

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КИЇВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ  
КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЇ ФІЗИКИ ТА ВИЩОЇ МАТЕМАТИКИ

**ДИПЛОМНА БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА (ПРОЄКТ)**

на тему:

Вдосконалення тензорезистивних перетворювачів для створення систем  
автоматичного керування в світлодизайні

Виконала: студентка групи БНТск – 20  
спеціальності 105 Прикладна фізика та  
наноматеріали  
освітньої програми Нано – та мікротехнології  
в дизайні

Вероніка ПОПОВИЧ

Науковий керівник: канд. фіз.-мат.наук,  
доцент Микола ГОРБАЧУК

Рецензент: д. фіз.-мат.наук, професор  
Олександр КОВАЛЬЧУК

Київ 2023

# КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ

Інститут інженерії та інформаційних технологій  
Кафедра прикладної фізики та вищої математики  
Спеціальність 105 Прикладна фізика та наноматеріали  
Освітня програма «Нано– та мікротехнології в дизайні»

## ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри  
прикладної фізики та  
вищої математики  
\_\_\_\_\_ Оксана ЛАГОДА

(підпис)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023 року

## ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТЦІ

Попович Вероніці Євгеніївні

1. Тема роботи: Вдосконалення тензорезистивних перетворювачів для створення систем автоматичного керування в світлодизайні. Науковий керівник роботи Горбачук Микола Тихонович, к.ф.-м.н., доцент. Затверджені наказом КНУТД від “08” листопада 2023 року № 224-уч.
2. Строк подання студенткою роботи – червень 2023 року.
3. Вихідні дані до дипломної роботи: наукові публікації, навчальна література, основи світлодизайну, дослідження тензорезистивних перетворювачів.
4. Зміст дипломної роботи (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ, Розділ 1 Аналіз використання систем автоматичного керування світлом у дизайні, Висновки до Розділу 1, Розділ 2 Сучасні системи керування освітленням та їх класифікація, Висновки до Розділу 2, Розділ 3 Теоретичні та експериментальні дослідження напівпровідникових тензодатчиків з метою застосування в системах освітлення, Висновки до Розділу 3, Висновки, Список використаних джерел, Додатки.
5. Дата видачі завдання: 3 квітня 2023 року.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Терміни виконання етапів	Примітка про виконання
1	Вступ	24.04.2023	
2	Розділ 1 Аналіз використання систем автоматичного керування світлом у дизайні	08.05.2023	
3	Розділ 2 Сучасні системи керування освітленням та їх класифікація	15.05.2023	
4	Розділ 3 Теоретичні та експериментальні дослідження напівпровідникових тензодатчиків з метою застосування в системах освітлення	24.05.2023	
5	Загальні висновки	26.05.2023	
6	Оформлення дипломної бакалаврської роботи (чистовий варіант)	30.05.2023	
7	Здача дипломної бакалаврської роботи на кафедру для рецензування (за 14днів до захисту)	01.06.2023	
8	Перевірка дипломної бакалаврської роботи на наявність ознак плагіату (за 10 днів до захисту)	05.06.2023	
9	Подання дипломної бакалаврської роботи на затвердження завідувачу кафедри (за 7 днів до захисту)	08.06.2023	

Студентка

\_\_\_\_\_

(підпис)

Вероніка ПОПОВИЧ

Науковий керівник  
роботи

\_\_\_\_\_

(підпис)

Микола ГОРБАЧУК

Рецензент

\_\_\_\_\_

(підпис)

Олександр КОВАЛЬЧУК

## АНОТАЦІЯ

### **ПОПОВИЧ В.Є. Вдосконалення тензорезистивних перетворювачів для створення систем автоматичного керування в світлодизайні**

Дипломна бакалаврська робота за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали,. – Київський національний університет технологій та дизайну, Київ, 2023 рік

Дипломна робота присвячена дослідженню та удосконаленню напівпровідникових тензодатчиків з метою застосування в системах автоматичного керування в світло дизайні. Проаналізовано плюси та мінуси застосування тензорезисторів, зроблено пропозиції щодо шляхів поліпшення точності, надійності та функціонування тензорезистивних перетворювачів. Розглянута можливість їх використання в якості регулятора освітленості в окремих зонах приміщень цілодобової роботи. Проаналізований принцип роботи системи автоматичного керування світлом, підібрані загальні робочі параметри системи керування, удосконалено конструкцію напівпровідникових тензодатчиків та технологію їх використання.

Обґрунтована необхідність використання саме такої системи керування, оскільки вона виключає можливості випадкових вклучень та може керувати багаторівневою системою освітлення.

*Ключові слова: тензорезистори, автоматичне керування освітленням, світлодизайн.*

## SUMMARY

### **POPOVICH V.E. Improvement of strain-resistive transducers for creating automatic control systems in light design.**

Bachelor's thesis in the speciality 105 Applied Physics and Nanomaterials, - Kyiv National University of Technology and Design, Kyiv, 2023.

The thesis is devoted to the study and improvement of semiconductor strain gauges for use in automatic control systems in lighting design. The pros and cons of using strain gauges are analyzed, and suggestions are made on ways to improve the accuracy, reliability, and functioning of strain gauge transducers. The possibility of their use as a lightning regulator in certain areas of premises around the clock is considered. The principle of operation of the automatic light control system is analyzed, the general operating parameters of the control system are

selected, and the design of semiconductor strain gauges and the technology of their use are improved.

The necessity of using such a control system is substantiated, since it eliminates the possibility of accidental switching on and can control a multi-level lighting system.

*Keywords: strain gauges, automatic lighting control, lighting design.*

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ СВІТЛОМ У ДИЗАЙНІ.....	9
1.1. Використання систем керування світлом.....	9
1.2. Види систем управління освітленням.....	9
1.3. Взаємодія з іншими системами .....	10
1.4 Структура деяких систем автоматичного керування світлом.....	11
Висновок до першого розділу.....	14
РОЗДІЛ 2. СУЧАСНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ОСВІТЛЕННЯМ ТА ЇХ КЛАСИФІКАЦІЯ .....	15
2.1. Деякі види систем керування.....	16
2.1.1. Автоматичне регулювання освітлення .....	16
2.1.2. Інтерактивне освітлення.....	17
2.2.3. Розумне освітлення.....	17
2.2.4. Динамічне освітлення.....	17
2.2.Тензорезистори та тензодатчики .....	18
2.3.Фотоматеріали та фоторезистори і їх деякі характеристики.....	21
2.4. Сучасні технології впроваджені в системи керування світлом .....	23
Висновки до другого розділу:.....	29
РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ТЕНЗОДАТЧИКІВ З МЕТОЮ ЗАСТОСУВАННЯ В СИСТЕМАХ ОСВІТЛЕННЯ .....	30
3.1. Сучасні тензорезистивні матеріали.....	30
3.2. Розробка нового тензодатчика .....	35
Висновок до третього розділу: .....	45

ВИСНОВКИ.....	46
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	48
ДОДАТКИ.....	54

## ВСТУП

**Актуальність теми** обумовлена тим, що для економних витрат електроенергії необхідно застосовувати системи автоматичного керування, які задовольняють наступним умовам: висока точність, відсутність випадкових вмикань, легкість встановлення та ергономічність використання. Для створення такої системи керування доцільно вдосконалити сучасні тензорезистивні перетворювачі та використовувати сучасні нанотехнології.

**Метою дослідження** є аналіз сучасних систем автоматичного управління освітленням та удосконалення і оптимізація для систем керування освітленням в закладах цілодобової роботи. Експериментальне дослідження напівпровідникових тензодатчиків, як приладів, перспективних для автоматизації у світлодизайні.

**Завдання дослідження:** теоретичний аналіз та експериментальні випробування напівпровідникових матеріалів та тензорезисторів та оцінка їх перспективності застосування в автоматизації систем освітлення та інших систем.

**Об'єкт дослідження:** регулювання системи освітлення за допомогою тензорезисторів.

**Предмет дослідження:** напівпровідникові тензорезистори з наночастинками.

**Методи наукового дослідження:** провела аналіз та синтез роботи тензорезистивних перетворювачів для створення систем автоматичного керування в світло дизайні. Також провела експериментальне дослідження напівпровідникових та металевих тензодатчиків з метою застосуванням тензорезистивного перетворювача для поліпшення роботи освітлення кав'ярні.

**Інформаційна база:** в своїй роботі я використовувала знання з практики, яку пройшла в компанії де створюють кавомашини, також взяла матеріал із статей у яких викладено результати моєї роботи, експериментів та досліджень.



**Наукова новизна** полягає в тому, що була запропонована нова форма тензодатчика та для покращення тензорезистивних характеристик був доповнений наночастинками склад сполучного. Подібні тензодатчики пропонується використовувати в системі світлодизайну для управління світлом в кав'ярні самообслуговування. Обрано ергономічне місце розташування тензодатчиків згідно до геометрії простору. Підібрані числові значення параметрів тензодатчика з урахуванням навантажень на його механічний елемент. При появі на тензочутливій платформі людини виникає навантаження на пружну балку з тензорезисторами або напівпровідниковим тензодатчиком та її пружна деформація. Ця деформація призводить до виникнення електричного сигналу з тензодатчика. Цей сигнал поступає на блок управління світлом і світло вмикається.

#### **Апробація результатів дослідження.**

1. Горбачук М.Т., Попович В.Є. Нанoeлементи в конструкції та дизайні тензодатчиків і аналіз деяких результатів вимірювань. II міжнародна науково-практична інтернет конференція молодих учених та студентів “Електромеханічні, інформаційні системи та нанотехнології”, 20 квітня 2023 року, КНУТД, м. Київ
2. Горбачук М.Т., Попович В.Є. П'єзорезистивний ефект в напівпровідниках та його практичне використання. Інтернет-конференція молодих учених та студентів “Електромеханічні, інформаційні системи та нанотехнології”, КНУТД. 18 листопада 2022 року, КНУТД, м. Київ

## **РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ СВІТЛОМ У ДИЗАЙНІ**

Система управління освітленням - це інтелектуальна мережа, яка дозволяє забезпечити необхідну кількість світла, де і коли це необхідно [1]. Ця система широко застосовується в комерційній та житловій нерухомості, а так само, в промисловості, для внутрішньої та зовнішньої реклами та при освітленні автомобільних доріг.

Більшість таких систем здатні автоматично регулювати освітлення. Автоматизація є одним із трьох основних механізмів оптимізації освітлення поряд із використанням енергоефективних ламп і грамотним розташуванням світильників [2].

### **1.1. Використання систем керування світлом**

Системи керування освітленням використовуються для максимізації економії енергії, у тому числі з урахуванням будівельних норм, стандартів зеленого будівництва та енергозберігаючих програм. Системи автоматичного керування освітленням часто зустрічаються під назвою «Розумний дім».

Використовувані пристрої

Якщо термін «керування освітленням» позначає окремі світильники, що включаються та вимикаються вручну або інколи обладнані вбудованими датчиками світла або руху, то поняття «система управління освітленням» передбачає світильники, датчики та інші допоміжні пристрої, об'єднані в єдину інтелектуальну систему, яка за потреби може працювати самостійно.

### **1.2. Види систем управління освітленням**

Система управління освітленням може включати:

- розумні вимикачі, здатні вмикатися та вимикатися автоматично,
- розумні димери, здатні автоматично змінювати потужність освітлення,
- розумні лампи, здатні автоматично вмикатися, вимикатися, змінювати потужність, колірну температуру та колір,

- світлодіодні стрічки (з тими ж можливостями, що й розумні лампи) та RGB-контролери для керування ними,
- датчики руху,
- датчики присутності,
- датчики відкриття дверей, вікна, дверцята і так далі,
- датчики світла.

### **1.3. Взаємодія з іншими системами**

Вона також може взаємодіяти з іншими системами будівлі (наприклад, пожежна сигналізація або ОВК).

Керувати світлом при цьому можна як звичайним способом (локально), так і через спеціальні центральні пульти, сенсорні екрани, веб-інтерфейси та мобільні програми (управління проходить через контролер).

Контроль за ефективністю управління освітленням у житлових приміщеннях здійснюється Консорціумом з енергоефективності [3].

Для автоматичного керування освітленням часто застосовуються два типи датчиків – датчики руху (освітлення включається при наближенні об'єкта до датчика) та датчики освітленості (освітлення включається при зміні ступеня «засвітлення» датчика). І ті й інші мають свої переваги і свої недоліки. Ми розглянемо схему керування освітленням із датчиком освітленості.

Як такий датчик використовується фоторезистор вітчизняного чи імпортного виробництва, головне щоб він був достатньою мірою захищеності, якщо ви плануєте використовувати систему автоматичного освітлення на відкритому місці. Параметри самого резистора не дуже важливі, оскільки налаштування чутливості схеми виконується резистором R4 [12].

Відразу необхідно відзначити, що ступінь яскравості лампи або як у нашому випадку світлодіодного складання HL1 залежатиме від ступеня освітленості фоторезистора [13]. А саме, що темніше на вулиці, то яскравіше горітимуть світлодіоди. І ще один момент, необхідно в обов'язковому

порядку виключити засвітлення фоторезистора світло діодами. Тобто, наприклад, розмістити світлодіод з верхнього боку козирка під'їзду, а світлодіоди в корпусі плафона під'їзного освітлення. Світлодіодне складання високої яскравості було прийнято застосувати виходячи з міркувань економії електроенергії та їхнього тривалого терміну служби. Підійде в принципі будь-яка в тому числі від ліхтарика на 3 світлодіоди [14]. (Додаток А)

Схема керування освітленням досить проста і не вимагає налагодження після збирання. Як говорилося вище, потрібно лише налаштувати за допомогою резистора R4 поріг спрацювання підсилювача DA1 LM358. Якщо замість економних світлодіодів високої яскравості ви все ж таки захочете використовувати звичайні лампи розжарювання слід використовувати замість VT1 KT3102 транзистор більшої потужності. Його потужність слід розрахувати виходячи з передбачуваного навантаження. Або встановити в цей ланцюг реле, яке своїм контактом комутуватиме вже основне навантаження [16].

T1 – понижувальний трансформатор 220/12В, на вихідний струм до 1А, у разі застосування світлодіодів цього більш ніж достатньо. При застосуванні в системі автоматичного освітлення ламп розжарювання потужність трансформатора необхідно розрахувати виходячи з передбачуваного навантаження [17]. (Додаток Б)

#### **1.4 Структура деяких систем автоматичного керування світлом**

Пропонований пристрій можна використовувати для підсобних приміщень у квартирі (у ванній кімнаті, туалеті, кладовці тощо). Відкривання та подальше закривання дверей включає освітлення, а наступне відчинення та закривання відключає його. Для цього на одвірку необхідно встановити геркон, а на самих дверях – постійний магніт, який утримує геркон у замкнутому стані, коли двері зачинені. Найпростіше для цієї мети використовувати пару магніт/геркон від наявних в продажу пристроїв охоронної сигналізації [18]. (Додаток В)

Якщо двері зачинені, на тактовий вхід нижнього тригера через замкнутий геркон К подається високий рівень (логічна Т). Якщо двері відчиняються, а потім знову зачиняються, відбувається зміна рівнів «1»-«0»-«1». D-тригер спрацьовує по перепаду «0» – «1», і у відповідь на наростання рівня він «перекидається». Оскільки інверсний вихід тригера з'єднаний із входом D, тригер працює у рахунковому режимі, тобто при кожному перепаді «0» – «1» на вході він змінює свій стан на протилежне [19].

Після перемикання тригера високий рівень його виходу відкриває через тензорезистор Т тиристор Ті. Який комутує лампу І. Тиристор відкривається на початку кожного напівперіоду напруги, поки на виході тригера підтримується високий рівень. На лампу подається пульсуюча (випрямлена) напруга мережі через діодний міст на діодах D2...05. Подальше відчинення та закривання дверей перекидає тригер, на його виході встановлюється низький рівень, і лампа гасне.

Живлення ІМС забезпечується параметричним стабілізатором на стабілітроні D1, робочий струм для якого задають резистори R4 R6 Конденсатор C2 усуває перешкоди живлення, а C1 - кидки напруги при спрацьовуванні геркона.

Пристрій можна зібрати навісним монтажем на шматочку склотекстоліту або гетинаксу і помістити в відповідну пластмасову коробочку, яку закріпити десь на дверному одвірку або біля лампи так, щоб вона не впадала в очі.

Оскільки живлення схеми здійснюється за безтрансформаторною схемою, при налагодженні слід бути обережними. Найкраще логічну частину (до транзистора) спочатку налагодити окремо. Запитав від джерела постійної напруги 7 10 В (можна від кількох батарей) Клеми джерела підключаються до конденсатора C2, а стабілітрон D1 тимчасово від'єднується. Досягнувши надійного спрацьовування тригера при відкриванні та закриванні дверей, можна підключити силову частину.

Мікросхему 4013 можна замінити вітчизняною К561ТМ2. Транзистор необхідний високовольтний з допустимою робочою напругою не нижче 300 В, наприклад. КТ812. КТ826. КТ940А. Діоди D2...D5 – КД202Н, Р Тирістор можна взяти КУ202Ж.

Як стабілітрон підійдуть будь-які з серії Д814, КС175...КС1Q1 [20].

Система автоматичного управління світлом є пристроєм, здатним реагувати на зміни освітленості в навколишньому середовищі і автоматично регулювати інтенсивність світла.

Фоторезистори – це електронні компоненти, чутливі до змін освітленості. Вони мають змінний опір, який змінюється залежно кількості падаючого світла. Чим більше світла падає на фоторезистор, тим менше його опір [21].

Пристрій автоматичного керування світлом складається з кількох основних компонентів:

- Фоторезистори: розміщуються у стратегічних місцях для вимірювання рівня освітленості. Зазвичай вони встановлюються на стелі чи стінах приміщення, що потребує автоматичного керування світлом.

- Мікроконтролер: приймає сигнали з фоторезисторів та аналізує їх для визначення рівня освітленості у приміщенні. Мікроконтролер також керує роботою освітлювальних приладів [22].

- Освітлювальні прилади: вмикаються та вимикаються автоматично залежно від виміряного рівня освітленості. Можуть бути використані різні типи світильників, такі як лампи розжарювання, світлодіодні або люмінесцентні лампи..

- Інтерфейс керування: може бути передбачений інтерфейс для ручного керування системою, наприклад панель з кнопками або сенсорний екран, що дозволяє користувачу налаштувати параметри автоматичного керування світлом [23].

Робота системи автоматичного управління світлом на основі фоторезисторів ґрунтується на зворотному зв'язку між фоторезисторами та

освітлювальними приладами. Коли рівень освітленості в приміщенні нижче заданого порога, фоторезистори виявляють це і передають сигнали мікроконтролера. Мікроконтролер активує освітлювальні пристрої, щоб забезпечити достатній рівень освітленості [24].

Якщо рівень освітленості стає вищим за заданий поріг, мікроконтролер вимикає освітлювальні прилади.

Така система автоматичного керування світлом може бути використана в різних областях, наприклад, в офісах, торгових центрах, громадських будівлях та будинках, де потрібне оптимальне використання енергії та створення комфортного освітлення залежно від навколишніх умов [12].

### **Висновок до першого розділу**

Система управління освітленням - це інтелектуальна мережа, яка дозволяє забезпечити необхідну кількість світла, де і коли це необхідно. Системи керування освітленням використовуються для максимізації економії енергії, у тому числі з урахуванням будівельних норм, стандартів зеленого будівництва та енергозберігаючих програм.

## РОЗДІЛ 2. СУЧАСНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ОСВІТЛЕННЯМ ТА ЇХ КЛАСИФІКАЦІЯ

У 1980-х технічне освітлення почало модернізуватися. Воно мало стати більш керованим та енергоефективним. Спочатку було створено аналог сучасної системи, який дозволяв контролювати флуоресцентний баланс та керувати інтенсивністю освітлення. Це був перший крок до створення повноцінної системи управління освітленням, проте аналог вимагав великої кількості кабельної проводки, що економічно неефективно. Tridonic [4] стала першою компанією, яка зробила цифровий протокол передачі даних у 1991 році (DSI). DSI став основним інтерфейсом передачі команд зі зміни освітлення всіх підключених світлових приладів. На відміну від аналога даний інтерфейс припускав спрощену систему використання кабелю. Таким чином, існує два типи систем:

- аналогова система керування освітленням
- цифрова система управління освітленням [5]

З останніх новинок була розроблена та створена згортова нейронна мережа (CNN) у рамках вбудованої системи управління освітленням будівлі, щоб визначити, чи може застосування CNN підвищити точність розпізнавання зображень та знизити енергоспоживання. В даний час системи управління освітленням в основному покладаються на інформаційні технології та сенсори для виявлення присутності чи відсутності людей у навколишньому середовищі. Однак через відхилення в цьому сприйнятті точність розпізнавання зображень не є високою. Щоб підтвердити ефективність нової системи на основі CNN, було розроблено та проведено експеримент. Важливість цього дослідження у тому, що висока точність розпізнавання зображень дозволяє знизити енергоспоживання. Результати експерименту показали, що при порівнянні фактичної позиції з позицією визначення різниця становила від 0,01 до 0,20 м, що вказує на високу точність розпізнавання зображень системи управління на основі CNN. Крім того, порівнюючи світловий потік розробленої системи з природним



освітленням та системи без природного освітлення із системою без інтелектуального управління, вдалося заощадити близько 40% енергії [6].

## 2.1. Деякі види систем керування

На основі тензорезисторів існують різноманітні системи керування світлом. Ось деякі з них :

Автоматичне регулювання освітлення

Інтерактивне освітлення

Розумне освітлення

Динамічне освітлення

### 2.1.1. Автоматичне регулювання освітлення

Тензорезистори можуть використовуватися в системах автоматичного регулювання освітлення для визначення рівня освітленості в приміщенні. [7] Вони можуть вимірювати зміну опору, доданого до них тиску або деформації, і на основі цього визначати інтенсивність світла в приміщенні. Ця інформація потім використовується для автоматичного регулювання яскравості світильників або відкриття жалюзі або фіранок для досягнення бажаного рівня освітлення. (Рис.2.1)

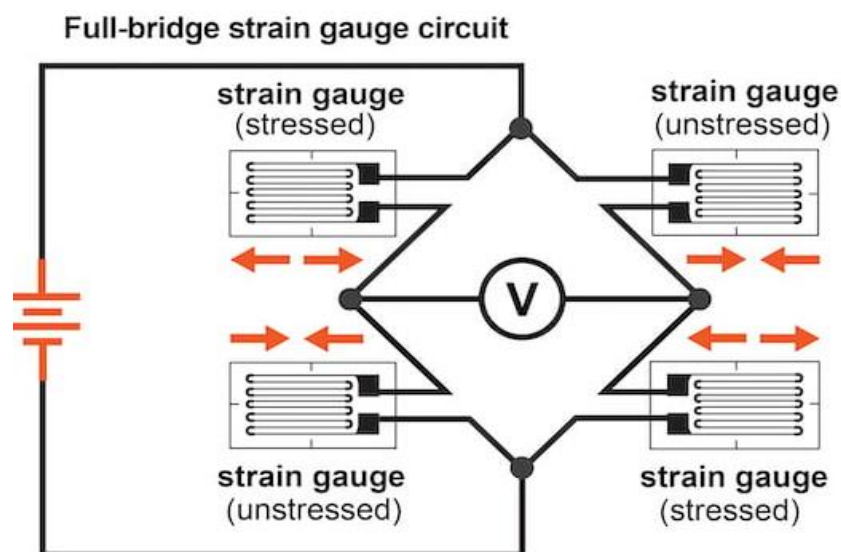
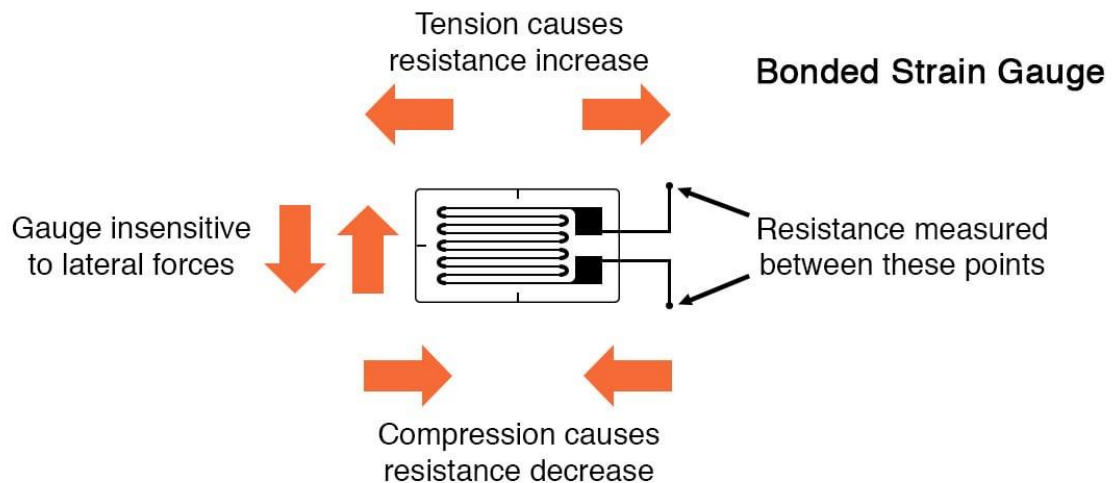


Рис.2.1. Приклад схеми використання тензорезисторів у системах автоматичного управління світлом

### 2.1.2. Інтерактивне освітлення

Тензорезистори можуть бути інтегровані в освітлювальні прилади, які реагують на тиск або деформацію, створюючи інтерактивні ефекти освітлення. Наприклад, освітлювальний пристрій може змінювати колір або інтенсивність світла в залежності від дотику або натискання на поверхню [8]. (Рис.2.2)



*Рис.2.2 Приклад використання тензорезистивних матеріалів у інтерактивному освітленні*

### 2.2.3. Розумне освітлення

Тензорезистори можуть використовуватися в системах розумного освітлення для виявлення присутності людей або змін у навколишньому середовищі. Вони можуть бути інтегровані в датчики руху або датчики присутності, щоб визначити, чи потрібно вмикати або вимикати освітлення у приміщенні [9]. Це дозволяє регулювати освітлення залежно від реальних потреб, заощаджуючи енергію та створюючи комфортне освітлення для користувачів.

### 2.2.4. Динамічне освітлення

Тензорезистори можуть бути використані для реалізації динамічного

освітлення, яке змінює параметри в реальному часі. Наприклад, вони можуть використовуватися в системах динамічного освітлення в музеях або виставкових залах для автоматичного адаптування освітлення під різні експонати або сцени [10].

Це лише деякі приклади систем керування світлом на основі тензорезисторів. З появою нових технологій та матеріалів, можливості керування світлом на основі тензорезисторів продовжують розширюватися [11].

## 2.2. Тензорезистори та тензодатчики

Тензометричні (дротяні) датчики застосовують для перетворення механічних напруг, зусиль та деформацій у різних механізмах та конструкціях в електричний сигнал. Найбільш поширені тензодатчики, у яких за зовнішнього впливу змінюється активний опір чутливого елемента. Такі датчики називають тензорезисторами. Найбільш поширений дротяний датчик (рис. 8.2) складається з дроту діаметром від 15 до 60 мк, покладеного зигзагоподібно і обклеєного з двох сторін тонким папером. До кінців дроту приєднані вивідні провідники для включення датчика вимірювальну мережу. (Додаток Г)

а – вид при знятому покритті; б – поперечний переріз; в – конструкція;  
1 – вивідні дроти; 2 – дріт; 3 – підкладка з паперу або лакової плівки; 4 – покриття з паперу, фетру чи лаку; 5 – паперовий каркас

Датчики приклеюють до випробуваної деталі так, щоб дроти сприймали її деформації (стиск або розтяг). В результаті змінюється опір дроту. Тензометричний датчик перетворює малі переміщення (деформації) в електричний опір. Опір дроту  $R$  залежить від його довжини  $l$ , м і перерізу  $S$ , м<sup>2</sup>, тобто:

$$R = \rho l / S \quad (2.1),$$

де  $\rho$  – питомий опір провідника, Ом · м.

Зміна довжини дроту  $\Delta l$ , викликана зусиллям деформації  $F$ , можна визначити за формулою:

$$\Delta l/l = F/ES \quad (2.2),$$

де  $E$  – модуль пружності металу дроту [30].

Однак деякі загальні параметри, які можуть бути враховані при розробці такої системи:

Тензорезистори виготовляються з різних матеріалів, що мають властивості, що дозволяють їм змінювати свій опір залежно від рівня деформації. Ось деякі характеристики матеріалів:

Тензорезистори виготовляються з різних матеріалів, які мають спеціальні властивості тензорезистивності. Залежно від типу тензорезистора можуть використовуватися різні матеріали. Ось деякі з них:

**Напівпровідники:** багато тензорезистори виготовляються з напівпровідникових матеріалів, таких як кремній (Si) і германій (Ge). Напівпровідники мають унікальні властивості електричної провідності, які змінюються при деформації або напрузі [18]. Напівпровідники також можуть бути леговані іншими елементами для керування їх електричними властивостями.

**Метали:** деякі тензорезистори можуть бути виготовлені із металевих матеріалів, таких як мідь (Cu) або сплави на основі нікелю (Ni). Металеві матеріали мають високу електричну провідність і можуть змінювати свою провідність при деформації або напрузі.

**Полімери:** деякі тензорезистори можуть бути виготовлені з полімерних матеріалів, таких як поліімід (PI) або поліакрилонітрил (PAN). Полімери мають гнучкість і хорошу стійкість до деформації, що дозволяє створювати гнучкі та еластичні тензорезистори [14].

**Композитні матеріали:** деякі тензорезистори можуть бути виготовлені з композитних матеріалів, які поєднують різні типи матеріалів, наприклад, полімери з добавкою наночастинок або вуглецевих нанотрубок. Це дозволяє

комбінувати різні властивості матеріалів для отримання бажаних характеристик тензорезисторів [25].

Важливо, що конкретні матеріали та їх склад можуть змінюватись в залежності від необхідних характеристик та застосування тензорезистора. Кожен матеріал має свої особливості, переваги та обмеження, і вибір матеріалу залежить від конкретних потреб та вимог додатка.

Геометрія: геометрія тензорезистора, включаючи його розміри та форму, також впливає на його опір. Велика поверхня тензорезистора може мати нижчий опір, ніж невелика поверхня [27].

Напруга або деформація: опір тензорезистора змінюється під впливом зовнішніх факторів, таких як напруга чи деформація. Додаток тиску або деформації до тензорезистора викликає зміну його внутрішньої структури і, отже, зміна його електричної провідності та опору.

Температура: температура довкілля також може впливати на опір тензорезистора [28]. Деякі матеріали можуть мати температурну залежність опору, що означає, що їхнє опір змінюється при зміні температури.

Це основні фактори, що впливають на опір тензорезистора. Розуміння цих факторів допомагає розробляти та оптимізувати тензорезистивні матеріали для різних програм управління світлом та інших областей.

Чутливість: чутливість тензорезисторного матеріалу визначає, наскільки сильно змінюється його опір за зміни механічних навантажень. Матеріали з високою чутливістю можуть забезпечити більш чуйну систему керування світлом.

Чутливість тензорезистору залежить від його структури. Оптимальна структура матеріалу та схема включення може сприяти вищій чутливості тензорезистора. (Додаток Д). Швидкість реакції може бути важливою для систем, де потрібне швидке та точне регулювання інтенсивності світла [14].

### 2.3. Фотоматеріали та фоторезистори і їх деякі характеристики

Діапазон довжин хвиль: фоторезисторні матеріали можуть мати кращий діапазон довжин хвиль світла, де вони найбільш чутливі. Наприклад, деякі матеріали можуть бути особливо чутливі до видимого світла, тоді як інші можуть виявляти інфрачервоне випромінювання [12].

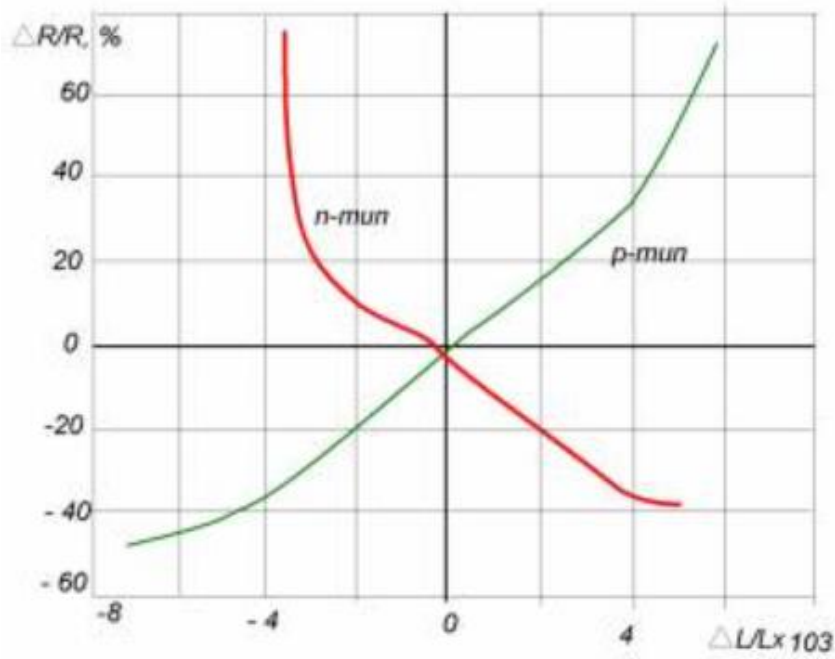


Рис. 2.3. Хвильова характеристика

Діапазон довжин хвиль, на якому фоторезистори найбільш чутливі, залежить від конкретного матеріалу та його властивостей. Можуть бути чутливими у певних вузьких діапазонах довжин хвиль або у ширших спектральних областях [17].

Деякі матеріали можуть спеціально розроблені для роботи в певних діапазонах довжин хвиль, таких як інфрачервоний або видимий спектр. Наприклад, напівпровідникові матеріали, такі як кремній, можуть бути найбільш чутливими у певних вузьких спектральних вікнах, де їх електричні властивості значуще змінюються.

Однак, в цілому, фоторезистори можуть бути чутливими в широкому діапазоні довжин хвиль, включаючи ультрафіолетову, видиму та

інфрачервону області спектра [11]. Це залежить від конкретного матеріалу та його електричних властивостей.

Для визначення конкретного діапазону довжин хвиль, на якому фоторезистори найбільш чутливі, необхідно звернутися до специфікацій та характеристик конкретного матеріалу або пристрою, а також до досліджень, проведених у цій галузі.

Стійкість до навколишнього середовища: Матеріали повинні бути стабільними та стійкими до впливу навколишнього середовища, такої як волога, температура чи хімічні речовини [15]. Це гарантує довговічність та надійність роботи системи керування світлом.

Фоторезисторні матеріали мають різні характеристики, які визначають їхню роботу в системах керування світлом. Ось деякі з основних характеристик, які зазвичай враховуються при виборі та застосуванні:

Опір у темряві: це опір матеріалу за низького рівня освітленості або у повній темряві. Воно може змінюватись від кількох кілометрів до мегомметрів і залежить від конкретного матеріалу.

Опір у світлі: це опір матеріала при високому рівні освітленості. Воно зазвичай значно нижче, ніж опір у темряві, і може досягати часток кілометра або ще менше [9].

Коефіцієнт зміни опору: це відношення зміни опору матеріалу до зміни рівня освітленості. Він показує, наскільки чутливо опір матеріалу реагує на зміни освітленості. Вищий коефіцієнт означає чутливіший матеріал.

Час відгуку: це час, який потрібний матеріалу для зміни опору після зміни рівня освітленості. Час відгуку може змінюватись від кількох мілісекунд до десятків мілісекунд або більше, залежно від матеріалу та його характеристик.

Діапазон чутливості до довжини хвилі: різні матеріали можуть бути більш менш чутливі до різної довжини хвилі світла. Наприклад, деякі матеріали можуть бути особливо чутливі до видимого світла, в той час як інші можуть реагувати краще на інфрачервоне випромінювання [8].

Температурні характеристики: матеріали можуть мати різні температурні залежності та зміни характеристик при зміні температури навколишнього середовища. Температурні характеристики важливі для забезпечення стабільної роботи системи управління світлом у широкому діапазоні температур [31].

Стійкість до навколишнього середовища: тензорезисторні матеріали повинні бути стійкими до впливу навколишнього середовища, як-от вологість, пил, хімічні речовини та інші фактори. Це забезпечує довговічність та стабільність роботи системи в різних умовах [14].

Вибір конкретного залежатиме від вимог проекту, таких як рівень освітленості, точність вимірювання, діапазон зміни освітленості, стабільність роботи та інші фактори [7].

#### **2.4. Сучасні технології впроваджені в системи керування світлом**

Тензорезистивні матеріали також можуть бути застосовані у світловому дизайні для створення унікальних ефектів та динамічних систем керування світлом. Ось деякі сучасні технології, впроваджені в системи керування світлом у світловому дизайні на основі тензорезистивних матеріалів:

Гнучкі світлові поверхні: тензорезистивні матеріали можуть бути інтегровані в гнучкі поверхні, які можуть змінювати форму та контур залежно від механічної напруги. Це дозволяє створювати динамічні та змінювані форми світлових об'єктів, а також регулювати інтенсивність та напрямок світла [9].

Інтерактивні світлові установки: тензорезистивні матеріали можуть використовуватися в інтерактивних світлових установках, де зміни механічного тиску на матеріал викликають зміни у освітленні. Наприклад, панелі, що реагують на дотики або жести, можуть керувати кольором, яскравістю або динамікою світлових ефектів.

Адаптивне освітлення: тензорезистивні матеріали можуть бути інтегровані в системи адаптивного освітлення, які реагують на довкілля та



потреби користувачів. Наприклад, сенсорні поверхні на основі тензорезистивних матеріалів можуть автоматично регулювати яскравість та колірну температуру світла в залежності від рівня природного освітлення або переваг користувачів [10].

Динамічні світлові ефекти: використання тензорезистивних матеріалів дозволяє створювати динамічні світлові ефекти, такі як зміна форми, рух, пульсація та переходи між різними освітленнями. Це може бути особливо корисним у сценічному та архітектурному світловому дизайні, де можна створювати унікальні та емоційні враження.

Однак варто відзначити, що впровадження тензорезистивних матеріалів у системи керування світлом у світловому дизайні все ще знаходиться у стадії досліджень та розробок [13]. Перед використанням таких технологій рекомендується провести ретельне проектування, тестування та оцінку їх застосовності для конкретних потреб та завдань світлового дизайну.

Ось деякі напрямки вдосконалення тензорезисторних перетворювачів у системах керування світлом:

Чутливість та точність: удосконалення тензорезисторних перетворювачів спрямоване на збільшення їх чутливості та точності. Чим більш чутливими вони стають, тим більше вони можуть реагувати на механічні деформації і передавати відповідні зміни в систему управління світлом [11]. Це може бути досягнуто шляхом оптимізації конструкції перетворювача, вибору оптимального матеріалу та використання нових технологічних процесів.

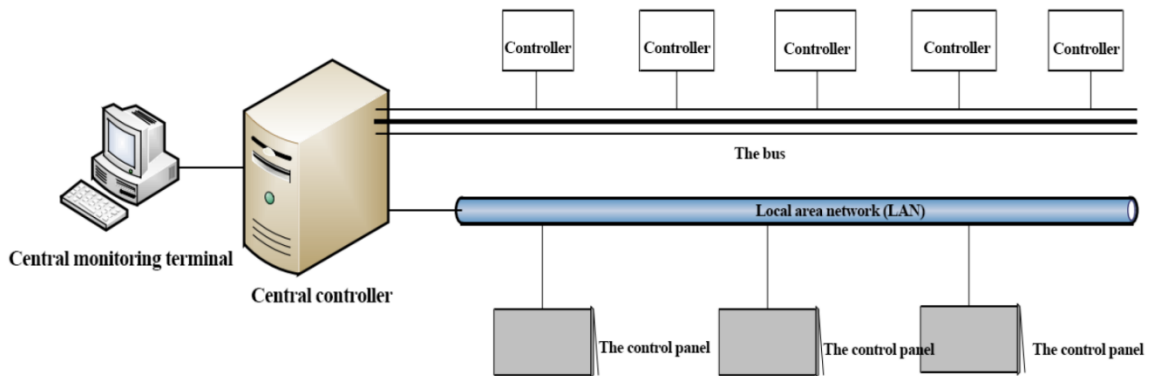
Динамічний діапазон: покращення динамічного діапазону тензорезисторних перетворювачів є ще одним важливим аспектом. Чим ширший діапазон механічних деформацій вони можуть виявити, тим більше можливостей для різноманітних ефектів та функцій у системі керування світлом. Це вимагає ретельного проектування та оптимізації матеріалів та електричних характеристик перетворювача [28].

Швидкодія: у деяких програмах системи керування світлом потрібне швидке реагування на зміни зовнішніх умов або команд користувача. Тому вдосконалення тензорезисторних перетворювачів спрямоване на підвищення їхньої швидкості відгуку та зниження часу затримки [11]. Це може бути досягнуто оптимізацією структури перетворювача та використанням передових електронних компонентів.

Інтеграція та мініатюризація: у світловому дизайні важлива можливість інтегрувати тензорезисторні перетворювачі у компактні та естетично привабливі пристрої. Тому вдосконалення технологій виробництва та монтажу дозволяє створювати більш компактні та інтегровані рішення. Мініатюризація перетворювачів також сприяє їх більш гнучкому використанню різних світлових установках [9].

Впровадження нових технологій може суттєво вплинути на робочі показники тензорезистивних матеріалів. Тензорезистивні матеріали мають властивість змінювати свій електричний опір під впливом механічних напруг. Ця властивість робить їх корисними для різних програм, таких як сенсори деформації, активні керовані елементи і т.д [11].

Інтелектуальна система керування освітленням зазвичай використовується для комунікації між середовищем та топологією мережі. В основному існують п'ять типів топології: (1) шинна структура, (2) зіркова структура, (3) кільцева структура, (4) деревоподібна структура та (5) мережева структура. Для поточного дослідження було обрано зоряну топологію, оскільки вона більш підходить для інтелектуальної системи управління освітленням з центральною та розподіленою системою. Структура центральної системи управління заснована на центральному процесорі, який пов'язаний з центральним керуючим вузлом через мережеве з'єднання безлічі вузлів, а потім центральний вузол управління передає команди на пульт управління та інше обладнання у системі керування освітленням [22]. Потім кожен вузол виконує ці команди. Схема конкретної структури показано малюнку 1 [10].



*Рис.2.4. Схема системи управління світлом*

Система управління цією структурою має переваги високої ефективності управління, простого виявлення проблем та сильної передавальної здатності. Недоліком є те, що оскільки система управління цією структурою в основному покладається на центральний контролер, якщо якість та ресурси центрального контролера не можуть бути гарантовані, стабільність системи значно знижується і розширення також буде обмежено певною мірою.

Інша система є розподіленою системою, яка в основному складається з освітлювального контролера, панелі управління та центру моніторингу. У цій системі керування як освітлювальний контролер, так і панель керування мають незалежні блоки, які можуть опрацьовувати різну інформацію окремо. Контрольний центр є основним компонентом усієї системи [23]. Освітлювальний контролер та панель управління обробляють інформацію та передають її в контрольний центр. Контрольний центр взаємодіє та конвертує отриману інформацію від кожного вузла. Конкретна структура показана на малюнку 2. Оскільки кожен вузол може функціонувати незалежно від центрального контролера, між кожним вузлом може здійснюватися інтерактивна взаємодія, що зміцнює виявлення та керування між вузлами та суттєво підвищує масштабованість системи керування. Тому у цьому проекті застосовано розподілену систему [24].

Ось кілька способів, як нові технології можуть впливати на робочі показники тензорезистивних матеріалів:

**Поліпшена чутливість:** розвиток нових технологій виробництва може спричинити створення тензорезистивних матеріалів з підвищеною чутливістю до механічних напруг. Це означає, що матеріали будуть більш чуйними і можуть виявляти менші зміни в напругах, що розширює їх застосування в більш точних вимірах [11].

**Більш широкий спектр роботи:** нові технології можуть допомогти розширити спектр роботи тензорезистивних матеріалів. Це означає, що вони можуть бути здатні працювати у більш високих або низьких температурах, а також у більш екстремальних умовах навколишнього середовища, що підвищує їхню універсальність та надійність.

**Поліпшена стабільність:** нові технології виробництва можуть допомогти покращити стабільність тензорезистивних матеріалів протягом часу. Вони можуть бути більш стійкими до впливу навколишнього середовища, такої як вологість, корозія або зношування, що продовжує їх термін служби та зберігає їхні робочі характеристики протягом тривалого часу.

Стабілізація роботи тензорезисторів важлива для забезпечення надійного та точного функціонування цих пристроїв [8]. Ось деякі методи та підходи, які використовуються для стабілізації роботи тензорезисторів:

**Калібрування:** одним із способів стабілізації роботи тензорезисторів є калібрування. Це процес налаштування та коригування роботи тензорезистора для компенсації можливих помилок та нелінійностей. Калібрування може здійснюватися шляхом зіставлення вимірювань з відомими еталонами або використання математичних моделей для коригування отриманих даних [10].

**Посилення сигналу:** тензорезистори можуть мати низький рівень сигналу, тому посилення сигналу може бути необхідним для підвищення чутливості та стабільності вимірювань. Підсилювачі можуть бути

використані для посилення слабких сигналів тензорезисторів, що допомагає покращити точність та стабільність вимірів [12].

Температурна стабілізація: температура може значно впливати на роботу тензорезисторів, особливо якщо вони виготовлені з матеріалів, чутливих до температурних змін. Для стабілізації роботи тензорезисторів може бути використана температурна компенсація, яка включає використання термостатів, термоелектричних охолоджувачів та інших пристроїв підтримки постійної температури навколишнього середовища

Електрична шумозаглушувальна фільтрація: електричний шум може вплинути на роботу тензорезисторів і призвести до помилок у вимірюваннях. Застосування фільтрів та методів шумозаглушення, таких як фільтри низьких частот та екранування, може допомогти усунути небажаний електричний шум та забезпечити стабільні вимірювання [16].

Механічна стабілізація: вібрації та механічні напруги можуть впливати на роботу тензорезисторів, особливо якщо вони використовуються в динамічних умовах або схильні до механічних навантажень. Для стабілізації роботи тензорезисторів можуть використовуватись механічні пристрої та системи амортизації, які допомагають знизити вплив зовнішніх механічних сил.

Стабілізація роботи тензорезисторів є важливим аспектом, який допомагає досягти більш точних та надійних вимірів. Конкретні методи стабілізації можуть залежати від конкретного типу та застосування тензорезисторів.

Інтеграція з іншими технологіями: Нові технології також можуть сприяти інтеграції тензорезистивних матеріалів з іншими передовими технологіями. Наприклад, вони можуть бути інтегровані з мікроелектронікою, наноматеріалами або бездротовими комунікаційними системами, що дозволяє створювати більш компактні та розумні пристрої [19].

**Висновки до другого розділу:**

Існує два типи систем: аналогова система керування освітленням та цифрова система управління освітленням. В даний час системи управління освітленням в основному покладаються на інформаційні технології та сенсори для виявлення присутності чи відсутності людей у навколишньому середовищі. Однак через відхилення в цьому сприйнятті точність розпізнавання зображень часто не є високою. З метою підвищення точності, надійності та стабільності роботи систем управління світлом нами було проведено роботи по удосконаленню напівпровідникових тензорезисторів та технологій їх використання.

### **РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ТЕНЗОДАТЧИКІВ З МЕТОЮ ЗАСТОСУВАННЯ В СИСТЕМАХ ОСВІТЛЕННЯ**

Впровадження нових технологій у виробництво тензорезистивних матеріалів може призвести до покращення їх робочих показників, таких як чутливість, діапазон роботи, стабільність та можливості інтеграції з іншими технологіями. Це відкриває нові перспективи для застосування цих матеріалів у різних галузях, таких як електроніка, робототехніка, медицина та багато інших [22].

#### **3.1. Сучасні тензорезистивні матеріали**

Як ілюстративні приклади тензорезистивних матеріалів у 2010 році та 2022 році можна розглянути наступні зразки:

2010 рік: полікристалічний кремній (полікремній)

Пристрій: у технічних додатках полікремній був широко використаний у вигляді тонких плівок, напилених на підкладки або у вигляді полікремнієвих резисторів [33].

Характеристики: у 2010 році полікремній володів високою чутливістю до механічних напруг, досить широким діапазоном роботи та помірною стабільністю.

Відмінність: основна відмінність від сучасних тензорезистивних матеріалів полягає в їх низькій інтеграції з іншими передовими технологіями та обмеженими можливостями мініатюризації.

В управлінні світлом у 2018 році використовувалися різні типи тензорезистивних матеріалів. Деякі з них включали:

Тензорезистори на основі гнучких плівок: ці матеріали дозволяли створювати гнучкі світлові поверхні, які могли змінювати свою оптичну пропускну здатність або світлопоглинання при застосуванні тиску або деформації [24].

Тензорезистивні полімери: це полімерні матеріали, які змінювали свій опір при механічній нарузі. Вони використовувалися для створення

датчиків тиску або деформації, які могли реагувати на зміни довкілля та регулювати світлові параметри.

Тензорезистивні матеріали для оптичних світлофільтрів: ці матеріали використовувалися для створення світлофільтрів, які могли б регулювати пропускання певних довжин хвиль світла. При зміні деформації чи напруги на матеріалі змінювалася його оптична характеристика, дозволяючи регулювати колірну температуру чи інтенсивність висвітлення [28].

#### 2022: Гібридні наноструктуровані матеріали

Пристрій: у сучасних тензорезистивних матеріалах застосовуються гібридні наноструктуровані системи, такі як квантові точки, нанотрубки вуглецю або графенові структури. Ці матеріали можуть бути впроваджені у формі нанокомпозитних плівок або наноструктурних датчиків [29].

Характеристики: гібридні наноструктуровані матеріали володіють високою чутливістю, широким діапазоном роботи, покращеною стабільністю та інтеграцією з іншими передовими технологіями. Вони можуть виявляти навіть найдрібніші механічні напруги та пропонувати нові можливості в галузі сенсорики та управління.

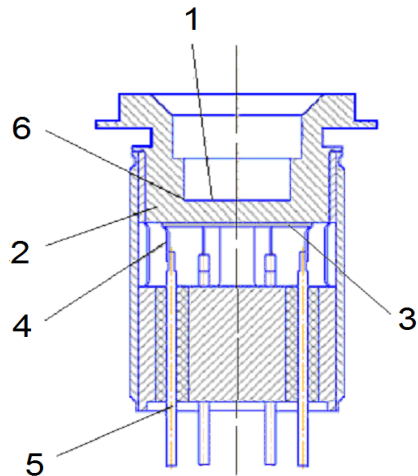
Відмінність: головна відмінність сучасних тензорезистивних матеріалів полягає в їх більш складній структурі та більш високих характеристиках, таких як чутливість, стабільність та можливості інтеграції з іншими передовими технологіями [4].

Важливо, що ці приклади представляють загальну ілюстрацію і відбивають всіх доступних матеріалів чи технологічних розробок. Розвиток у галузі тензорезистивних матеріалів продовжується, і існують численні нові матеріали та покращені характеристики, які можуть бути доступні в даний час.

У світлодизайні 2020 року використовувалися різні типи тензорезистивних матеріалів для створення ефектів освітлення. Деякі з них включають:



Гнучкі плівки з тензорезистивними властивостями: Ці матеріали дозволяють створювати гнучкі та вигнуті світлові поверхні. Вони можуть змінювати свою оптичну пропускну здатність або світлопоглинання залежно від прикладеної напруги чи деформації.



*Рис. 3.1. – Тензорезисторна тонкоплівкова НІМЕМС датчика тиску*

1 – мембрана, 2 – периферійна основа, 3 – гетерогенна структура, 4 – вивідні провідники, 5 – гермовиводи, 6 – межа мембрани.

З підвищенням попиту системи управління, контролю та безпеки зростає потреба у датчиках фізичних величин (тиску, сили, прискорення, переміщення та інших.). Значну частку ринку займають датчики тиску. Сучасні датчики тиску створюються на основі нано- та мікроелектромеханічних систем (НІМЕМС) [1-5]. Для прецизійних вимірювань тисків у ракетно-космічній та авіаційній техніці використовують датчики на основі тензорезистивного ефекту із застосуванням тонких тензорезистивних плівок [6, 7].

Провідними зарубіжними виробниками тензорезисторних датчиків тиску є «OMEGA», «Nagano Keiki», «ADZ Nagano», «Trafag AG», «Bell & Howell», «Setra Sistem», «METALLUX», «Gefran», «Wika» «GFS», «Datametrics», «Siemens AG», «Endress & Hauser», «Rosemount», «Boeing Co», «Meclec Co», «Fischer&Porter».

Датчик тиску на основі тензорезисторної тонкоплівкової НІМЕМС конструктивно складається з корпусу, НІМЕМС та різних додаткових елементів. НІМЕМС перетворює тиск у вихідний електричний сигнал.

При конструюванні НІМЕМС датчиків враховують особливості та недоліки пружних елементів та тензорезисторів. Для підвищення чутливості тензоелементи (тензорезистори) розміщують на пружних елементах НІМЕМС в зонах найбільших деформацій, а для зменшення температурної похибки датчиків матеріали тензоелементів (тензорезисторів) вибирають з меншим ТКС, використовують мостові вимірювальні ланцюги з термокомпенсацій.

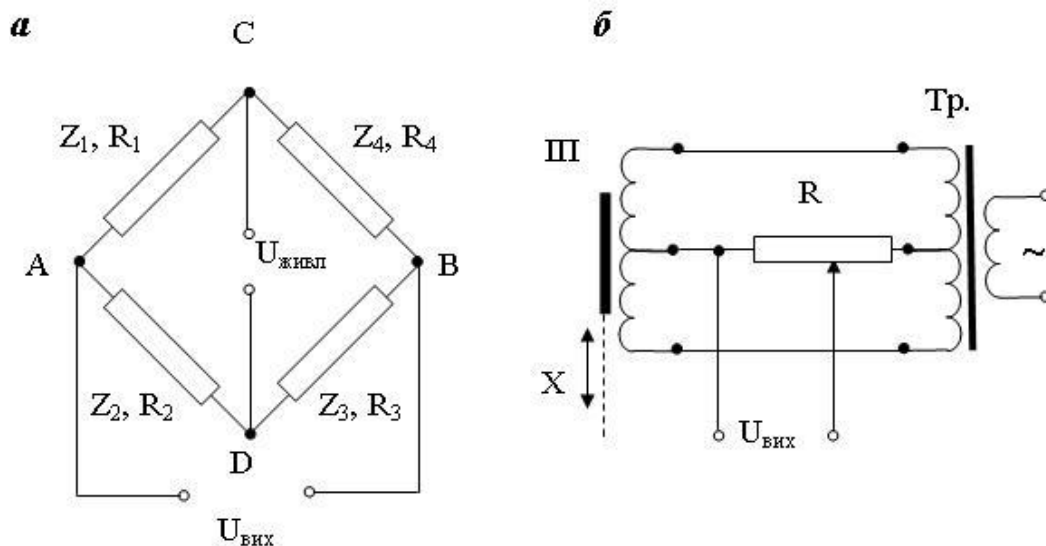


Рис.3.2. Схеми мостового підключення вимірювальних перетворювачів:  
а - загальний випадок; б – мостова схема з індуктивним перетворенням

Вивчення існуючих та перспективних розробок виробників показує, що перспективними напрямками створення тензорезисторних тонкоплівкових датчиків тиску є – засновані на використанні нових матеріалів та структур НіМЕМС, стійких до впливу факторів, що дестабілізують (температур, віброприскорень, ударів тощо) [9–13].

Вибір матеріалів виготовлення тензорезистивних елементів НіМЕМС здійснюють переважно за такими параметрами: питомий опір, коефіцієнт тензочутливості, температурний коефіцієнт опору (ТКС), температурний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР). Вони визначають ефективність

перетворення механічної деформації в електричний сигнал, температурний діапазон роботи та температурну похибку датчика [19].

Для виготовлення тонкоплівкових резистивних елементів (тензорезисторів) датчиків механічних величин застосовуються сплави [14–21]:

- нікелю та хрому з легуючими добавками Х20Н80 та Х20Н75Ю;
- керметний (хром та кремній з легуючими добавками) П65ХС, К50С, РС у різних модифікаціях (1004, 3001, 3710, 5402, 4400, 5406);
- вольфраму з ренієм ВР27ВП та молібдену з ренієм МР47ВП.

Недоліком сплаву П65ХС при його застосуванні для виготовлення тензорезисторів НІМЕМС є високе значення ТКС – не менше  $1 \times 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$ . У результаті виготовлені вимірювальні ланцюги мають велику температурну похибку, унаслідок чого потрібно введення терморезистора для компенсації розбалансу [17].

Тензорезистивні полімери: це полімерні матеріали, які змінюють свій опір при механічній нарузі. Вони можуть використовуватися для створення інтерактивних світлових елементів, що реагують на тиск, стиснення або вигин.

Тензорезистивні фарби :це спеціальні фарби, що містять тензорезистивні частинки. Вони можуть бути нанесені на різні поверхні, такі як стіни, підлога або об'єкти, і змінювати свій колір або яскравість при додатку тиску або деформації.

Тензорезистивні світлодіоди (LED): у деяких світлодізайн-додатках використовувалися тензорезистивні світлодіоди, які можуть змінювати свою яскравість або колір залежно від зовнішнього тиску або деформації.

Важливо відзначити, що розвиток та застосування тензорезистивних матеріалів у світлодізайні постійно просувається, і нові матеріали та технології можуть бути доступні у наступні роки, після 2020 року [22].

Як показують наведені вище результати огляду різних систем керування освітленням досить перспективними можуть бути системи, які

ґрунтуються на датчиках механічних напружень та деформацій – тензодатчики та тензорезистори. Особливо це стосується тензодатчиків на основі напівпровідникових матеріалів. Такі систему можуть керувати різними параметрами освітлення використовуючи механічні взаємодії користувача з оточуючими предметами.

### **3.2. Розробка нового тензодатчика**

Як показують наведені вище результати огляду різних систем керування освітленням досить перспективними можуть бути системи, які ґрунтуються на датчиках механічних напружень та деформацій – тензодатчики та тензорезистори. Особливо це стосується тензодатчиків на основі напівпровідникових матеріалів. Такі систему можуть керувати різними параметрами освітлення використовуючи механічні взаємодії користувача з оточуючими предметами.

З метою використання напівпровідникових матеріалів та тензодатчиків для створення чутливих елементів в системах керування освітленням нами проаналізований тензорезистивний ефект в напівпровідникових матеріалах типу кремнію, удосконалено відомі напівпровідникові датчики, на їх основі створено експериментальні зразки високочутливих тензодатчиків та тензорезисторів і досліджено їх характеристики [34-35]. Досліджено також вплив нанорозмірних наповнювачів в клеї, за допомогою яких закріплюються тензодатчики.

Електрофізичні властивості напівпровідників у 10-100 разів чутливіші до механічних впливів, ніж властивості металів. Але широкому використанню напівпровідникових матеріалів в тензометрії перешкоджає декілька причин. Основними є температурна залежність електрофізичних параметрів таких тензодатчиків, а також невисока механічна міцність і жорсткість, що призводить до повзучості показань, значна поперечна тензочутливість.

Розвиток науки і техніки неможливий без удосконалення засобів контролю різних фізичних параметрів. Це відноситься і до тензометрії [36-43].

П'єзрезистивний ефект - це зміна електричного опору матеріалу при механічному впливі на нього. Відомо, що зміна електричного опору в цьому випадку відбувається з двох причин – за рахунок зміни геометричних розмірів та за рахунок зміни рухливості носіїв заряду та відповідно провідності матеріалу. Перша причина відноситься до металів, де рухливість носіїв струму при механічному впливі практично не змінюється, а опір змінюється завдяки зміні розмірів при деформації – рис.3.3.

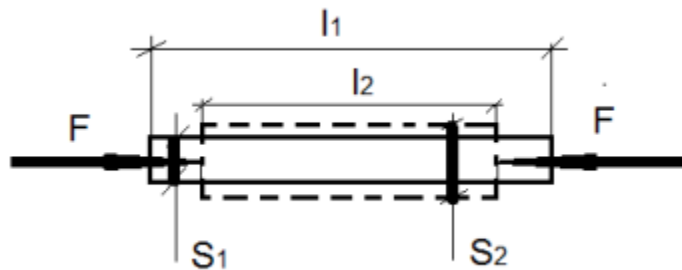


Рис.3.3 Зміна розмірів  $l$ - довжини,  $S$  – площі поперечного перерізу зразка при механічному впливі на його силою  $F$ .

Електричний опір  $R$  матеріалу визначається виразом:

$$R = \rho l / S, \quad (3.1)$$

де  $\rho$  – питомий опір,  $l$  – довжина зразка,  $S$  – площа поперечного перерізу.

Як можна зрозуміти з рис.1 і виразу (1) при стисканні електричний опір зразка буде зменшуватися за рахунок зменшення довжини  $\Delta l = l_1 - l_2$  і зростання площі поперечного перерізу  $\Delta S = S_2 - S_1$ , а при розтягуванні збільшуватися.

У напівпровідниках з кубічною решіткою для загального випадку, коли напрямок механічної напруги  $\sigma$  і густини струму  $j$  становлять довільний кут, п'єзрезистивний ефект теоретично описується за допомогою

п'єзорезистивних  $\pi_{ij}$  ( $\pi = \Delta\rho/\rho_0 X$ , де  $\Delta\rho$  – зміна питомого опору,  $\rho_0$  – початковий питомий опір,  $X$  – механічна напруга) або еласторезистивних  $m_{ij}$  коефіцієнтів, які є тензорами четвертого рангу [44-46]. Ці коефіцієнти пов'язані між собою через коефіцієнти податливості та модулі пружності. Для кристалів того класу симетрії, до якого належить кремній, у системі кристалографічних осей для опису п'єзорезистивного ефекту достатньо знати три коефіцієнти:  $\pi_{11}$ ,  $\pi_{12}$  та  $\pi_{44}$ , які іноді називають головними п'єзорезистивними коефіцієнтами. Головні п'єзорезистивні коефіцієнти залежить від багатьох чинників: від матеріалу, типу провідності, питомого опору, рівня легування, температури, величини механічної деформації (напруги).

В літературі [47,48], наприклад, наведені відомі різні комбінації коефіцієнтів п'єзоопору для напрямків механічних напруг і щільності струму, що збігаються з певними кристалографічними вісями. Усі три основних коефіцієнти п'єзоопору можуть бути визначені шляхом трьох вимірів у різних напрямках. Повний тензор п'єзоопору  $\pi_{ijkl}$  визначається таким чином:

$$\frac{\Delta\rho_{ij}}{\rho_0} = \sum_{kl} \pi_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (3.2)$$

де  $\sigma_{kl}$  – тензор напруги,  $\Delta\rho_{ij}$  – тензор питомого опору. Відомо, що тензор напруги є симетричним тензором і має шість незалежних компонентів. Те саме справедливо і для тензора питомого опору.

З урахуванням сказаного у шестивимірному просторі можна отримати:

$$\frac{\Delta\rho_i}{\rho_0} = \sum_{j=1}^6 \pi_{ij} \sigma_j, i = 1, 2, \dots, 6 \quad (3.3)$$

Залежно від кристалографічної орієнтації зразка кремнію виходять різні комбінації величин поздовжніх та поперечних коефіцієнтів п'єзоопору. Це важливо враховувати при розробці конструкції тензодатчиків і особливо таких, чутливий елемент яких працюватиме в умовах одновісної деформації і складові чутливого елемента будуть орієнтовані як поздовжньому, так і поперечному напрямкам.

Для дослідження та створення вимірювальних перетворювачів використані леговані іонною імплантацією фосфору та бору тонкі і нанорозмірні полікристалічні плівки кремнію на площині (100) монокристалічного кремнію з ізолюючим шаром  $\text{SiO}_2$ . Такі структури можуть бути більш технологічними при використанні планарних методів виготовлення вимірювальних перетворювачів.

Використані плівки полікремнію n та p-типу провідності, товщиною 0.6 мкм та рівнями легування  $(1 \cdot 10^{17} - 5 \cdot 10^{19}) \text{ см}^{-3}$ . В основному в експерименті використовувалися зразки з плівками p-типу поздовжньої орієнтації  $\langle 100 \rangle$ , а поперечної  $\langle 010 \rangle$ , так як для сильнолегованого полікристалічного p-кремнію поперечний і поздовжній коефіцієнти для цієї орієнтації, як показано, близькі за величиною. Легуючою домішкою для p-кремнію служив бор.

Для певних розмірів датчика механізм передачі деформації призводить до того, що як показано в [50] при співвідношенні ширини датчика  $d$  до висоти  $h$   $d/h < 2$  поперечна деформація об'єкта практично не передається на його поверхню. Ця властивість використана нами для виготовлення експериментальних тензодатчиків (вимірювальних перетворювачів).

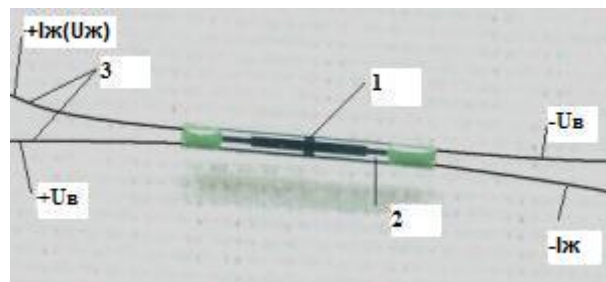


Рис. 3.4. Датчик деформації. 1-тензочутлива мікросхема; 2 – підкладка; 3 – електричні виводи;  $I_{ж}(U_{ж})$  – струм чи напруга живлення,  $U_{в}$  – вихідна напруга.

На рис.3.4 показано зображення одного з типів перетворювачів деформації (напруження) і полярність підключення живлення та вимірювальних приладів. Він складається з інтегрального чутливого

елемента 1, виконаного на основі плівки кремнію, осадженої на підкладку 2 монокристалічного кремнію з шаром оксиду на поверхні. Електричні виводи 3 виготовлені з алюмінієвого дроту  $d=80$  мкм, кінці яких забезпечені смужками металу, що піддається пайці звичайним припоєм. Конструкція та інтегральне виконання чутливого елемента датчика забезпечують термокомпенсацію основних параметрів, компенсацію впливу магнітного поля та відсутність поперечної тензочутливості. Розмір бази датчика 8мм, вхідний  $R_{вх}$  і вихідний  $R_{вих}$  електричні опори залежать від рівня легування і товщини плівок і знаходяться в межах (200 – 3000) Ом, струм живлення залежить від величини опору і, як правило, знаходиться в межах (1 – 10) мА.

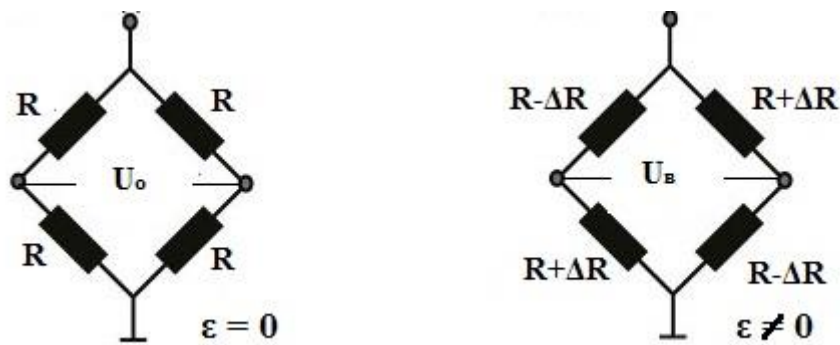


Рис.3.5. Принципова електрична схема чутливого елемента тензодатчика

Принцип роботи тензодатчика полягає у зміні електричного опору резистивних елементів інтегральної мікросхеми при прикладанні механічної деформації вздовж осі датчика (рис. 4.3), розкомпенсації мікросхеми та появі, в результаті цього електричної напруги  $U_в$  на вимірювальних контактах при живленні датчика струмом або напругою (див. рис.2,3). Попередньо проградувавши датчик тобто. отримавши залежність вихідної напруги  $U_в$  від величини механічної деформації в подальшому за величиною вихідної напруги датчика, жорстко закріпленого на об'єкті, визначають деформацію об'єкта.

$$\varepsilon = (U_в - U_0)/k \quad (3.4)$$



де  $U_v$  – вихідний сигнал датчика після появи деформації  $\epsilon$  об'єкта, що досліджується,  $U_0$  – початковий вихідний сигнал, який вимірюється після монтажу датчика на об'єкт,  $k = \Delta U_v / \Delta \epsilon$  – тензочутливість датчика.

Для монтажу датчика на об'єкт дослідження можуть бути використані клеї БФ-2, ВС-350 та інші, що широко застосовуються в тензометрії та забезпечують достатню жорсткість монтажу. Допустимість використання даного сполучного матеріалу може бути перевірена за величиною повзучості показань датчика після навантаження перевіркою балки, яка не повинна перевищувати допустиму похибку вимірювань.

Наведемо для прикладу деякі результати дослідження вимірювальних перетворювачів з  $R_{вх} = 1.7$  кОм ( $N_p = 10^{18}$  см<sup>-3</sup>). Тензочутливість при струмі живлення 2 мА становить приблизно 42 мкВ/млн<sup>-1</sup>. Величина нульового (початкового) вихідного сигналу датчика  $U_0 \sim 6.2$  мВ і при необхідності може бути підігнана близькою до нуля. Температурна залежність тензочутливості трохи більше 0,02 % /К,  $U_0 \sim 8$  мкВ/К,  $R \sim 0.03$  % /К. Характеристики можна змінювати, наприклад, збільшуючи струм живлення (не допускаючи перегріву та неприпустимих шумів), збільшити чутливість.

Відомо, що точність вимірювань значною мірою залежить від такого параметра, як повзучість показань. Повзучість визначається жорсткістю конструкції датчика та сполучного і обумовлена пластичною деформацією сполучного (клею) під дією механічної деформації. Як правило, для напівпровідникових датчиків повзучість істотно вища за повзучість фольгових металевих.

На наш погляд, для розглянутих датчиків повзучість є головним недоліком і обумовлена досить жорсткою конструкцією перетворювача. Шляхами зменшення повзучості можуть бути подальша мініатюризація та оптимізація форми датчика, підбір сполучного.

В подальшому досліджено вплив наноелементів в технологічних процесах вимірювань та конструкції напівпровідникових тензодатчиків на похибки вимірювань деформації в умовах коли вісь бази датчика не

збігається з напрямком головної деформації об'єкта. Експериментальні дослідження проведені на датчиках загальної конструкції, розглянутої в [38,41].

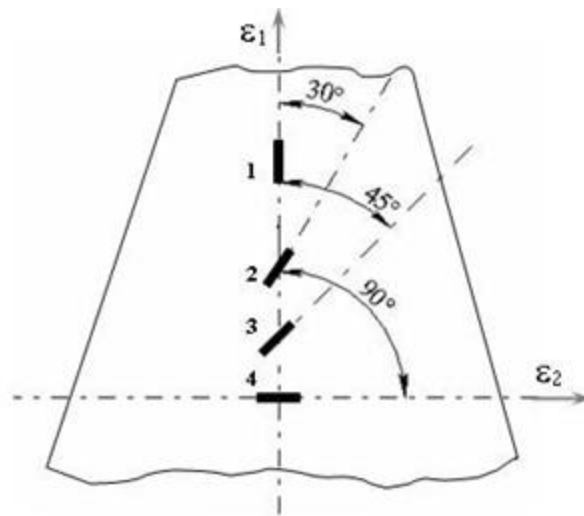


Рис. 3.6. Схема розташування тензодатчиків при дослідженні випадку розбіжності осі датчика та напрямку головної деформації  $\varepsilon_1$ .

На рис.3.6 показано напрямок головної деформації  $\varepsilon_1$  балки та схема розташування датчиків на балці. Датчики кріпилися за допомогою клею БФ-2 та епоксидних клеїв з нанорозмірними домішками. Вісь бази датчика 1 збігається з напрямком головної деформації  $\varepsilon_1$ , датчик 2 розташований під кутом  $30^\circ$  до  $\varepsilon_1$ , датчик 3 - під кутом  $45^\circ$  і датчик 4 - під кутом  $90^\circ$  (збігається з головною деформацією  $\varepsilon_2$ ). Усі датчики взято з однієї партії, виготовленої в одному технологічному режимі.

Розрахункові деформації, які були використані для порівняння з отриманими експериментально, визначені за формулами, взятими з [43]:

$$\varepsilon_\varphi = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \cos 2\varphi \quad (3.5)$$

де  $\varphi$  - кут між напрямком  $\varepsilon_1$ , та напрямком, для якого розраховується деформація. Деформація  $\varepsilon_2$  розрахована за формулою  $\varepsilon_2 = -\mu\varepsilon_1$  (де  $\mu$  - коефіцієнт Пуассона).

Найбільша відмінність  $\varepsilon_\varphi$  від  $\varepsilon_\varepsilon$  спостерігається для  $\varphi = 30^\circ$  і становить величину 6%, що на рівні похибки експерименту. Результати свідчать про незначність поперечної тензочутливості датчиків. Як показано у роботі [42],

не вся деформація передається від досліджуваного деформованого об'єкта до чутливого елемента тензодатчика. Облік зазначеного ефекту може бути зроблений за допомогою коефіцієнта передачі, величина якого може бути визначена за формулою [42,43]:

$$k_{пер} = 1 - \frac{2}{bl} \left( 1 - e^{-bl/2} \right) \quad (3.6)$$

де ,  $b = \sqrt{GC/EQ}$  ,  $G$  - модуль зсуву сполучного,  $E$  - модуль пружності чутливого елемента (зразка),  $Q$  - площа поперечного перерізу зразка,  $C = \frac{2\pi}{\ln 4h_c/h}$  ,  $h$  - товщина зразка,  $h_c$  - товщина сполучного,  $l$  - довжина зразка.

Ґрунтуючись на дослідженнях було встановлено шляхи удосконалення конструкції тензодатчика та технології його кріплення з застосуванням елементів нанотехнологій.

Зображення деяких з експериментально досліджуваних зразків напівпровідникових тензодатчиків та металевих тензорезисторів представлені в Додатках Е,Ж.

### 3.3 Елементи проєкту системи керування світлом в кав'ярні



*Рис.3.7. Розташування тензочутливої платформи 1 для управління світлом біля кав'ярні*

Варіанти конструкції тензочутливої платформи:

А. Знизу тензочутливої платформи монтується окрема пружна балка, на якій закріплюються тензорезистори або інтегральний напівпровідниковий тензодатчик.

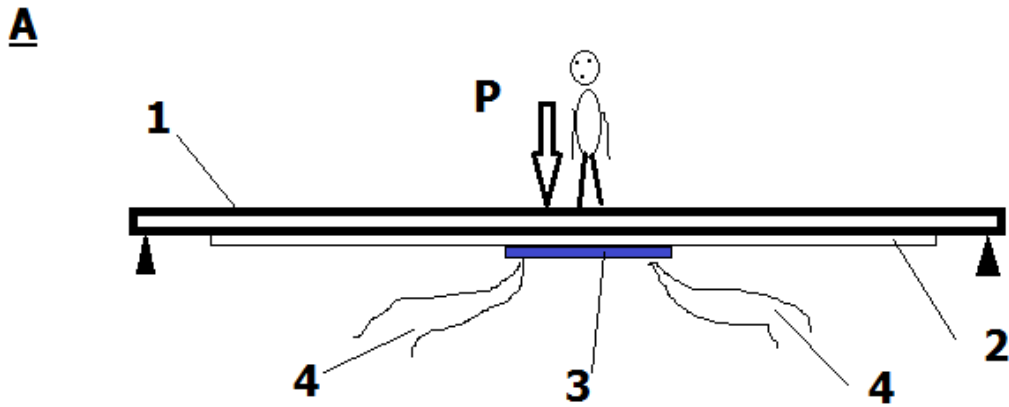


Рис. 3.8. Варіант А. 1 – тензочувлива платформа, 2 – пружня балка з'єднана з платформою 1, 3 – тензодатчик (тензорезистори), 4 – електричні виводи для живлення датчиків та отримання вихідного сигналу.

В. Знизу тензочувливої платформи монтується спеціальної конструкції автономний тензодатчик на основі металевих або напівпровідникових тензорезисторів.

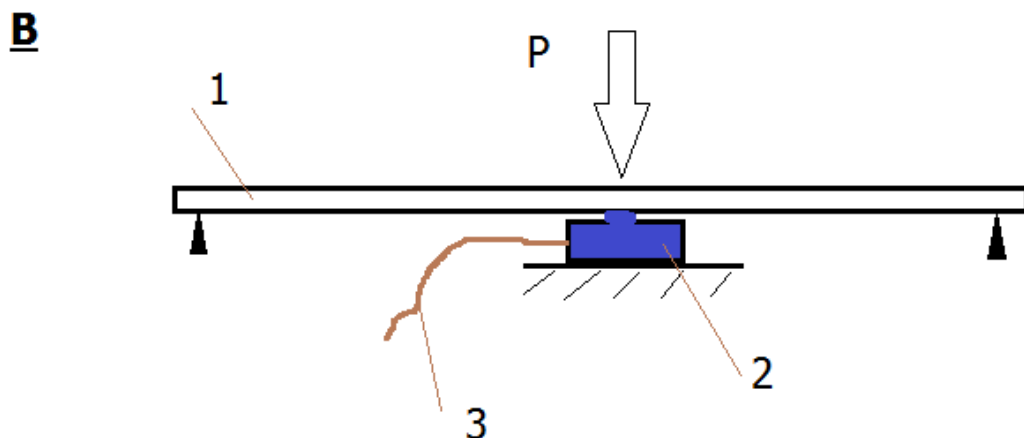


Рис. 3.9. Варіант В. 1 – тензочувлива платформа, 2 - автономний тензодатчик, 3 - електричний кабель для живлення датчика та отримання вихідного сигналу.

Принцип роботи запропонованої системи управління світлом полягає в наступному.

При появі на тензочутливій платформі людини виникає навантаження на пружну балку з тензорезисторами або напівпровідниковим тензодатчиком та її пружна деформація (варіантА). Ця деформація призводить до виникнення електричного сигналу з тензодатчика. Цей сигнал поступає на блок управління світлом і світло вмикається.

В загальному теж саме відбувається і в варіанті В, тільки що тут платформа безпосередньо контактує з тензодатчиком.

### **Висновок до третього розділу:**

За останні 10 років тензорезистори зазнали значних змін та прогресу, що призвело до значного поліпшення їх характеристик та переваг. Ось деякі основні зміни та переваги, пов'язані з розвитком тензорезисторів:

1. **Покращена чутливість:** Було розроблено досліджено нові конструкції з більш високою чутливістю до механічної напруги. Це дозволяє більш точно вимірювати та реєструвати малі зміни величини напруги, які можуть виникати у різних додатках.
2. **Широкий діапазон роботи:** Нові конструкції та тензорезисторні матеріали дозволяють працювати у широкому діапазоні механічних напруг. Це дозволяє застосовувати їх у різних галузях, де потрібний вимір різноманітних механічних впливів, таких як тиск, стиск, розтягування та вигин.
3. **Покращена стабільність:** Дослідження тензорезисторних матеріалів призвели до розробки матеріалів з покращеною стабільністю електричних властивостей при механічних навантаженнях, що повторюються. Це дозволяє досягти більш довговічної роботи та знизити ефекти втоми матеріалу.
4. **Інтеграція в нанoeлектроніку:** Тензорезисторні матеріали стали активно досліджуватися в контексті нанoeлектроніки та гнучких електронних систем. Вони можуть бути інтегровані в наноструктури та

наноелектронні пристрої, забезпечуючи можливість створення гнучких, легких та високоефективних сенсорних систем.

## ВИСНОВКИ

Експериментально підтверджено практично відсутня поперечна тензочутливість тензодатчиків розглянутої в роботі конструкції, встановлено зниження на 15% часової повзучості при використанні нанододмішок в складі сполучного.

Проаналізовано п'єзоефект у металах та більш детально у напівпровідниках типу кремнію, розглянуто теоретичні принципи роботи напівпровідникових тензодатчиків. Запропоновано варіанти удосконалення вимірювальних перетворювачів, виготовлено експериментальні зразки вимірювальних перетворювачів деформації на основі плівок кремнію на кремнієвих підкладках та досліджено їх характеристики. Перевагами запропонованих конструкцій та технологій вимірювання є висока тензочутливість, простота перетворення вимірюваного параметра електричний сигнал, температурна компенсація вихідних параметрів перетворювачів.

Тензорезистивні матеріали можуть бути застосовані у світловому дизайні для створення унікальних ефектів та динамічних систем керування світлом. Як показують результати огляду різних систем керування освітленням досить перспективними можуть бути системи, які ґрунтуються на датчиках механічних напружень та деформацій – тензодатчики та тензорезистори. Особливо це стосується тензодатчиків на основі напівпровідникових матеріалів. Такі систему можуть керувати різними параметрами освітлення використовуючи механічні взаємодії користувача з оточуючими предметами.

Таким чином нами показана перспективність застосування напівпровідникових тензодатчиків розглянутих та удосконалених нами

конструкцій та технологій використання в різних системах керування освітленням, які ґрунтуються на механічній взаємодії користувача (людини, тварини, автоматичних пристроїв та інш.). Вони мають високу чутливість, яка може також регулюватись, незначну залежність характеристик від температури, малі розміри. Розроблено елементи конструкції системи керування освітленням в кав'ярні.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. DiLouie, Craig (2008). Lighting controls handbook. Lilburn, Ga. [u.a.]: Fairmont Press [u.a.] p. 239. ISBN 1-4200-6921-7.
2. A.Gkaravelis, G.Papaioannou. Light Optimization fur Detail Highlighting. Computer Graphics Forum (proc. Pacific Graphics 2018. 37(7), pp.37-44, October, 2018.
3. CEE Residential Lighting Controls Market Characterization | Energy Efficiency Program Library. Retrieved November 8, 2015. Archived from the original on December 8, 2015.
4. Tridonic GmbH & Co KG — Home. Retrieved November 8, 2015. Archived from the original on November 17, 2015.
5. [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0\\_%D1%83%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F\\_%D0%BE%D1%81%D0%B2%D0%B5%D1%89%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%D0%BC](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0_%D1%83%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F_%D0%BE%D1%81%D0%B2%D0%B5%D1%89%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%D0%BC)
6. <https://imolodec.com/lighting/sistema-avtomaticheskogo-osveshcheniya>
7. Leira, F.; Johansen, T.; Fossen, T. Automatic detection, classification and tracking of objects in the ocean surface from UAVs using a thermal camera. In Proceedings of the Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 7–14 March 2015; pp. 1–10.
8. Tiwari, M.; Singhai, R. A review of detection and tracking of object from image and video sequences. Int. J. Comput. Intell. Res. 2017, 13, 745–765
9. Wang, Y.; Luo, X.; Fu, S.; Hu, S. Context multi-task visual object tracking via guided filter. Signal Process. Image Commun. 2018, 62, 117–128.
10. Dehghan, A.; Shah, M. Binary quadratic programming for online tracking of hundreds of people in extremely crowded scenes. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 2018, 40, 568–581
11. Sahbani, B.; Adiprawita, W. Kalman filter and iterative-hungarian algorithm implementation for low complexity point tracking as part of fast multiple object tracking system. In Proceedings of the 2016 6th International

- Conference on System Engineering and Technology (ICSET), Bandung, Indonesia, 3–4 October 2016; pp. 109–115.
12. Zeng, M.; Nguyen, L.T.; Yu, B.; Mengshoel, O.J.; Zhu, J.; Wu, P.; Zhang, J. Convolutional neural networks for human activity recognition using mobile sensors. In Proceedings of the 2014 6th International Conference on Mobile Computing, Applications and Services (MobiCASE), Austin, TX, USA, 6–7 November 2014; pp. 197–205.
  13. Ordóñez, F.; Roggen, D. Deep convolutional and lstm recurrent neural networks for multimodal wearable activity recognition. *Sensors* 2016, 16, 115.
  14. Albelwi, S.; Mahmood, A. A framework for designing the architectures of deep convolutional neural networks. *Entropy* 2017, 19, 242.
  15. Gao, Z. Object-Based Image Classification and Retrieval with Deep Feature Representations. Ph.D. Thesis, School of Computing and Information Technology, University of Wollongong, New South Wales, Australia, 2018; pp. 724–735.
  16. Teow, M.T. Understanding convolutional neural networks using a minimal model for handwritten digit recognition. In Proceedings of the 2017 IEEE 2nd International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS), Kota Kinabalu, Malaysia, 21 October 2017; pp. 167–172.
  17. Kristan, M.; Matas, J.; Leonardis, A.; Vojir, T.; Pflugfelder, R.; Fernandez, G.; Nebehay, G.; Porikli, F.; Cehovin, L. A novel performance evaluation methodology for single-target trackers. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 2016, 38, 2137–2155.
  18. Mishkin, D.; Sergievskiy, N.; Matas, J. Systematic evaluation of convolution neural network advances on the imagenet. *Comput. Vis. Image Underst.* 2017, 161, 11–19.
  19. Manohar, V.; Soundararajan, P.; Raju, H.; Goldgof, D.; Kasturi, R.; Garofolo, J. Performance evaluation of object detection and tracking in

- video. In Asian Conference on Computer Vision; Springer: Berlin, Heidelberg, 2006; pp. 151–161.
20. Gade, R.; Moeslund, T. Thermal tracking of sports players. *Sensors* 2014, 14, 13679–13691.
  21. Bernardin, K.; Stiefelhagen, R. Evaluating multiple object tracking performance: The clear mot metrics. *EURASIP J. Image Video Process.* 2008, 2008, 246309
  22. Bochinski, E.; Eiselein, V.; Sikora, T. High-speed tracking-by-detection without using image information. In Proceedings of the 2017 14th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS), Lecce, Italy, 29 August–1 September 2017; pp. 1–6.
  23. Wan, X.; Wang, J.; Zhou, S. An online and flexible multi-object tracking framework using long short-term memory. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, Salt Lake City, UT, USA, 18–22 June 2018; pp. 1230–1238.
  24. Bewley, A.; Ge, Z.; Ott, L.; Ramos, F.; Upcroft, B. Simple online and realtime tracking. In Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Phoenix, AZ, USA, 25–28 September 2016; pp. 3464–3468.
  25. Wu, Y.; Lim, J.; Yang, M. Object tracking benchmark. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 2015, 37, 1834–1848.
  26. Čehovin, L.; Kristan, M.; Leonardis, A. Is my new tracker really better than yours? In Proceedings of the IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision, Steamboat Springs, CO, USA, 24–26 March 2014; pp. 540–547.
  27. Čehovin, L.; Leonardis, A.; Kristan, M. Visual object tracking performance measures revisited. *IEEE Trans. Image Process.* 2016, 25, 1261–1274.
  28. Wang, Q.; Gong, D.; Qi, M.; Shen, Y.; Lei, Y. Temporal sparse feature auto-combination deep network for video action recognition. *Concurr. Comput. Pract. Exp.* 2018, 30, e4487.

29. Jiang, X.; Xiao, Z.; Zhang, B.; Zhen, X.; Cao, X.; Doermann, D.; Shao, L. Crowd counting and density estimation by trellis encoder-decoder networks. In Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Long Beach, CA, USA, 15–20 June 2019; pp. 6126–6135.
30. Chen, X.; Lai, J. Detecting abnormal crowd behaviors based on the div-curl characteristics of flow fields. *Pattern Recognit.* 2019, 88, 342–355.
31. Wei, X.; Du, J.; Xue, Z.; Liang, M.; Geng, Y.; Xu, X.; Lee, J. A very deep two-stream network for crowd type recognition. *Neurocomputing* 2019, 396, 106–112.
32. Vahora, S.; Chauhan, N. Deep neural network model for group activity recognition using contextual relationship. *Eng. Sci. Technol. Int. J.* 2019, 22, 47–54
33. Jing, S.; Chen, C.; Kang, X.K. Slicing convolutional neural network for crowd video understanding. In Proceedings of the IEEE Conf Comput Vis Pattern Recognition, Las Vegas, NV, USA, 27–30 June 2016; pp. 5620–5628
34. Горбачук М.Т., Попович В.Є. Нанoeлементи в конструкції та дизайні тензодатчиків і аналіз деяких результатів вимірювань. II міжнародна науково-практична інтернет конференція молодих учених та студентів “Електромеханічні, інформаційні системи та нанотехнології”, 20 квітня 2023 року, КНУТД, м. Київ
35. Горбачук М.Т., Попович В.Є. П'єзорезистивний ефект в напівпровідниках та його практичне використання. Інтернет-конференція молодих учених та студентів “Електромеханічні, інформаційні системи та нанотехнології”, КНУТД. 18 нояб. 2022 року, КНУТД, м. Київ
36. Barlian AA, Narain R, Li JT, Quance CE, Cho A, Mukundan V, Pruitt BL. Piezoresistive MEMS underwater shear stress sensors. 19th IEEE

- International Conference on Micro Electro Mechanical Systems; Istanbul, Turkey. 2006. pp. 626–629.
37. Morin FJ, Geballe TH, Herring C. Temperature dependence of the piezoresistance of high-purity silicon and germanium. *Phys Rev.* 1957;105:525–539.
  38. Nikolay Gorbachuk, Mikhail Larionov, Aleksey Firsov, Nikolay Shatil. Semiconductor Sensors for a Wide Temperature Range. *Sensors & Transducers Journal and Magazine*, Vol. 162, Issue 1, January 2014, pp.1-4
  39. French PJ, Evans AGR. Piezoresistance in polysilicon. *Electron Lett.* 1984;20:999.
  40. Дружинін А.А., Мар'ямова І.І., Кубраков А.П., Павловський І.В. Тензорезистори для низьких температур на основі нитевидних кристалів кремнію. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі.* 2008, №4, с. 26-30.
  41. Lund E, Finstad T. Measurement of the temperature dependency of the piezoresistance coefficients in p-type silicon. *ASME Advances in Electronic Packaging.* 1999;26-1:215–218.
  42. Mandurah MM. PhD. Electrical Engineering, Stanford University; 1981. The physical and electrical properties of polycrystalline-silicon.
  43. Seto JYW. Piezoresistive properties of polycrystalline silicon. *J App Phys.* 1976;47:4780–4783.
  44. Erskine JC. Polycrystalline silicon-on-metal strain gauge transducers. *IEEE Trans Electron Devices.* 1983;30:796–801.
  45. Matsuda K, Kanda Y, Yamamura K, Suzuki K. Nonlinearity of piezoresistance effect in p- and n-type silicon. *Sens Actuators, A.* 1990;21:45–48.
  46. Горбачук М.Т.. Електротехнічні матеріали. Навчальний посібник. LAP LAMBERT Academic Publishing. 17 Meldrum Street, Beau Bassin 71504, Mauritius, 2017. ISBN: 978-620-2-05432-4, 110 с.

47. Seeger K. *Semiconductor Physics. An Introduction.* 7th edition. - Springer, 1999. — 534 p.
48. Smith C.S. Piezoresistance effect in germanium and silicon. - *Phys. Rev.* 1954, v. 94, 1, p. 42-49.
49. Tufte O.N., Stelzer E.L. Piezoresistive properties of silicon diffused layers. – *J. Appl. Phys.*, 1963, v. 34, 9, p. 313–318.
50. Горбачук М.Т. П'єзорезистивні ефекти в напівпровідниках та напівпровідникових тензодатчиках. - Збірник наукових праць *SWorld: Сучасні проблеми та шляхи їх вирішення в науці, транспорті і освіті* '2012. т.7, с. 30-33. Одеса 2012.
51. Barlian AA, Park WT, Mallon JR Jr, Rastegar AJ, Pruitt BL. Review: Semiconductor Piezoresistance for Microsystems. *Proc IEEE Inst Electr Electron Eng.* 2009;97(3):513-552. doi: 10.1109/JPROC.2009.2013612.

## ДОДАТКИ

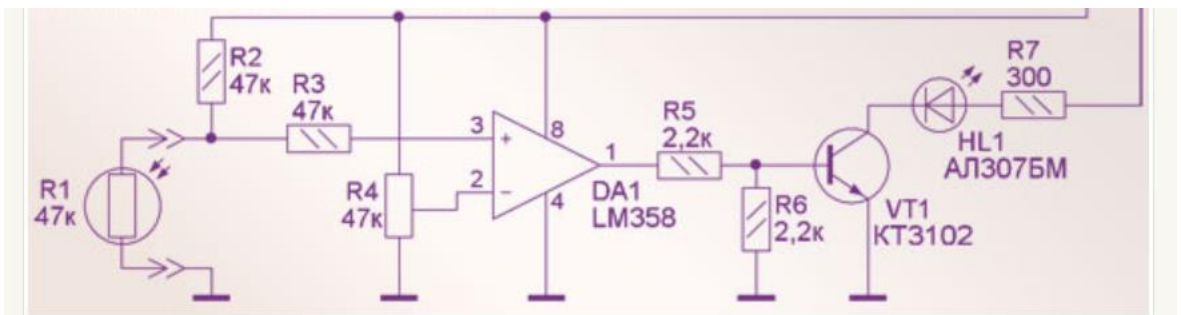
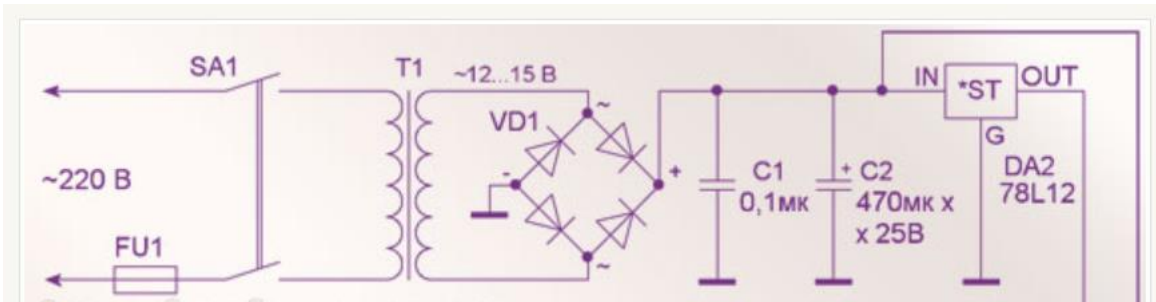
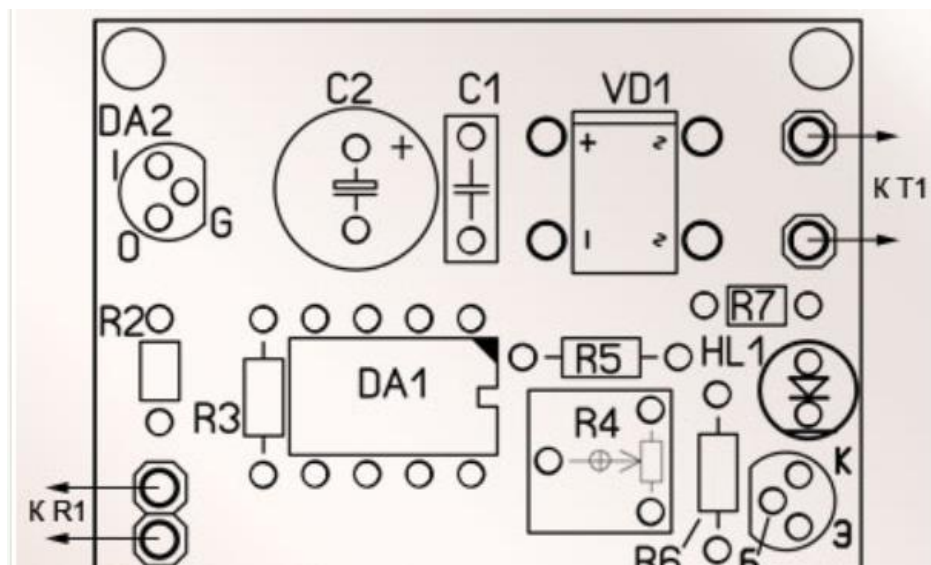
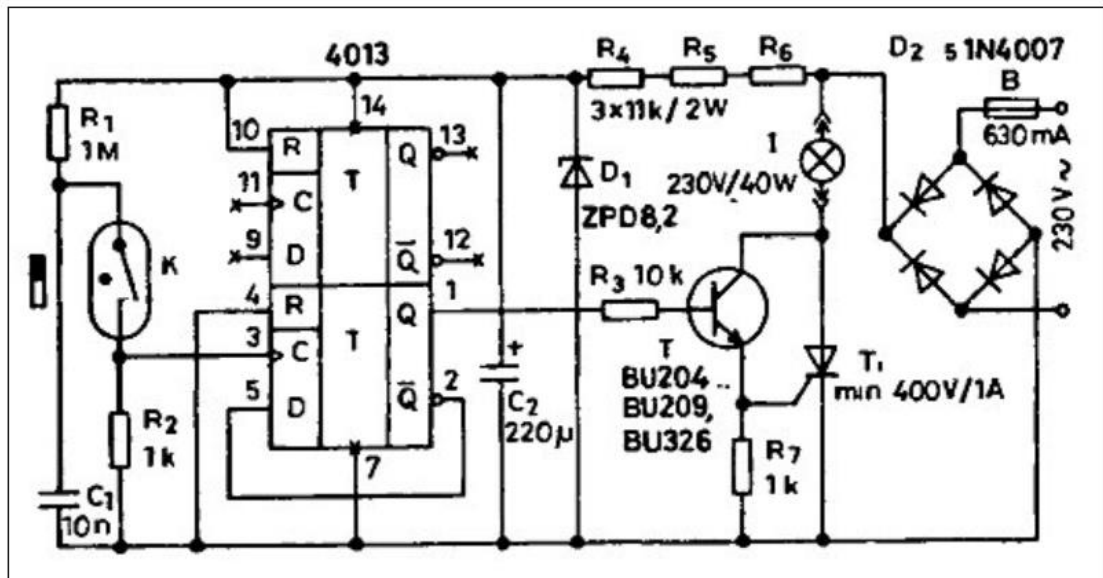


Схема системи автоматичного керування освітленням [15]

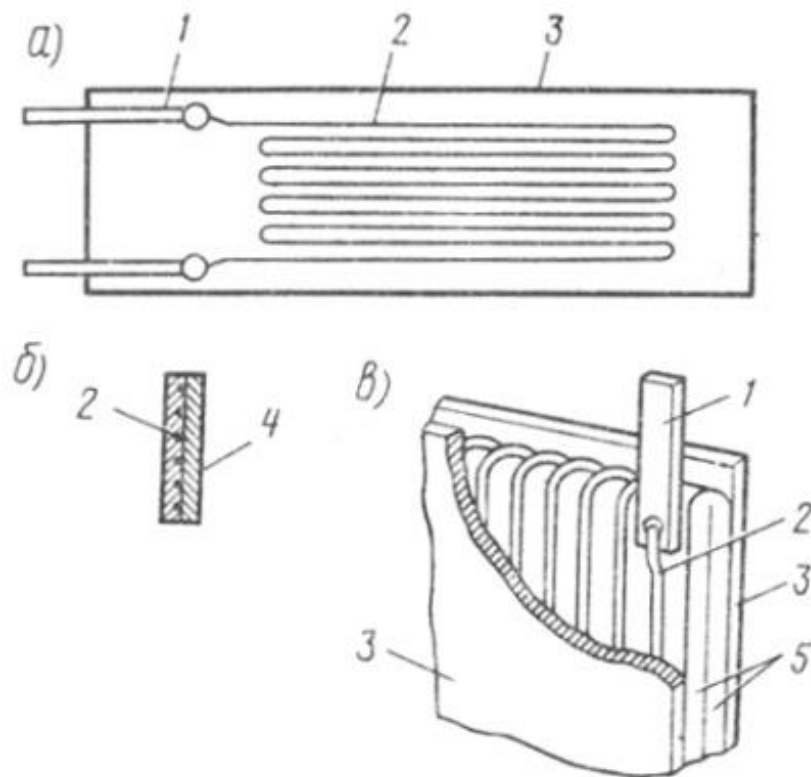


Друкована плата системи автоматичного освітлення, вид з боку елементів

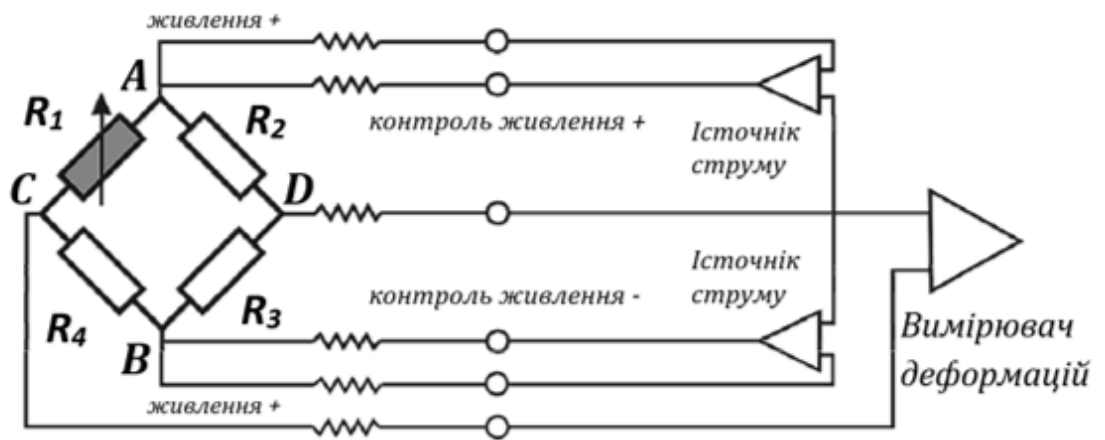




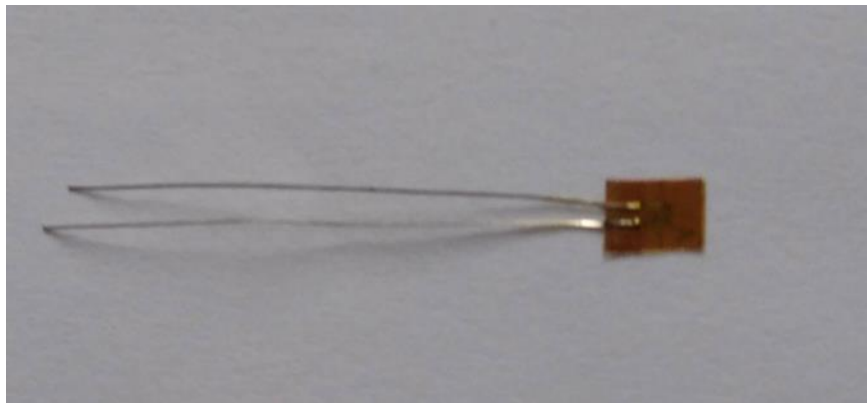
Приклад реалізації автоматичної системи управління світлом



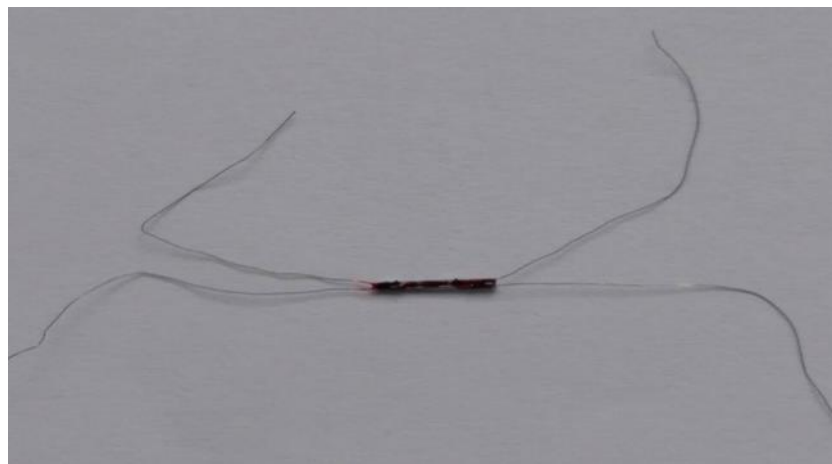
Дрітовий тензодатчик



*Мостова схема підключення тензорезисторів*



*Досліджувані металеві тензодатчики (два виводи) та удосконалені напівпровідникові*



*Напівпровідниковий тензодатчик (чотири виводи контакти)*