Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ МІКРОПЕРЕМІЩЕНЬ ДЛЯ МАНІПУЛЮВАННЯ МІНІАТЮРНИМИ ОБ'ЄКТАМИ

EXPLORATION OF MICRO-MOVEMENT SYSTEMS FOR MANIPULATING MINIATURE OBJECTS

спеціальність 176 Мікро- та наносистемна техніка
(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Мікро- та наносистемна техніка»
(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи МНТм-21
КРАВЧУК Олександр Олегович
_____
(підпис)

Керівник:
К.т.н., доцент
ДЕНИСЮК Віктор Юрійович
_____
(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«___» _____ 2025 р.
К.т.н., доцент
Гарант освітньої програми:
ЛАПЧЕНКО Юрій Сергійович
_____
(підпис)

Луцьк – 2025 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: *комп'ютерних та інформаційних технологій*
Кафедра: *автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій*
Ступінь вищої освіти: *магістр*
Галузь знань: *17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації*
Спеціальність: *176 Мікро- та наносистемна техніка*
Освітня програма: *«Мікро- та наносистемна техніка»*

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
д.т.н., професор Повстяной О.Ю.
_____
«___» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Кравчуку Олександру Олеговичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи *Дослідження систем мікропереміщень для маніпулювання мініатюрними об'єктами*

Керівник роботи: *к.т.н., доцент Денисюк Віктор Юрійович*

затверджені наказом закладу вищої освіти від «27» червня 2025 р. № 304/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи «01» грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: *методика взаємопов'язаних механічних, електромеханічних та вимірювальних аспектів функціонування систем мікропереміщень, призначених для точного позиціонування і маніпулювання мініатюрними об'єктами; методи оцінки точності, стабільності та динамічних характеристик системи; методи вивчення впливу конструктивних та матеріальних параметрів на ефективність мікропереміщень та визначення оптимальних режимів роботи для забезпечення високої повторюваності позиціонування.*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що потрібно розробити):
Анотація. Вступ. 1. Аналіз вихідних даних та шляхи вирішення поставленого завдання. 2. Теоретична частина. 3. Експериментально-розрахункова частина. 4. Спеціальна частина. Загальні висновки та рекомендації. Список використаних джерел.

5. Перелік графічного матеріалу:
Графічний матеріал виконано у вигляді презентації, яка складається з 18 слайдів.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
Аналіз вихідних даних та шляхи вирішення поставленого завдання	*Денисюк В.Ю.*		
Теоретична частина	*Денисюк В.Ю.*		
Експериментально-розрахункова частина	*Денисюк В.Ю.*		
Спеціальна частина	*Денисюк В.Ю.*		
Нормоконтроль	*Лапченко Ю.С.*		
Гарант ОПП	*Лапченко Ю.С.*		
Показник запозичень тексту	***3,14 %***		
Академічна доброчесність	*Федік Л.Ю.*		

7. Дата видачі завдання «27» червня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	*Аналіз вихідних даних та шляхи вирішення поставленого завдання*	До 01.10.2025 р.	
2.	*Теоретична частина*	До 15.10.2025 р.	
3.	*Експериментально-розрахункова частина*	До 01.11.2025 р.	
4.	*Спеціальна частина*	До 15.11.2025 р.	
5.	*Загальні висновки та рекомендації*	До 17.11.2025 р.	
6.	*Оформлення пояснювальної записки*	До 20.11.2025 р.	
7.	*Оформлення презентації*	До 23.11.2025 р.	
8.	*Нормоконтроль*	До 25.11.2025 р.	
9.	*Інструментальна перевірка і експертне оцінювання рівня унікальності тексту*	До 28.11.2025 р.	
10.	*Представлення роботи до захисту*	До 01.12.2025 р.	

Здобувач вищої освіти _____ (Кравчук О. О.)
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____ (Денисюк В. Ю.)
(підпис) (прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Кравчук О. О. Дослідження систем мікропереміщень для маніпулювання мініатюрними об’єктами. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Мікро- та наносистемна техніка» спеціальності 176 Мікро- та наносистемна техніка. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків.

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню багатокоординатних систем мікропереміщення і їх модулів на базі п’єзоелектричних перетворювачів для маніпулювання мініатюрними об’єктами.

У роботі запропонована концепція мехатронних маніпуляційних систем мікропереміщень з деревовидною структурою, заснованою на принципах біоніки, що дозволяє досягти високої варіативності маніпулювання з мінімальним ускладненням конструкцій мікроманіпуляторів. Запропоновані нові схемні рішення мехатронних модулів з одного, двома і трьома ступенями вільності на базі біморфних п’єзоелектричних приводів. Показано, що біморфний п’єзоелектричний привід скорочує кінематичний ланцюг модулів мікропереміщень в порівнянні з іншими елементами, що перетворюють електричну енергію в механічну. Біморфні п’єзоелектричні приводи, завдяки використанню прямого і зворотного п’єзоефекту, можуть бути елементами мініатюрних мехатронних систем мікропереміщень. Застосування методики розрахунку пружних систем з біморфними п’єзоелектричними приводами дозволяє швидко провести аналіз фізичної картини системи мікропереміщень при дії електричної напруги і зовнішніх механічних навантажень, оцінити і вибрати варіант кінематичної схеми системи і його модулів, знайти оптимальні параметри елементів системи.

Ключові слова: мікроманіпуляційна система, мікропозиціонування, мехатронний пристрій, біморф, п’єзоелектричний захват, п’єзопривід.

ANNOTATION

Kravchuk O. Exploration of micro-movement systems for manipulating miniature objects. Manuscript.

Qualification work of the master of OP «Micro- and nanosystem technology» specialty 176 Micro- and nanosystem technology. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

The master's qualification work consists of an introduction, four sections, conclusions, a list of sources used, appendices.

The paper proposes a concept of mechatronic manipulation systems of micromovements with a tree-like structure based on the principles of bionics, which allows to achieve high variability of manipulation with minimal complication of micromanipulator designs. New schematic solutions of mechatronic modules with one, two and three degrees of freedom based on bimorphic piezoelectric actuators are proposed. It is shown that the bimorphic piezoelectric actuator shortens the kinematic chain of microdisplacement modules in comparison with other elements that convert electrical energy into mechanical energy. Bimorphic piezoelectric actuators, thanks to the use of direct and reverse piezoelectric effect, can be elements of miniature mechatronic systems of microdisplacement. The application of the methodology for calculating elastic systems with bimorphic piezoelectric actuators allows you to quickly analyze the physical picture of the microdisplacement system under the action of electric voltage and external mechanical loads, evaluate and choose a variant of the kinematic scheme of the system and its modules, and find the optimal parameters of the system elements.

Key words: micromanipulation system, micropositioning, mechatronic device, bimorph, piezoelectric gripper, piezo drive.

ЗМІСТ

ВСТУП……..…….…. 9
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ВИХІДНИХ ДАНИХ ТА ШЛЯХИ ВИРІШЕННЯ ПОСТАВЛЕНОГО ЗАВДАННЯ ……. 13
1.1 Аналіз задачі, яка буде вирішуватись в рамках досліджень систем мікропереміщень для маніпулювання мініатюрними об’єктами … 13
1.2 Огляд інформаційних джерел по мікроманіпуляційних системах і їх елементах ……..……... 21
1.3 Пошук шляхів реалізації поставленого завдання ……..... 35
1.4 Постановка завдань по кваліфікаційній роботі магістра ……. 39
Висновки до розділу …… 40
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА …….……..…. 42
2.1 Аналіз фізичних перетворень, які присутні в п’єзоелектричних мехатронних модулях мікропереміщення …… 42
2.2 Характеристика наявних (існуючих) теоретичних положень в контексті функціонування модулів мікропереміщення …….. 44
2.3 Математичне моделювання модулів мікропереміщень з біморфними п’єзоприводами ……..……..…… 56
Висновки до розділу …… 71
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА ….. 73
3.1 Схемне представлення кінематики модулів мікропереміщення з біморфними п’єзоприводами ……..…… 73
3.2 Принцип функціонування модулів мікропереміщення з біморфними п’єзоприводами …….…….. 81
3.3 Обґрунтування вибору кінематики модулів мікропереміщень з біморфними п’єзоприводами…….. 84
3.4 Розробка схеми функціонування і дослідження п’єзоелектричного захвату з мікропозиціонуванням…….. 100

3.5 Моделювання динаміки пружних систем з біморфними п’єзоелектричними перетворювачами ……..…..... 111
Висновки до розділу ……... 121
РОЗДІЛ 4 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА ……..….....…. 123
4.1 П’єзоелектричний привід з регулюванням за положенням……. 123
4.2 П’єзоелектричний привід з підпорядкованим регулюванням ……. 127
4.3 Широтно-імпульсне керування п’єзоактюатором ……..…….. 129
Висновки до розділу……... 131
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ …….……... 132
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ …….…… 135
ДОДАТКИ …….…….……..... 139

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ ТА СКОРОЧЕНЬ

СМП – системи мікропереміщень;

МЕМС – мікроелектромеханічна система;

ММС – мікроманіпуляційні системи;

АМР – автономні мікророботи;

ММ – мікромеханічний модуль;

ППМ – п’єзоелектричний привід мікропереміщень;

БПП – біморфний п’єзоелектричний привід;

ПКП – п’єзокерамічна пластинка;

ПКШ – п’єзокерамічна шайба;

СПП – складовий п’єзоелектричний перетворювач;

ПП – п’єзоелектричний перетворювач;

АПН – активні пружні напрямні;

АПШ – активні пружні шарніри;

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;

ЛАХ – логарифмічна амплітудно-частотна характеристика;

ФЧХ – фазо-частотна характеристика;

ПК – п’єзокераміка;

ПД – п’єзодвигун;

МКСК – мікроконтролерні системи керування;

МК – мікроконтролер;

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач;

СП – силовий перетворювач;

ДП – датчик переміщення;

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція;

ЛКП – лінійний кроковий п’єзодвигун.

ВСТУП

Актуальність теми. Сфера мікромеханіки активно розвивається у різних галузях техніки, зокрема в мікроелектроніці, приладобудуванні та медичній техніці. Це сприяло широкому впровадженню п’єзоелектричних перетворювачів (ПП), які застосовуються як двигуни та елементи пружних систем. Постійно з’являються нові напрями використання ПП у задачах маніпуляції робочими органами високоточних мініатюрних і мікромеханічних систем.

Сучасні технічні завдання вимагають забезпечення лінійних переміщень мікрооб’єктів у межах 0,01-1 мм та кутових переміщень 0,5°-3° з дискретністю до 1 мкм і 10 кут. сек. Такі системи мікропереміщень (СМП) використовуються у мікроманіпуляторах для біологічних досліджень на клітинному рівні, складанні мікропристроїв (мікроклапанів, мікродвигунів, реле, мікросхем), а також у лазерних сканерах, системах юстирування та адаптивної оптики. Застосування традиційних електромеханічних приводів у таких системах є малоефективним через їх громіздкість і високу вартість. Потреба у компактності та точності відтворення руху зумовила розвиток п’єзоелектричних мехатронних систем, у яких поєднано функції приводу, механічних передач і керування.

Проблема дослідження. При проєктуванні мікромеханічних систем необхідно мати повні дані про характеристики, які визначають оптимальність конструкції: траєкторії руху робочих органів, величини переміщень, силові показники, керованість у заданому частотному діапазоні. Спершу доцільно здійснити аналіз існуючих СМП з метою визначення граничних параметрів. Далі потрібно встановити геометричні та фізичні характеристики елементів, що перетворюють електричну енергію у механічну, з урахуванням обмежень на габарити, сили, робочі частоти тощо. Для цього необхідна розробка типових схемних рішень СМП, створення математичних моделей модулів із характерними кінематичними властивостями, що дозволять визначати необхідні параметри. Особливу увагу слід приділити пружним пристроям, кінцеві ланки яких забезпечують поступальні, обертальні або комбіновані рухи. Важливим

аспектом є узгодження вхідних і вихідних параметрів модулів при їх послідовному та паралельному з’єднанні.

Для створення ефективних СМП необхідно вирішити зазначені проблеми, тому тема кваліфікаційної роботи магістра, в якій розробляються питання теорії і проєктування СМП, є актуальною.

Мета кваліфікаційної роботи – дослідження методів проєктування модулів систем мікропереміщень на основі п’єзоелектричних приводів та формування практичних рекомендацій для створення високоефективних СМП у приладобудуванні.

Об’єкт дослідження – мікропереміщення в мікроманіпуляційних системах з п’єзоелектричними приводами.

Предмет дослідження – мікроманіпуляційні системи з п’єзоелектричним приводом.

Методи досліджень. У роботі використані методи теоретичної механіки, теорії пружності, теорії та автоматичного управління, системного аналізу, фізики пружних п’єзоелектричних і пасивних пружних середовищ, числені методи розрахунку переміщень і деформацій, пакети прикладних програм MatCad-2020.

Задачі дослідження:

1. Проаналізувати сучасний стан розробок виконавчих пристроїв для прецизійного позиціонування та класифікувати СМП і їх приводи.

2. Розробити концепцію побудови маніпуляційних СМП і дослідити рухи робочих органів.

3. Визначити вимоги до модулів із ПП та запропонувати нові схемні рішення пружних пристроїв.

4. Встановити параметри деформованого стану п’єзокерамічних елементів при подачі напруги.

5. Розробити методику розрахунку переміщень багатокоординатних пружних систем при дії електричної напруги та зовнішніх сил.

6. Дослідити амплітуди вимушених коливань вихідних ланок з урахуванням добротності елементів системи.

7. Провести експериментальні дослідження та зіставити їх із результатами математичного моделювання.

8. Сформулювати рекомендації щодо проєктування пристроїв з ПП.

Теоретична значущість. У роботі вирішено комплексну задачу формування теоретичних основ і методології розрахунку та проєктування багатокоординатних систем мікропереміщень на основі ПП.

Практична цінність та галузь застосування. Отримані результати дозволяють створювати різноманітні мехатронні СМП і визначати перспективні напрями їх розвитку. Методика розрахунку пружних систем з біморфними ПП забезпечує швидкий аналіз фізичних процесів у СМП, визначення оптимальних параметрів елементів та схем. Розроблені рішення можуть бути використані в медичній техніці (мікроманіпулятори, ендоскопічні та мікрохірургічні роботи), приладобудуванні та електронній промисловості (маніпулятори, віброживильники, системи позиціонування), а також в оптоелектроніці, пневмо- та гідроавтоматиці.

Наукова новизна роботи.

1. Запропоновано концепцію побудови багатокоординатних мехатронних СМП із деревоподібною структурою для підвищення надійності й варіативності маніпулювання.

2. Розроблено нові схемні рішення пружних СМП з біморфними ПП зі скороченими кінематичними ланцюгами та систематизовано їх за видом траєкторій руху.

3. Створено методику розрахунку пружних систем з біморфними ПП для визначення переміщень, деформацій та напружень у квазістаціонарному й динамічному режимах.

4. Побудовано комплекс розрахункових моделей пружних систем із замкнутими та розімкнутими кінематичними ланцюгами та виконано їх параметричну оптимізацію.

5. Розроблено методику аналізу динаміки модулів мікропереміщень при зовнішньому навантаженні з урахуванням внутрішніх втрат у п’єзоелектричних

і механічних середовищах.

Апробація результатів кваліфікаційної роботи магістра:

1. XI Міжнародна науково-практична конференція молодих учених, аспірантів і студентів «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології – 2025», (м. Київ, 07 травня 2025 року).

2. XIII-та Міжнародна науково-практична інтернет-конференція молодих учених та студентів «Актуальні проблеми автоматизації та управління», (м. Луцьк, 28 листопада 2025 року).

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ ВИХІДНИХ ДАНИХ ТА ШЛЯХИ ВИРІШЕННЯ ПОСТАВЛЕНОГО ЗАВДАННЯ

1.1 Аналіз задачі, яка буде вирішуватись в рамках досліджень систем мікропереміщень для маніпулювання мініатюрними об’єктами

Системи мікропереміщень (СМП) мініатюрних об’єктів застосовуються у приладобудуванні вже протягом кількох десятиліть, головним чином у сфері оптико-механічних пристроїв та годинникових механізмів. Наприкінці XX – на початку XXI століття відбувся різкий стрибок у розвитку технологій, пов’язаних із виробництвом комп’ютерної техніки, що відкрило шлях до створення принципово нових пристроїв мікросистемної техніки. Серед найвагоміших досягнень цього етапу – мініатюрні годинникові механізми, мікрофотоапарати, портативні магнітофони для спеціальних служб, а також електромагнітні реле малих габаритів (наприклад, поляризоване реле РЕЗ-45 об’ємом лише 250 мм³). Проте подальшого якісного зменшення розмірів механічних систем за умов традиційного машинобудування та приладобудування досягти було неможливо – техніка наблизилася до своєї «фізичної межі».

Робототехнічні комплекси, що використовували СМП для складання мініатюрних виробів, виявилися громіздкими, малонадійними та потребували постійної участі оператора. До 70-80-х років XX століття чітко проявилося протиріччя: рівень розвитку електронної промисловості значно випереджав можливості традиційного виробництва мініатюрних електромеханічних систем, обмежених технологіями точного машинобудування та низьким рівнем автоматизації. Потреби оборонної та космічної галузей, медицини, екологічного моніторингу й атомної енергетики стали поштовхом до розвитку мініатюрних і мікроелектромеханічних систем (МЕМС).

До мініатюрних електромеханічних пристроїв умовно відносять системи розміром від 10×10×10 мм до 50×50×50 мм, тоді як ще менші об’єкти вже класифікують як мікросистеми. СМП забезпечують переміщення вихідної ланки

на відстань до 1 мм із мінімальним кроком у десяті частки мікрометра. Окремі СМП здатні здійснювати переміщення з роздільною здатністю до 0,15 Å, що використовується у скануючих тунельних мікроскопах і належить до сфери нанотехнологій [1].

Значні інвестиції у розвиток мікроелектроніки, зокрема у виробництво великих інтегральних схем на основі кремнію, відкрили перспективні напрями і для мікромеханіки. Методи поверхневої та об'ємної мікрообробки напівпровідникових матеріалів, зокрема фотолітографія та рентгенолітографія (LIGA-технологія), дають можливість створювати мікрооб'єкти практично довільної форми з розмірами до кількох мікрометрів [2, 3]. Ці технології дозволяють точно контролювати глибину травлення, формування стінок та каналів, що відкриває шлях до створення механічних структур із високою жорсткістю та міцністю, придатних для передачі зусиль і крутних моментів у мікромеханічних передачах.

Починаючи з 1990-х років, активно розробляються комплексні проєкти мікросистемної техніки, які інтегрують у компактному об'ємі всі ключові компоненти – приводи, сенсори, системи керування та обчислювальні блоки. Логічним продовженням цього процесу є розвиток біонічних СМП, що наслідують ієрархічну організацію біологічних систем: периферичний рівень відповідає за локальні рухи, тоді як «центральний» рівень забезпечує цільове управління, коригуючи дії на основі сенсорної інформації. Таким чином, мехатронні СМП набувають властивостей, подібних до функціонування живих організмів, які сформувалися в процесі еволюції.

Створення СМП поєднує сучасні методи мікроелектронного виробництва з традиційними технологіями точного машинобудування. Зокрема, модулі грубих переміщень та відносно великогабаритні елементи економічно вигідніше виготовляти класичними методами.

За своїм призначенням і функціональними можливостями СМП можна розділити на мікроманіпуляційні системи (ММС), автономні мікроботи (АМР) і приладові СМП (рис. 1.1).

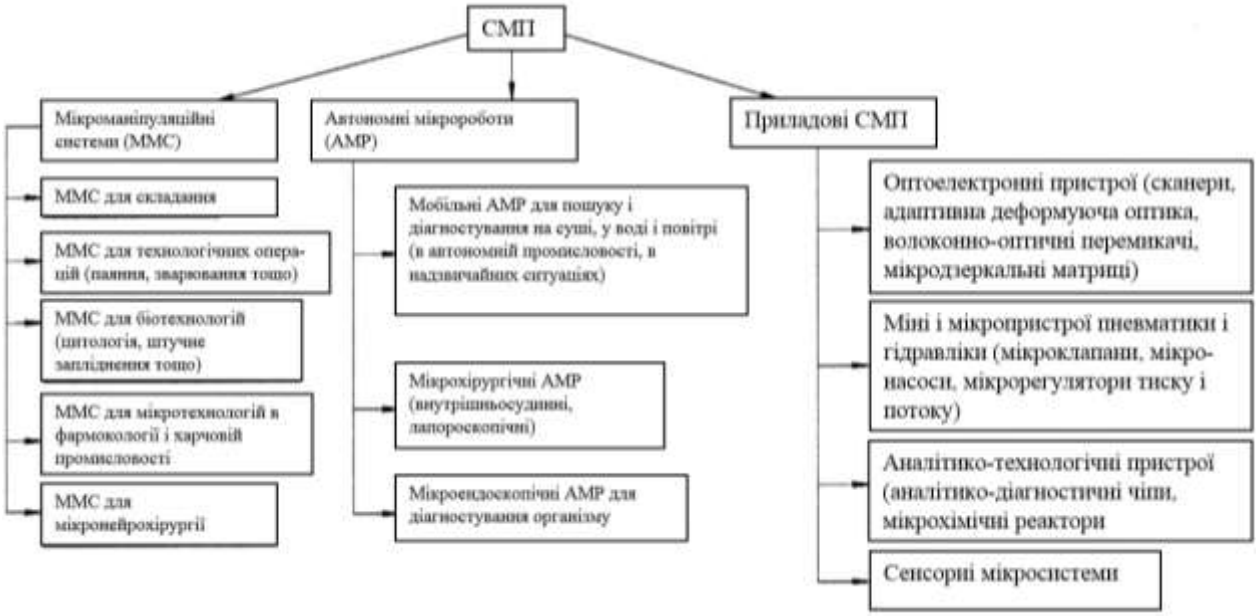


Рисунок 1.1 – Основні напрямки розвитку систем мікропереміщень [3]

Мікроманіпуляційні системи (ММС) – це автоматизовані електромеханічні комплекси, призначені для виконання високоточної технологічної обробки або маніпулювання міні- та мікрооб’єктами. Одним із основних напрямів їх застосування є механічне складання мікромеханічних пристроїв. За функціональними ознаками такі системи подібні до складальних роботів-маніпуляторів у точному машинобудуванні, проте вирізняються суттєво вищою точністю позиціонування та обмеженим робочим ходом. Діапазон переміщення робочого органу в залежності від об’єкта складання може становити від 0,2 мм до 5 мм, а точність позиціонування (роздільна здатність) варіюється в межах від 0,5 мкм до 0,05 мм. Окремий клас становлять ММС, що застосовуються для технологічних операцій – зокрема, мікрозварювання, мікропаяння, склеювання мікрооб’єктів, а також для контролю та тестування характеристик мікропристроїв (наприклад, вимірювання електричного опору мікроланцюгів). У цьому випадку вимоги до системи включають не лише високу точність позиціонування, а й можливість забезпечення керованого силового впливу на об’єкт у діапазоні від 10^{-3} Н до 0,1 Н.

На сучасному етапі широкого застосування набули мікроманіпуляційні системи для біологічних технологій і досліджень [4]. Вже з 1990-х років завдяки

впровадженню ММС стало можливим виконання операцій штучного запліднення яйцеклітини. У цитології такі системи використовують для аналізу електричних потенціалів клітинних мембран, де необхідна вища роздільна здатність (близько 0,05 мкм) порівняно з ММС для технологічних процесів.

З кінця 1990-х років з'явилися перші приклади використання ММС в офтальмологічних мікрооперацію. Зокрема, запатентовані у США мікроманіпулятори дозволили виконувати хірургічні втручання на судинах, що живлять зоровий нерв. Водночас їх функціональність залишалася обмеженою допоміжними діями, а точність рухів становила лише близько 0,05 мм.

Перспективним напрямом розвитку є створення систем для дистанційного проведення мікрооперацій. У такому випадку висококваліфікований хірург може керувати мікроманіпулятором віддалено, перебуваючи у власній клініці, тоді як пацієнт перебуває в операційній будь-де за наявності стабільного доступу до Інтернету. Реалізація цієї концепції можлива лише за умови використання високонадійних каналів зв'язку та оснащення системи сенсорними пристроями.

Крім того, мікротехнології у фармакології вимагають застосування мікроманіпуляторів із ще вищою роздільною здатністю, оскільки вони мають забезпечувати вплив на рівні молекул органічних сполук. Подібні параметри реалізуються у ММС, що використовуються в тунельних мікроскопах для сканування мікрорельєфу поверхні матеріалів. Для таких систем характерна роздільна здатність порядку 10-100 нм.

З огляду на погіршення екологічної ситуації та зростання ймовірності виникнення техногенних катастроф, зокрема пов'язаних з атомними об'єктами, а також у зв'язку з загрозами терористичного характеру, виникла гостра потреба у створенні мобільних мініатюрних систем. Такі на перший погляд мініатюрні пристрої мають виконувати складні завдання з пересування у різних середовищах і по поверхнях, а також здійснювати технологічні операції, наприклад, відбір проб зараженого ґрунту. Подібні автономні мікроботи (АМР) можуть бути оснащені мікроманіпуляторами [5].

Окреме місце серед АМР посідають системи, призначені для

малотравматичних хірургічних лапароскопічних та внутрішньосудинних втручань. Сьогодні у провідних клініках світу здійснюється видалення холестеринових бляшок зі стінок судин та припікання виразок стравоходу за допомогою подібних мікроботів. Основними проблемами при створенні таких систем залишаються енергозабезпечення (яке наразі реалізується за допомогою тонких проводів), а також розроблення мініатюрних робочих органів і сенсорних засобів для відчуття зовнішнього середовища. Особливу роль у цій сфері відіграють мікроендоскопічні АМР, які застосовуються для діагностичного огляду внутрішніх порожнин організму та забору мікрозразків тканин для онкологічних досліджень.

Приладові сенсорні мікросистеми (СМП) можуть функціонувати як у складі апаратів традиційних габаритів, так і як елементи ММС або АМР. Одним із найперспективніших напрямів є оптоелектронні пристрої, що базуються на використанні міні- і мікродзеркал та оптичних хвилеводів. До цієї категорії належать оптичні сканери, волоконно-оптичні перемикачі та матриці мікродзеркал для дисплеїв. Такі пристрої знаходять застосування у поліграфії, цифровій обробці зображень, контролі якості продукції, системах зчитування штрих-кодів, конфокальній мікроскопії, ендоскопії, а також у технологіях передачі даних через оптоволоконні розподільники інформаційних потоків [6].

Для подібних систем характерні такі параметри: діаметр дзеркал від 0,4 до 5 мм, кут сканування у діапазоні 20-25°, частота сканування від 100 Гц до 40 кГц. Волоконно-оптичні перемикачі, як правило, формуються з оптичних хвилеводів, між якими на шляху променя розміщуються рухомі мікродзеркала розміром близько 0,2 мм і товщиною 5 мкм. При цьому кут їх повороту може досягати 28° [7].

У вимірювальних та інформаційних лазерних системах широкого застосування набули елементи адаптивної оптики – деформовані дзеркала з контрольованою локальною кривизною, де величина місцевих деформацій обмежується діапазоном 1-3 мкм [8].

Подальший перспективний розвиток приладових сенсорних і

мікроприладових систем (СМП) пов’язаний із створенням міні- та мікропристроїв у сфері пневматики та гідравліки. Ще у 1990-х роках провідні корпорації впровадили біморфні п’єзоприводи у ролі мікровентиляторів для охолодження високопродуктивних інтегральних мікросхем, зокрема процесорів [9]. Генерація вібрацій п’єзопластин на частотах близько 20 кГц створює достатню повітряну конвекцію для підтримання стабільного теплового режиму їх роботи.

Для керування тиском, переміщенням та розподілом потоків рідини і газу з витратою в діапазоні 0,1-100 мм³/с у мініатюрних автоматизованих пристроях почали активно використовувати мікроклапани, мікродозатори, мікронасоси та мікрорегулятори [10]. Подібні СМП є необхідними для створення медичних апаратів, що забезпечують підтримку життєво важливих фізіологічних параметрів під час цілодобового моніторингу стану пацієнтів у відділеннях інтенсивної терапії, а також у терапії інсулінозалежних хворих.

Крім того, мініатюрні пневмогідравлічні системи є важливим елементом аналітичних та технологічних мікропристроїв, інтегрованих в автономні мікроботи (АМР), що застосовуються у хімічній та фармацевтичній промисловості, для безперервного моніторингу стану навколишнього середовища, зокрема в умовах агресивних середовищ.

До приладових сенсорних і мікроприладових систем (СМП) належать також сенсорні мікросистеми. Їх чутливі елементи виконують функцію первинних перетворювачів, формуючи на виході електричний сигнал, що відображає вплив зовнішнього середовища. Природа такого впливу може бути різноманітною: механічною, електричною, магнітною, хімічною, радіаційною тощо. У цій сфері важливе місце займають мікроелектромеханічні системи (МЕМС) [11]. Особливу роль відіграють вібраційні мікрогіроскопи, використання яких у безпілотних літальних апаратах малого класу суттєво підвищує їх стійкість та динамічні характеристики в умовах великих перевантажень [12].

Залежно від швидкодії, амплітуди переміщень та точності позиціонування

робочих органів мікроманіпуляційних систем (ММС), а також вихідних ланок приладових СМП, застосовуються різні електромеханічні перетворювачі, які виконують роль приводних елементів.

За принципом дії такі перетворювачі умовно поділяють на дві основні групи (рис. 1.2):

– приводи прямого перетворення, в яких електрична енергія безпосередньо трансформується в механічну;

– приводи багатоступеневого перетворення, де електрична енергія спочатку трансформується в теплову або іншу форму (наприклад, у хвильову – механічні чи електромагнітні хвилі, включаючи оптичний діапазон), а потім перетворюється в механічну енергію спрямованого руху вихідної ланки СМП.

Рисунок 1.2 – Перетворення енергії в приводах, що застосовуються в системах мікропереміщень [12]

Приводи прямого перетворення енергії широко застосовуються в мікротехнічних системах. До них відносяться такі типи приводів (перераховані за зростанням швидкодії):

– міні- та мікроелектродвигуни постійного струму і крокові – обертового та лінійного типів;

– електромагнітні приводи;

– магнітострикційні приводи;

– п’єзоелектричні та електрострикційні приводи;

– електростатичні приводи;

– електроосмотичні приводи;

– електрогідродинамічні приводи.

Як правило, ці приводи характеризуються високою швидкодією. Найнижча швидкодія спостерігається у приводів, що перетворюють енергію електромагнітного поля в механічну (постійна часу τ = 10-50 мс), що зумовлено інерційністю індуктивної складової та відносно великою масою ротора.

П’єзоелектричні та електрострикційні перетворювачі мають значно кращу швидкодію (τ = 1-20 мс). На їх динамічні характеристики впливає велика електрична ємність паралельно з’єднаних п’єзо- або електрострикційних елементів. Струми в таких системах на один-два порядки менші, ніж у електромагнітних приводів, тому теплові деформації практично незначні.

За силовими характеристиками ці приводи перевершують більшість інших типів, хоча мають суттєвий недолік – наявність гістерезису залежності «напруга – переміщення». Зусилля, яке може створювати стовпчик з п’єзокерамічних дисків, може бути дуже великим, але хід при цьому обмежений. Наприклад, набір із 64 тонких п’єзокерамічних дисків розміром 1,4×3×9 мм при напрузі 150 В забезпечував тиск близько 35 МПа, час спрацьовування близько 0,1 мс та максимальний хід ≈ 0,8 мкм.

1.2 Огляд інформаційних джерел по мікроманіпуляційних системах і їх елементах

Мікроманіпуляційні системи (мікроманіпулятори) призначені для захоплення, утримання та переміщення мікрооб'єктів, а також для виконання різноманітних операцій над ними за допомогою мініатюрних робочих органів. Подібно до маніпуляційних систем більших розмірів (промислових маніпуляторів), ММС включають нерухому основу, модулі переміщень та робочі органи. У випадку маніпуляторів із вільним переміщенням робочого органу, вони утворюють просторовий механізм із розімкненим кінематичним ланцюгом, у якому ланки з'єднані кінематичними парами з приводами, що забезпечують одну ступінь рухливості (обертальну або поступальну) [13].

Для мікроманіпуляторів цей принцип не завжди дотримується. Через малі переміщення робочих органів в оперативній зоні (декілька часток міліметра) рух може забезпечуватись за рахунок пружних деформацій кінематичних елементів маніпулятора. Будь-яка невелика ділянка такого пружного елемента може мати шість ступенів вільності, що відповідає шести компонентам деформацій, які описуються формулами (1.1-1.3):

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}; \tag{1.1}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}; \tag{1.2}$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}; \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \tag{1.3}$$

де ε_x – деформація нескінченно малої ділянки по осі x;

ε_y – деформація нескінченно малої ділянки по осі y;

ε_z – деформація нескінченно малої ділянки по осі z;

γ_{xy} – деформація зсуву в площині xy;

γ_{xz} – деформація зсуву в площині *xz*;

γ_{yz} – деформація зсуву в площині *yz*;

u, *v*, *w* – переміщення по осях *x*, *y*, *z*.

На практиці переміщення будь-якої точки плоского пружного елемента по трьох координатах реалізується досить просто. Це означає, що один керований пружний кінематичний елемент може забезпечувати рух робочого органу мікроманіпулятора у тривимірному просторі. Ця особливість є однією з ключових відмінностей мікроманіпуляторів від маніпуляторів більших розмірів.

Ще однією відмінністю є мала зона обслуговування мікроманіпуляторів: кути сервісу становлять не більше 2°-5°, тоді як у маніпуляторів із циліндричною системою координат вони можуть перевищувати 180°. Хід руки промислового маніпулятора може досягати 80 % від її мінімального розміру у втягненому положенні, тоді як у мікроманіпуляторів із гідропередачею – не більше 20 %. Тому одним із основних напрямів розвитку ММС є збільшення зон обслуговування та кутів сервісу. При використанні МЕМС як вихідних ланок кути повороту важелів мікрозахватів можуть відповідати кутам у «великих» маніпуляторах.

Динамічні навантаження мають значно менший вплив на роботу мікроманіпуляторів порівняно зі звичайними маніпуляторами. Швидкості переміщення робочих органів ММС зазвичай не перевищують 1-2 мм/с, а маси рухомих елементів – 10^{-2} кг. Через це демпфуючі пристрої, необхідні для великих маніпуляторів, у мікросистемах не застосовуються.

Важливою відмінністю є також вплив теплових деформацій на точність переміщень. При малих ходах і високій роздільній здатності теплові дрейфи елементів ММС стають критичними, особливо при роботі спільно з мікроскопами, де необхідне інтенсивне освітлення, що призводить до нагрівання системи.

Оцінимо похибку позиціонування мікроманіпулятора, довжина ланки якої $l = 5 \cdot 10^{-2}$ м, коефіцієнт лінійного розширення $\beta_T = 1{,}1 \cdot 10^{-5}$ 1/град.К (сталь). Зміну

довжини ланки при нагріванні на $\Delta T = 1$ °К можна знайти за формулою $\Delta l = \beta_T l \Delta T = 0{,}55 \cdot 10^{-6} = 0{,}55 \cdot 10^{-6}$ м. Це значення систематичної помилки позиціонування можна порівняти зі ступенем дозволу багатьох мікроманіпуляторів, призначених для біологічних досліджень.

Одним із важливих принципів проєктування ММС є уникнення використання біметалевих ланок. Паралельно з'єднані деталі бажано виготовляти з матеріалів із близькими коефіцієнтами лінійного розширення, оскільки різниця в цих значеннях призводить до вигину конструкції при нагріванні. Крім того, доцільно передбачати термокомпенсуючі елементи, які при нагріванні основних ланок мікроманіпулятора зміщують робочий орган у протилежному напрямку.

На відміну від великих маніпуляторів, для мікроманіпуляторів критичним є захист від зовнішніх вібрацій. Вібрації будівель мають частоти від 10 до 100 Гц, із максимумом амплітуди близько 2 мкм на 15-20 Гц, тому резонансна частота систем віброзахисту ММС повинна знаходитися в діапазоні 2-5 Гц. Завдяки невеликим розмірам мікроманіпуляторів перспективним є застосування методів активного віброзахисту [14].

Зазвичай у мікроманіпуляторах зворотний зв'язок за положенням робочого органу реалізується за допомогою оптичних систем із подальшою обробкою відеосигналу. Наприклад, координати робочого органу можуть визначатися із сигналів двох мініатюрних відеокамер, розташованих у взаємно перпендикулярних площинах. Це дозволяє отримувати координати безпосередньо відносно нерухомої основи, без необхідності перерахунку координат проміжних ланок ММС.

Структура ММС багато в чому нагадує структуру великих маніпуляторів. Виконавчий блок зазвичай побудований за принципом послідовного розімкненого кінематичного ланцюга: кожен модуль, що забезпечує певні ступені рухливості, розташовується на рухомій частині попереднього. На базовому модулі встановлюються послідовно модулі переміщень. Якщо модулі грубих переміщень не забезпечують необхідної точності, додатково

використовуються модулі точних переміщень.

Для прикладу розглянемо ММС, призначену для роботи з мікрооб'єктами розміром 0,1×0,1×0,1 мм. Робочий орган переміщується оператором за допомогою джойстика, при цьому спостереження ведеться через монітор. Мінімальний хід робочого органу становить 1 % від розміру об'єкта (1 мкм), а похибка кроку – близько 0,5 мкм. Швидкість руху робочого органу при точних операціях складає від 1 мкм/с до 0,2 мм/с, а при швидкому переміщенні поза робочою зоною – від 1 мм/с до 10 мм/с. Такі параметри відповідають завданням біологічних досліджень на рівні клітини та технологічних процесів складання електронних пристроїв і мікромеханізмів.

ММС зазвичай мають кілька режимів роботи [15].

1. Налагоджувальний режим – перевірка роботоздатності всіх модулів, ручне управління.

2. Режим грубих переміщень – прискорене підведення робочого органу до об'єкта, можливе ручне або автоматичне керування.

3. Режим точних переміщень – робочий режим для точних маніпуляцій, з ручним або автоматичним керуванням.

Ці режими реалізуються в ММС з дворівневою структурою: нижній рівень відповідає за налаштування системи, а верхній забезпечує переміщення робочого органу по всіх координатах як у режимі грубих, так і точних переміщень. Проте така конструкція має певні недоліки. Під час точних переміщень рухаються всі елементи системи, що негативно впливає на динамічні характеристики ММС. Крім того, робоча зона обмежена, оскільки дана схема дозволяє реалізувати лише 3-4 ступені рухливості; збільшення їх числа значно збільшує габарити конструкції. Для ілюстрації можна розглянути ММС, призначену для роботи з біооб'єктами (рис. 1.3).

ММС складається з двох основних блоків: нерухомого блоку 1 та маніпуляційного блоку 2. У нерухомому блоці на тримачі 3 фіксується об'єкт дослідження 4 (наприклад, за допомогою вакуумного захоплення).

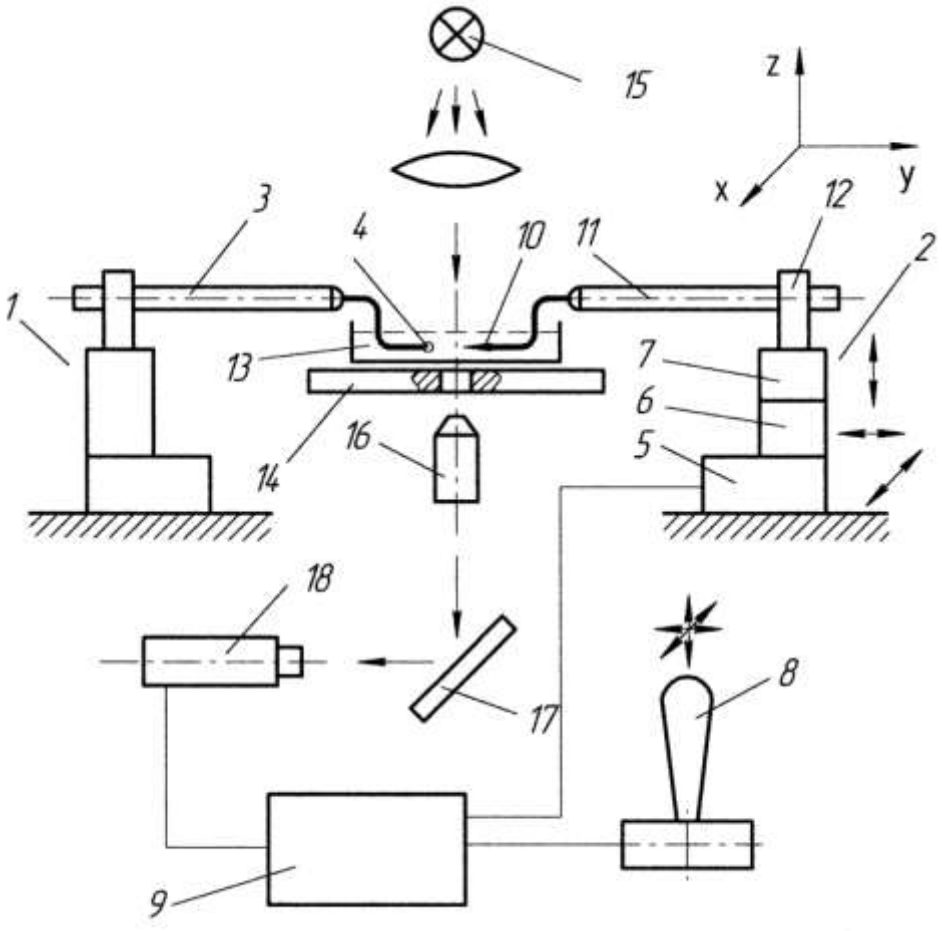


Рисунок 1.3 – Традиційна схема роботи з мікрооб’єктами [15]

Маніпуляційний блок 2 містить три однакових модулі 5, 6 і 7, кожен із яких забезпечує переміщення робочого органу по одній координаті, надаючи ММС три ступені вільності *x*, *y*, *z*. Керування може здійснюватися вручну за допомогою джойстика 8 або мікрометричних гвинтів (на схемі не показано), а також автоматично через комп’ютер 9.

Робочий орган ММС 10 (голка) закріплений в тримачі 11, який в свою чергу зафіксований на платформі 12 модуля 7. Об’єкт дослідження 4 і робочий орган 10 поміщені при роботі в прозору кювету 13, що знаходиться на предметному столику 14. Робоча зона освітлюється джерелом світла 15. Візуальна інформація про робочу зону через об’єктив 16 надходить, відбиваючись від дзеркала 17 на відеокамеру 18.

Останнім часом набули найбільшого поширення ММС з гідравлічними приводами [16]. Конструктивно маніпуляційний блок в такій системі (рис. 1.4)

має основу у вигляді стійки 1, на якій встановлений модуль 2 з одним ступенем вільності. На ньому послідовно встановлені аналогічні модулі 3 і 4. Всі три модулі мають гідравлічні приводи, зв’язані через гнучкі трубки з блоком керуючих гідроциліндрів 5, 6, 7, що приводяться в рух або вручну, або за допомогою крокових електроприводів. На модулі 4 встановлений тримач 8, в якому зафіксовано робочий орган – голка 9.

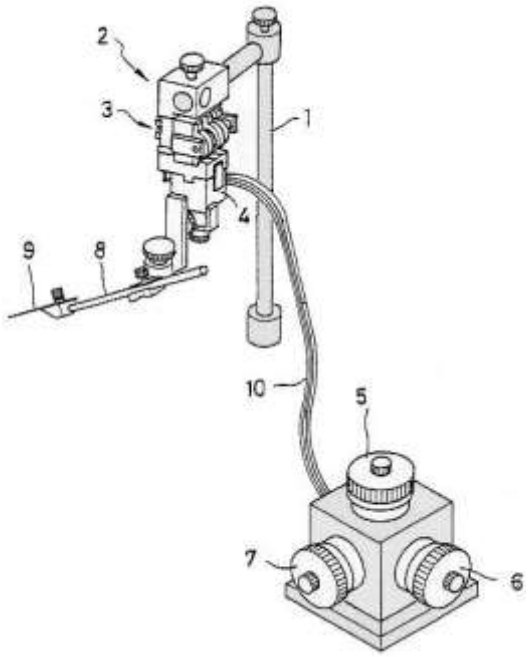


Рисунок 1.4 – Мікроманіпуляційна система з гідравлічними приводами [16]

Кожен модуль такий ММС може мати наступне конструктивне рішення (рис. 1.5). Він має основу 1, відносно якої по напрямних ковзання рухається каретка 2 за рахунок двох мініатюрних гідроциліндрів 3, 4. Штоки гідроциліндрів 3, 4 закріплені на основі 1 корпусу – на каретці 2. При русі в напрямку А робоча рідина подається через трубку 5 в гідроциліндр 3, а з гідроциліндра 4 робоча рідина витікає по трубці 6 через дросель, створюючи тим самим постійний опір руху каретки. При русі в напрямку В робота циліндрів змінюється. Таке технічне рішення дозволяє зменшити вплив тертя ковзання при реверсі, однак, при переміщеннях порядку 1 мкм можливі стрибкоподібні ривки каретки 2 з тримачами 7, 8 і робочим органом 9.

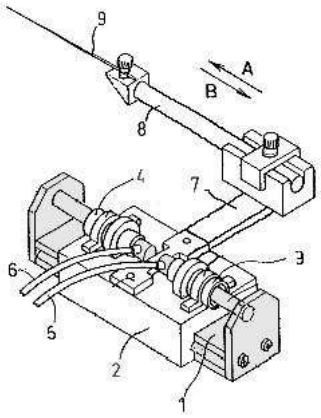


Рисунок 1.5 – Модуль з гідроприводом [16]

Ще одним прикладом структури ММС є мікроманіпулятор, розроблений для офтальмологічних операцій [16]. У мікрохірургії як інструмент використовується мікроканюля, через яку доставляються лікарські засоби до судин очного нерва (рис. 1.6).

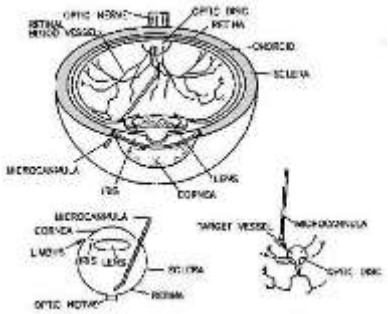


Рисунок 1.6 – Схема офтальмологічної операції за допомогою мікроманіпулятора [16]

У цій ММС (рис. 1.7) мікроманіпулятор 1 встановлюється та фіксується відносно оперативної зони всередині склери ока (приблизні розміри зони – 1×1×1 мм) за допомогою багатоланкової важільної стійки 2, закріпленої на основі 3. Сам мікроманіпулятор забезпечує одну поступальну ступінь вільності, що відповідає за подачу робочого органу до кровоносних мікросудин. Рух інструменту здійснюється через гідропривід 4, у який робоча рідина подається по трубці 5. Лікарський препарат вводиться в кровоносну судину через мікроканюлі 6 за допомогою шприца 7.

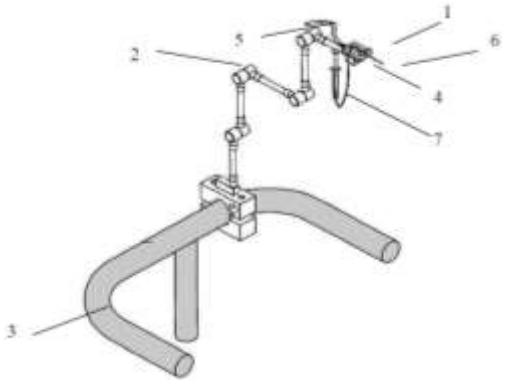


Рисунок 1.7 – Мікроманіпулятор для офтальмологічних операцій [16]

Цей приклад демонструє, що при такому складному налаштуванні базового модуля, коли виставлення робочого органу відносно оперативної зони здійснюється вручну за допомогою багатоланкової важільної стійки 2, функціональні можливості мікроманіпулятора виявляються явно недостатніми для виконання операцій подібного типу через обмежену рухливість робочого органу. Для точного введення мікроканюлі 6 в кровоносну мікросудину необхідно щонайменше два додаткові ступені рухливості. Беручи до уваги відмінності в параметрах руху та позиціонування для зазначених режимів, а також різний рівень автоматизації переміщень, пропонується розділити ММС на чотири рівні (рис. 1.8).

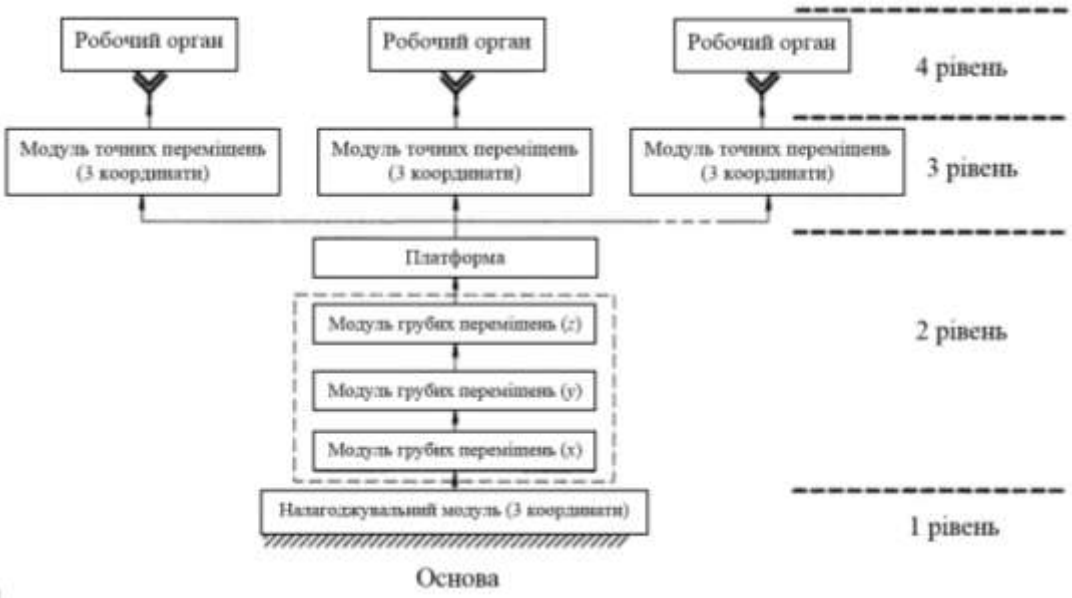


Рисунок 1.8 – Деревоподібна структура мікроманіпуляційної системи [16]

Перший рівень – базовий. Цей рівень включає модулі для встановлення блоку ММС у початкову позицію, яка залишається незмінною протягом тривалого часу, тобто забезпечується фіксація мікроманіпулятора відносно решти технологічного обладнання. Наприклад, у біологічних дослідженнях – відносно контейнера з біооб'єктами, блоку змінних робочих органів або області растра мікроскопа. Для цього застосовуються конструкції з масивними установлювальними механічними передачами, які іноді можуть оснащуватися електроприводами, хоча зазвичай їх виставляють вручну з використанням стандартних вимірювальних інструментів, таких як штангенциркулі, мікрометри чи плитки Іогансона.

Найбільш доцільно переміщати блоки модулів на відстані до 40-50 мм та повертати в горизонтальній площині до 90°, оскільки це відповідає діапазону переміщень предметних столиків більшості біологічних мікроскопів. Кількість ступенів рухливості на цьому рівні зазвичай становить 3-4 (наприклад, переміщення ММС за координатами x, y, z та кут φz).

У випадку ММС для мікрохірургії кількість ступенів рухливості може досягати 8-10, оскільки необхідно встановити модулі у зручному для хірурга положенні відносно оперативної зони.

Другий рівень – режим грубих переміщень. На цьому рівні використовуються точні електроприводи з механічними передачами (гвинтовими, стрічковими, важільними) або гідравлічними системами. У випадку гідравлічних передач рух від крокового електроприводу передається на гідроциліндр або пружний сильфон, заповнений рідиною. Далі рідина по тонкому, але жорсткому трубопроводу надходить у відповідний гідроциліндр чи сильфон, розташований безпосередньо біля об'єкта маніпулювання.

На цьому рівні можливі як ручний, так і автоматичний режими керування. Переміщення блоку модулів зазвичай досягає 20 мм (приблизно половини ходу базового рівня) зі швидкістю 1-10 мм/с та точністю позиціювання ±0,05 мм, що відповідає мінімальній довжині об'єкта дослідження. Ці переміщення виконуються, зокрема, при заміні одного об'єкта маніпулювання на інший.

Кожен модуль забезпечує одну ступінь вільності, зазвичай поступальну. Послідовне з’єднання трьох таких модулів формує три ступені вільності для модулів точних переміщень, встановлених на платформі.

Третій рівень – точні переміщення. Цей рівень забезпечує безпосереднє маніпулювання робочими органами (захватами, голками, вакуумними присосками тощо) в оперативній зоні системи. Для цього застосовуються п’єзоелектричні або електростатичні приводи, які забезпечують точність позиціонування до ±0,5 мкм. Хід робочого органу обмежується 0,5 мм, що дозволяє повністю охопити розмір об’єкта та, при необхідності, розмістити три об’єкти в одну лінію для послідовних точних маніпуляцій.

Максимальна швидкість переміщення робочого органу становить близько 0,2 мм/с, що відповідає реакції оператора при роботі з мікроскопом [17]. Сучасні системи автоматизації та обробки візуальних сигналів дозволяють підвищити швидкість до 0,5 мм/с.

Завдяки таким малим переміщенням, переміщення по трьох координатах можна реалізувати одним модулем. На платформі можуть бути встановлені кілька модулів точних переміщень, що дозволяє одночасно маніпулювати різними об’єктами. При налаштуванні модулі повинні мати можливість точного відносного позиціонування (±0,05 мм) по двох координатах на відстань до 5 мм.

Наприклад, один робочий орган першого модуля оперує з біологічною субстанцією, другий робочий орган другого модуля працює з інструментом для дослідження, а третій орган третього модуля деформує об’єкт для допомоги другому робочому органу. Така паралельна структура дозволяє виконувати операції одночасно на кількох об’єктах, наприклад, при складанні мікровиробів. Заміна об’єктів маніпулювання здійснюється за рахунок переміщень модулів другого рівня відносно контейнерів на відстань до 20 мм.

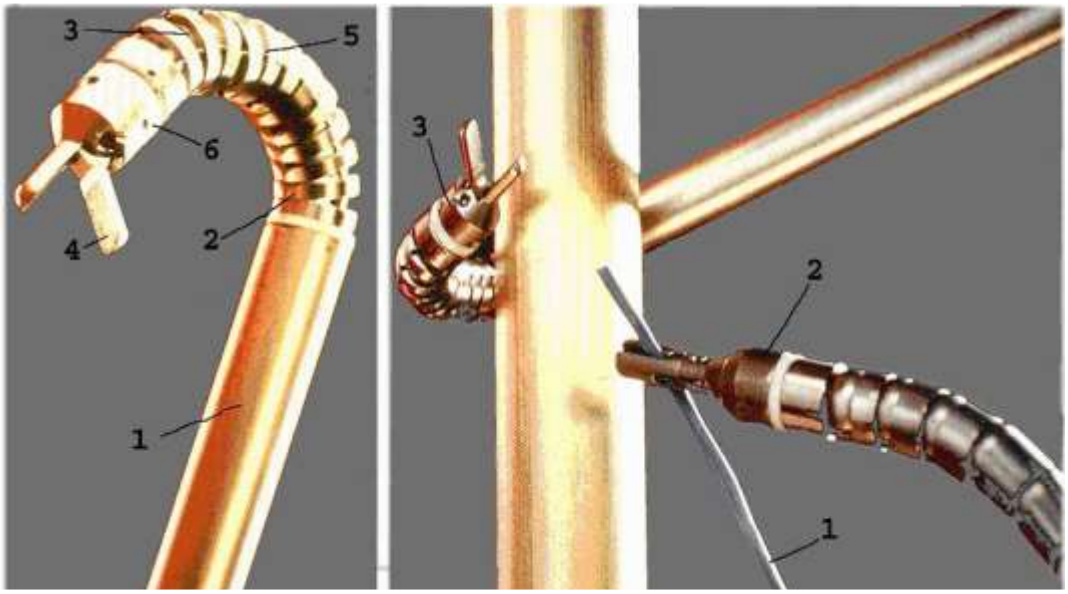
Четвертий рівень – високоточні мікроманіпулятори на базі МЕМС. Цей рівень характеризується принципово новими можливостями маніпулювання мікрооб’єктами за допомогою мікромеханізмів, розроблених на базі МЕМС. Вони дозволяють виконувати мікропереміщення окремих елементів змінного

робочого органу – наприклад, пальців або зап’ястя захвату, перфораційних рухів або хитань голки, розміри яких не перевищують 0,1 мм. Хід робочого органу на цьому рівні зазвичай менше 0,1 мм, при максимальній похибці позиціонування ±0,5 мкм, проте кути повороту елементів робочого органу значно більші, до 30°.

Мікрозахвати та інші мініатюрні робочі органи виготовляються методами фотолітографії, лазерної обробки, травлення та електроерозійної обробки. Основною складністю при розробці таких мікропристроїв є підведення енергії до приводних елементів.

Для мікрохірургічних операцій робочий орган мікроманіпулятора повинен мати щонайменше два ступені вільності, враховуючи опір біологічних тканин, який складає 10^{-2}-10^{-1} Н. Мініатюрний захват має розміри близько 1×1×3 мм. Для виготовлення таких робочих органів більш придатні методи традиційної механічної обробки, електроерозійної обробки мікродротом і лазерної обробки, оскільки фотолітографічні технології тут менш ефективні.

Прикладом є робочий орган хірургічного мікроманіпулятора для накладання мікрошвів на розсічені тканини (рис. 1.9) [17].



а) б)

Рисунок 1.9 – Хірургічний мікроманіпулятор [17]:
а – гнучкий робочий орган, б – робочі органи в дії

Робочий орган, встановлений на модулі точних переміщень мікроманіпулятора, містить циліндричний корпус 1 діаметром 5 мм, до якого прикріплений гнучкий елемент, що володіє двома ступенями рухливості (рис. 1.9, а). Він складається з кілець 2, між якими знаходяться кульки 3 з центральними отворами, через які пропущена нитка, що приводить у рух губку захвату 4. Кільця 2 мають чотири отвори, через які пропущені пружні нитки 5, закріплені на корпусі захвату 6. Вигин гнучкого валу здійснюється за рахунок витягування будь-якої пружної нитки 5. Фіксація вигнутого положення досягається за рахунок прикладення до решти ниток однакових тягнучих сил. Така дія призводить до збільшення сил тертя між кільцями 2 і кульками 3. Привід ниток може здійснюватися як від мікроелектродвигунів, так і від п’єзоприводів (в залежності від розмірів робочого органу і відповідно від ходу нитки). Такі хірургічні мікроманіпулятори можуть працювати в парі (рис. 1.9, б), у цьому випадку кетгут 1 або голка з шовним матеріалом може перехоплюватися або притримуватися під час операції почергово або одним захоплювачем 2, або іншим захоплювачем 3.

Управління мініатюрними робочими органами може здійснюватися за допомогою джойстика, виконаного у вигляді сенсорної рукавички, яка має засоби відчуттів (рис. 1.10) [11].

Рисунок 1.10 – Мікромеханічна система із сенсорною рукавичкою управління [11]

Таким чином, для забезпечення складних рухів бажано мати кілька робочих органів на одному мікроманіпуляторі, які можуть працювати в оперативній зоні одночасно з одним об’єктом, що властиво високоорганізованим живим істотам в подібних ситуаціях.

Приблизні кінематичні параметри рівнів ієрархії модулів МСС наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Кінематичні параметри модулів МСС [11]

Рівні ієрархії	1 (базовий)	2	3	4
Кількість ступенів вільності, їх види	3-4. 3 поступальних, 1 обертальний і більше	3. Поступальні	3. Поступальні, обертальні	1-2. Поступальні, обертальні
Діапазони переміщень	До 40 мм	До 20 мм	До 0,5 мм	До 0,1 мм, 30^0
Діапазони швидкостей	–	1 – 10 мм/с	До 0,2 мм/с	До 0,2 мм/с, 15 град/с
Точність позиціонування	±0,1 мм	±0,05 мм	±0,5 мкм	±0,5 мкм

Прикладом використання наведеної вище ієрархії ММС може служити схема роботи з мікрооб’єктами, показана на рисунку 1.11.

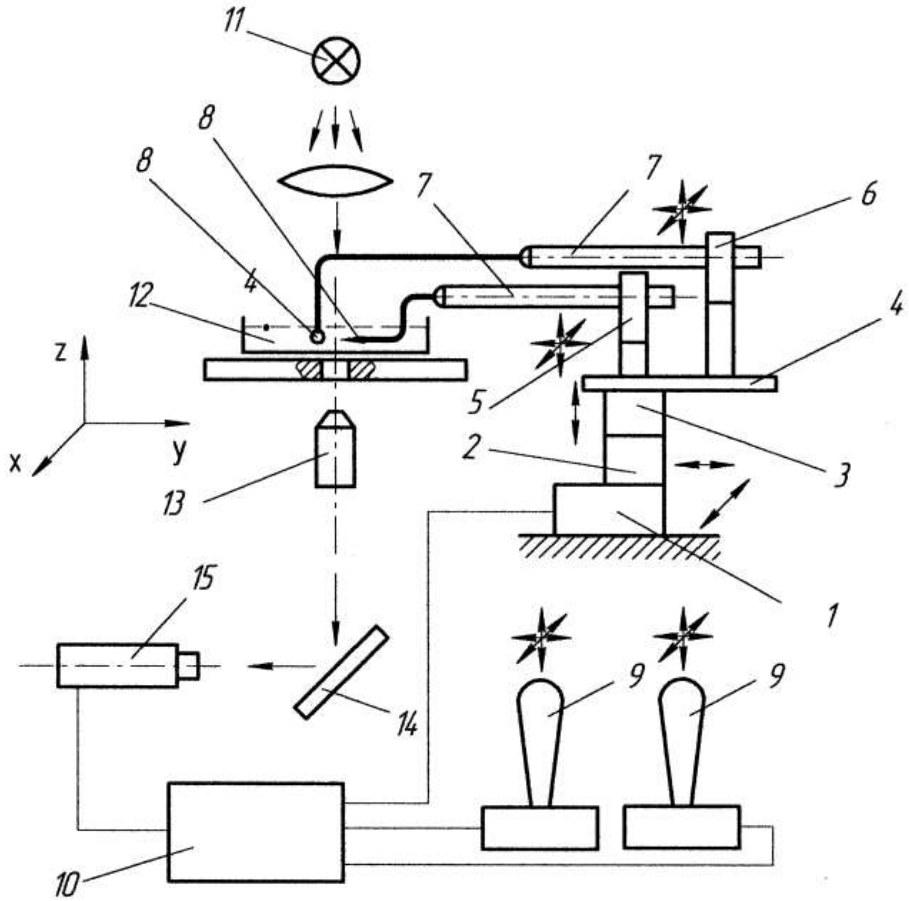


Рисунок 1.11 Схема роботи з мікрооб’єктами за допомогою мікромеханічної системи, що має розгалужену структуру [11]

В порівнянні з традиційною схемою (рис. 1.3) вона має один маніпуляційний блок, на якому встановлені послідовно три модулі грубих переміщень 1, 2, 3. На рухомій частині модуля 3 закріплена платформа 4. На ній встановлено два однакових модулі точних переміщень 5 і 6, кожен з яких має три ступені вільності. Вихідна ланка модуля 5 оснащена тримачем 7, в якому знаходиться змінний мікрозахват чи інший мікромеханізм 8 (наприклад, мініатюрна голка, що має можливість повертатися на досить великий кут 15^0-30^0). Вихідна ланка модуля 6 оснащена тримачем 7, в якому знаходиться змінний мікромеханізм 8 (наприклад, мініатюрна вакуумна присоска, що має можливість також повертатися на кут 15^0-30^0). За допомогою двох джойстиків 9 і комп'ютера 10 оператор може керувати рухом як об'єкта дослідження, так і робочим органом. Оперативна зона освітлюється джерелом світла 11. Оптичний сигнал, проходячи через прозору кювету 12 і об'єктив 13 і відбиваючись від дзеркала 14, надходить на відеокамеру 15. При такій компоновці вплив зовнішніх вібрацій на рух мікромеханізмів 8 відносно один одного менший, ніж при закріпленні об'єкта на нерухомому столику.

Запропонована деревоподібна структура аналогічна структурі живого організму, тим самим вона задовольняє біонічні принципи побудови складних систем. У своїй практиці людина часто тримає в одній руці об'єкт, а іншою рукою маніпулює інструментом (наприклад, пропускаючи нитку в голку, людина автоматично зближує обидва предмети одночасно, і лише в момент торкання нитки і голки вона фіксує положення нитки, продовжуючи повільний рух голкою). Тут важливо підкреслити, що досягнення конкретної мети, тобто визначеної відносної взаємодії об'єкта з інструментом, які зафіксовані в двох робочих органах, має багатоваріантність.

Таким чином, розподіл функцій і їх властивостей (діапазонів переміщень, швидкостей і точностей позиціонування) за рівнями ієрархії, а також розгалужена структура ММС дозволяють підвищити її гнучкість, ефективність і надійність: збільшити оперативну зону мікроманіпулятора при малих його габаритах, підвищити точність відпрацювання заданих рухів.

1.3 Пошук шляхів реалізації поставленого завдання

Мікроманіпуляційні системи (ММС) через надзвичайно малі переміщення робочих органів (до 0,1 мм) та високі вимоги до точності відпрацювання рухів (до ±0,5 мкм) потребують оснащення високочутливими датчиками зворотного зв’язку. Основною вимогою до таких датчиків є мінімальні габарити, що забезпечують можливість їх інтеграції безпосередньо в елементи мікромеханічної системи.

Поєднання високої точності та достовірності сигналів зворотного зв’язку з мініатюрними розмірами датчиків значно ускладнює процес створення ММС. За традиційною схемою керування сигнали від датчиків подаються до окремо розташованого блоку управління. Однак через мініатюрність приводів ММС аналогові сигнали зворотного зв’язку взаємодіють із керуючими сигналами, що суттєво знижує точність та достовірність управління.

Раціональним рішенням є розміщення перетворювачів аналогових сигналів у дискретні безпосередньо біля датчиків, адже передача дискретних сигналів є на порядок надійнішою. Проте таке рішення породжує технічне протиріччя: з одного боку, для підвищення точності мікроприводів необхідна інтеграція датчиків із перетворювачами сигналів у безпосередній близькості, а з іншого – це не повинно призводити до збільшення габаритів усієї ММС. Подолати це протиріччя можливо двома шляхами.

1. Використання оптичних систем передачі інформації: рухома частина модуля оснащується дзеркалом, а оптичний сигнал сприймається датчиком, розташованим на нерухомій частині ММС. Такі системи з нерухомими датчиками можуть визначати координати (переміщення) рухомих елементів.

2. Використання мініатюрних інтегральних електронних пристроїв (в тому числі оптоелектронних), кремнієві підкладки яких є несучими елементами пружних механічних систем. Такі системи дають інформацію про механічні напруження, деформацію і прискорення. Нижче буде показано, що п’єзоелектричні перетворювачі з використанням п’єзокерамічних елементів

здатні ефективно вирішити поставлену задачу.

Найбільш перспективний напрямок в цій галузі полягає у розробці мехатронних мікромеханічних модулів (ММ), з яких утворюється ММС. Суть мехатронного підходу до проєктування полягає в інтеграції в єдиний функціональний модуль приводний, інформаційний та керуючої складових електромеханічної системи [18]. Такий ММ може складатися з наступних елементів:

– мікроелектромеханічний привід;

– пружні механічні передачі;

– мініатюрні датчики зворотного зв’язку;

– первинні перетворювачі електричних сигналів, що знімаються з датчиків;

– інтерфейси і аналого-цифрові перетворювачі.

Для маніпуляційних систем доцільно мати зворотний зв’язок за такими параметрами:

– за переміщенням робочого органу (вихідної ланки);

– за швидкостями і прискореннями в характерних точках системи;

– за деформаціями (що еквівалентні механічним напруженням) в характерних точках системи.

Зворотній зв’язок за переміщеннями дозволяє вийти робочому органу (вихідної ланки) в певну точку з мінімальними похибками в квазістаціонарному режимі (тобто коли динамічні сили і моменти на порядок менші, ніж сили п’єзопривода), незважаючи на наявність гістерезису в п’єзоперетворювачах. Чутливі елементи, що входять до складу датчиків переміщення, за принципом дії можна класифікувати на оптичні, електромеханічні та пневматичні [19]. Оптичні системи зворотного зв’язку (технічний зір), які використовуються в ММС, дозволяють проводити обробку одержуваної інформації та визначати поточні значення швидкостей і прискорень вихідної ланки при постійному моніторингу. При цьому на вихідній ланці зазвичай відсутній будь-який перетворюючий елемент, за винятком мініатюрного дзеркала, тому компактність системи висока. Інформація про швидкості і прискорення дозволяє працювати мехатронному

ММ в динамічному режимі з мінімальними похибками як за переміщенням, так і за швидкостями.

Пневматичні датчики зазвичай не підходять для ММ, тому що в більшості випадків подача повітряного струменя в робочу зону неприпустима, хоча точність таких датчиків досягає 0,1-0,5 мкм [20]. Електромеханічні датчики, зокрема індукційні і ємнісні, як правило, мають гірші характеристики за точністю, ніж пневматичні.

Зворотній зв'язок за деформаціями (і відповідно за механічними напруженнями) дозволяє здійснити тактильну відчутливість системи, тобто визначати наступні параметри процесу.

1. Момент часу, коли робочий орган починає взаємодіяти із зовнішнім середовищем, наприклад, коли голка мікроманіпулятора починає входити в досліджуваний біоматеріал.

2. Механічні навантаження на робочий орган: опір середовища або об'єкта, динамічні навантаження на робочий орган під час розгону або гальмування при мікроударі. Крім того, в деяких випадках може виникнути ситуація, в якій механічні навантаження будуть перевищувати допустимий рівень. Тому ці датчики забезпечать інформацію про граничні навантаження.

3. За інформацією, що надходить з декількох датчиків деформації, можна судити про відхилення просторового положення елемента системи від певного фіксованого положення, інформація про це перебуває в пам'яті мікропроцесора.

П'єзоелектричні перетворювачі можуть працювати, використовуючи як прямий, так і зворотний п'єзоефект. З цієї причини п'єзокерамічну пластинку, що входить до складу п'єзоперетворювача, можна застосовувати в якості приводного елемента, а невелику його частину – в якості датчика деформацій або прискорень. Такі датчики реагують на змінний вплив, тому використання їх в якості чутливого елемента квазістаціонарного процесу проблематичне. Вони мають високу чутливість, особливо тонкоплівкові п'єзоелектричні датчики. В [21] описується датчик, що має габарити 10x10x0,06 мм, діапазон вимірюваних тисків від 1 Па до $8 \cdot 10^4$ Па, діапазон частот від 2 Гц до $2 \cdot 10^4$ Гц.

Більш перспективним є використання п’єзорезистивних датчиків, заснованих на зміні електричного опору при механічній деформації чутливого шару датчика. Такий шар, виконаний за технологією вакуумного напилення на ізольовану підкладку, має дуже малі габарити: не більше 1х1х0,02 мм, а чутливість таких датчиків висока. В [22] описується датчик, що вимірює тиск від 1 до 50 кПа, максимальна напруга на виході датчика – 80 мВ, температурний коефіцієнт нестабільності – 0,02 %/К.

Для надійної роботи всього ММ в цілому сигнали від датчиків зворотного зв’язку повинні передаватися в двійковому коді. Відповідно до цієї вимоги структура мехатронного датчика може бути наступною (рис. 1.12).

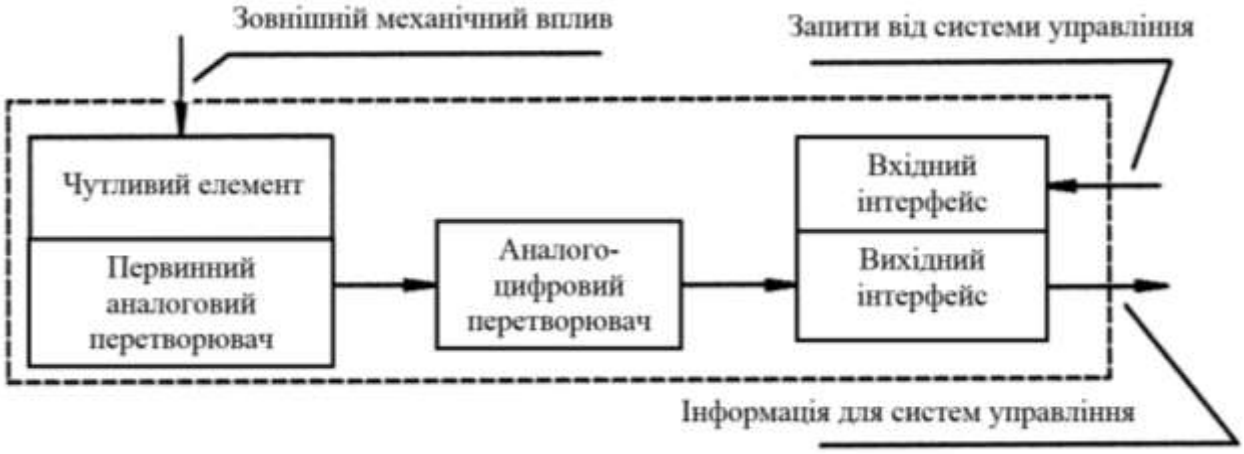


Рисунок 1.12 – Структурна схема мехатронного датчика мікромеханічного модуля [22]

Зовнішній механічний вплив (сила, тиск, деформація) впливає на чутливий елемент, який перетворює його в електричний сигнал. Чутливий елемент безпосередньо зв’язаний з первинним аналоговим перетворювачем, який підсилює електричний сигнал до рівня, необхідного для нормальної роботи аналого-цифрового перетворювача. Оцифрований електричний сигнал надходить на вихідний інтерфейс, який накопичує і адаптує цифрову інформацію для подальшої передачі його в систему управління.

Під час періодичного опитування мехатронних датчиків всієї ММС запит

на розглянутий датчик надходить на вхідний інтерфейс, який відкриває канал для отримання інформації від вихідного інтерфейсу. Для зменшення габаритів мехатронних модулів ММС сигнали від системи управління і назад йдуть по одній шині.

Оснащення ММС мехатронними датчиками дозволяє вводити в систему управління інформацію про зовнішні дії різної фізичної природи. У цьому випадку стають ефективними методи адаптивного управління та методи, засновані на нечіткій логіці, для здійснення яких використовують процесори з ваговими асоціативними правилами [22].

1.4 Постановка завдань по кваліфікаційній роботі магістра

Виходячи з аналізу інформаційних джерел, присвячених дослідженню методів проєктування модулів систем мікропереміщень на базі п’єзоелектричних приводів було сформульовано наступні завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан розробок виконавчих пристроїв для прецизійного позиціонування та класифікувати СМП і їх приводи.

2. Розробити концепцію побудови маніпуляційних СМП і дослідити рухи робочих органів.

3. Визначити вимоги до модулів із ПП та запропонувати нові схемні рішення пружних пристроїв.

4. Встановити параметри деформованого стану п’єзокерамічних елементів при подачі напруги.

5. Розробити методику розрахунку переміщень багатокоординатних пружних систем при дії електричної напруги та зовнішніх сил.

6. Дослідити амплітуди вимушених коливань вихідних ланок з урахуванням добротності елементів системи.

7. Провести експериментальні дослідження та зіставити їх із результатами математичного моделювання.

8. Сформулювати рекомендації щодо проєктування пристроїв з ПП.

Висновки до розділу

1. Сучасний рівень техніки дає великий спектр фізичних ефектів, що застосовуються в приводах СМП. Найбільш часто зустрічаються це електромеханічні і електромагнітні приводи, як найбільш універсальні. Далі за поширенням слідують п’єзоелектричні і електростатичні. Решта типи «екзотичних» приводів в даний час є об’єктами досліджень.

2. За швидкодією кращими є електростатичні приводи. За силовими характеристиками – п’єзоелектричні і магнітострікційні приводи (працюють на розтягнення-стиснення). За компактністю з урахуванням використання технологій електронних компонентів найбільш перспективними для приладових мікросистем є електростатичні приводи і приводи на основі перетворення теплової енергії в механічну. Електромеханічні (мікроелектродвигуни), електромагнітні та п’єзоелектричні приводи мають найбільшу перспективу для здійснення точного позиціонування робочих органів ММС і АМР.

3. Основні відмінності ММС від маніпуляторів точного машино- та приладобудування полягають у наступному:

– в ММС є можливість отримання трьох і більше (до шести) ступенів вільності на одному модулі мікроманіпулятора;

– ММС мають істотно менші кути сервісу, ніж маніпулятори;

– відносно малі динамічні навантаження;

– для ММС температурні деформації мають істотне значення;

– захист від зовнішніх вібрацій має найважливіше значення для ММС.

Як правило, зворотний зв’язок за положенням робочого органу ММС здійснюється по оптичному каналу.

4. На основі аналізу структури ММС можна зробити наступні висновки:

– маніпулювання з мікрооб’єктами дозволяє застосувати деревовидну ієрархічну структуру ММС;

– деревовидна структура ММС з числом робочих органів не менше двох, які перебувають на різних модулях точних переміщень, дозволяє застосувати

біонічний принцип маніпулювання з об’єктами та інструментами;

– деревовидна структура ММС дозволяє здійснити багатоваріантність взаємодії об’єкта з інструментом і знайти оптимальний для даної ситуації варіант;

– деревоподібна структура ММС дозволяє підвищити надійність всієї системи в цілому при відмові окремих її елементів;

– маніпулювання на рівні десятих часток міліметра і менше дозволяє створювати модулі точних переміщень з трьома ступенями вільності, що підвищує компактність системи і її універсальність.

РОЗДІЛ 2
ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

2.1 Аналіз фізичних перетворень, які присутні в п'єзоелектричних мехатронних модулях мікропереміщення

П'єзоелектричні перетворювачі, які є основним елементом п'єзоприводу, засновані на дії п'єзоелектричного ефекту, відкритого братами Кюрі в 1880 р. Прямий п'єзоефект – це утворення електричних зарядів на поверхні тіла при його механічній деформації. Зворотний п'єзоефект – це утворення деформації при накладенні різниці потенціалів на його поверхні. П'єзоефект одержав свою назву від грецького «piezo» – тисну. Цією властивістю володіють деякі кристали, які відносяться до типу сегнетоелектриків (назва походить від найбільш характерного кристала цієї групи – сегнетової солі $NaK_4H_4O_64H_2O$).

Розрізняють два види сегнетоелектриків: монокристали і поляризовані полікристали [21]. Перші зустрічаються в природі (наприклад, кварц) і вирощуються штучним шляхом, вони мають високу вартість і тому в промисловості використовуються рідко. Другі – п'єзокерамічні вироби – отримують промисловим шляхом; вони мають в ультразвуковій техніці найбільше поширення. Більшість з них являють собою хімічні сполуки у вигляді солей свинцю і барію: $PbNb_2O_6$, $PbTiO_3$-$PbZrO_3$, $BaTiO_3$.

П'єзоелектричну кераміку, подібно до звичайної кераміки, виготовляють гарячим пресуванням і литтям під тиском, тому форма п'єзокерамічних елементів може бути різноманітною. Для прояви п'єзоефекту п'єзокерамічні елементи необхідно поляризувати (на відміну від монокристалічних сегнетоелектриків). Спочатку поверхні п'єзоелемента (найчастіше паралельні) металізують сріблом або міддю методом впалювання або ультразвуковим лудінням. Потім п'єзоелементи поляризують в спеціальних ваннах, наповнених силіконової рідиною при температурі 100-130 ^{0}C. Поляризація полягає в тому, що на електроди подають протягом декількох годин високу постійну напругу (в залежності від товщини п'єзоелемента – від 0,5 кВ до 10 кВ).

Напрямок поляризації (від плюсового електрода до мінусового), перпендикулярний поверхонь електродів і збігається з координатною віссю, умовно отримав індекс «3», інші два перпендикулярних напрямки отримали індекси «1» і «2» (рис. 2.1).

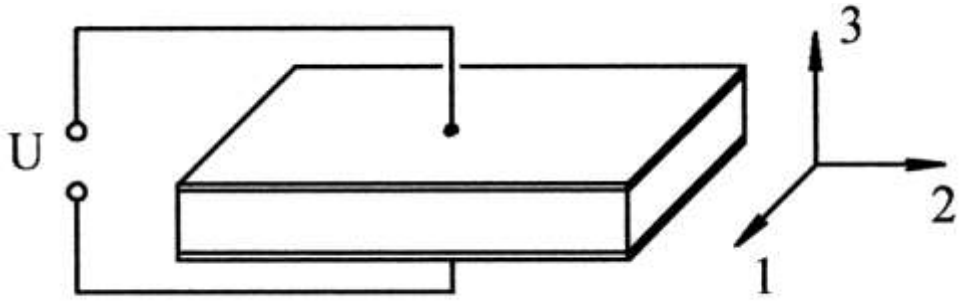


Рисунок 2.1 – П’єзокерамічна пластина з паралельними електродами [21]

Відзначимо, що на поверхнях п’єзоелемента можуть бути додатково нанесені й інші електроди, які в подальшому підключаються до джерела змінної напруги для збудження коливань певного виду (наприклад, зсувні). Однак у переважній більшості випадків п’єзоелементи в п’єзоперетворювачах підключаються до джерела напруги тими ж електродами, які використовувалися для поляризації.

П’єзокерамічні елементи найчастіше виготовляють у вигляді тонких і товстих шайб і дисків, прямокутних пластинок, трубок з електродами, що знаходяться на утворених поверхнях.

При подачі на електроди п’єзоелемента напруги, що збігається за знаком з напругою поляризації п’єзоелемента, він видовжується, якщо знак протилежний, то він коротшає (у всіх напрямках, але по-різному: в цьому проявляється властивість анізотропії п’єзокераміки).

Найважливіша вимога до п’єзоелементів, – високе значення п’єзомодуля *d*, який в спрощеному вигляді являє собою відношення відносної механічної деформації *S* до напруженості прикладеного до п’єзоелемента електричного поля *E*: $d = \frac{S}{E}$. Для п’єзокерамічної пластини з паралельними електродами

напруженість електричного поля E і електрична напруга U зв'язані формулою, аналогічної для конденсатора $E = \frac{U}{h}$, де h – товщина п'єзоелемента. (В механіці прийнято відносну деформацію позначати буквою ε, а механічне напруження буквою σ.

Залежно від розглянутого напрямку деформації і поляризації елементів п'єзомодуль різних п'єзокерамічних матеріалів може варіюватися в діапазоні $20 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н – $600 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н. Закони п'єзоефекту формуються для елемента об'єму п'єзоматеріалу, в межах якого напруження і деформований стан можна вважати однорідним.

П'єзоелементи при роботі в якості вібраторів повинні витримувати великі знакозмінні навантаження, тому важлива динамічна міцність п'єзокераміки. Таким вимогам відповідають наступні вітчизняні марки п'єзокераміки: ЦТС-19, ЦТСНВ-1, ПКР-7, ПКР-7М, ЦТБС-3, ЦТС-23.

2.2 Характеристика наявних (існуючих) теоретичних положень в контексті функціонування модулів мікропереміщення

В якості приводів мікропереміщень в основному використовують три типи п'єзоперетворювачів:

– багатошарові пакети, набрані з п'єзокерамічних шайб або дисків, що працюють на розтяг-стиск;

– трубчасті п'єзоперетворювачі; вони можуть працювати як на розтяг-стиск, так і на згин;

– біморфні п'єзоперетворювачі, що складаються із склеєних п'єзокерамічних пластин, між якими може знаходитися металева ресора, вони працюють на згин.

Перший тип п'єзоперетворювачів має високі силові характеристики, які обмежуються в основному властивостями міцності п'єзокераміки. Такі приводи мають високу жорсткість, яка відповідає жорсткості стержня при стисненні.

Другий тип п’єзоперетворювачів є відрізком тонкостінної циліндричної або конічної п’єзокерамічної трубки, електроди якої розташовані на концентричних поверхнях. Ці трубчасті п’єзоперетворювачі відрізняються простотою і малою вартістю. Однак при однакових поздовжніх розмірах з багатошаровими п’єзоперетворювачами їх переміщення на порядок менше. Жорсткість таких перетворювачів також нижча, ніж у багатошарових.

Третій тип п’єзоприводів характеризується переміщеннями, які на 1-2 порядки вище переміщень, що розвиваються приводами першого і другого типів, однак жорсткість і силові характеристики їх на 2-3 порядки гірше, ніж у першого типу. Таким чином, якщо необхідно створити пристрій мікропереміщень, що має малі габарити і не потребує високих силових характеристик, то вибір можна зупинити на біморфних п’єзоперетворювачах.

П’єзоелектричні приводи мікропереміщень (ППМ) мають ряд незаперечних переваг перед іншими приводами. Це високі питомі силові характеристики, малі значення електричних струмів і втрат, висока надійність і технологічність виготовлення, радіаційна і температурна стійкість. До недоліків ППМ можна віднести порівняно високу напругу, що подається на електроди, прояв гістерезису, нестабільність п’єзоелектричних параметрів, вплив зміни вологості на електричні параметри. Шляхи подолання цих недоліків наступні:

– вибір відповідних п’єзоактивних матеріалів;

– зменшення товщини п’єзоелектричних шарів;

– введення зворотних зв’язків за положенням вихідної ланки;

– програмні методи управління;

– застосування технологій виробництва інтегральних схем.

Зменшення впливу гістерезису на роботу п’єзоелектричного мехатронного ММ може бути досягнуто за рахунок застосування певних видів п’єзокерамічних матеріалів. Різні огляди [21, 23, 24] показують, що для багатьох типів п’єзокераміки в основному петля гістерезису функції переміщення – прикладена електрична напруга має коефіцієнт гістерезису порядку 10-12%, що явно погано для точних приводів мікропереміщень. Останнім часом з’явилися нові матеріали,

які мають низькі значення коефіцієнта гістерезису – від 2% до 5% при кімнатній температурі. До них відноситься, наприклад, п’єзокераміка «PIEZOTITE®» типу P-5E і P-7 японської компанії MURATA (рис. 2.2, 2.3).

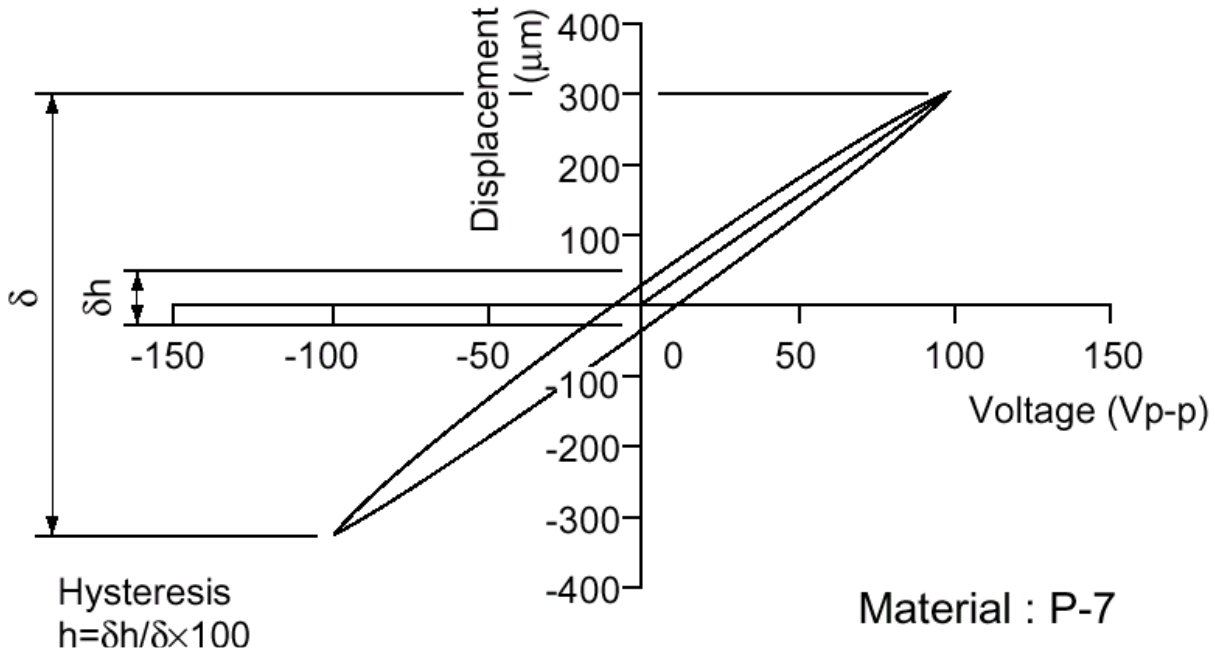


Рисунок 2.2 – Петля гістерезису для п’єзокераміки P-7 [21]

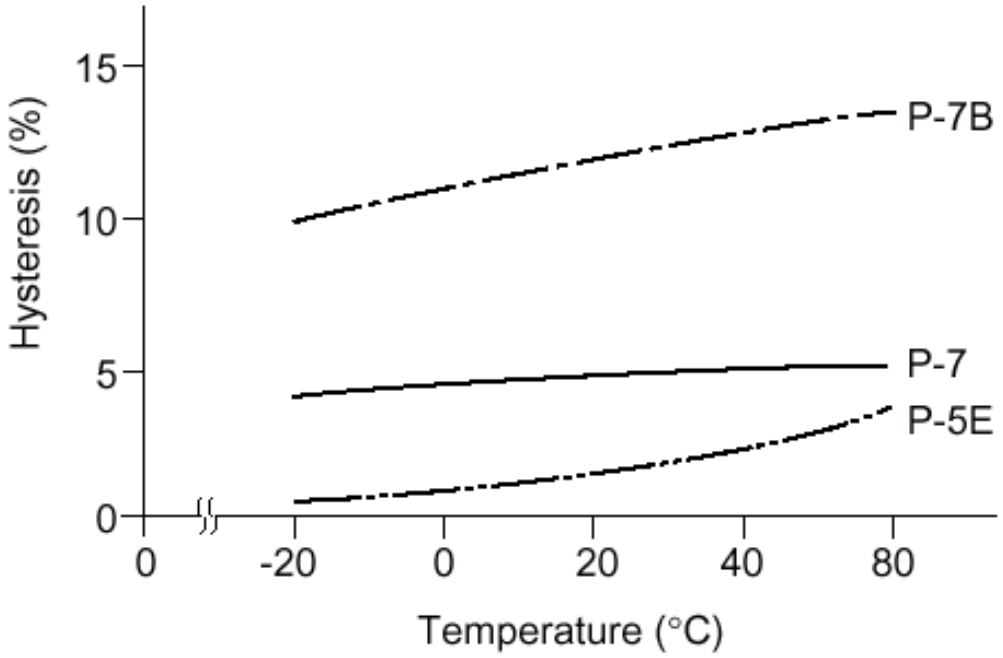
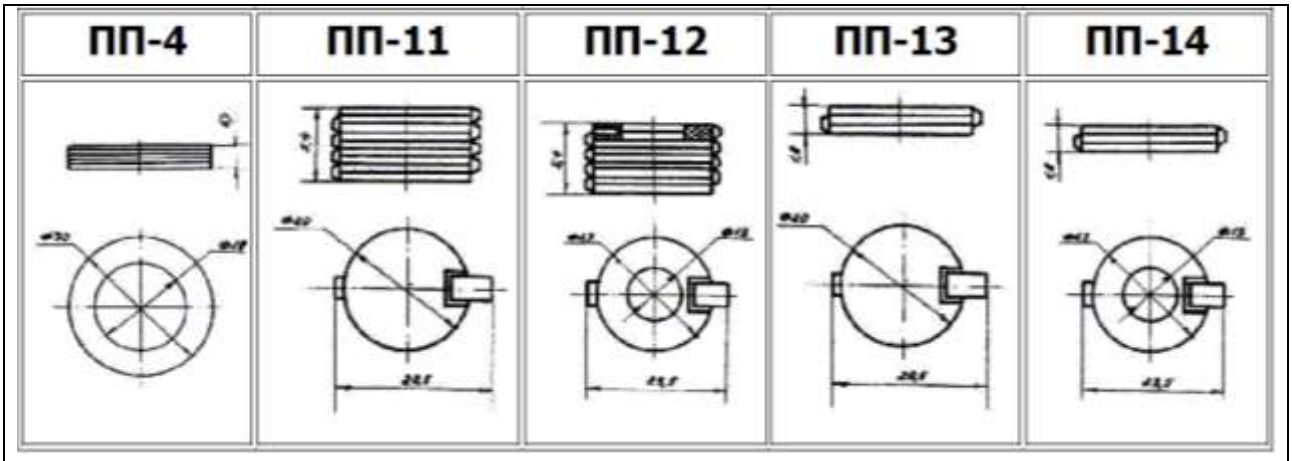


Рисунок 2.3 – Залежність коефіцієнта гістерезису від температури для п’єзокераміки «PIEZOTITE®» [21]

Промисловість випускає п’єзоприводи широкої номенклатури – п’єзопакети, набрані і склеєні з п’єзокерамічних шайб товщиною 0,6 мм (рис. 2.4, а) , які мають такі характеристики (таблиця 2.1) [21].

Таблиця 2.1 – Параметри п’єзопакетів [21]



Характеристики	ПП-4	ПП-11	ПП-12	ПП-13	ПП-14
Чутливість, мкм/В, 10^{-3}	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Опір ізоляції	20,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Статична ємність, тис. пф	80±20	65±12,5	52±10	22±4	17±0,3
Гранична електрична напруга, В	500,0	600,0	600,0	600,0	600,0
Маса, г	20,0	15,0	15,0	6,0	6,0

а) б)

Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд п’єзоприводів: а – пакетні п’єзоприводи; б – складений п’єзопривід [21]

З цих п’єзопакетів збираються складові п’єзоприводи (СПП), які стягуються гвинтовою стяжкою (рис. 2.4). П’єзоприводи ППУ-1, ППУ-2, ППУ-5, ППУ-6, ППУ-8 стягнуті шпилькою; п’єзоприводи ППУ-3 і ППУ-4 стягнуті зовнішнім корпусом (прорізною пружиною). Сила стяжки – $P_0 = 2500$ Н ± 300 Н. Стягування п’єзопакетів в конструкціях п’єзоприводів здійснюється для

зменшення гістерезису і підвищення опору приводу радіальним навантаженням. Їх характеристики приведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Параметри складових п’єзоприводів [21]

Параметри	Марка складового п’єзопривода						
	ППУ-1	ППУ-2	ППУ-8	ППУ-3	ППУ-4	ППУ-5	ППУ-6
Переміщення, мкм	± 24	± 30	± 40	± 24	± 30	± 24	± 30
Статична ємність, мкф, не більше	1,5	1,74	4,2	1,92	2,21	1,5	1,74
Робоча напруга U_{max}, В	±300	±300	±300	±300	±300	±300	±300
Гранично допустима напруга, В	±500	±500	±500	±500	±500	±500	±500
Опір ізоляції, МОм не менше	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Габаритні розміри, мм	Ф23х124	Ф23х154	Ф30х204	Ф32х130	Ф32х160	Ф32х130	Ф32х160
Масса г, не більше	360	400	900	740	845	690	780
Максимальна сила P_{max}, кН*	0,55	0,55	2,4	6,2	6,2	3,4	3,4
Коефіцієнт жорсткості c_A, МН/м *	23	18	60	260	210	140	110
Накопичена енергія W_{max}, мДж*	6,6	8,3	48	74	93	41	51

*Останні три рядки таблиці – розрахункові.

Під максимальною силою (або блокуючою силою) P_{max} розуміється сила, яку розвиває привід (або сила зовнішнього навантаження) при загальмованому вільному кінці перетворювача, при подачі максимальної напруги U_{max}. Сила P, що розвивається приводом, залежить від переміщення ξ його робочого торця. Коефіцієнт жорсткості, що характеризує кут нахилу характеристики $P=f(\xi)$ приводу, обчислюється за формулою (2.1):

$$c_A = \frac{P_{\max}}{\xi_{\max}}, \qquad (2.1)$$

$\xi_{\max}$ – максимальне переміщення вільного кінця перетворювача при зовнішній силі $P = 0$. Чим вища жорсткість приводу, тим більшу силу розвиває привід при заданому переміщенні. Максимальна енергія (2.2), яку може накопичити привід в загальмованому стані, є комплексним критерієм оцінки його силових можливостей:

$$W_{\max} = \frac{c_A \xi_{\max}^2}{2}. \qquad (2.2)$$

Прикладом виконання СПП може бути зразок (рис. 2.5), що складається з пакету секцій 1 тонких п’єзокерамічних шайб (ПКШ) і має по кінцях два фланця 2, стягнутих гвинтовою шпилькою 3 з тонкою середньою частиною за допомогою двох гайок 4. Стяжка секцій необхідна для вибірки зазорів і люфтів між ПКШ, підвищення жорсткості п’єзоелектричного приводу і зменшення петлі гістерезису. Тонкостінна пластмасова втулка 5 служить в якості ізолятора і елемента, що центрує весь пакет секцій ПКШ. Слюдяні шайби 6 також є ізоляторами, що володіють високою жорсткістю при стисненні.

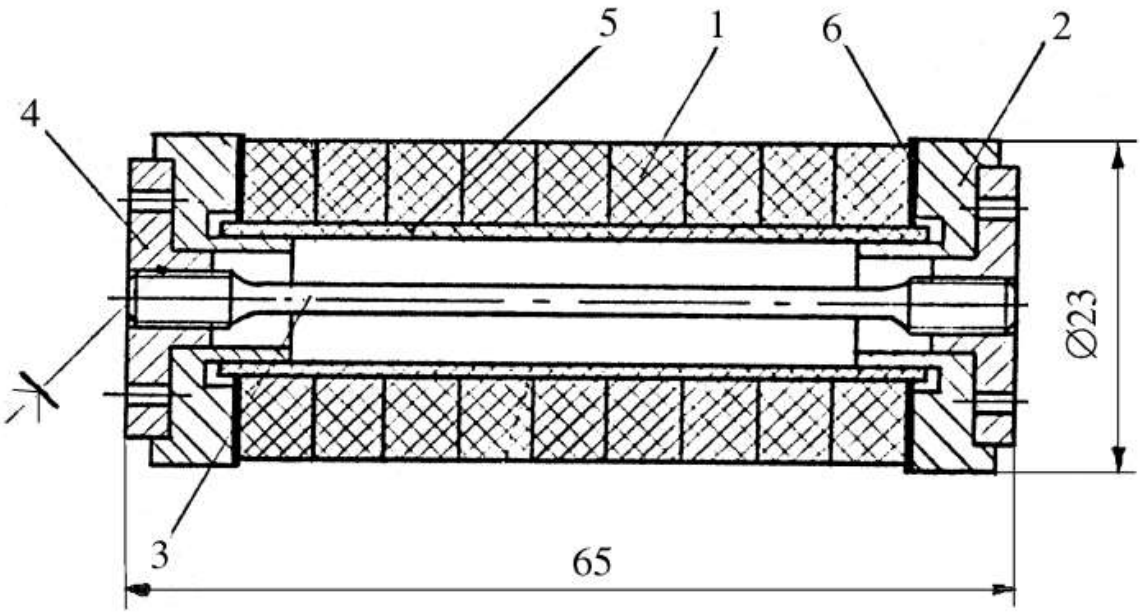


Рисунок 2.5 – Складовий п’єзоперетворювач [21]

Зазвичай секція 1 складається із 10-20 ПКШ товщиною 0,5-1 мм з сріблення електродами, нанесеними на плоскі торцеві поверхні, які електрично паралельно з'єднані між собою (рис. 2.6), а вектори поляризації $\overline{P}_1$ і $\overline{P}_2$ п'єзокерамічних елементів спрямовані назустріч один одному.

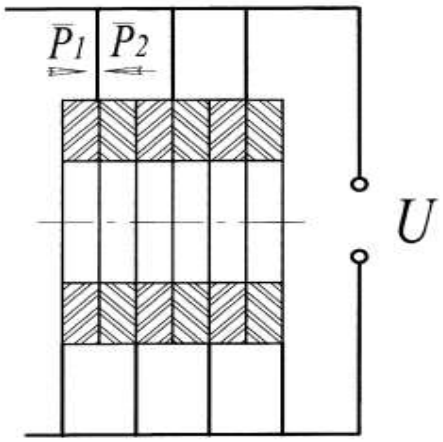


Рисунок 2.6 – З'єднання п'єзокерамічних шайб в секцію [21]

Таке паралельне електричне з'єднання ПКШ дає збільшення переміщення торця СПП, пропорційне кількості ПКШ, проте істотно зростають габарити, маса і вартість такого пристрою. При наведених на рисунку 2.5 розмірах максимальне переміщення складе 5,2 мкм при напрузі 300 В, максимальне зусилля, що розвивається пристроєм, може досягти $1{,}7 \cdot 10^3$ Н.

Зменшення напруги, що подається на електроди, здійснюється за рахунок зменшення товщини п'єзокерамічних пластинок. Японська компанія MEGACERA випускає п'єзокерамічні диски товщиною від 0,035 мм до 0,8 мм при діаметрі від 9 до 60 мм. Такі малі товщини дозволяють знизити напругу до 10-20 В, що відповідно призводить до зменшення габаритів самих мехатронних модулів і полегшує завдання подачі електроживлення до п'єзоелементів.

Дешевші і прості п'єзоприводи містять трубчасті п'єзокерамічні елементи, на твірні поверхні яких нанесені електроди (зовнішній вигляд – на рисунку 2.7, характеристики – в таблиці 2.3 [21]).

Таблиця 2.3 – Параметри трубчастих п’єзоприводів [21]

Параметри	Марка складового п’єзопривода					
	ППУ-9	ППУ-10	ППУ-11	ППУ-12	ППУ-13	ППУ-14
Переміщення, мкм	± 3	± 4	± 5	± 7	± 9	± 12
Статична ємність, мкф, не більше	20	25	40	50	60	80
Робоча напруга U_{max}, В	±500	±500	±500	±500	±500	±500
Гранично допустима напруга, В	±600	±600	±600	±600	±600	±600
Опір ізоляції, МОм не менше	50	50	50	50	50	50
Габаритні розміри, мм	Ф10х55	Ф10х55	Ф10х87	Ф10х87	Ф10х119	Ф10х119
Максимальна сила P_{max}, кН*	126	131	127	132	132	135
Коефіцієнт жорсткості c_A, МН/м *	42,0	32,7	25,4	18,9	14,6	11,2
Накопичена енергія W_{max}, мДж*	0,19	0,26	0,32	0,46	0,59	0,81

*Останні три рядки таблиці – розрахункові.

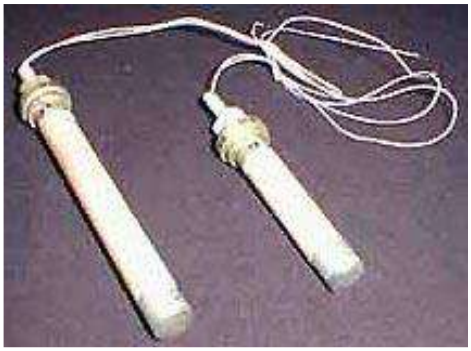


Рисунок 2.7 – П’єзоприводи з трубчастим п’єзокерамічним елементом [21]

Такі п’єзоприводи мають товщину стінок від 0,5 до 1,5 мм. Зменшення товщини призводить до зменшення напруги живлення, проте виготовлення тонкостінних п’єзокерамічних трубочок вимагає жорсткого виконання технології. Якщо розділити один електрод, наприклад зовнішній, на чотири поздовжніх сегмента, то, подаючи на них напругу різних знаків, можна отримати не тільки поздовжні, а й згинальні переміщення торця в двох взаємно перпендикулярних напрямках.

Використання біморфних п’єзоелектричних приводів (БПП) дає істотне збільшення переміщення [21]. У них використовуються згинальні деформації

багатошарових структур, що складаються з активних – п’єзоелектричних шарів і неактивних – металевих або полімерних шарів. При певному напрямку поляризації п’єзокерамічних елементів виникають керовані згинальні деформації, які призводять до багаторазового збільшення мікропереміщень у порівнянні з наведеними вище п’єзоперетворювачами, що працюють на розтяг-стиск. Однак жорсткість БПП на порядок нижча, тому силові характеристики БПП гірші. Найпростіший БПП (рис. 2.8) складається з двох довгих склеєних між собою п’єзокерамічних пластин 1 і 2 з однаковим напрямком векторів поляризації $\overline{P}_1$ і $\overline{P}_2$.

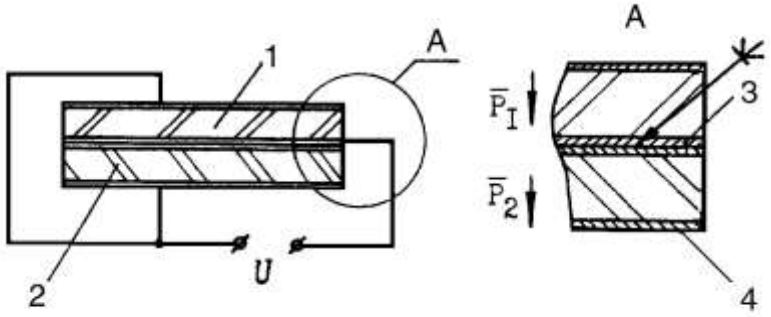


Рисунок 2.8 – Найпростіший біморфний перетворювач [21]

Якщо подати постійну напругу на електроди пластин 3 і 4, одна п’єзопластина буде подовжуватися, а інша – зменшуватися. Оскільки вони з’єднані, то БПП зігнеться. При подачі змінної напруги на частотах нижче першого резонансу незакріплений БПП матиме форму згинальних коливань, як показано на рисунку 2.9.

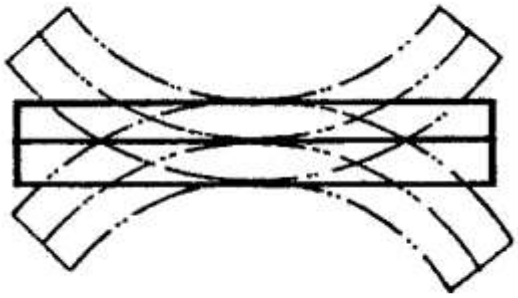


Рисунок 2.9 – Вигин незакріпленого біморфного перетворювача [21]

Якщо один його кінець закріпити, а інший залишити вільним, то зміщення вільного кінця БПП можна розрахувати за формулою (2.3):

$$\xi = \frac{3}{4}\frac{d_{31}Ul^2}{h^2}, \tag{2.3}$$

де d_{31} – п’єзомодуль;

U – напруга;

l – довжина пластин;

h – товщина пластини.

Наприклад, якщо $d_{31} = 1{,}25\cdot10^{-10}$ Кл/Н, $U = 400$ В, $l = 0{,}06$ м, $h = 0{,}3\cdot10^{-3}$ м, то $\xi = 3{,}0\cdot10^{-3}$ м. Цей результат добре узгоджується з експериментами дослідженнями. Така конструкція нетехнологічна при механічному складанні, так як п’єзокераміка – крихкий матеріал і гвинтові з’єднання можуть її пошкодити. Тому часто використовуються пристрої з ресорою – неактивною металевою пластиною, вклеєною між п’єзоелементами 1, 2 (рис. 2.10).

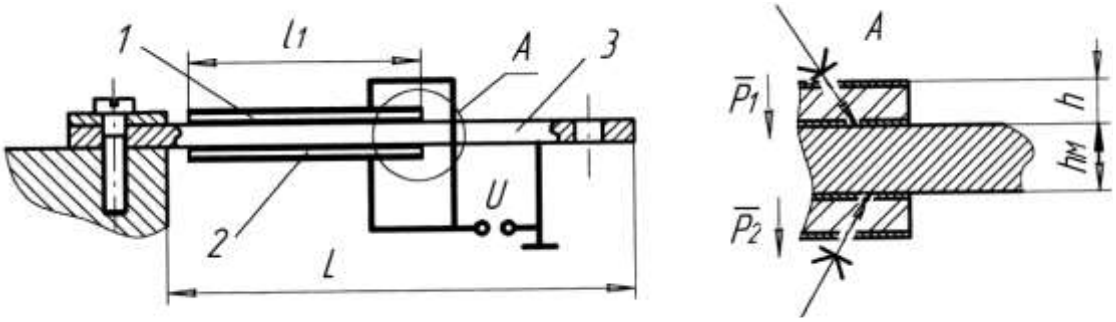


Рисунок 2.10 – БПП з металевою пластиною [21]

Ця металева пластина 3 має вільні від п’єзокераміки частини, призначені для фіксації та складання пристрою, однак переміщення такого пристрою менше, ніж в БПП без металевої пластини. Залежно від вимог, що пред’являються до пристроїв мікропереміщень, відношення товщин лежить в діапазоні $0{,}5 \le \frac{h}{h_м} \le 5$. Найчастіше в приладах і апаратах ресора заземлена, тому її

кріплення до металевого корпусу здійснюється без ізоляторів. Практика показує, що при склеюванні п’єзоелементів з ресорою електричний контакт між електродами і ресорою достатній для нормальної роботи п’єзоприводу.

Мініатюрні біморфні п’єзоприводи японської компанії MURATA [21] (рис. 2.11) на базі п’єзокераміки PIEZOTITE® мають наступні параметри. При напрузі $U = 200$ В переміщення вільного кінця пластини – щонайменше 1200 мкм, а сила, що утримує вільний кінець пластини в початковому положенні, 83 ± 20 мН. Електрична ємність становить 5,7±2 нФ. Коефіцієнт жорсткості цього приводу $c_A = 0{,}07 \cdot 10^{-3}$ Н/м, а максимальна накопичена енергія $W_{max} = 0{,}05$ мДж.

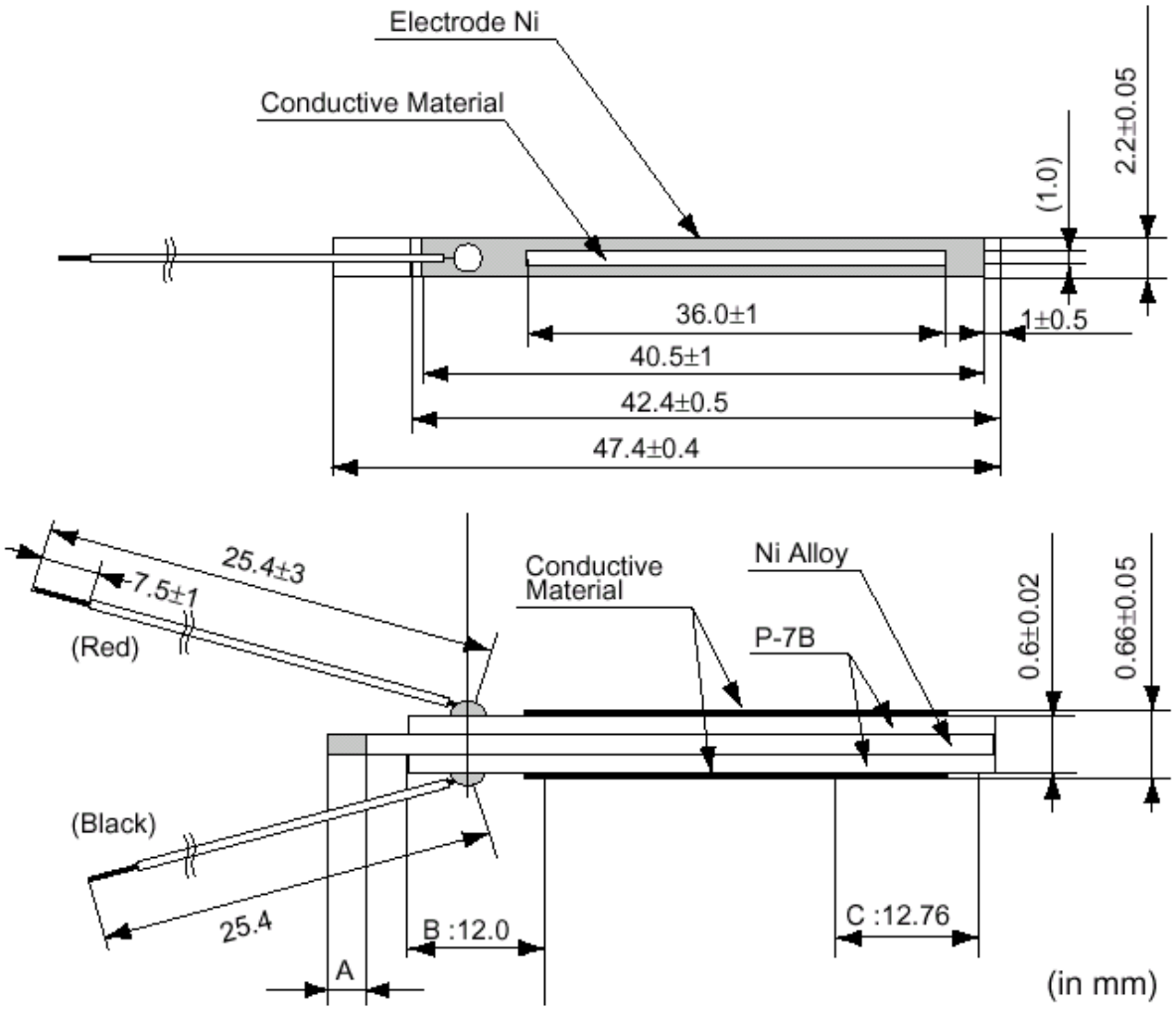


Рисунок 2.11 – Біморфний п’єзопривід компанії MURATA [21]

На рисунку 2.12 приведена діаграма «накопичена енергія – максимальне переміщення» для складових, трубчастих і біморфних п’єзоприводів в логарифмічному масштабі (для електродвигунів аналогічна діаграма «потужність – швидкість обертання»).

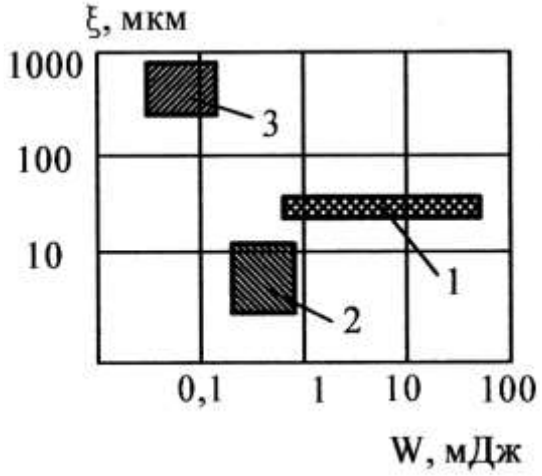


Рисунок 2.12 – Діаграма «накопичена енергія – максимальне переміщення» [21]: 1 – складові п’єзоприводи, 2 – трубчасті п’єзоприводи, 3 – біморфні п’єзоприводи

Як видно з діаграми, найбільше переміщення досягається за допомогою біморфних п’єзоприводів, а максимальна енергія накопичується в складових п’єзоприводах. Трубчасті п’єзоприводи є проміжними за своїми енергетичними характеристиками, а за переміщеннями вони мають найгірші показники.

Аналіз побудованої діаграми дозволяє зробити такі висновки. Для застосування складових п’єзоприводів в ММС часто буває недостатнім їх переміщення, а накопичена енергія і сила, що розвивається ними, явно надлишкові. Тому одне з основних завдань пружних механічних передач складається в збільшенні ходу (мультиплекції переміщень) приводу за рахунок зменшення сили. Аналогічне завдання може бути також вирішено для трубчастих п’єзоприводів за рахунок послідовного з’єднання приводів. Для БПП навпаки переміщення в принципі достатні, але необхідно підвищити силу приводу. Таке завдання може бути вирішено за рахунок зменшення ходу БПП.

Більш перспективний шлях – це паралельне з'єднання БПП.

У п'єзоелектричних мехатронних модулях всі зазначені приводи оснащені (або можуть бути оснащені) датчиками прискорень, в якості яких виступають або окремі ПКШ, або електрично відокремлені ділянки п'єзопластин або п'єзокерамічних трубок, що працюють на використанні прямого п'єзоефекту. Ці п'єзокерамічні елементи можуть служити в якості датчиків сили. Однак в статичному або квазістатичному режимах достовірність одержуваної від них інформації може бути низькою через те, що статичні заряди будуть стікати з електродів датчиків через ізоляцію. Тому, мехатронні модулі оснащуються в основному оптичними і п'єзорезистивними датчиками. Вони розташовуються на пружних елементах, які є механічними передачами руху від п'єзоприводу до вихідної ланки – робочому органу.

2.3 Математичне моделювання модулів мікропереміщень з біморфними п'єзоприводами

В основі всіх розрахунків переміщень і силових навантажень вихідних ланок модулів з п'єзоприводами лежать рівняння, що описують стан п'єзоелектричного середовища під дією електричного поля і зовнішніх механічних навантажень [12].

У матричній формі лінеаризовані рівняння зворотного п'єзоефекту (2.4) для малих об'ємів п'єзоелектричного середовища можна представити у вигляді:

$$S = s^E T + d_t E, \tag{2.4}$$

де S і T – механічні деформації і напруги;

E – напруженість електричного поля;

s^E – постійні податливості;

d_t – транспонована матриця п'єзомодулів.

Верхній індекс E означає вимірювання константи при постійній

напруженості електричного поля (це пов’язано з тим, що в розглянутих п’єзоприводах розподіл зарядів на електродах рівномірний). Відомі й інші представлення рівнянь зворотного п’єзоефекту, однак для розглянутих п’єзоприводів рівняння (2.4) найбільш прийнятні. Для п’єзокерамічних матеріалів їх можна представити в розгорнутому вигляді матриці (2.5):

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{12}^E & s_{11}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{13}^E & s_{13}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

де S_1, S_2, S_3 – деформації розтягу-стиску;

S_4, S_5, S_6 – деформації зсуву;

T_1, T_2, T_3 – головні (нормальні) механічні напруження (розтягу-стиску);

T_4, T_5, T_6 – напруження зсуву;

$s_{11}^E,..s_{66}^E$ – постійні податливості для різних умов стану п’єзосередовища;

d_{31}, d_{33}, d_{15} – п’єзомодулі для різних умов стану п’єзосередовища.

Напрямки осей, позначених цифрами 1, 2, 3, відповідають рисунку 2.1 і збігаються з індексами параметрів рівнянь (2.5). Відзначимо, що явище гістерезису тут не враховується.

Для п’єзоелектричних елементів, що мають товщину (розмір по осі 3) набагато меншу, ніж решта розміри рівняння (2.5) істотно спрощуються. Фізичний сенс спрощення полягає в тому, що зсувними деформаціями і напруженнями для тонких пластинок можна знехтувати.

При проєктуванні модулів мікропереміщень з БПП важливо знати характер розподілу деформацій і напружень по поперечному перерізі БПП. Ця інформація

дозволяє вибрати конструктивні параметри елементів в залежності від технічних вимог, що пред'являються до пристрою [12].

Розглянемо БПП, що складається зі склеєних двох довгих і вузьких п'єзокерамічних пластин (ПКП) з металевою ресорою між ними (рис. 2.13).

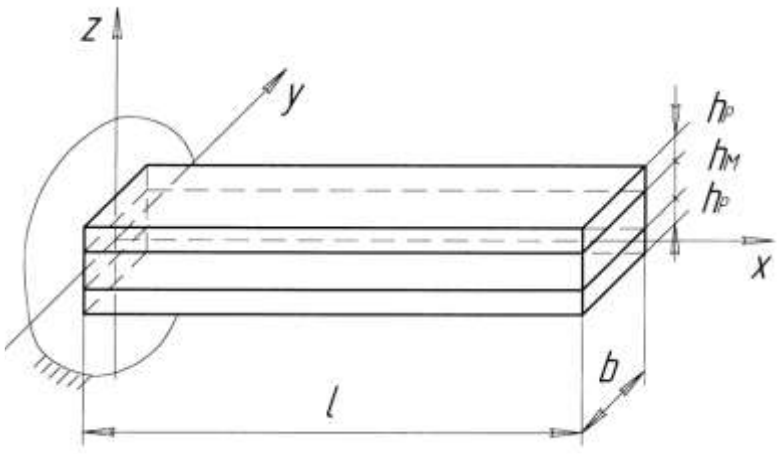


Рисунок 2.13 – Біморфний п'єзоперетворювач [12]

Нехай довжина БПП набагато більше поперечних розмірів ($l >> b, h_P, h_M$). При подачі електричної напруги на електроди п'єзокерамічних пластин БПП згинається. При цьому в активних шарах (в п'єзокерамічних пластинах) і в пасивному шарі (металевій ресорі) виникають згинальні деформації і напруження в площині *xz*. Розглянутий БПП симетричний відносно осі *x*, тому нейтральна лінія поперечного перерізу при згині буде проходити через середину металевої ресори.

Визначимо залежність деформацій і механічних напружень від електричної напруги *U*. Оскільки шари склеєні між собою, то вважатимемо, що проковзування шарів відсутнє і поперечний переріз «сендвіча» при вигині залишається плоским і не деформується. Крім того, поперечний переріз залишається перпендикулярним нейтральної лінії.

Для розглянутого випадку (S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6 = 0) рівняння зворотного п'єзоефекту (2.5) може бути представлено у вигляді (2.6) при $h_M/2 \le z \le h_P + h_M/2$; $-h_P - h_M/2 \le z \le -h_M/2$:

$$S_P(z) = T_P(z)s_{11}^E + d_{31}E_3, \tag{2.6}$$

де $S_P(z)$ – відносна деформація ПКП (або верхньої, або нижній) – вона еквівалентна S_1;

$T_P(z)$ – механічне напруження, що виникає в ПКП;

T_1, s_{11}^E – податливість п'єзокераміки при постійній напруженості електричного поля;

d_{31} – п'єзоелектричний модуль ПКП при дії електричної напруги в напрямку, перпендикулярному деформації ПКП;

$E_3 = U/h_P$ – напруженість електричного поля при подачі напруги U на електроди ПКП.

У нашому випадку вісь z збігається з віссю з номером «3», а вісь x – з віссю «1». Для пасивної металевої ресори справедливий закон Гука (2.7) на ділянці $-h_M/2 \le z \le h_M/2$:

$$T_M(z) = E_M S_M(z), \tag{2.7}$$

де $T_M(z)$ – механічне напруження, що виникає в металевій ресорі;

E_M – модуль Юнга для металу ресори;

$S_M(z)$ – відносна деформація ресори.

Оскільки поперечний переріз БПП повертається при вигині на кут θ без деформації, залишаючись плоским, то справедлива рівність (2.8) при $-h_M/2 - h_P \le z \le h_M/2 + h_P$:

$$S_P(z) = S_M(z). \tag{2.8}$$

Виходячи з лінійного характеру рівнянь (2.6-2.8) можна припустити, що механічні напруження також матимуть лінійну залежність від z як на пасивних,

так і на активних ділянках. Внаслідок симетричності БПП можна для простоти визначити ці залежності, наприклад, тільки для верхньої частини (2.9-2.11):

$$T_P(z) = A + Bz \text{ при } h_M/2 \le z \le h_P + h_M/2, \tag{2.9}$$

$$T_M(z) = Cz \text{ при } 0 \le z \le h_M/2, \tag{2.10}$$

$$S_P(z) = S_M(z) = Dz \text{ при } 0 \le z \le h_P + h_M/2, \tag{2.11}$$

де *A*, *B*, *C*, *D* – постійні коефіцієнти.

Підставивши (2.10) і (2.11) в (2.7), отримаємо (2.12):

$$Cz = E_M Dz \text{ або } D = \frac{C}{E_M}. \tag{2.12}$$

Підставимо (2.9) і (2.11) в (2.7) , отримаємо (2.13):

$$Dz = s_{11}^E(A + Bz) + d_{31}E, \tag{2.13}$$

а з урахуванням (2.12) рівняння (2.13) буде мати вигляд (2.14):

$$\frac{C}{E_M} z = s_{11}^E(A + Bz) + d_{31}E_3, \text{ або } \left(\frac{C}{E_M} - Bs_{11}^E\right)z = d_{31}E_3 + As_{11}^E. \tag{2.14}$$

Рівняння (2.14) має виконуватися при $\forall z$ з інтервалу $0 \le z \le h_P + h_M/2$, тому ліва і права частини рівняння (2.14) повинні дорівнювати нулю:

$$\begin{cases} \dfrac{C}{E_M} - Bs_{11}^E = 0; \\ d_{31}E_3 + As_{11}^E = 0, \end{cases}$$

звідки отримаємо залежності (2.15-2.16) для коефіцієнтів *A*, *B*, *C*:

$$B = \frac{C}{E_M s_{11}^E}; \tag{2.15}$$

$$A = \frac{d_{31} E_3}{s_{11}^E}. \tag{2.16}$$

У будь-якому поперечному перерізі БПП згинальний момент $M(x) = 0$ при $0 \le x \le l$, тому що на БПП не діють ніякі зовнішні сили і моменти (2.17):

$$M = 2b\int_0^m T_M(z) \cdot z dz + 2b\int_m^n T_P(z) \cdot z dz = 0, \tag{2.17}$$

де $m = h_M/2,\ n = h_P + h_M/2.$

Підставивши в (2.17) вирази (2.9) і (2.10), отримаємо рівняння (2.18):

$$\int_0^m Cz^2 dz + \int_m^n (A + Bz) z dz = 0. \tag{2.18}$$

Провівши необхідні перетворення, отримаємо рівняння (2.19):

$$C\frac{m^3}{3} + A\frac{(n^2 - m^2)}{2} + B\frac{(n^3 - m^3)}{2} = 0. \tag{2.19}$$

З урахуванням рівнянь (2.15) і (2.16) визначимо значення коефіцієнта *C* за формулою (2.20):

$$C = \frac{3d_{31} E_M (n^2 - m^2) E_3}{2\left[m^3 E_M s_{11}^E + (n^3 - m^3)\right]}. \tag{2.20}$$

Підставивши (2.20) в (2.12), знайдемо значення коефіцієнта *D* (2.21):

$$D = \frac{3d_{31}\left(n^2 - m^2\right)E_3}{2\left[m^3 E_M s_{11}^E + \left(n^3 - m^3\right)\right]}. \tag{2.21}$$

Таким чином, визначені всі коефіцієнти рівнянь (2.9), (2.10), (2.11), дозволяють знайти механічні напруження $T_P(z)$, $T_M(z)$ і відносні деформації $S_P(z)$, $S_M(z)$ в активному і пасивному шарах поперечного перерізу БПП при подачі напруги *U* на ПКП і умові $h_M/2 \le z \le h_P + h_M/2$, отримаємо (2.22):

$$T_P(z) = \frac{d_{31}}{s_{11}^E h_P}\left\{-1 + \frac{3}{2}\cdot\frac{\left[\left(h_P + \frac{h_M}{2}\right)^2 - \frac{h_M^2}{4}\right]z}{\frac{h_M^3}{8}E_M s_{11}^E + \left(h_P + \frac{h_M}{2}\right)^3 - \frac{h_M^3}{8}}\right\}U \ . \tag{2.22}$$

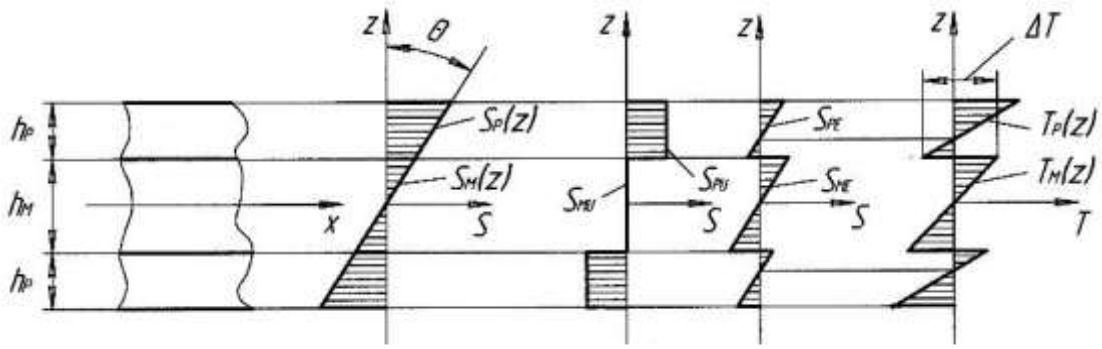
При умові $0 \le z \le h_M/2$, отримаємо вираз (2.23):

$$T_M(z) = \frac{3}{2}\cdot\frac{d_{31}\left[\left(h_P + \frac{h_M}{2}\right)^2 - \frac{h_M^2}{4}\right]E_M z}{\left[\frac{h_M^3}{8}E_M s_{11}^E + \left(h_P + \frac{h_M}{2}\right)^3 - \frac{h_M^3}{8}\right]h_P}U \tag{2.23}$$

При $0 \le z \le h_P + h_M/2$, отримаємо вираз (2.24):

$$S_P(z) = S_M(z) = \frac{3}{2}\cdot\frac{d_{31}\left[\left(h_P + \frac{h_M}{2}\right)^2 - \frac{h_M^2}{4}\right]z}{\left[\frac{h_M^3}{8}E_M s_{11}^E + \left(h_P + \frac{h_M}{2}\right)^3 - \frac{h_M^3}{8}\right]h_P}U \, . \tag{2.24}$$

Епюри розподілу деформацій і напружень за перерізом, отримані виходячи з формул (2.22)-(2.24), показані на рисунку 2.14, (б), (г).



а) б) в) г) д)

Рисунок 2.21 – Епюри розподілу деформацій і механічних напружень по поперечному перерізу БПП: а – ділянка БПП; б – епюра деформацій БПП; в – епюра деформацій, що виникають на вільних ПКП від дії електричної напруги; г – епюра чисто пружних деформацій БПП; д – епюра механічних напружень БПП [12]

В приграничному шарі при $z = h_M/2$ існує стрибок механічних напружень у вигляді (2.25):

$$\Delta T = \left| T_P\left(z = \frac{h_M}{2}\right) - T_M\left(z = \frac{h_M}{2}\right)\right|. \qquad (2.25)$$

Використовуючи (2.22) і (2.23), отримаємо вираз (2.26):

$$\Delta T = \left|\frac{d_{31}}{h_P} U\left[-\frac{1}{s_{11}^E} + \frac{3}{2}\cdot\frac{E_M\left(n^2 - m^2\right)}{E_M s_{11}^E m^3 + \left(n^3 - m^3\right)}\right]\left(\frac{1}{s_{11}^E} - E_M\right) m\right|, \qquad (2.26)$$

де $m = h_M/2,\ n = h_P + h_M/2.$

В окремому випадку при відсутності металевої ресори ($h_M = 0$) стрибок механічних напружень максимальний (2.27):

$$\Delta T_0 = \left| \frac{d_{31}}{s_{11}^E h_P} U \right|. \qquad (2.27)$$

Фізичний зміст появи стрибка механічних напружень на межах ресори і ПКП полягає в наступному. Розглянемо деформацію (2.28), виникану в БПП, як суму деформації від дії електричної напруги і пружною деформації, яка виникає через взаємодію склеєних частин:

$$S_P = S_{PU} + S_{PE}, \qquad (2.28)$$

де $S_{PU} = d_{31} \frac{U}{h_P}$ – деформації не склеєних ПКП при дії тільки електричної напруги;

$S_{PE} = s_{11}^E T_P$ – пружна деформація ПКП, яка виникає тільки через взаємодію з приклеєною до неї пасивною ресорою.

Відповідно для ресори її деформацію також можна представити як суму деформацій (2.29) від дії електричної напруги (S_{MU}) і від дії пружних сил, що виникають через взаємодію з приклеєною до неї ПКП (S_{ME}):

$$S_M = S_{MU} + S_{ME}. \qquad (2.29)$$

У цьому виразі $S_{ME} = E_M T_M$, $S_{MU} = 0$, тому що матеріал ресори пасивний до дії електричної напруги. В цьому випадку епюра деформацій вільних частин БПП, що виникають від дії електричної напруги, матиме вигляд, показаний на рисунку 2.14, (в), а епюра пружних деформацій, що виникають від взаємодії склеєних частин (рис. 2.14, д), буде як різниця епюр на рисунку 2.14, (б) і на рисунку 2.14, (в).

Очевидно, що координата z, в якій $T_P(z) = 0$ і $S_{PE}(z) = 0$ однакова (рис. 2.14, (д) і рис. 2.14, (г)). Стрибок механічних напружень ΔT в шарі з

координатою $z = h_м/2$ пояснюється стрибком пружних деформацій S_{PE} і S_{ME} в точці з цієї координатою. Аналіз виразів (2.22-2.27) показує наступне.

1. Деформації і механічні напруження зникають при $U = 0$. Знак деформації в шарах БПП залежить від знаку U, відповідно і розташування шарів, схильних до розтягування і стиснення, також залежить від знаку прикладеної електричної напруги.

2. Деформації як в ресорі, так і в ПКП залежать від товщини шарів і співвідношення пружних характеристик шарів (податливостей або модулів пружності). Чим менша податливість ПКП і товщина ресори, тим більше деформація і відповідно прогин БПП.

3. Механічні напруження в БПП залежать від співвідношення пружних характеристик шарів (модулів пружності або податливостей). Вони зростають з підвищенням податливості ПКП.

4. Стрибок механічного напруження, що виникає на границі активних і пасивних шарів при подачі електричної напруги на ПКП, максимальний при відсутності ресори. Її наявність як би згладжує зміну механічного напруження при переході від одного активного шару до іншого.

Ці висновки дозволяють варіювати параметрами БПП, досягаючи певної мети. Практика показує, що найбільша причина відмови БПП полягає у відшаруванні припою з провідником і малою ділянкою срібного електрода від ПКП, що працює у вібраційному режимі. Цей дефект виникає через механічні напруження на поверхні ПКП. Тому з метою підвищення надійності електроконтакта необхідно зменшити їх, бажано до нуля. Ця вимога відповідає умові (2.30):

$$T_P\left(z = h_P + h_м/2\right) = 0, \qquad (2.30)$$

з якої випливає з урахуванням (2.22), що необхідно розв’язати кубічне рівняння (2.31):

$$2H^3\left(E_M s_{11}^E - 1\right) + 3H^2 - 1 = 0, \qquad (2.31)$$

де $H = \dfrac{h_M/2}{h_P + h_M/2}$.

В окремому випадку, коли $\left(E_M\right)^{-1} = s_{11}^E$, тобто ресора має ті ж пружні характеристики, що й ПКП, отримуємо $H = \dfrac{1}{\sqrt{3}}$ або $h_M = \dfrac{2}{\sqrt{3}-1} h_P$.

Таким чином, при вибраних матеріалах ресори і п’єзокераміки можна визначити співвідношення між товщинами шарів, при якому механічне напруження на поверхні ПКП буде дорівнювати нулю.

Загальний характер розподілу механічних напружень і деформацій за перерізом, що виникають при подачі електричної напруги, якісно схожий на характер розподілу цих величин при підвищенні температури в біметалевих пластинах. У них спостерігаються такі ж скачки напруги в області спаю. Однак в таких пристроях не може існувати пасивний шар, як в БПП, і, крім того, картина розподілу зазначених характеристик не може бути симетричною відносно нейтральної лінії згину. Порівняльний аналіз залежності (2.24) і аналогічної залежності деформацій від температури для біметалів свідчить, що при відсутності зовнішнього навантаження відносна деформація постійна за довжиною, тому нейтральна лінія має в обох випадках постійну кривизну за довжиною, тобто вигнуті елементи мають форму дуги кола.

У зв’язку з тим, що рівняння зворотного п’єзоефекту (2.6) і закон Гука (2.7) лінійні, при подачі електричної напруги і при навантаженні БПП зовнішніми механічними навантаженнями буде діяти принцип суперпозиції. Він полягає в тому, що деформації і механічні напруження, що виникають при спільній дії електричної напруги і зовнішніх механічних навантажень, будуть являти собою алгебраїчну суму зазначених впливів.

Нейтральна лінія БПП при відсутності зовнішніх сил має постійну кривизну, тому вона має форму дуги окружності. Відносна деформація *S* шару з

координатою *z* для вигнутого бруса представлена у вигляді (2.32):

$$S = \frac{z}{R_0}, \tag{2.32}$$

де R_0 – радіус кривизни зігнутої нейтральної лінії.

З огляду на залежність (2.11), отримаємо для БПП вираз (2.33):

$$\frac{1}{R_0} = D. \tag{2.33}$$

Кут повороту поперечного перерізу БПП з координатою *x* визначається залежністю (2.34):

$$\theta = \pm\int_0^x \frac{1}{R_0} dx = \pm Dx, \tag{2.34}$$

а переміщення вільного кінця БПП залежністю (2.35):

$$\xi = \int_0^t \theta dx = \pm \int_0^t Dx dx = \pm \frac{Dt^2}{2}, \tag{2.35}$$

де верхній знак береться при позитивній кривизні (випуклість вниз), а нижній знак – при негативній кривизні (випуклість вверх).

З огляду на формулу (2.21), отримаємо мікропереміщення кінця БПП (2.36) при подачі електричної напруги на ПКП:

$$\xi = \mu \frac{3}{4} \cdot \frac{d_{31}\left[\left(h_P + \frac{h_M}{2}\right)^2 - \frac{h_M^2}{4}\right] \cdot l^2}{\left[E_M s_{11}^E \frac{h_M^3}{8} + \left(h_P + \frac{h_M}{2}\right)^3 - \frac{h_M^3}{8}\right] \cdot h_P} \cdot U. \tag{2.36}$$

Для випадку, показаного на рисунку 2.14, (в) (2.36) беремо знак «–», так як верхні шари БПП, розташовані вище осі *x* мають позитивну деформацію і, отже, кривизна буде негативною і переміщення кінця БПП буде відбуватися в негативному напрямку осі *z*.

Зазвичай розробник може більшою мірою варіювати параметрами ресори, ніж п'єзокераміки, тому розглянемо вплив на переміщення зміни модуля пружності ресори і її товщини. Максимум переміщення досягається при $E_M = 0.$ При зменшенні товщини ресори переміщення збільшується і досягає максимуму при $h_M = 0.$ В окремому випадку, коли товщина ресори $h_M = 0$, переміщення вільного кінця БПП, що складається тільки з двох склеєних ПКП, визначається виразом (2.37):

$$\xi_0 = \pm \frac{3}{4} \cdot \frac{d_{31} l^2}{h_P^2} U. \qquad (2.37)$$

Ця формула аналогічна залежності (2.3). З формул (2.3) і (2.37) випливає, що чим тонша металева ресора і менший її модуль пружності, а також менше податливість п'єзокераміки, тим більше зміщення БПП. Для підвищення зміщення в якості ресори можуть бути використані дюралюмінієва або тонка фольгована склотекстолітова пластинка, що має що має низький модуль пружності. Фольга в останньому випадку служить для забезпечення електричного контакту з електродами ПКП. Таким чином, для досягнення максимального значення переміщення БПП необхідно зменшувати товщину ресори і її модуль пружності. Однак слід враховувати, що при дуже малій товщині ресори (~ 0,01 мм) закладення такого БПП вироджується в пружний шарнір, що тягне за собою зміну граничних умов при розрахунках коливальних систем. Крім того, аналіз представлених формул підтверджує твердження [22], що для збільшення переміщення необхідно зменшувати шар клею.

Визначимо переміщення вільного кінця БПП, що має випуск ресори, другий кінець якого закріплений, як показано на рисунку 2.15.

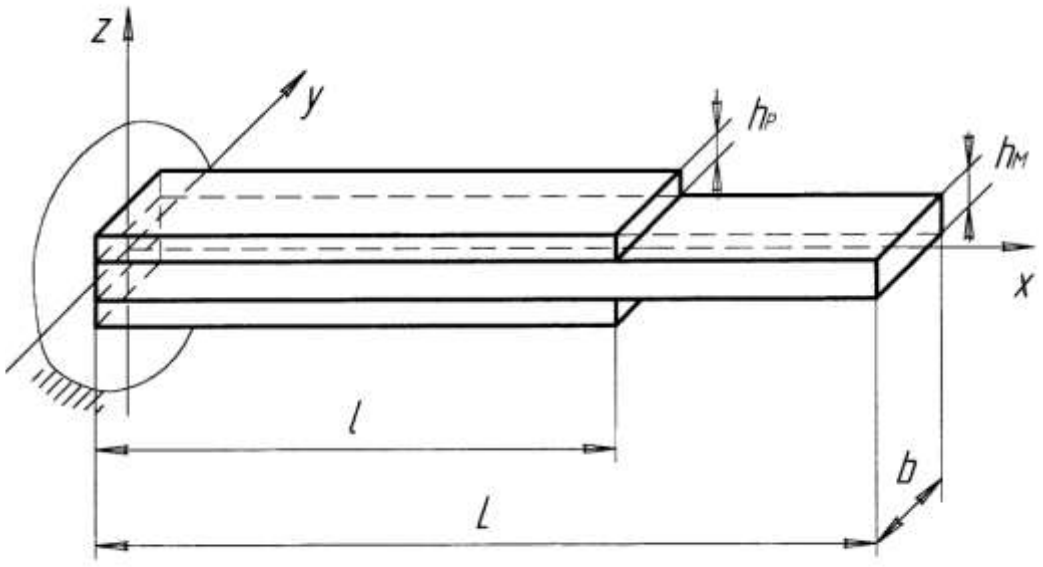


Рисунок 2.15 – Розрахункова схема БПП з випуском ресори [22]

На рисунку 2.15 представлена довжина ПКП, складових БПП – *l*, довжина металевої ресори – *L*, ширина ПКП і ресори однакова і дорівнює – *b* на всій довжині. Нехай при подачі постійної електричної напруги *U* на електроди ПКП верхня ПКП видовжується, а нижня – коротшає. В цьому випадку нейтральна лінія О-О зігнеться, як показано на рисунку 2.16.

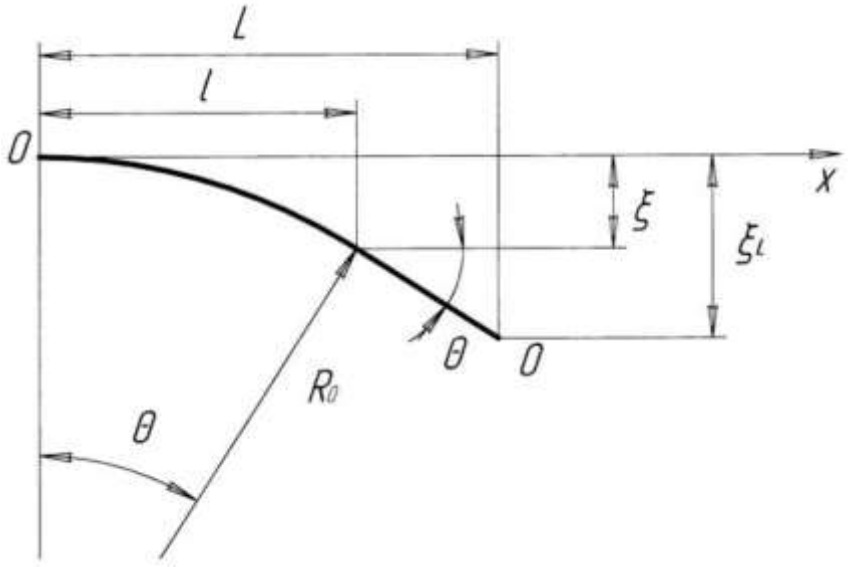


Рисунок 2.16 – Положення нейтральної лінії БПП з випуском ресори при подачі електричної напруги [22]

Оскільки на випуску ресори відсутній будь-який вплив, то кут повороту нейтральної лінії θ (2.38) залишиться постійним на відрізку $l \le x \le L$:

$$\theta = -\frac{2}{3} \cdot \frac{d_{31}\left[\left(h_P + \frac{h_M}{2}\right)^2 - \frac{h_M^2}{4}\right] \cdot l}{\left[E_M s_{11}^E \frac{h_M^3}{8} + \left(h_P + \frac{h_M}{2}\right)^3 - \frac{h_M^3}{8}\right] \cdot h_P} \cdot U. \qquad (2.38)$$

Виходячи з рисунка 2.16 переміщення вільного кінця металевої ресори визначається за формулою (2.39):

$$\xi_L = \xi + \theta(L - l). \qquad (2.39)$$

З формул (2.36), (2.38) і (2.39) маємо формулу (2.40) для визначення переміщення вільного кінця ресори:

$$\xi_L = \xi\left(1 + 2\frac{L-l}{l}\right) = -\frac{3}{4} \cdot \frac{d_{31}\left[\left(h_P + \frac{h_M}{2}\right)^2 - \frac{h_M^2}{4}\right] \cdot \left(1 + 2\frac{L-l}{l}\right) l^2}{\left[E_M s_{11}^E \frac{h_M^3}{8} + \left(h_P + \frac{h_M}{2}\right)^3 - \frac{h_M^3}{8}\right] \cdot h_P} \cdot U. \qquad (2.40)$$

Аналіз формули (2.40) показує, що переміщення вільного кінця БПП залежить від довжини ПКП в другому ступені, а від відношення *L*/*l* – в першому ступені. Наведемо чисельні значення характеристик БПП з випуском ресори при наступних значеннях параметрів: $l = 3{,}0 \cdot 10^{-2}$ м, $L = 5{,}3 \cdot 10^{-2}$ м, $b = 1{,}5 \cdot 10^{-2}$ м, $h = 1{,}5 \cdot 10^{-2}$ м, $h_M = 1{,}0 \cdot 10^{-3}$ м, $h_P = 0{,}80 \cdot 10^{-3}$ м, $E_M = 0{,}71 \cdot 10^{11}$ Па (дюралюміній), $s_{11}^E = 10{,}7 \cdot 10^{-12}$Па$^{-1}$, $d_{31} = 1{,}35 \cdot 10^{-10}$ Кл/Н, (п'єзокераміка ЦТБС-3). Розрахунки дали наступні результати при *U* = 300 В: переміщення вільного кінця $\xi_L = 5{,}8 \cdot 10^{-5}$ м, $\theta = 0{,}087^0$, механічне напруження в п'єзокераміці

$T_P = 2{,}4 \cdot 10^6$ Па (на поверхні п’єзопластини), механічне напруження в металі $T_M = 1{,}8 \cdot 10^6$ Па (на поверхні ресори), стрибок механічних напружень $\Delta T = 4{,}2 \cdot 10^6$ Па, відносна деформація уздовж всієї довжини ПКП $S = 6{,}6 \cdot 10^{-5}$.

Висновки до розділу

1. В якості приводів мікропереміщень для маніпуляційних систем в основному використовують три типи п’єзоперетворювачів: багатошарові пакети, набрані з п’єзокерамічних шайб або дисків, що працюють на розтяг-стиск; трубчасті п’єзоперетворювачі; вони можуть працювати як на розтяг-стиск, так і на згин; біморфні п’єзоперетворювачі, що складаються із склеєних п’єзокерамічних пластин, між якими може знаходитися металева ресора, вони працюють на згин.

2. П’єзоелектричні приводи мікропереміщень (ППМ) мають ряд переваг перед іншими приводами. Це високі питомі силові характеристики, малі значення електричних струмів і втрат, висока надійність і технологічність виготовлення, радіаційна і температурна стійкість. До недоліків ППМ можна віднести порівняно високу напругу, що подається на електроди, прояв гістерезису, нестабільність п’єзоелектричних параметрів, вплив зміни вологості на електричні параметри. Шляхи подолання цих недоліків наступні: вибір відповідних п’єзоактивних матеріалів, зменшення товщини п’єзоелектричних шарів, введення зворотних зв’язків за положенням вихідної ланки, програмні методи управління, застосування технологій виробництва інтегральних схем. Зменшення впливу гістерезису на роботу п’єзоелектричного мехатронного ММ може бути досягнуто за рахунок застосування певних видів п’єзокерамічних матеріалів.

3. У п’єзоелектричних мехатронних модулях всі приводи оснащені датчиками прискорень, в якості яких виступають або окремі ПКШ, або електрично відокремлені ділянки п’єзопластин або п’єзокерамічних трубок, що

працюють на використанні прямого п’єзоефекту. Ці п’єзокерамічні елементи можуть служити в якості датчиків сили. Однак в статичному або квазістатичному режимах достовірність одержуваної від них інформації може бути низькою через те, що статичні заряди будуть стікати з електродів датчиків через ізоляцію. Тому, мехатронні модулі оснащуються в основному оптичними і п’єзорезистивними датчиками. Вони розташовуються на пружних елементах, які є механічними передачами руху від п’єзоприводу до вихідної ланки – робочому органу.

4. П’єзоелектричні модулі, засновані на застосуванні складових, трубчастих і біморфних п’єзоприводів, дозволяють створити компактні системи мікропереміщень в широкому спектрі переміщень і механічних навантажень. БПП дозволяють вкоротити кінематичні ланцюги модуля. БПП є за своїми властивостями пружними елементами, тому вони можуть грати роль пружних передавальних механізмів (наприклад, бути еквівалентом важеля).

5. Розраховано і проаналізовано розподіл деформацій і напружень по поперечному перерізі БПП в стрижневий моделі при дії електричної напруги. Загальний характер розподілу механічних напружень і деформацій по перерізу якісно схожий на характер розподілу цих величин від температури в біметалевих пластинах. Однак в біметалевих пристроях не може існувати пасивний шар як в БПП і, крім того, картина розподілу зазначених характеристик не може бути симетричною відносно нейтральної лінії вигину.

РОЗДІЛ 3
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

3.1 Схемне представлення модулів мікропереміщення на базі складних і трубчатих п’єзоприводів

Збільшення переміщення без збільшення габаритів СПП (тобто без установки додаткових п’єзопакетів) може бути досягнуто за допомогою ускладнення кінематики мікромеханічного модуля. З цієї причини зазначені п’єзоприводи повинні мати механічні передачі з використанням важелів і безфрикційних пружних шарнірів. Однак цей принцип мультиплекції переміщень має обмежену ефективність внаслідок малого коефіцієнта мультиплекції [24].

Розглянемо мікромеханічний модуль мультиплекції переміщень з різноплечним важелем і пружним шарніром (рис. 3.1).

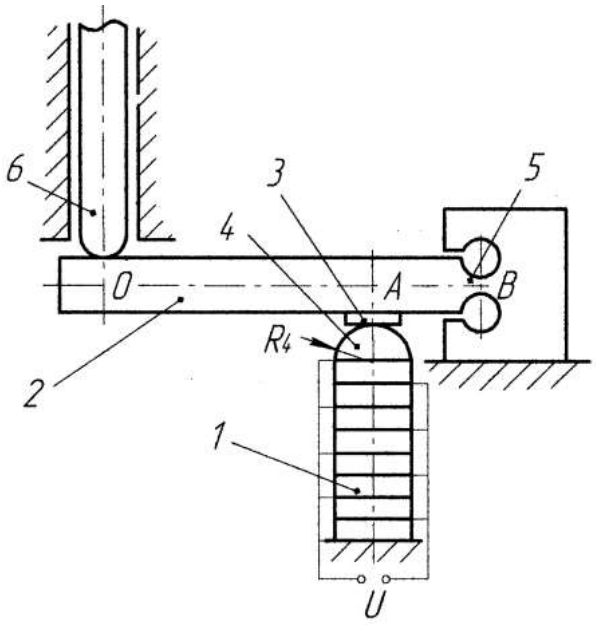


Рисунок 3.1 – П’єзоелектричний модуль з системою важеля мультиплекції [24]

Даний модуль складається з СМП 1, важеля 2 з контактною площадкою 3, яка взаємодіє в точці А зі сферичним наконечником 4 робочого торця СПП 1.

Важіль 2 кріпиться до основи за допомогою пружного шарніра 5 (застосування традиційних шарнірів взагалі неможливо через люфти). Кінець важеля 2 контактує з вихідною ланкою 6 в точці О.

Подібна конструктивна схема може мати місце, наприклад, в гальмівному пристрої крокового п'єзодвигуна, в якому створення сили тертя між робочим органом і вихідною ланкою здійснюється за допомогою пружини (на рисунку 3.1 не показана), а звільнення робочого органу здійснюється при подачі напруги на СПП. У такій конструкції важливо як забезпечення необхідного зусилля при гальмуванні (близько 5 Н), так і досить великого зазору (~ 0,05 мм) при знятті гальмівного впливу. Іншим прикладом використання такої схеми може служити привід подачі різця прецизійного токарного верстата для обробки мініатюрних виробів (хід ~ 0,2 мм, зусилля різання ~ 10 Н).

При подачі напруги U на СПП 1 його довжина збільшується і він своїм сферичним наконечником 4 діє на вставку важеля 3, переміщаючи вихідну ланку 6 вгору. У точці контакту А виникають контактні деформації, які зменшують переміщення вихідної ланки 6. На відміну від ідеальної схеми різноплечного абсолютно жорсткого важеля з ідеальним шарніром, в даній схемі виникають додаткові згинальні деформації самого важеля і пружного шарніра, які також зменшують переміщення вихідної ланки. Ідеальний коефіцієнт мультиплекції, що відповідає схемі абсолютно жорсткого важеля з ідеальним шарніром, визначається виразом (3.1):

$$k_0 = \frac{\xi_0}{\xi_{A0}} = \frac{OB}{AB}, \qquad (3.1)$$

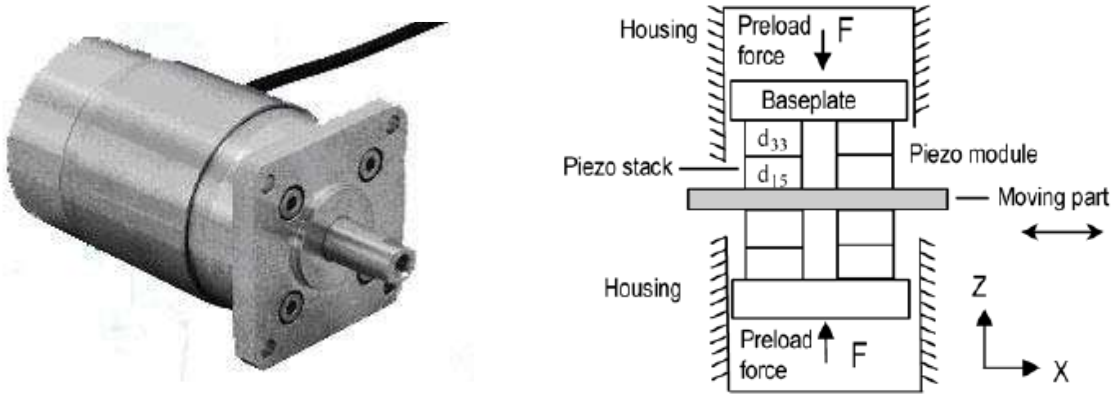
де ξ_0 – переміщення точки О;

ξ_{A0} – переміщення точки А без урахування деформацій.

Таким чином, мультиплекція даної системи буде суттєво менше, ніж у ідеальної схеми.

Складові п'єзоперетворювачі можуть розвивати великі сили, тому їх

можна використовувати в якості приводних елементів для компенсації зносу інструменту в металообробних верстатах. У разі, коли необхідні відносно великі переміщення і сили, складові перетворювачі використовуються в якості елементів крокових п'єзодвигунів. На рисунку 3.2 показаний загальний вигляд такого п'єзодвигуна і схема його роботи [25]. Розроблений компанією PI п'єзодвигун розвиває силу до 600 Н і має робочий хід 20 мм при мінімальному кроці 0,01 мкм при швидкості 0,5 мм/с, похибка позиціонування не більше 0,005 мкм досягається за рахунок зворотного зв'язку за положенням за допомогою лінійного інкрементального енкодера.



а) б)

Рисунок 3.2 – Лінійний кроковий п'єзодвигун: а – зовнішній вигляд; б – принцип дії [25]

Принцип дії п'єзодвигунів полягає в наступному. Рухомий шток (Moving part) затиснутий двома парами складових п'єзоперетворювачів (Piezo stack) d_{33} і d_{15} за допомогою постійної сили (Preload force), яку забезпечує пружина (на рисунку 3.2 не показана). П'єзоперетворювачі d_{33} працюють на розтягнення-стиснення, а п'єзоперетворювачі d_{15} працюють на зсув. Для здійснення руху штока вправо на праві п'єзоперетворювачі d_{33} подається така напруга, при якій вони вкорочуються (по осі Z), а на ліві п'єзоперетворювачі d_{33} подається напруга, при якій вони подовжуються. Далі на ліві перетворювачі d_{15} подається напруга, при якому їх поверхні, що контактують зі штоком, зсуваються вправо (по осі X).

Тим самим забезпечується переміщення штока вправо на один крок. Розмір кроку залежить від величини напруги на d_{15}. Далі шток затискають праві d_{33}, а ліві d_{33} відпускають шток. Подається напруга на праві d_{15}, забезпечуючи переміщення штока по осі X ще на один крок.

Для трубчастих п’єзоприводів застосування важільної системи з пружними шарнірами малоефективне. Сили, що розвиваються такими приводами, малі в порівнянні з СПП, а малі переміщення (3-5 мкм) трубчастих приводів будуть «з’їдені» деформаціями механічної передачі. Для таких п’єзоприводів більш перспективне послідовне з’єднання трубчастих п’єзоперетворювачів, що забезпечує збільшення переміщення зі збереженням сили приводу. Для зменшення габаритів вони можуть розташовуватися коаксіально всередині один одного (рис. 3.3).

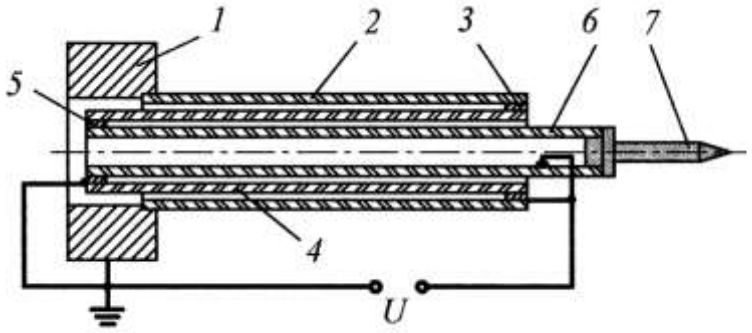


Рисунок 3.3 – Послідовне з’єднання трубчастих п’єзоперетворювачів [25]

У корпусі 1 зафіксований трубчастий п’єзоперетворювач 2, кінець якого за допомогою металевої втулки 3 приклеєний до кінця більш тонкого трубчастого п’єзоперетворювача 4. У свою чергу другий кінець п’єзоперетворювача 4 через втулку 5 прикріплений до третього трубчастого п’єзоперетворювача 6, на кінці якого знаходиться робочий орган 7 (наприклад, голка). Напруга U подається на зовнішній електрод п’єзоперетворювача 4 і внутрішній електрод п’єзоперетворювача 6 (зовнішні електроди п’єзоперетворювачів 2 і 6 і внутрішній електрод п’єзоперетворювача 4 заземлені). Напрямок вектора поляризації всіх п’єзоперетворювачів вибрано таким чином, що при подачі

напруги U довжина п’єзоперетворювачів 2 і 6 збільшується, а довжина п’єзоперетворювача 4 зменшується, тому переміщення робочого органу 7 буде дорівнювати сумі переміщень всіх п’єзоперетворювачів. Якщо один із перетворювачів, наприклад перетворювач 6, матиме внутрішній електрод, розділений вздовж осі на чотири незалежних електроди, то можливе отримання траєкторії робочого органу 7, перпендикулярної його осі за рахунок вигинистих деформацій перетворювача 6. При проєктуванні таких пристроїв потрібно мати на увазі, що з’єднання трубчастих п’єзоприводів через втулки за допомогою клею викликає деформації зсуву при осьовому навантаженні на робочий орган. Клейове з’єднання тим міцніше, чим тонший шар клею між поверхнями, що сполучаються. Тому з’єднання втулки з двома трубчастими п’єзоперетворювачами має бути виконано по можливості точно і з мінімальними зазорами.

Розглянуті методи мультиплекції переміщень дозволяють збільшити переміщення мікромеханічного модуля в кілька разів, при цьому загальні габарити пристроїв підвищуються незначно.

У деяких випадках необхідно збільшити переміщення БПП. Такі завдання зустрічаються при розробці мініатюрних оптико-механічних систем сканування. Найпростіший спосіб – це збільшення як довжини ПКП l_1, так і довжини ресори L (рис. 2.10), проте корисні навантаження такої системи істотно зменшуються, різко знижується перша власна частота системи і збільшується лінійний розмір. В пристрої виникає небезпека виходу з ладу БПП, тому що при великих зусиллях виникають деформації розтягування в тендітних п’єзокерамічних елементах, що може привести до тріщин. Можливе багатоступінчате послідовне з’єднання декількох БПП в одному механізмі, що призводить до зменшення розмірів конструкції в цілому, але при цьому зменшується жорсткість всієї пружної системи (перетворення стає неефективним при 5-6 ступенях, з’єднаних послідовно) [25]. Така конструкція (рис. 3.4) має п’єзоелектричні елементи 1 і 2, встановлені з двох сторін на пластині 3 з декількома паралельними прорізами, яка закріплена на основі 4.

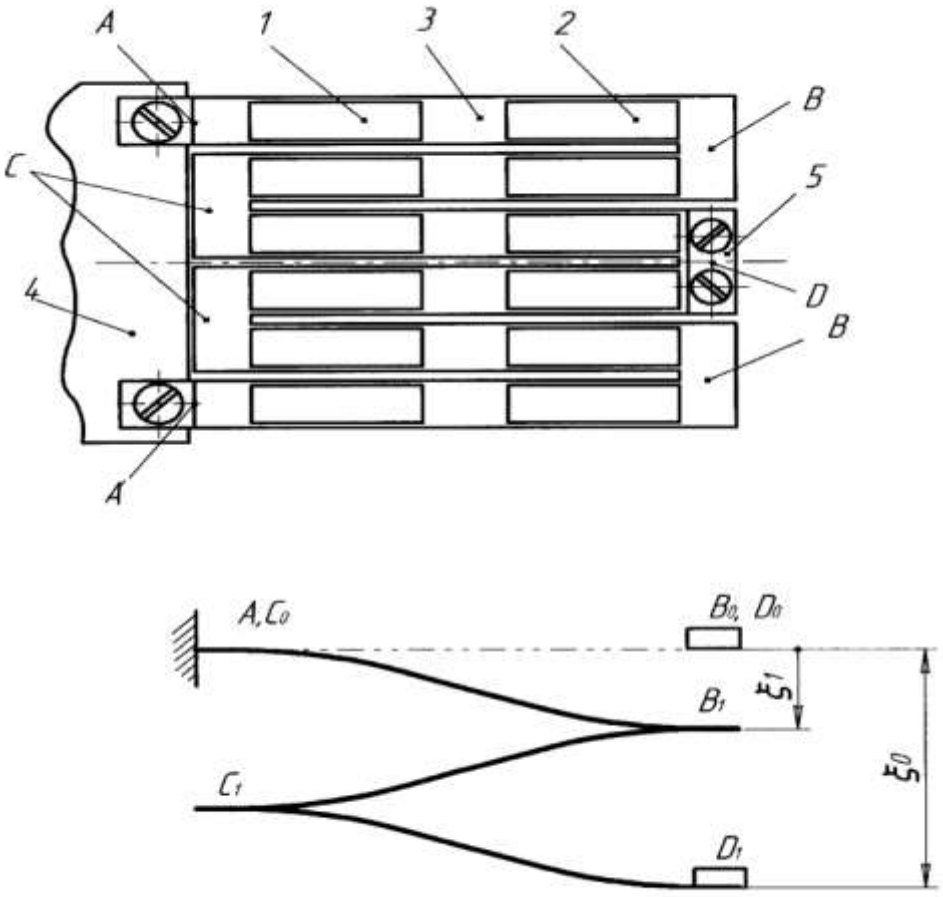


Рисунок 3.4 – Пристрій з послідовним з’єднанням БПП і схема його прогину [25]

При відсутності напруги точки A, B_0, C_0, D_0 знаходяться в одній площині. При подачі напруги на п’єзоелементи переміщення точки D зросте пропорційно кількості послідовно з’єднаних БПП (в нашому випадку $\xi_0 = 3\xi_1$). Тут необхідно зазначити, що ресора 3 має перегин в середній частині, тому п’єзоелементи 1 і 2 мають протилежну поляризацію. Ця конструкція може бути використана в якості реле або пневматичного чи гідравлічного розподільного пристрою (сопло-заслінка).

На рисунку 3.5, (а), (б) показано пристрій, мультиплекція кутового переміщення якого досягається за рахунок застосування важільної системи [25]. На плоскій ресорі 1 її вид (рис. 3.5, г) встановлено чотири БПП 2. У середній частині ресори на виступах E, D (які служать важелями) закріплена нежорстка ресора 3, в центрі якої знаходиться вихідна ланка 4 (наприклад, дзеркало).

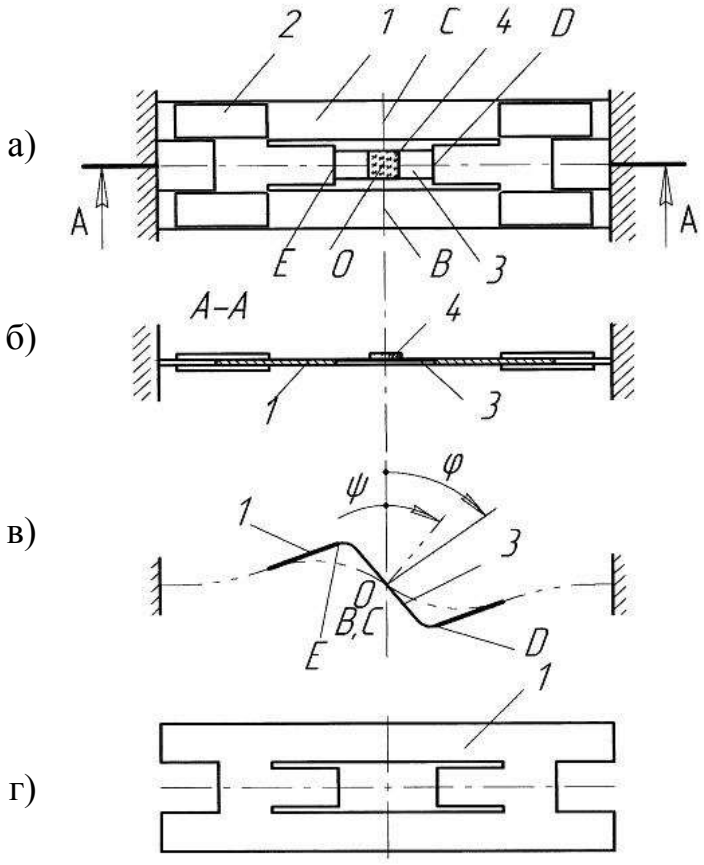


Рисунок 3.5 – Пристрій мультиплекції кутового переміщення і схема його роботи [25]

При подачі напруги на БПП ресора згинається за *S*-подібною формою (рис. 3.5, в), а точки В і С повертаються на кут ψ. Завдяки тому, що виступи Е, D залишаються незігнутими, точка О гнучкої ресори 3 повернеться на кут $\varphi > \psi$ за рахунок вигину ресори 3. Мультиплекція кутового переміщення вихідної ланки залежить від співвідношення розмірів виступів Е, D і ресори 3.

Паралельне з’єднання БПП не збільшує переміщення вихідної ланки пристрою, однак кратно підвищує жорсткість і його силові характеристики. Сучасні технології напилення п’єзоактивного матеріалу на плоскі пружні металеві пластинки дають можливість створити надзвичайно компактну конструкцію багатошарового БПП з високими питомими силовими характеристиками (рис. 3.6) [24]. На плоскі спіральні ресори 1 нанесені п’єзокерамічні шари 2 і 3, які формують спіральний БПП. За допомогою гвинта-стяжки 4 з штовхачем 5 спіральні БПП утворюють паралельну структуру.

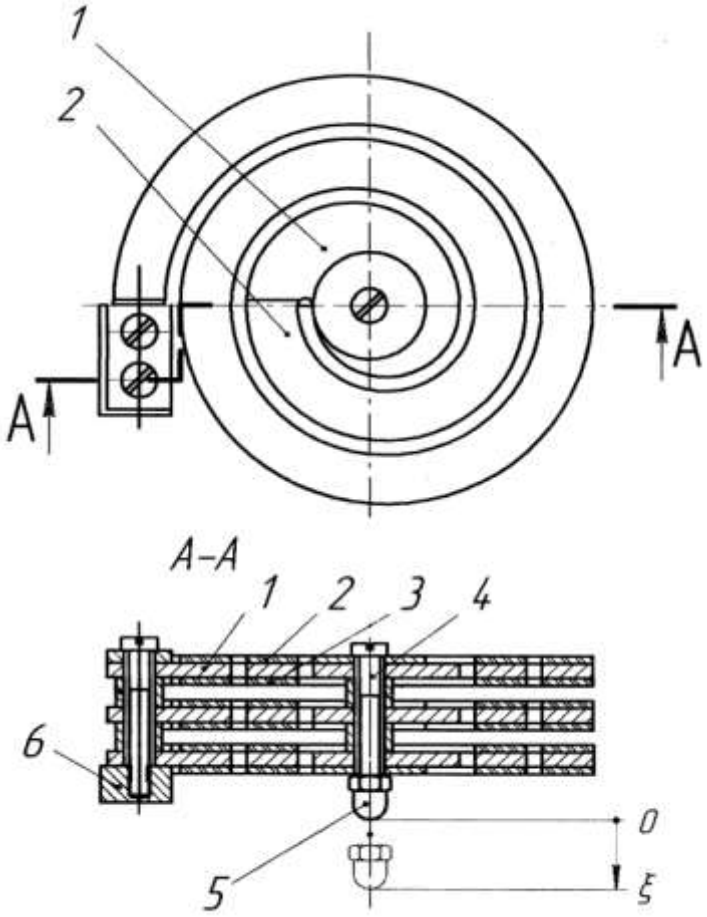


Рисунок 3.6 – Паралельне з’єднання спіральних БПП [24]

Ресори 1 закріплені на основі 6 за допомогою гвинтового з’єднання. Тут можливе досягнення переміщень близько 5 мм і силою на кінці БПП до 1 Н при загальних габаритах конструкції Ø80х20 мм і при кількості спіральних ПП до 10 елементів. Такі компактні конструкції перспективні для здійснення переміщення об’єктивів малогабаритних оптичних пристроїв.

Таким чином, п’єзоелектричні модулі, засновані на застосуванні складових, трубчастих і біморфних п’єзоприводів, дозволяють створити компактні системи мікропереміщень в широкому спектрі переміщень і механічних навантажень. БПП дозволяють вкоротити кінематичні ланцюги модуля. БПП є за своїми властивостями пружними елементами, тому вони можуть грати роль пружних передавальних механізмів (наприклад, бути еквівалентом важеля).

3.2 Принцип функціонування модулів мікропереміщення з біморфними п’єзоприводами

У мікромеханіці широко використовуються пружні пристрої в якості механічних передач. Це пояснюється їх істотними перевагами: високою точністю параметрів руху, надійністю, довговічністю, автономністю в роботі, відсутністю тертя ковзання, люфтів, зносу, технологічністю виготовлення [22, 25]. Ці пристрої не містять активних елементів, тобто ці кінематичні ланцюги служать тільки для перетворення і передачі руху і не використовуються для перетворення електричної енергії в механічну. Для забезпечення заданої траєкторії руху вихідної ланки при застосуванні традиційного електромеханічного приводу з пружними кінематичними зв’язками характерна наступна функціональна схема (рис. 3.7).

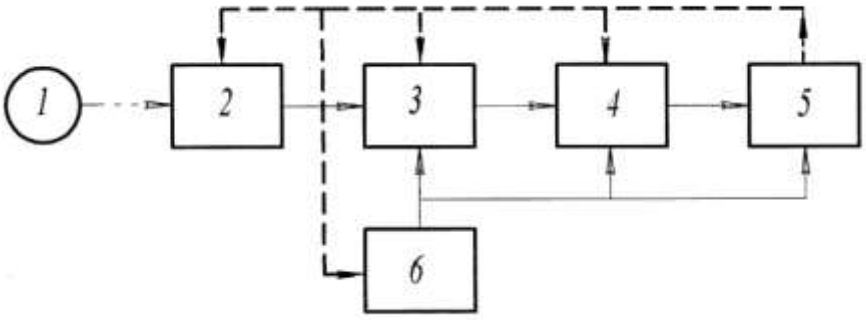


Рисунок 3.7 – Функціональна схема традиційного електромеханічного приводу з пружними кінематичними пристроями [25]

На схемі основною лінією показано механічний зв’язок, пунктирною лінією – механічний зворотний зв’язок (силовий вплив навантаження), штрих-пунктирною лінією показано електричний зв’язок елементів. В такому приводі електричний керуючий сигнал від системи управління 1 подається на перетворюючий елемент 2, який на виході дає механічне переміщення вхідної жорсткої ланки 3, яка в свою чергу за рахунок кінематичних зв’язків перетворюється пружними передавальними ланками 4 (пружні важелі, різні

пружини, нитки тощо) в рух вихідної жорсткої ланки 5. У таких пружних пристроях перетворення траєкторії руху здійснюється також за рахунок механічних зв’язків з пружними напрямними ланками 6 (пружні паралелограми, пружні шарніри тощо), які здійснюють розв’язку рухомих елементів ланцюга з нерухомим ланкою (корпусом) і задану форму траєкторії руху вихідної ланки. Опір механічного навантаження, тобто механічний зворотний зв’язок від вихідної жорсткої ланки 5 передається на всі механічні ланки 2, 3, 4, 6, змінюючи траєкторію руху цих ланок.

При використанні БПП, які служать не тільки для перетворювання електричної енергії в механічну, а й грають роль пружних кінематичних ланок, кінематичні ланцюги таких приводів істотно скорочуються. Функціональна схема такого нового пружного пристрою з БПП показана на рисунку 3.8 (зображення механічних і електричних зв’язків аналогічно попередньої схеми).

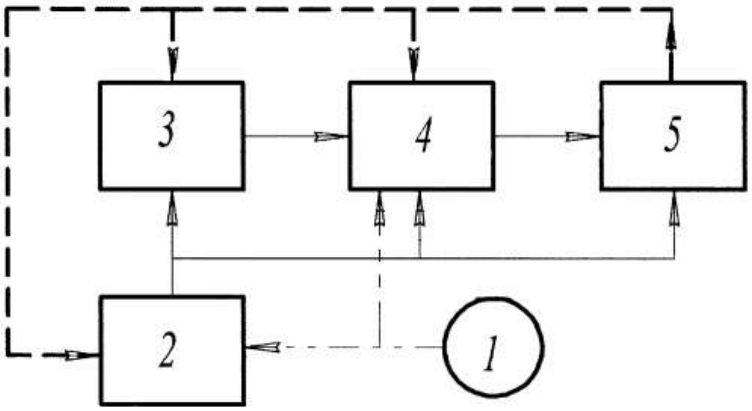


Рисунок 3.8 – Функціональна схема електромеханічного приводу з пружними біморфними п’єзоелектричними ланками [25]

Тут електричний сигнал від системи управління 1 надходить одночасно на БПП, які служать як пружними напрямними ланками 2, так і пружними передавальними ланками 4, які задають траєкторію руху жорсткої вихідної ланки 5. Рух від пружних ланок з БПП 2 через проміжні жорсткі ланки 3 передається до ланок з БПП 4 і від них – до вихідної ланки 5. Механічний вплив навантаження на відміну від попередньої схеми здійснюється на перетворюючі елементи 2, 3,

4, а також на вихідну ланку 5. При механічному зовнішньому впливі система управління може коригувати траєкторії руху всіх пружних ланок окремо, тому що вони одночасно є перетворювачами. Порівнюючи ці дві функціональні схеми, можна зробити висновок про те, що схема з БПП має коротший кінематичний ланцюг і великі функціональні можливості для корекції та управління траєкторією вихідної ланки.

Досить часто постає завдання отримати не просто велике переміщення вихідної ланки, а й отримати його рух з певною траєкторією.

Тут мова йде про коливальний (хитальний) рух вихідної ланки пружних пристроїв з малими переміщеннями через обмеження за деформаціями. Кінематика пружних пристроїв, що дозволяють здійснювати рух вихідної ланки по жорстко визначеній траєкторії, давно і глибоко досліджена і широко застосовується в приладах та мікроманіпуляційних системах [26].

Можна виділити основні кінематичні ланцюги модулів мікропереміщень, які передають вихідній ланці пристрою певну траєкторію руху. Ці кінематичні ланцюги можуть містити як перетворюючі елементи (п’єзоелектричні перетворювачі), так і пасивні пружні елементи. Вихідна ланка може відтворювати рухи по траєкторіях наступних типів: прямолінійним і криволінійним (з постійною і керованою формою траєкторії). Криволінійні траєкторії можуть проходити по лінії (по дузі в площині або по гвинтовій лінії), а також по замкнутій лінії. Зокрема траєкторії можуть бути круговими, еліптичними, «8»-подібними тощо. Ці траєкторії постійної форми, а також змінюються від циклу до циклу траєкторії, можуть бути відтворені тільки за допомогою системи управління, яка задає не тільки значення переміщення, але і форму траєкторії. Для забезпечення керованої форми траєкторій руху точок вихідної ланки необхідно мати кінематичні ланцюги з двома і більше ступенями вільності. До них можна віднести пружні шарніри з двома ступенями вільності, а також послідовно з’єднані пружні кінематичні елементи – напрямні і пружні шарніри з одним ступенем вільності.

3.3 Обґрунтування вибору кінематики модулів мікропереміщень з біморфними п’єзоприводами

3.3.1 Активні пружні направляючі

Підвищення компактності, точності відпрацювання рухів в приладах та інших пристроях може бути досягнуто за рахунок скорочення кінематичного ланцюга від перетворювача енергії до вихідної ланки. Для цієї мети як не можна краще підходять п’єзоперетворювачі, і особливо біморфний. БПП є одночасно перетворюючими і пружними елементами. Вони компактні і легко вбудовуються в самі кінематичні ланки, тим самим кінематичний ланцюг коротшає з усіма витікаючими наслідками [26, 27].

Напрямні механізми поступального руху побудовані за схемою пружного паралелограма, переміщення якого реалізуються пружними плоскими ресорами. Для отримання поступального руху за допомогою активних пружних напрямних (АПН) з БПП, на них подають напругу, при якому БПП згинаються і відповідно згинаються ресори в цілому, формуючи траєкторію вихідної ланки (рис. 3.9).

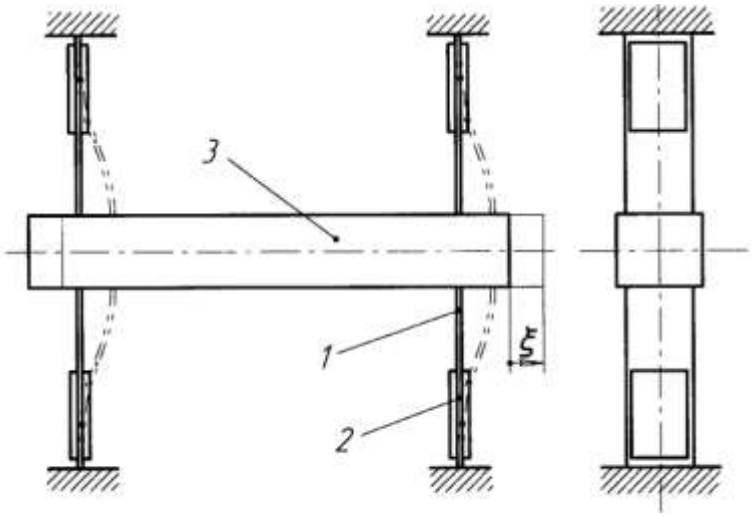


Рисунок 3.9 – Найпростіший тип АПН [26]

Кінематичний ланцюг пружного активного паралелограма дозволяє вихідній ланці здійснювати поступальний рух, якщо ресори 1 з БПП 2 розташовані симетрично відносно осі ланки 3.

Використання квазіпаралелограма (рис. 3.10) з круглими перфорованими ресорами 1, на яких встановлені БПП 2, збільшує жорсткість системи в цілому за несиметричного навантаження, що діє на вихідну ланку 3.

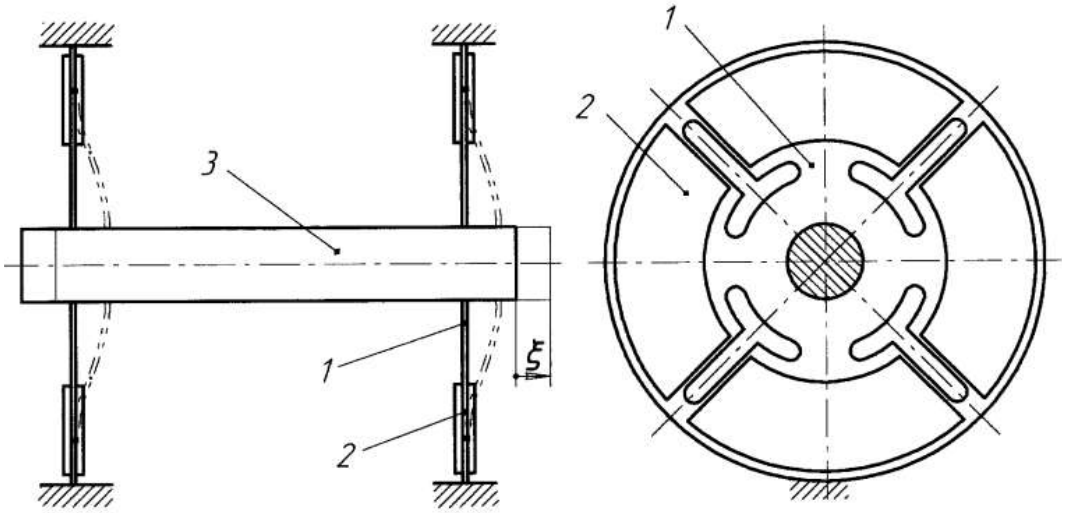


Рисунок 3.10 – Активний квазіпаралелограм [27]

Механізм активного пружного паралелограма може бути використаний для отримання ефекту вібротранспортування. Віброживильник мініатюрних деталей (рис. 3.11), що працює на частотах 50-150 Гц, складається з основи 1, на якій похило закріплені плоскі ресори 2 з БПП, і лотка 3 з деталями 4, які переміщаються [27].

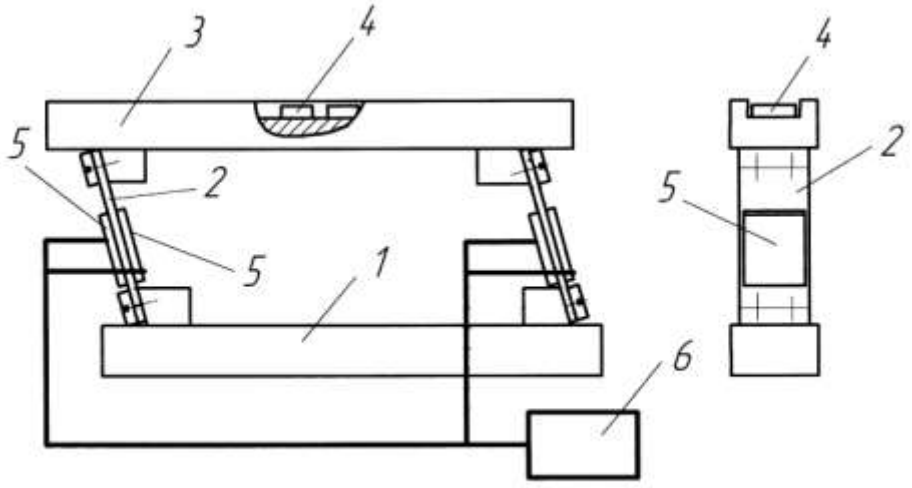


Рисунок 3.11 – П’єзоелектричний віброживильник [27]

Змінна напруга подається до п’єзоелектричних елементів 5 від генератора 6. Через велику довжину ресор з БПП простір між ресорами вільний. Можлива установка під лотком бункера для деталей, який кріпиться до самого лотка. У цьому випадку подача деталей на лоток з бункера може здійснюватися за допомогою імпульсів стисненого повітря [25].

Для зменшення вертикальних габаритів можуть бути застосовані пружні напрямні, у яких БПП розташовані уздовж робочої ланки. Пристрій (рис. 3.12, а) [28] містить основу 1 з двома плоскими ресорами 2 малої довжини і лоток 3 з деталями 4, які переміщаються. Паралельно лотка на серединах ресор 2 встановлена ресора 5 з БПП 6 і 7, до яких підключений генератор гармонійної напруги 8. У цьому випадку вигин ресор 2 формується за рахунок передачі згинального моменту з боку ресори 5 з БПП 6 і 7 (рис. 3.12, б). Вертикальні габарити такого пристрою приблизно в два рази нижче, ніж віброживильника, зображеного на рисунку 3.11.

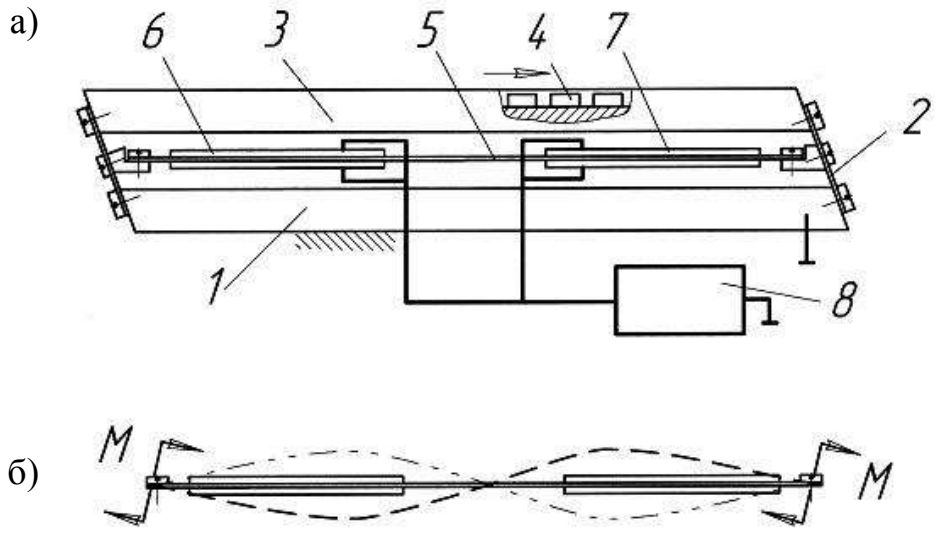


Рисунок 3.12 – П’єзоелектричний віброживильник малої висоти (а) і схема вигину ресори (б) [28]

Описана вище пружна схема з активною ресорою, яка розташована уздовж вихідної ланки, може бути застосована в якості компактного модуля поступальних рухів вихідної ланки мікроманіпулятора. Такий пристрій

(рис. 3.13) складається з циліндричного корпусу 1, всередині якого на тонких дротових ресорах 2 і 3 закріплені циліндрична платформа 4 і чотири плоскі ресори 5 і 6. На кожній з них є БПП 7 і 8. Таким чином, кожна ресора 5 встановлена на двох парах дротових ресор 2, і кожна ресора 6 встановлена на двох парах дротових ресор 3, що проходять наскрізь корпусу 1. Вертикальні дротові ресори 2 і горизонтальні дротові ресори 3 зсунуті один відносно одного на малу відстань, щоб вони не перетиналися в одній точці на платформі 4.

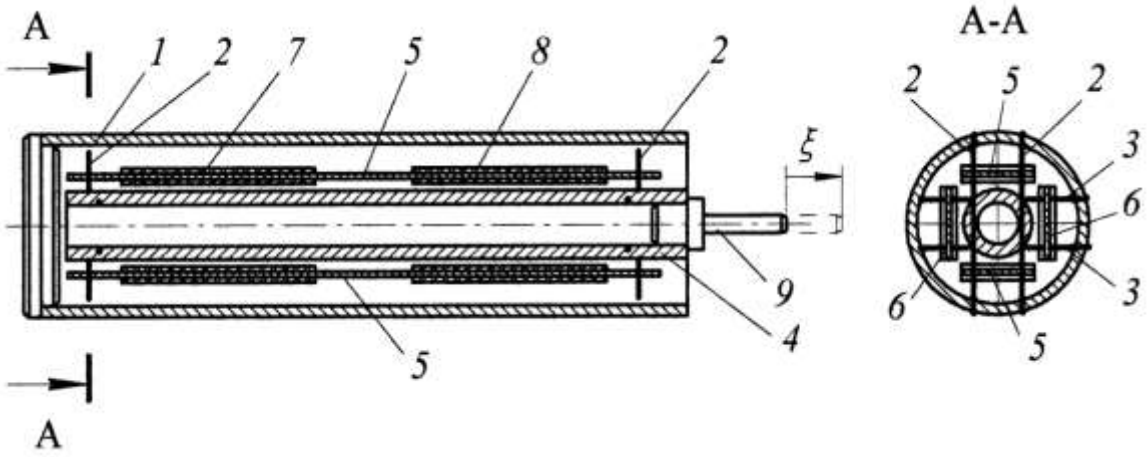


Рисунок 3.13 – Модуль поступальних переміщень
на базі чотирьох ресор з БПП [28]

При подачі напруги на всі БПП 7 і 8 ресори 5 і 6 згинаються так само, як показано на рисунку 3.12, (б). В результаті цього вихідна ланка 9 разом з платформою 3 поступально переміщається уздовж осі на відстань ξ. Така пружна система відрізняється підвищеною жорсткістю і силою, що розвивається п’єзоприводом.

Наведений модуль поступальних переміщень на базі чотирьох ресор з БПП з габаритами Ø8х60 мм має хід 0,2 мм при блокуючій силі 2 Н.

3.3.2 Активні пружні шарніри

Для створення гойдаючого руху відносно нерухомої точки можуть бути використані активні пружні шарніри (АПШ) з БПП [29]. Вони також виконують дві функції – функцію задання кінематики руху і функцію перетворення

електричної енергії в механічну. Тут важливо, що через малу масу і розміри БПП його інерційні характеристики мало впливають на динаміку кінцевої ланки (на противагу пристрою, що має електромеханічний привід і передачу). За аналогією з пружними шарнірами АПШ володіють такими ж перевагами. Крім того, установка БПП на самому шарнірі різко скорочує кінематичний ланцюг від перетворювача енергії до вихідної ланки і відповідно зменшує габарити пристрою в цілому, а також збільшує його швидкодію і точність відпрацювання кутового переміщення.

При гойдальному русі жорсткої ланки за рахунок АПШ для багатьох задач приладобудування важливо мати фіксовану точку гойдання, тобто миттєвий центр швидкостей жорсткої ланки повинен залишатися постійним (наприклад, для дзеркальних скануючих пристроїв). Розглянемо деякі схемні рішення АПШ. Найбільш простий варіант АПШ (рис. 3.14) являє собою защемлену з двох сторін плоску ресору 1 з закріпленими на ній симетрично двома БПП 2 і 3.

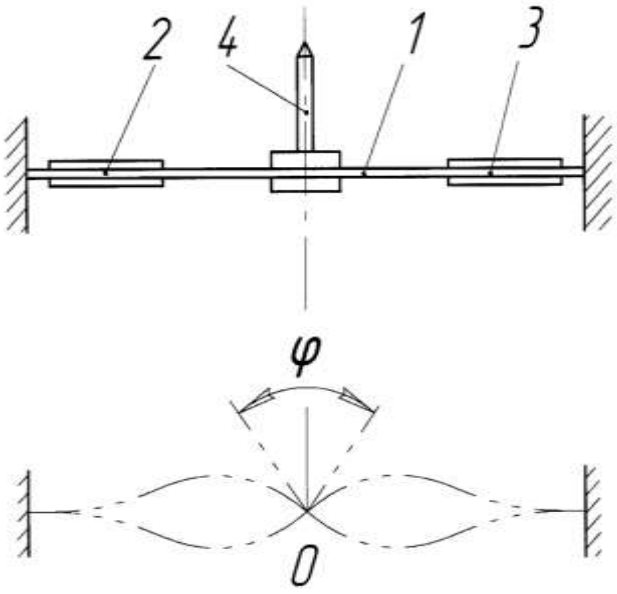


Рисунок 3.14 – Найпростіший п’єзоелектричний АПШ [29]

Посередині ресори встановлено жорстку вихідну ланку (стержень) 4. При подачі напруги на БПП 2 і 3 із зсувом фаз 180^0 вигин ресори матиме хвилеподібну форму. Точка О на ресорі залишається нерухомою, а ланка 4 буде здійснювати

гойдальний рух, що навколо точки О. Кут повороту такого пристрою φ становить зазвичай частки градуса. Порушуючи коливання другої форми згинальної моди в даній пружній системі, можна домогтися значних амплітуд кутових зсувів ланки 4 ($\varphi = 2^0$-5^0). Якщо необхідно пристрій, в якому кінцева ланка може мати змінну вісь хитання, то ця задача легко вирішується за рахунок різниці напруги, що подається на БПП 2 і 3. Залежно від співвідношення амплітуд електричних напруг, що подаються на БПП 2 і 3, координата миттєвого центру швидкостей О жорсткої ланки 4 може змінюватися за програмою. В цьому випадку система має два ступені вільності. При своїй простоті дані варіанти АПШ мають серйозний недолік – через малу жорсткість ресори в напрямку, перпендикулярному її площині, можуть виникнути паразитні коливання точки О, що призведе до спонтанних зсувів осі гойдання шарніра.

Для усунення зазначеного недоліку можливе хрестоподібне з’єднання двох ресор в точці О – центрі гойдання (рис. 3.15). Дві ресори 1 і 2 з БПП 3 мають загальну центральну частину в точці О. У цьому випадку жорсткість системи в напрямку, перпендикулярному площині ресор, стає високою. Як недолік можна відзначити збільшення габаритів в порівнянні з першим варіантом.

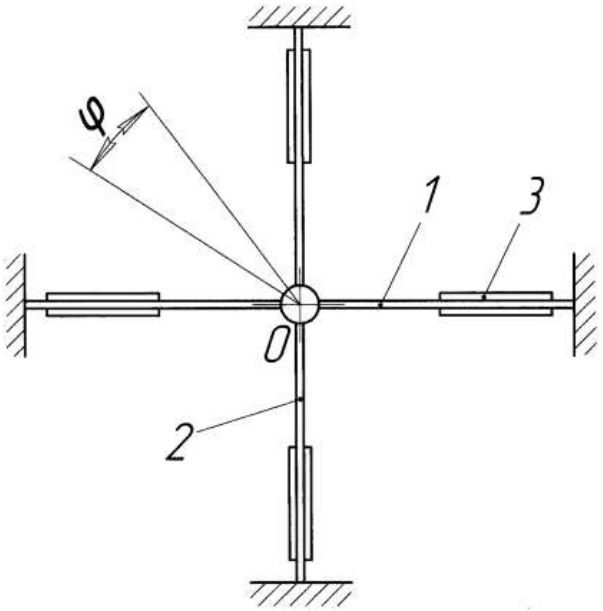


Рисунок 3.15 – Хрестоподібний АПШ [29]

Для збільшення кута повороту φ можна застосувати послідовне з'єднання таких АПШ (рис. 3.16). Пристрій має БПП 1 на ресорах 2, які зафіксовані на осях 3, кожна з яких встановлена в корпусі попереднього АПШ.

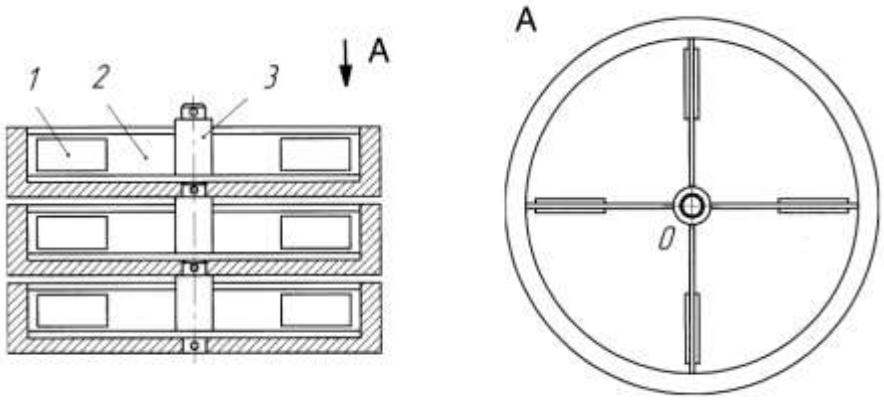


Рисунок 3.16 – Послідовне з'єднання АПШ [29]

Така конструкція має велику інерційність через масивні кільцеві корпуси АПШ, тому швидкодія пристрою низька.

У ряді випадків з конструктивних міркувань (коли місце знаходження осі гойдання зайнято) можуть бути рекомендовані асиметричні АПШ (рис. 3.17). Ресори 1 і 2, що мають БПП 3 і 4, закріплені на жорсткій ланці 5 під деяким кутом, що не дорівнює 0 і π. Центр гойдання знаходиться в миттєвому центрі швидкостей жорсткої ланки 5. Однак його рух може виявитися поза межами стійкості в динамічних режимах, і центр гойдання буде «гуляти».

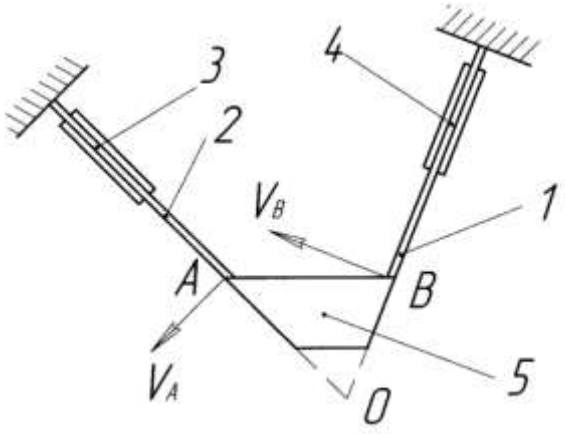


Рисунок 3.17 – Асиметричний АПШ [29]

Всі наведені АПШ мають незначні кути повороту, що пов’язано з кінематичними особливостями цих схем. На порядок можуть бути збільшені кути повороту за рахунок застосування відомої в приладобудуванні скрученої стрічки. Пристрій зі скрученої стрічкою і приводом від БПП дає виграш в компактності і в плавності руху вихідної ланки в порівнянні з електромеханічним приводом. Він складається з двох скручених стрічок 1 і 2, з’єднаних жорсткою ланкою 3 зі стержнем 4 (рис. 3.18).

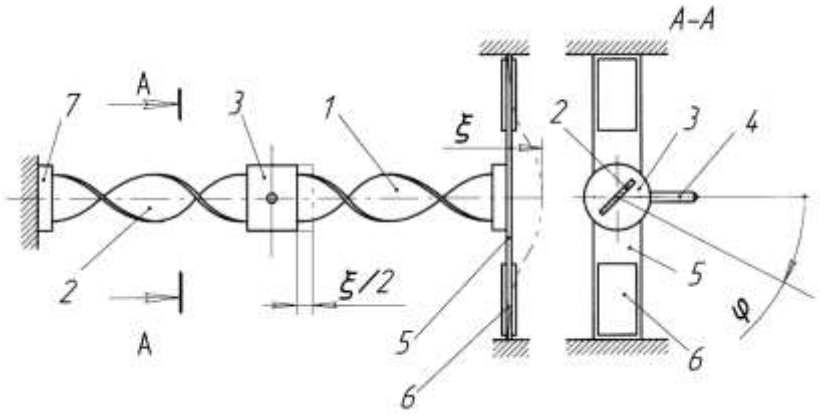


Рисунок 3.18 – Пристрій повороту зі скрученою стрічкою і БПП [29]

Один з кінців скрученої стрічки 1 закріплений в центральній частині ресори 5 з БПП 6. Скручена стрічка 2 зафіксована на основі 7. При подачі напруги на БПП центральна частина ресори 5 переміщається разом з кінцем стрічки 1 на відстань ξ. Стрічки починають розкручуватися і стержень 4 повертається на кут φ і зміщується на відстань $\xi/2$. Таким чином, вихідна ланка рухається по гвинтовій лінії. Щоб отримати рух по колу, необхідно застосувати симетричну схему, закріпивши другий кінець стрічки 2 на другий ресорі з БПП. При габаритах пристрою 100х60х10 мм можна отримати кут повороту близько 20^0. Такий пристрій має знижену жорсткістю на скручування, тому його доцільно використовувати в якості стрілочних покажчиків або в оптичних системах для сканування променя з малими швидкостями за допомогою хитного мініатюрного дзеркала, а також в ультразвукових медичних сканерах.

Рух вихідної ланки по гвинтовий лінії використовується для

вібротранспортування деталей в мініатюрних вібробункерах. Ці системи мають високу крутильну жорсткість і працюють зазвичай в близькорезонансних режимах. Такий п’єзоелектричний вібробункер (рис. 3.19) для мініатюрних деталей годинникової промисловості має на основі 1 три похилі ресори з БПП 2, які закріплені на платформі 3 з зовнішньою чашею, що має гвинтову доріжку для деталей [30]. При напрузі 100 В з частотою 150 Гц рух деталей здійснювалося зі швидкістю 4-5 мм/с, що цілком прийнятно для складальних автоматів.

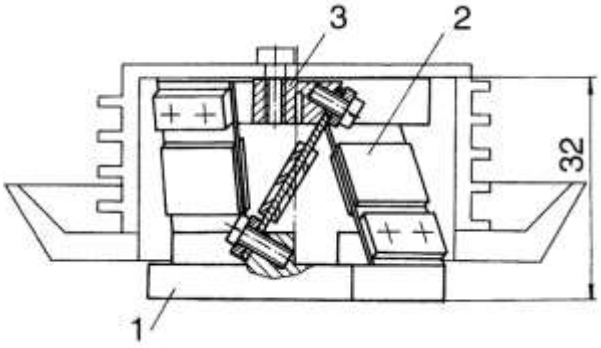


Рисунок 3.19 – П’єзоелектричний вібробункер [29]

Цей пристрій має досить великі габарити по висоті, тому що ресори розташовані під невеликим кутом до вертикалі виходячи з вимог вібротранспортування. Для зменшення габаритів (рис. 3.20) можливе горизонтальне розташування на основі 1 трьох похилих ресор 2 з БПП 3, які закріплені по периферії чаші 4 вібробункера на кутниках 5 [30].

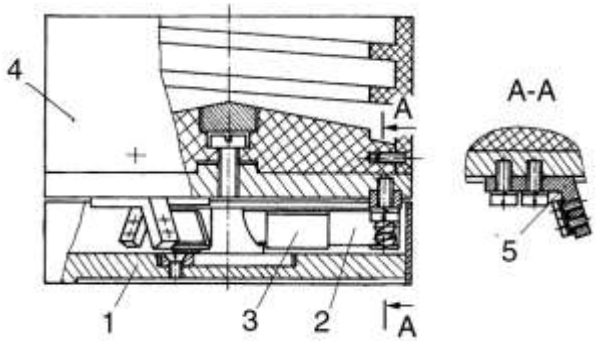


Рисунок 3.20 – П’єзоелектричний вібробункер з горизонтальними ресорами [30]

На відміну від поширених в приладобудуванні вібробункерів з електромагнітними вібраторами, п’єзоелектричні бункери мало чутливі до перекосу чаші і похибок виконання ресор, і напруга живлення може формуватися за допомогою комп’ютера.

Всі розглянуті вище модулі мікропереміщень з п’єзоприводами є пружними пристроями, що мають одну ступінь вільності. Змінюючи напругу, що подається на п’єзоперетворювачі, ми можемо змінювати амплітуду переміщення, а форма траєкторії вихідної ланки залишається незмінною.

3.3.3 Модулі мікропереміщення з керуючою траєкторія руху

Складні керовані траєкторії руху вихідної ланки використовуються в мікроманіпуляторах, призначених для біологічних досліджень і складання компонентів мікроелектроніки, в двокоординатних оптичних скануючих пристроях. Останнім часом керовані траєкторії здійснюються в прецизійних багатокоординатних п’єзоприводах і оптичних системах навігації супутників [31].

Залежно від розв’язуваних завдань вихідна ланка мікроманіпуляціних систем може мати від двох до шести ступенів вільності. Послідовне з’єднання модулів мікропереміщень з п’єзоприводами, кожен з яких має одну ступінь вільності, дає можливість управляти формою траєкторій руху точок об’єкту маніпулювання. Послідовно-паралельне з’єднання модулів мікроманіпулятора з трьома ступенями вільності (рис. 3.21) має підвищену жорсткість в порівнянні з мікроманіпулятором, в якому три БПП з’єднані послідовно під прямим кутом один до одного.

Розташовані в одній площині БПП 1 з одного боку консольно закріплені на основі, а з іншої – жорстко зв’язані з другою парою БПП 2, які паралельні один одному. З іншого боку БПП 2 зв’язані з жорсткою платформою 3, утворюючи АПП. У свою чергу, на протилежних гранях платформи 3 зафіксовані два інших паралельно розташованих БПП 4, кінці яких встановлені на другій жорсткій платформі 5, утворюючи другий АПП. На платформі 5 знаходиться вихідна ланка 6 (наприклад, мікроелектрод).

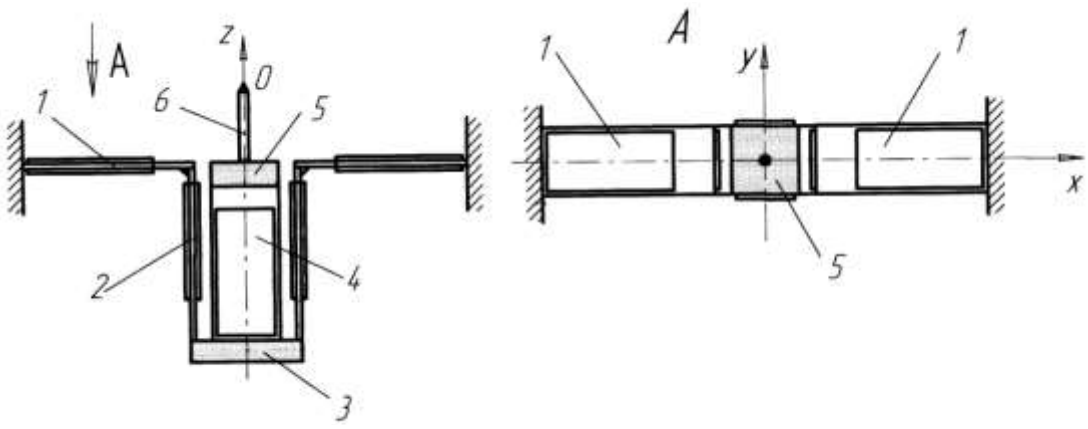


Рисунок 3.21 – Трьохкоординатний мікроманіпулятор з послідовно-паралельним з’єднанням біморфних п’єзоприводів [31]

При подачі напруги на БПП 1 точка О вихідної ланки здійснює переміщення уздовж осі *z*, при подачі напруги на БПП 2 точка О переміщається по осі *x*, а при подачі напруги на БПП 4 точка О рухається по осі *y*.

Управління просторовою траєкторією руху точок вихідної ланки може бути здійснено за допомогою паралельних кінематичних зв’язків між окремими БПП. У таких пристроях досягається велика компактність і жорсткість системи в порівнянні з традиційними схемами послідовного з’єднання модулів. В останні роки паралельні кінематичні зв’язки стали застосовувати в п’єзоелектричних скануючих пристроях, що забезпечують хитання променя в двох площинах. Заслуговують на увагу розробки компанії Microvision [30], в яких п’єзоелектричні двокоординатні сканери використовуються для отримання зображення безпосередньо на сітківці ока (Retinal Scanning Display). Сама сітківка ока спостерігача стає безпосередньо екраном, на якому за допомогою малопотужних напівпровідникових лазерів відтворюється кольорове зображення з роздільною здатністю 5 мкм. Такі відеосистеми, виконані у вигляді шолома або окулярів, набувають поширення в мікрохірургії, в авіації і мобільному зв’язку.

Принцип дії двокоординатного сканера досить простий: мініатюрне дзеркало Ø4 мм прикріплюється в центрі хрестоподібного біморфного п’єзоелектричного перетворювача, на елементи якого подається змінна напруга [30]. Дзеркало в такому випадку може мати кутове переміщення в двох

площинах. Як кінематичний елемент, таку пружну систему можна віднести до активних пружних сферичних шарнірів.

Для збільшення кута сканування, що еквівалентно зменшенню габаритів пристрою або збільшення області сканування, пропонується наступна схема сканера (рис. 3.22) [31]. На чотирьох плоских металевих ресорах 1 встановлені п’єзокерамічні пластинки 2, які утворюють БПП. При подачі напруги вони згинаються і передають згинальні моменти на дзеркало 3 через пружні стержні 4. В результаті цього жорстке дзеркало 3 повертається в площині дії моментів.

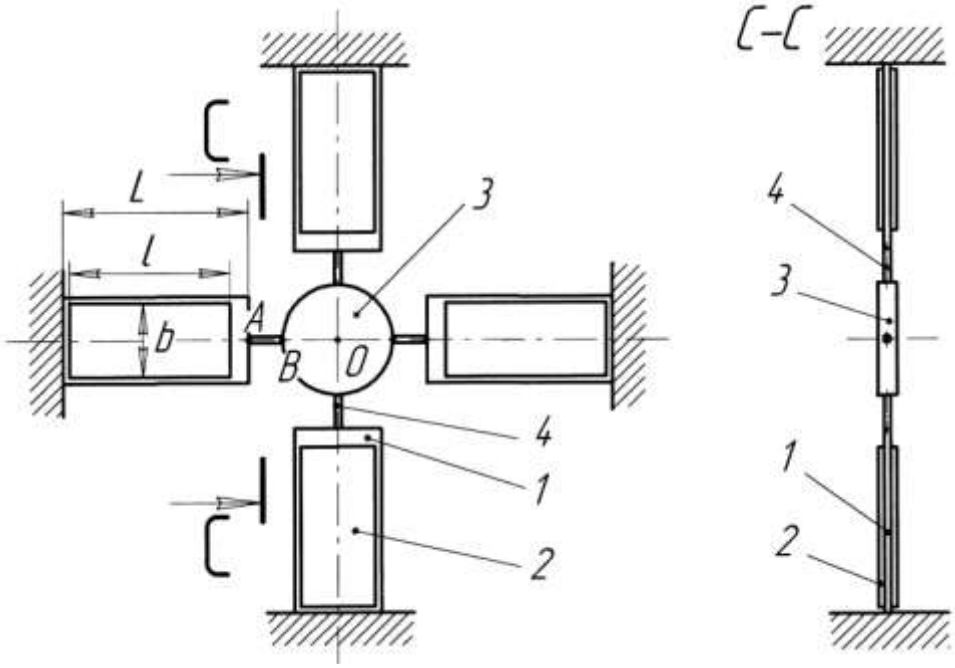


Рисунок 3.22 – Багатокоординатна маніпуляційна система з БПП [31]

Резонансний режим роботи п’єзоприводу сканера має на увазі гармонійну залежність кута гойдання дзеркала від часу, тому система відтворення зображення повинна мати елемент компресії передачі даних, що залежить від поточного кута нахилу дзеркала.

Наведена схема паралельного з’єднання чотирьох БПП дозволяє вихідній ланці (дзеркало 3) мати три ступені вільності: хитання навколо двох осей і поступальне переміщення в напрямку осі.

Якщо вихідна ланка СМП відчуває підвищені механічні навантаження, то

можна підвищити жорсткість пристрої за схемою на рисунку 3.22, ввівши паралельні ланки з БПП в кожну з чотирьох плечей зазначеної трикоординатної пружної системи [31]. У мікроманіпуляторі (рис. 3.23) на основі 1 закріплені ресори 2 з БПП 3, зв’язані з хрестоподібною ресорою 4. У центрі ресори 4 встановлена вихідна ланка 5, що має на циліндричній частині різьбу. Положення вихідної ланки 5 регулюється її поворотом відносно гайок 6, одна з яких припаяна до ресори 4. На вихідній ланці 5 встановлена також гайка 7, положення якої визначає співвідношення між власними частотами системи. Отвори 8 в ресорах 2 служать для зниження жорсткості ресор. Таке технічне рішення СМП дозволяє ефективно працювати як в резонансному режимі з великими амплітудами, так і в режимі точних переміщень з керованими траєкторіями при відносно великих навантаженнях на вихідну ланку.

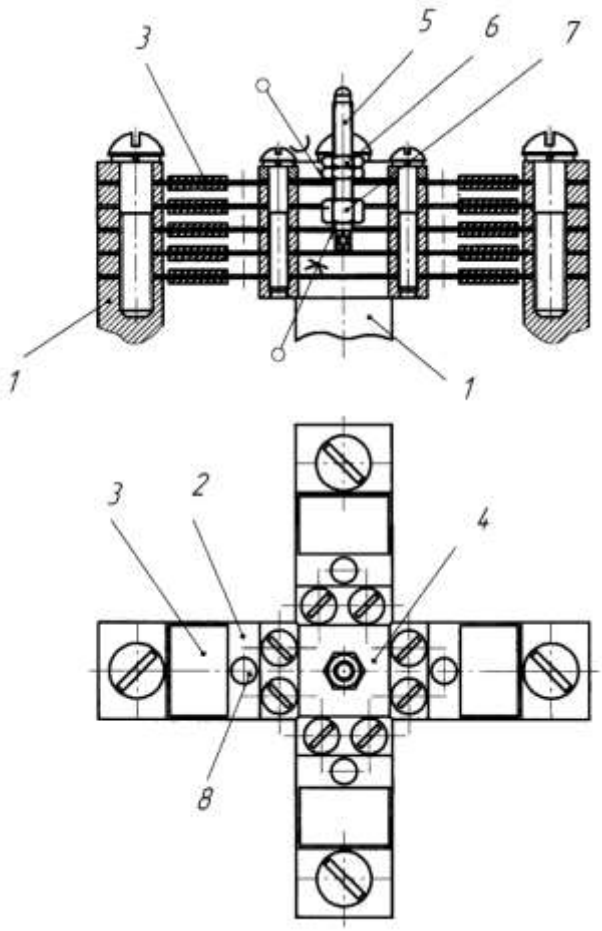


Рисунок 3.23 – Трьохкоординатний мікроманіпулятор з посиленою схемою [31]

Для мікроманіпуляторів, призначених для автоматичного складання МЕМС, а також для операцій на клітинному рівні в біології, є потреба в модулях, що мають до шести ступенів вільності. Такі модулі мікропереміщень можуть бути створені на базі механізму платформи Стюарта. Ці мехатронні багатокоординатні пристрої мають стержневу конструкцію з шістьма приводами поступального переміщення. У сучасному машинобудуванні технологічні машини такого типу з кульково-гвинтовими передачами (верстати, координатно-вимірювальні машини, роботи) отримали назву гексапод.

Пропонується шестикоординатний мікромеханічний модуль з п’єзоприводами (рис. 3.24), що складається з основи 1, на якій за допомогою пружних шарнірів 2 встановлені шість модулів поступального руху 3 на базі чотирьох ресор з БПП (рис. 3.13).

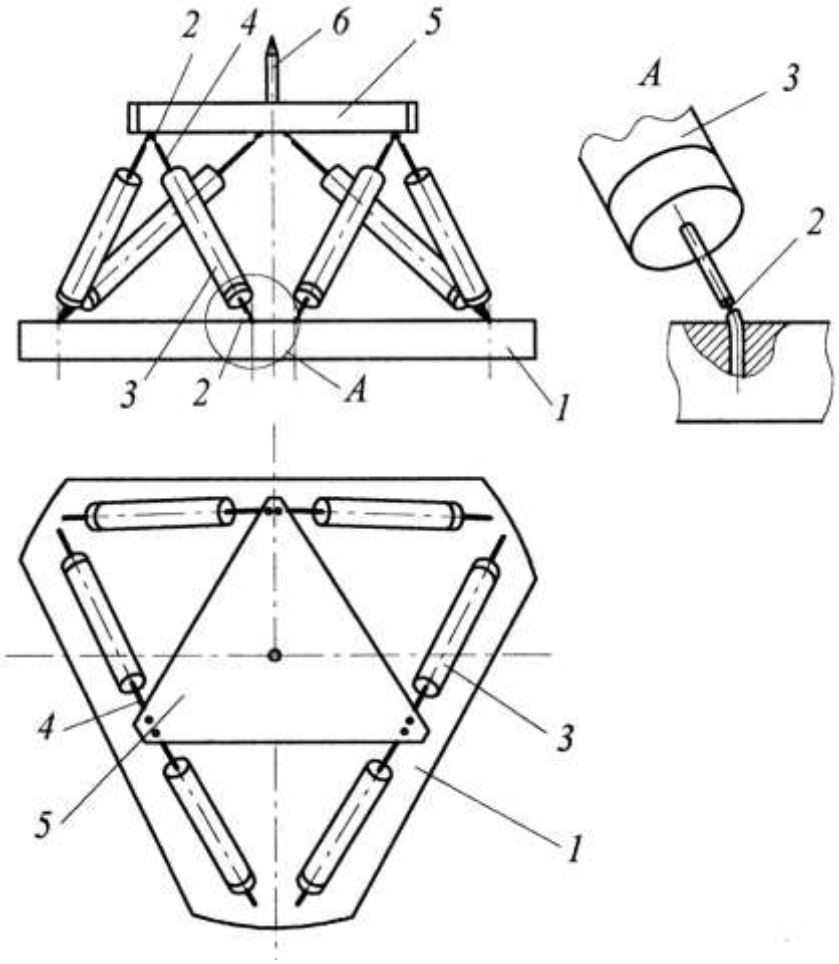


Рисунок 3.24 – Шестикоординатний мікромеханічний модуль [31]

Вихідні ланки 4 цих модулів за допомогою пружних шарнірів встановлені на рухомій платформі 5 з робочим органом 6. Керуючи переміщенням вихідних ланок 4, можна забезпечити просторове переміщення робочого органу 6 по шести координатах (три обертальних і три поступальних).

Основними перевагами гексаподного мікромеханічного модуля є:

– висока точність переміщень, що забезпечується підвищеною жорсткістю всіх шести модулів поступального руху;

– поліпшені масогабаритні характеристики внаслідок зменшення числа елементів кінематичного ланцюга;

– висока ступінь уніфікації мехатронних вузлів, що забезпечує технологічність виготовлення і конструктивну гнучкість.

Використовуючи модулі з двома ступенями вільності, можна створити вібраційні п’єзоприводи обертання сфери по трьох осях [31]. Основним приводним елементом такого пристрою може служити БПП з ресорою, аналогічний АПШ, показаному на рисунку 3.15. Зазвичай в п’єзодвигунах такий елемент працює в резонансних режимах. Якщо ресора з БПП збуджується на першій власній частоті згинальних коливань f_1, то вихідна ланка (штовхач) буде здійснювати коливальний рух по прямолінійній траєкторії, як показано на рисунку 3.25, (а). При порушенні коливань на другій власній частоті f_2 вихідна ланка буде здійснювати гойдаючий рух (рис. 3.25, б). Якщо цю коливальну систему налаштувати таким чином, що $f_1 / f_2 = 2$, і подати на БПП бігармонічну напругу цих частот, то кінець вихідної ланки буде рухатися за 8-подібною траєкторією.

а) б)

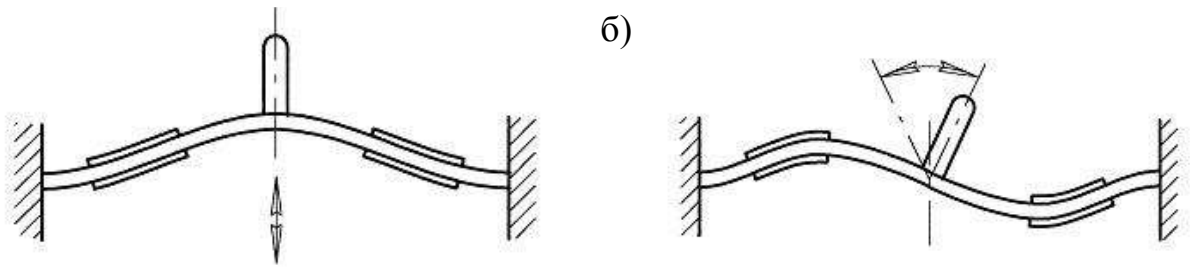


Рисунок 3.25 – Перша (а) і друга (б) моди згинальних коливань БПП [31]

Така траєкторія руху дозволяє здійснювати односпрямований рух об’єкта, який має контакт з штовхачем з проковзуванням. Однак домогтися шляхом розрахунків виконання даного співвідношення частот досить важко. Тому в конструкцію вводиться додатковий регулювальний елемент – маса, розташована на стержні і яка має можливість фіксуватися на різній відстані h від осі гойдання (аналогічно системі, показаній на рисунку 3.23). Основна ідея полягає в тому, що h не впливає на значення f_1, (впливає тільки сама маса), але на значення f_2 – впливає пропорційно значенню h. Таким чином, регулюючи положення маси, можна підганяти частоту f_2 до необхідного співвідношенню власних частот [31].

На рисунку 3.26 показана конструктивна схема експериментального багатокоординатного сферичного вібродвигуна для навігаційної системи супутника, що забезпечує точне позиціонування кулі за трьома кутовими координатами.

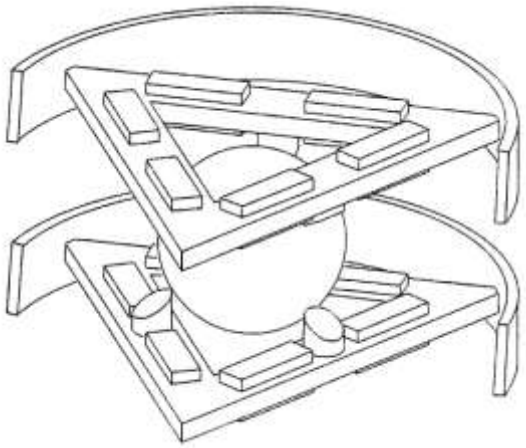


Рисунок 3.26 – Багатокоординатний сферичний п’єзодвигун [31]

Куля в статиці спирається на три точки – три штовхача, рух кожного з яких може управлятися незалежно. Зверху куля притискається такою ж системою вібраторів з штовхачами [31]. За допомогою програмованого режиму коливань нижньої і верхньої частини вібродвигуна куля може повертатися навколо трьох осей. На кулі встановлюється мініатюрна відеокамера, що здійснює стеження за положенням космічного об’єкта відносно зірок.

3.4 Розробка схеми функціонування і дослідження п’єзоелектричного захвату з мікропозиціонуванням

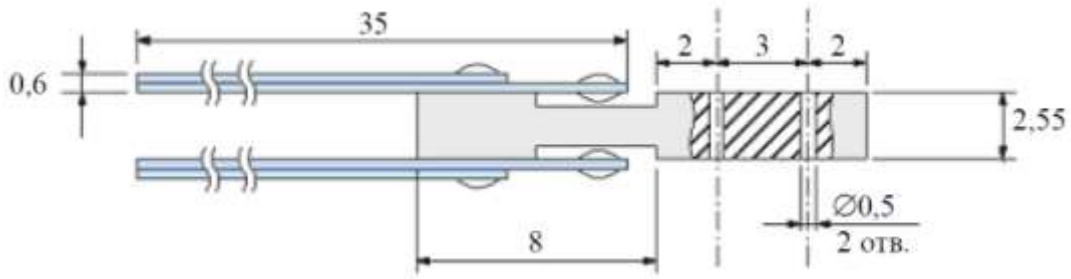
Для складання і монтажу мікропристроїв затребувані мікроманіпулятори і мікрозахватні пристрої, які можуть забезпечити високу точність і надійність позиціонування мікродеталей. Проблема розробки мехатронних систем мікропереміщень актуальна, так як потрібно створювати нові високоточні автоматичні пристрої в областях мікроробототехніки, мікробіології та мікроелектроніки. Крім того, залишається актуальною задача вібротранспортування і подачі до робочого органу маніпулятора орієнтованих міні і мікродеталей.

Виходячи з вимог, що пред’являються до автоматичного обладнання для установки поверхнево монтованих електронних компонентів (ПМК) на друковані плати, для точного позиціонування ПМК відносно провідних доріжок в якості модулів точних переміщень є ефективним використання біморфних п’єзоелектричних актюаторів (БПА). Це пов’язано з тим, що БПА можуть здійснювати переміщення робочих органів з похибкою до часток мікрометра при максимальному переміщенні до 1-2 мм без додаткових механічних передавальних пристроїв.

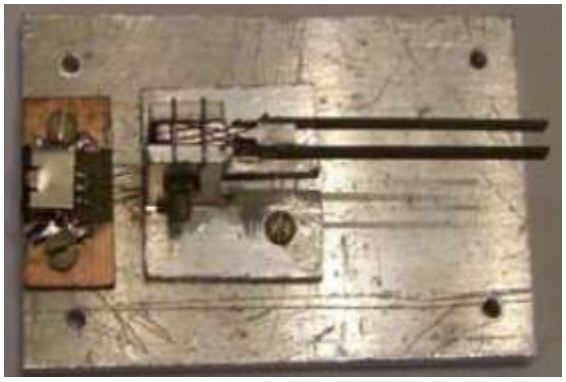
Крім того, використання як зворотного, так і прямого п’єзоефекту дозволяє використовувати одні і ті ж п’єзокерамічні елементи БПА в якості приводу і датчика механічних величин одночасно. Такий мехатронний підхід до створення мініатюрних маніпуляційних систем є найбільш ефективним, так як в цьому випадку механічна частина маніпуляційних пристроїв спрощується, а характеристики управління поліпшуються [32].

Для складання і монтажу мікропристроїв необхідні мікроманіпулятори і мікрозахватні пристрої, що дозволяють забезпечити високу точність і надійність позиціонування мікродеталей. Для вирішення цих завдань розроблено п’єзоелектричний захват [33], конструкція якого представлена на рисунку 3.27, (а).

а)



б)



в)

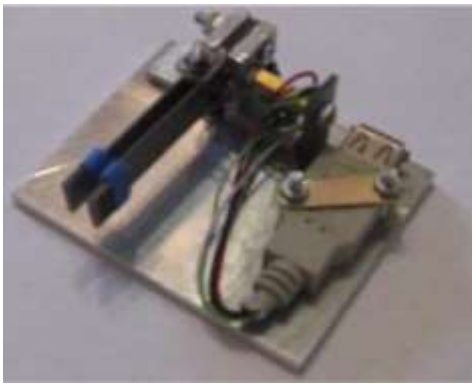


Рисунок 3.27 – П’єзоелектричний захват з мікропозиціонуванням [33]

Завдяки зміні керуючої напруги на п’єзоелектричних пальцях захвату, можна реалізувати точні переміщення захопленої деталі, не застосовуючи додатковий привід.

Для виготовлення захвату були використані два біморфних п’єзоелектричних актюатори (БПА), розташовані паралельно і з’єднані з несучою алюмінієвої консоллю. В експериментальних моделях (рис. 3.27, б, в) несуча консоль встановлена на нерухому платформу, в робочих же зразках вона повинна бути встановлена на маніпулятор.

Технічні характеристики п’єзоелектричного захвату, в якому використані два БПА, представлені нижче в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Характеристики п’єзоелектричного захвату [33]

Розміри біморфа, мм	35 × 2,5 × 0,6
Маса біморфа, г	0,5
Ємність, нФ	13
Керуюча напруга, В	± 100
Прогин кінця кожного пальця, мм	± 0,5
Робоча довжина пальця, мм	28
Максимальне зусилля, Н	0,12
Відстань між пальцями, мм	2,25
Маса захвату, г	2

На рисунку 3.28 представлено схему підключення п’єзоелектричного захвату з мікропозиціонуванням. Керуюча напруга *U* подається через подільники на резисторах *R*1-*R*2 і *R*3-*R*4 на кожен палець захвату окремо. Залежно від співвідношення напруг, що подаються на пальці захвату, деталь може бути або затиснута по осі захвату, або зміщена в захваті вліво або вправо від осі захвату.

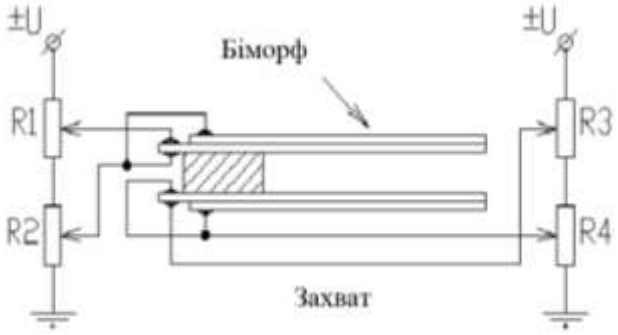


Рисунок 3.28 – Схема підключення п’єзоелектричного захвату з мікропозиціонуванням [33]

Концепція використання п’єзоелектричного захвату для мікропозиціонування деталі схематично показана на рисунку 3.29: грубі переміщення реалізуються маніпулятором, а точні мікропереміщення деталі при установці її на точку монтування здійснюються захватом.

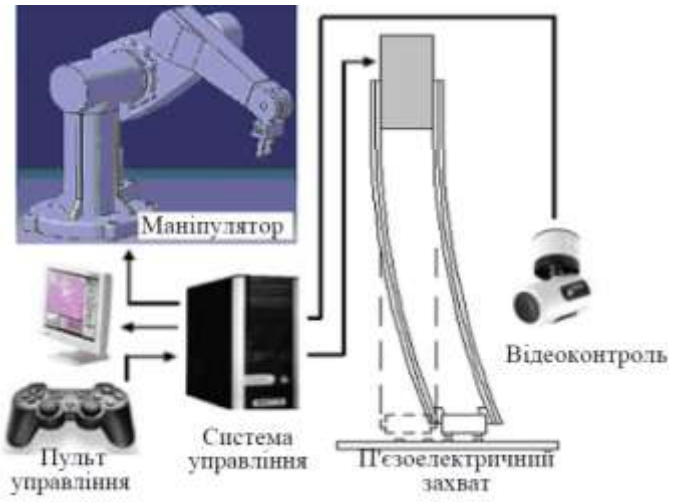


Рисунок 3.29 – Маніпулятор з п’єзоелектричним захватом для мікропозиціонування [33]

Залежно від співвідношення напруги, що подається на пальці захвату, деталь може бути затиснута по осі захвату, або зміщена в захваті вліво або вправо від неї. Для контролю мікропереміщень пропонується використовувати відеокамеру.

Для проведення досліджень був зібраний лабораторний стенд (рис. 3.30), що складається з наступних основних частин:

– блок живлення Б5-60 на 140 В;

– двоканальний блок управління напругою;

– мікроскоп МБС-10 з підсвічуванням;

– відеокамера: мікротеленасадка МТН-222 для мікроскопа МБС-10;

– монітор аналоговий чорно-білий для мікроскопа МБС-10;

– 2 мультиметра DT-830B;

– п’єзоелектричний мікрозахват;

– двоканальний USB PC осцилограф PCSU 1000 (на рисунку не показаний).

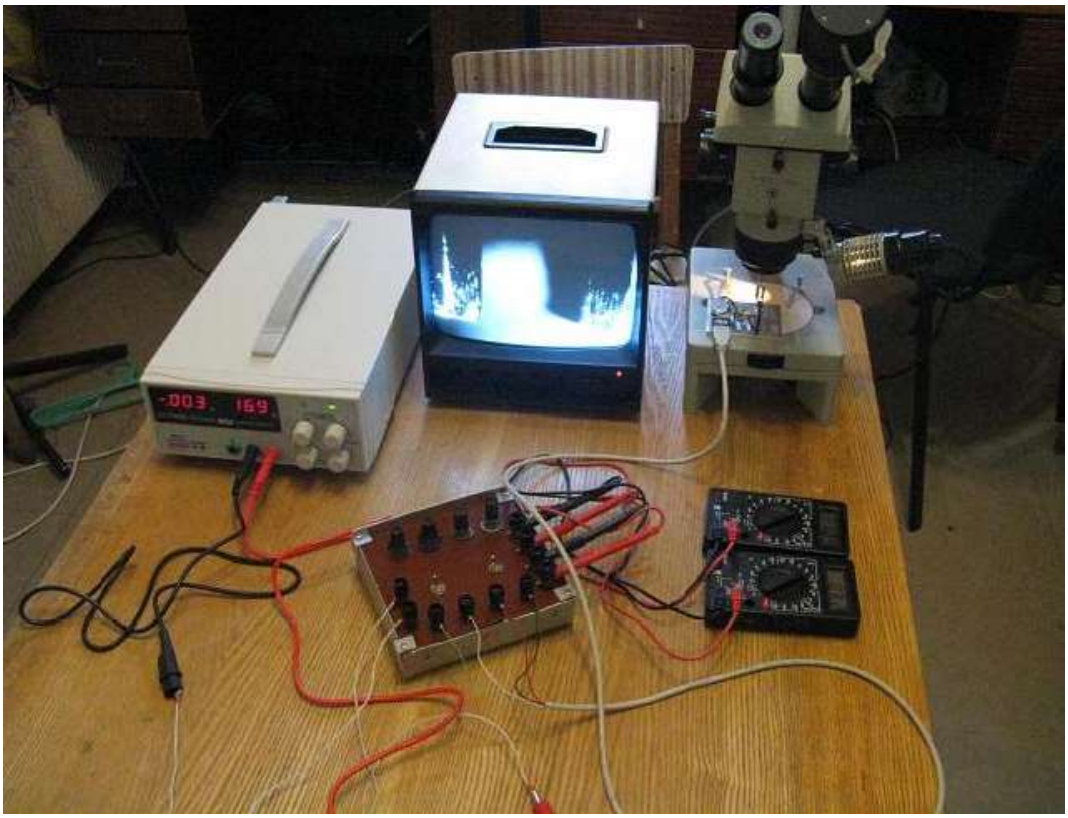


Рисунок 3.30 – Лабораторний стенд для дослідження п’єзоелектричних мікрозахватів [33]

Блок-схема експериментального стенду показана на рисунку 3.31. У кожному з проведених дослідів захват встановлювався у фокус мікроскопа, потім підключався до пристрою управління напругою і блоку живлення [33].

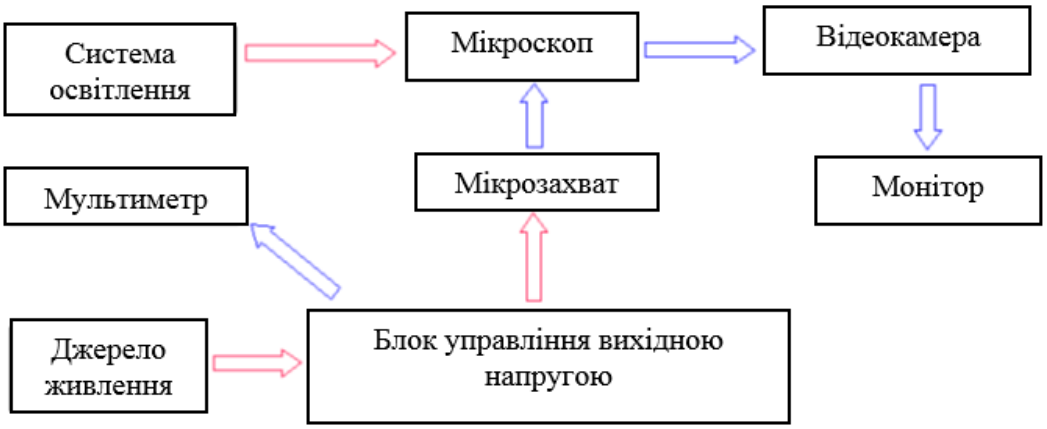


Рисунок 3.31 – Блок-схема стенду для дослідження п’єзозахвату [33]

При різних напругах пальці захвату формують різні згинальні деформації, зображення яких з мікроскопа за допомогою відеокамери надходять на екран монітора, де, знаючи кратність збільшення зображення, за допомогою штангенциркуля визначається переміщення.

З модулів мікропереміщень з БПП можуть бути складені послідовні ланцюги в СМП. В такому випадку вихідна ланка одержує декілька ступенів вільності. Паралельне з’єднання ресор з БПП дозволяє підвищити силу приводу на виході. Крім того, таке з’єднання БПП дозволяє створити компактні багатокоординатні мікромеханічні модулі з паралельними кінематичними ланцюгами.

Для складання і монтажу мікропристроїв потрібні мікроманіпулятори, оснащені мікрозахватними пристроями, які можуть забезпечити високу точність і надійність позиціонування мікродеталей. Основна ідея полягає в тому, що захват, завдяки особливостям конструкції і управління, крім функції захоплення і утримання деталі може реалізувати точні переміщення захопленої деталі, що відрізняє його від робочого органу з традиційною роздільною схемою

захоплення і позиціонування. Для здійснення цієї ідеї запропонований захват, в якому використані два БПП, розташовані паралельно і з'єднані з корпусом (рис. 3.32).

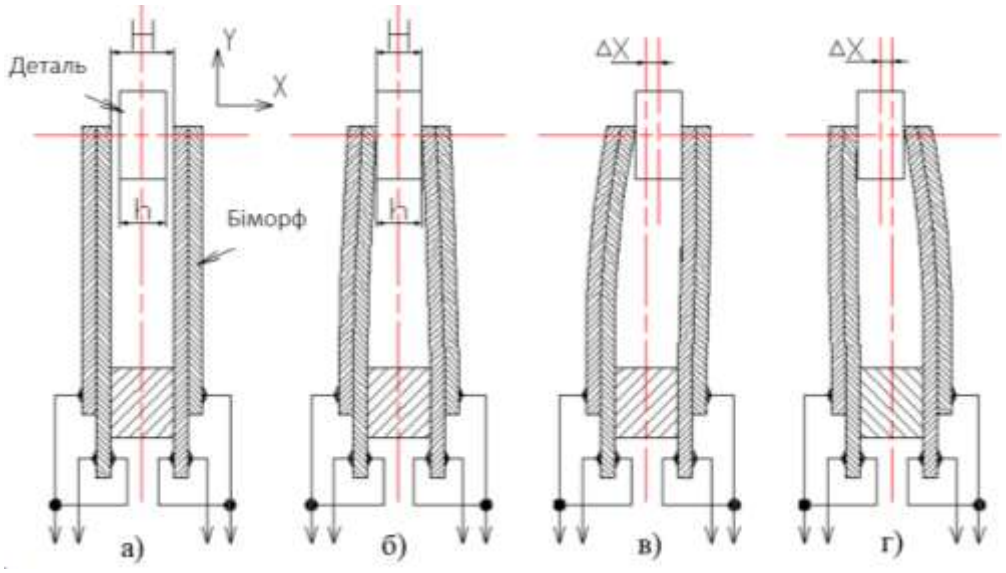


Рисунок 3.32 – Принцип роботи захвату з мікропозиціонуванням:
а) деталь не затиснута $H>h$; б) захоплення деталі $H = h$;
в) мікропозиціонування вправо; г) мікропозиціонування вліво [33]

Чутливість захвату, що дозволяє визначати силу затиску деталі в захваті, здійснюється за допомогою зміни резонансу губок захвату при контакті з деталлю, яка затискається. Керуюча напруга подається на центральний електрод кожного п'єзобіморфа. Інша частина захвату заземлена. Кожна губка захвату управляється окремо від свого джерела напруги. У початковий момент подається однакова напруга на обидві губки захвату (рис. 3.32, б), і деталь затискається. Потім напруга на одній губці зменшується, а на іншій – збільшується. Таким чином, можна отримати зміщення центру деталі або вправо (рис. 3.32, в), або вліво (рис. 3.32, г).

Таким чином, застосування БПП в якості приводів мікропереміщень дозволяє вкоротити кінематичні ланцюги модулів внаслідок того, що БПП є як елементами перетворення електричної енергії в механічну, так і елементами пружних передавальних механізмів.

Залежність мікропозиціонування деталі, затиснутої в захваті, показана на рисунку 3.33, (а), а залежність переміщення кінця вільного пальця захвату від напруги показана на рисунку 3.33, (б). При взятті деталі в початковий момент захват підводиться до деталі таким чином, що між губками захвату і деталлю залишається зазор близько 0,25 мм на сторону. Далі подається однакова напруга 70 В на обидва БПА, в результаті чого вони згинаються назустріч один одному, і деталь затискається. Далі, змінюючи окремо напруги на кожній губці, домагаються зміни зміщення центру деталі відносно корпусу захвату в ту чи іншу сторону. Ступінчастий характер прямої (1) і зворотної гілки (2) залежності (рис. 3.33, а) пояснюється послідовною, почерговою зміною напруги на п’єзобіморфах.

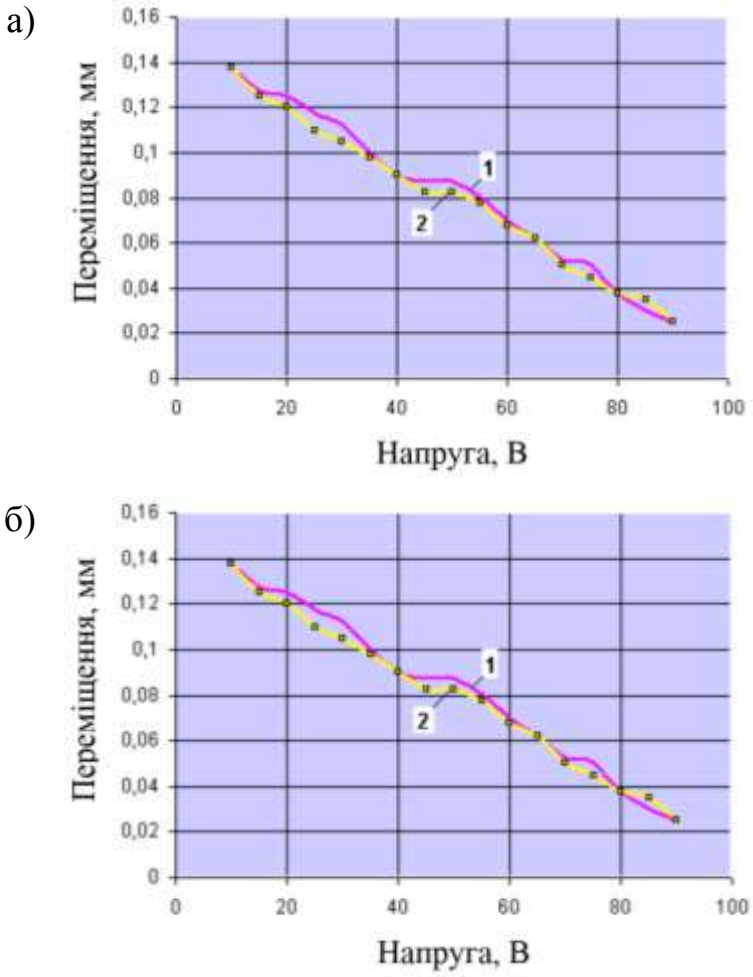


Рисунок 3.33 – Залежності переміщення пальців захвату від напруги [33]:
а – мікропозиціонування деталі, затиснутої в захват; б – кінця вільного пальця

Порівнюючи залежність переміщення губки захвату без деталі від напруги (рис. 3.33, б) з залежністю переміщення центру затиснутої деталі від напруги (рис. 3.33, а), можна зробити висновок, що вплив гістерезису в другому випадку зменшується приблизно на порядок. Таке зменшення гістерезису дозволяє спростити систему управління мікропозиціонування і підвищити його точність. Мікропереміщення деталі по осі X (рис. 3.32) експериментальним п'єзозахватом дає можливість реалізувати мікропозиціонування деталі з похибкою 5 мкм при мінімально можливому кроці напруги 1 В.

У досліджуваному захваті використовуються п'єзоелектричні біморфи, в яких проявляється як прямий, так і зворотний п'єзоефект, тому для чутливості захвату можуть бути запропоновані наступні схеми роботи:

1. Один з пальців включається як датчик в ланцюг автогенератора, і вимірюється зміна частоти автоколивань від зовнішнього впливу при наявності деталі і без неї.

2. Один з пальців захвату включається в якості приводу, а другий виступає в ролі датчика, потім вимірюються АЧХ, напруга датчика при коливанні пальця приводу з деталлю і без неї.

3. Один з пальців захвату включається в якості приводу, а другий – в ланцюг генератора синусоїдального сигналу на резонансної частоті, і визначається зміна сили струму в ланцюзі пальця датчика при затиснутій деталі і планомірному збільшенні тиску на деталь з боку пальця приводу.

4. Один з пальців захвату, обраний в якості датчика, підключається як п'єзотрансформатор до генератора синусоїдального сигналу і до осцилографа, і визначається зміна коефіцієнта передачі в залежності від тиску на палець захвату.

Для визначення можливості чутливості і оцінки швидкодії захвату в режимі затиснення деталі і мікропозиціонування важливо на початковому етапі дослідити АЧХ вільних пальців захвату і при мікропозиціонуванні затиснутою в захваті деталі (рис. 3.34).

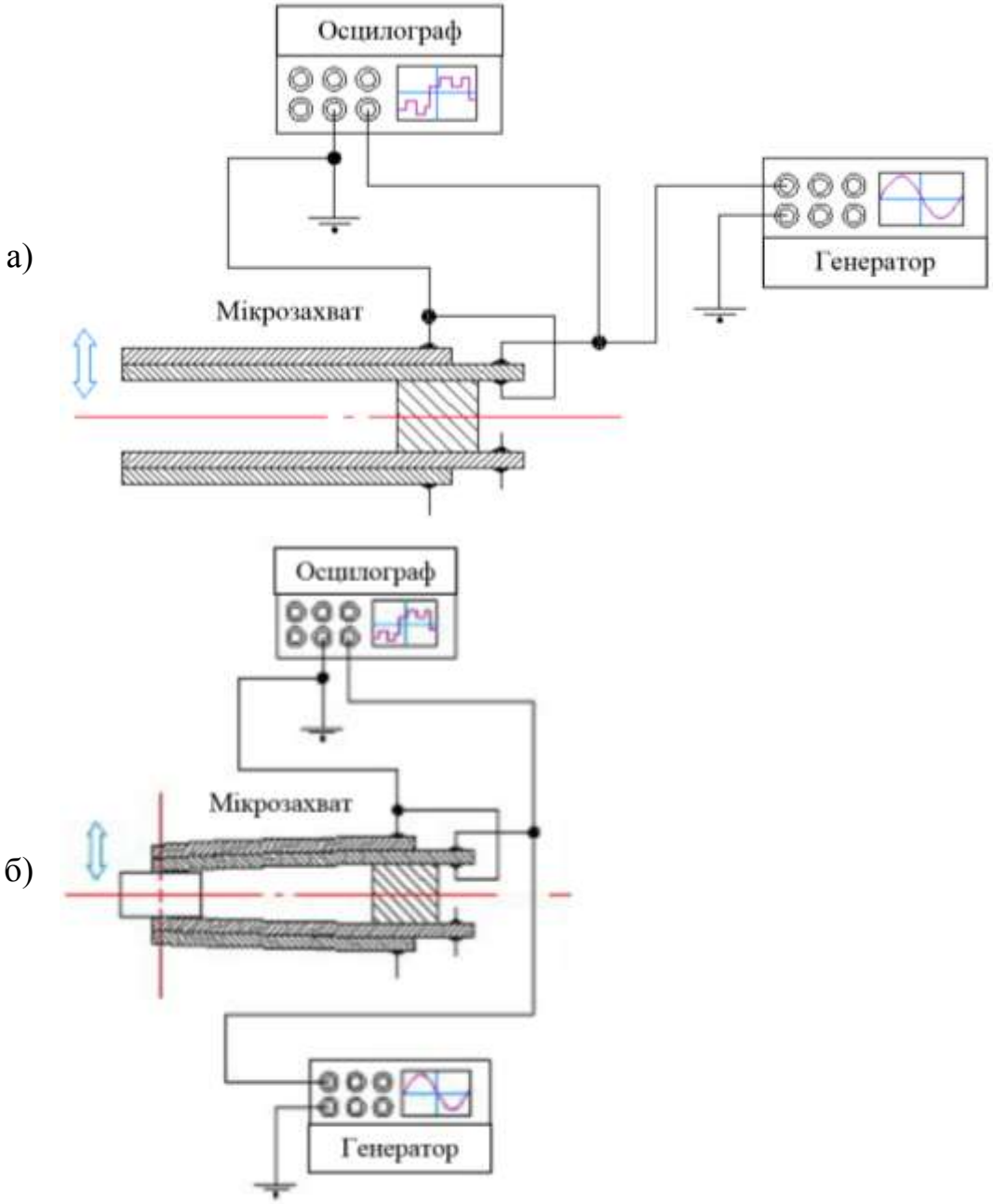


Рисунок 3.34 – Схема визначення АЧХ пальця захвату [33]:
а – без деталі, б – з деталлю

З порівняння графіків (рис. 3.35) випливає висновок про те, що під час захоплення деталі резонанс зміщується в бік зниження частоти, локальний мінімум розширюється і виявляється в інтервалі частот від 200 до 250 Гц. Зменшується амплітуда резонансних коливань в 3,5 рази. Таким чином, за зміщенням резонансної частоти і зменшенням амплітуди коливань можна судити про наявність деталі в захваті.

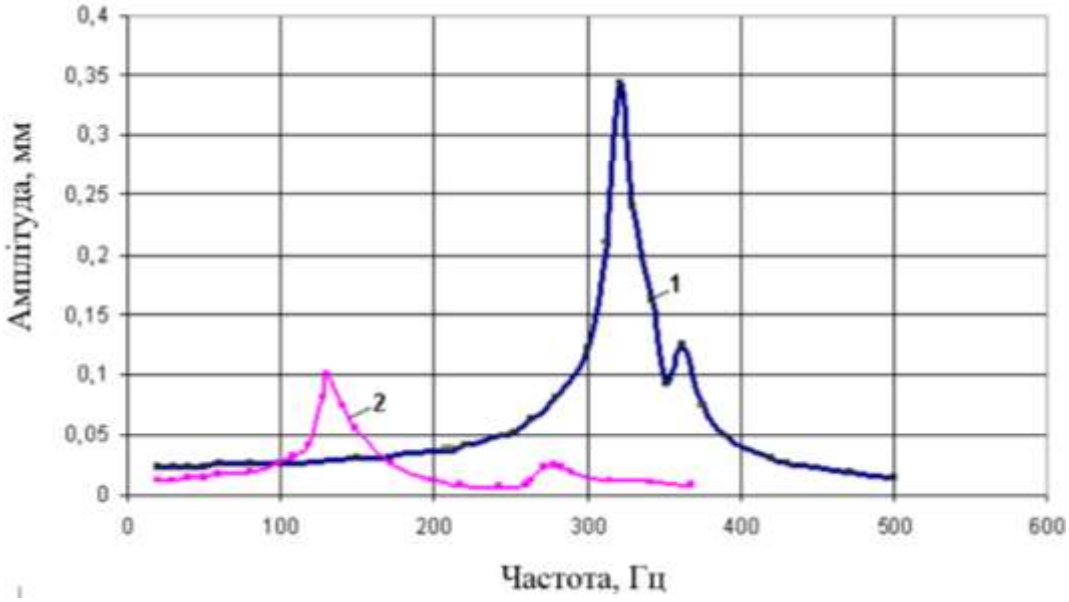


Рисунок 3.35 – Графіки АЧХ для вільного пальця захвату (1) і для захвату з деталлю (2) [33]

Для схеми, при якій один палець є приводом коливань, а другий палець служить датчиком (рис. 3.36), отримані АЧХ при відсутності і наявності деталі (рис. 3.37).

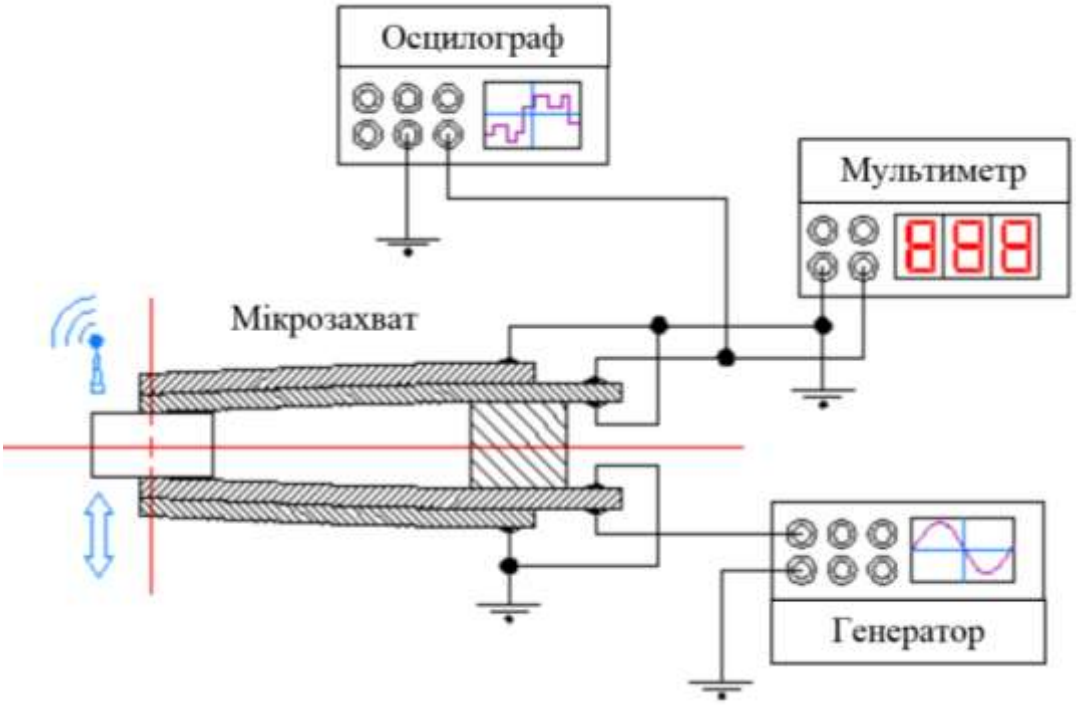


Рисунок 3.36 – Визначення резонансу датчика для захвату з деталлю [33]

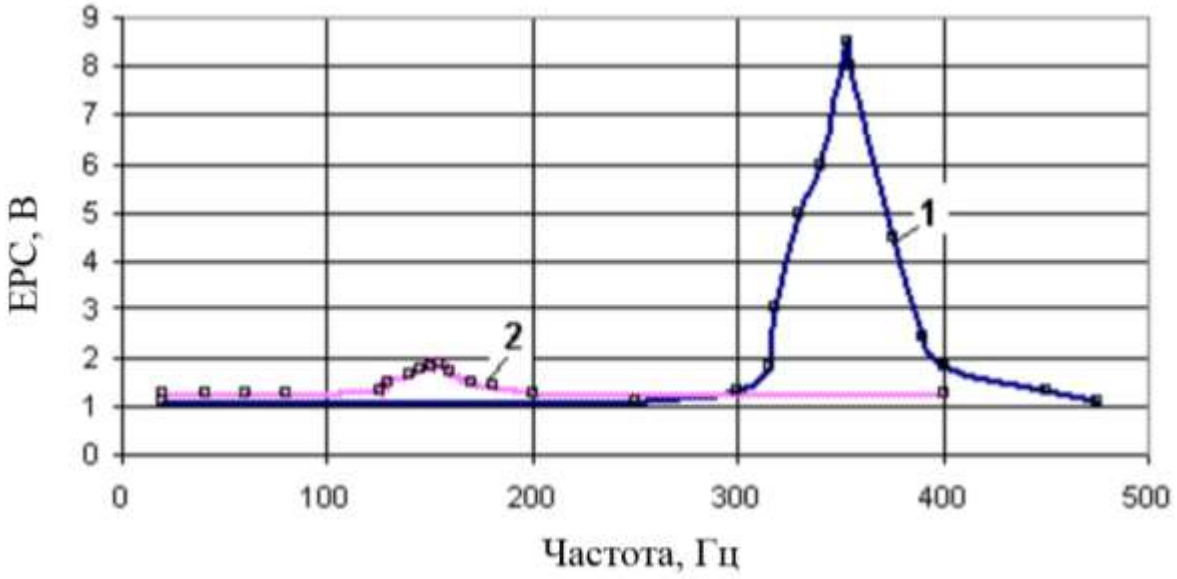


Рисунок 3.37 – Напруга на датчику вільного пальця захвату (1) і захвату з деталлю (2) [33]

Порівняння графіків (рис. 3.35, 3.37) показує, що зміщення резонансу в розглянутих випадках близькі (близько 200 Гц). Тому чутливість за схемою (рис. 3.37) може бути використано на практиці.

Розроблений п’єзоелектричний захват реалізує нову ідею про використання єдиного приводу для захоплення, чутливості і мікропозиціонування деталі, що відрізняє пропонований захват від традиційних схем захватних пристроїв з роздільними системами чутливості і точного позиціонування на базі додаткових приводів. Такий підхід дозволяє підвищити точність і надійність системи, завдяки відсутності передавальних ланцюгів, а також значно спростити конструкцію мікроманіпулятора.

Для п’єзозахвату, який служить робочим органом автоматичної системи для установки ПМК на друковані плати, необхідно мати зворотний зв’язок за силою стиснення деталі і за моментом взяття деталі відповідно. Наявність такої інформації дає можливість збільшення швидкодії системи і підвищує надійність взяття деталі.

3.5 Моделювання динаміки пружних систем з біморфними п’єзоелектричними перетворювачами

Для отримання поступального руху платформи АПП (рис. 3.38) за допомогою двох БПП 1, встановлених на ресорах 2, на них подають напругу від джерела 4, при якому БПП згинаються і відповідно вигинаються ресори в цілому, формуючи рух платформи 3. Переміщення платформи можна вимірювати мікрометром 5, або оптичними чи індуктивними датчиками [34].

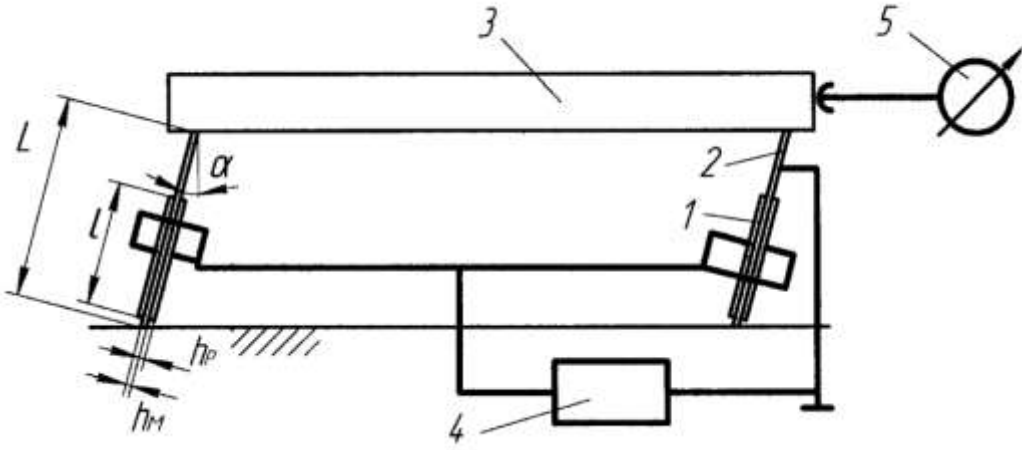


Рисунок 3.38 – Схема визначення переміщень платформи АПП [34]

АПП може використовуватися в якості приводу мікропереміщень в квазістатичному режимі, а також в якості віброживильника мініатюрних деталей [30]. В останньому випадку однонапрямлений рух деталей уздовж платформи здійснюється при куті нахилу ресор $\alpha = 15^0\text{-}30^0$. Розглянемо поведінку АПП при змінних в часі зовнішніх керуючих і збурюючих впливах. Для вирішення цього завдання скористаємося теорією передавальних функцій лінійних систем, так як в розглянутому діапазоні напруг, які подаються прямий і зворотний п’єзоефекти лінійні.

Електричну схему пружної системи з БПП, що працює в режимі приводу мікропереміщень в області частот до нижчої власної частоти, можна представити таким чином (рис. 3.39. а, б).

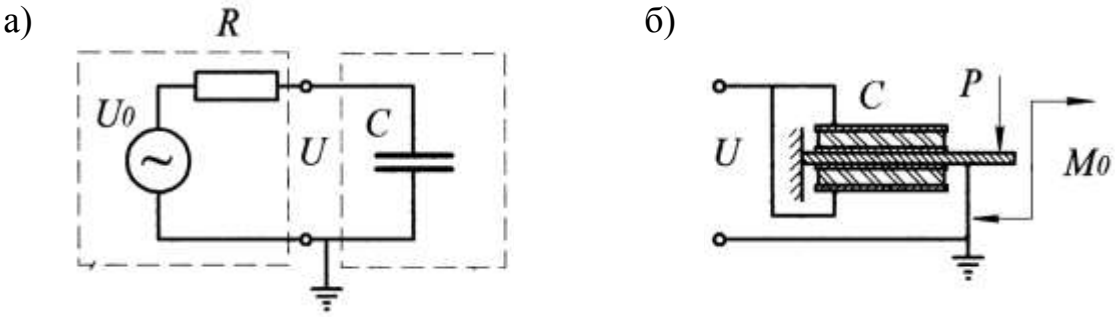


Рисунок 3.39 – Схема пружної системи з БПП із зовнішнім навантаженням:
а – принципова електрична схема, б – електромеханічна схема [30]

Тут керуюча напругу U_0, що подається на БПП від джерела змінної напруги 1, трансформується за рахунок інтегруючого RC-ланцюга в напругу U, яка безпосередньо перетворюється у переміщення кінця п’єзоелектричного біморфа 2 за рахунок зворотного п’єзоефекту. Активний опір R є вихідним опором джерела живлення пружної системи з БПП. Електрична ємність C – ємність конденсатора, утвореного електродами п’єзокерамічних елементів, що утворюють біморф. У зв’язку з тим, що обидва п’єзоелементи електрично з’єднані паралельно, ємність біморфа визначається виразом (3.2):

$$C = 2\frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{h_P}, \tag{3.2}$$

де ε – відносна діелектрична проникність п’єзоелектричного середовища;

ε_0 – діелектрична проникність вакууму ($\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м);

S – площа електрода ($S = lb$);

h_P – товщина п’єзоелемента.

Зовнішніми навантаженнями пружної системи з БПП є сила P і момент M_0. Структурна схема модуля мікропереміщень з одним ступенем вільності визначається електричними, електромеханічними і механічними параметрами системи (рис. 3.40). Визначимо передавальну функцію системи з одним ступенем вільності з урахуванням внутрішніх втрат [35].

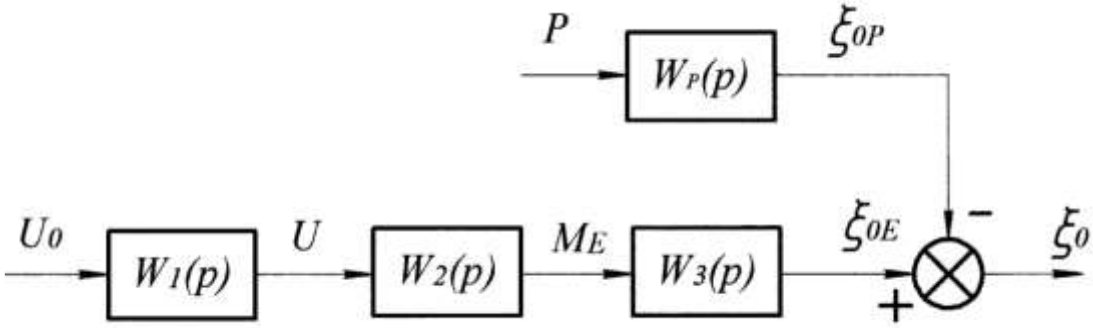


Рисунок 3.40 – Структурна схема пружної системи з БПП [35]

Вхідний керуючий вплив – це керована за законом $U_0(t)$ напруга, що знімається з джерела. Вихідний сигнал – це переміщення кінцевої ланки модуля мікропереміщень – $\xi_0(t)$. Збурюючий вплив – це змінні в часі сила навантаження P для АПП і момент навантаження M_0 – для АПШ. Виходячи зі структурної схеми, керуючий вплив трансформується в напрузі U на першій ланці структурної схеми, яка є електричною частиною системи «джерело напруги – БПП». Далі на другогій ланці, яка є перетворювачем електричної енергії в механічну, напруга трансформується в еквівалентний згинальний момент M_E за рахунок зворотного п’єзоефекту. Завдяки третій ланці (передавальний механізм) еквівалентний момент трансформується в переміщення кінцевої ланки ξ_{0E} за рахунок пружних елементів системи. Збурююча механічна дія P перетворюється в переміщення кінцевої ланки ξ_{0P} також за рахунок пружних елементів (для АПП), яке алгебраїчно складається на суматорі з ξ_{0E}. В результаті цього при одночасній дії керуючого і збурючого впливів кінцева ланка отримає переміщення (3.3):

$$\xi_0 = \xi_{0E} - \xi_{0P}. \tag{3.3}$$

Перша ланка (рис. 3.40) відображає електричну частину системи, друга ланка – електромеханічну частину системи і третя ланка механічну частину [35]. Передавальна функція першої ланки, що представляє собою аперіодичну ланку, має вигляд (3.4):

$$W_1(p) = \frac{1}{T_1 p + 1}, \tag{3.4}$$

де p – оператор Лапласа.

Постійна часу $\overline{T_1} = R\overline{C}$ є комплексною величиною, якщо враховувати електричні втрати в п'єзокераміці. У цьому випадку комплексна ємність буде представлена у вигляді (3.5):

$$\overline{C} = C\left(1 + j\frac{1}{Q_E}\right), \tag{3.5}$$

де Q_E – електрична добротність п'єзоелектричної кераміки, з якої виготовлений біморфний п'єзоперетворювач.

Електрична добротність визначається через тангенс діелектричних втрат виразом (3.6):

$$Q_E = \frac{1}{tg\delta}. \tag{3.6}$$

Специфіка БПП як перетворювача електричної енергії в механічну закладена в передавальній функції другої ланки, що являє собою безінерційну ланку. З урахуванням втрат вона має вигляд (3.7):

$$W_2(p) = \overline{k}_2, \tag{3.7}$$

де $\overline{k}_2$ – комплексний коефіцієнт перетворення. Його можна знайти з формули (3.8) для еквівалентного моменту, в якій еквівалентний момент є комплексною величиною:

$$\bar{k}_2 = \frac{\overline{M}_E}{U}. \tag{3.8}$$

У комплексному вигляді еквівалентні моменти можна розрахувати з урахуванням втрат в матеріалах п'єзокераміки та металевої ресори за формулою (3.9):

$$\overline{M}_E = \frac{3}{2} \cdot \frac{d_{31}\left[\left(h_P + \frac{h_M}{2}\right)^2 - \frac{h_M^2}{4}\right]U_0}{\left\{\overline{E}_M \bar{s}_{11}^E \frac{h_M^3}{8} + \left[\left(h_P + \frac{h_M}{2}\right)^3 - \frac{h_M^3}{4}\right]\right\} h_P \overline{\lambda}_B}, \tag{3.9}$$

де $\overline{E}_M = E_M\left(1 + j\frac{1}{Q_M}\right)$ – комплексний модуль пружності металу ресори;

$\overline{\lambda}_B = \frac{12}{b\left\{\overline{E}_M h_M^3 + 2\frac{h_P^3}{\bar{s}_{11}^E}\left[1 + 3\left(1 + \frac{h_M}{h_P}\right)^2\right]\right\}}$ – комплексна податливість перерізу біморфа;

$\bar{s}_{11}^E = s_{11}^E\left(1 + j\frac{1}{Q_P}\right)^{-1}$ – комплексна податливість п'єзокераміки;

d_{31} – п'єзомодуль;

h_M і h_P – товщина металевої ресори і п'єзоелектричного елемента відповідно;

b – ширина БПП;

Q_M – добротність матеріалу металевої ресори;

Q_P – механічна добротність п'єзокераміки.

Враховування добротності матеріалів дозволяє розрахувати параметри пружних систем в коливальному режимі, в тому числі при резонансі.

Передавальна функція третьої ланки, що представляє собою коливальну ланку, залежить від кінематики і механічних параметрів пружних елементів модуля мікропереміщень. Для визначення передавальної функції $W_3(p)$

розглянемо динамічну модель модуля мікропереміщень, де вихідним сигналом є лінійне переміщення ξ_0. Для АПП динамічна модель з зосередженими параметрами, приведена до однієї ресори, повинна має вигляд (3.10):

$$\frac{m}{n}\ddot{\xi}_0 + r\dot{\xi} + c_0\xi_0 = g_E M_E - g_P P, \tag{3.10}$$

де m – приведена маса рухомої платформи пружного паралелограма;

n – кількість ресор з БПП;

r – коефіцієнт опору;

c_0 – коефіцієнт жорсткості ресори;

g_E і g_P – коефіцієнти пропорційності.

Тут можна скористатися комплексним представленням пружних параметрів системи, тому останнє рівняння в комплексній формі має вигляд (3.11):

$$\frac{m}{n}\ddot{\bar{\xi}}_0 + \bar{c}_0\bar{\xi}_0 = \bar{g}_E M_E - \bar{g}_P P, \tag{3.11}$$

де $\bar{\xi}_0$ – комплексне переміщення кінцевої ланки.

Комплексний коефіцієнт жорсткості АПП визначається за формулою (3.12):

$$\bar{c}_0 = nL^{-3}\left\{\frac{\bar{\lambda}_B + (1-l_L)^3\bar{\Delta}}{3} - \frac{\left[\bar{\lambda}_B + (1-l_L)^2\bar{\Delta}\right]^2}{4\left(\bar{\lambda}_M - l_L\bar{\Delta}\right)}\right\}^{-1}, \tag{3.12}$$

де $\bar{\lambda}_M = \left(\bar{E}_M \frac{bh_M^3}{12}\right)$, $\bar{\Delta} = \bar{\lambda}_M - \bar{\lambda}_B$, а комплексний коефіцієнт пропорційності

$$\bar{g}_E = \bar{c}_0 \cdot \frac{L^2}{2} \cdot \frac{\bar{\lambda}_B \bar{\lambda}_M (1 - l_L) l_L}{\bar{\lambda}_M - \bar{\Delta} l_L}.$$

Для визначення передавальної функції $W_3(p)$ зробимо перетворення Лапласа у вигляді виразу (3.13):

$$\left(\frac{m}{n} p^2 + \bar{c}_0 \right) \xi_0 = \bar{g}_E M_E - \bar{g}_P P, \tag{3.13}$$

де ξ_0, M_E, P – зображення відповідних змінних: переміщення, еквівалентного моменту, зовнішньої сили.

Передавальна функція для керуючого впливу матиме вигляд (3.14):

$$W_3(p) = \frac{0_0}{M_E} = \frac{\bar{k}_3}{\bar{T}_3^2 p^2 + 1}, \tag{3.14}$$

де $\bar{T}_3 = \sqrt{\frac{m}{n\bar{c}_0}}$ – середнє механічні напруження (розтягу-стиску);

$\bar{k}_3 = \frac{\bar{g}_E}{\bar{c}_0}$ – комплексний коефіцієнт перетворення;

$n = 2$ – кількість ресор в АПП.

Приведена маса платформи визначається за формулою (3.15) і складається з маси самої платформи m_{P0} та приведеної до неї маси ресор з БПП m_P:

$$m = m_{P0} + m_P, \tag{3.15}$$

де $m_P = \frac{33}{280} n m_B$ – підраховується за наближеною формулою Тимошенко;

m_B – маса ресори з п’єзоелементами.

Кругова власна частота пружної системи визначається виразом (3.16):

$$\omega_0 = \mathrm{Re}\left(\frac{1}{\overline{T}_3}\right) = \mathrm{Re}\sqrt{\frac{\overline{c}_0 n}{m}}. \qquad (3.16)$$

Наведена розрахункова модель дозволяє визначити динамічні характеристики АПП.

Для визначення логарифмічних амплітудно-частотних (ЛАХ) і фазо-частотних (ФЧХ) характеристик системи скористаємося Mathcad-2020.

Аналіз АПП проводився при наступних чисельних значеннях параметрів (ці параметри системи відповідають пристрою, показаному на рисунку 3.38, який досліджувався експериментально).

Маса рухомої платформи m = 0,2 кг, кількість ресор з БПП $n = 2$, $l = 3{,}0 \cdot 10^{-2}$ м, $L = 5{,}3 \cdot 10^{-2}$ м, $b = 1{,}5 \cdot 10^{-2}$ м, $h_M = 1{,}0 \cdot 10^{-3}$ м, $h_P = 0{,}80 \cdot 10^{-3}$ м, $E_M = 0{,}71 \cdot 10^{11}$ Па (дюралюміній), Q_M = 1000, $s_{11}^E = 15{,}2 \cdot 10^{-12}$ Па$^{-1}$, $d_{31} = 1{,}25 \cdot 10^{-10}$ Кл/Н, $\varepsilon = 840$, $Q_P = 50$, $tg\delta$ = 0,035, (п'єзокераміка ЦТС-19). Опір джерела напруги $R = 5{,}0 \cdot 10^4$ Ом. Амплітудне значення вхідної напруги становило U_0 =30 В.

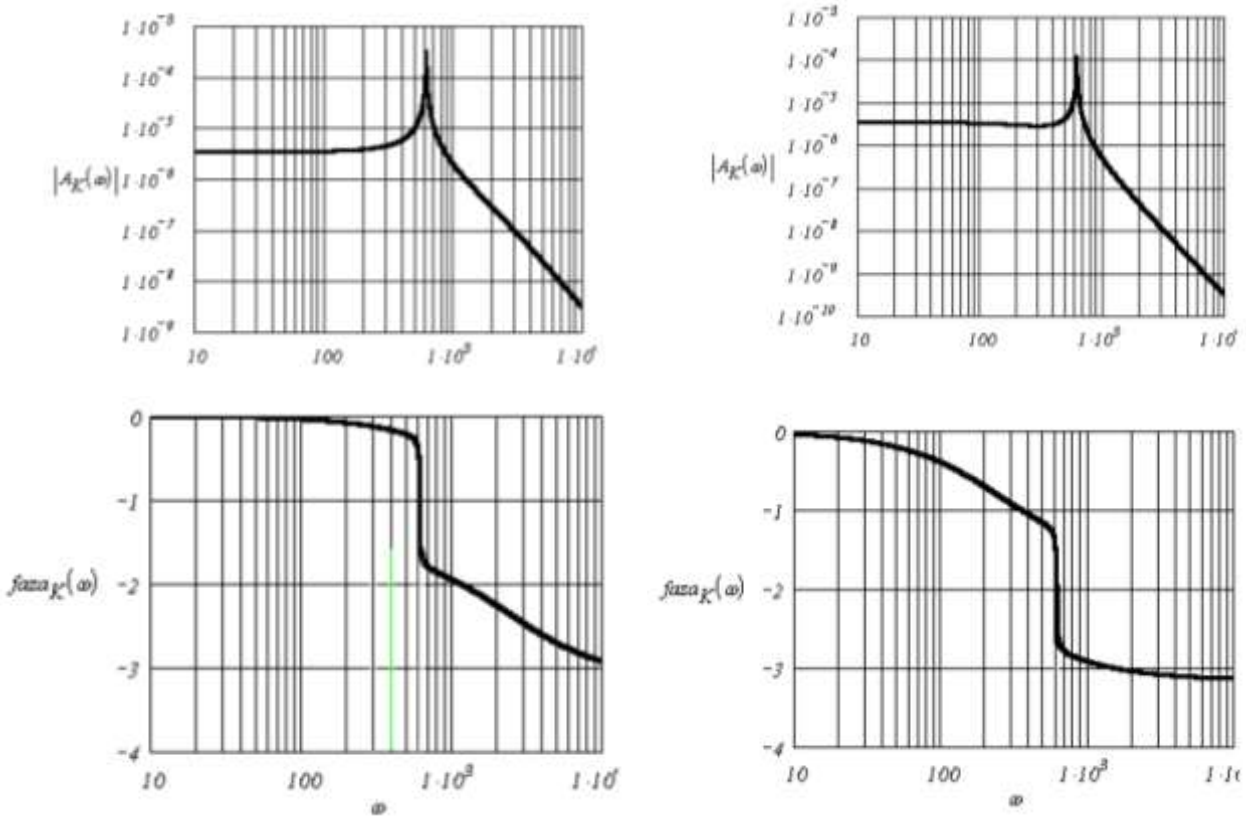
Розрахунки дали наступні результати: $\mathrm{Re}(\overline{T}_1) = 4{,}18 \cdot 10^{-4}$ с, $\mathrm{Re}(\overline{k}_2) = 2{,}22 \cdot 10^{-4}$ сА, $\mathrm{Re}(\overline{T}_3) = 1{,}63 \cdot 10^{-3}$ с, $\mathrm{Re}(\overline{k}_3) = 5{,}07 \cdot 10^{-4}$ с^{2}кг$^{-1}$м$^{-1}$, $\omega_0 = 0{,}61 \cdot 10^3$ рад/с, власна частота $f_0 = \dfrac{\omega_0}{2\pi} = 97$ Гц.

За наведеними параметрами були побудовані ЛАХ і ФЧХ для двох значень опору джерела напруги: для $R = 5{,}0 \cdot 10^4$ Ом, і $R = 50 \cdot 10^4$ Ом (рис. 3.41). Тут введено такі позначення (3.17):

$$|A_k(\omega)| = \mathrm{mod}[U \cdot W_E(j\omega)], \quad faza_k = \arg[A_k(\omega)]. \qquad (3.17)$$

У першому випадку перегин у графіку ФЧХ знаходиться правіше

резонансної частоти ($\omega_{01} = \frac{1}{\mathrm{Re}(\overline{T}_1)} > \omega_0$), Тому на частотах $\omega < \omega_0$ вплив передавальної функції першої ланки на амплітуду переміщень не позначається, а в другому випадку – лівіше резонансної частоти, тому відбувається падіння амплітуди в діапазоні $\omega < \omega_0$, що буде негативно позначатися на роботі системи [35].



а) б)

Рисунок 3.41 – ЛАХ і ФЧХ системи [35]: а – при R = 5,0·10^4 Ом;
б – при R = 50·10^4 Ом

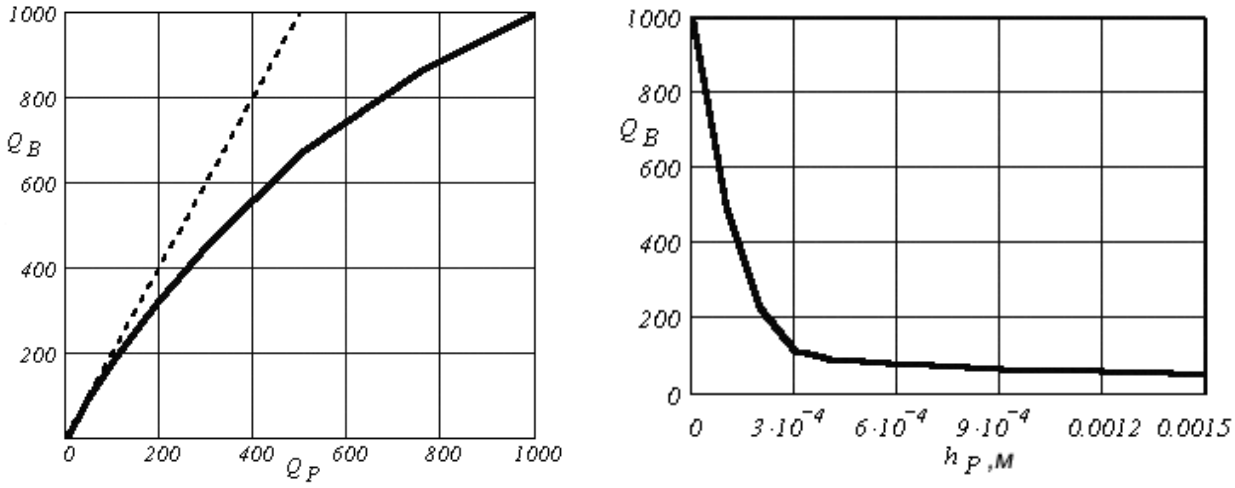
Виходячи з вищесказаного, при проєктуванні систем з БПП необхідно упевнитися, що опір джерела напруги задовольняє вимогу, при якій $\omega_{01} > \omega_0$.

При роботі пружних систем з БПП у вібраційному режимі важливо знати добротність всієї системи Q_B, щоб оцінити амплітуди переміщень вихідної ланки поблизу резонансу і споживану потужність, сформулювати вимоги до системи управління. Для цього визначається модуль комплексної амплітуди кінцевої

ланки як функція частоти: $|A_k(\omega)| = \mathrm{mod}[U \cdot W_E(j\omega)]$. У цьому випадку добротність системи з БПП визначається за амплітудно-частотною характеристикою системи за формулою (3.18):

$$Q_B = \frac{|A_K(\omega_0)|}{|A_K(\omega = 0)|}. \qquad (3.18)$$

Результати розрахунку добротності АПП відображені на рисунку 3.42.



а) б)

Рисунок 3.42 – Залежності добротності АПП від добротності п’єзокераміки (а) і від товщини п’єзоелементів (б) [35]

Значення добротності для дюралюмінію, з якого виконані ресори, – $Q_M \approx 1000$. Зі збільшенням добротності п’єзокераміки Q_P добротність системи Q_B зростає до значення Q_M, а зі збільшенням товщини п’єзоелементів добротність Q_B падає від значення Q_M до значення Q_P (на цьому графіку пунктиром показана дотична до кривої в точці 0,0). Звідси випливає висновок, що для вібропристроїв товщина п’єзоелементів повинна бути як якнайменшою по відношенню до товщини ресор. При застосуванні пружної системи з БПП в якості мікроманіпуляційного модуля або вібропристрою за наведеними залежностям можна вибрати параметри елементів АПП з необхідним значенням Q_B.

Механічна добротність, обчислена за експериментальними даними за показами п'єзодатчиків, наклеєних на ресору, становить $Q_{\text{exp}} = 60$, що 50 % нижче, ніж Q_B. Тому, зменшення Q_{exp} в порівнянні з Q_B виникає внаслідок механічних втрат в клейових з'єднаннях п'єзопластин з ресорами, а також через похибки вимірювання частот і Q_M.

Висновки до розділу

1. Довжина кінематичних ланцюгів в складних багатокоординатних мікромеханічних системах істотно скорочується при застосуванні БПП в порівнянні з іншими типами ПП. Це пов'язано з тим, що кожен БПП є одночасно перетворювачем електричної енергії в механічну і пружною кінематичною передавальною ланкою.

2. Розглянуто модулі з ПП, в яких основним завданням є мультиплекція переміщень вихідної ланки, а додатковим завданням при їх проєктуванні є збільшення жорсткості і сили приводу. Основні характерні види рухів вихідної ланки СМП для модулів з одним ступенем вільності – це зворотно-поступальний, плоскопаралельний, гойдаючий і просторовий рухи, для модулів з декількома ступенями вільності – це рух вихідної ланки, точки якої здійснюють переміщення по замкнутій траєкторії і по незамкнутій траєкторії.

3. Залежно від необхідного виду руху вихідної ланки пропонується, використовувати:

– активні пружні напрямні для поступального руху, в яких БПП виконують функції пружних ресор – в модулях поступальних мікропереміщень для позиціонуючих пристроїв, столиків мікроскопів, нарощування сили приводу здійснюється за рахунок збільшення числа ресор БПП;

– активні пружні шарніри (АПШ) з БПП для здійснення гойдального руху вихідної ланки відносно нерухомої точки – можна застосовувати для сканування оптичним променем, а також для здійснення обертального руху ротора в вібродвигунів;

– модулі з БПП для здійснення руху по гвинтовій лінії –мають знижену жорсткістю на скручування, тому їх доцільно використовувати в якості стрілочних покажчиків або в оптичних системах для сканування променя з малими швидкостями за допомогою коливного мініатюрного дзеркала, а також в ультразвукових медичних сканерах;

– модулі з БПП для здійснення руху вихідної ланки з двома і трьома ступенями вільності – використовуються в мікроманіпуляторах, призначених для біологічних досліджень і складання компонентів мікроелектроніки, в двокоординатних оптичних скануючих пристроях.

4. Розроблений п’єзоелектричний захват реалізує нову ідею про використання єдиного приводу для захоплення, чутливості і мікропозиціонування деталі, що відрізняє пропонований захват від традиційних схем захватних пристроїв з роздільними системами чутливості і точного позиціонування на базі додаткових приводів. Такий підхід дозволяє підвищити точність і надійність системи, завдяки відсутності передавальних ланцюгів, а також значно спростити конструкцію мікроманіпулятора.

5. Для мікроманіпуляціоних систем швидкості, прискорення робочого органу і його інерційні характеристики малі, тому питання динаміки не актуальні, проте для приладових СМП, зокрема для віброприводів, систем сканування і пристроїв мікрогідро- і пневмоавтоматики вони важливі. Системи мікропереміщень мають яскраво виражений характер коливальних ланок з малим демпфуванням. Електричні параметри п’єзоелементів надають на поведінку системи в цілому малий вплив у порівнянні з механічними елементами. Порівняння частотних характеристик, отриманих аналітичним і експериментальним шляхами, показує, що на демпфування основний вплив має механічна добротність п’єзокераміки. Порівняння частотних характеристик, отриманих аналітичним і експериментальним шляхами, показує, що на демпфування основний вплив має механічна добротність п’єзокераміки. Тому для інженерних розрахунків значення Q_B потрібно брати на 20-25 % нижче, ніж для розглянутого типу п’єзокераміки.

РОЗДІЛ 4
СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

4.1 П’єзоелектричний привід з регулюванням за положенням

Удосконалення сучасної елементної бази оптико-механічних та електричних приладів і систем направлено на підвищення їх статичних, динамічних характеристик та характеристик точності, зниження масогабаритних показників і поліпшення ергономічних характеристик [34]. Аналогове керування на сьогодні майже повністю себе вичерпало і є стримуючим фактором розвитку в силу наступних недоліків:

1. Нестабільність параметрів. При зміні зовнішніх впливів, особливо таких, як температура, вологість, вібрація, тиск змінюються параметри аналогових підсилювачів, фільтрів, інтеграторів та інших елементів. Це призводить до зміни основних показників якості системи керування.

2. Складність централізованого керування декількома об’єктами. Цей недолік пов’язаний з проблемою точної передачі аналогових сигналів на великі відстані. При проходженні безперервних сигналів по кабелях, дротах або радіоканалах вони зазнають спотворення за рахунок обмеженості смуги пропускання каналу зв’язку, нелінійності приймально-передавального тракту, а також, через дії різноманітних перешкод.

3. Складність серійного виробництва аналогових систем керування. Зазвичай системи керування є складними об’єктами, які включають велике число аналогових елементів і пристроїв. При серійному виробництві таких систем виникають значні труднощі індивідуальної настройки кожної окремої системи керування. В результаті всі випущені системи відрізняються один від одного параметрами і вимагають постійних досить складних і трудомістких регулювань, що призводять до істотного подорожчання виробу.

Не є винятком і прецизійні системи керування з п’єзоелектричними виконавчими пристроями, де до недавнього часу використовувалися аналогові пристрої з високовольтними лінійними підсилювачами на виході, які мають

високе енергоспоживання і малий коефіцієнт корисної дії, схильні до самозбудження, внаслідок наявності зворотних зв’язків і потребують індивідуальної настройки для забезпечення стійкості. Названі і ряд інших причин зумовили широке поширення цифрових систем керування. У цифрових системах інформація міститься на таких параметрах сигналів, як величина напруги або струму, а в числах, представлених зазвичай в двійковому коді. Для формування, передачі і перетворення двійкових сигналів в цифрових системах керування використовуються окремі елементи цифрової техніки, тобто регістри, лічильники, логічні елементи, а також мікроконтролери, які серійно випускаються, спеціалізовані або універсальні цифрові обчислювальні машини. Застосування цифрових систем дозволяє усунути основні недоліки аналогових систем керування. Крім того, властиві їм такі незаперечні переваги як:

– наявність недорогої апаратури, яка серійно випускається;

– висока швидкодія;

– програмна реалізація алгоритмів, легкість настроювання;

– стабільність роботи, відсутність дрейфу параметрів;

– можливість реалізації складних законів керування;

– гнучкість архітектури системи, можливість зміни алгоритмів керування в ході експлуатації;

– відносна дешевизна розробки.

Все це пояснює широке впровадження цифрової техніки в прецизійний п’єзоелектричний привід і систем на його основі. Важливим є і те, що математичний опис і аналіз більшості сучасних цифрових систем керування базуються на методах аналізу аналогових систем.

В даний час широкого поширення набули мікроконтролерні системи керування (МКСК) в тому числі і п’єзоелектричними виконавчими пристроями. У них здійснюється програмно-апаратне керування за допомогою програмованих мікроконтролерів, що дає можливість організації гнучкого керування п’єзодвигунами і дозволяє реалізувати складні закони керування шляхом відповідного програмування МКСК з компенсацією зовнішніх впливів і

нелінійностей, властивих пристроям даного типу. Велика номенклатура мікроконтролерів, від найпростіших PIC – контролерів до порівняно складних однокристальних мікро-ЕОМ, дозволяє реалізовувати цифрове керування як одноконтурних приводів, так і більш складних багатоконтурних і багатоприводних систем і комплексів. Через специфіку керування п’єзоелектричними пристроями не завжди вдається обійтися без аналогових пристроїв, а застосування цифрових засобів, в поєднанні з аналоговими пристроями старого покоління, підсилює їх недоліки через складність узгодження підсилювальних пристроїв п’єзоприводу з мікроконтроллерними пристроями. Для широкого впровадження цифрового п’єзоприводу в технічних системах необхідно підвищення енергетичної ефективності високовольтних електронних пристроїв керування, забезпечення їх стійкості і спрощення зв’язку з мікропроцесорними пристроями. Всі поставлені завдання вирішуються застосуванням сучасних лінійних підсилювачів і пристроїв керування з вихідними каскадами на високовольтних транзисторах, що працюють в ключовому режимі, тобто використанням імпульсних пристроїв, а також спеціалізованих драйверів для п’єзоелектричних виконавчих пристроїв. Всі перераховані пристрої прості, економічні, надійні, стійкі до самозбудження, мають кращі масогабаритні показники в порівнянні з лінійними підсилювачами старих моделей, забезпечують найбільш оптимальні режими роботи і зручності узгодження з керуючими мікропроцесорними пристроями. На рисунку 4.1 показана узагальнена функціональна схема цифрового п’єзоелектричного приводу, що являє собою одноконтурну систему регулювання за положенням [35].

У ній можна виділити дві частини: цифрову і аналогову. У цифрову входять мікроконтролер (МК), пристрої зв’язку з мікроконтролером: аналого-цифровий і цифроаналоговий перетворювачі (АЦП і ЦАП), силовий перетворювач (СП) керування п’єзодвигуном, безпосередньо виконавчий п’єзодвигун (ПД), датчик переміщення (ДП) і ЕОМ, яка задає верхній рівень керування (ЕОМ ВК).

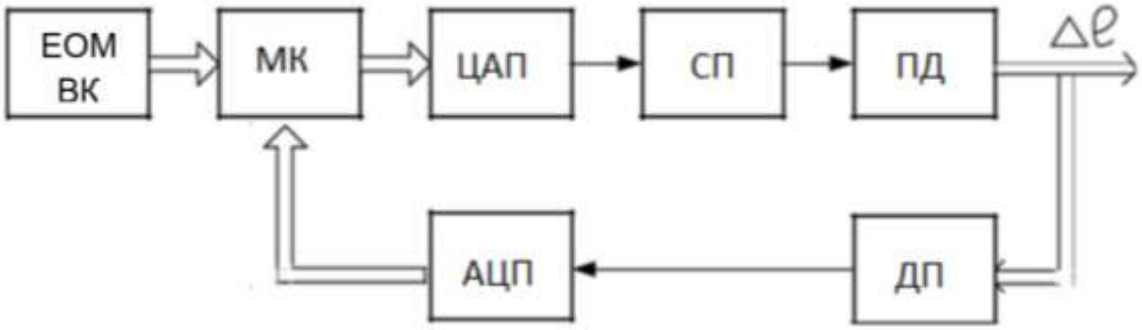


Рисунок 4.1 – Узагальнена функціональна схема цифрового п’єзоелектричного привода [35]

АЦП і ЦАП – здійснюють аналого-цифрове перетворення і дискретизацію за часом з періодом *T*, вони можуть представляти самостійні пристрої або бути вбудованими, як у випадку з використанням мікроконтролерів ADuC831 і ADuC841, що значно підвищує перешкодозахищеність і надійність роботи всього пристрою. Вибір періоду квантування часу *T* в системі залежить від вимог до динамічних властивостей приводу в цілому і швидкодії цифрової частини зокрема. Зазвичай в електромеханічних системах період *T* становить від десятих часток до одиниць мілісекунд (0,1-5 мс), що пред’являє досить високі вимоги до продуктивності мікроконтролера.

СП – перетворює сигнал керування за формою, величиною і потужністю, необхідною для керування п’єзодвигунами. У якості СП можуть бути використані лінійні аналогові високовольтні підсилювачі потужності, спеціалізовані драйвери, каскади високовольтних транзисторів, що працюють в ключовому режимі.

ДП – формує сигнал зворотного зв’язку за положенням. У сучасних системах для цих цілей використовуються ємнісні, індуктивні, тензорезистивні або оптико-електронні перетворювачі.

ПД – п’єзодвигун, як виконавчий пристрій переміщує деякий об’єкт на задану величину. Це може бути будь-який з раніше розглянутих п’єзоелектричних пристроїв.

4.2 П’єзоелектричний привід з підпорядкованим регулюванням

У ряді випадків досить позитивний результат в цифровому п’єзоприводі дає застосування підпорядкованого регулювання [35]. Розглянемо п’єзоприводи з двигуном на багатошаровій кераміці. На рисунку 4.2 представлена його функціональна схема.

Рисунок 4.2 – Функціональна схема п’єзоприводу [35]

Схема побудована за принципом систем зі зворотним зв’язком і містить три контури регулювання. Найшвидший контур – контур керування напругою. Частота квантування сигналів (інформації) в контурі складає 5 кГц. Цей контур забезпечує ефективну роботу високовольтного підсилювача, включаючи режим енергозбереження. Наступним є контур керування струмом, що проходить через п’єзоактюатор. Цей контур також є швидкодіючим, частота квантування інформації в ньому становить 5 кГц, однак контур струму є додатковим до контуру керування напругою. Основне завдання контуру струму – підвищити швидкодію приводу.

Показники точності приводу визначаються контуром регулювання переміщення. Цей контур є відносно повільним. У контурі здійснюється порівняння величин поточного переміщення об’єкта з заданим. Регулятори

переміщення, струму і напруги реалізовані у вигляді програми роботи мікроконтролера, з огляду на це і конкретизуючи інші пристрої приводу можна представити функціональну схему системи, як це показано на рисунку 4.3.

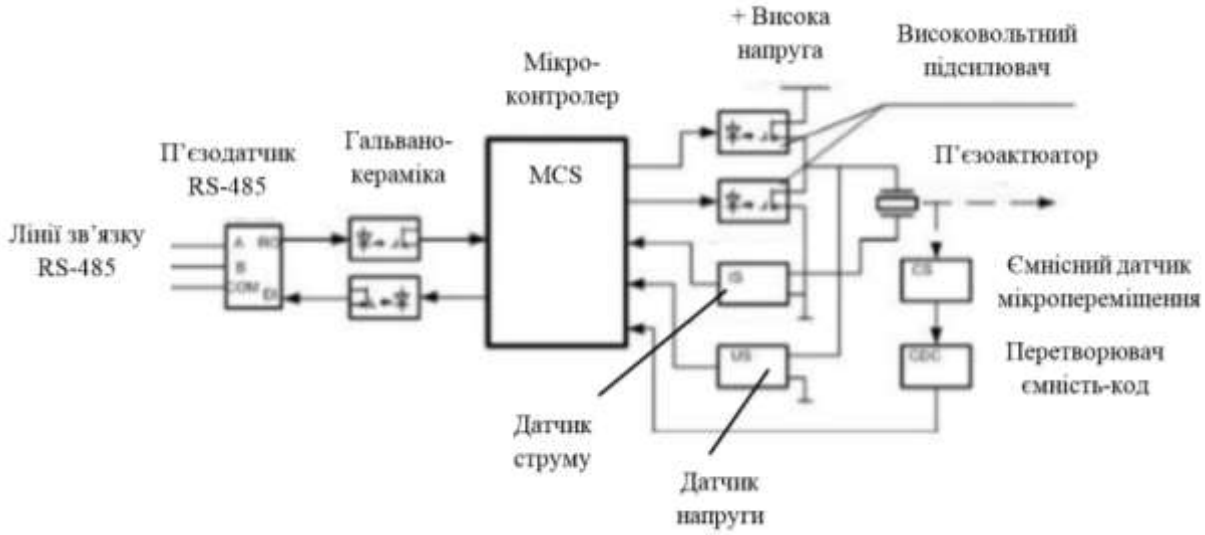


Рисунок 4.3 – Функціональна схема п’єзоприводу на основі п’єзоактюатора з багатошарової тонкоплівкової кераміки [35]

Ядром приводу служить мікроконтролер ADuC841 фірми Analog devices. Необхідне мікропереміщення задається дистанційно по цифровій лінії зв’язку RS-485.

Узгодження з лінією виконано на спеціальній мікросхемі приймача-передавача з використанням зовнішніх елементів гальванічної розв’язки. Керування п’єзоактюатором здійснюється через високовольтний підсилювач з напругою живлення до 150 В постійного струму. Величина напруги, що подається на п’єзоактюатор, контролюється датчиком напруги.

За рахунок цього в приводі доданий режим підкачки заряду, що підвищує ККД роботи підсилювача. Величина мікропереміщення контролюється спеціальним ємнісним датчиком, вбудованим в конструкцію п’єзоприводу. Для поліпшення динамічних властивостей електроприводу використовується додатковий зворотний зв’язок за струмом п’єзоактюатора [35, 36, 37, 38].

При переміщенні на 100 мкм, яке може бути отримано у сучасних

тонкоплівкових п’єзоактюаторів, привід здатний забезпечити дозвіл на рівні 0,01 мкм.

Випробування приводу з п’зоактюатором на діапазон 8 мкм показало, що час реакції на одиничний стрибок становить 10 мс. Гістерезис п’єзоактюатора повністю компенсований, а похибка роботи приводу визначається похибкою роботи датчика переміщення.

4.3 Широтно-імпульсне керування п’єзоактюатором

З метою підвищення ККД і істотного зменшення габаритів силових перетворювачів для керування п’єзоприводом можливе використання широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). У цьому випадку вихідні високовольтні транзистори силового перетворювача працюють в ключовому режимі і вихідна напруга перетворювача залежить від часу знаходження транзисторів у відкритому (включеному) стані. Таке імпульсне керування п’єзоактюатором дуже перспективне, але має специфічні особливості [35].

Спрощено високовольтна частина силового перетворювача з ШІМ-керуванням зображена на рисунку 4.4.

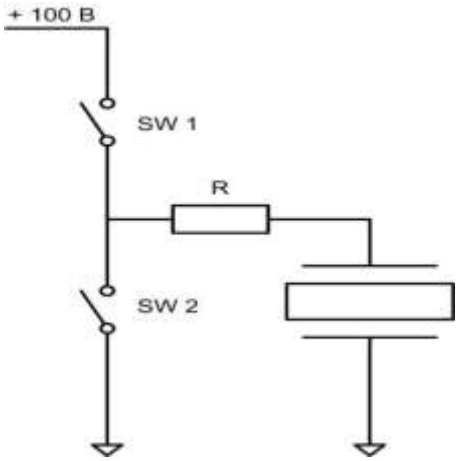


Рисунок 4.4 – Спрощена схема імпульсного керування п’єзоприводу (*R* – сумарний власний опір силових ключів, джерела живлення і додатковий опір в ланцюзі п’єзоприводу) [35]

Ключі *SW*1 і *SW*2 (в ролі яких використовуються вихідні силові транзистори) замикаються почергово з певною частотою і тривалістю (шпаруватістю), подаючи тим самим на п’єзодвигун напруги, наприклад 100 або 0. При використанні ШІМ створюване п’єзоактюатором переміщення має пульсуючий характер через низьку інерційності п’єзоматеріалів і наявності пружних властивостей елементів конструкції (коливальної ланки в моделі п’єзоактюатора).

Приклад пульсацій переміщення показаний на рисунку 4.5, їх форма і амплітуда змінюються в залежності від частоти ШІМ і значення шпаруватості.

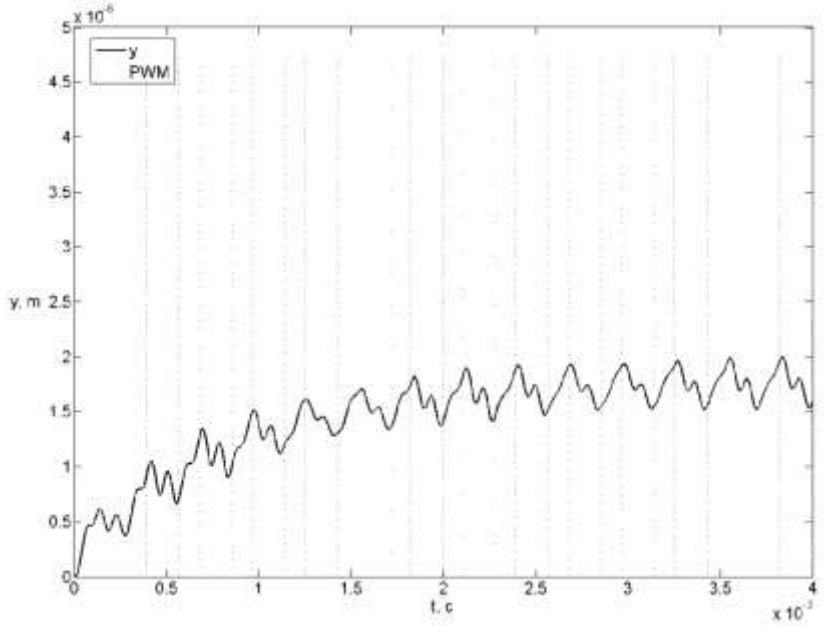


Рисунок 4.5 – Перехідний процес в п’єзоприводі з ШІМ-керуванням (графік імпульсів ШІМ представлений не в масштабі по осі ординат) [35]

При підвищенні частоти амплітуда знижується і, отже, підвищується стабільність позиціонування. Однак технічно не завжди вдається використовувати досить високі частоти комутації транзисторів, тому доводиться йти на компроміс між величиною частоти і стабільністю позиціонування.

Іншою особливістю ШІМ-керування є виникнення специфічної нелінейності при лінійній моделі п’єзоактюатора. Цю особливість також слід враховувати при виборі частоти модуляції.

Висновки до розділу

1. Прецизійні цифрові системи керування на базі мікроконтролерних системи п’єзоелектричними виконавчими пристроями дають можливість організації гнучкого керування п’єзодвигунами і дозволяють реалізувати складні закони керування шляхом відповідного програмування МКСК з компенсацією зовнішніх впливів і нелінійностей, властивих пристроям даного типу.

2. П’єзоелектричний привід з підпорядкованим регулюванням побудований за принципом систем зі зворотним зв’язком і містить три контури регулювання. Перший контур (найшвидший) – контур керування напругою, який контур забезпечує ефективну роботу високовольтного підсилювача, включаючи режим енергозбереження. Другим є контур керування струмом (швидкодіючий), що проходить через п’єзоактюатор. Основне завдання контуру струму – підвищити швидкодію приводу. Третім є контур регулювання переміщення, який визначає показники точності приводу. Цей контур є відносно повільним. У контурі здійснюється порівняння величин поточного переміщення об’єкта з заданим.

3. Керування п’єзоприводом методом ШІМ здійснюється з метою підвищення ККД і істотного зменшення габаритів силових перетворювачів. При використанні ШІМ створюване п’єзоактюатором переміщення має пульсуючий характер через низьку інерційності п’єзоматеріалів і наявності пружних властивостей елементів конструкції (коливальної ланки в моделі п’єзоактюатора). Форма пульсацій переміщення і амплітуда змінюються в залежності від частоти ШІМ і значення шпаруватості. При підвищенні частоти амплітуда знижується і, отже, підвищується стабільність позиціонування.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У кваліфікаційній роботі магістра розв’язано комплекс важливих науково-технічних завдань, пов’язаних із розробкою та дослідженням багатокоординатних систем мікропереміщень на базі п’єзоелектричних перетворювачів, що забезпечують високоточне маніпулювання мініатюрними об’єктами.

1. Проведений аналіз сучасного стану розвитку виконавчих пристроїв для прецизійного позиціонування дозволив класифікувати основні типи СМП та їх приводів. Встановлено, що найбільш перспективними для створення високоточних маніпуляційних систем є п’єзоелектричні приводи завдяки поєднанню високої швидкодії та значних силових характеристик.

2. Запропонована концепція мехатронних маніпуляційних систем мікропереміщень з деревовидною структурою, заснованою на принципах біоніки, що дозволяє досягти високої варіативності маніпулювання з мінімальним ускладненням конструкцій мікроманіпуляторів.

3. На основі аналізу видів руху вихідних ланок СМП запропоновані нові схемні рішення мехатронних модулів з одним, двома і трьома ступенями вільності на базі БПП. Показано, що БПП скорочує кінематичний ланцюг модулів мікропереміщень в порівнянні з іншими елементами, що перетворюють електричну енергію в механічну.

4. Сформульовані вимоги до модулів з п’єзоперетворювачами та розроблені нові схемні рішення пружних передавальних механізмів, які забезпечують збільшення ходу переміщень при збереженні необхідної точності та керованості. Розроблено і проаналізовано математичні моделі БПП. На основі результатів експериментів зроблений вибір розрахункової моделі, яка використана для аналізу й синтезу модулів пружних систем мікропереміщень з однією та декількома ступенями вільності. Визначено розподіл механічних напружень і деформацій за перерізом БПП при подачі електричної напруги.

5. На основі досліджень деформованого стану п’єзокерамічних елементів

при подачі напруги встановлено закономірності розподілу механічних напружень та деформацій, що дозволило уточнити параметри моделей та підвищити точність розрахунків. Розроблена методика розрахунку переміщень, деформацій і силових характеристик пружних систем мікропереміщень з БПП, що дозволяє аналізувати і синтезувати запропоновані багатокоординатні пристрої.

6. Розроблена методика розрахунку переміщень багатокоординатних пружних систем з урахуванням електричної напруги та зовнішніх сил. Це дало змогу отримати аналітичні залежності для аналізу та синтезу нових пристроїв із ПП.

7. Розроблено комплекс математичних моделей модулів мікропереміщень з одним та декількома ступенями вільності на базі БПП, що мають розімкнуті і замкнуті кінематичні ланцюги. Визначено робочі зони і траєкторії кінців вихідних ланок модулів з декількома ступенями вільності. Розраховані параметри пружних систем, при яких переміщення вихідних ланок і сили, що розвиваються – максимальні.

8. Досліджено динамічні характеристики систем мікропереміщень. Визначені амплітудно- та фазочастотні характеристики з урахуванням добротності елементів, що дозволило оцінити роботу пристроїв у режимах вимушених коливань.

9. Проведено експериментальні дослідження, результати яких підтвердили адекватність математичних моделей. Це забезпечило можливість використання розроблених моделей для прогнозування та оптимізації роботи пристроїв.

10. П’єзоелектричні приводи за сукупністю силових характеристик і швидкодії є найбільш перспективними для мехатронних СМП. П’єзоелектричні пристрої рекомендується використовувати:

– в мікроманіпуляційних системах для складання мікровиробів, для біологічних досліджень і технологій та мікрохірургії, для приводу головок високоточних вимірювальних машин, в прецизійних електроерозійних верстатах для двухкоординатної подачі дроту;

– в якості вібраційних живильників мініатюрних деталей і орієнтуючих пристроїв;

– в автономних мікроботах, призначених для моніторингу навколишнього середовища (літаючі, повзаючі, плаваючі мініроботи), для лапороскопічної хірургії, ендоскопічної діагностики організму людини;

– в оптоелектронних перемикачах і сканерах технологічних лазерних установок, мініатюрних пристроях пневматики і гідравліки (мікронасоси і мікроклапани), призначених для роботи в медичних апаратах і приладах;

– в прецизійних багатокоординатних вібродвигунах, призначених для переміщення і орієнтації столиків мікроскопів і чутливих елементів навігаційних приладів;

– в пристроях побутового призначення – вібраційних бритвах, вібромасажерах, іграшках.

Важливо відзначити, що п’єзокераміка може працювати з високою надійністю при високих температурах (до 300 ^{0}C), в агресивних середовищах і у вакуумі, а також не створює значних електромагнітних полів у вібраційному режимі. Ці переваги створюють перспективу для використання п’єзоелектричних пристроїв в космічній техніці, в метрологічному обладнанні і електронній промисловості.

Результати цієї роботи дозволяють підвищити ефективність принципово нових мехатронних пристроїв мікропереміщень з ПП за рахунок оптимізації їх параметрів. Запропоновані нові технічні рішення пристроїв мікропереміщень відкривають шляхи для подальшого розвитку одного з найперспективніших напрямів високотехнологічних систем мікромеханіки.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Зайцев Р. В., Кіріченко М. В., Зайцева Л. В. Методи дослідження структури тонких плівок: підручник. Харків: ФОП Бровін О. В., 2021. 320 с.

2. Поп М. М., Біланич В. С. Фізика та технології наноструктур: навч. посіб. Ужгород: ДВНЗ «УжНУ», 2024. 104 с.

3. Обробка та аналіз зображень у скануючій зондовій мікроскопії: ключові аспекти та рецепти. URL: https://www.ntmdt-si.com/resources/webinars/image-processing-and-analysis-in-scanning-probe-microscopy (дата звернення 10.09.2025).

4. Артюх О. М., Дударенко О. В., Кузьмін В. В., Сосик А. Ю., Щербина А. В. Основи мехатроніки: навч. посіб. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2021. 372 с.

5. Струтинський В. Б., Гуржій А. М. Наземні роботизовані комплекси: монографія. Житомир: ПП «Рута», 2023. 524 с.

6. Поліщук М. М., Ткач М. М. Робототехнічні системи та комплекси: мобільні роботи довільної орієнтації: підруч. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 301 с.

3. Бернацький А. П. Основи робототехніки військового призначення: навч. посіб. Київ: Ліра-К, 2024. 500 с.

7. Хорольський В. П., Коренець Ю. М. Мехатроніка (мехатроніка та інтелектуальна автоматика): навч. посіб. Кривий Ріг: ДонНУЕТ, 2023. 342с.

8. Хорольський В. П., Коренець Ю. М., Серебреников В. М. Автоматизовані системи керування виробництвом смарт-продуктів харчування: монографія. Кривий Ріг: Чернявський Д.О., 2021. 312с.

9. Хорольський В. П., Коренець Ю. М. Автоматизація виробничих процесів: підручник. Кривий Ріг: ДонНУЕТ, 2022. 370 с.

10. Васильківський І. С., Федінець В. О., Юсик Я. П. Виконавчі пристрої систем автоматизації. URL: https://surl.li/tgqjor (дата звернення 20.09.2025).

11. Лобур М., Мельник М. Основи мікросистемих пристроїв: навч. посіб. URL: http://cad.lp.edu.ua/project/b3.pdf (дата звернення 20.09.2025).

12. Andrew J. Kurdila. Dynamics and control of robotic systems. URL: https://surl.li/vkiiii (дата звернення 21.09.2025).

13. Антощенков Р. В., Нанка О. В., Лебедєв А. Т., Антощенков В. М., Кісь В. М., Галич І. В. Мехатронні системи автомобілів і тракторів: підручник. URL: https://surl.li/qzdtry (дата звернення 21.09.2025).

14. Омелян А. В. Методи та система підвищеної ефективності керування п’єзоелектричним мікроманіпулятором: дис. … д-ра філософії: 172. Київ, 2022. 160 с.

15. Видмиш А. А., Ярошенко Л. В. Основи електропривода. Теорія та практика: навч. посіб. URL: https://surl.li/yxlumv (дата звернення 22.09.2025).

16. Невлюдов І. Ш., Андрусевич А. О., Євсєєв В. В., Новоселов С. П., Демська Н. П. Проектування мобільних маніпуляційних роботів: монографія. Харків: ХНУР, 2022. 427 с.

17. Mohammad H. Abedin-Nasab. Handbook of robotic and imageguided surgery. URL: https://surl.li/fzmxim (дата звернення 23.09.2025).

18. «Narishige». URL: https://products.narishige-group.com/. (дата звернення 24.09.2025).

19. «Eppendor». URL: https://www.eppendorf.com/. (дата звернення 25.09.2025).

20. «Wpiinc». URL: https://www.eppendorf.com/. (дата звернення 26.09.2025).

21. «Piezotech». URL: http://piezotech.com.ua/ (дата звернення 27.09.2025).

22. Діденко Ю. В., Татарчук Д. Д. Основи технології виготовлення елементів мікро- та наносистемної техніки: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 113 с.

23. Гуржій А. М., Нельга А. Т., Співак В. М., Ітякін О. С. Основи автоматики та робототехніки: навч. посіб. Дніпро: «Гаран СВ», 2021. 243 с.

24. Діордієв В. Т., Кашкарьов А. О., Дубініна С. В., Новіков Г. В. Засоби автоматизації електротехнічних комплексів: навч. посіб. URL: https://surl.li/rczsdm (дата звернення 28.09.2025).

25. Іванов В. О., Дегтярьов І. М. Технологічні основи гнучких автоматизованих виробництв: навч. посіб. Суми: Сумський державний університет, 2022. 203 с.

26. Денисюк В. Ю., Огородник М. О. Мехатронний автоматизований комплекс для дослідження мікрооб'єктів. *«Прогресивні напрямки розвитку автоматизованих технологічних комплексів»*: зб. наук. праць VIII Міжнар. наук. техн. конф. ТК-2024 (м. Луцьк, 28-30 трав. 2024 р.). Луцьк: ЛНТУ, 2024. С. 23-24.

27. Петренко С. Ф., Омелян А. В. Спосіб керування п'єзоелектричним двигуном: патент 123316 Україна, № 201804592; заявл. 26.042018; опубл. 17.03.2021, Бюл. №11.

28. «NIPPON BEARING». URL: https://www.nbcorporation.com/ (дата звернення 28.09.2025).

29. «IKO International». URL: https://www.ikont.com/ (дата звернення 29.09.2025).

30. «PM». URL: https://www.pm.nl/ (дата звернення 30.09.2025).

31. «HIWIN». URL: https://www.hiwin.com/ (дата звернення 05.10.2025).

32. «Інфоком ЛТД». URL: https://surl.li/cqefqh (дата звернення 10.10.2025).

33. Тимчик Г. С., Скицюк В І., Клочко Т. Р. Конструювання механотронних модулів. Точність механотронних модулів: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 79 с.

34. Бондаренко І. М., Бородін О. В., Карнаушенко В. П. Сучасна компонентна база електронних систем: навч. посіб. URL: https://surl.lt/gqvfcm (дата звернення 15.10.2025).

35. Теряєв В. І., Король С. В. Системи програмного та слідкуючого керування рухом: підручник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 150 с.

36. Трет'як А. В., Кльон А. М. Основи робототехніки: навч. посіб. Полтава: «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2024. 135 с.

37. Денисюк В. Ю., Кравчук О. О. Система керування точністю мікропереміщень предметного столика мікроскопа. Автоматизація та

комп’ютерно-інтегровані технології – 2025: матер. XI Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Київ, 07 трав. 2025 р.). Київ: «Політехніка», 2025. С. 16-17.

38. Денисюк В. Ю., Кравчук О. О. Розроблення та аналіз багатокоординатних мікроманіпуляційних систем точного позиціонування на основі п’єзоелектричних виконавчих пристроїв. *Актуальні проблеми автоматизації та управління*: матер. XIII-ої Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. (м. Луцьк, 28 лист. 2025 р). Вип. 13. Луцьк, 2025. С. 139-147.