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 п'єзоелектричних мікродвигунів

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)

Д.О. Тотьмянін
(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)

Тотьмяніну Данилу Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проєкту) *Дослідження та розробка системи керування параметрами п'єзоелектричних мікродвигунів*

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, 30 – 200 кГц Proteus, Electronics Workbench*

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)*1. П'єзоелектричні мікродвигуни 2. Система керування параметрами п'єзоелектричного 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 п'єзоелектричні мікродвигуни 2. Структурна схема системи керування параметрами п'єзоелектричного мікродвигуна 3. Електро-*

механічна схема п'єзоелектричного мікродвигуна4. Електро-фізичні властивості п'єзоелементів 5 Електрична схема генератора керуючих сигналів 6. Моделювання роботи схеми генератора 7. Схема оптичного каналу системи зворотного звяку п'єзоелектричного мікродвигуна 8. Схема зворотного звяку системи керування параметрами п'єзоелектричного 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 _____ _____*Тотьмянін Д.О.*_____
(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 72 сторінок, 38 рисунків, 13 таблиць, 25 джерел літератури.

Об’єкт дослідження – п’єзоелектричні мікродвигуни.

Мета роботи – дослідження та розробка системи керування параметрами п’єзоелектричних мікродвигунів.

Завдання роботи – розробити схему функціювання п’єзоелектричного мікродвигуна; провести моделювання струмових та напругових характеристик п’єзоелектричного мікродвигуна за допомогою САПР електронних схем; розглянути можливість практичного використання п’єзоелектричного мікродвигуна у системах позиціювання скануючої мікроскопії.

Методика досліджень – моделювання пристрою за допомогою програмних забезпечень Proteus.

Короткий виклад результатів досліджень – розроблено систему керування параметрами п’єзоелектричного мікродвигуна, проведено моделювання роботи у складі системи автоматизованого вкуруання атомно-силовим мікроскопом.

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

Прогнозні пропозиції – запропоновано подальше удосконалення шляхом використання використання п’єзоелектричного мікродвигуна у системах позиціювання скануючої мікроскопії.

П’ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИЙ МІКРОДВИГУН, СКАНУЮЧА МІКРОСКОПІЯ, МІКРОКОНТРОЛЕР, 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. П’єзоелектричні мікродвигуни ……..... 7

1.1 Застоування п’єзоелектриків у конструкціях п’єзоелектричних мікродвигунів ……... 7

1.2 Блокові п’єзоелектричні виконавчі механізми ……... 8

1.3 П’єзоелектричні біморфні виконавчі механізми ……. 11

1.4 Лінійні крокові п’єзоелектричні мікродвигуни …….. 17

1.5 Резонансні п’єзодвигуни…… 20

2. Система керування параметрами п’єзоелектричного мікродвигуна ….. 24

2.1 Структурна схема системи керування параметрами п’єзоелектричного мікродвигуна ……... 24

2.2 Генератор керуючих сигналів п’єзоелектричного мікродвигуна…….. 31

2.3 Схема зворотнього зв’язку системи керування параметрами п’єзоелектричного мікродвигуна ……... 40

2.3.1 Схема системи керування параметрами п’єзоелектричного мікродвигуна……... 40

2.3.2 Схема оптичного каналу системи зворотного звяку п’єзоелектричного мікродвигуна…… 42

3. Техніко - економічне обґрунтування виготовлення електронної схеми генератора керуючих сигналів системи керування параметрами п’єзоелектричних мікродвигунів …… 48

3.1 Обґрунтування вибору технології виготовлення електронної схеми схеми генератора керуючих сигналів системи керування параметрами п’єзоелектричних мікродвигунів …….. 48

3.2 Розрахунок витрат на виготовлення електронної схеми схеми генератора керуючих сигналів системи керування параметрами 50

п’єзоелектричних мікродвигунів ……..... 53
4 Охорона праці та техногенна безпека при розробці електричних схем для системи керування параметрами п’єзоелектричних мікродвигунів 4.1
4.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих 54
виробничих факторів…….. 54
4.2 Заходи зі зменшення впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів…… 56
4.3 Виробнича санітарія……... 56
4.4 Електробезпека……... 57
4.5 Пожежна та техногенна безпека об’єкту …….. 59
4.6 Розрахунок освітлення робочого місця …….. 60
Висновки та рекомендації……... 63
Перелік посилань……..…… 65
Додаток 1…… 68

Вступ

Поява нового напрямку розвитку мікро- та наноелектроніки як у технологічному, так і у схемотехнічному аспектах - мікроелекромеханічних систем (МЕМС), відкриває перед нами не тільки перспективи створення прнципово нових пристроїв та систем, але і можливість удосконалення добре відомих і достатньо розвинених [1-4].

Так, наприклад, у добре відомому методі дослідження та формування наноповерхонь – атомно силовій мікроскопії одним із обмежувальних факторів більш ефективного його використання є проблема точного позиціювання одного із основних елементів – кантилевера. [1-4].

Механічні елементи керування зондом атомно-силового мікроскопа не завжди можуть забезпечити необхідну точність, проведення експериментальних і технлогічнх операцій, яка висувається до апаратури подібного рівня (0,1 нм) [1-4].

Одним із шляхів вирішення цієї пробеми може стати використання такого елемента МЕМС, як п’єзоелектричний мікродвигун [1-4].

Але, застосування подібного мініатюрного пистрою потребує не тільки надточних розмірів його основних складових, а і ефективної системи контролю електричних параметрів.

Тому актуальним є питання розробки п’єзоелектричних мікродвигунів та систем контролю параметрів їх функціювання.

1. П’єзоелектричні мікродвигуни

1.1. Застоування п’єзоелектриків у конструкціях п’єзоелектричних мікродвигунів

Мініатюрні п’єзодвигуни використовують для точного пози-ціонування у сферах мікросистемної техніки.

В основу принципів роботи мініатюрних п’єзодвигунів пок-ладено метод побудови п’єзоактюаторів.

П’єзоелектричний мікроактюатор це актюатор, побудований на використанні зворотного п’єзоелектричного ефекту, який проявляється в зміні розмірів п’єзоелектрика під дією зовнішнього електричного поля.

Основна формула для зворотного п’єзоелектричного ефекту формулюється так [5-11]:

$$k\, d_{\text{зв}} E \tag{1.1}$$

де k величина відносної деформації п’єзоелектрика; $d_{\text{зв}}$ коефіцієнт зворотногоп’єзоефекту; E напруженість електричного поля.

Для отримання п’єзоелектричного ефекту п’єзоелектричну кераміку треба піддавати процесу поляризації, а для поліпшення п’єзоелектричних властивостей структура кристала повинна бути асиметричною.

Приклади, які демонструють принцип дії згинальних одношарових п’єзоелектричних актюаторів показано на рис 1.1. На рис. 1.1, *а* шар п’єзоелектрика осаджений на балку. Коли на п’єзокерамічну пластину впливає керувальна напруга, вона або стискається, або розширюється пропорційно прикладеній напрузі. Оскільки підкладка не змінює своєї довжини, то через стиснення або розширення п’єзокераміки актюатора вигинається пропорційно прикладеній напрузі. Такий же принцип можна застосувати і до тонкої кремнієвої мембрани (рис. 1.1, *б*). Якщо прикласти напругу, то мембрана деформується [5-11].



Рисунок 1.1 Принцип дії одношарових п’єзоелектричних актюаторів

Якщо як підкладку використовують другу п’єзокерамічну пластину, то замість одношарового отримують двошаровий виконавчиймехаізм. У такому переміщувачі кожна пластина працює на розтяг або стискання зустрічно іншій пластині. Найбільшого поширення в п’єзомеханіці набули саме дво- і багатошарові виконавчі механізми [5-11].

Як матеріали підкладок і мембран можна використовувати: кремній, діоксид та нітрид кремнію, карбід кремнію та навіть алма-зи. Струмопровідні плівки виготовляють з платини, титану, моліб-дену, алюмінію, золота, хрому. Шари п’єзоелектрика формуються з цирконат-титанату свинцю (PZT), нітриду алюмінію, оксиду цинку та ін [5-11].

П’єзоелектричні актюатори бувають таких видів: блокові актюатори, багатошарові актюатори, а також п’єзоелектричні двигуни.

1.2 Блокові п’єзоелектричні виконавчі механізми

Принцип конструкції п’єзоелектричних блокових виконавчих механзмів представлено на рисунку 1.2 [5-11].

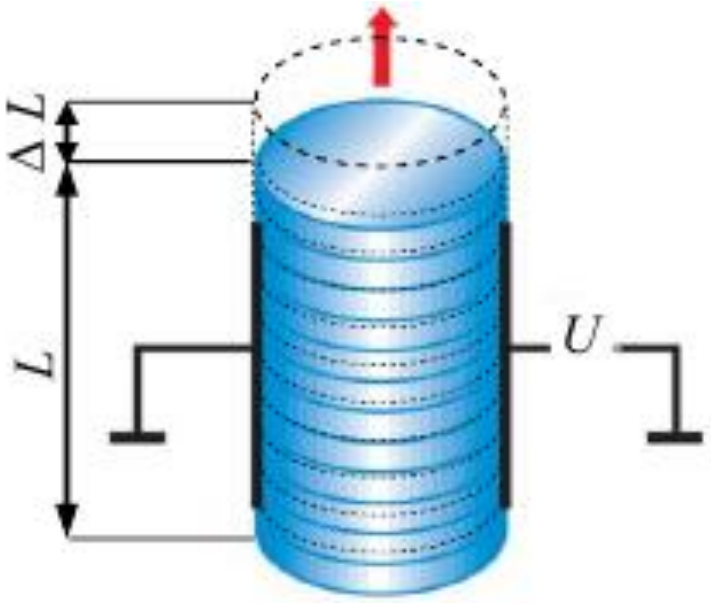


Рисунок 1.2 Принцип конструкції п’єзоелектричного блокового виконавчого механізму [5-11]

Виконавчим елементом є пакет окремих шарів п’єзоелектричної кераміки, які кон-тактують один з одним. Електроди, які використовують для приведення в дію механізма з’єднані паралельно,тому полярність прикладеного електричного поля викликає однакову поляризацію в кожному шарі. Якщо хід одиночного п’єзокерамічного елемента $d_{од}$ вимірюється в мікронах, то для кількох таких елементів, складених разом у пакет, хід збільшується. Результуючий вихідний зсув актюатора складається з відносних деформацій всіх п’єзоелементів блока, що мають однаковий знак [5-11]:

$$\Delta L = d_{од}\, n\, U. \qquad (1.2)$$

Максимальна деформація (відношення ходу до висоти паке-та) для блокового актюатора може становити від 0,15% до 0,2% від висоти пакета.

Такі виконавчі механізми є оптимальними, коли потрібен великий зсув, оскільки амплітуда вихідного зміщення актюатора підсилюється залежно від кількості шарів у блоці. Основним матеріалом для твердотільних блокових виконавчих механізмів залишається цирконат-титанату свинцю (PZT).

Зображення мікроскопічної структури десятишарового PZT MEMC-актюатора, показано на рис 1.3[5-11].

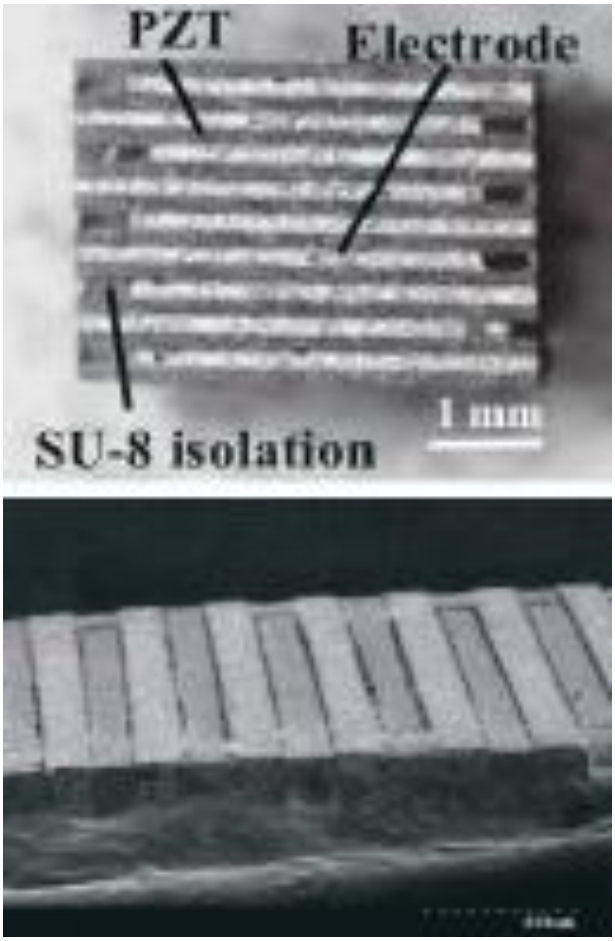


Рисунок 1.3 Десятишаровий PZT MEMC-актюатор [5-11]

Головною перевагою блокових п’єзоелектричних актюаторів є безпрецедентна точність позиціонування соті та навіть тисячні частки нанометра. Крім того, вони надійні, довговічні, мають високу швидкість спрацьовування (у діапазоні мікросекунд), розвивають високі прискорення та мають велику ви-хідну потужність. Саме тому п’єзоелектричні механізми покладені в основі сучасних напівпровідників літографічних інструментів, атомносилових мікроскопів та інших нанорозмірних прецизійних систем.

Ще однією конструкцією, що використовує блокові актюатори, є конструкція згинальнонатяжних актюаторів. Такі пристрої перетворюють невеликий зсув

багатошарового п’єзокерамічного елемента в деформацію вигину двох металевих пластин, що охоплюють цей елемент. Завдяки механічному підсиленню такого перетворення згинальнонатяжні актюатори демонструють багаторазове збільшення зсуву порівняно з блоковими актюаторами. Залежно від форми їх конструкції (рис. 1.4) згинально-натяжні актюатори отримали назву «мууні» (еліпсоїдні) і «кімвал» (тарілкові). Модифікація «кімвал» може демонструвати набагато більші переміщення (зсув) порівняно з базовою конструкцією [5-11].

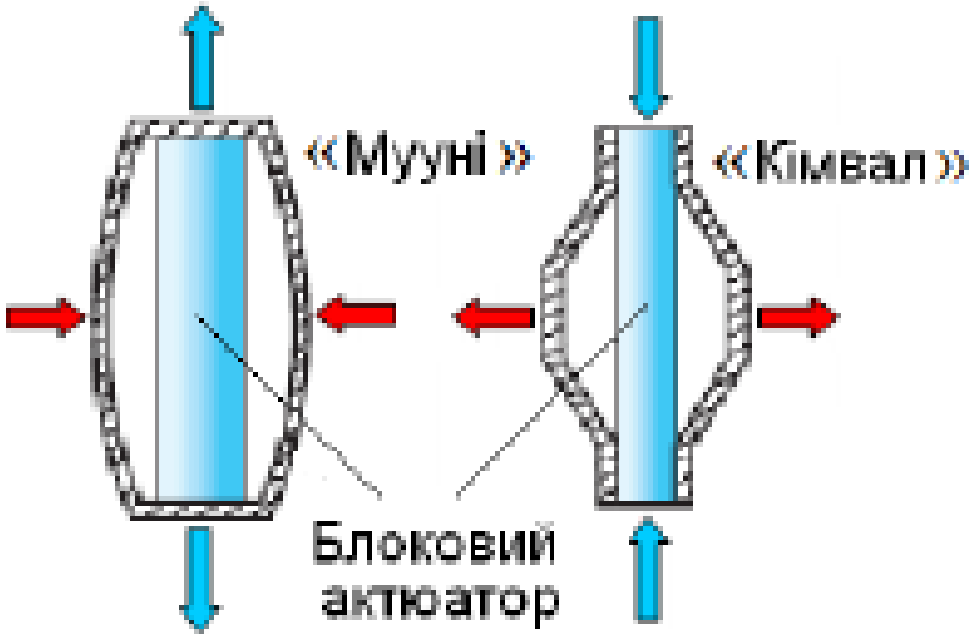


Рисунок 1.4 Згинально-натяжні виконавчі механізми [5-11]

1.3 П’єзоелектричні біморфні виконавчі механізми

Біморфна (двошарова) конструкція збільшує зміну розмірів п’єзопластин, чим досягається значне відхилення актюатора, яке досягає рівня декількох міліметрів за відносно малих розмірів ак-тюатора. Єдине обмеження це те, що плівки повинні бути досить товстими для запобігання

діелектричному пробою або короткому замиканню, це може статися за надто високої напруги керування.

Біморф складається з двох тонких склеєних між собою п’єзокерамічних пластин з прокладкою між ними або без неї. П’єзокерамічні пластини найчастіше виготовляються з модифіко-ваного цирконат-титанату свинцю. На п’єзокерамічні пластини на-носяться електроди зі срібла або нікелю.

Після нанесення на п’єзокерамічні пластини електродів, вони поляризується в сильному постійному елек-тричному полі і набувають п’єзо-електричних властивостей [5-11].

Зазвичай біморфи монтуються у вигляді консолі (рис. 1.5), стандартна вільна довжина Lв якої становить приблизно 85% від загальної довжини L

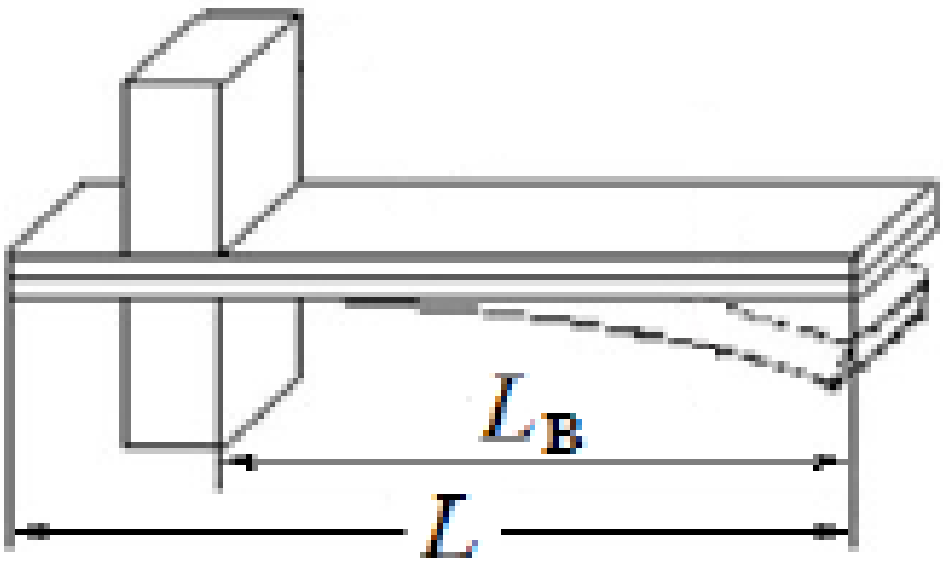


Рисунок 1.5 П’єзоелектричний біморфний виконавчий механізм [5-11]

Біморф, складений з двох пластин, напрямок поляризації яких однаковий, називають паралельним біморфом. Біморф, у яко-му поляризація пластин має протилежний напрямок, позначають як послідовний біморф.

Керування формою біморфа здійснюється поданням електричної напруги на електроди, що нанесені на п’єзопластини.

У послідовному біморфі пластини з’єднані з джерелом живлення послідовно (рис. 1.6, *а*). У цьому випадку на пластину з додатною

полярністю впливає додатна напруга і завдяки зворотному п’єзоелектричному ефекту вона подовжується, тоді як пластина від’ємної полярності не працює і перешкоджає цій зміні довжини, що і призводить до вигину біморфа. Спосіб умикання паралельного біморфа такий (рис. 1.6, б): два зовнішні електроди підключають до одного виводу.

Другим виводом слугує центральний електрод. Паралельний біморф розвиває зусилля у два рази більші ніж послідовний біморф [5-11].

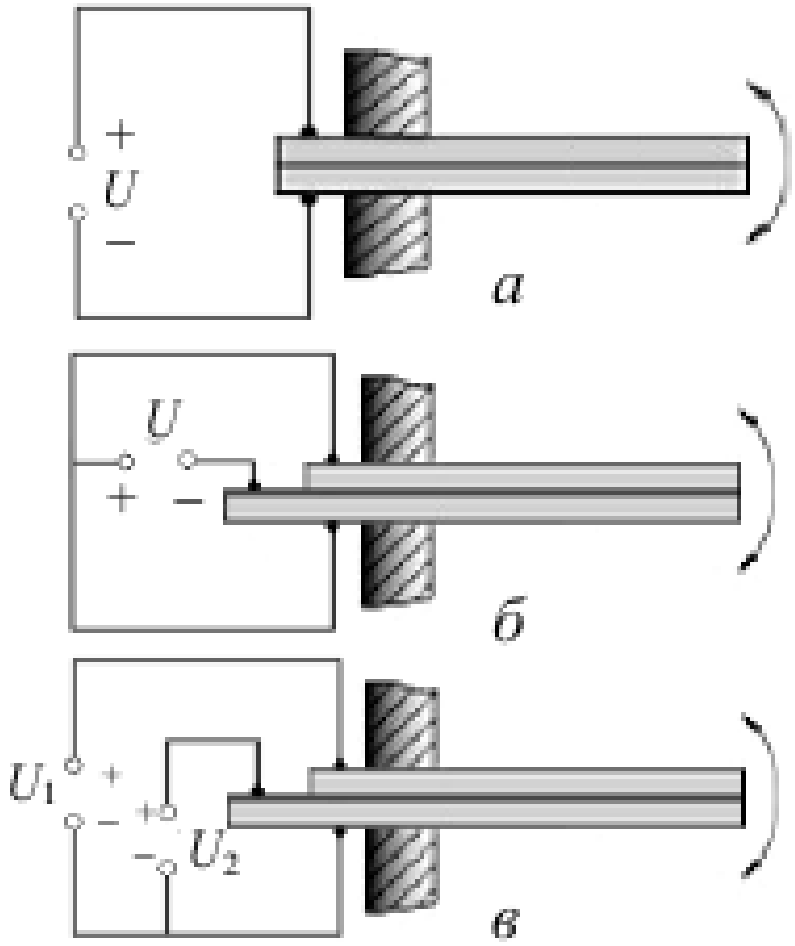


Рисунок 1.6 Послідовні і паралельні біморфи виконавчого механізма [5-11]

У послідовному біморфі одна з пластин завжди буде перебувати під напругою, зворотною напрузі поляризації, що створює небезпеку деполяризації. Це також справедливо і для паралельного біморфа (див. рис.1.6, *б*) [5-11].

Для усунення можливого дефекту деполяризації пластин до-цільно вмикати біморф за схемою (рис. 1.6, *в*), де обидві пласти-ни збуджуються в напрямку поляризації, а подача напруги зсуву дозволяє уникнути дрейфу характеристик, що викликається депо-ляризацією, підвищує чутливість та збільшує термін експлуатації.

Забезпечуючи переміщення до 5 мм, біморфні актюатори здатні розвивати прийнятне значення зусилля до 5Н за низьких значень напруги збудження 20 ... 150 В [5-11].

Біморфні п’єзоелектричні актюатори знаходять широке застосування в сучасних мікромеханічних системах, де потрібні відносно невеликі механічні переміщення з максимальною чутливістю. Приклад використання біморфних актюаторів для регулю-ванні з нанометричною точністю лінз, дзеркал, оптичних приладів показано на рис. 1.7 , *а*, а приклад біморфів як пристроїв керування гідравлічними та пневматичними клапанами на рис. 1.7, *б* [5-11].

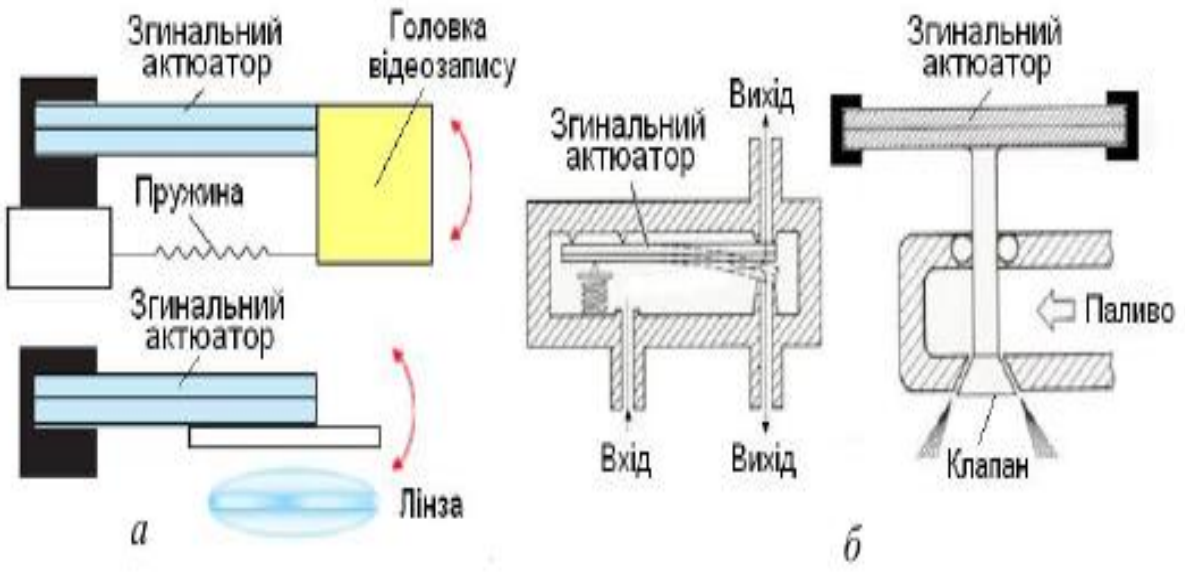


Рисунок 1.7 Приклад використання біморфних виконавчих механізмів

Біморфи можна використовувати і як окремі мініатюрні пристрої. На рис. 1.8, а показано зовнішній вигляд мініатюрних біморфних п’єзоактюаторів серії PI-140, які поставляються з керувальним контролером (рис. 1.8, б). Такі актюатори з датчиком положенняє ідеальними пристроїями для сканування, позиціонування та керування відхиленням лазерного

променя, які застосовуються у сканерах атомносилових мікроскопів (рис. 1.9). Вони забезпечують значно вищі точність, повторне позиціонування та швидкість відгуку, ніж стандартні актюатори без зворотного зв’язку [8,9,12].

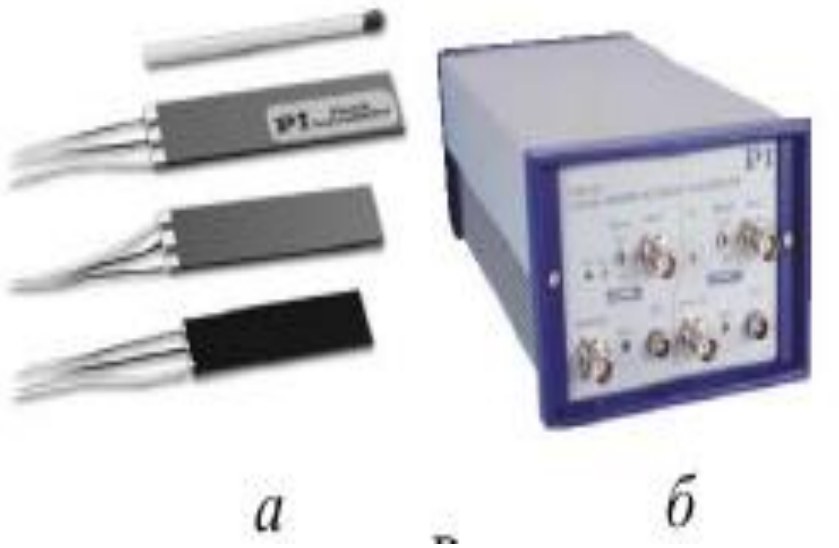


Рисунок 1.8 Вигляд мініатюрних біморфних п’єзоактюаторів серії PI-140 [5-11].

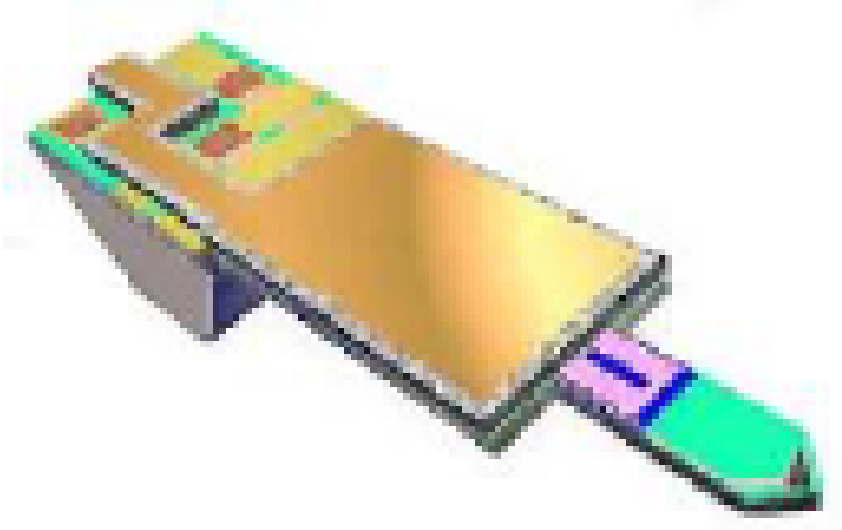


Рисунок 1.9 Кантилевер атомно-силового мікроскопа на біморфному ввиконавчому механізмі [8-9, 12]

Основні переваги біморфів порівняно з аналогічними електронними елементами: низька вартість; мале споживання енергії; значна величина переміщення (до 5 мм) і достатнє зусилля (до 5 Н); висока швидкодія та довговічність (до 100 млн циклів).

Різновидом згінальних актюаторів є дискові згинальні актюатори (рис. 1.10, а). Дискові згинальні актюатори затискаються по діаметру і під дією прикладеної напруги набувають форми купола. Переміщення, які можуть здійснювати дискові біморфи, невеликі - до 200 мкм, але при цьому вони мають субнанометричну роздільну здатність [5-11].

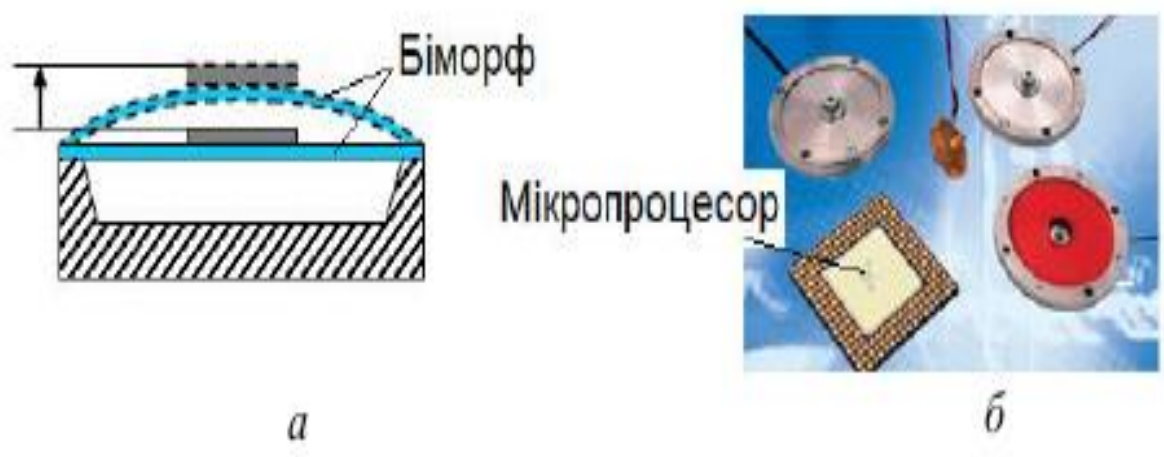


Рисунок 1.10 Дискові згинальні виконавчі механізми [5-11]

Як переваги дискових актюаторів порівняно з пакетними по-вторювачами можна відзначити відносно невисоку вартість і плос-ку конструкцію. Використовують як у статичному, так і в динаміч-ному режимі роботи. Дискові актюатори можуть бути одно- і дво-дисковими. На рис. 1.10, *б* показані дискові повторювачі німецької компанії *Physic Instrumente* (PI), які співмірні з розмірами мікропроцесора [5-11].

1.4 Лінійні крокові п’єзоелектричні мікродвигуни

Базова конструкція лінійного крокового п’єзодвигуна містить Н-подібну групу п’єзоактюаторів (рис. 1.11), два з яких діють як актюатори затискачі (гальма), а два других блокових актюатора - як ходові двигуни. Актюатори затискачі керуються прямокутними сигналами, а ходові - пилкоподібними. Завдяки цьому є можливість реалізовувати принцип дроблення кроку і зупиняти п’єзодвигун на будьякому такті напруги, яка формує ходову пилу [5-11].

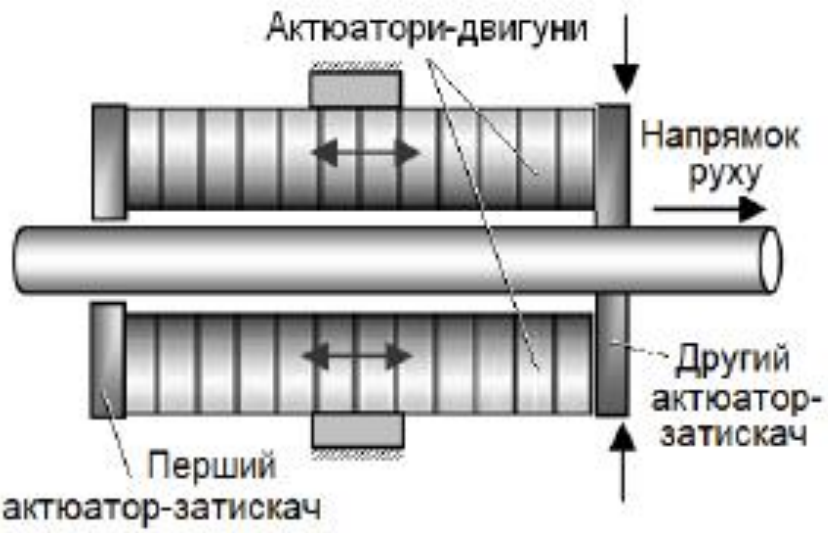


Рисунок 1.11 Конструкція лінійного крокового п’єзодвигуна [5-11]

1Робочий цикл такого п’єзодвигуна складається з декількох етапів (рис. 11.2): перший гальмувальний актюатор приводиться в дію і затискає один кінець штока двигуна; на актюатор-двигун подається напруга, і він приводиться в дію - подовжується; другий актюатор-затискач після максимального кроку актюатора-двигуна затискає його; з першого гальмувального актюатора знімається напруга, і він розблоковує шток двигуна; блоковий актюатор-двигун, з якого знята напруга, стискається в напрямку пересування.

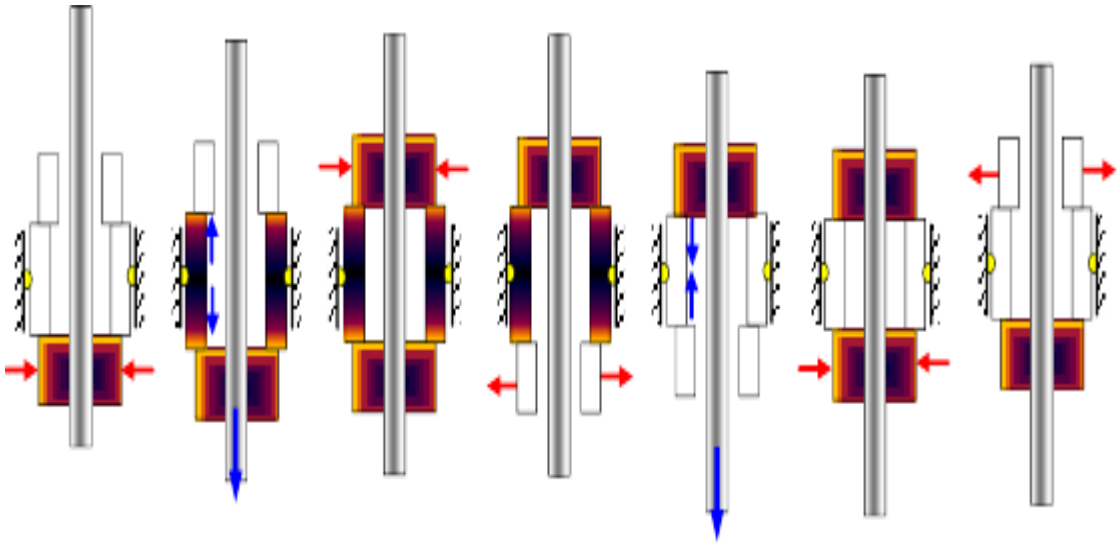


Рисунок 1.12 Робочий цикл лінійного крокового п’єзодвигуна [5-11]

Такі мотори іноді називають «дюймовою личинкою». Швидкість такого мотора регулюєть-

ся зміною кроку (величиною амплітуди) і частоти. Саме на цьому принципі ґрунтується робота п’єзоелектричного моторчика (4 мм завдовжки і 1,8 мм завширшки), створеного групою вчених з університету штату Пенсільванія (США) (рис. 1.13) [5-11].

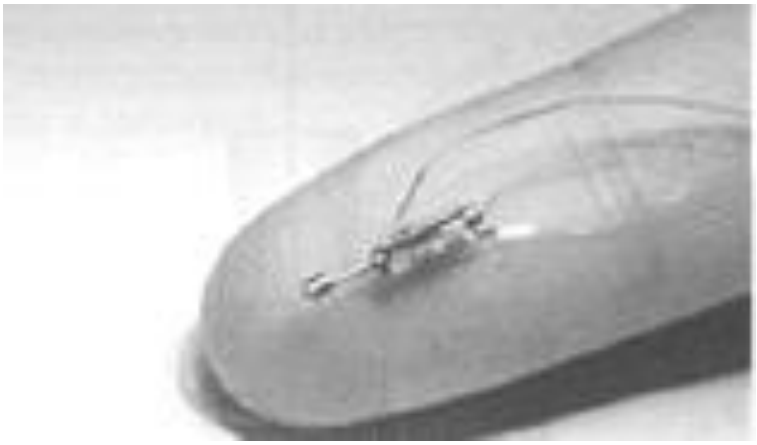


Рисунок 1.13 Лінійний кроковий п’єзодвигун личинкового типу

Такий моторчик знаходить застосування передусім у медицині, наприклад у мікрохірургії або для керування дзеркальцем ендоскопа. Дещо іншу конструкцію має кроковий п’єзопривід NEXLINE компанії Physik Instrumente. Принципова схема такого привода показана на рис.1.14 [5-11].

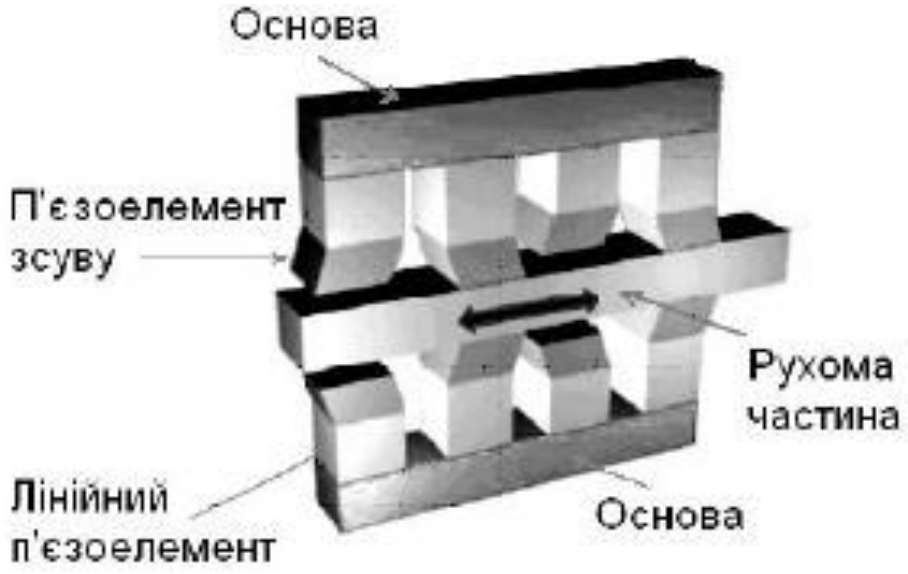


Рисунок 1.14 крокoвий п’єзопривід NEXLINE компанії Physik Instrumente [5-11]

Принцип роботи NEXLINE ґрунтується на використанні двох типів п’єзоелементів лінійного п’єзоелемента і п’єзоелемента зсуву. Лінійні п’єзоелементи закріплюються на основі, на яку діє сила попереднього навантаження. П’єзоелементи зсуву, контактуючи з рухомою частиною, переміщують її у двох напрямках, реалізуючи ідею фрикційного передавання руху. Чим більше таких модулів, тим вище розвиваються зусилля штовхання. Величина кроку п’єзодвигунів залежить від величини навантаження. Ефект гістерезису, який полягає в неоднозначності зміни розмірів п’єзокерамічних елементів від напрямку зміни електричного поля, не дозволяє приводу переміщатися з однаковими кроками. Для позиціонування і досягнення високої повторюваності переміщення двигун оснащується лінійним датчиком положення, що забезпечує роздільну здатність 5 нм на всьому діапазоні переміщення. Таким чином, п’єзодвигун NEXLINE дозволяє здійснювати переміщення на великі відстані з високою точністю. Складений активний модульп’єзодвигуна NEXLINE показано на рис. 1.15, а, а його зовнішній вигляд - на рис. 1.15, б [5-11].



Рисунок 1.15 Складений активний модуль п’єзодвигуна NEXLINE

Схему чотирьох тактів робочого циклу такого двигуна зображено на рис. 1.16. Стрілками показано напрямок деформації кожного із сегментів активного модуля.

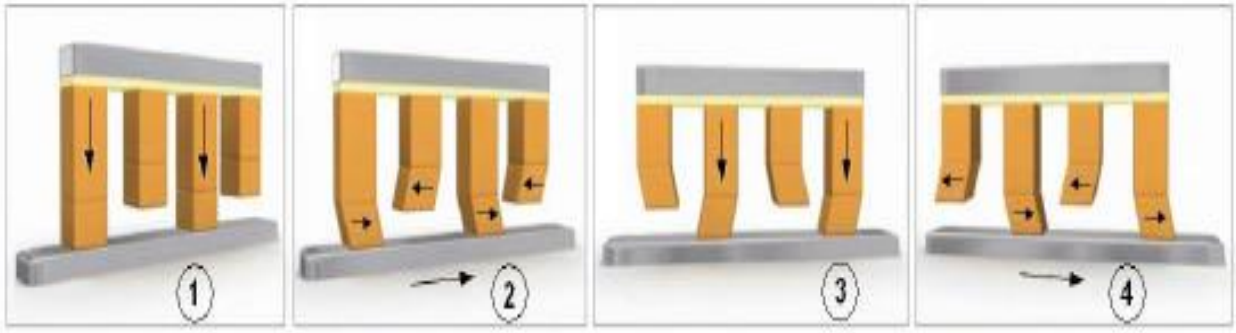


Рисунок 1.16 Схема чотирьох тактів робочого циклу п’єзодвигуна NEXLINE

П’єзодвигуни NEXLINE чутливі до перегріву. Тривале позиціонування на граничних швидкостях може призвести до нагрівання активного модуля і до зниження терміну експлуатації [5-11].

1.5 Резонансні п’єзодвигуни

Останнім часом активно розвиваються резонансні п’єзодвигуни, які є сучасною альтернативою двигунам постійного струму, вони також відомі як вібраційні двигуни. Перевагами подібних двигунів є висока нанометрична

роздільна здатність, швидкість та потужність, несумірна з їх розмірами. Конструкцію резонансного п’єзоприводу показано на рис.1.17, а. Основними елементами п’єзоприводу є: чотиригранна металева муфта (з немагнітного матеріалу) із внутрішньою різьбою, ходовий гвинт (черв’як) і чотири пластини п’єзокераміки. Пластини п’єзокераміки прикріплені на гранях металевої муфти, черв’як закручений в муфту [5-11].

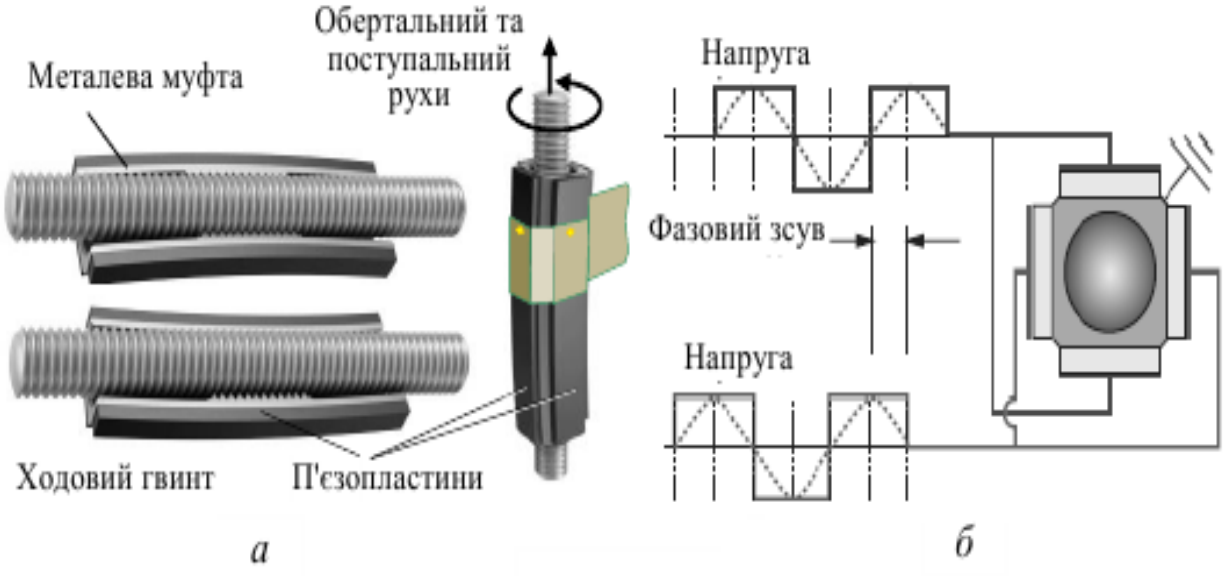


Рисунок 1.17 . Конструкція резонансного п’єзодвигуна

Із подачею двофазної напруги на протилежні пари пластин п’єзокераміки в них виникають механічні рухи.(рис. 1.17, а), які передаються металевій муфті. Якщо є зсув фаз між поданими електричними напругами (рис. 1.17 б), то на межі дотичних поверхонь муфти та черв’яка виникають сили здавлювання з поворотом. Унаслідок ходовий гвинт обертається і лінійно переміщується відносно муфти. Змінюючи зсув фаз, можна змінювати напрямок руху гвинта

(черв’яка). Ці п’єзоприводи працюють в резонансному режимі на частотах 30…200 кГц залежно від їх розмірів. Мінімальні габарити п’єзоприводу Squiggle фірми NST 1,55×1,55×6 мм (рис. 1.18), споживана потужність~ 500м Вт, діапазон лінійних переміщень 5…30 мм, роздільна здатність 0,5 мкм [5-11].



Рисунок 1.18 П’єзодвигун Squiggle фірми NST [5-11]

Отже, за матеріалами розділу робимо наступні висновки:

1) розвиток п’єзоелектричних компонентів МЕМС на сучасному етапі мікроелектроніки є ще достатньо актуальним, так як елементи механічних конструкцій п’єзоприводів є ще співрозмірними із мікродіапазоном;

2) подальша еволюція МЕМС із мікро- до нано- ситем безперечно призведе до потреби вдосконалення як механіної, так і електричної складової розробок із урахуванням фізичних обмежень наноелектроніки;

3) на сучасному етапі розвитку інформація про схемотехнічну складову систем керування п’єзоелектричними пристроями є обмеженою, так як являє собою або військову, або комерційну таємницю;

4) актуальним постає питання схемотехнічної реалізації систем керування МЕМС пристроями на перехідному етапі імплементації мікрокомпонент до наноектронних комплексів

Тому, метою дипломної роботи є дослідження та розробка системи керування параметрами п’єзоелектричних мікродвигунів.

Для досягнення мети у роботі потрібно виконати такі завдавння:

1) на підставі аналізу існуючих систем обрати ефективну схему функціювання п’єзоелектричного мікродвигуна;

2) розробити структурну схему пристрою;

3) провести моделювання струмових та напругових характеристик п’єзоелектричного мікродвигуна за допомогою САПР електронних схем;

4) розглянути можливість практичного використання розроблюваного п’єзоелектричного двигуна у пристроях наноіндустрії;

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

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

2. Система керування параметрами п’єзоелектричного мікродвигуна

2.1 Структурна схема системи керування параметрами п’єзоелектричного мікродвигуна

На підставі проведеного уроздiлі 1 аналізу існуючих МЕМС із п’єзоелектричними двигунами для подальшої розробки обрано МЕМС резонансного п’єзоелектричного мікродвигуна. Як зазначалося вище, резонансні п’єзодвигуни є сучасною альтернативою двигунам постійного струму, вони також відомі як вібраційні двигуни. Перевагами подібних двигунів є висока нанометрична роздільна здатність, швидкість та потужність, несумірна з їх розмірами [5-11].

Структурна схема розроблюваної системи представлна на рисунку 2.1. .

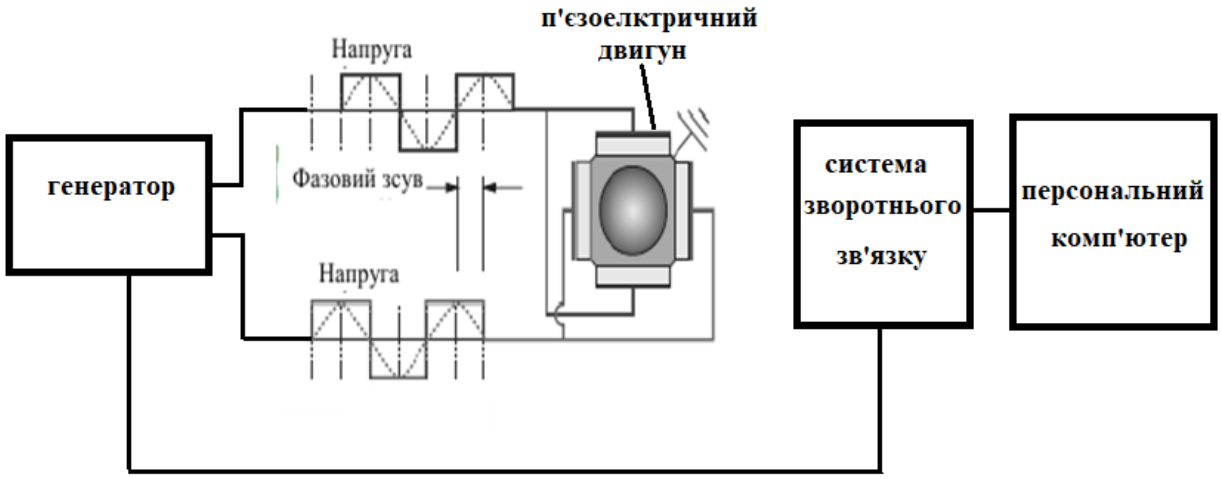


Рисунок 2.1 – Структурна схема системи керування параметрами п’єзоелектричного мікродвигуна

Структурна схема включає безпосередньо двигун, генератор керуючих сигналів, систему зворотнього зв’язку, яка забезпечує коригування

параметрами генератора в залежності від переміщення виконавчого механізма двигуна, персональний комп’ютер для обобки та керування сигналів системи.

Основними елементами п’єзоприводу зазвичай є: чотиригранна металева муфта (з немагнітного матеріалу) із внутрішньою різьбою, ходовий гвинт (черв’як) і чотири пластини п’єзокераміки. Пластини п’єзокераміки прикріплені на гранях металевої муфти, черв’як закручений в муфту. Загальний вид п’єзоелектричного мікродвигуна предсталено на рисунку 2.2 [5-11].



Рисунок 2.2 - Загальний вид п’єзоелектричного мікродвигуна

Із подачею двофазної напруги на протилежні пари пластин п’єзокераміки в них виникають механічні рухи, які передаються металевій муфті. Якщо є зсув фаз між поданими електричними напругами, то на межі дотичних поверхонь муфти та черв’яка виникають сили здавлювання з поворотом. Унаслідок ходовий гвинт обертається і лінійно переміщується відносно муфти. Змінюючи зсув фаз, можна змінювати напрямок руху гвинта (черв’яка). Ці п’єзоприводи працюють в резонансному режимі на частотах 30…200 кГц залежно від їх

розмірів. Мінімальні габарити п’єзоприводу, рекомендовані провідними виробниками МЕМС - 1,55×1,55×6 мм [5-11].

Таблиця 2.1 – Конфігурація та геометричні розміри п’єзоелементів[12].

Геометрія		Розмір, мм	
		мінімальний	максимальний
1	3	4	4
Диски	діаметр	4,0	70,0
	товщина	0,2	15,0
Кільця	діаметр зовнішній	8,0	120,0
	діаметр внутрішній	2,6	80,0
	товщина	0,3	15,0
Призми	довжина	4,0	120,0
	ширина	4,0	35,0
	товщина	0,2	10,0
Циліндри	діаметр зовнішній	8,0	85,0
	діаметр внутрішній	3,0	77,0
	висота	5,0	50,0

П'єзоелементи можуть бути виготовлені з п'єзокерамічних матеріалів ЦТС-19, ЦТС-19М, ЦТСНВ-1, ЦТБС-3, ЦТССт-3, ЦТСтБС-1, ПКВ-460, ЦТССт-1 відповідно до робочої та конструкторської документації.

Гарантійний термін зберігання п'єзоелементів 12 років з дати приймання п'єзоелементів в експлуатацію при дотримані допустимих меж, що зазначені в таблиці 2.2.

Залежність електрофізичних параметрів п’єзокераміки від складу матеріалу можна прослідкувати на рис. 2.2. за даними [13].

При проектуванні виконавчих пристроїв правильний вибір матеріалу є визначальним фактором основних характеристик і функціональних можливостей п'єзоелементів, п’єзоактюаторів і в кінцевому підсумку виконавчих елементів.

При виборі матеріалу для таких пристроїв увагу приділяють наступним параметрам:

– d (d_{xx}) – п'єзомодуль (у напрямку робочих деформацій) визначають робочий діапазон поляризації виконавчого пристрою;

– K (k_{xx}) – коефіцієнти електромеханічного зв'язку характеризують ефективність перетворення електричної енергії, що підводиться до матеріалу, в механічну.

Квадрат коефіцієнта електромеханічного зв'язку дорівнює відношенню генеруючої механічної енергії до електричної енергії, що підводиться (в разі зворотного п'єзоефекту).

Коефіцієнт електромеханічного зв'язку залежить як від властивостей матеріалу, так і від напрямків, в яких поляризується енергія. Тому кожен матеріал може характеризуватися декількома такими коефіцієнтами залежно від виду перетворення.

Так, наприклад, коефіцієнт k_{33} характеризує ступінь перетворення енергії збуджуючого електричного поля, спрямованого по осі поляризації, в енергію поздовжньої деформації в тому ж напрямку; коефіцієнт k_{31} характеризує ступінь перетворення енергії того ж поля в енергію деформації, перпендикулярної напрямку поля:

– Y_{ij} – модуль Юнга визначає пружні і резонансні властивості матеріалу;

– $Q_м$ – характеризує втрати енергії в матеріалі на внутрішнє тертя, визначає ефективну ширину смуги пропускання, впливає на ступінь загасання коливальних процесів;

– ε_r – відносна діелектрична проникність визначає повний опір п’єзоелемента, характеризує діелектричні і в кінцевому підсумку ємнісні властивості п’єзоелемента;

– tg_δ та tg_σ – тангенси кутів діелектричних і механічних втрат характеризує діелектричні і механічні втрати в матеріалі;

– $T_к$ – температура Кюрі визначає граничну температуру, при якій настає область фазового переходу в матеріалі (теплове рух молекул руйнує дипольні структуру матеріалу і п'єзоелектричні властивості зникають);

– ΔT – рекомендований робочий діапазон температур, в якому флуктуації параметрів матеріалу будуть знаходиться в межах допустимих значень.

Вплив середовища, такі, як вологість, зміна тиску на стабільність та варіювання параметрів [13].

Релаксорні сегнетоелектрики (релаксори) характеризуються дуже високою діелектричною проникністю ($\varepsilon = 10^4 \ldots 10^5$). Відповідно, релаксори демонструють унікальні технічні характеристики і перспективні для застосування у багатьох електронних пристроях насамперед як конденсаторні матеріали, тому що їх велике значення ε зберігається у значному температурному діапазоні. Релаксори характеризуються також видатними електромеханічними, електрооптичними та акустооптичними параметрами.

Відомо, що і піроелектричний, і п’єзоелектричний ефекти діелектриків пропорційні їх значенню ε. У релаксорах ці ефекти виникають під дією прикладеного ззовні по Це визначає, що як піро-, так і п’єзоелектричний ефекти у релаксорів не є власними, а індуковані зовнішнім електричним полем. Індукований ефект може бути таким, що він перевищує електромеханічні ефекти звичайних п’єзоелектриків і тому релаксорні електромеханічні приводи перспективні (і вже використовуються) у мікропозиціонерах, мініатюрних ультразвукових моторах, для адаптивних механічних заслінок в мікротехнологіях тощо. Перевагою релаксорних сегнетоелектричних матеріалів є те, що вони безгістерезисні, а саме такі електромеханічні приводи й потрібні в мікромеханіці (мікро-драйвери), зокрема в діапазоні НВЧ — для мікромеханічного керування параметрами фільтрів і фазообертачів.

Важливим параметром більшості згаданих електронних пристроїв є їх швидкодія. Оскільки основні параметри піро-, п'єзо- та оптичних реласорних перетворювачів залежать від значення ε, то очевидно, що швидкість реагування релаксованого пристрою визначається частотною дисперсією діелектричної проникності, тобто характеристикою ε(ν). Оцінювання обмежень у швидкості роботи релаксорних електронних пристроїв на основі вивчення частотної дисперсії ε релаксорів показала їх спроможність реагувати в об'ємних пристроях до частоти порядку мегагерца, а у плівках — до десятків мегагерц. Це визначається тим, що релаксорна поведінка невпорядкованих сегнетоелектриків зумовлена домінуючим внеском у діелектричну проникність релаксорів, пов'язаним з електромеханічним зв'язком полярних кластерів у таких матеріалах. Класичний піроефект можливий тільки у 10 класах полярних кристалів, що мають полярну вісь (в піроелектричних класах). У релаксорах — центросиметричних діелектриках — спонтанної поляризації немає, однак за умови прикладного ззовні електричного поля (поля зміщення, Eb) релаксор набуває індукованої поляризації Pi, яка може бути дуже великою за великого значення ε: Pi ≈ $\varepsilon_0 \varepsilon Eb$. Ця поляризація створює в діелектрику полярну вісь, і, таким чином, під впливом поля Eb нейтральний діелектрик набуває властивості «полярного»: він здатний створювати як піро-, так і п'єзоефект — вони індуковані електричним полем.

Порівняємо індуковану поляризацію відомого пара електрика $(Ba_{0,6}Sr_{0,4})$ Ba Sr $(TiO)_3$, що має досить велику проникність ε ~ 4000 (звичайно він позначається як BST), і поляризацію одного з найбільш вивчених релаксорів $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$, який позначається як PMN (рисунок 2.3).

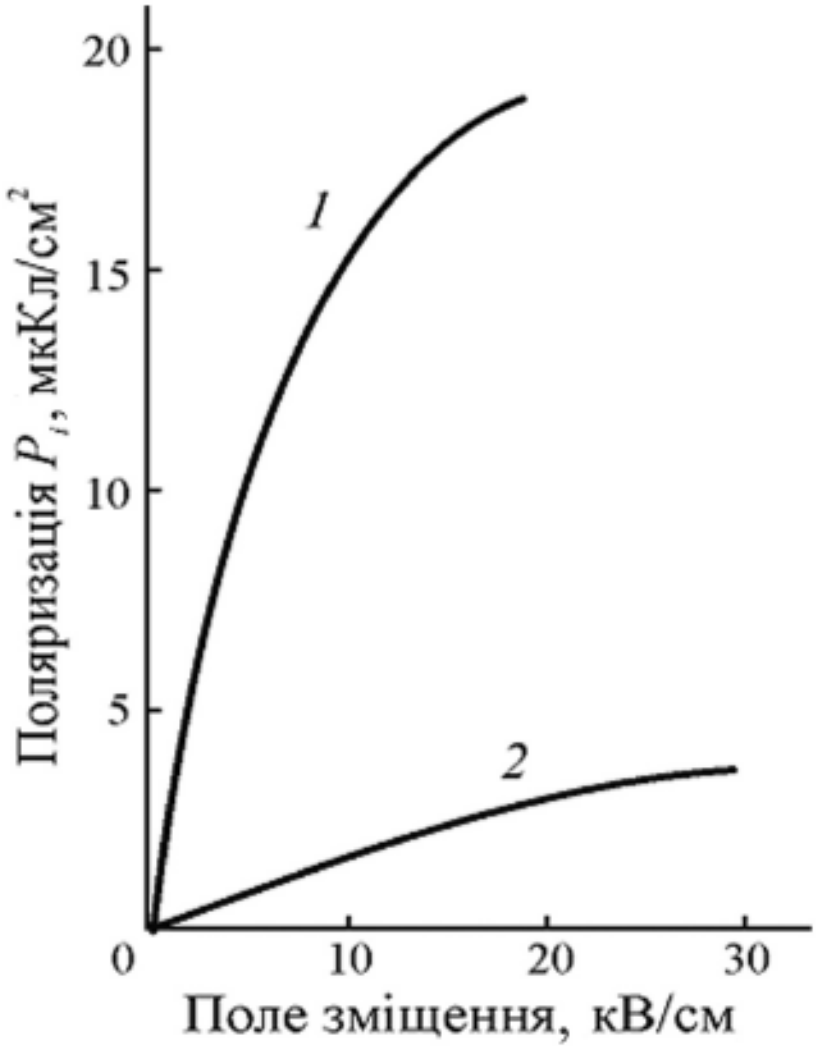


Рисунок 2.3 Електрично індукована поляризація : 1 — у релаксорі PMN; 2 — у параелектрику BST.

Видно, що індукована поляризація в PMN у декілька разів перевещує таку саму поляризацію у BST.

Рекордне значення деформації в електричному полі демонструє релаксорний кристал складу $PbZn_{1/3}Nb_{2/3}O_3$ — 4,5 % $PbTiO_3$ (PZN — 4,5 % PT). Деформація у ньому в 10 разів перевершує деформацію сегнетоп'єзокераміки PZT-8 і, на відміну від останньої, фактично не дає гістерезису. На рисунку 2.4 представлено електромеханічні властивості у релаксорах.

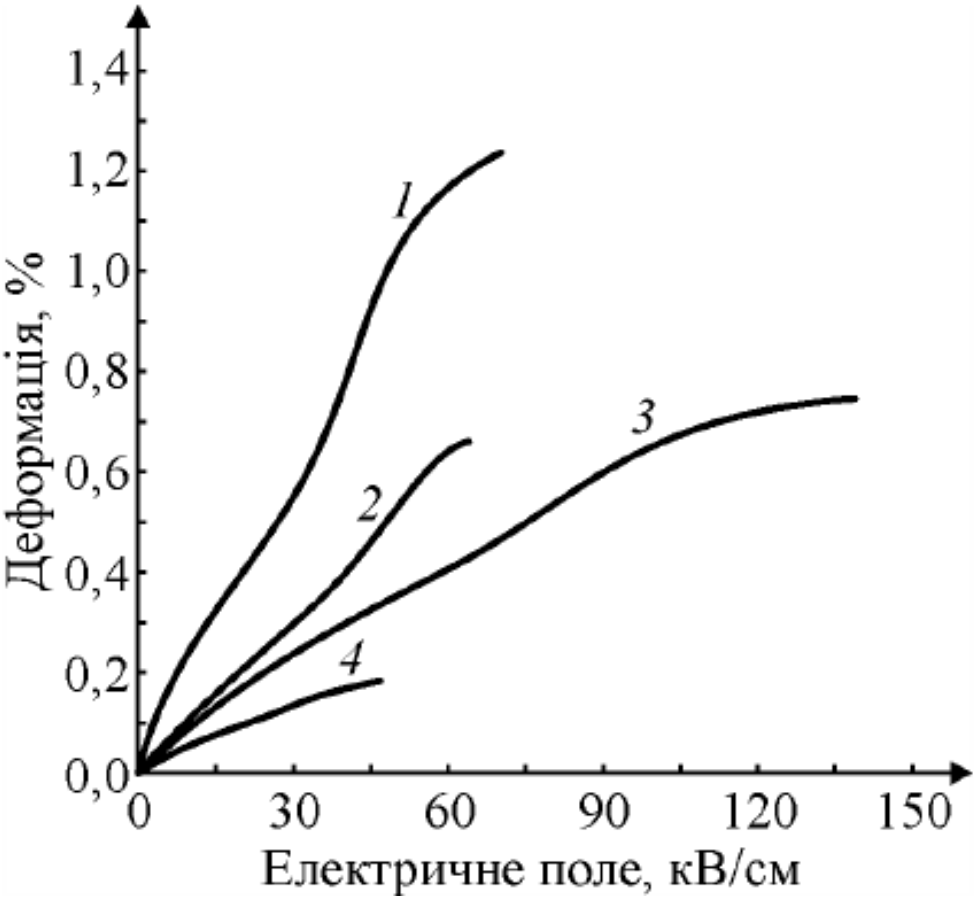


Рисунок 2.4 - Електрострикція у релаксорах: 1 — кристал PZN — 4,5 % PT; 2 — кристал PZN; 3 — кристал PMN — 24 % PT; 4 — сегнетоп’єзокераміка PZT-8

Отже, у якості п’єзоелементів двигуна обираємо релаксори PZN.

2.2 Генератор керуючих сигналів п’єзоелектричного мікродвигуна

Вибір генератора керуючих сигналів п’єзоелектричного мікродвигуна проводимо на підставі наступного аналізу основних базових функціональних схем

На рис.2.5 представлена схема генератора Колпітца, що часто використовується, виконана на польовому транзисторі. Паралельний LC-контур

встановлений на вході та з виходу на вхід через конденсатор СОС подається сигнал зворотного зв'язку. Частота синусоїдальних коливань напруги на виході генератора, як і попередньої схемою, обумовлена параметрами LC-контуру[15, 16].

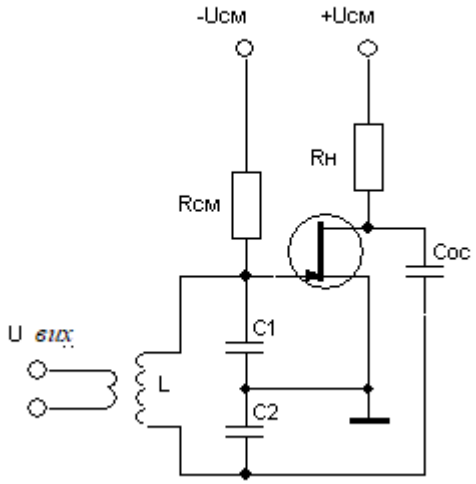


Рисунок 2.5- Генератор Колпітца

Одним з найважливіших параметрів будь-якого генератора є коефіцієнт нестабільності частоти коливань, що генеруються. де абсолютне відхилення частоти від номінального значення f. За рахунок коливань температури та напруги джерела живлення коефіцієнт нестабільності транзисторних LC-генераторів не перевищує десятих часток відсотка [15, 16]

$$\delta_f = \frac{\Delta f}{f} 100\%$$

Істотне зменшення нестабільності генераторів може бути досягнуто за рахунок використання кварцового резонатора, який є особливим чином вирізаною і відшліфованою пластиною натурального або штучного кварцу. Кварц - п'єзоелектрик, тому пружні коливання кристала можуть бути викликані додатком електричного поля, а ці коливання, у свою чергу, генерують напругу на гранях кристала. В цьому випадку кристал поводиться як RLC-елемент, еквівалентна схема якого наведена на рис.2.6

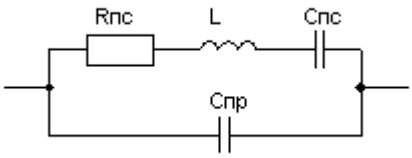


Рисунок 2.6 – Еквівалентна схема заміщення кварцового резонатора

Два конденсатори еквівалентної схеми дають пару близько розташованих резонансних частот – послідовного та паралельного контуру, що відрізняються один від одного не більше ніж на 1%. Загалом кварцовий резонатор веде себе як резонансний контур із високою добротністю (близько 10000) та високою стабільністю параметрів. При включенні резонатора в позитивний зворотний зв'язок і виконання умови балансу амплітуд на частоті резонансної виникають автоколивання[15,16].

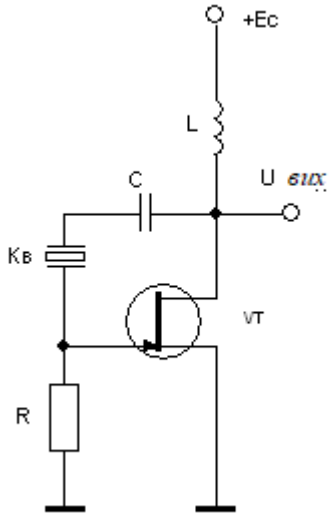


Рисунок 2.7 – Генератор Пірса

На рис.2.7 представлений генератор синусоїдальних коливань на польовому транзисторі, відомий як генератор Пірса. За рахунок кварцового резонатора фаза вихідного сигналу змінюється на 1800, тобто сумарний зсув фази по відношенню до сигналу на затворі досягає, що призводить до виникнення коливань резонансної частоти кварцу. Інша схема (рис.2.8) є аналогом генератора Колпітца (рис.1.5), в якому LC – контур замінений кварцовим резонатором. Наявність кварцового резонатора забезпечує коефіцієнт

нестабільності генератора не вище 10-6 у діапазоні температур від 0 до 5^0 С. [15, 16].

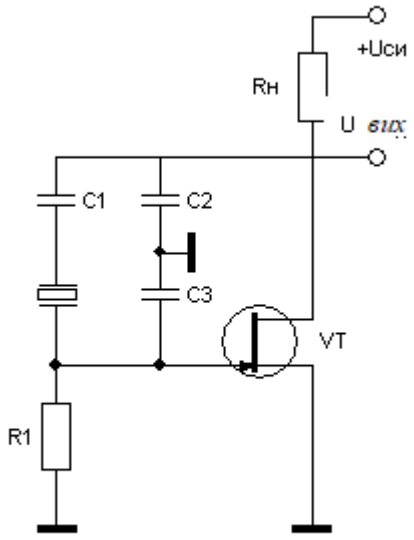


Рисунок 2.8 – Кварцовий генератор Колпітца

Генератори, аналогічні до розглянутих, доцільно використовувати на високих частотах. Це з тим , що з зниження частоти генерації габаритні розміри LC-контуру неприпустимо зростають. Виготовлення кварцових резонаторів на частоти нижче кількох десятків кілогерців також пов'язане із значними технологічними труднощами.

У RC генераторах цього баланс фаз досягається з допомогою спеціальної фазосдвигающей RC – ланцюга, встановлюваної ланцюга зворотний зв'язок. Схема найпростішого RC-генератора на транзисторі наведена на рис.2.9. Трьохланковий RC-ланцюг на частоті квазірезонансу забезпечує зсув фази, що дорівнює 1800. Схема із загальним емітером, на якій зібраний генератор, змінює фазу сигналу на виході 0, тобто. сумарний фазовий зсув дорівнює , рахунок чого виконується умова балансу фаз. За умови C1 = C2 = C3 = C і R3 = R4 = $R_{вх_{VT}}$ = R коефіцієнт передачі триланкового RC-ланцюга дорівнює приблизно 1/29, тому, якщо коефіцієнт посилення транзисторного каскаду$_{IN}$< 29 у схемі виникають коливання з частотою

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}RC}$$

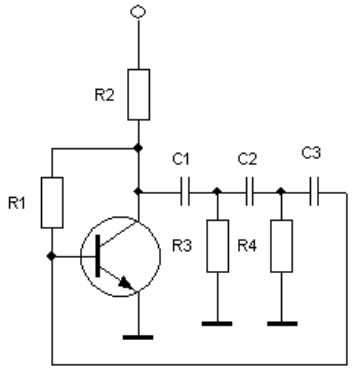


Рисунок 2.9 – RC-генератор на транзисторі

Не дивлячись на простоту схеми, даний генератор знаходить обмежене застосування в практичних пристроях. Це з тим, що коефіцієнт нелінійних спотворення вихідної напруги може досягати 10% а стабільність частоти недостатня. Слід зазначити, що у схемі рис.2.10 можна деяких межах змінювати частоту генерації. Для цього послідовно з резистором R3 встановлюють змінний опір[15, 16].

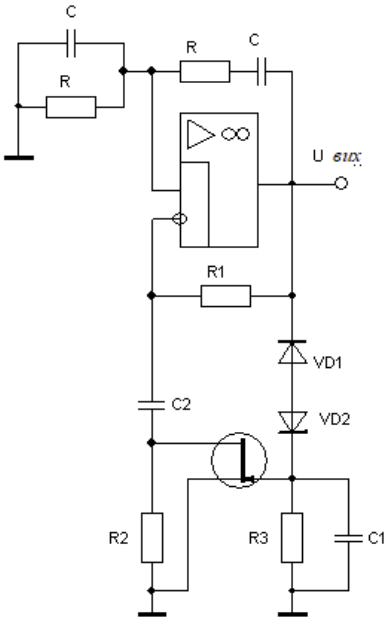


Рисунок 2.10 – RC-генератор із мостом Вина

Найбільш часто для побудови RC-генераторів використовується міст Вина, який не має фазового зсуву на частоті квазірезонансу, а коефіцієнт передачі на цій частоті дорівнює 1/3. На рис.2.11 наведено генератор

синусоїдальних коливань на основі мосту Вина. Він є неінвертуючим підсилювачем з коефіцієнтом посилення (1+R1/R2), на неінвертуючий вхід якого подається сигнал з моста Вина. Так як фазовий зсув моста Вина дорівнює нулю, у схемі забезпечується баланс фаз. Для забезпечення балансу амплітуд коефіцієнт посилення неінвертуючого підсилювача має бути К>3. Виконання цієї умови призводить до виникнення автоколивань у схемі на частот Особливістю даного генератора є необхідність досить точно підтримувати величину коефіцієнта посилення підсилювача. При зменшенні коефіцієнта посилення коливання згасають, зі збільшенням – амплітуда вихідної напруги починає зростати, до насичення вихідних каскадів підсилювача, що зумовлює спотворення форми вихідного сигналу. Для підтримки синусоїдальної форми вихідної напруги у схемі рис.1.8 передбачено ланцюг автоматичного регулювання посилення (АРУ). Активним елементом АРУ є польовий транзистор, включений паралельно резистору R2. Транзистор працює у режимі регульованого резистора. На затвор транзистора подається випрямлена та згладжена напруга з виходу генератора. При збільшенні вихідної напруги транзистор підзапирається, його опір "стік-витік" зростає , що шунтує дію транзистора зменшується, що призводить до зменшення коефіцієнта посилення підсилювача, а значить і відновлення вихідного значення амплітуди сигналу на виході генератора. Зменшення амплітуди вихідної напруги має зворотну дію. Наявність глибокого негативного зв'язку у схемі забезпечує високу стабільність підсилювальної ланки у RC-генераторі. Тому температурна нестабільність частоти генераторів визначається в основному залежністю від температури параметрів елементів RC-ланки зворотного зв'язку. Тому в практичних схемах цього виду можна отримати значення коефіцієнта нестабільності на рівні У багатьох випадках при практичному застосуванні RC-генераторів синусоїдальних коливань виникає завдання регулювання частоти. При побудові генераторів з регульованою частотою слід враховувати той факт, що зміна хоча б одного із частотоздатних елементів змінює умову виникнення генерації, що може призвести до зриву коливань. З огляду на це у схемі рис.2.10 регулювання

частоти пов'язані з певними труднощами, оскільки за зміни величини резистора R3 потрібно коригування коефіцієнта посилення транзисторного підсилювача. Однак, зміна опору R1 змінює вхідний опір транзисторного каскаду, а зміна колекторного навантаження R2 може призвести до зміни параметрів робочої точки транзистора та його переходу в нелінійний режим роботи. Це обмежує практичне використання генератора рис.2.10 у схемах із регульованою частотою.

У генераторі на основі моста Вина умова стійкої генерації полягає в тому, щоб коефіцієнт посилення сигналу по ланцюгах позитивного і негативного зворотного зв'язку дорівнював одиниці на будь-якій частоті. Тому при зміні частоти коливань вихідної напруги у генераторах необхідно використовувати здвоєний потенціометр (або конденсатор). Однак використання здвоєних регулюючих елементів має певні незручності. У схемі рис.2.11 потенціометр R2 є одним з елементів моста Вина та його регулювання змінює частоту генерації [15, 16].

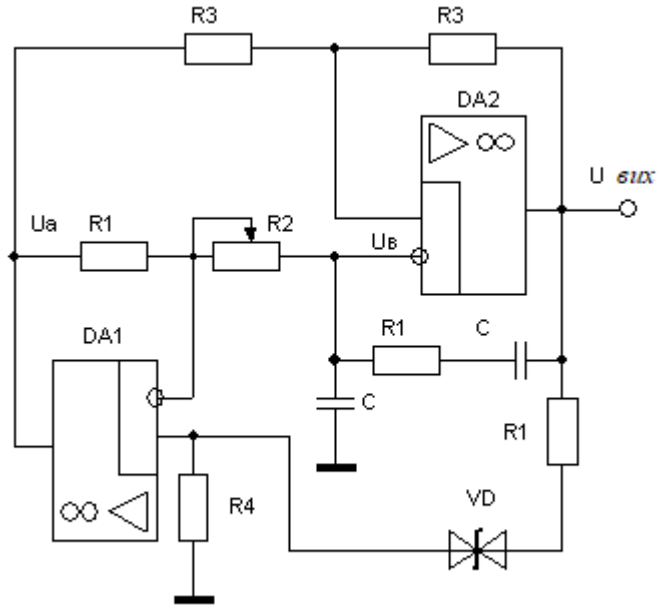


Рисунок 2.11 Схема регулювання частоти генератора

Одночасно R2 є вхідним резистором інвертуючого підсилювача на DA1, який формує сигнал негативного зворотного зв'язку Ua на вхід операційного підсилювача DA2. Наприклад, при зменшенні R2 збільшується частота

коливань і одночасно зменшується сигнал позитивного зворотного зв'язку Uв на вході DA2, що не інвертує.

На підставі основних вимог до характеристик генераторів та, виходячи із умов, які висуваються до матеріалу двигуна обираємо наступну схему генератора - рисунок 2.12.)[17]. У базовій схемі із метою модернізації та покращення функціональних можливостей робимо заміну компараторів LM193 (на схемі DA1, DA2) на мікрсхему LM293 AD (більша потужність та температурна стабільність).

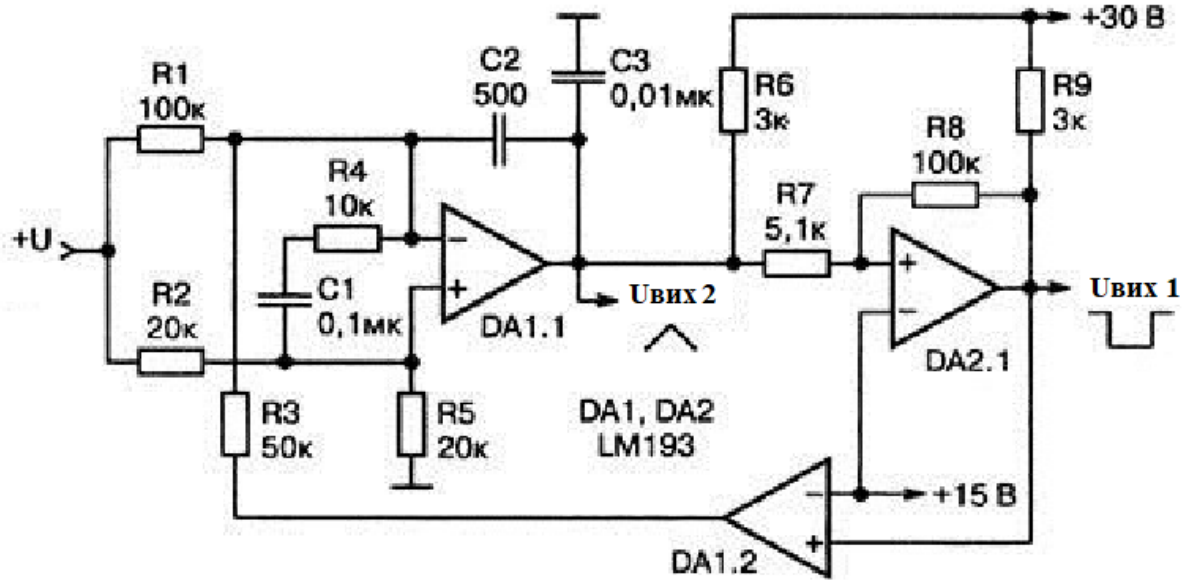


Рисунок 2.12 – Електрична схема генератора керуючих сигналів п’єзоелектричного мікродвигуна

На рисунку 2.13 представлена функціональна схема LM293 AD [18].

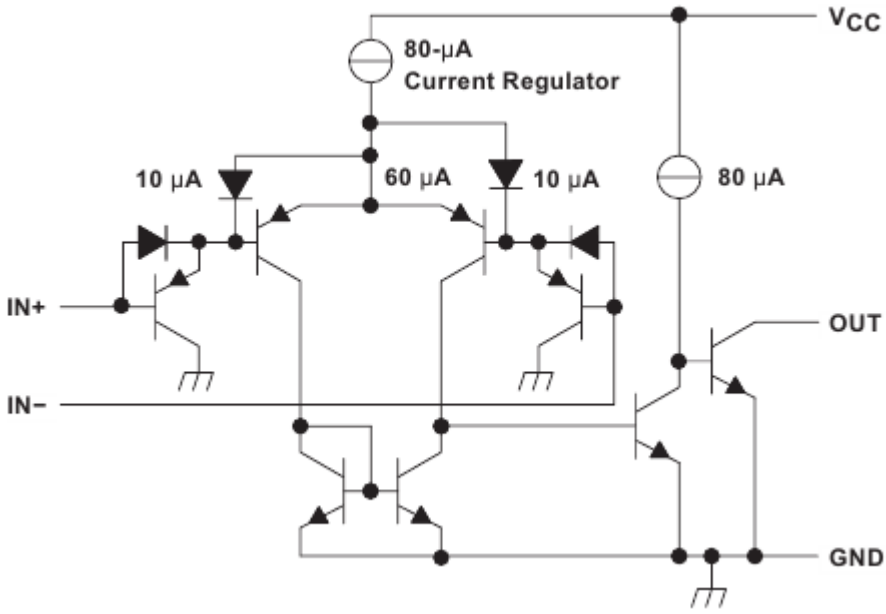


Рисунок 2.13 – Функціональна схема LM293 AD

Моделювання роботи схеми було проведено за допомогою програмного середовища Proieus [19]. Результати моделювання представлено на рисунку 2.14

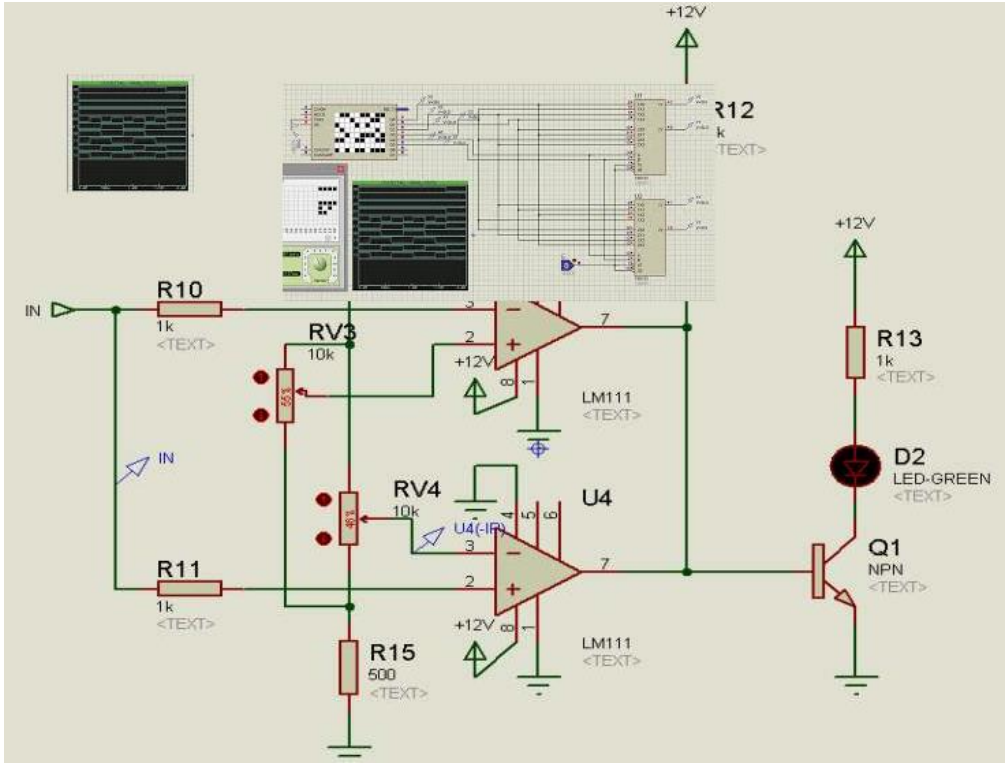


Рисунок 2.14 Моделювання роботи схеми генератора керуючих сигналів п’єзоелектричного мікродвигуна в середовищі Proteus

Результати моделювання добре узгоджуються із озрахунковими даними.

2.3 Схема зворотнього зв’язку системи керування параметрами п’єзоелектричного мікродвигуна

У цьому розділі питання автоматизації розглядаються спільно із практичним використанням розроблюваної МЕМС п’єзоелектричного мікродвигуна – система позиціювання вимірювального зонда силової скануючої мікроскопії [20].

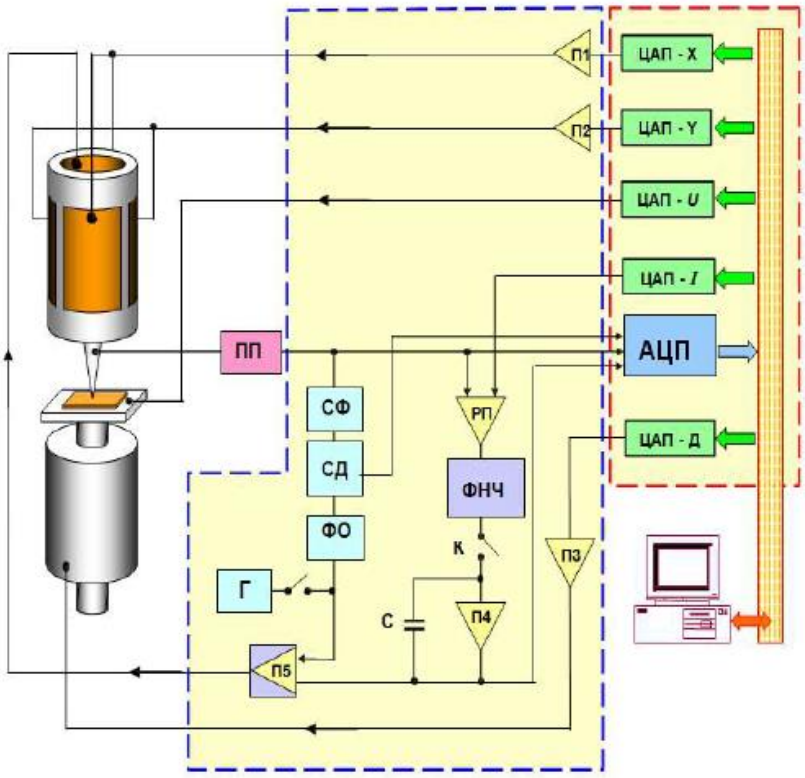
Вимоги гарної ізоляції приладів від зовнішніх вібрацій і необхідність роботи зондових мікроскопів в умовах вакууму накладають серйозні обмеження на застосування чисто механічних обладнань для переміщень зонда й зразка. У зв'язку із цим широке поширення в зондових мікроскопах одержало обладнання на основі п'єзоелектричних мікро-двигунів, що дозволяють здійснювати дистанційне керування переміщенням об'єктів [20].

Якщо такий двигун працює в парі з нарізним сполученням, то при кроці різьблення порядку 0,1 мм забезпечується точність позиціонування об'єкта порядку 0,25 - 1 мкм. Для збільшення точності застосовуються додаткові механічні редуктори. Можливість електричного керування дозволяє ефективно використовувати п’єзоелектричні двигуни в автоматизованих системах зближення зонда й зразка скануючих зондових мікроскопів [20].

Тому, така система є поєднаною із власною системою керування параметрами п’єзоелектричного мікродвигуна.

2.3.1 Схема системи керування параметрами п’єзоелектричного мікродвигуна

Спрощена схема системи керування представлена на рисунку 2.15 [20].



Ричунок 2.15 - Схема зворотного звяку системи керування параметрами п’єзоелектричного мікродвигуна

Система керування СТМ складається із цифрової частини, реалізованої на базі персонального комп'ютера, і аналогової частини, яка виконана у вигляді окремого блоку. Цифрова частина складається з набору ЦАП і АЦП і виділена на схемі червоною пунктирною границею. Аналогова частина показана на схемі синьої пунктирною лінією. Напруга на тунельному проміжку задається оператором за допомогою ЦАП - U, а підтримуваний системою зворотного зв'язку струм - за допомогою ЦАП - I. Двоканальні цифро-аналогові еретворювачі ЦАП - X і ЦАП - Y служать для формування рядкових і кадрових розгорнень. Петля зворотного зв'язку складається з попереднього підсилювача ПП, конструктивно розташованого у вимірювальній голівці СТМ, різницевого

підсилювача РП, фільтра низьких частот ФНЧ, підсилювачів П4 і П5, п’єзоперетворювача тунельного проміжку, що регулює величину. Перед початком роботи оператор установлює робочі параметри тунельного струму й напруги й включає систему зближення зонда й зразка. При цьому керуюча

напруга подається на двигун із ЦАП – Д. У початковому стані струм у петлі зворотного зв'язку відсутній, і сканер максимально витягнутий у напрямку до зразка. З появою тунельного струму зворотний зв'язок відсуває сканер, і система переходить у режим точної установки зразка. У цьому режимі відбувається спільний рух зразка й відсунення (системою ЗЗ) зонда доти, поки сканер не встане в середину свого динамічного діапазону.

2.3.2 Схема оптичного каналу системи зворотного звяку п’єзоелектричного мікродвигуна

Для створення ефективного зворотного зв’язку на кантилевер мікроскопа подається лазерне випромінювання. По відбитому променю, який спрямовується нафотодіод налаштовується положення мікродвигуна.

Схема оптичного каналу системи зворотного звяку п’єзоелектричного мікродвигуна представлена на рисунку 2.16.

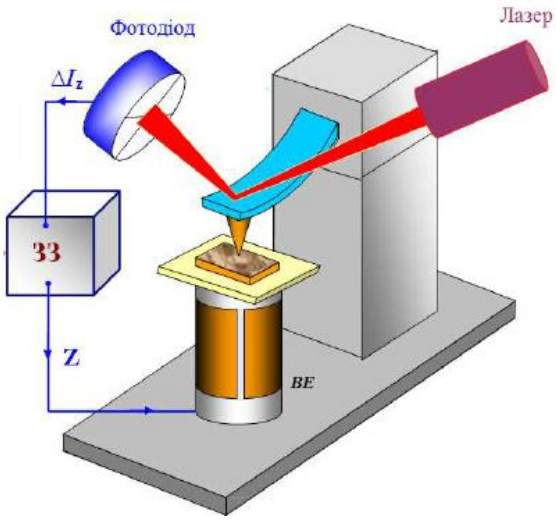


Рисунок 2.16 - Схема оптичного каналу системи зворотного звяку п’єзоелектричного мікродвигуна

Дипломна робота виконувалась сумісно із розробкою МЕМС електростатичного мікродвигуна. Тому, у якості джерела лазерного випромінювання і пристрою реєстрації потужності відбитого променя обрано

світлодіод L11767-0066L та фотодіод S1787-04 фірми Hamamatsu, оптичні характеристики яких добре узгоджуються [21]. На рисунках 2.17 та 2.18 представлено спектральні характеристики відповідних компонент. У таблицях 2.1 та 2.2 предсталено їх загальні характеристики.



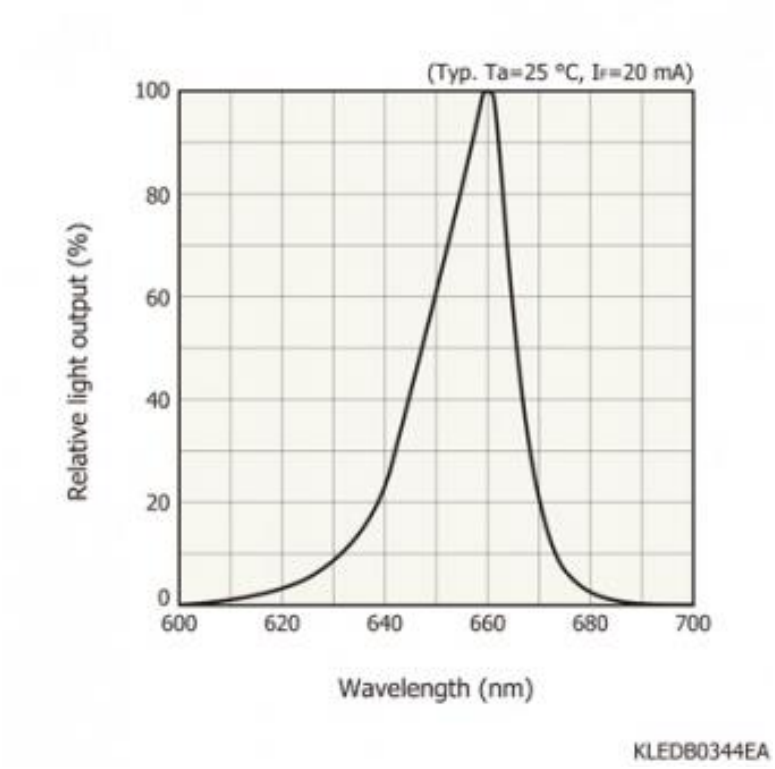


Рисунок 2.17 - Спектральні характеристики світлодіода L11767-0066L

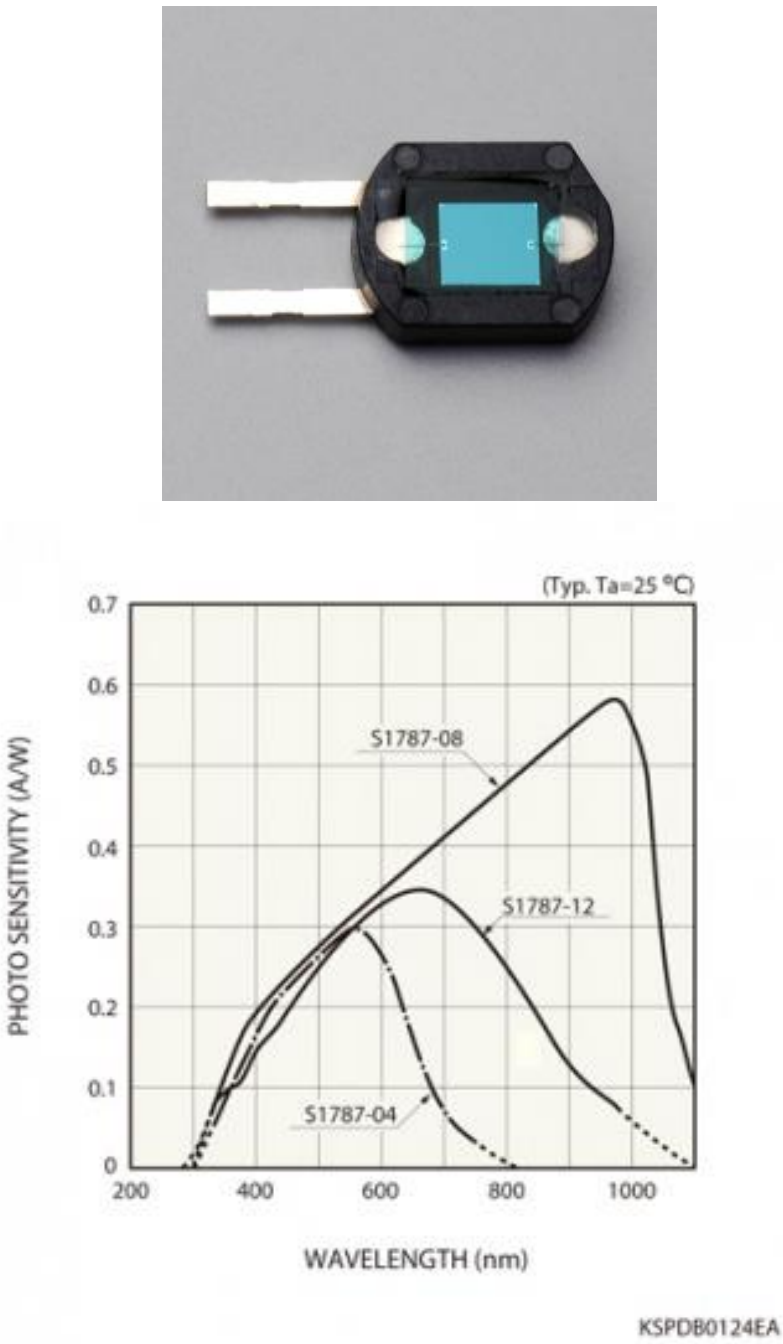


Рисунок 2.18 - Спектральні характеристики фотодіода S1787-04

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

Отже, за результатами розділу можна зробити наступні висновки:

1) для подальшої розробки обрано МЕМС резонансного п’єзоелектричного мікродвигуна;

2) структурна схема включає безпосередньо двигун, генератор керуючих сигналів, систему зворотнього зв’язку, яка забезпечує коригування параметрами генератора в залежності від переміщення виконавчого механізма двигуна, персональний комп’ютер для обобки та керування сигналів системи.

3) за основу роботи мікродвигуна використано принцип зворотного п’єзоефекта, у результаті якого приІз подачі двофазної напруги на протилежні пари пластин п’єзокераміки в них виникають механічні рухи, які передаються металевій муфті, у наслідок чого ходовий гвинт обертається і лінійно переміщується відносно муфти;

4) у результаті аналізу електро-фізичних влстивостей п’єзоелементів, для матеоріалу п’єзопластин обираємо релаксор $PbZn_{1/3}Nb_{2/3}O_3$ — 4,5 % $PbTiO_3$ (PZN — 4,5 % PT);

5) на підставі основних вимог до характеристик генераторів та, виходячи із умов, які висуваються до матеріалу двигуна обрано схему генератора керуючих сигналів із використанням компараторів, заснованих на мікросхемах LM293 AD;

6) схема зворотного зв’язку МЕМС п’єзоелектричного мікродвигуна використовується спільно із системою позиціювання вимірювального зонда силової скануючої мікроскопії;

7) для покращення схеми зворотного зв’язку використовується схема оптичного каналу - на кантилевер мікроскопа пропонується подається лазерне випромінювання. По відбитому променю, який спрямовується нафотодіод налаштовується положення мікродвигуна;

8) у якості випромінювача та фотоприймача схеми оптичного каналу системи зворотного звяку п’єзоелектричного мікродвигуна використовуємо

світлодіод L11767-0066L та фотодіод S1787-04 фірми Hamamatsu, оптичні характеристики яких добре узгоджуються;

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

3 Техніко - економічне обґрунтування виготовлення електронної схеми генератора керуючих сигналів системи керування параметрами п’єзоелектричних мікродвигунів

3.1 Обґрунтування вибору технології виготовлення електронної схеми схеми генератора керуючих сигналів системи керування параметрами п’єзоелектричних мікродвигунів

Топологічний аналіз показує, що пристрій може бути реалізований у вигляді малогабаритного мікромодуля і виконаний 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 електронної схеми проаналізуємо ієрархії чотирьох варіантів (табл. 3.1), враховуючи шкалу відносної важливості (табл. 3.2) [22].

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 тонкіх 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 (табл. 3.3) [22].

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 (табл. 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 (табл. 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
$\sum$					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
$\sum$					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
$\sum$					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 (табл. 3.10) [22].

З порівняння глобальних пріоритетів різних технологій видно, що найбільшим є пріоритет у варіанта виготовлення електронної схеми схеми генератора керуючих сигналів системи керування параметрами п’єзоелектричних мікродвигунів із 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 електронної схеми: 1) швидкодія; 2) завадостійкість; 3) споживана потужність; 4) площа, займана на кристалі; 5) сумісність; 6) вартість. Найбільший локальний пріоритет у критерію «сумісність» (табл. 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 електронної схеми схеми генератора керуючих сигналів системи керування параметрами п’єзоелектричних мікродвигунів

.

3.2 Розрахунок витрат на виготовлення електронної схеми схеми генератора керуючих сигналів системи керування параметрами п’єзоелектричних мікродвигунів

Витрати на матеріали і напівфабрикати, вказані в таблиці 3.11, склали 410,4 грн.

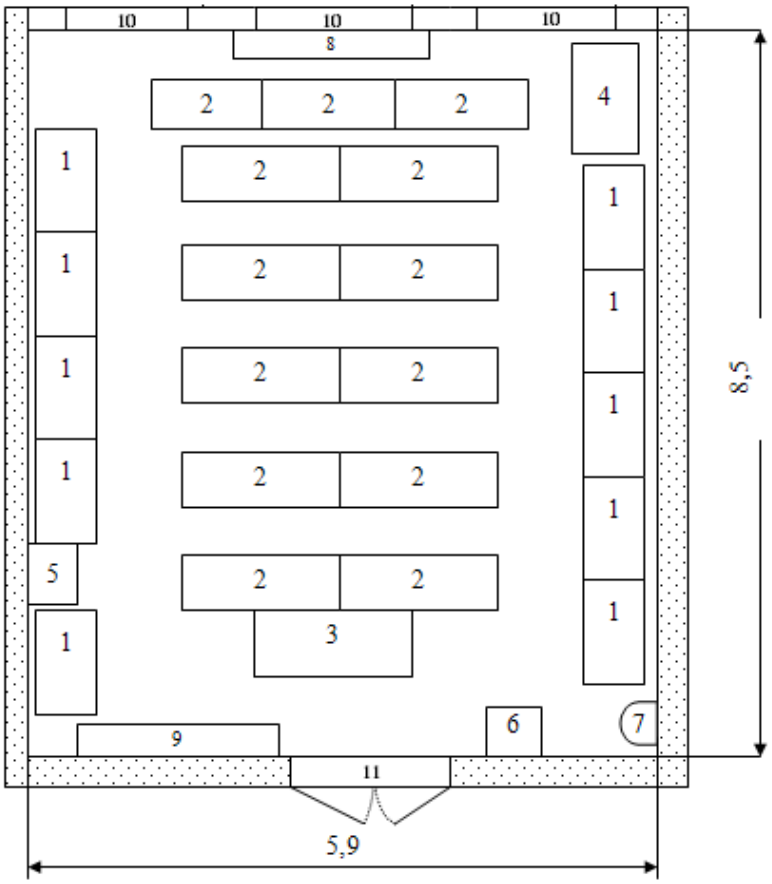
Таблиця 3.11 - Розрахунок вартості основних елементів

Матеріали і напівфабрикати	Одиниця виміру	Кількість	Ціна за одиницю, грн.	Вартість матеріалів і напівфабрикатів, грн.
Фольгований склотекстоліт	$м^2$	0,2	10	2
Хлорне залізо	кг	0,5	10	10
LM293 AD	шт.	3	40	120,00
Транзистор КТ604А	шт.	1	10	10
Транзистор КТ913А	шт.	1	50	50
Транзистор 2Т3129А9	шт.	2	35	70
Транзистор IRF9610	шт.	1	15	15
Транзистор IRF640N	шт.	1	15	15
Конденсатори метало-плівкові типа CL20	шт.	17	2,0	34
Резистор	шт.	24	0,6	14,40
Папір писальний	уп.	1	20	20
Транспортно-заготівельні витрати				50
Разом				410,4

4 Охорона праці та техногенна безпека при розробці електричних схем для системи керування параметрами п’єзоелектричних мікродвигунів

4.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів

В даному розділі як об’єкт дослідження розглянуто приміщення в якому проводяться лабораторні роботи та роботи з відео термінальними пристроями. План приміщення наведено на рисунку 3.1 [23].



1 - стіл комп’ютерний, 2 - стіл аудиторний, 3 - стіл викладача, 4 - установка Холла, 5 - шафа силова, 6 - сейф, 7 - умивальник, 8 - спліт система, 9 - дошка аудиторна, 10 - вікно, 11 - двері

Рисунок 4.1 – План розташування робочих місць

Приміщення, в якому знаходяться відео термінальні пристрої, має такі характеристики:

- довжина приміщення 8,5 м;
- ширина приміщення 5,9 м;
- висота 4 м;
- число вікон 3;
- кількість робочих місць 28;
- забарвлення інтер'єру: біла стеля, блідо-бежеві стіни, підлога бетонна, обтягнута лінолеумом коричневого кольору.

Відповідно до ПХТ 12.0.003-74 небезпечні та шкідливі фактори за природою дії поділяються на такі групи: фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні [24,25].

В даному приміщені діють такі фізичні небезпечні та шкідливі фактори:

• підвищений рівень вібрацій, інфразвукових коливань, ультразвуку, іонізуючих випромінювань, статичної електрики, електромагнітних випромінювань, ультрафіолетової чи інфрачервоної радіації;

• підвищені чи знижені барометричний тиск, вологість, іонізація та рухомість повітря;

• небезпечне значення напруги в електричному колі; підвищена напруженість електричного чи магнітного полів;

• недостатня освітленість робочої зони; підвищена яскравість світла;

Також присутні небезпечні та шкідливі психофізіологічні фактори, до яких належать фізичні (статичні та динамічні) і нервово-психічні перевантаження (розумове перенапруження, перенапруження органів чуття, монотонність праці, емоційні перевантаження).

4.2 Заходи зі зменшення впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Одним із заходів є підвищення комфортності роботи шляхом раціоналізації параметрів робочого місця та робочого приміщення з ергономічної точки зору [23].

Обсяг приміщення на одного працюючого за санітарними нормами має становити не менше 20 м^3, а площа приміщення – не менше 6 м^2. Ширина основних проходів у приміщенні повинна становити не менше 1,5 м. Ширина виходів з приміщення повинна бути не менше 1 м, висота – не менше 2,2 м. Дане приміщення має обсяг V=188,06 м^3 , а площу S=50,15 м^2. Таким чином наше приміщення не відповідає нормам з ергономічної точки зору.

Для зменшення впливу психофізіологічних факторів складено правильний графік трудового дня, встановлено необхідний час перерв, темп та ритм роботи, які необхідні для зменшення дії на організм людини фізичних зусиль, що в свою чергу дозволяють захистити людину від перевтомлення та втрати здоров’я [25].

4.3 Виробнича санітарія

Мікроклімат характеризується наступними параметрами: температура, вологість, швидкість повітря, атмосферний тиск, шум [23].

Для нашого приміщення температура підтримується завдяки вентиляції (природної і штучної) в теплу пору року, та за допомогою опалення та герметизації приміщення в холодну пору року. Оптимальні норми температури для холодної пори року 21-23°С, для теплої складає 22-24°С.

Наше приміщення відповідає цим температурним нормам.

В даному приміщенні є два види вентиляції:

– природна (аерація через вікна і двері);

– примусова (приточно-витяжна).

Функціонально близьким, але відмінним від вентиляції за способом повітрообміну є кондиціонування. В даному приміщені є наявність кондиціонера, який підтримує в приміщенні комфортні умови незалежно від зовнішніх умов (визначеної температури, вологості, чистоти повітря і швидкості повітряних потоків).

Вологість повітря в даному приміщенні не 40-60%, що відповідає оптимальним нормам. Це реалізується за допомогою вентиляції і кондиціонування приміщення, а також за рахунок проведення вологих збирань.

У приміщенні є наявність відео термінальних пристроїв та учбових стендів для проведення лабораторних робіт. Всі ці устаткування мають низький рівень шуму, що в свою чергу не перевищує допустиму норму рівня шуму в 65 дБ.

В нашому приміщенні, де знаходяться відео термінальні пристрої, використовується змішане освітлення, тобто поєднання природного і штучного освітлення.

В якості природного - бокове освітлення через вікна. В даному приміщенні використовується загальне штучне освітлення.

Розрахунок його здійснюється за методом світлового потоку з урахуванням потоку, відбитого від стін і стелі [24].

Нормами для даних робіт в даному приміщенні встановлена необхідна освітленість робочого місця Ен = 300лк (середня точність роботи по розрізненню деталей розміром від 1 до 10 мм).

4.4 Електробезпека

Приміщення за ступенем небезпеки ураження людей електричним струмом відповідно до ПУЕ і ГОСТу 12.1.013-78 являється приміщенням без підвищеної небезпеки [23-25].

Приміщення сухе, добре опалюване з струмонепровідною підлогою, з температурою 18-24 °С, з вологістю 40-50%. З електроустаткувань в ньому знаходяться відео термінальні пристрої та учбові стенди, які знаходяться під напругою.

Причини ураження електричним струмом [25].

1. Пошкодження устаткування.
2. Пошкодження ізоляції.
3. Коротке замикання на землю або на корпус.
4. Порушення правил техніки безпеки и роботи с електроустаткуванням.

Для забезпечення електробезпеки в даному приміщенні використовуються такі технічні засоби:

- захисне заземлення;
- мала напруга;
- захисне відімкнення;
- ізоляція струмопроводів;
- знаки безпеки.

Захисне заземлення — навмисне електричне з'єднання з землею або її еквівалентом металевих струмопровідних частин, що можуть опинитися під напругою.

Учбові стенди, які знаходяться в приміщенні, працюють на мінімально можливих напругах, що забезпечує додаткову безпеку.

Усі електроустаткування можна у разі потреби вимкнути через електронний щит управління, який миттєво знеструмлює усі стенди та відео термінальні пристрої. Скрізь, де встановлені розетки є попереджувальні знаки.

4.5 Пожежна та техногенна безпека об’єкту

Приміщення відноситься за вибухопожежною небезпекою до категорії “Б” [23].

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” [25]. Це горіння обладнання та установок, які знаходяться під електричною напругою. Серед необхідних засобів гасіння пожежі в даному приміщені є два вуглекислих 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.

3.6 Розрахунок освітлення робочого місця

Загальний світловий потік визначається за формулою [23,24]:

$$F_{зсп} = \frac{E_н \cdot S \cdot z1 \cdot z2}{V} \quad (4.1)$$

де $E_н$ - нормована освітленість ($E_н$ = 300лк), S - площа приміщення; z1 - коефіцієнт, що враховує старіння ламп і забруднення світильників (z1=1,5); z2 - коефіцієнт, що враховує нерівномірність освітлення приміщення (z2 = 1,1); V - коефіцієнт використання світлового потоку, визначається в залежності від коефіцієнтів відбиття від стін, стелі, робочих поверхонь, типів світильників і геометрії приміщення.

Площа приміщення:

$$S = A \cdot B = 8{,}5 \cdot 5{,}9 = 50{,}12 см^2 \quad (4.2)$$

Виберемо з таблиці коефіцієнт використання світлового потоку за наступними даними:

- коефіцієнт відбиття білої стелі Rп=70%;
- коефіцієнт відбиття від стін, забарвлених в світлу фарбу Rст=50%;
- коефіцієнт відбиття від підлоги, покритої лінолеумом темного кольору Rр=10%;
- індекс приміщення

$$I = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} = \frac{8{,}5 \cdot 5{,}9}{4 \cdot (8{,}5 + 5{,}9)} = 0{,}87 \quad (4.3)$$

Знайдений коефіцієнт [3]: V = 0,62.

За формулою (4.1) визначаємо загальний світловий потік:

$$F_{зсп} = \frac{300 \cdot 50{,}15 \cdot 1{,}1 \cdot 1{,}5}{0{,}62} = 40039 \text{ лк.}$$

Для організації загального штучного освітлення виберемо лампи типу ЛБ65.

Люмінесцентні лампи мають ряд переваг перед лампами розжарювання: їх спектр ближче до природного; вони мають велику економічність (більше світловіддача) і термін служби у 10-12 раз більше. Поряд з цим є й недоліки: їх робота супроводжується іноді шумом; гірше працюють при низьких температурах; їх не можна застосовувати у вибухонебезпечних приміщеннях; мають малу інерційність. Для нашого приміщення люмінесцентні лампи підходять.

Світловий потік однієї лампи ЛБ65 становить не менш $F_л$ = 4600 лм. Число N ламп, необхідних для організації загального освітлення визначається за формулою:

$$N = \frac{F_{зсп}}{F_л} = \frac{40039}{4600} = 12 \qquad (4.4)$$

В якості світильників вибираємо ПВЛ-1, 2×65 Вт. Електрична потужність однієї лампи ЛБ65 $W_л$ = 65 Вт.

Потужність всієї освітлювальної системи:

$$W_{ос} = W_л \cdot N = 65 \cdot 12 = 780 Вт \qquad (4.5)$$

Розміщення світильників ПВЛ-1, 2×65 Вт представлено на рисунку 4.2.

Таким чином, щоб забезпечити світловий потік $F_{зсп}$ = 40039 лм в даному приміщенні використовується 6 світильників по 2 лампи ЛБ65 в кожному. Згідно розрахунків освітленість приміщення відповідає встановленим нормам.

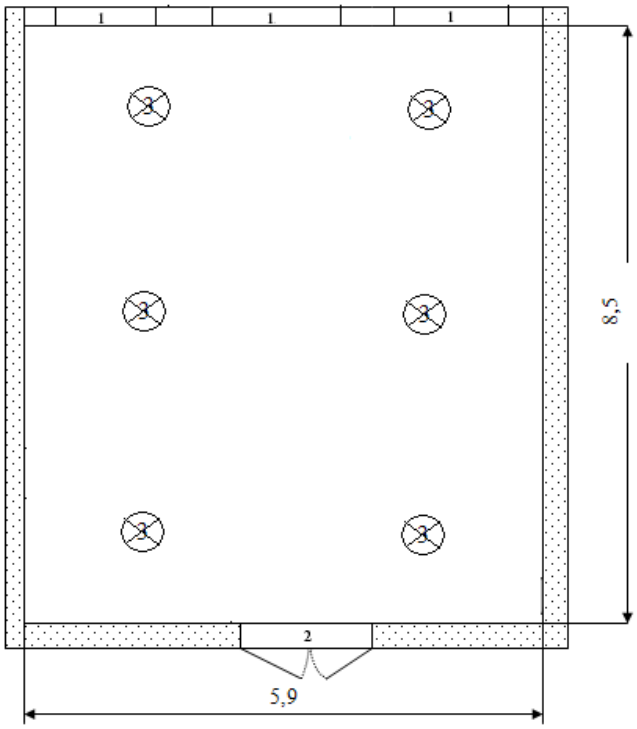


Рисунок 4.2 – План розташування світильників

Отже, за результатами виконання роботи можна зробити наступні висновки:

1) розвиток п’єзоелектричних компонентів МЕМС на сучасному етапі мікроелектроніки є ще достатньо актуальним, так як елементи механічних конструкцій п’єзоприводів є ще співрозмірними із мікродіапазоном;

2) подальша еволюція МЕМС із мікро- до нано- ситем безперечно призведе до потреби вдосконалення як механіної, так і електричної складової розробок із урахуванням фізичних обмежень наноелектроніки;

3) актуальним постає питання схемотехнічної реалізації систем керування МЕМС пристроями на перехідному етапі імплементації мікрокомпонент до наноектронних комплексів

4) для розробки обрано МЕМС резонансного п’єзоелектричного мікродвигуна;

5) структурна схема включає безпосередньо двигун, генератор керуючих сигналів, систему зворотнього зв’язку, яка забезпечує коригування параметрами генератора в залежності від переміщення виконавчого механізма двигуна, персональний комп’ютер для обробки та керування сигналів системи;

6) за основу роботи мікродвигуна використано принцип зворотного п’єзоефекта, у результаті якого при подачі двофазної напруги на протилежні пари пластин п’єзокераміки в них виникають механічні рухи, які передаються металевій муфті, у наслідок чого ходовий гвинт обертається і лінійно переміщується відносно муфти;

7) у результаті аналізу електро-фізичних влстивостей п’єзоелементів, для матеріалу п’єзопластин обираємо релаксор $PbZn_{1/3}Nb_{2/3}O_3$ — 4,5 % $PbTiO_3$ (PZN — 4,5 % PT);

8) на підставі основних вимог до характеристик генераторів та, виходячи із умов, які висуваються до матеріалу двигуна обрано схему

генератора керуючих сигналів із використанням компараторів, заснованих на мікросхемах LM293 AD;

9) схема зворотного зв'язку МЕМС п'єзоелектричного мікродвигуна використовується спільно із системою позиціювання вимірювального зонда силової скануючої мікроскопії;

10) для покращення схеми зворотного зв'язку використовується схема оптичного каналу - на кантилевер мікроскопа пропонується подається лазерне випромінювання. По відбитому променю, який спрямовується нафотодіод налаштовується положення мікродвигуна;

11) у якості випромінювача та фотоприймача схеми оптичного каналу системи зворотного звяку п'єзоелектричного мікродвигуна використовуємо світлодіод L11767-0066L та фотодіод S1787-04 фірми Hamamatsu, оптичні характеристики яких добре узгоджуються;

12) за допомогою САПР електроніки Electronics Workbench та 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. Jeremie Bouchaud, Richard Dixon. MEMS market brief, Isuppli, January – 2009. P. 23-32.

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

7. Горячко А. М., Кулик С. П., Прокопенко О. В. Основи скануючої зондової мікроскопії та спектроскопії : Навчальний посібник / за ред. С. П. Кулика та О. В. Прокопенка. Київ : Радіофізичний факультет Київського національного університету імені Тараса Шевченка, 2012. 170 с.

8. Основи наноелектроніки : підручник : у 2 кн. Кн. 2 : Матеріали і нанноелектронні технології / Ю. І. Якименко та ін. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 340 с. URL : http://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi73/0053956.pdf. (дата звернення 01.08.2024).

9. 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.

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

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

12. ISO 9001:2000 Quality management systems – Requirements. ДСТУ 3921.2-2000 (ISO 10012-2:1997) Забезпечення якості засобами вимірювальної техніки, Частина 2. Настанови щодо контролю процесів вимірювань. [Електронний ресурс]; режим доступу URL :https://www.zoda.gov.ua/files/WP_Article_File/original/000011/11933.pdf(дата звернення 01.08.2024).

13. Петренко, С.Ф. П'єзоелектричний двигун в приладобудуванні / С.Ф Петренко, - К.: «Корншчук», 2002. – 96 с.

14. Поплавко Ю. М. П’єзоелектрики: навч. посіб. / Ю. М. Поплавко, Ю. І. Якименко. Київ : НТУУ «КПІ», 2013 328 с.

15. Бойко В.С., Бойко В.В., Видолоб Ю.Ф. Теоретичні основи електротехніки: Підручник: У 3 т. Видавництво «Політехніка», 2004. – Т.1: Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами. – 272 с.: іл. Т.1: Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами. – 272 с.: іл.

16. Паначевний Б.І., Свергун Ю.Ф. Загальна електротехніка: Підручник. 2-ге вид. – К.: Каравела, 2007. – 296 с

17. Micropower Voltage ReferencePrecision, Single Supply Op Amp URL : https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/lt-journal-article/ltmag_v05n4_dec95.pdf (дата звернення: 10.08.2024).

18. Матеріали сайту Радіомаг URL : https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/lm293ad_123306.html (дата звернення: 10.08.2024).

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

20. Горячко А. М., Кулик С. П., Прокопенко О. В. Основи скануючої зондової мікроскопії та спектроскопії : Навчальний посібник / за ред. С. П. Кулика та О. В. Прокопенка. Київ : Радіофізичний факультет Київського національного університету імені Тараса Шевченка, 2012. 170 с.

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

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

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

24. 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.

25. 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.

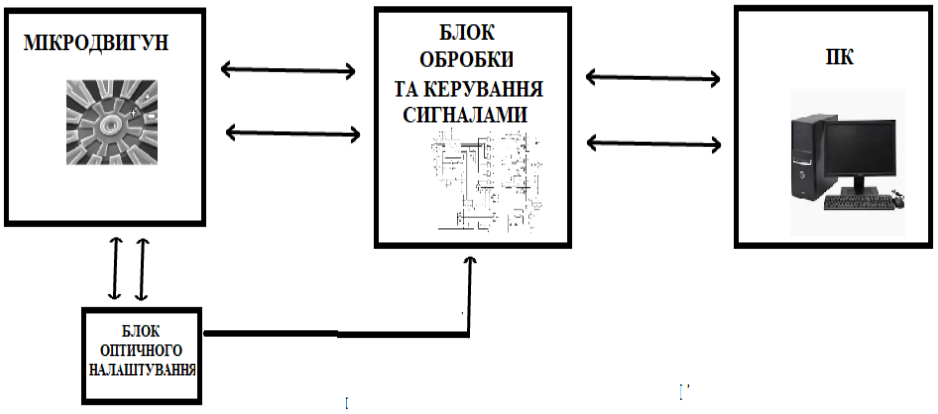


Рисунок 1 – Структурна схема системи керування параметрами електростатичного мікродвигуна

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.