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

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

на тему Дослідження та розробка системи керування параметрами електростатичного мікродвигуна

Виконав: студент II курсу, групи 8.1763
спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка
(код і назва спеціальності)
освітньої програми Мікроелектронні інформаційні системи
(код і назва освітньої програми)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)

А..А. Щербань
(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
2024

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 *другий (магістерський)*
Спеціальність *153 «Мікро- та наносистемна техніка»*
(код і назва)
Освітня програма *Мікроелектронні інформаційні системи*
(код і назва)
Спеціалізація _____

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри *ЕІСПЗ*
Критська Т.В.
"____" _____20___року

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

Щербаню Артему Андрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проєкту) *Дослідження та розробка системи керування параметрами електростатичного мікродвигуна*
_____
керівник роботи *Світанько Микола Вікторович, к.ф.-м.н., доцент*,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від "*28*" *лютого 2024 року №* *361-с*

2 Строк подання студентом роботи *02 грудня 2024 року*

3 Вихідні дані до роботи *МЕМС,600 В, ± 12 В, Microcap, Proteus, Electronics Workbench*
_____

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)*1. Мікроелектромеханічні актюатори 2. Система керування параметрами електростатичного мікродвигуна 3. Техніко – економічне обґрунтування 4. Охорона праці та техногенна безпека при розробці системи*

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)*1. МЕМС електростатичні мікродвигуни 2. Структурна схема системи керування параметрами електростатичного мікродвигуна 3. Електро-*

механічна схема функціювання електростатичного мікродвигуна 4. MUMPS - топологія електростатичного мікродвигуна 5. Схема блоку оптичного налаштування електростатичного мікродвигуна 6. Моделювання роботи схем підключення світлодіода, фотодіода та блоку керування 7. Електрична схема блоку керування 8. Модель одноелектронного транзистора для силової частини мікродвигуна

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
I	*Світанько М.В., доцент*	*01.03.2024*	*01.03.2024*
II	*Світанько М.В., доцент*	*01.03.2024*	*01.03.2024*
III	*Світанько М.В., доцент*	*01.03.2024*	*01.03.2024*
IV	*Світанько М.В., доцент*	*01.03.2024*	*01.03.2024*

7 Дата видачі завдання *01 березня 2024 року*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	*Літературний огляд*	*21.10.2024*	
2	*Розрахункова частина*	*20.11.2024*	
3	*Техніко-економічне обґрунтування розробки*	*20.11.2024*	
4	*Розробка заходів із охорони праці та техногенної безпеки*	*20.11.2024*	
5	*Розробка графічної частини роботи*	*24.11.2024*	
6	*Оформлення пояснювальної записки*	*01.12.2024*	
7	*Нормоконтроль*	*02.12.2024*	
8	*Попередній захист роботи*	*05.12.2024*	

Студент _____ *Щербань А.А.*
(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 73 сторінок, 21 рисунок, 17 таблиць, 44 джерел літератури.

Об’єкт дослідження – електростатичні двигуни.

Мета роботи – дослідження та розробка системи керування параметрами електростатичного мікродвигуна.

Завдання роботи – розробити схему функціювання електростатичного мікродвигуна; провести моделювання струмових та напругових характеристик електростатичного мікродвигуна за допомогою САПР електронних схем; розглянути можливість удосконалення шляхом подальшого зменшення геометричних розмірів елементів із урахуванням квантово-механічних обмежень.

Методика досліджень – моделювання пристрою за допомогою програмних забезпечень Proteus, Microcap 5.0, Electronics Workbench.

Короткий виклад результатів досліджень – розроблено систему керування параметрами електростатичного мікродвигуна, проведено моделюванняроботи одноелектронного польового транзистора у складі розроблюваної системи. Результати впроваджень – макет електронного приладу пройшов випробовування на кафедрі ЕІСПЗ.

Прогнозні пропозиції – запропоновано подальше удосконалення шляхом використання використання у якості силових елементів мікродвигунів одноелектронних польових транзисторів.

ЕЛЕКТРОСТАТИЧНИЙ МІКРОДВИГУН, ВИСОКОВОЛЬТНІ ПОЛЬОВІ ТРАНЗИСТОРИ, ОДНОЕЛЕКТРОННИЙ ТРАНЗИСТОР, PROTEUS.

Дипломну роботу виконано на кафедрі електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення з 01.03.2024 р. по 02.12.2024 р.

ЗМІСТ

Стор.

Вступ ……. 6

1. Мікроелектромеханічні актюатори ……... 7

1.1 Електростатичні актюатори ……. 8

1.1.1 Принцип дії електростатичних актюаторів…….. 8

1.1.2 Роторні електростатичні безконтактні мікродвигуни …… 11

1.2 Електростатичні діелектричні мікродвигуни ……. 14

1.3 Принципи квантової механіки у наноелектроніці ……. 16

1.3.8 Одноелектронні пристрої, як база подальшого розвитку наноелектроніки ……. 19

2. Система керування параметрами електростатичного мікродвигуна …… 23

2.1 Структурна схема системи керування параметрами електростатичного мікродвигуна ……... 23

2.2 Електромеханічна схема функціювання електростатичного двигуна …… 24

2.3 Блок оптичного налаштування електростатичного мікродвигуна ….. 27

2.4 Блок обробки та керування сигналами …… 34

2.5 Модель однолектронного транзистора для силової частини мікродвигунів …….. 41

3. Техніко - економічне обґрунтування виготовлення електронних схем системи керування параметрами електростатичного мікродвигуна ……. 46

3.1 Обґрунтування вибору технології виготовлення електронних схем системи керування параметрами електростатичного мікродвигуна …….. 46

3.2 Розрахунок витрат на виготовлення електронних схем системи керування параметрами електростатичного мікродвигуна ……..... 50

4 Охорона праці та техногенна безпека при розробці електричних схем системи керування параметрами електростатичного мікродвигуна …….. 52
4.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів…….. 52
4.2 Заходи зі зменшення впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів…… 53
4.3 Виробнича санітарія……... 54
4.4 Електробезпека……... 57
4.5 Пожежна та техногенна безпека об’єкту …….. 58
4.6 Розрахунок місцевого освітлення робочого місця при монтажі елементів на плату…… 59
Висновки та рекомендації……... 62
Перелік посилань……..…… 64
Додаток 1…… 69

Вступ

На початку 2000-х років, згідно закону Мура [1,2], стало зрозумілим, що подальший розвиток мікроелектроніки повинен, або вичерпати свої можливості, або вийти на принципово новий етап технологічного розвитку. Таким етапом став розвиток технології та схемотехніки пристроїв наноелектроніки. Особливо активно в період з початку 2000-х років і дотепер почали розвиватись пристрої, які характеризуються наявністю мініатюрних (мікронних) механічних деталей у по'єднанні із мікроелектронними компонентами. Прикладом таких мікроелекромеханічних систем (МЕМС) можуть бути мікросопічні гідравлічні та пневматичні клапани, струминні сопла принтера, пружини для підвіски головки вінчестера), мікроінструменти мікромашини (мотори, насоси, турбіни з розмірами, що не перевищують декількох міліметрів), мікророботи [3-6].

Основними елементами у більшості цих сестем є виконавчі механізми, які працюють на принципах механіки, оптики, акустики, тепломеханіки. Такі елементи обо'єднуються терміном актюатори (акселерометри, гіроскопи, магнітометри, мікродвигуни, мікрозатискачи, мікродзеркала) [3-6].

Але, зменшення розмірів електронних компонент від мікрометрів до нанометрів неменуче призведе до зменшення розмірів усієї МЕМС. Це в свою чергу призведе до обмеженості використання при розробці таких систем законів класичної фізикики та електромеханіки [7-14].

Наразі існує досить мало моделей МЕМС, які б поєднували в собі пристрої наноелектроніки і механіки на квантово-механічному рівні.

Тому актуальним є питання по розробці наноелектронних мікромеханічних пристроїв, у тому числі актюаторів.

1. Мікроелектромеханічні актюатори

Слово «актюатор» походить від англійського терміна actuator

Елемент будь-якого пристрою, який може «діяти». Як правило, це можуть бути як елементарні елементи иак і елементарні механічні дії, наприклад, лінійне переміщення або обертання. Якщо слово «актюатор» (актуатор) вживається у значенні механічного виконавчого пристрою, то мається на увазі, що це елементарний пристрій, що переміщує (обертає) певний об’єкт, на-приклад чутливу масу МЕМС-гіроскопа [3-12].

Двигун (мотор, привід) це виконавчий пристрій в широкому сенсі цього слова, зазвичай містить в собі кілька взаємодіючих ак-тюаторів, наприклад конденсаторну «гребінку» або ряд п’єзоелементів, а також інші механічні елементи (редуктори, муфти, важелі, тощо) і додаткові блоки [3-12].

Мікроактюатори мають розміри від декількох квадратних мікрометрів до одного квадратного сантиметра. Діапазон застосування мікроактюаторів надзвичайно широкий, і він постійно зростає. Їх використовують в робототехніці, керувальних пристроях, космічній галузі, біомедицині, у вимірювальних приладах.

Залежно від способу активації виділяють такі типи мікроелектромеханічних актюаторів:

електростатичні актюатори;

магнітні актюатори;

п’єзоелектричні актюатори;

теплові (біметалеві) актюатори

Найпоширенішими методами перетворення сигналу в меха-нічний рух вважаються п’єзоелектричний та електростатичний, хоча й інші методи мають важливе значення. Електростатична акти-вація застосовується

приблизно в одній третині актюаторів. Але, цей вид активації має недоліки: це знос і злипання. До переваг над іншими типами актюаторів, наприклад, над магнітними електростатичні мають переаги - на мікроскопічному рівні за одна-кових розмірів вихідний сигнал електростатичного актюатора на відносну одиницю розмірності більше, ніж при використанні магнітних методів [3-12].

1.1. Електростатичні актюатори

1.1.1 Принцип дії електростатичних актюаторів

Електростатичні актюатори працюють за рахунок електростатичного притягання і відштовхування, яке виникає між обкладками конденсатора.Узагальному виглядіелектростатичний актюатор містить рухомий і нерухомий електроди (рис. 1.1). Рухомим електродом є консольні балки і мембрани [3-12].

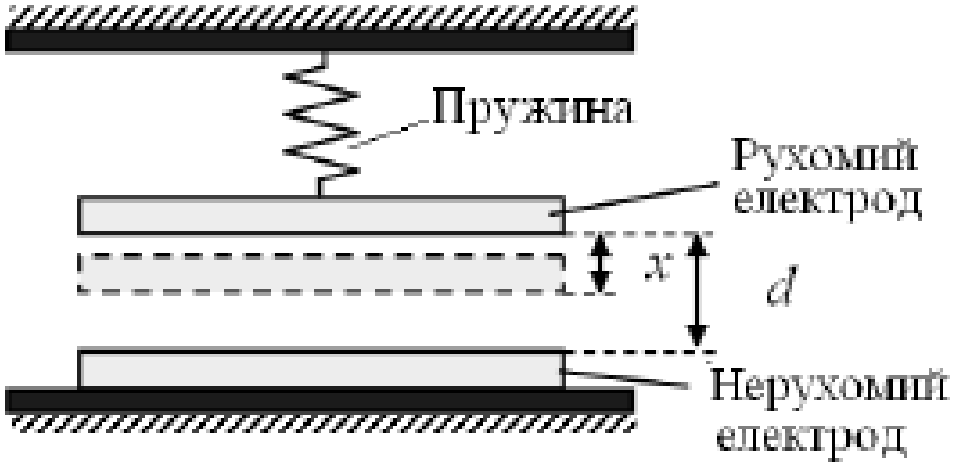


Рисунок 1.1.Електростатичний актюатор

Принцип дії цих актюаторів ґрунтується на виникненні елек-тростатичної сили між рухомим і нерухомим електродами. Із поданням на обкладки відхильної напруги на рухомий електрод починає діяти електростатична сила, яка визначається виразом [12-14]:

$$F_{\text{ел}} = \frac{C}{d}\int_0^U U\,dU = \frac{CU^2}{2d}, \qquad (1.1)$$

де d – відстань між рухомим і нерухомим електродами; C – ємність, створювана електродами.

Під час подання на електроди відхильної напруги U між ними виникає електростатична взаємодія і рухомий електрод притягується до нерухомого. У міру відхилення рухомого електрода від початкового положення відстань між електродами d буде зменшуватися, що зумовлює збільшення електростатичної сили Fел. Отже, у розрахунках електростатичної сили, що діє на рухомий електрод відносно нерухомого, необхідно враховувати вже здійснене відхилення x [1-14]:

$$F_{\text{ел}} = \frac{CU^2}{2(d-x)}. \qquad (1.2)$$

Сила, що створюється пружиною (див. рис. 1.1), компенсує електростатичну силу, зупиняючи переміщення рухомого електрода.

Існує кілька варіантів реалізації електростатичних актюаторів на основі плоскопаралельних конденсаторів. Приклад використання електростатичного актюатора для обертання мікродзеркала показано на рис. 1.2 [1-14].

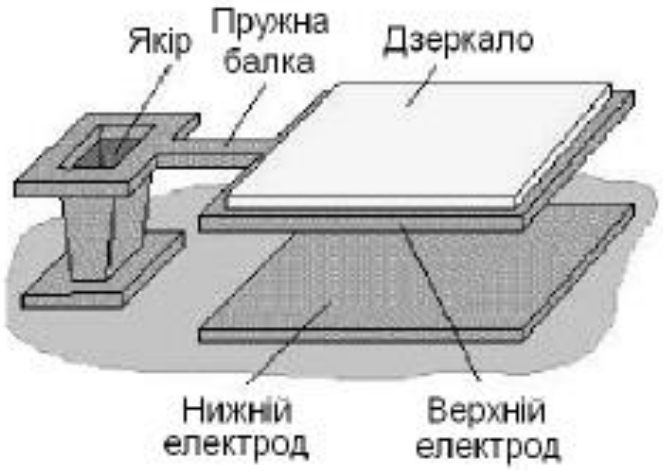


Рисунок 1.2 Електростатичний актюатор для обертання мікродзеркала

Для генерації в такому пристрої значних сил, які будуть здійснювати корисну роботу, необхідно, щоб зі зміною відстані сильно змінювалися ємності. Саме так працюють електростатичні мікродвигуни, що отримали назву «гребінка». Електростатичний гребінчастий мікродвигун являє собою

структуру, показану на рис. 1.3, *а*, і складається з двох обкладок складної форми. Зубці кожної з них поміщаються у виїмки іншої (рис. 1.3, *б*) [12].

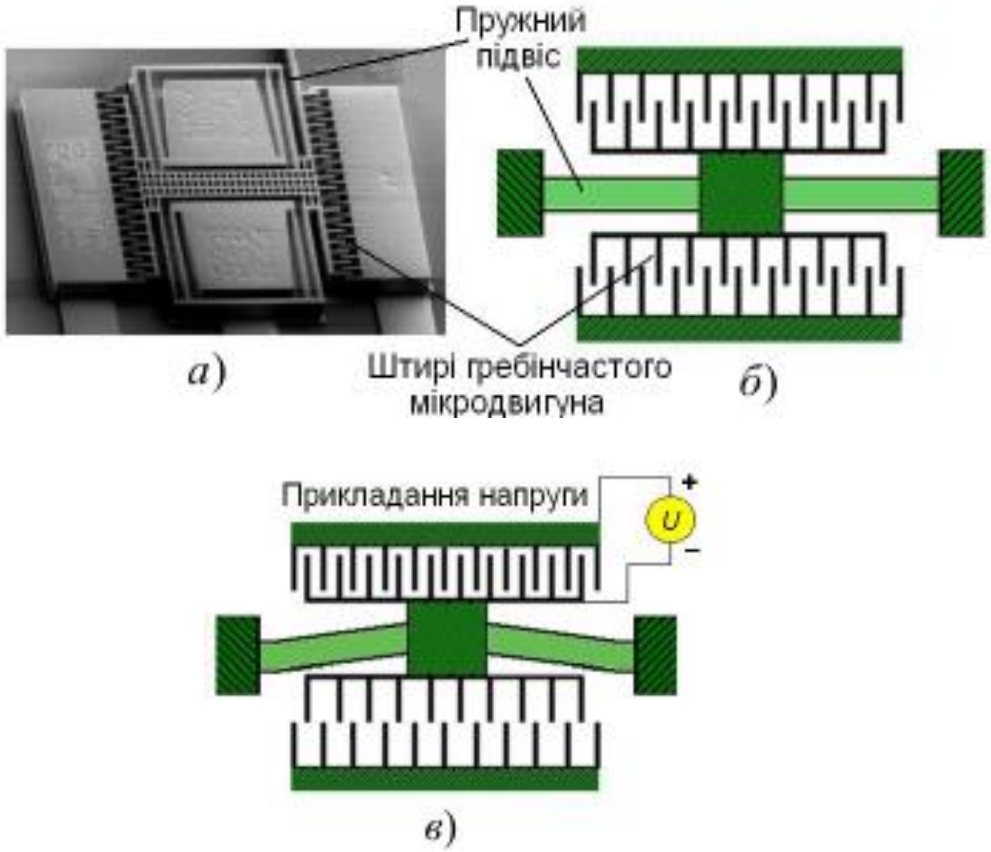


Рисунок 1.3 Електростатичний гребінчастий мікродвигун

У разі прикладанні до обкладок напруги *U* одного знака зубці починають виходити з виїмок, відсуваючи обкладки одну від одної, а прикладання напруги різних знаків навпаки наближає обкладки одна до одної (рис. 1.3 *в*). Крім того форма «гребінця» позбавляє такий актюатор від можливості зміщення у напрямку, пер-пендикулярному до зубців.ЄмнІсть збільшується пропорційно кількості штирів тому для генерації великих сил, потрібна велика кількість штирів. Саме гребінчасті мікроактюатори приводять у вібраційний рух чутливі маси осциляторів TF-гіроскопівів [12].

Крім планарної реалізації гребінчастих електростатичних актюаторів, можливі варіанти обертових гребінчастих мікродвигунів. Варіант

електростатичного гребінчастого мікродвигуна, пальці гребінок ротора якого розташовуються над пальцями статора, пока-зано на рисунку 1.4 [12].

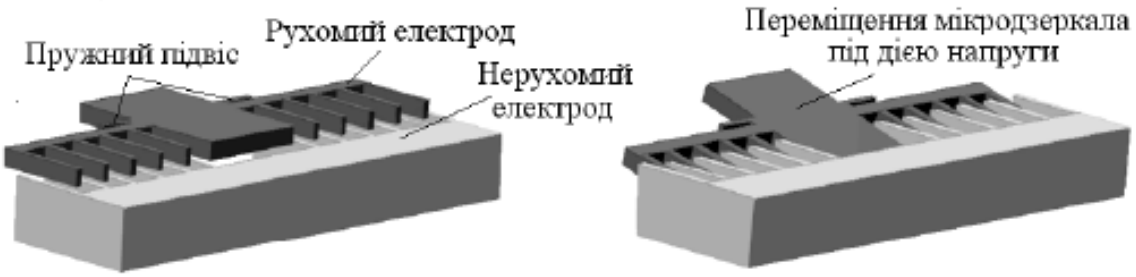


Рисунок 1.4 Варіант електростатичного гребінчастого мікродвигуна

Із прикладанням напруги двигун завдяки пружному підвісу повертає мікродзеркало на кут, пропорційний поданій напрузі.

1.2 Роторні електростатичні безконтактні мікродвигуни

Основна відмінність електростатичних безконтактних (повітряних) мікродвигунів від класичних електростатичних макродвигунів малий зазор між статором і ротором, який дорівнює 1…2.

мкм (у класичних електростатичних макромашинах він дорівнює 1…2мм). Малий зазор у міжелектродному просторі МЕМС-двигунів визначає відносно високу густину електричної енергії, що «накачується» у зразок і, отже, високу ефективність двигуна. Електростатичні безконтактні двигуни обертального руху (їх ще називають електростатичними двигунами кочення) у першому наближенні можна трактувати як електростатичні гребінчасті мікродвигуни, у яких ротор і статор згорнуті у кругову конструкцію. Проте на відміну від гребінчастого мікродвигуна у роторному двигуні (рис. 1.5) напруга циклічно прикладається до різних полюсів статора, унаслідок чого ротор здійснює обертальні рухи, тобто електростати класу крокових двигунів [1-14].



Рисунок 1.5 Роторний мікродвигун

В електростатичних безконтактних двигунах ротор не торкається поверхні статора, а його силове зчеплення зі статором здійснюється завдяки концентрації електричного поля над зубцями ро-тора і статора. При цьому не зношуються поверхні ротора і статора, що можна вважати перевагами двигунів цього типу [12].

Основний недолік - це низька точність позиціонування, яка визначається розмірами зубців ротора і статора. Високої точності позиціонування можна досягти тільки у разі надзвичайно малих розмірів зубців і дуже високої точності їх виготовлення. Це значно ускладнює технологію виготовлення двигуна, яка передбачає дорогі операції: виготовлення розмірів деталей з точністю не нижче 0,1 мкм; глибоке прецизійне хімічне трав-лення та інші, що істотно збільшує вартість виробництва. Планарний електростатичний мікродвигун, із (фото із сильним збільшенням, показано на рис. 1.5) Розміри електростатичних мікродвигунів не перевищують у діаметрі волосину людини [12].

Мікродвигуни виготовляють з використанням MUMPs-технології (рис. 1.6) шляхом осадження основи і жертовного шару, формування вихідного рисунка, витравлювання маски та жертовних шарів і звільнення

ротора. MUMPs – (Multi User MEMS Process) тришаровий полікремнієвий процес стандартної мікротехнології поверхневої обробки. Дана мікротехнологія є комерційного призначення [12].

Недоліком даної технології є неможливість виготовлення елементів МЕМС із іншого матеріалу, крім як із полікремнія.

Перевагою даної технології є можливість створення в одному процесі великої кількості різних за функціональним призначенням елементів МЕМС виготовленими з незначними змінами, а також можливість інегрального створення мікродавачів і мікроактюаторних елементів на одній підкладці з елементами обробки, передачі та збереження інформації. Окрім цього, планарні багаторівневі мікроактюаторні елементи мають більшу функціональність у порівнянні з конструкціями таких же розмірів, створених з використанням об’ємної мікрообробки [12].

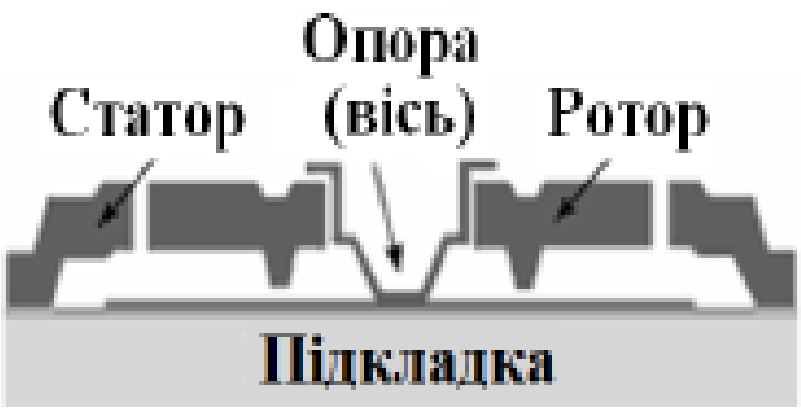


Рисунок 1.6 Приклад використання MUMPs-технології в прцесі виготовлення електростатичного мікродвигуна [12]

Мікродвигуни можуть бути монолітно інтегровані на одному кремнієвому кристалі з необхідними електронними компонентами схеми керування приводу, що містять генератори, подільники частоти, лічильники і транзистори.

1.3 Електростатичні діелектричні мікродвигуни

В електростатичних діелектричних мікродвигунах рух створюється шляхом електростатичного накату (розпластування з при-липанням) тонкої металевої стрічки ротора на поверхню сегнетоелектричної плівки статора. Основним елементом такого двигуна є пелюсток-петля з гнучких і тонких провідних стрічок або метале-вих плівок. Товщина цих плівок повинна бути невеликою, така, щоб забезпечувався їх вигин під дією електричного поля в момент електростатичного накату на поверхню діелектрика (сегнетоелект-рика) ротора [12-14].

Пелюсток ротора, що переміщається у просторі під дією імпульсу електричного поля, згинається, відбувається його прилипання та натяг на поверхню діелектрика статора. Через натяг ротор переміщується відносно статора. Після припинення дії імпульсу електричного поля пелюсток повертається у вихідне положення.

Конструктивну схему сегнетоелектричного мікродвигуна показано рис. 1.7 [12].

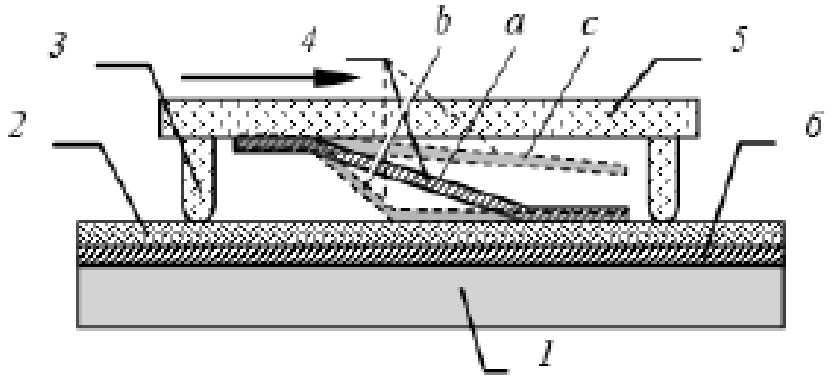


Рисунок 1.7 Схема сегнетоелектричного мікродвигуна

Статор Статор мікродвигуна являє собою кремнієву підкладку 1, на поверхню якої нанесений шар металу 6 і сегнетоелектрична плівка 2. Ротор 4 у вигляді металевої гнучкої пластини (пелюстка) переміщається відносно статора. мікродвигуна являє собою кремнієву підкладку *1*, на поверхню якої

нанесений шар металу *6* і сегнетоелектрична плівка *2*. Ротор *4* у вигляді металевої гнучкої пластини (пелюстка) переміщається відносно статора. Двигун працює в повітряному се-редовищі за нормального атмосферного тиску. Механічний контакт здійснюється за напрямними *3*. При подачі імпульсу напруги між статором і ротором під дією електростатичних сил відбувається електростатичний накат гнучкого пелюстка ротора *4* (штрихпунктирне зображення пелюстка на рис. 1.7) на поверхню сегнетоелектрика, в результаті чого пелюстка згинається і передає імпульс руху скляній платформі *5*.

Накат пелюстка починається з моменту його торкання поверхні сегнетоелектрика - "захоплення" пелюстка (положення *a* на рис. 1.7) і закінчується "електронним приклеюванням" пелюстка до поверхні (положення *b* на рис. 1.7) [12].

Після припинення дії імпульсу напруги в розпластаній частині пелюстка виникає протидія пружних сил локально деформованих ділянок пелюстка електростатичним, зумовленим залишко-вими зарядами в діелектрику. Пелюсток *4* відлипає від поверхні сегнетоелектрика і під дією пружних сил повертається у вихідне положення (положення *c* на рис. 1.7), при цьому платформа за інерцією просувається ще на деяку відстань. Із поданням другого імпульсу напруги процес поновлюється.

Планарні ємнісні мікродвигуни даного типу можуть забезпе-чити шлях переміщення 10 ... 40 мм; крок переміщення ротора 0,01 10 мкм за частоти тактів керувальних імпульсів прямокутної фо-рми 100 ... 10000 Гц і напруги до 100 В. Питома енергоємність планарних мікродвигунів досягає 1 Дж/м^3, що значно перевищує енергоємність індуктивних і п’єзоелектричних аналогів [12-14].

1.3 Принципи квантової механіки у наноелектроніці

Нанотехніка і наноелектроніка мають справу з об'єктами, характерні розміри яких відносяться до нанометрового діапазону. Властивості таких об'єктів (до них відносяться, зокрема атоми, молекули і інші мікрочастинки) описуються квантовою механікою. Процеси, що відбуваються в мікросвіті, майже повністю лежать за межами чуттєвого сприйняття, і тому поняття квантової теорії позбавлені наочності, властивої класичній фізиці [15-18].

В основі квантової механіки лежить уявлення про те, що поведінка мікрооб'єктів (мікрочастинок) описується функцією стану – хвильово ю функцією.

Хвильова функція залежить від просторових координат q_i і від часу. Квадрат модуля хвильової функції $|\psi q_i(t)|^2$ пропорційний ймовірності виявлення відповідних значень q_i в момент часу t при вимірюванні,тобто при взаємодії мікрооб'єктів з макроскопічними приладом. Зміна в часі стану об'єкта можна визначити, вирішуючи диференціальне хвильове рівняння Шредінгера для ψ -функції або використовуючи операторний метод, запропонований В. Гейзенбергом [3]. Ідею дуалізму, тобто поєднання в одному квантовому об'єкті корпускулярних і хвильових властивостей, вперше висловив Луї де Бройль, який припустив, що частинці з повною енергією Е (що включає і релятивістський член - енергію спокою m_0c^2) і імпульсом може бути поставлена у відповідність хвиля , довжина якої λ і частота ω пов'язані з енергією і імпульсом співвідношеннями [15-18]:

$$E = \hbar\omega, \vec{p} = \hbar\vec{k}, \lambda = h/p, \qquad (1.1)$$

де $\hbar = h/2\pi$, h - стала Планка, $\vec{k}$ – хвильовий вектор, рівний за модулем $2\pi/\lambda$.

З квантової теорії випливає ряд принципів, що мають основоположне значення для наноелектроніки. Перший з них - квантування. Його суть полягає в тому, що деякі фізичні величини, що описують мікрооб'єкт, в певних умовах приймають тільки дискретні значення. Так, наприклад, квантується енергія електрона при його русі в області простору, розмір якої можна порівняти з довжиною хвилі де Бройля для цієї частки. Квантування енергії електрона означає, що вона може мати тільки деякий дискретний набір значень. Кожному з цих значень зіставляють енергетичний рівень, який відповідає цьому стаціонарному стану. Перебуваючи в стаціонарному стані, електрон не випромінює фотони. Випромінювання відбувається тільки при переході з одного стану в інший [15-18].

Фундаментальним законом квантової механіки є принцип невизначеності Гейзенберга, що полягає в тому, що існують пари сполучених величин, що характеризують параметри частинок, які не можуть бути визначені з довільною точністю одночасно. Наприклад, не можна одночасно виміряти положення частинки і її імпульс, проекції моменту імпульсу на дві взаємо перпендикулярних осі, а також енергію частинки в збудженому стані і час життя в цьому стані. І справа, звичайно, не в якості вимірювальної апаратури, а в принциповій неможливості таких операцій. Математично принцип невизначеності можна виразити у вигляді нерівностей[15-18]:

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar, \qquad \Delta E \Delta t \geq \hbar \tag{1.2}$$

де Δx, Δp, ΔE, Δt - невизначеність, тобто інтервал значень координати, проекції імпульсу, енергії і часу.

Ще один фундаментальний принцип квантової механіки, а саме принцип тотожності однакових мікрочастинок, в поєднанні з наявністю у них власного механічного моменту (спіна), призводить до важливих статистичних закономірностей квантової фізики. Це перш за все принцип заборони Паулі, який полягає в тому, що взаємодіючі між собою однакові частки з напівцілим спіном - ферміони (до них відносяться електрони, протони, нейтрони і ін.) - не можуть перебувати в абсолютно однакових

квантових станах. Наприклад, в атомі може існувати тільки два електрона з однаковою енергією і одним і тим же значенням моменту імпульсу і його проекції на який-небудь напрямок. Цих електронів два, оскільки вони можуть мати тільки дві різні проекції спіна [3]. Таким чином, відповідно до принципів невизначеності Гейзенберга і заборони Паулі в осередку фазового простору об'ємом $\Delta x \Delta p_x \; \Delta y \Delta p_y \; \Delta z \Delta p_z = \hbar^3$, де $\Delta x \Delta y \Delta z$ -об'єм у фізичному просторі, а $\Delta p_x \; \Delta p_y \; \Delta p_z$ - об'єм в просторі імпульсів, також може знаходитися не більше двох електронів з різними спінами.

Для розгляду руху частинки в потенційному полі, не що залежить від часу, використовується стаціонарне рівняння Шредінгера, яке має вигляд [15-18]:

$$\Delta\psi + \frac{2m}{\hbar^2}[E - U(x,y,z)]\psi = 0, \qquad (1.3)$$

де m і E - маса і повна енергія частинки, U (x) - потенційна енергія, Δ - оператор Лапласа [15-18]:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

Диференціальне рівняння (1.3) записано щодо просторової частини хвильової функції ψ (x, y, z). Часова її частина являє в стаціонарному випадку гармонійну функцію, квадрат модуля якої дорівнює одиниці [15-18]:

$$e^{-\frac{i}{\hbar}Et} = e^{-i\omega t}, \qquad (1.4)$$

На хвильову функцію накладаються очевидні з точки зору фізики умови: вона повинна бути однозначною і безперервною разом зі своєю першою похідною.

Знаючи хвильову функцію, можна знайти не тільки ймовірність знаходження частинки в даній точці простору, а й середні значення величин, що залежать від координат [15-18].

1.4 Одноелектронні пристрої, як база подальшого розвитку наноелектроніки

Важливим завданням квантової механіки, що має пряме відношення до наноелектроніки є проходження частинки через потенційний бар'єр, або тунельний ефект. При зменшенні лінійних розмірів інформаційних електронних приладів і пристроїв виникає проблема маніпулювання і визначення стану окремих носіїв заряду. І перш за все електронів. Цей напрямок розвитку електроніки отримав назву «твердотільна одноелектроніка». Одноелектронні пристрої являють собою перспективні наноелектронні прилади, засновані на ефекті дискретного тунелювання окремих електронів і забезпечують ультранизькі рівні споживаної енергії при ультранизьких робочих напругах [19-20].

Тунельний перехід у своїй найпростішій формі може бути представлений у вигляді двох металічних електродів розділених тонким шаром діелектрика. У випадку надпровідних металічних контактів, тунельний струм буде обумовлений тунелюванням куперівських пар. А у випадку нормальних металічних контактів, тунельний струм буде обумовлено одиничними електронами.

Згідно із законами класичної електродинаміки, ніякого струму не може бути через ізолюючий бар'єр. Навпаки, згідно з квантовою механікою, існує відмінна від нуля ймовірність проходження квантової частинки через потенціальний бар'єр (див. тунелювання). Коли до двох металічних контактів, розділених тонким шаром діалектрика, прикладається напруга, то починається і протікання струму. В першому порядку наближення тунельний струм пропорційний до прикладеної напруги. Іншими словами, тунельний перехід поводить себе, як тривіальний резистор, з постійним значенням опору. (див. закон Ома). Цей опір експоненційно залежить від товщини

потенціального бар'єру, котра сягає декількох нанометрів. Очевидно, що структура із двох металічних електродів, розділених діелектриком, також має і ємність. Тому тунельний перехід веде себе подібно до конденсатора.

Враховуючи дискретність електричного заряду, струм через тунельний перехід являє собою серію подій, в яких один електрон проникає через бар'єр шляхом тунелювання (ефектами двохелектронного тунелювання тут нехтується). Тому конденсатор тунельного переходу заряджається одиночними тунельними електронами, викликаючи появу напруги на металічних контактах $U=e/C$ де e - елементарний заряд електрона $1.6x10^{-19}$ Кл, та C - ємність тунельного переходу. Оскільки ємність тунельного переходу мала, тому навіть при тунелюванні одного електрона напруга на контактах буде досить значною. Це викликає зменшення електричного струму, обумовленого зовнішньою малою напругою, прикладеною до електродів. Збільшення опору тунельного переходу в області нульових струмів і називається кулонівською блокадою [19-20].

У випадку кулонівської блокади необхідно забезпечити достатньо низьку температуру, щоб отримати значно більше значення зарядової енергії (енергія, що необхідна для одноелектронного заряду тунельної ємності) по відношенню до термальної. Для вищевказаної ємності 1 фемтофарада (10^{-15} Ф), Це означає, що температура повинна бути порядку 1 кельвіна.

Щоб зробити тунельний перехід у вигляді пластинчатого конденсатора з ємністю порядку 1 фемтофарада, використовуючи оксидний шар з відносною проникністю 10 та товщиною один нанометр, необхідно створити електроди розмірами 100x100 нанометрів [19-20].

Електронні прилади на основі одноелектронного тунелювання складаються з однієї або декількох квантових точок, з'єднаних тунельними переходами як між собою, так і з підвідними електродами. Це транзистори і функціональні елементи, що дозволяють будувати більш складні одноелектронні системи обробки інформації [19-20].

Одноелектронний транзистор – транзистор, в основі якого лежить можливість отримання помітних значень змін струму маніпуляцією окремих електронів при проходженні їх через тунельний перехід [19-20].

Тунельний перехід представляє собою перехід електронів через потенціальний бар'єр у випадку, коли кінетична енергія електронів менша за потенціальну енергію бар'єру . Контакти матеріалів, в яких спостерігається тунелювання, називаються тунельними контактами. На рис 1.8 приведено схематичне зображення одноелектронного транзистора. Аналогічно польовому транзистору, одноелектронний транзистор має три електроди:витік, стік, затвор [19-20].

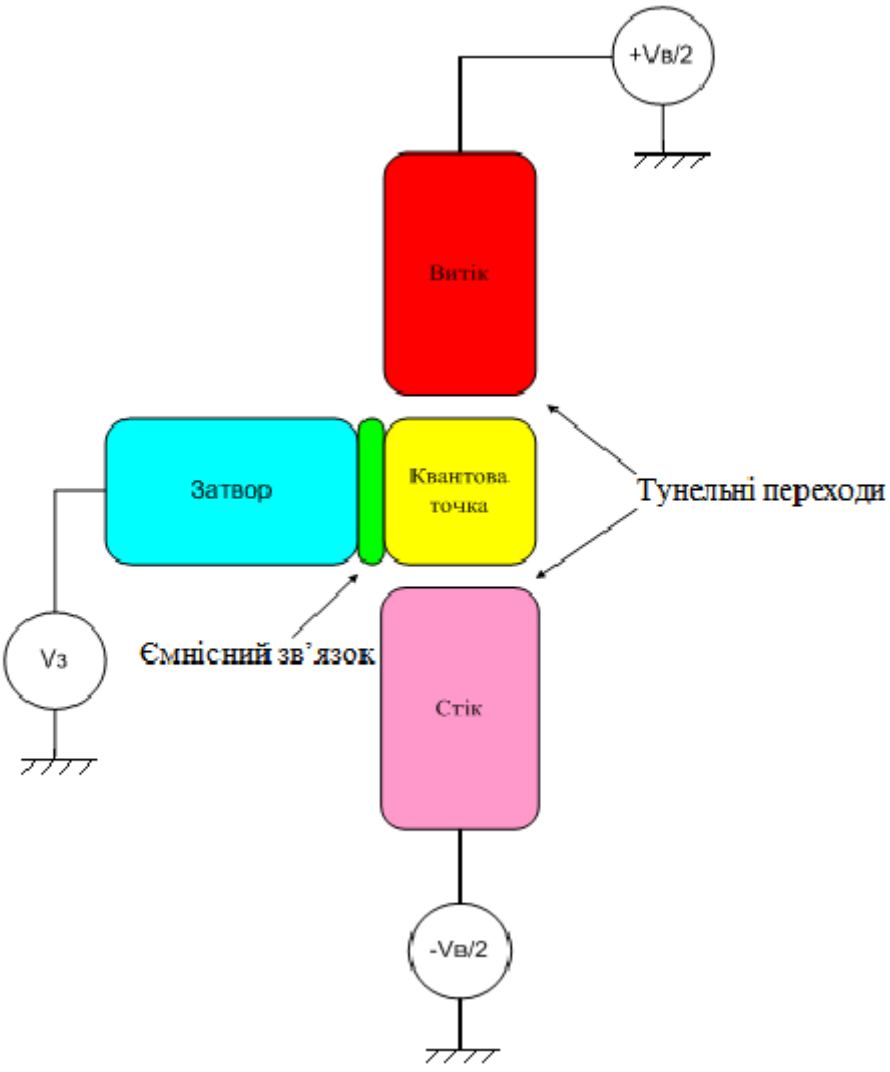


Рисунок 1.8 – Схема одноелектронного транзистора[19-20]

Отже, за матеріалами розділу робимо наступні висновки:

1) серед багатьох прикладів розробок електростатичних мікродвигунів дуже мало саме електричних схем керування та контролю основних параметрів – напруги, струмів, механічних складових;

2) також, не так багато інформації щодо моделей автоматизованого керування такими пристроями;

3) квантово-механічні компоненти наноелектроніки потребують подальшого аналізу з питань інтеграції одноелектронних притроїв до складу МЕМС.

Тому, метою дипломної роботи є дослідження та розробка системи керування параметрами електростатичного мікродвигуна.

Для досягнення мети у роботі потрібно виконати такі завдавння:

1) на підставі аналізу існуючих систем обрати ефективну схему функціювання електростатичного мікродвигуна;

2) розробити структурну схему пристрою;

3) провести моделювання струмових та напругових характеристик електростатичного мікродвигуна за допомогою САПР електронних схем;

4) розглянути можливість удосконалення шляхом подальшого зменшення геометричних розмірів елементів із урахуванням квантово-механічних обмежень;

5) провести техніко-економічний розрахунок системи, що розробляється;

4) розробити заходи із норм дотримання умов безпеки праці та техногенної безпеки.

2. Система керування параметрами електростатичного мікродвигуна

2.1 Структурна схема системи керування параметрами електростатичного мікродвигуна

У якості загальної структурної схеми була обрана схема, представлена на рисунку 2.1.

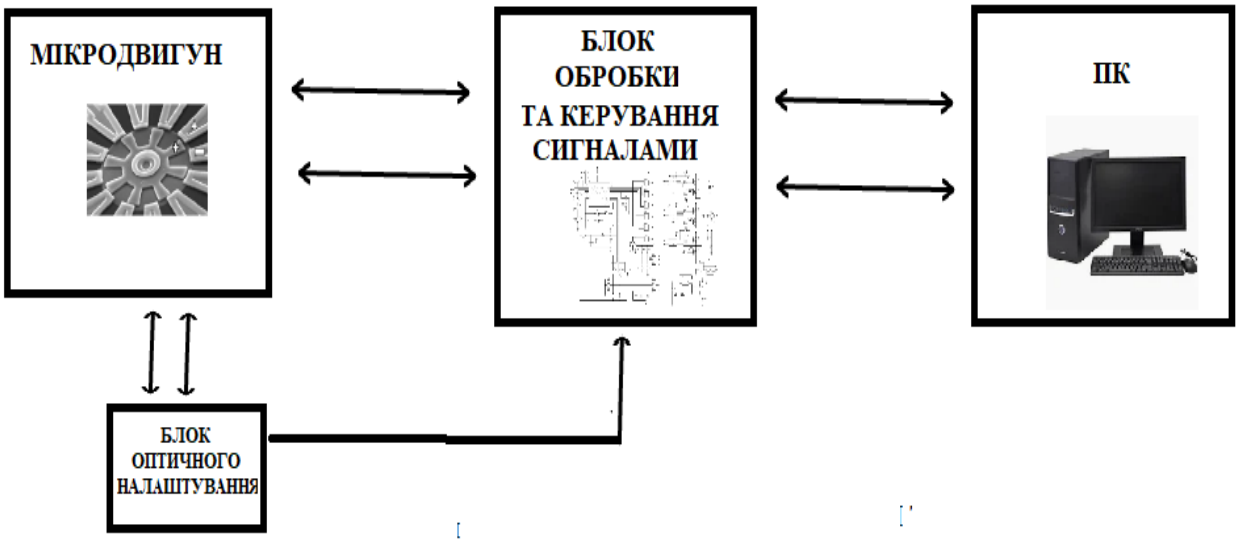


Рисунок 2.1 – Структурна схема системи керування параметрами електростатичного мікродвигуна

Структурна схема включає безпосередньо електростатичний мікродвигун, блок обробки та керування сигналами, блок оптичного налаштування сигналами, блок оптичного налаштування мікродвигуна, персональний комп’ютер для автоматизоаного управління роботою мікро-двигуна.

Призначення блоку оптичного налаштування – виставлення механічної складової двигуна в початкову точку відліку роботи.

2.2. Електромеханічна схема функціювання електростатичного двигуна

Як уже зазначалося вище, за основу роботи електростатичного двигуна використано принцип виникнення обертового моменту у роторі за рахунок кулонівських сил притягання-відштовхування між полюсами ротора і статора [21]. Наразі детальна інформація по автоматизованим системам контролю елнктричних параметрів електростатичних мікродвигунів дуже обмежена. Тому, в роботі у якості моделі використовуємо принципи розрахунків, викладені в роботах [22-26], виконаних дослідниками наукових груп Китаю, Японії та США. Електро-механічна схема функціювання електростатичного двигуна представлена на рисунку 2.2.

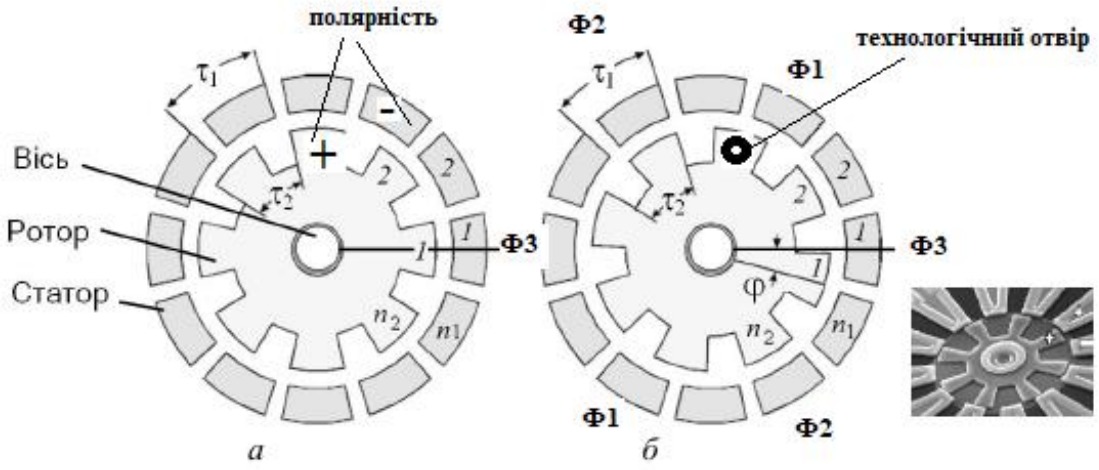


Рисунок 2.2 Механічна схема функціювання електростатичного двигуна: Ф1,Ф2, Ф3 – розташування силових фаз.

На рисунку 2.3 предсталено топологію контактів статора двигуна.

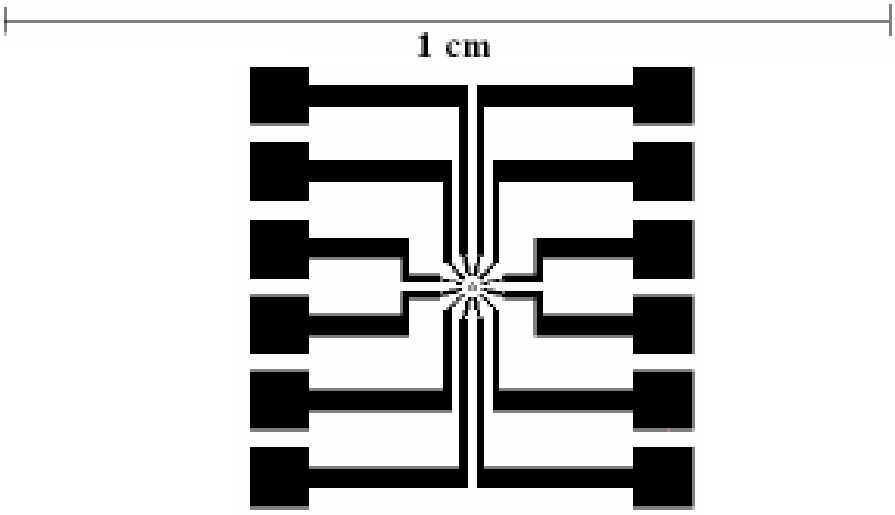


Рисунок 2.3 Топологія контактів статора електростатичного мікродвигуна

Кутовий крок розміщення полюсів статора і ротора визначається наступним чином [12]:

$$\tau_1 = \frac{2\pi}{n_1};\ \tau_2 = \frac{2\pi}{n_2}; \qquad (2.1)$$

де τ_1, τ_2 – кутовий крок полюсів статора і ротора відповідно; n_1, n_2 – кількість полюсів на статорі та роторі відповідно.

Якщо напруга прикладена до полюса статора 1 (рис 2.2а,) тобто мікродвигун перебуває у відносній рівновазі. Якщо напруга буде прикладена до полюса 2 статора, то стан ротора зміниться так, що він займе нове положення відносно даного полюса, тобто обертальний момент, що діє на ротор, поверне його на деякий кут φ . Далі цикл повторюється.

Крок збільшення кута повороту ротора τ_s мікродвигуна може бути визначений за допомогою такого виразу [12]:

$$\tau_s = \min\left(\left|\tau_1 - i\tau_2\right|\right) = \frac{2\pi}{n_1 n_2}\min\left(\left|n_1 - in_2\right|\right),\ i \in [0, n_2 - 1] \qquad (2.2)$$

Якщо кількість полюсів статора змінюватиметься в діапазоні

j∈[0, q-1], де q - кількість фаз, то вираз (2.2) набуде такого вигляду [12]:

$$\tau_s = \min\left(\left|j\tau_1 - i\tau_2\right|\right) = 2\pi \min\left(\left|\frac{j}{n_1} - \frac{i}{n_2}\right|\right) = \frac{2\pi}{n_1 n_2}\min\left(\left|jn_2 - in_1\right|\right), \quad (2.3)$$
$$i \in [0, n_2 - 1], \quad j \in [0, q-1].$$

Кутову частоту планарного електростатичного двигуна можна визначити за допомогою виразу [12]:

$$n = f\tau_s (2\pi)^{-1}, \quad (2.4)$$

де f – частота перемикання фаз.

Обертальний момент, що діє на ротор мікродвигуна, можна описати у вигляді [12]:

$$M = \frac{\Delta W}{\Delta\varphi} = 0{,}5\frac{\Delta C}{\tau_s}U^2, \quad (2.5)$$

де ΔC – зміна ємності між статором і ротором; U – напруга між статором і ротором.

За допомогою розрахунків для розроблюваного пристрою визначено, що електростатичний мікродвигун має 8 зубців ротора і 12 зубців статора. Виготовлення деталей мікродвигуна пропонується виконати за методами MUMPs-технології [27,28]. MUMPs (Multi User MEMS Process) – тришаровий полікремнієвий процес стандартної мікротехнології поверхневої обробки. На рисунку 2.4 представлено топологію електростатичного мікродвигуна. Максимальна площа, проміжку, яку займає простір ротора та статора не перевищує 2 мм^2. У одній із лопатей ротора виготовлено технологічний отвір для забезпечення режиму початкового відліку роботи двигуна. Технологічний отвір є складовою оптичної системи.

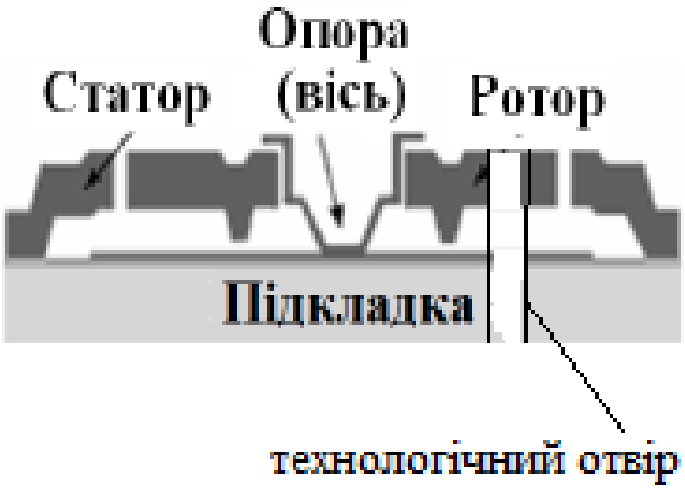


Рисунок 2.4 – MUMPs- топологія електростатичного мікродвигуна

2.3 Блок оптичного налаштування електростатичного мікродвигуна

Призначення блоку оптичного налаштування – виставлення механічної складової двигуна в початкову точку відліку роботи.

Для фіксації точки відліку початку роботи електростатичного мікродвигуна у роботі проонується оптична система, яка складається із оптичного джерела світла –лазерного світлодіода, світловодного (отичного) волокна і фотодіода, сполкченого із блоком реєстрації та керування електричними сигналами пристрою. Схема оптичного блоку представлена на рисунку 2.5. Встановлення початку відліку відповідає максимальному значенню фотосрума, що потрапляє на фотодіод через технологічний опір.

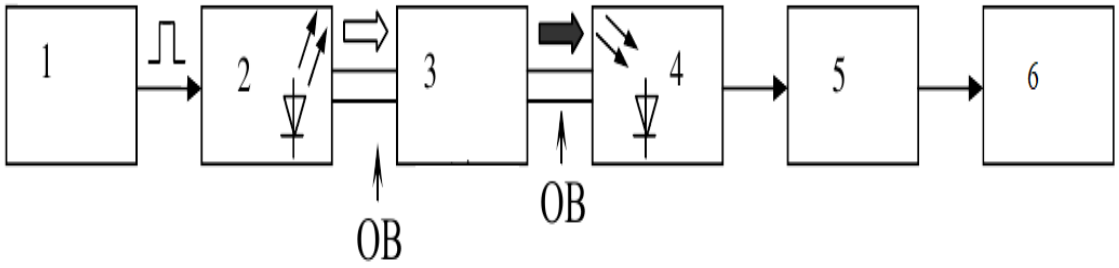


Рисунок 2.5 Схема блоку оптичного налаштування електростатичного мікродвигуна:ОВ – оптичне волокно, 1 – генератор імпульсів, 2 – світлодіод, 3 електростатичний двигун 4 – фотоприймач, 5 - блок обробки та керування сигналів, 6 – ПК.

У якості оптичного волокна використовуємо кварцеве світловолокно кінцевого світіння діаметром 1 мм (рисунок 2.6.)

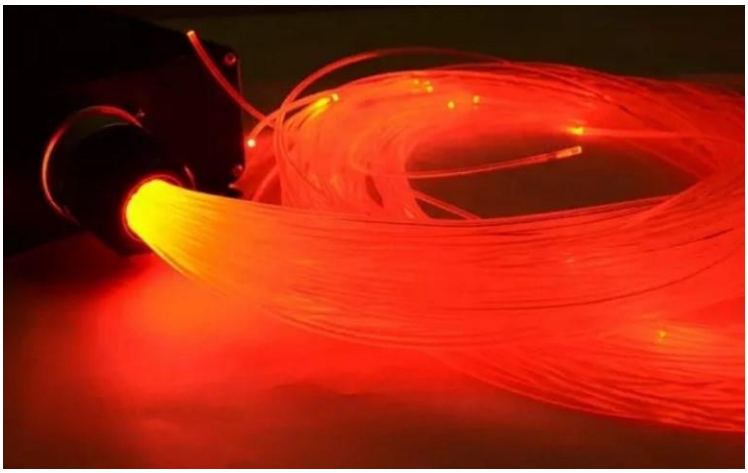


Рисунок 2.6 Оптичне волокно

У якості випромінювача та фотоприймача використовуємо світлодіод L11767-0066L та фотодіод S1787-04 фірми Hamamatsu, оптичні характеристики яких добре узгоджуються [29]. На рисунках 2.7 та 2.8 представлено спектральні характеристики відповідних компонент. У таблицях 2.1 та 2.2 предсталено їх загальні характеристики.

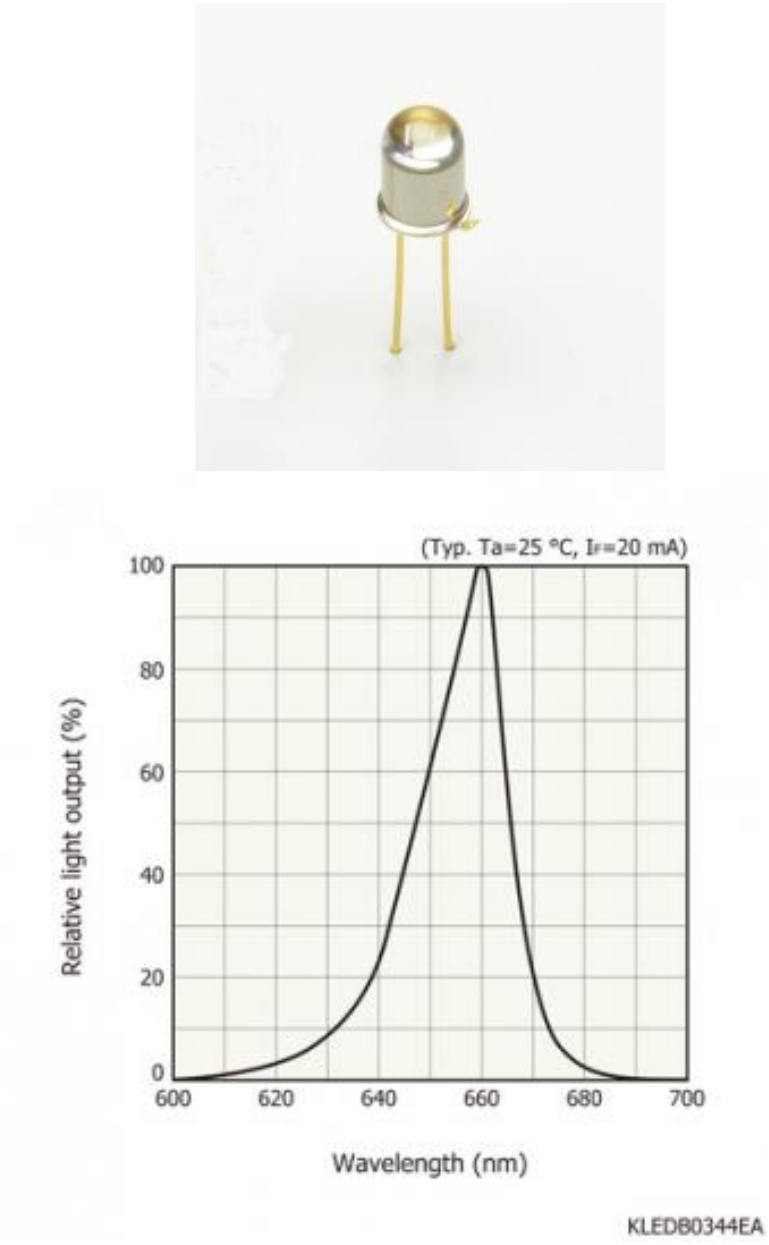


Рисунок 2.7 - Спектральні характеристики світлодіода L11767-0066L

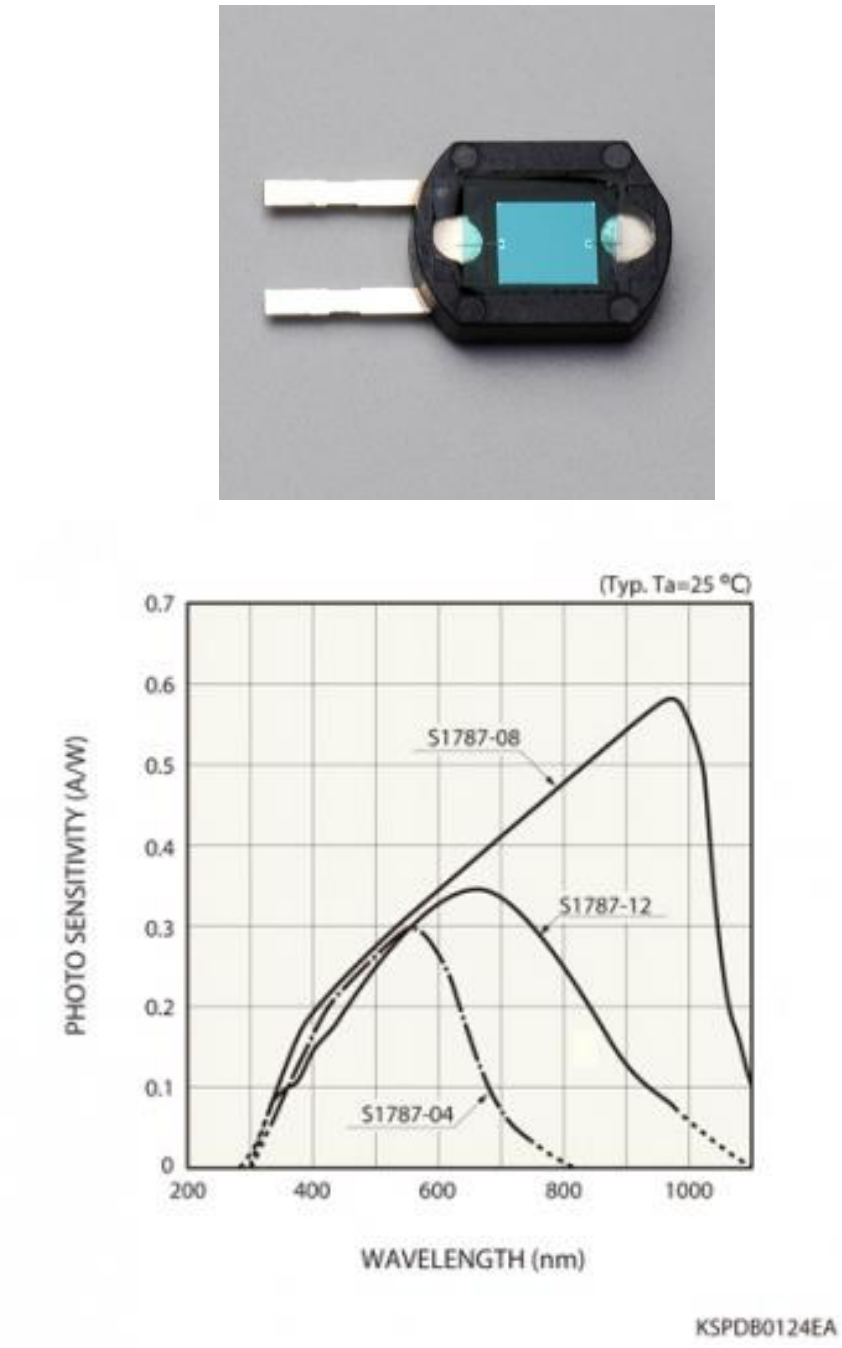


Рисунок 2.8 - Спектральні характеристики фотодіода S1787-04

Таблиця 2.1 – Характеристики світлодіода L11767-0066L

Найменша пікова довжина хвилі випромінювання	650 нм
Типова пікова довжина хвилі випромінювання	660 нм
Найбільша пікова довжина хвилі випромінювання	670 нм
Типова потужність випромінювання	7 мВт
Типова пряма напруга	2.1 В
Типова частота зрізу	6 МГц

Таблиця 2.2 – Характеристики фотодіода S1787-04

Матеріал / Тип	Si
Спектральний діапазон мін. нм	190 нм
Спектральний діапазон макс. нм	1000 нм
Корпус / Виконання	TO-5
Пік спектрального діапазону, нм	720 нм
Розмір фоточутливої поверхні	3.6 × 3.6 мм
Кількість елементів	1
Охолодження	без охолодження
Макс. зворотна напруга	5 В
Типова фоточутливість	0.36 А/Вт
Макс. темновий струм	10 пА
Типовий час наростання	1 мкс

Для забезпечення функціювання світлодіода використовується електрична схема генерації лазерного світлодіода, представлена уроботі [30] (рисунок 2.9).

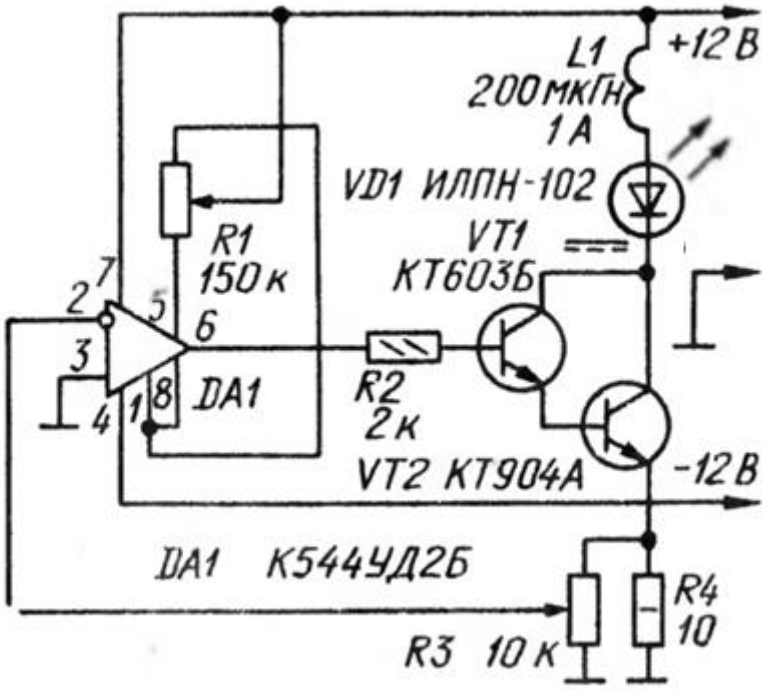


Рисунок 2.9 – Електрична схема генерації лазерного світлодіода

У базовій схемі модель світлодіода ИЛПН-102 замінено на більш сучасну L11767-0066L, у ланці генерації інжекційного струму замість біполярних транзисторів КТ904А використано польовий транзистор IRF540. Також у схемі змінено операційний підсилювач К544УД2Б на LM358. Моделювання схеми проводилось у середовищі Microcap. Результати моделювання представлені на рисунку 2.10 [31].

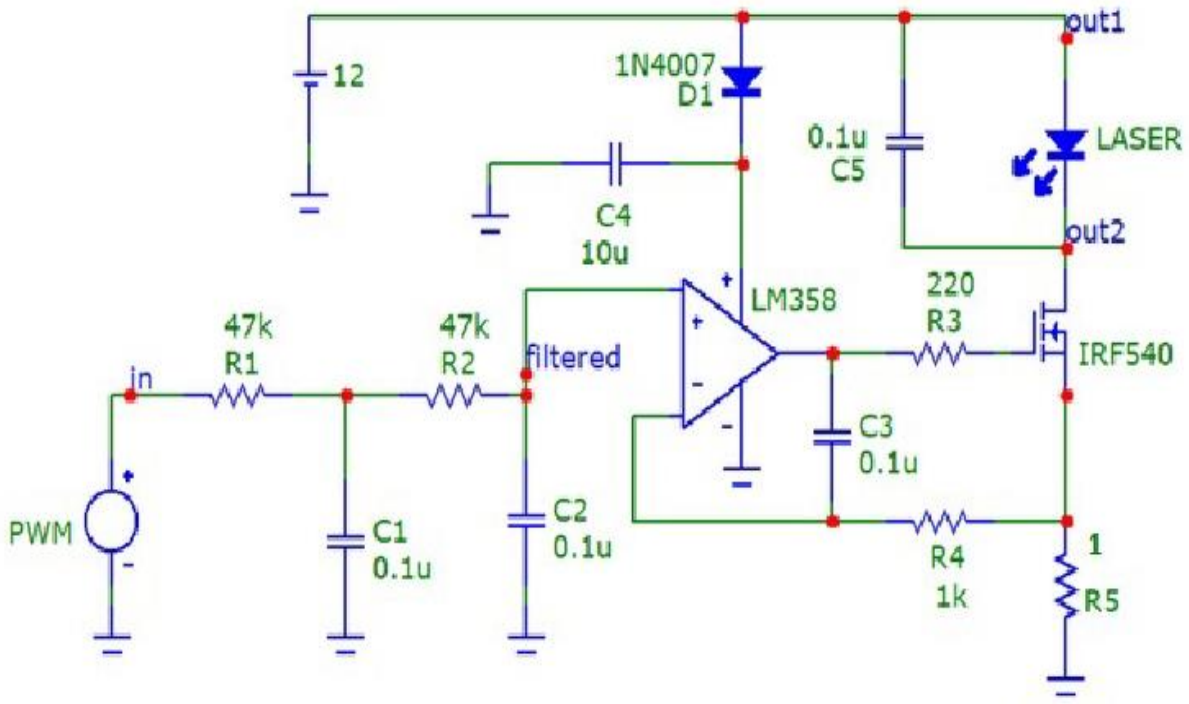


Рисунок 2.10 – Моделювання роботи схеми генерації лазерного світлодіода

Результати моделювання добре узгоджуються із технічними характеристиками.

Для підключення фотодіода використаємо схему, представлену на рисунку 2.11.

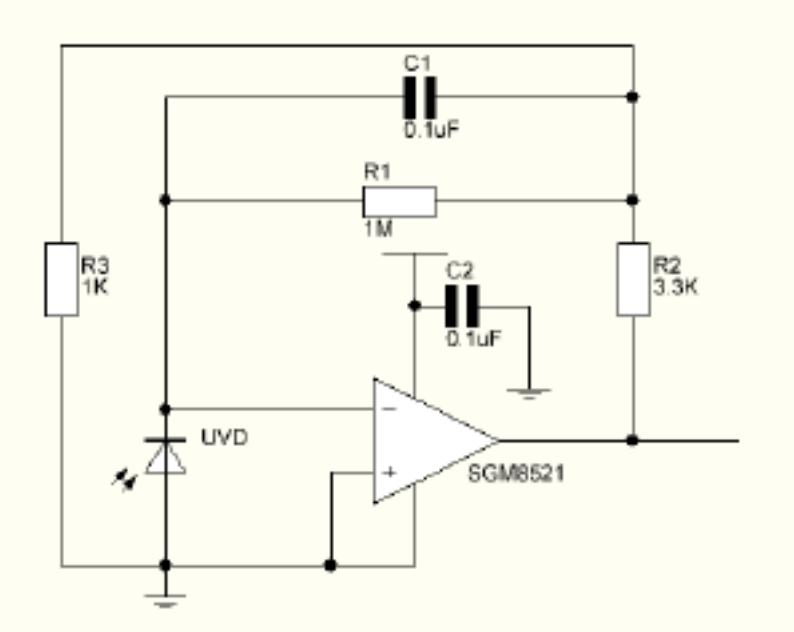


Рисунок 2.11 Схема підключення фотодіода

На рисунку 2.12 представлено моделювання схеми в редакторі САПР Proteus [31].

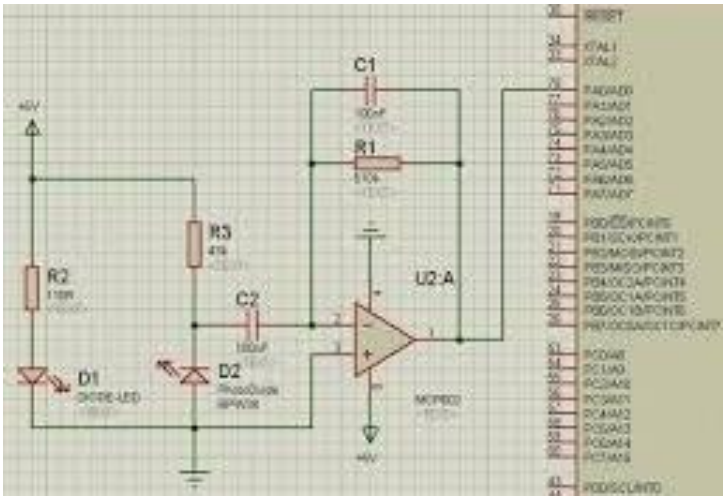


Рисунок 2.12 – Моделювання схеми включення фотодіода в редакторі Proteus.

2.4 Блок блок обробки та керування сигналами

Блок обробки та керування сигналами складається із мікроконтролерної частини ти силової частини, яка безпосередньо керує роботою електростатичного двигуна. У роботах [23-25], де вперше було

описано принципи побудови системи живлення та керування електростатчними мікро-двигунами, були надані лише загальні рекомендації. Тому, виходячи із теоретичних розрахунків, згідно (1.2), (2.5) та матеріалів робіт [23-25], було визначено, що керуюча напруга на контакти статора повинна становити близько 600 В. За прототип було взято схему, представлену у роботі [32], але із заміною силової частини, яка, базується на польових транзисторах IRL 540 (напруга на виході – 100 В), на польові транзистори IRF840 (вихідна напруга – 500 В) [33]. Нарисунку 2.13 представлена функціональна схема системи керування та контролю електростатичними двигунами. На рисунку 2.14 предсталено функціональні параметри польових транзисторів IRF840. На рисунку 2.15 представлена розроблювана схема.

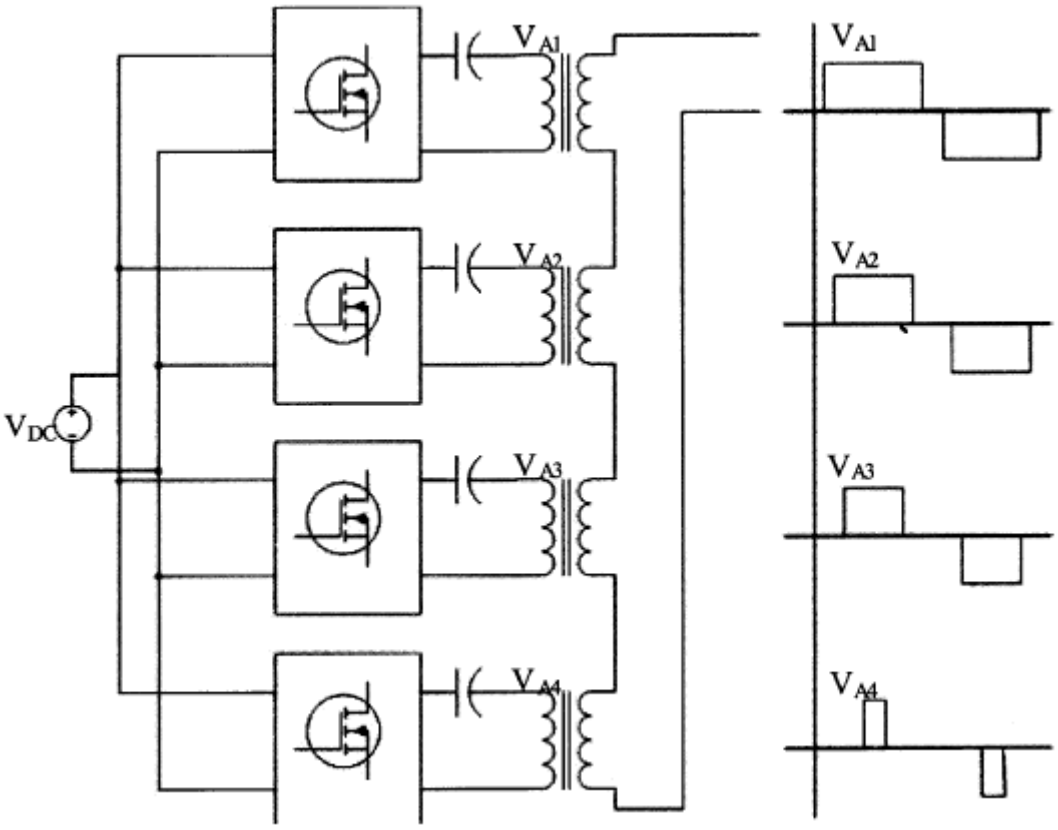


Рисунок 2.13 - Функціональна схема системи керування та контролю електростатичними двигунами [23-25].

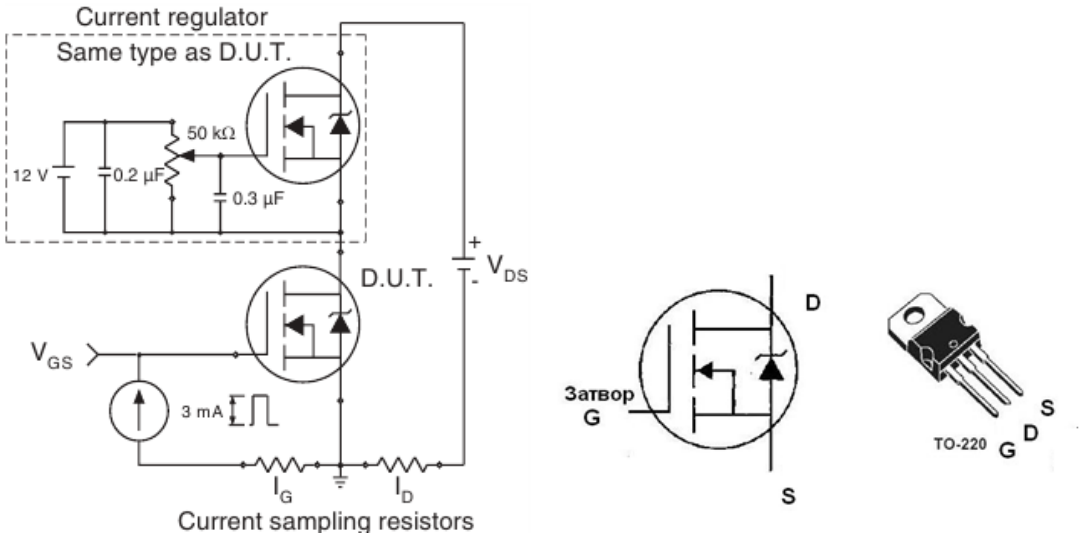


Рисунок 2.14 – Функціональні параметри польових транзисторів IRF84[33]

У таблиці 2.3 представлено основні параметри польових транзисторів IRF84.

Таблиця 2.3 Основні параметри польових транзисторів IRF84[33]

V_{DS} (V)	500	
$R_{DS(on)}$ (Ω)	V_{GS} = 10 V	0.85
Q_g (Max.) (nC)	63	
Q_{gs} (nC)	9.3	
Q_{gd} (nC)	32	
Configuration	Single	

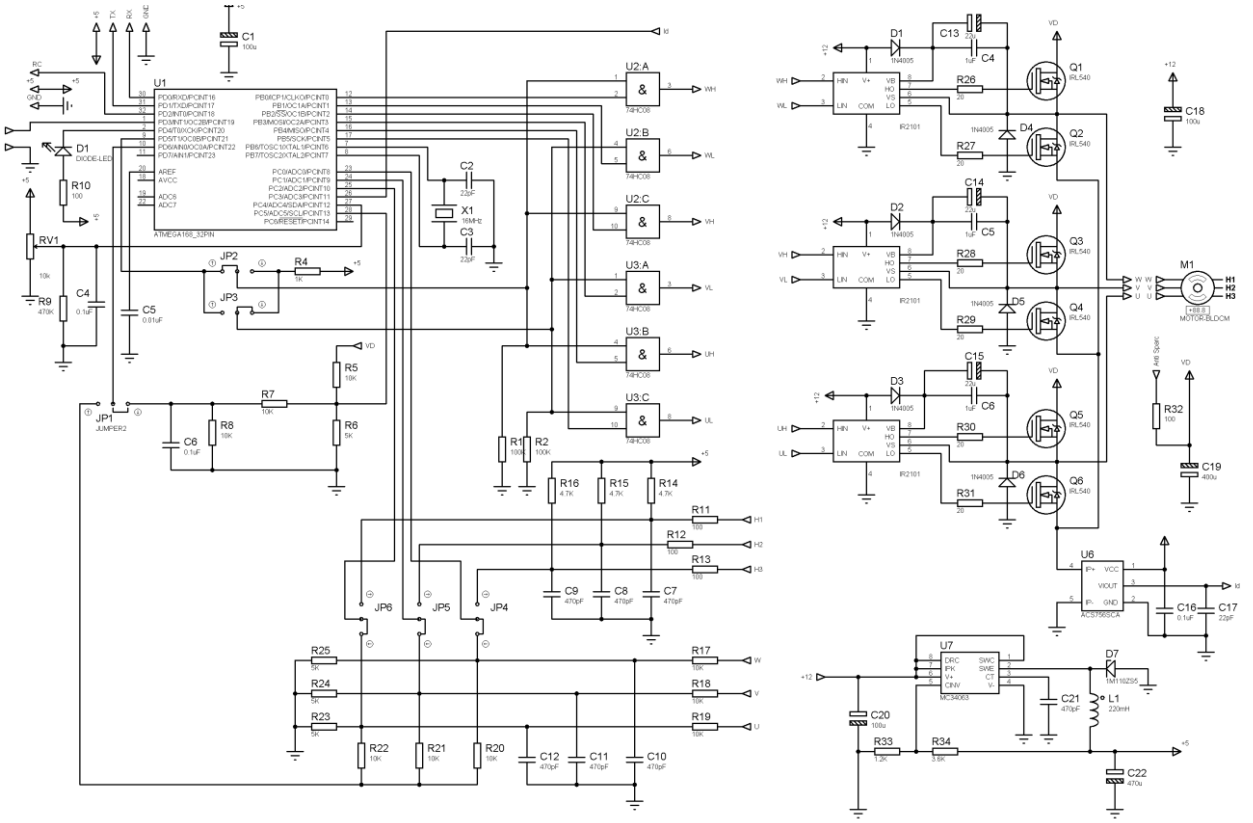


Рисунок 2.15 – Електрична схема блоку обробки та керування сигналами електростатичного мікродвигуна

Схема умовно поділена на дві частини: ліва – мікроконтролер з логікою, права – силова частина. Силову частину можна модифікувати для роботи з двигунами іншої потужності або з іншою напругою живлення. У якості контролера використовується AT90PWM3[34]. На рисунку 2.16. редставлена функціональна схема мікроконтроера AT90PWM3.

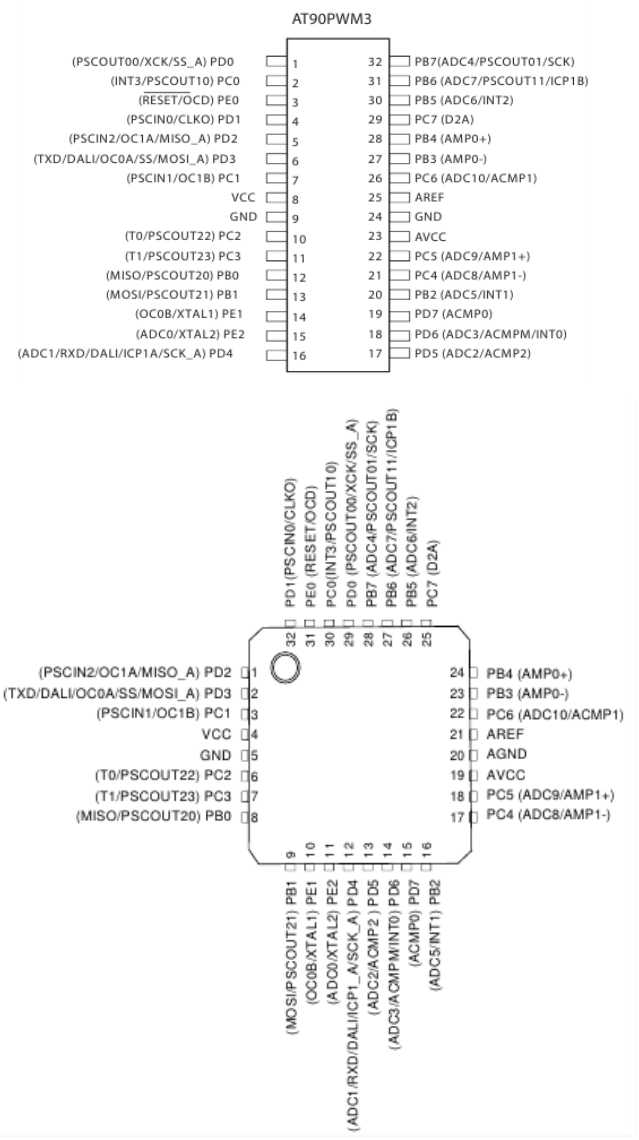


Рисунок 2.16 - Функціональна схема мікроконтролера AT90PWM3

Живлення схеми роздільне. Оскільки жилення драйверів ключів здійснюється від 10 до 20 В, використовується живлення 12В. Живлення мікроконтролера здійснюється через DC-DC перетворювач, зібраний на мікросхемі MC34063 [35] (рисунок 2.17). Можете застосовувати лінійний стабілізатор із вихідною напругою 5В. Передбачається, що напруга VD може бути від 12В і від обмежується можливостями драйвера ключів і самими ключами.

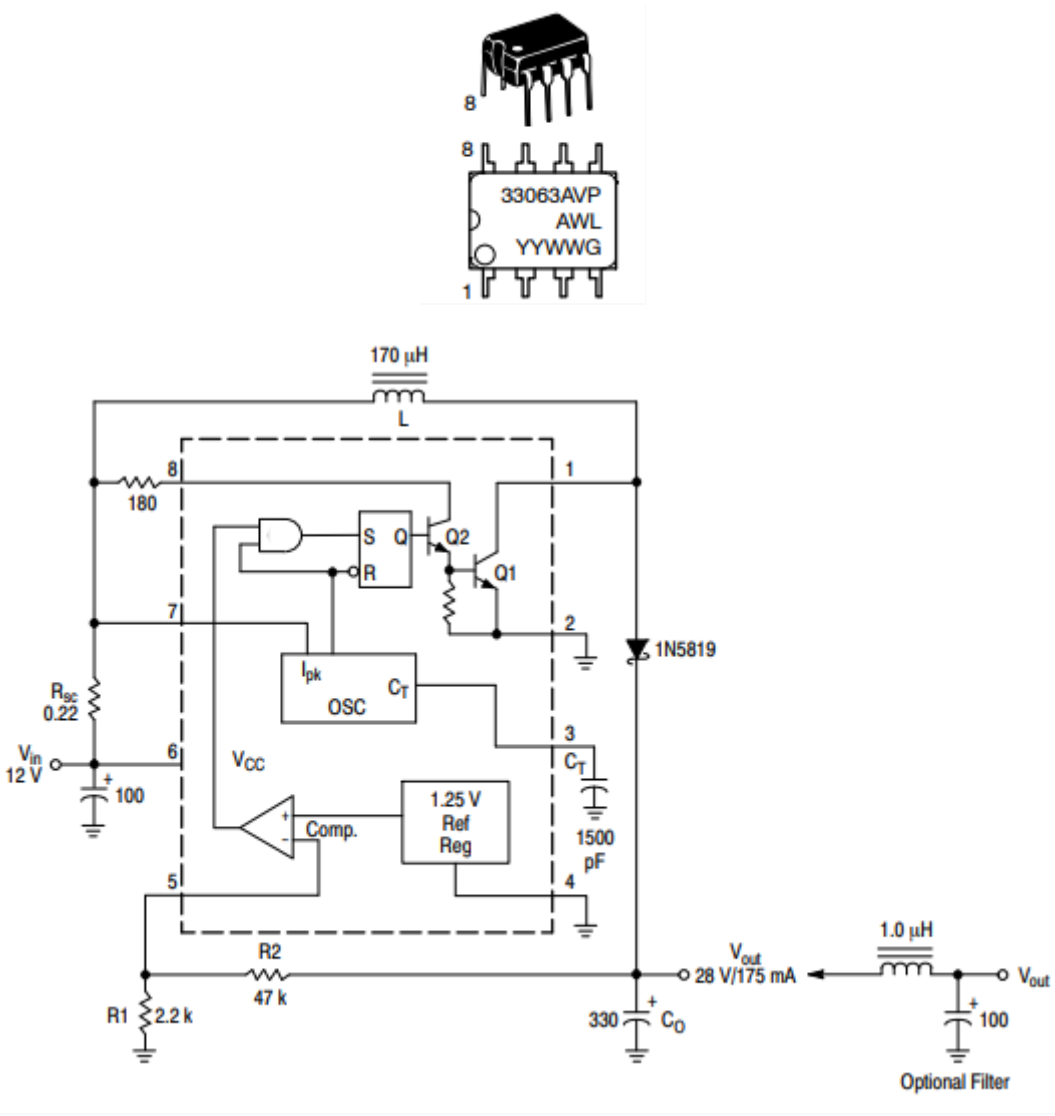


Рисунок 2.17 – Функціональна схема DC-DC перетворювача MC34063

У таблиці2.4 надано характеристики DC-DC перетворювача MC34063[35]

Таблиця 2.4 - Характеристики DC-DC перетворювача MC34063[35]

Test	Conditions	Results
Line Regulation	V_{in} = 8.0 V to 16 V, I_O = 175 mA	30 mV = ±0.05%
Load Regulation	V_{in} = 12 V, I_O = 75 mA to 175 mA	10 mV = ±0.017%
Output Ripple	V_{in} = 12 V, I_O = 175 mA	400 mVpp
Efficiency	V_{in} = 12 V, I_O = 175 mA	87.7%
Output Ripple With Optional Filter	V_{in} = 12 V, I_O = 175 mA	40 mVpp

На виході OC0B (PD5) мікроконтролера U1 генерується ШІМ сигнал. Він надходить на перемикачі JP2, JP3. Цими перемикачами можна вибрати варіант подачі ШІМ на ключі (на верхні, нижні або всі ключі). На схемі

перемикач JP2 встановлений у положення для подачі ШІМ сигналу на верхні ключі. Перемикач JP3 на схемі встановлений в положення для відключення подачі ШІМ сигналу на нижні ключі. На цю ж логіку надходять 6 сигналів із виводів мікроконтролера PB0..PB5, які керують сигналами для 6 ключів. Таким чином, логічні елементи (U2, U3) накладають ШІМ сигнал на керуючі сигнали. На драйвери верхніх ключів сигнали підуть безпосередньо з мікроконтролера, а на нижні - через логічні елементи.

Напруга фаз двигуна N,B,IN через резистивні дільники W - (R17,R25),V - (R18, R24), U - (R19, R23) надходять на входи контролера ADC0(PC0),ADC1(PC1),ADC2(PC2). Ці виводи використовують як входи компараторів. Резистивні дільники вибираються таким чином, щоб напруга, що подається на вхід мікроконтролера, не перевищувала допустиму. У разі, резисторами 10К і 5К ділиться на 3. Тобто, при живленні двигуна 12В. на мікроконтролер подаватиметься 12В * 5К / (10К + 5К) = 4В. Опорна напруга для компаратора (вхід AIN1) подається від половинної напруги живлення двигуна через дільник (R5,R6,R7,R8). Далі напруга зменшується вдвічі дільником R7, R8, після чого надходить на вивід AIN1 внутрішнього компаратора мікроконтролера. Перемикач JP1дозволяє переключити опорну напругу на напругу "середньої точки", що формується резисторами (R20, R21, R22).

На вході ADC5 (PC5)через дільник R5, R6 подається напруга живлення двигуна. Ця напруга контролюється мікроконтролером.

На вході ADC3 (PC3) надходить аналоговий сигнал від датчика струму. Датчик струму ACS756SA. Перевага цього датчика в тому, що він не використовує шунт, а значить, має внутрішній опір, близький до нуля, тому на ньому не відбувається тепловиділення. Крім того, вихід датчика аналоговий в межах 5В, тому без будь-яких перетворень подається на вхід мікроконтролера АЦП, що спрощує схему.

Сигнал, що задає обороти двигуна, з потенціометра RV1 надходить на вхід ADC4(PC4).

Сигнали TX, RX використовуються для налаштування регулятора та видачі інформації про стан регулятора - обороти двигуна, струм, напруга живлення тощо. Для налаштування регулятора його можна підключити до USB порту комп'ютера за допомогою FT232 перехідника. Налаштування виконується через будь-яку програму терміналу.

У якості драйверів ключів використовувалися IRF84.

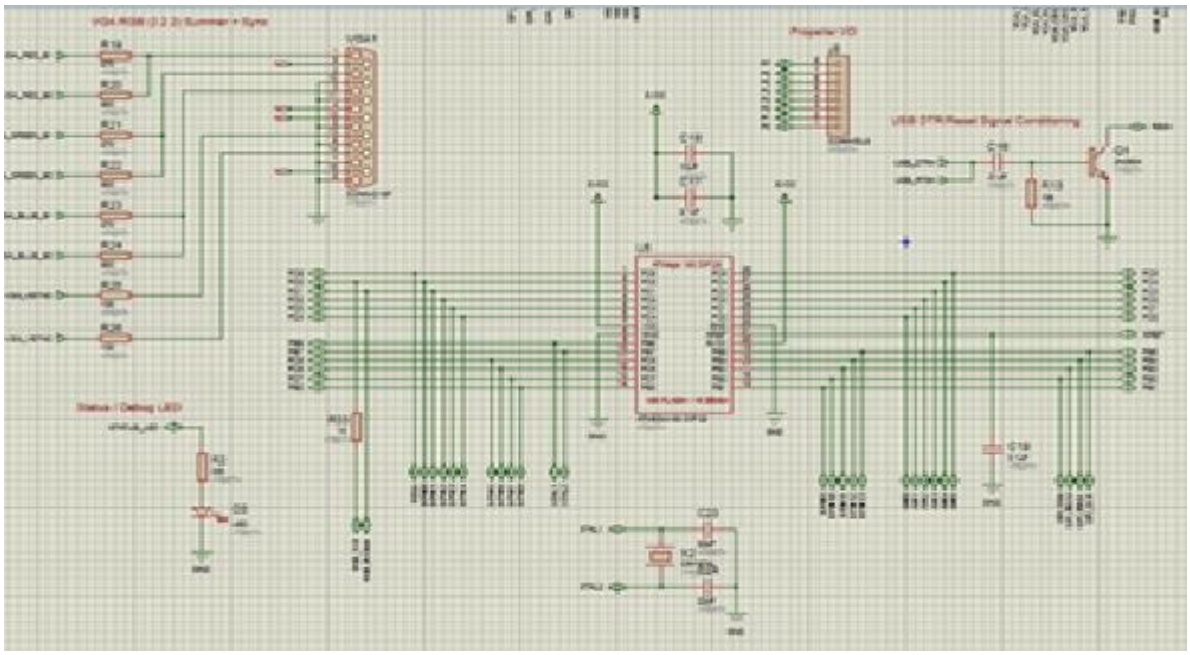


Рисунок 2.16 – Моделювання схеми блоку обробки та керування сигналами електростатичного двигуна у редакторі Proteus [36].

2.5 Модель однолектронного транзистора для силової частини мікродвигунів

Як зазначалося у розділі 1, зменшення лінійних розмірів компонент неменуче призведе до обмежень фізичних властивостей на квантовому рівні. Ці обмеження можна подолати шляхом використання принципово нових пристроїв наноелектроніки. Можливим вирішенням проблем, які висвітлюються у розроблюваній системі може стати використання у якості силових елементів мікродвигунів одноелектронних польових транзисторів [38 - 40]. На рисунку 2.17 представлено - Схематичне зображення

вертикального польового транзистору на основі графену, яка була використана для подальшого моделювання [40].

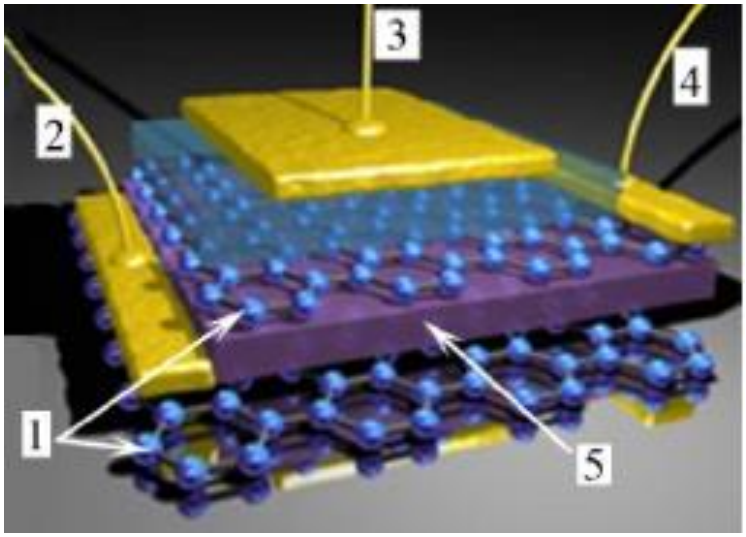


Рисунок 2.17 - Схематичне зображення вертикального польового транзистору на основі графену: 1 – шари графену;2 – стік; 3 – керувальний електрод; 4 – витік; 5 – відокремлювальний шар діелектрика (BN або MoS2) [40].

За основу розрахунку та моделювання булв використаний алгоритм, який раніше був застосований при моделюванні одноелектронного транзистора, представлений у роботі [37]. Основною моделлю була функціональна електрична схема одноелектронного транзистора, яка відповідає структурі, що визначена на рисунку 2.17 і має вигляд, що представлений на рисунку 2.18.

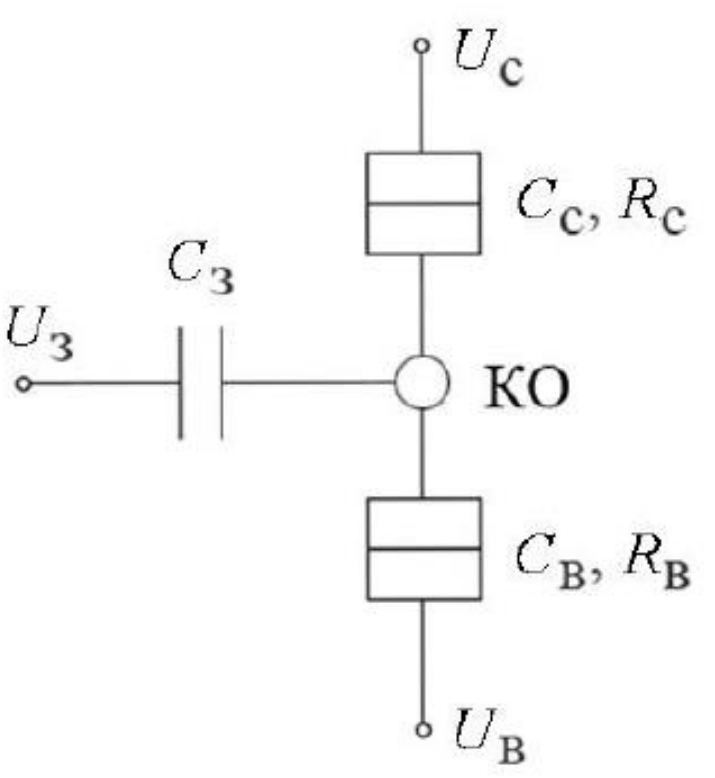


Рисунок 2.18 – Функціональна схема одноелектронного транзистора

На схемі ОЕТ (рисунок 2.18) Uз. с. в, Rз. с. в, С з. с. в – відповідно потенціали, тунельні (квантові) опори та ємності затвору, стоку і витоку КО – кулонівський острівець.

На підставі функціональної схеми в системі автоматизованого проектування Electronics Workbench було складено еквіваленту схему одноелектронного транзистора (рисунок 2.19).

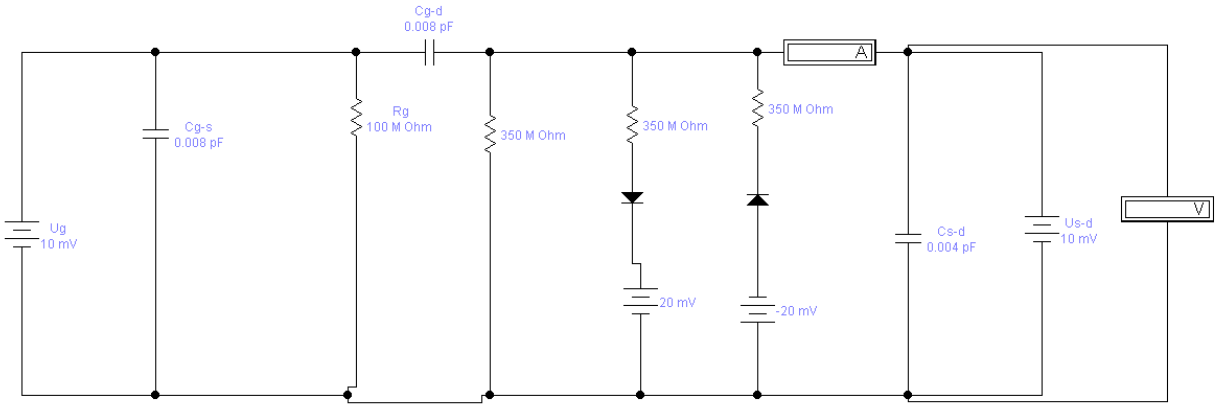


Рисунок 2.19 – Еквівалентна схема одноелектронного транзистора в системі автоматизованого проектування Electronics Workbench

Отже, за результатами розділу можна зробити наступні висновки:

1) розроблено функціонально- структурну схему системи керування параметрами електростатичного мікродвигуна;

2) за основу роботи електростатичного двигуна використано принцип виникнення обертового моменту у роторі за рахунок кулонівських сил притягання-відштовхування між полюсами ротора і статора;

3) деталі мікродвигуна пропонується виконати за методами MUMPs-технології [27,28]. MUMPs (Multi User MEMS Process) – тришарового полікремнієвого процесу стандартної мікротехнології поверхневої обробки;

4) для фіксації точки відліку початку роботи електростатичного мікродвигуна у роботі проонується оптична система, яка складається із оптичного джерела світла –лазерного світлодіода, світловодного (отичного) волокна і фотодіода, сполкченого із блоком реєстрації та керування електричними сигналами пристрою;

5) у якості випромінювача та фотоприймача використовуємо світлодіод L11767-0066L та фотодіод S1787-04 фірми Hamamatsu, оптичні характеристики яких добре узгоджуються;

6) електрична схема блоку обробки та керування сигналами електростатичного мікродвигуна складається із двох частин – мікроконтролера із логікою та силової частини;

7) робота силової частини блоку обробки та керування сигналу базується на польових транзисторах IRF840, так як розрахована напруга на виході – 500 В. Силову частину можна модифікувати для роботи з двигунами іншої потужності або з іншою напругою живлення;

8) у якості контролера використовується AT90PWM3;

9) зменшення лінійних розмірів компонент неменуче призведе до обмежень фізичних властивостей на квантовому рівні. Ці обмеження можна подолати шляхом використання принуипово нових пристроїв наноелектроніки. Можливим вирішенням проблем, які висвітлюються у розроблюваній системі може стати використання у якості силових елементів мікродвигунів одноелектронних польових транзисторів;

10) за допомогою САПР електроніки Microcap, Electronics Workbench, Prot eus було проведено моделювання основних функціональних блоків системи. Результати моделювання добре узгоджуються із розрахунками.

3 Техніко - економічне обґрунтування виготовлення електронних схем системи керування параметрами електростатичного мікродвигуна

3.1 Обґрунтування вибору технології виготовлення електронних схем системи керування параметрами електростатичного мікродвигуна

Топологічний аналіз показує, що система може бути реалізована у вигляді малогабаритних мікромодулів і виконана за сучасною маловитратною технологією тонко плівкових гібридних мікрозборок. Але у відмінності від стандартної технології у гібридного виконання всі елементи будуть навісними, а напиленням на підкладці виконується лише струмопровідний шар.

Для вибору технології виготовлення електронних схем системи керування параметрами електростатичного мікродвигуна проаналізуємо ієрархії чотирьох варіантів (таблиця 3.1), враховуючи шкалу відносної важливості (таблиця 3.2) [41].

Таблиця 3.1 - Можливі варіанти технологій виробництва пристрою

Технологія		Короткий опис
A	Напівпровідникових інтегральних схем	Всі елементи та між елементні з'єднання виконані на поверхні та в об'ємі загального кристала напівпровідника
B	Толстоплівкових гібридних інтегральних схем	Всі елементи та між елементні з'єднання виконані у вигляді товстих композітних плівок.
C	Тонкоплівкових гібридних інтегральних схем	Всі елементи та між елементні з'єднання виконані у вигляді тонких плівок провідних та резистивних матеріалів.
D	Тонкоплівкових гібридних мікрозборок	Активні та пасивні елементи схеми навісні, а струмопровідний шар виконано у вигляді тонких плівок.

Вибір робимо за критеріями, наведеними в таблиці 3.3.

Встановлюємо відносну вагу кожного критерію на основі матриці попарних порівнянь для обраних критеріїв (таблиця 3.3) [41].

Таблиця 3.2 - Шкала відносної важливості

Інтенсивність відносної важливості	Визначення
1	рівна важливість
3	помірна перевага
5	сильна перевага
7	значна перевага
9	дуже сильна перевага
2,4,6,8	проміжні судження

Таблиця 3.3 – Попарне порівняння критеріїв

Критерій	1	2	3	4	5	6	$\sqrt[6]{\prod_{i=1}^{6}\omega_i}$	X_i
1. Швидкодія	1	1/3	3	1/7	1/5	3	0,664	0,073
2. Завадостійкість	3	1	3	1/3	1/7	3	1,042	0,116
3. Споживання	1/3	1/3	1	1/5	1/7	3	0,460	0,051
4. Площа	7	3	5	1	1/5	7	2,297	0,254
5. Сумісність	5	7	7	5	1	5	4,277	0,473
6. Вартість	1/3	1/5	1/3	1/7	1/5	1	0,293	0,033
∑							9,033	1,00

У матриці прийняті наступні позначення: *i* – номер критерію; при порівнянні 6-ох критеріїв (таблиця 3.3) *i* = 1, 2, 3, 4, 5, 6; X_i - локальний пріоритет, тобто відносна вага і-го критерію в глобальному критерії:

Далі аналогічно складаємо 6 матриць попарних порівнянь альтернатив стосовно кожного критерію (таблиці 3.4 - 3.9). Оскільки тепер порівнюються 4 технології по одному критерію , то i = 1, 2, 3, 4.

$$X_i = \frac{\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}}{\sum_{i=1}^{4}\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}},$$

де $\sum$ - сума по стовпці $\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$.

Таблиця 3.4 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «швидкодія»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$	X_i
A	1	1/5	3	3	1,16	0,19
B	5	1	7	7	3,96	0,65
C	1/3	1/7	1	1/2	0,39	0,07
D	1/3	1/7	2	1	0,56	0,09
∑					6,07	1,00

Таблиця 3.5 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «завадостійкість»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$	X_i
A	1	5	1	1/3	1,14	0,21
B	1/5	1	1/5	1/7	0,48	0,09
C	1	5	1	1/3	1,56	0,29
D	3	7	3	1	2,20	0,41
∑					5,37	1,00

Таблиця 3.6 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «споживання»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$	X_i
A	1	5	1/5	1/7	0,61	0,09
B	1/5	1	1/7	1/9	0,24	0,04
C	5	7	1	1/3	1,85	0,29
D	7	9	3	1	3,71	0,58
∑					6,41	1,00

Таблиця 3.7 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «площа»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$	X_i
A	1	5	3	5	0,99	0,21
B	1/5	1	1/3	1/2	0,24	0,05
C	1/3	3	1	3	2,03	0,43
D	1/5	2	1/3	1	1,47	0,31
∑					4,73	1,00

Таблиця 3.8 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «сумісність»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$	X_i
A	1	5	1/3	1/5	0,76	0,13
B	1/5	1	1/7	1/9	0,24	0,04
C	5	7	1	1/2	2,41	0,41
D	3	9	2	1	2,47	0,42
∑					5,88	1,00

Таблиця 3.9 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «вартість»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$	X_i
A	1	3	5	6	3,08	0,56
B	1/3	1	3	4	1,41	0,26
C	1/5	1/3	1	2	0,60	0,11
D	1/6	1/4	1/2	1	0,38	0,07
∑					5,47	1,00

Глобальний пріоритет для кожної альтернативи обчислюється як сума добутків кожного локального пріоритету на його ваговий коефіцієнт (таблиця 3.10) [41].

З порівняння глобальних пріоритетів різних технологій видно, що найбільшим є пріоритет у варіанта виготовлення електронних схем системи керування параметрами електростатичного мікродвигуна з використанням технології тонкоплівкових гібридних мікрозборок

Таблиця 3.10 - Глобальний пріоритет для кожної альтернативи

Пріоритети	№1	№2	№3	№4	№5	№6	Глобальний
Вага	0,073	0,116	0,051	0,254	0,473	0,033	
Напівпровідникових інтегральних схем	0,19	0,21	0,09	0,21	0,13	0,56	0,176
Толстоплівкових гібридних інтегральних схем	0,65	0,09	0,04	0,05	0,04	0,26	0,100
Тонкоплівкових гібридних інтегральних схем	0,07	0,29	0,29	0,43	0,41	0,11	0,360
Тонкоплівкових гібридних мікрозборок	0,09	0,41	0,58	0,31	0,42	0,07	0,364

За допомогою методу аналізу ієрархій проведене порівняння чотирьох типів технологій виготовлення електронних схем системи за наступними критеріями: 1) швидкодія; 2) завадостійкість; 3) споживана потужність; 4) площа, займана на кристалі; 5) сумісність; 6) вартість. Найбільший локальний пріоритет у критерію «сумісність» (таблиця 3.3). За даними таблиці 3.9 локальний пріоритет за критерієм «вартість» є найвищим для технології напівпровідникових інтегральних схем. Проте найбільший глобальний пріоритет має технологія тонкоплівкових гібридних мікрозборок. Саме вона й буде використовуватися для виготовлення електронних схем системи керування параметрами електростатичного мікродвигуна

3.2 Розрахунок витрат на виготовлення електронних схем системи керування параметрами електростатичного мікродвигуна

Витрати на матеріали і напівфабрикати, вказані в таблиці 3.11, склали 4144,35грн.

Таблиця 3.11 - Розрахунок вартості основних покупних виробів

Матеріали і напівфабрикати	Одиниця виміру	Кількість	Ціна за одиницю, грн.	Вартість матеріалів і напівфабрикатів, грн.
Фольгований склотекстоліт	$м^2$	0,6	10	6,00
Хлорне залізо	кг	1,5	40	60,00
Конденсатор	шт.	10	20	200,00
Мікроконтролер AT90PWM3	шт.	1	1114,00	1114,00
Роз’єми комутації	шт.	7	18	126,0
Резистор	шт.	20	1,1	20,20
Оптоволоконний кабель	м	1	10,00	10,00
ОП А747	шт.	2	81,5	163,00
РК індикатор	шт.	1	105,2	105,20
Фотодіод S1787-04	шт.	1	16,83	500,00
Світлодіод L11767-0066L	шт.	1	500,00	500,00
ПТ КП103	шт.	2	14,4	28,8

ПТ IRF840	шт.	6	170,00	1020,0
Стабілітрон	шт.	1	2,15	2,15
Папір писальний	уп.	1	89	89,0
Транспортно-заготівельні витрати				200
Разом				4144,35

4 Охорона праці та техногенна безпека при розробці електричних схем системи керування параметрами електростатичного мікродвигуна

4.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Роботи, що проводяться в дослідницькій лабораторії, не представляють великої небезпеки, оскільки приміщення кафедри 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 [37].

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.

4.2 Заходи зі зменшення впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів

При розробці оптосхематичної системи значна частина робіт повинна бути виконана на комп’ютері – програмування мікроконтролера пристрою. 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 [42].

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 позвоночником- 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.

4.3 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 метах повинні відповідати санітарним нормам мікроклімату виробничих приміщень, що діють [42]

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 4.1.

Таблиця 4.1 - 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 супроводяться деякою фізичною напругою, при яких витрата енергії складає від 120 до 150 ккал/год

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 4.2 [42] приведені гранично допустимі концентрації небезпечних речовин, вживаних при монтажі елементів, згідно СН 245-71.

Таблиця 4.2 - 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 (рисунок 4.1).

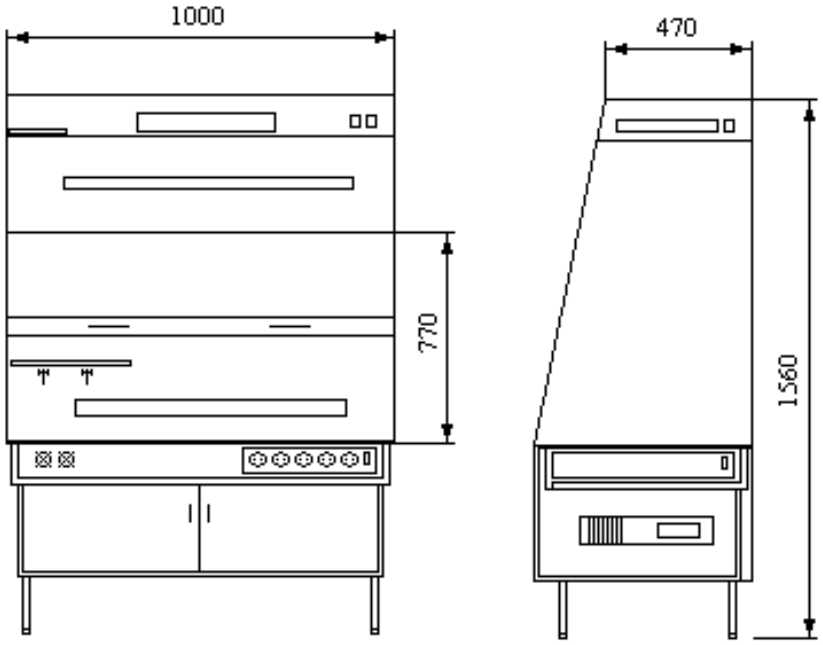


Рисунок 4.1 – Витяжна шафа для проведення експериментальних досліджень, виготовлення печатних плат і монтажу компонентів паянням

4.4 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 [42-44].

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 [42-44].

4.5 Пожежна та техногенна безпека об’єкту

Приміщення відноситься за вибухопожежною небезпекою до категорії “Б” [42-44].

Основними причинами пожеж в даному приміщенні є:

- необережне поводження з вогнем;

- незадовільний стан електротехнічних пристроїв, порушення правил їх

- монтажу та експлуатації;

- невиконання вимог нормативних документів з питань пожежної безпеки.

Приміщення за класом пожеж відноситься до категорії “Е” [43]. Це горіння обладнання та установок, які знаходяться під електричною напругою. Серед необхідних засобів гасіння пожежі в даному приміщені є два вуглеки-

слих вогнегасники типу ОУ-2. Для мінімізації виникнення пожежі в даному приміщені вчасно проводиться профілактичний огляд та ремонт електроустаткування. В приміщенні є план евакуації згідно якого люди повинні залишити приміщення у разі виникнення пожежі. Ширина шляхів евакуації в світлі повинна бути не менше 1 м, дверей - не менше 0.8 м. При дверях, що відкриваються з приміщень в загальні коридори, за ширину евакуаційного шляху коридором слід приймати ширину коридору, зменшену:

- на половину ширини дверного полотна - при однобічному розташуванні дверей,

- на ширину дверного полотна - при двосторонньому розташуванні дверей.

Висота проходу на шляхах евакуації повинна бути не менше 2 м. У підлозі на шляхах евакуації не допускаються перепади висот менше 45 см і виступи, винятком порогів в дверних отворах. Висота дверей у просвіті на шляхах евакуації повинна бути не менше 2 м.

4.6 Розрахунок місцевого освітлення робочого місця при монтажі елементів на плату

Згідно СНіП 23-05-95 для місцевого освітлення (у складі комбінованого освітлення) слід використовувати світильники з непрозорими відбивачами. Світильники місцевого освітлення слід розташовувати так, щоб їх елементи, що світять, не потрапляли прямо у поле зору працівників як даного так і інших робочих місць [43].

Вираження для освітленості даної точки “а” поверхні спостережуваного об'єкту визначається виразом:

$$E_a = \frac{J_{св}}{\lambda_{са}^{\,2}} \cos\gamma_{са}\,.$$

Тут $J_{св}$ – сила світла, що випромінюється світильником, кд/м^2; $l_{са}$ – довжина шляху світлового променя від елементу, що світить, до точки “а” спо-

стережуваного об'єкту, м; $\gamma_{ñà}$ - кут, що утворюється світловим променем в напрямі від елементу, що світить, до точки “а” і нормаллю до спостережуваної поверхні в точці “а”, рад. Розташування світильника на робочому місці показане на рисунку 4.2.

У точці “а” світильник місцевого освітлення повинен створювати освітленість, рівну нормативному значенню для місцевого освітлення (в даному випадку 180 лк), з відхиленням в межах –10% … +20%.

Визначимо силу світла, потрібну від світильника місцевого освітлення:

$$x_{св} = 20см; y_{св} = 10см; z_{св} = 20см; x_a = 20см; y_a = 30см$$

$$l^*_{са} = \sqrt{(x_{св} + x_a)^2 + (y_{св} + y_a)^2} = 56{,}6см$$

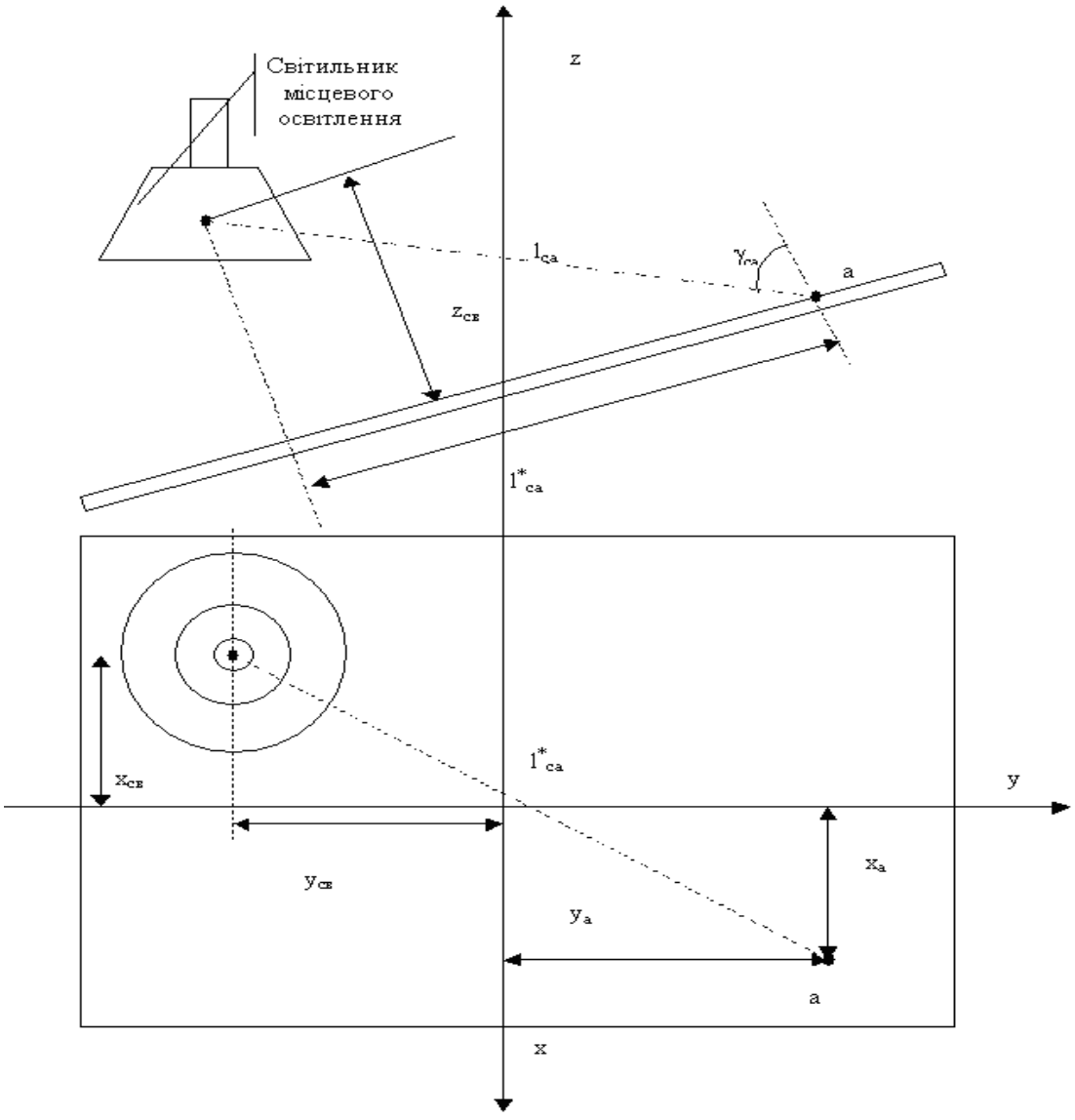


Рисунок 4.2 – Розташування світильника місцевого освітлення

$$l_{са} = \sqrt{{l^*}_{са}^{\,2} + {z_{св}}^{2}} = 60 см$$

$$\gamma_{са} = \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{z_{св}}{l_{са}}\right) = 1{,}231 рад$$

У світильнику використовується лампа розжарювання, тому для вибору лампи світильника місцевого освітлення по величині створюваного світлового потоку проведемо розрахунок:

$$\Omega_{св} = 2\pi\left\{1 - \cos\left[arctg\left(\frac{d_{св}}{2h_{л}}\right)\right]\right\} = 4{,}14$$

$$\Phi_{Л} = E_{норм.м} \cdot {l_{св.а.}}^{2} \cdot \frac{4\pi}{\cos\gamma_{са}}\left[1 + \chi_{св}\rho_{св}\left(\frac{4\pi}{\Omega_{св}} - 1\right)\right]^{-1} = 796$$

З таблиці [42] вибираємо лампу розжарювання типа БК-215-225-60 потужністю 60 Вт.

Отже, за результатами виконання роботи можна зробити наступні висновки:

1) серед багатьох прикладів розробок електростатичних мікродвигунів дуже мало саме електричних схем керування та контролю основних параметрів – напруги, струмів, механічних складових;

2) за основу роботи електростатичного двигуна використано принцип виникнення обертового моменту у роторі за рахунок кулонівських сил притягання-відштовхування між полюсами ротора і статора;

3) деталі мікродвигуна пропонується виконати за методами MUMPs-технології [27,28]. MUMPs (Multi User MEMS Process) – тришарового полікремнієвого процесу стандартної мікротехнології поверхневої обробки;

4) для фіксації точки відліку початку роботи електростатичного мікродвигуна у роботі проонується оптична система, яка складається із оптичного джерела світла –лазерного світлодіода, світловодного (отичного) волокна і фотодіода, сполученого із блоком реєстрації та керування електричними сигналами пристрою;

5) у якості випромінювача та фотоприймача використовуємо світлодіод L11767-0066L та фотодіод S1787-04 фірми Hamamatsu, оптичні характеристики яких добре узгоджуються;

6) електрична схема блоку обробки та керування сигналами електростатичного мікродвигуна складається із двох частин – мікроконтролера із логікою та силової частини;

7) робота силової частини блоку обробки та керування сигналу базується на польових транзисторах IRF840, так як розрахована напруга на виході – 500 В. Силову частину можна модифікувати для роботи з двигунами іншої потужності або з іншою напругою живлення;

8) у якості контролера використовується AT90PWM3;

9) зменшення лінійних розмірів компонент неменуче призведе до обмежень фізичних властивостей на квантовому рівні. Ці обмеження можна подолати шляхом використання принуипово нових пристроїв наноелектроніки. Можливим вирішенням проблем, які висвітлюються у розроблюваній системі може стати використання у якості силових елементів мікродвигунів одноелектронних польових транзисторів;

10) за допомогою САПР електроніки Microcap, Electronics Workbench, Proteus було проведено моделювання основних функціональних блоків системи. Результати моделювання добре узгоджуються із розрахунками.

Як рекомендації щодо розроблюваного пристрою можна відмітити наступне:

1) система може бути використана в подальших розробках МЕМС;

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

Результати роботи були предсталені на Міжнародній науково-практичній конференції Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні Запорізького національного університету «Сучасні перспективи розвитку обліку, фінансів, економіки, управління, права та інженерії».

Перелік посилань

1. G. E. Moore Progress in Digital Integrated Electronics. // Reprinted, with permission, from Technical Digest 1975. International Electron Devices Meeting // IEEE, 1975, pp. 11-13.

2. G. E. Moore Cramming More Components onto Integrated Circuits. Proceedings of the IEEE, V. 86, N. 1, Januare 1998 pp. 82-85.

3. Гірняк Ю. Мікроелектромеханічні системи у сучасному приладобудуванні / Ю. Гірняк // Вимірювальна техніка та метрологія. 2008. № 69. С10 - 15.

4. Лобур М. Основи мікросистемних пристроїв / / М. Р. Мельник . – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2016. – 258 с.

5. Головатий А. Розрахунок і конструювання робочих органів мікромеханічних гіроскопів / А. Головатий // Вісник Тернопільського технічного університету. – 2007. – Том 12, № 4. – С.20 - 25.

6. Jeremie Bouchaud, Richard Dixon. MEMS market brief, Isuppli, January – 2009. P. 23-32.

7. Павлік С. І, Зубко Є. І. Основи наноелектроніки. Навчально-методичний посібник для студентів спеціальності 6.05080102 «Мікро-та наноелектроніка». Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 50 с.

8. Готра З. Ю. Субмікронні та нанорозмірні структури наноелектроніки. Підручник / З. Ю. Готра, І. І. Григорак, Б. А. Лукіянець, В. П. Махній, С. В. Павлов, Л. Ф. Політанський, Ежи Потенські. Чернівці : Видавництво та друкарня «Технологічний центр». 2014. 839 с.

9. Hari Singh Nalva. Nanostructured materials and nanotechnology // Academic Press. 2002. 834 c.

10. Nenchev M., Deneva M., Yasser A., Suat T., Chassagne L., Himbert M., Quantum electronics and optical techniques and devices for applications inbiology,

atmosphere monitoring, optical communications and sciences // Journal of the Technical University Sofia Plovdiv branch, Bulgaria “Fundamental Sciences and Applications” Vol. 19, 2013. 7 – 22.

11. Автоматизація проектування МЕМС з використанням системи COMSOL : навч. посіб. / В. М. Теслюк, Р. З. Кривий, М. Р. Мельник . – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2016. – 216 с.

12. Філяшкін М.К. Мікроелектромеханічні системи: Навчальний посібник – Київ: НАУ, 2019. – 276 с.

13. Заячук Д. М. Нанотехнології і наноструктури. Навч. посібник. Львів : Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2009. 580с.

14. Заячук Д. М. Низькорозмірні структури і надгратки. Навч. посібник. Львів : Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2006. 220с.

15. Вакарчук І. О. Квантова механіка : підручник / І. О. Вакарчук. 4-те вид., доп. Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2012. 872 с. : 78 іл.

16. Юхновський І. Р. Основи квантової механіки: Навч. посібник. – 2-ге вид., перероб. і доп. К. : Либідь, 2002. 392 с.

17. Готра З. Ю. Субмікронні та нанорозмірні структури наноелектроніки. Підручник / З. Ю. Готра, І. І. Григорак, Б. А. Лукіянець, В. П. Махній, С. В. Павлов, Л. Ф. Політанський, Ежи Потенські. Чернівці : Видавництво та друкарня «Технологічний центр». 2014. 839 с.

18. D.V. Averin and K.K Likharev Mesoscopic Phenomena in Solids, edited by B.L. Altshuler, P.A. Lee, and R.A. Webb (Elsevier, Amsterdam, 1991)

19. Thijssen J. M., van der Zant H. S. Charge transport and single-electron effects in nanoscale systems // Phys. Status Solidi B. - 2008. - V. 245. - N 8. - P. 1455 – 1470.

20. Yu. O. Kruglyak, M. V. Strikha. Uzahalnena model elektronnoho transportu v mikro- i nanoelektronitsi // Sens. elektron. mikrosist. tehnol. – 2015. – t. 12, No. 3. S. 4 – 27 (in Ukrainian).

21. Electromagnetics and Applications // матеріали сайту URL : https://phys.libretexts.org/@go/page/24983(дата звернення 01.08.2024).

22. G. Chen, J. Zhang, Z. Fan, X. Gao, Y. Ye An electrostatic micromotor based on electrets. IET Nanodielectr. 2023. - №6.- p. 276–281

23. Dadkhah, M., et al.: Voltage-induction synchronous electrostatic motor.

Int. J. Adv. Des. Manuf. Technol. 77(1-4), 145–164 (2015). матеріали сайту URL : https://doi. org/10.1007/s00170-014-6385-3(дата звернення 01.08.2024).

24. Yamashita, N., et al.: Evaluation of an electrostatic lm motor driven by two-four-phase ac voltage and electrostatic induction. In: Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1572–1577. IEEE (2007)

25. Baginsky, I.L., Kostsov, E.G.: Electrostatic micromotor based onferroelectric ceramics. J. Micromech. Microeng. 14(11), 1569–1575 (2004). матеріали сайту URL : https://doi.org/10.1088/0960-1317/14/11/019(дата звернення 01.08.2024).

26 Nagle, S.F., et al.: An electric induction micromotor. J. Microelectromech.Syst. 14(5), 1127–1143 (2005). матеріали сайту URL : https://doi.org/10.1109/jmems.2005. 851816 (дата звернення 01.08.2024).

27. Plummer, James D. et.al. Silicon VLSI Technology: Fundamentals, Practice and Modeling : Prentice Hall, 2000. pp 50-60.

28. Koester, David, et.al. PolyMUMPs Design Handbook, rev. 9.0. July 2003.

29. Матеріали сайту seltokphotonics.com URL https://seltokphotonics.com/catalog/hamamatsu-l11767-0066l-chervonyy-svitlodiod-led-660-nm-7-mw/(дата звернення 01.08.2024).

30. Нелін Є. Я. Конспект лекцій з дисципліни "Інтегральна і функціанальна електроніка". Розділ "Наноелектроніка". Київ : КПІ, 1994. 24 с.

31. Цирульник С. М. Проектування мікропроцесорних систем : навчальний посібник / С. М. Цирульник, Г. Л. Лисенко. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 201 с.

32 Матеріали сайту Avislabсайт для палких паяльників URL : https://blog.avislab.com/brushless08/ (дата звернення 01.08.2024).

33. Матеріали сайту vishay URL : https://www.vishay.com/docs/91000/disclaimer.pdf (дата звернення 01.08.2024).

34. Матеріали сайту alldatasheet URL : https://www.alldatasheet.com (дата звернення 01.08.2024).

35. Матеріали alldatasheet сайту Semiconductor Components Industries, LL https://www.mini-tech.com.ua(дата звернення 01.08.2024).

36. Мікропроцесорні та мікроконтролерні системи : Лабораторний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. освітньої програми «Інтегровані інформаційні системи» спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології», / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: А.О. Новацький. – Електронні текстові дані (1 файл: 18.983 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 247 с. URL : https://ist.kpi.ua/wp-content/uploads/2019/02/ПОСІБНИК-МОДЕЛЮВАННЯ-В-PROTEUS.pdf (дата звернення 01.08.2024).

37. О. С. Мельник, О. С. Пономарьов, Модель одноелектронного нанотранзистора для автоматизації схемотехнічного проєктування// Електроніка та системи управління. 2011. №2 (28).

38. Yu Y. S. Modelling of Single-Electron Transistors for Efficient Circuit and Design // IEEE Trans. Electron. Devices. 1999. №7. P. 1667 – 1682.

39. Hwang S. W. KOSEC developed at Nanoelectronics Laboratory in Korea University / S. W. Hwang Seoul, Korea, 2008. 825 p

40. Field-effect tunneling transistor based on vertical graphene heterostructures / L. Britnell, R. V. Gorbachev, R. Jalil et al. // Science. 2012. V. 335, № 6071. P. 947 - 950.

41. Основи наукових досліджень : навч. посіб. / за заг. ред. Т. В. Гончарук. Тернопіль, 2014. 272 с.

42. Бєгун В. В., Науменко І. М. Безпека життєдіяльності : Навч. посібник. Київ : МОНУ, 2004. 328 с.

43. 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.

44. 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.

Додаток 1

Міністерство освіти і науки України
Запорізький національний університет
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні ЗНУ
Національний університет «Києво-Могилянська академія» (м. Київ)
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара (м. Дніпро)
Університет митної справи та фінансів (м. Дніпро)
Полтавський державний аграрний університет (м. Полтава)
Хмельницький університет управління та права імені Леоніда Юзькова (м.Хмельницький)
Криворізький національний університет (м. Кривий ріг)
ДВНЗ «Донбаський державний педагогічний університет» (м. Дніпро)
Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича (м. Чернівці)
Міністерство внутрішніх справ
Запорізький науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України
Державна аудиторська служба України
Управління Східного офісу Держаудитслужби в Запорізькій області
Технічний Університет Молдови (республіка Молдова, м. Кишинев).
Маріямпольський університет прикладних наук (Маріямполе, Литва)
Університет Александраса Стульгінскіса (Каунас, Литва)
Університет Вітаутаса Великого (Каунас, Литва)
Університет Ромернса (Литва)
Інститут розвитку міжнародної співпраці (Республіка Польща)
Вища Школа Управління Охороною Праці в Катовіцах (Республіка Польща)
Ченстоховський Технологічний Університет (м. Ченстохова, Республіка Польща)
Гуманітарно-Природничий Університет ім. Яна Длугоша в Ченстохова
(м. Ченстохова, Республіка Польща).



Міжнародна науково-практична конференція

Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні

Запорізького національного університету

«Сучасні перспективи розвитку обліку, фінансів, економіки, управління, права та інженерії»

(Режим роботи дистанційний)

5 – 6 грудня 2024 р.

м. Запоріжжя

Організаційний комітет

Голова оргкомітету

Фролов М.О. – д.і.н., професор, заслужений працівник освіти України, академік Академії наук вищої освіти України, в.о. ректора ЗНУ.

Васильчук Г.М. – д.і.н., професор, проректор з наукової роботи ЗНУ.

Заступник голови:

Метеленко Н.Г. – д.е.н., професор, академік Академії економічних наук України, директор Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні ЗНУ.

Меліхова Т.О. – д.е.н., професор, академік Академії економічних наук України, завідувач кафедри обліку, аналізу, оподаткування та аудиту ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ

Каркоцький І.О. – директор Запорізького НДЕКЦ МВС.

Члени оргкомітету:

Адамовська В.С. – к.е.н., доцент, завідувач кафедри обліку, оподаткування, публічного управління та адміністрування Криворізького національного університету.

Ажажа М.А. – д.н.з держ. упр., професор, професор кафедри управління та адміністрування ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ.

Арутюнян І.А. – д. т. н., професор, завідувач кафедри промислового та цивільного будівництва ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ.

Банах А.В. – к. т. н, доцент, завідувач кафедри міського будівництва та господарства ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ.

Бєлоконь К.В. – к.т.н., доцент, заст. директора з наукової роботи ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ.

Бєлоконь Ю. О. – д.т.н., професор, завідувач кафедри металургійних технологій, екології та техногенної безпеки ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ.

Власов А.О. – к.т.н., доцент, завідувач кафедри металургійного обладнання ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ.

Воронкова В.Г. – д.ф.н., професор, завідувач кафедри управління та адміністрування ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ.

Глущевський В.В. – д.е.н., професор, професор кафедри інформаційної економіки, підприємництва та фінансів ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ.

Грешко Р.І. – к.е.н., доцент, декан економічного факультету Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича

Івановська А.М. – д.ю.н., професор, проректор зі стратегічного розвитку, наукової роботи та зовнішніх зв'язків Хмельницького університету управління та права імені Леоніда Юзькова.

Клопов І.О., д.е.н., професор, в.о. завідувача кафедри інформаційної економіки, підприємництва та фінансів ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ.

Коваленко В.Л.– д.т.н., професор, завідувач кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ.

Коверга С.В. – д.е.н., професор, академік Академії економічних наук України, професор кафедри управління та адміністрування ДВНЗ «Донбаський державний педагогічний університет».

Коломоєць Т.О. – д.ю.н., професор, член - кореспондент НАПрН України, Заслужений юрист України, декан юридичного факультету ЗНУ.

Корнеєва Н.М. – заступник директора Запорізького НДЕКЦ МВС.

Критська Т. В. – д.т.н., професор, завідувач кафедри електроніки, інформаційних систем і програмного забезпечення ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ.

Мамонова АА. – заступник начальника управління – начальник відділу управління Східного офісу Держаудитслужби в Запорізькій області

Макаренко А.П. – д.е.н., професор, професор кафедри обліку, аналізу, оподаткування та аудиту ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ.

Макаренко П.М. – д.е.н., професор, завідувач кафедри економіки та міжнародних економічних відносин Полтавського державного аграрного університету.
Макаренко Ю.П. – д.е.н., професор, професор кафедри фінансів, банківської справи та страхування Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.
Меліхов Є.В. – асистент кафедри інформаційної економіки, підприємництва та фінансів ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ, аспірант 073 «Менеджмент».
Мержинський Є. К. – к.е.н., доцент, доцент кафедри інформаційної економіки, підприємництва та фінансів ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ, директор Центру Польської культури, освіти, науки та євроінтеграції ім. Яна ІІІ Собеського.
Мусійченко О.Г. - асистент кафедри обліку, аналізу, оподаткування та аудиту ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ, бухгалтер-практик.
Оглобліна В.О. – к.е.н., доцент, доцент кафедри інформаційної економіки, підприємництва та фінансів ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ.
Подмешальська Ю.В. – к.е.н., доцент, доцент кафедри обліку, аналізу, оподаткування та аудиту ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ.
Птіцина Л.А. – к.е.н., доцент кафедри обліку, аналізу, оподаткування та аудиту ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ.
Рафаель Чилочі – д.е.н., проф., декан факультету економіки та бізнес-інжинірингу Технічного Університету Молдови.
Синиця Ю.С. - к.е.н., доцент, доцент кафедри обліку, аналізу, оподаткування та аудиту ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ.
Тараненко В.Є. – к.е.н., доцент, завідувач кафедри соціального забезпечення та податкової політики Університету митної справи і фінансів (м. Дніпро).
Феофанов Л.К. – к.е.н., доцент, доцент кафедри обліку, аналізу, оподаткування та аудиту ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ.
Храпкіна В.В. – д.е.н., професор, професор кафедри маркетингу та управління бізнесом НУ«Києво-Могилянська академія».
Шапуров О.О. – д.е.н., професор, заступник директора з навчально-виховної роботи ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ.
.

УДК 620.3

СвітанькоМ.В., к.ф-м.н., доцент, доцент кафедри електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення, Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні ЗНУ, м. Запоріжжя

Щербань А.А., магістрант 2 курсу спеціальності 176 «Мікро- та наносистемна техніка», Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні ЗНУ, м. Запоріжжя

Тотьмянин Д.О., магістрант 2 курсу спеціальності 176 «Мікро- та наносистемна техніка», Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні ЗНУ, м. Запоріжжя

Пупирев Д.Є., магістрант 2 курсу спеціальності 176 «Мікро- та наносистемна техніка», Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні ЗНУ, м. Запоріжжя

МІКРОЕЛЕКРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА ЛЕКТРОСТАТИЧНОГО МІКРОДВИГУНА

На початку 2000-х років, згідно закону Мура [1], стало зрозумілим, що подальший розвиток мікроелектроніки повинен, або вичерпати свої можливості, або вийти на принципово новий етап технологічного розвитку. Таким етапом став розвиток мікроелекромеханічних систем (далі – МЕМС) [2].

Але, зменшення розмірів електронних компонент від мікрометрів до нанометрів неминуче призведе до зменшення розмірів усієї системи. Це в свою чергу призведе до обмеженості використання при розробці таких систем законів класичної фізики та електромеханіки [3,4].

Наразі існує досить мало моделей і систем, які б поєднували в собі пристрої наноелектроніки і механіки на квантово-механічному рівні.

Тому актуальним є питання по розробці наноелектронних мікромеханічних пристроїв.

У роботі пропонується МЕМС електростатичного мікродвигуна.

У якості загальної структурної схеми була обрана схема, представлена на рисунку 1.

Структурна схема включає безпосередньо електростатичний мікродвигун, блок обробки та керування сигналами, блок оптичного налаштування сигналами, блок оптичного налаштування мікродвигуна, персональний комп’ютер для автоматизованого управління роботою мікродвигуна.

За основу роботи електростатичного двигуна використано принцип виникнення обертового моменту у роторі за рахунок кулонівських сил притягання-відштовхування між полюсами ротора і статора.

Виготовлення деталей мікродвигуна пропонується виконати за методами MUMPs-технології [5].

Для фіксації точки відліку початку роботи електростатичного мікродвигуна у роботі пропонується оптична система, яка складається із оптичного джерела світла – лазерного світлодіода, світловодного (оптичного) волокна і фотодіода, сполученого із блоком реєстрації та керування електричними сигналами пристрою.

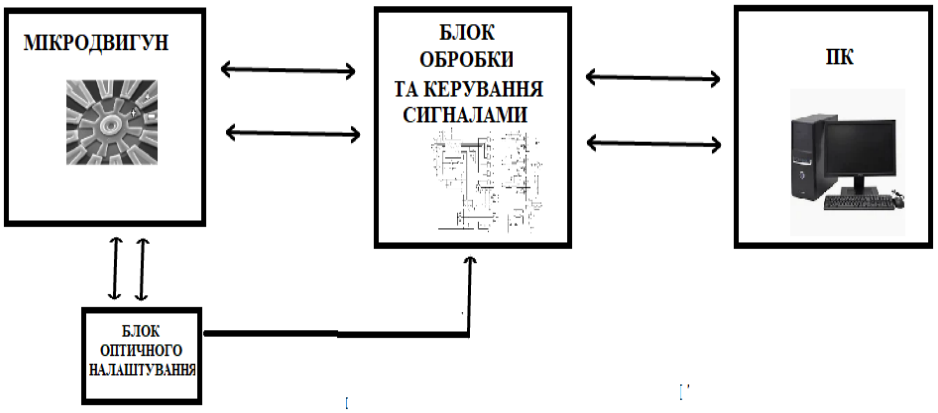


Рисунок 1 – Структурна схема системи керування параметрами електростатичного мікродвигуна

Блок обробки та керування сигналами складається із мікроконтролерної частини ти силової частини, яка безпосередньо керує роботою електростатичного двигуна.

Представлена розробка може стати перехідною моделлю в процесі трансформації мікромеханізмів до наноелектронних комплексів.

Як удосконалення системи, розглядається можливість використання в електронній складовій електростатичного мікродвигуна елементів одноелектроніки.

Література

1. G. E. Moore Cramming More Components onto Integrated Circuits. Proceedings of the IEEE, V. 86, N. 1, Januare 1998 pp. 82-85.

2. Jeremie Bouchaud, Richard Dixon. MEMS market brief, Isuppli, January 2009. pp. 23-32.

3. Готра З. Ю. Субмікронні та нанорозмірні структури наноелектроніки. Підручник / З. Ю. Готра, І. І. Григорак, Б. А. Лукіянець, В. П. Махній, С. В. Павлов, Л. Ф. Політанський, Ежи Потенські. Чернівці : Видавництво та друкарня «Технологічний центр», 2014. 839 с.

4. Філяшкін М.К. Мікроелектромеханічні системи : Навчальний посібник Київ : НАУ, 2019. 276 с.

5. Koester D., et. al. PolyMUMPs Design Handbook, rev. 9.0. July 2003.