www.metrology.kharkov.ua (дата звернення: 10.01.2025).

13. Оптичний вимірювач потужності Photodiode Elite Optoelectronics Co., Ltd.URL: http : // ua.oem-laser.com/ /(дата звернення: 10.01.2025).

14. Вимірювач потужності FieldMaster FM URL: http : // ebay.com (дата звернення: 10.01.2025).

15. Модуль детектора APD-TIA з пігтейлом Sichuan Jiuzhou Optical Electronics co.,Ltd URL : http : // www.jiuzhouopticaldevice.com (дата звернення: 10.01.2025).

16. Photomultiplier tubes - Basics and applications [Текст] : /Toshikazu Hakamata та ін. // Tokyo : Hamamatsu Photonics K.K., 2007 - 323 с.

17. Mazidi M.A., McKinlay R. 8051 Microcontroller and Embedded Systems. NJ: Prentice Hall, 2005. 640 p.

18. STC89C52RC (PDF) - STCmicro Technology Co,.Ltd URL: http : // https://www.alldatasheetru.com (дата звернення: 10.01.2025).

19. Antognetti, P.; Massobrio, G.: Semiconductor device Modeling with SPICE. New York: McGrawwHill, 1988.

20. M. Steglich, M. Oehme, T. Kasebier, M. Zilk, K. Kostecki, E.-B. Kley, J. Schulze, Ge-on-Si photodiode with black silicon boosted responsivity APPLIED PHYSICS LETTERS 107, 051103 (2015).

21. Атаманчук П. С., Мендерецький В. В., Панчук О. П., Білик Р. М. Охорона праці в галузі : навч. посіб. Київ : ЦУЛ, 2017. 322 с. URL: http://ebooks.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi56/0041366.pdf.

22. Бєлоконь К. В., Куріс Ю. В., Манідіна Є. А. Інформаційні технології в охороні праці : навч.-метод. посіб. для студентів ЗДІА спец. 263 "Цивільна безпека" ден. та заоч. форм навчання. Запоріжжя : ЗДІА, 2018. 160 с. URL: http://ebooks.znu.edu.ua/files/ZII/metodychky/2018/f359035.pdf.

23. Бєлоконь К. В., Рижков В. Г., Куріс Ю. В., Манідіна Є. А. Основи охорони праці : навч.-метод. посіб. Запорііжжя : ЗДІА, 2015. 180 с. URL http://ebooks.znu.edu.ua/files/ZII/metodychky/do2018/f356296.pdf.

24. Бєлоконь К. В., Суржицька Л. А., Цимбал В. А., Карнаух А. А. Цивільний захист : конспект лекцій. Запоріжжя : ЗДІА, 2015. 69 с. URL: http://files.znu.edu.ua/files/ZII/metodychky/do2018/f356329.pdf.

25. Охорона праці. Методичні вказівки до проведення практичних занять та виконання контрольних робіт для студентів ЗДІА інженерних спеціальностей / Укл. В.Г. Рижков – Запоріжжя, 2005. – 43 с.

26. Безпека життєдіяльності. Методичні вказівки до практичних занять та контрольні завдання для студентів ЗДІА всіх спеціальностей денної та заочної форм навчання / Укл. В.Г. Рижков. – Запоріжжя, 2005. – 24 с.