

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

Михайло ЛОБУР, Михайло МЕЛЬНИК

ОСНОВИ МІКРОСИСТЕМИХ ПРИСТРОЇВ

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

№530785-TEMPUS-1-2012-1-PL-TEMPUS-JPCR



Co-funded by the
Tempus Programme
of the European Union

Навчальний посібник "**Основи мікросистемних пристроїв**" створено для допомоги вищим навчальним закладам України впровадити нову магістерську навчальну програму "Проектування мікросистем".

Посібник "**Основи мікросистемних пристроїв**" створено при підтримці Європейського Союзу за Спільним Європейським Проектом "Curricula Development for New Specialization: Master of Engineering in Microsystems Design" (MastMST), ідентифікаційний номер 530785-TEMPUS-1-2012-1-PL-TEMPUS-JPCR.

Координатор проекту проф. Збігнев Лісік, Технічний університет м. Лодзь, Польща.

Учасники проекту:

- Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна, координатор проф. Михайло Лобур.
- Київський Національний університет ім. Тараса Шевченка, м. Київ, Україна, координатор проф. Валерій Скришевський.
- Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна, координатор проф. Володимир Хаханов.
- Донецький національний технічний університет, м. Красноармійськ, Україна, координатор проф. Володимир Святний.
- Технічний університет м. Ільменау, Німеччина, координатор проф. Іво Рангелов.
- Ліонський Національний інститут прикладних наук, Франція, координатор проф. Александра Апотолук
- Університет Павії, м. Павії, Італія, координатор проф. Паоло Ді Барба

Посібник схвалено наглядовою групою TEMPUS проекту в складі: проф. Паоло Ді Барба (Університет Павії) - співголова, проф. Александра Апостолук (Ліонський Національний інститут прикладних наук) – співголова, члени: проф. Збігнев Лісік (Технічний університет м. Лодзь), д-р Яцек Подгурські (Технічний університет м. Лодзь), д-р Януш Возний (Технічний університет м. Лодзь), Д-р Валентин Іщук (Технічний університет м. Ільменау), д-р Марія-Евеліна Могначі (Університет Павії), д-р Роберто Галді (Університет Павії)) 6 травня 2016, м. Павія, Італія.

Автори висловлюють глибоку вдячність керівництву вищеназваних університетів за всебічну підтримку Проекту.

Textbook "**Fundamentals of Microsystems Devices**" developed to help higher education institutions in Ukraine to introduce new master's educational program "Designing microsystems".

Textbook "**Fundamentals of Microsystems Devices**" was created with the support of the European Union within the Joint European Project "Curricula Development for New Specialization: Master of Engineering in Microsystems Design" (MastMST), identification number 530785-TEMPUS-1-2012-1-PL-TEMPUS-JPCR.

Project Coordinator prof. Zbigniew Lisik, Lodz University of Technology, Lodz, Poland.

Учасники проекту:

- Lviv Politechnical National University, Lviv, Ukraine ,
Coordinator prof. Mykhailo Lobur.
- Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine,
Coordinator prof. Valeriy Skryshevsky.
- Kharkiv National University of Radioelectronics, Ukraine ,
Coordinator prof. Vladimir Hahanov.
- Donetsk National Technical University, Krasnoarmiysk,
Coordinator prof. Volodymyr Sviatny.
- Ilmenau University of Technology, Germany,
Coordinator prof. Ivo Rangelow.
- Lyon Institute of Applied Sciences, France,
Coordinator prof. Alexandra Apostoluk.
- University of Pavia, Italy,
Coordinator prof. Paolo Di Barba.

The Handbook was approved by Tempus project Quality Supervisory Team composed of: prof. Paolo Di Barba (University of Pavia) - Co-Chair, prof. Alexandra Apostoluk (Lyon Institute of Applied Sciences) – Co-Chair, members: prof. Zbigniew Lisik (Lodz University of Technology), Dr Jacek Podgorski (Lodz University of Technology), Dr Janusz Wozny (Lodz University of Technology), Dr Valentyn Ishchuk (Ilmenau University of Technology), Dr Maria Evelina Mognaschi (University of Pavia), Dr Roberto Galdi (University of Pavia) May 6, 2016, Pavia, Italy.

The authors express their deep gratitude to the aforementioned universities for full support of the project.

ПЕРЕДМОВА

Роботу виконано за проектом Curricula Development for New Specialization: Master of Engineering in Microsystems Design / MastMST, ідентифікаційний номер 530785-TEMPUS-1-2012-1-PL-TEMPUS-JPCR. Програма фінансування ЄК: Міжрегіональна програма Європейського сусідства і партнерства.

Цільова група: студенти, випускники, викладачі та адміністрація університетів, керівники промислових підприємств, міністерство освіти і науки України.

Основною метою проекту є створення умов в українських технічних університетах для навчання за спеціальністю “Проектування та інженерія мікросистем” відповідно до регіональних потреб ринку праці.

У навчальному посібнику розглянуто основні типи мікросистемних пристроїв, їх характеристики, принципи роботи та способи їх виготовлення. Коротко розглянуто моделі елементів і пристроїв МЕМС. Найбільшу увагу приділено гіроскопам, акселерометрам та тензодавачам, наведено класифікації та історію розвитку мікросистемної техніки.

Представлений підручник призначений для студентів, аспірантів та науковців, які спеціалізуються в галузі систем автоматизованого проектування мікросистемних пристроїв.

ЗМІСТ

1	ВСТУП ДО КУРСУ.....	14
1.1	Розвиток мікросистемної техніки.....	14
1.2	Властивості мікросистем.....	20
1.3	Електроніка та інформаційні технології.....	21
1.4	Інвестиції в мікросистемну техніку.....	21
2	ІСТОРІЯ МЕМС.....	23
2.1	Історія та архітектура.....	23
2.1.1	<i>Винахід Біполярного Транзистора (1947р.).....</i>	<i>23</i>
2.1.2	<i>Відкриття п'єзорезистивного ефекту в Si і Ge (1954р.).....</i>	<i>24</i>
2.1.3	<i>Перша інтегральна схема (1958р.).....</i>	<i>24</i>
2.1.4	<i>Перший мікропроцесор (1971р.).....</i>	<i>25</i>
2.1.5	<i>Давачі тиску на кремнієвих пластинах (1960-1970рр.).....</i>	<i>26</i>
2.1.6	<i>Винахід атомно-силового мікроскопа (1986р.).....</i>	<i>26</i>
2.1.7	<i>Перші мікродвигуни (1988р.).....</i>	<i>27</i>
2.1.8	<i>Решітка Модулятора світла (1992р.).....</i>	<i>27</i>
2.1.9	<i>Перші комерційні акселерометри (1993р.).....</i>	<i>28</i>
2.1.10	<i>Розвиток оптики наприкінці 1990-х, початку 2000-х.....</i>	<i>28</i>
2.1.11	<i>Розвиток БіоМЕМС наприкінці 1990-х, початку 2000-х.....</i>	<i>29</i>
3	МІКРОСИСТЕМИ.....	30
3.1	Класифікація мікроелектромеханічних систем.....	30
3.2	Структура мікроелектромеханічних систем.....	36
3.3	Актюатори.....	37
3.4	Давачі.....	40
3.5	Пристрої керування.....	41
4	ВИЗНАЧЕННЯ, КЛАСИФІКАЦІЯ ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ.....	42

4.1	Визначення.....	42
4.1.1	Визначення давач.....	42
4.1.2	Визначення перетворювач.....	42
4.1.3	Визначення актюатор.....	43
4.2	Класифікація давачів.....	43
4.3	Класифікація актюаторів.....	47
4.4	Характеристики давачів та актюаторів.....	48
4.4.1	Передавальна функція.....	49
4.4.2	Опір та узгодження опорів.....	50
4.4.3	Діапазон та амплітуда.....	51
4.4.4	Точність, похибка, нестабільність.....	52
4.4.5	Часова нестабільність.....	55
4.4.6	Чутливість.....	55
4.4.7	Надійність мікросистем.....	57
4.4.8	Похибки.....	60
4.4.9	Гістерезис.....	61
4.4.10	Нелінійність.....	62
4.4.11	Насиченість.....	64
4.4.12	Частотна залежність.....	65
4.4.13	Час відклику.....	66
4.4.14	Калібрування.....	67
4.4.15	Роздільна здатність.....	68
4.4.16	Інші параметри давачів.....	69
5	ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ МСТ.....	70
5.1	SIGA - технологія.....	71
5.2	MUMPs - тенологія.....	72
5.3	Об'ємна мікрообробка.....	75
5.4	Поверхнева мікрообробка.....	76

5.5	Технологія виготовлення LIGA	78
5.6	Глибоке реактивне іонне травлення.....	80
5.7	Фотолітографія	82
5.8	Матеріали для мікрообробки	83
5.9	Рідке хімічне травлення.....	84
5.10	Сплавлення	85
6	ПРОЕКТУВАННЯ МЕМС	87
6.1	Закони пропорційної мініатюризації.....	87
6.1.1	<i>Число Рейнольдса (механіка рідини).....</i>	<i>88</i>
6.1.2	<i>Число Коші (пружні коливання).....</i>	<i>89</i>
6.1.3	<i>Число Вебера (інерція, поверхневий натяг).....</i>	<i>89</i>
6.1.4	<i>Число Фур'є (перехідний процес при перенесенні тепла).....</i>	<i>90</i>
6.1.5	<i>Число Фруда (механіка, конвекція, механіка рідини).....</i>	<i>90</i>
6.2	Проектування мікросистем	91
6.3	Проблеми проектування мікросистем.....	98
6.4	Електродинамічні аналогії в осциляторних системах.....	100
7	ДАВАЧІ.....	106
7.1	Електромагнітні давачі	106
7.1.1	<i>Основні засади електромагнетизму.....</i>	<i>106</i>
7.2	Ємнісні давачі та актюатори	107
7.2.1	<i>Ємність.....</i>	<i>107</i>
7.2.2	<i>Конденсатор.....</i>	<i>108</i>
7.2.3	<i>Розрахунок ємності різних конструкцій конденсаторів.....</i>	<i>109</i>
7.3	Ємнісні позиційні давачі та давачі переміщення.....	112
7.4	Давачі зазору.....	114
7.5	Позиційний давач	115

7.6	Ємнісні давачі рівня рідини	116
7.7	Магнітні давачі та актюатори.....	117
7.7.1	<i>Магнетизм</i>	<i>117</i>
7.8	Індуктивні давачі зазору	118
7.9	Механічні давачі сили.....	119
7.9.1	<i>Тензодавачі.....</i>	<i>120</i>
7.9.2	<i>Дротові тензодавачі.....</i>	<i>124</i>
7.9.3	<i>Фольгові тензодавачі.....</i>	<i>126</i>
7.9.4	<i>Напівпровідникові тензодавачі.....</i>	<i>129</i>
7.9.5	<i>Похибки тензодавачів.....</i>	<i>130</i>
7.9.6	<i>Інші тензодавачі.....</i>	<i>131</i>
7.10	Тактильні давачі	131
7.11	Давачі температури.....	132
7.12	Давачі тиску	136
7.12.1	<i>Принцип роботи та конструкція</i>	<i>136</i>
7.13	Давачі кута - гіроскопи.....	142
7.13.1	<i>Сфери використання гіроскопів</i>	<i>143</i>
7.13.2	<i>Конструкція гіроскопу та принцип роботи.....</i>	<i>144</i>
7.14	Інерційні давачі	147
7.14.1	<i>Ємнісний інерційний давач</i>	<i>148</i>
7.14.2	<i>Сфери використання інерційних давачів.....</i>	<i>150</i>
7.14.3	<i>Конструкція та принцип роботи МЕМС акселерометра....</i>	<i>151</i>
8	АКТЮАТОРИ – ВИКОНАВЧІ МЕХАНІЗМИ	157
8.1.1	<i>Тертя і знос.....</i>	<i>157</i>
8.2	Різні типи мікроактюаторів	161
8.3	Актюатор як компонент мікросистемної техніки	163
8.4	Температурні актюатори.....	164

8.5	Теплові актюатори.....	165
8.6	Принцип роботи термоактюатора.....	166
8.6.1	<i>Переваги теплових мікроактюаторів</i>	<i>167</i>
8.6.2	<i>Недоліки мікроактюаторів</i>	<i>168</i>
8.7	Електроактюатори.....	168
8.8	Термопневматичні актюатори.....	169
8.9	П'єзоелектричні актюатори	170
8.10	Електростатичні актюатори	171
8.11	Електромагнітні актюатори	173
8.12	Ємнісні актюатори.....	176
8.13	Біметалеві термоактюатори	176
8.14	Математична модель електроактюатора	178
8.15	Математична модель мікроактюатора на базі рівнянь в часткових похідних	180
8.16	Мікротурбіни.....	183
8.17	Давачі випромінювання - мікроболометри	189
8.17.1	<i>Інтеграція IR-давачів в автомобільні ІЧ-камери нічного бачення</i>	<i>192</i>
8.17.2	<i>Мікроболометри.....</i>	<i>193</i>
8.17.3	<i>Загальна архітектура мікроболометра.....</i>	<i>194</i>
8.17.4	<i>Модель мікроболометра.....</i>	<i>195</i>
8.17.5	<i>Електрична складова</i>	<i>196</i>
8.17.6	<i>Теплова складова</i>	<i>197</i>
8.18	Цифрові мікродзеркальні пристрої.....	199
8.18.1	<i>Інтегральні мікродзеркала</i>	<i>203</i>
8.19	Інтегральні мікромеханічні ключі.....	208
8.19.1	<i>Параметри мікромеханічних ключів.....</i>	<i>212</i>

8.20	Електромагнітний мікрогенератор.....	215
8.20.1	<i>Аналітична модель.....</i>	216
8.20.2	<i>Моделювання магнітного поля електромагнітного мікрогенератора.....</i>	218
8.20.3	<i>Обмеження при проектуванні мікрогенератора</i>	220
8.20.4	<i>Конструкція електромагнітного мікрогенератора.....</i>	220
8.20.5	<i>Принцип роботи мікрогенератора.....</i>	221
8.20.6	<i>Теоретичні дослідження конструкції плоскої пружини.....</i>	222
8.20.7	<i>Коливання системи маса-пружина.....</i>	224
8.20.8	<i>Вибір матеріалу.....</i>	225
8.21	Електростатичні мікродвигуни.....	225
8.22	Гідравлічні актюатори.....	228
8.22.1	<i>Класифікація мікропомп.....</i>	229
8.22.2	<i>Механічні мікронасоси.....</i>	231
8.22.3	<i>Електростатичні мікронасоси</i>	232
8.22.4	<i>П'єзоелектричні мікронасоси</i>	233
8.22.5	<i>Термопневматичні мікронасоси</i>	233
8.22.6	<i>Мікропомпи з ефектом пам'яті форми</i>	234
8.22.7	<i>Біметалеві мікропомпи.....</i>	235
8.22.8	<i>Електромагнетичні мікронасоси</i>	236
8.22.9	<i>Немеханічні мікронасоси.....</i>	237
8.22.10	<i>Магнітогідродинамічні насоси (МГД).....</i>	238
8.22.11	<i>Електрогідродинамічні мікронасоси (ЕГД).....</i>	239
8.22.12	<i>Електроосмотичні мікронасоси (ЕО).....</i>	239
8.22.13	<i>Насос на електрозмочуванні.....</i>	241
8.22.14	<i>Мікропомпи бульбашкового типу.....</i>	243
8.22.15	<i>Електрохімічні мікронасоси.....</i>	243
	СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	245

ВСТУП

На сьогоднішній день мікросистемна техніка (МСТ) продовжує стрімко розвиватися. Такий тривалий і незупинний розвиток відбувається за рахунок ключових переваг мікропристроїв, а саме: надійності, точності, малих розмірів і низького енергоспоживання. МСТ технології застосовуються у багатьох галузях, як для масового виробництва, такого як побутова електроніка (охоронні системи, мобільні телефони, комп'ютерна техніка та т. ін.), автомобілебудування (системи пасивного та активного захисту пасажирів), так і в прецизійній техніці дрібносерійного виробництва – медичному устаткуванні, військовій і авіаційній техніці. Це можуть також бути мініатюрні деталі (гідравлічні і пневмоклапани, струменеві сопла принтера, пружини для підвіски головки вінчестера), мікроінструменти (скальпелі і пінцети для роботи з об'єктами мікронних розмірів), мікромашини (мотори, насоси, турбіни завбільшки з горошину), мікророботи, мікродавачі і виконавчі пристрої, аналітичні мікролабораторії (на одному кристалі) і т.д.

Дану галузь індустрії в Японії називають мікромашини (Micromachines), в Європі – мікросистемні технології (Micro System Technology) а в США – мікроелектромеханічні системи МЕМС (Microelectromechanical systems). В Україні існують наукові школи (Петренка А.І., Сігорського В.П., Рогози В.С., Смеркла Л.М., Хаханова В.І., Мачуліна В.Ф.), роботи яких частково вирішують задачі мікросистемної техніки. Також до першопрохідців у галузі мікросистемної техніки можна віднести Миколу Сядристого, який є автором найменшого у світі працюючого електромотора, розмір якого становить $1/20 \text{ мм}^3$, що в порівнянні з розмірами макового зернятка менше майже в 20 разів. Даний мотор Микола Сядристий розробив для найменшого у світі годинника (рис. 1.1), який у свою чергу помістив у очі бабки. Мотор і годинник складаються із 130 деталей, розмір яких соті і тисячні частки міліметра. Виконані ці деталі із золота та скла.



Рис. 1.1 Бабка з вмонтованим у її очі електричним годинником [1]

Динамічний розвиток високоточних технологій дає змогу не тільки проектувати і виготовляти технічні системи все менших розмірів, але і об'єднувати в межах одного компактного пристрою все більше число функціональних можливостей. Інтеграція в одному пристрої досягнень в області мікроелектроніки, механіки, оптики та інших областей науки привела до створення мікроелектромеханічних систем (МЕМС). МЕМС – це виконані на одному кристалі датчик та актюатор, розмірами елементів порядку сотень мікрометрів. Такі системи виготовляються із застосуванням технологій мікроелектроніки, але відрізняються від мікроелектронних пристроїв наявністю просторової розмірності. Якщо виробі мікроелектроніки планарні і механічно статичні, то МЕМС техніка – це реальні тривимірні конструкції, окремі елементи яких повинні мати свободу механічних переміщень в просторі.

Специфіка проектування і розрахунку таких складних пристроїв обумовлена передусім масштабним чинником, який проявляється в тому, що закони макрофізики, не завжди коректні для опису поведінки мікрооб'єктів. Таким чином, проектування продуктивних МЕМС вимагає спільних зусиль фахівців з різних областей науки і додаткових досліджень, які б дозволили коректувати модельні уявлення про виробі, що проектуються. Крім досягнення найкращих робочих характеристик пристрою, оптимальне проектне рішення потребує зменшення використання дорогих матеріалів та трудомістких процесів, необхідних для виготовлення пристрою.

Тільки комп'ютерне моделювання дозволяє визначати механічні та фізичні параметри компонентів пристрою та знаходити оптимальні конструктивні співвідношення, не вдаючись до дорогих експериментальних досліджень. Саме тому комп'ютерне моделювання та його автоматизація є одним з основних рушіїв розвитку МЕМС.

Даний підручник має наметі роз'яснити основні принципи роботи мікросистемних пристроїв та способу їх проектування та виготовлення.

1 ВСТУП ДО КУРСУ

1.1 Розвиток мікросистемної техніки

Мікросистемні технології (МСТ) почали розвиватися ще з середини ХХ ст. і, отримуючи щоразу нові поштовхи з боку нових винаходів, чергових удосконалень технологій, нових галузей науки та техніки, динамічно розвиваються і дедалі ширше застосовуються у широкому спектрі промислової продукції у всьому світі. Сама галузь мікросистемних технологій (МСТ) почала свій розвиток з амбіційного проекту однієї американської лабораторії, що працювала з напівпровідниками. В 60-х роках ними запропоновано і виготовлено кремнієву мікромембрану на кристалі кремнію із застосуванням технологій, що, зазвичай, використовуються для виготовлення напівпровідникових пристроїв. Таку мембрану запропоновано застосовувати у вимірювачах тиску замість звичайних металевих. Переваги такої розробки здавалися незаперечними, хоча і вимагали удосконалення технологічного процесу та методики вимірювань переміщень мембрани. Проте чи не найбільшого поштовху розвитку мікросистемних технологій було надано у 80-х роках – удосконалені технологічні процеси оброблення матеріалів, нові матеріали, поява принципово нового обладнання, використання можливостей електронно-обчислювальної техніки тощо, – все це принципово змінило підхід до виготовлення мікросистем. Назва “мікросистемні технології” (МСТ) вживається найчастіше в Європі, у країнах Америки здебільшого використовують назву “мікроелектромеханічні системи” (МЕМС), а в країнах Азії поширена назва “мікромашини” або “мікронаука”, натякаючи на значну частку наукової роботи інженерів цієї галузі. За такою назвою ховається значний обсяг наукових досягнень у різноманітних галузях. Сам по собі пристрій МЕМС є поєднанням електричних та механічних елементів в одну систему мініатюрних розмірів (значення розмірів механічних елементів найчастіше лежать у мікронному діапазоні), і достатньо часто такий пристрій містить контролер керування для здійснення запрограмованих дій у системі та

обміну інформацією з іншими приладами та системами. Класифікація пристроїв МЕМС є достатньо об'ємною та, наразі, неусталеною. Це пов'язано з великою кількістю можливих застосувань, появою щоразу нових пристроїв та їхнім використанням у нових галузях. Пристрої МЕМС можна класифікувати за сферою застосування, за кількістю використаних елементів, за розмірами усієї конструкції, за використаними фізичними явищами, за технологією виготовлення тощо. Зосередження різноманітних та різнорідних елементів в одній системі змушує об'єднувати різноманітні технології, характерні для певного виду елементів. Інколи розробникам доводиться винаходити нові технологічні процеси та принципи для оптимального виготовлення та розміщення необхідної кількості різних елементів. Навіть з побіжного аналізу структури МЕМС зрозуміло, що сумарний технологічний процес є дуже складним і тривалим. Так, залежно від складності пристрою технологічний процес його виготовлення, навіть із застосуванням сучасних технологій, може тривати від кількох днів до кількох десятків днів. Попри саме виготовлення, доволі тривалими є перевірка та відбраковування. Часто виготовляється відразу партія однотипних пристроїв, причому вихід якісної продукції часто не перевищує 2 %. З іншого боку, достатньо зручно та доцільно розглянути внутрішню будову та принципи функціонування таких пристроїв, що забезпечує ґрунтовніше розуміння пристрою.

Розвиток мікроелектроніки призвів до безпрецедентного зростання обчислювальних потужностей. Підвищення ефективності і безпеки виробництва і транспорту, моніторинг і діагностика стану атмосфери, вод і ґрунтів, нові можливості для медицини і охорони здоров'я, рішення інших глобальних проблем – ось коло кардинальних змін, які обіцяє інформаційна революція.

Необхідний новий рівень зв'язку зовнішнього світу із віртуальним. Існуючі виробництва і величезний парк різнотипних давачів тільки у першому початковому наближенні відповідають сьгоднішнім вимогам.

Рішення має забезпечувати виробництво в кількостях, які значно перевищують сьогоденний парк давачів, акселерометрів дешевшими і більш уніфікованими засобами.

MEMS і ширша область - мікросистемна техніка (МСТ) виникли і розвиваються на основі використання модифікованих технологій мікроелектроніки. Як і мікросхеми, їх виготовляють груповими методами, що забезпечують масові тиражі і низьку вартість одиничного виробу. MEMS давачі призначені для сприйняття зовнішніх механічних, теплових, хімічних дій тощо, а не тільки для перетворення, обробки і передачі електричних сигналів. Більш того, в рамках мікросистемної техніки створюються пристрої які активно взаємодіють із зовнішнім світом, тобто «актюатори»: різноманітні клапани, помпи, мікродвигуни тощо.

Багате «придане» мікроелектроніки створило потужний фундамент: це надчисті матеріали і прецизійна точність, технології проектування і розвинута інфраструктура розробки, виробництва і продаж. Природно, що все це вимагає адаптації і розвитку.

Мікросистемна техніка (МСТ) в даний час є одним з найдинамічніших міждисциплінарних науково-технічних напрямків. Стрімкий розвиток МСТ-технологій за останні роки показав величезний потенціал цієї галузі та дозволив реалізувати безліч елементів, які неможливо виготовити з використанням макротехнологій. Багато країн оголосили мікросистемні технології одними з найважливіших пунктів своєї національної програми.

Мікросистеми виготовляються за технологією інтегральних схем (ІС). Саме інтегральна технологія дала змогу в сотні разів знизити вартість мікросистем. Першими елементами МСТ, що з'явилися в 80-х роках, були давачів тиску та акселерометри. В останні 5 років в МСТ-індустрії спостерігається бурхливе зростання завдяки розробці нових продуктів, таких як оптичні ключі, дисплеї з плоским екраном та інші давачі. Прогнозований великий ринок збуту для МСТ продукції є причиною високого інтересу до досліджень в області МСТ.

Найважливішою особливістю мікросистем є те, що їх розробка пов'язана з різними областями фізики, такими як механіка, електромагнетизм, гідродинаміка, теорія пружності та інші. Проте теорії, придатні для макрооб'єктів, не завжди коректні для опису поведінки об'єктів у мікросвіті. Тому розробка моделей інтегральних елементів, що дозволяють враховувати їх розміри, є одним з основних напрямів розвитку МСТ. Моделювання дозволяє визначати механічні та фізичні параметри елементів, знаходити оптимальні конструктивні співвідношення, не вдаючись до експериментальних досліджень. Також не завжди можливо виміряти такі фізичні величини, як температурне поле або розподіл швидкості в потоці газу в мікро масштабах, не вносячи в них змін. Проте дані величини відіграють важливу роль в термодавачах, які побудовані на конвективній теплопередачі.

Характерною рисою XXI століття є розвиток вбудованих систем, які знаходять все більше використання у всіх сферах життєдіяльності людини. Прикладами таких вбудованих систем є:

- вбудована система контролю і стабілізації вмісту цукру в крові людини, хворої на цукровий діабет;
- мікро роботи;
- охоронні системи.

1.1 Термінологія

МСТ (Micro Systems Technology - Мікросистемна техніка) - гібрид MEMS і іншої технології мікромеханічної обробки, подібної до MEMS, але з дещо більшими можливостями.

MEMS (MicroElectroMechanical Systems – Мікроелектромеханічні Системи) - розширення технології виготовлення інтегральних схем. Технологія виготовлення плоских і об'ємних пристроїв спільно з технологією виготовлення великих інтегральних схем.

Нанотехнології (Nanotechnology) дія досягається через безпосередній контроль (керування) на рівні атомів і молекул.

NEMS (NanoElectroMechanical Systems – наноелектромеханічні системи) – системи виготовлені на основі нанотехнології. Поняття нанотехнології міцно входить у наше життя, а ще в 1959 р знаменитий американський фізик-теоретик Ричард Фейнман говорив про те, що існує "разюче складний світ малих форм, а коли-небудь (наприклад в 2000 р) люди будуть дивуватися тому, що до 1960 р ніхто не ставився серйозно до досліджень цього світу. На першому етапі розвиток нанотехнологій визначався в основному створенням пристроїв зондової мікроскопії. Ці пристрої є своєрідними очима і руками нанотехнологій. Сьогодні прогрес в галузі нанотехнології пов'язаний з розробкою наноматеріалів для аерокосмічної, автомобільної, електронної промисловості. Але поступово все частіше згадуються як перспективна область застосування нанотехнологій – медицина.

Однією із найбільших областей, яку завоювала мікросистемна техніка (МСТ) і де дуже швидко завойовує нові позиції – це давачі. У більшості випадків система складається із таких основних складових: пристрої отримання інформації (давачі), пристрої передачі, опрацювання, прийняття рішення і, нарешті, виконуючих пристроїв (актюаторів) (див. рис. 1.1).

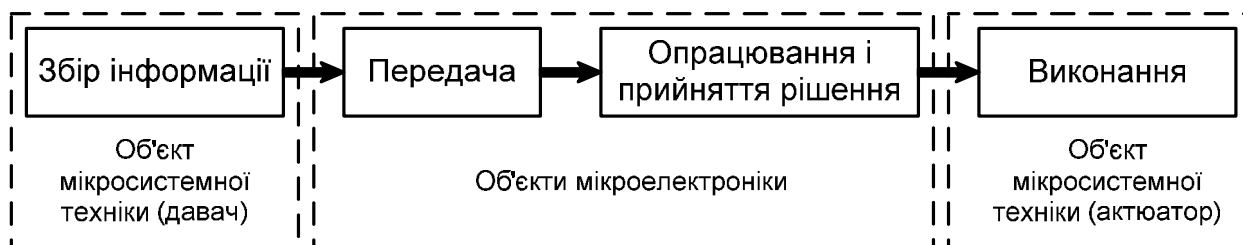


Рис. 1.1 Типова схема вбудованої системи

В останні роки в питаннях передачі і опрацювання інформації мікроелектроніка дала змогу отримати вражаючі результати. Головним об'єктом уваги МСТ стали давачі і виконавчі механізми (актюатори).

Основними завданнями мікросистемної техніки є інтеграція конструкцій і технологій з метою зменшення ваги, розмірів, зменшення частки ручної праці, і, як наслідок, зниження собівартості.

У давачах, як правило, здійснюється перетворення різних форм енергії в електричний сигнал. Види енергії, перетворення, якої повинні забезпечити

давачі представлено на рис. 1.2. Натомість типи давачів, які призначені для перетворення різних видів енергії в електричний сигнал за допомогою мікроелектронних перетворювачів наведено на рис. 1.3.



Рис. 1.2 Види енергії

МЕХАНІЧНА	•Тензорезистори, тензодіоди, транзистори, ємнісні перетворювачі, діод Ганна, мікроелектроди
АКУСТИЧНА	•П'єзоперетворювачі, тензопреобразователь
ЕЛЕКТРИЧНА	•Мікроелектроди, іоночувствительные прилади
МАГНІТНА	•Датчики Холла, Магніторезистори, магніодіоди, магнітотранзисторах
ТЕПЛОВА	•Терморезистор, діоди, транзистори, піроелектрони
СВІТЛОВА	•Фоторезистори, фотодіоди, фототранзистори, ПЗС
ХІМІЧНА	•Мікроелектроди, Хемотронніе прилади, іоночувствительные прилади
ЯДЕРНА	•Напівпровідникові детектори випромінювання

Рис. 1.3 Приклади перетворення різних видів енергії

Для того, щоб показати важливість та актуальність розвитку мікросистемної техніки на рис. 1.4 наведено приклад використання тільки невеликої кількості датчиків, які використовуються в сучасному автомобілі.



Рис. 1.4 Датчики, які використовують в сучасному автомобілі

На сьогоднішній день для автомобілебудування актуальною залишається задача розробки наступних датчиків:

- прискорень систем безпеки;
- залишкової ємності акумулятора;
- небезпеки зближення, перешкод;
- навігації та діагностики і т.д.

Найбільш швидко прогресують в області мікросистемної техніки датчики вимірювання параметрів руху, хімічного складу, тиску і температури.

1.2 Властивості мікросистем

Властивості мікросистем багато в чому відрізняються від властивостей більших об'єктів, що складаються з тих же самих атомів і молекул. Наприклад, наночастки платини набагато ефективніше очищають автомобільні вихлопи від токсичних забруднювачів, ніж звичні платинові каталізатори. Одношарові і багатшарові графітні циліндри нанометрової товщини, так звані вуглецеві нанотрубки, прекрасно проводять електрику і тому можуть стати заміною

мідним дротам. Нанотрубки також дозволяють створювати композитні матеріали виняткової міцності і принципово нові напівпровідникові і оптоелектронні пристрої. На сучасному етапі нанотехнології використовують під час виробництва особливих видів скла, на яких не осідає бруд (застосовується в автомобіле- і авіабудуванні), під час виробництва чорнил; для виробництва одягу, який неможливо забруднити і пом'яти і так далі. [2]

1.3 Електроніка та інформаційні технології

Особливі надії на нанотехнології покладають фахівці у галузі електроніки та інформаційних технологій. У 1965 році можна було вмістити на одному чіпі лише 30 транзисторів. У 1971 році — 2 тис. Нині один чіп містить близько 2 млрд. транзисторів величиною 14 нанометрів, і вже створено технологію розміром 10 нанометрів. Цей процес зробив складну електронну і комп'ютерну техніку доступною для більшості споживачів: у 1968 році один транзистор коштував у США \$1, нині за ці гроші можна придбати 50 млн транзисторів. У 1965 році Гордон Мур, фахівець у сфері фізичної хімії, зробив знамените передбачення, яке було названо «Закон Мура». «Закон Мура» говорить, що число транзисторів на чіпі буде подвоюватися кожні 18 місяців. Протягом декількох десятиріч цей прогноз доводив свою точність. Нині виробники комп'ютерних чіпів зіштовхнулись із складностями мініатюризації: щоб продовжував діяти «Закон Мура», потрібно, щоб транзистор був не більшим 9 нанометрів. За прогнозом Міжнародного Консорціуму Напівпровідникових Компаній, цей рівень розвитку технології буде досягнуто до 2016 року. [3]

1.4 Інвестиції в мікросистемну техніку

Мікротехнології є однією із провідних сфер новітніх технологій, кількість інвестицій в яку збільшується із року в рік, на фоні зменшення обсягу інвестицій в інших сферах. Консультативна Рада з проблем науки і технології при Президенті США (PRESIDENT'S Council of Advisors on Science and Technology) підготувала доповідь, у якій аналізується нинішній рівень розвитку

нанотехнологій в США та в інших науко-творчих країнах і оцінюються перспективи подальшого прогресу в цій новітній сфері наукових досліджень та технологічних розробок. У доповіді підкреслюється, що в наш час Сполучені Штати є світовим лідером у області нанотехнологій. На частку США припадає чверть світових інвестицій у цю сферу і не менше половини статей по нанотехнологіях, публікованих в найавторитетніших професійних журналах. Америка також лідирує за кількістю патентів, які присуджуються за нанотехнологічні розробки. В цілому американські фахівці тримають дві третини таких патентів, виданих останніми роками. Автори доповіді попереджають, що конкуренція у сфері нанотехнологій останніми роками загострилася і, безумовно, посилюватиметься і в осяжному майбутньому. Країни Євросоюзу, Японія і Китай в наш час щорічно виділяють на ці програми зі своїх бюджетів приблизно по \$900 млн, що ненабагато менше американських федеральних витрат.

2 ІСТОРІЯ МЕМС

2.1 Історія та архітектура

За великим рахунком, початком розвитку МЕМС можна вважати 1954 рік. Саме тоді був відкритий п'єзорезистивний ефект кремнію і германію, який ліг в основу перших давачів тиску і прискорення. Через 20 років - в 1974 році - компанією National Semiconductor вперше налагоджено масове виробництво давачів тиску. А в 1990-х роках ринок мікроелектромеханічних систем значно виріс завдяки початку використання різних мініатюрних давачів в автомобільній електроніці.

MEMS-системи отримали приставку «мікро-» через свої розміри. Складові частини таких пристроїв мають розміри від 1 до 100 мкм, а розміри готових систем варіюються від 20 мкм до 1 мм.

Створення мікроелектромеханічних систем (МЕМС) і пристроїв відбулося одночасно в багатьох місцях і завдяки ідеям та зусиллям великої кількості людей. У всьому світі нові технології МЕМС і додатки з'являються щодня.

Розглянемо деякі етапи, які внесли вагомий вклад в розвиток МЕМС, про які ми знаємо сьогодні.

2.1.1 Винахід Біполярного Транзистора (1947р.)

Транзистор використовує електричний струм або незначні зміни напруги для підсилення струму або напруги. Транзистори є основними складовими для побудови комп'ютерів, стільникових телефонів, і всієї сучасної електроніки.

Біполярний транзистор винайшли в 1947 році Джон Бардін і Волтер Браттейн під керівництвом Шоклі із Bell Labs за що отримали Нобелівську премію з фізики. Вперше його продемонстрували 16 грудня, а 23 грудня відбулось офіційне представлення винаходу і саме ця дата вважається днем відкриття транзистора. Для побудови першого транзистора використаний

германій. Продемонстрована можливість створення транзисторів з напівпровідникових матеріалів.



Рис. 2.1 Перший польовий транзистор (1947р.) [4]

2.1.2 Відкриття п'єзорезистивного ефекту в Si і Ge (1954р.)

У 1954 році Ч. Сміт. виявив, що п'єзорезистивний ефект напівпровідників може бути на кілька порядків більший, ніж у металах. Це відкриття показало, що кремній і германій реагують на тиск повітря або води краще, ніж метали. На сьогоднішній день п'єзорезистивний ефект в кремнії використовується в багатьох пристроях МЕМС, таких як тензодавачі, давачі тиску і акселерометри.

Тензометри почали розвиватися на комерційній основі в 1958 році. В 1959 році, як перший комерційний проект – реалізовано давачі деформації.

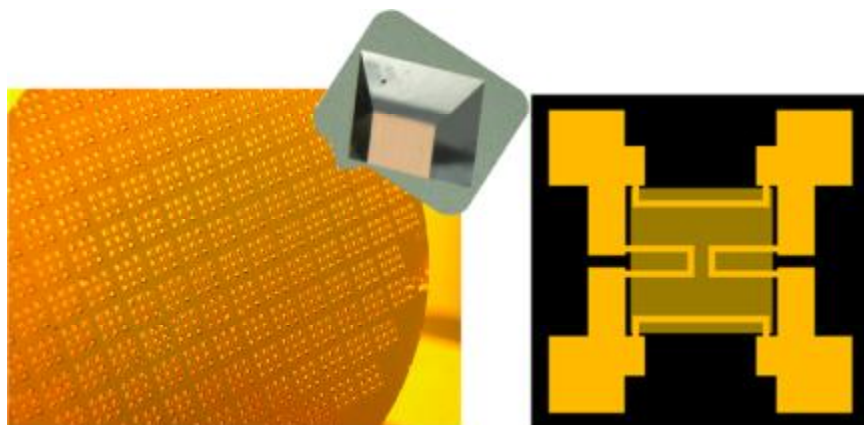


Рис. 2.2 Приклад п'єзорезистивного давача тиску [5]

2.1.3 Перша інтегральна схема (1958р.)

До винаходу інтегральної схеми (ІС) існували обмеження на мінімальний розмір транзисторів. Вони повинні були мати достатній розмір, щоб їх можна

припаяти до електричної плати. ІС включає в себе транзистори, резистори, конденсатори і провідники.

У 1958 році побудовано першу інтегральну схему на одному кристалі германію, яка містила в собі 1 транзистор, 3 резистори і 1 конденсатор. Інтегральна схема складалася з кристалу германію близько 11 мм завдовжки, мідного та золотого дроту та скляної пластини (див. рис. 2.3). Її творці були натхненні невдалою спробою британського інженера Джеффри Друммера побудувати подібну схему в 1956 р. У 1958 р. компанія Texas Instruments взяла Джека Кірбі на роботу, щоб він знайшов спосіб мініатюризації схем. Після експериментів з кремнієм, він врешті-решт придумав першу інтегральну схему з використанням германію замість кремнію. У липні того ж року Том Єрган приєднався до команди і вчені побудували перші 3 прототипи на основі конструкцій Кірбі. У 2000 р. Кірбі було присуджено Нобелівську премію з фізики.

Перші інтегральні схеми коштували по 450 \$, у той час як сучасні мають набагато меншу ціну. Тим не менш, історичне значення першої інтегральної схеми велике.

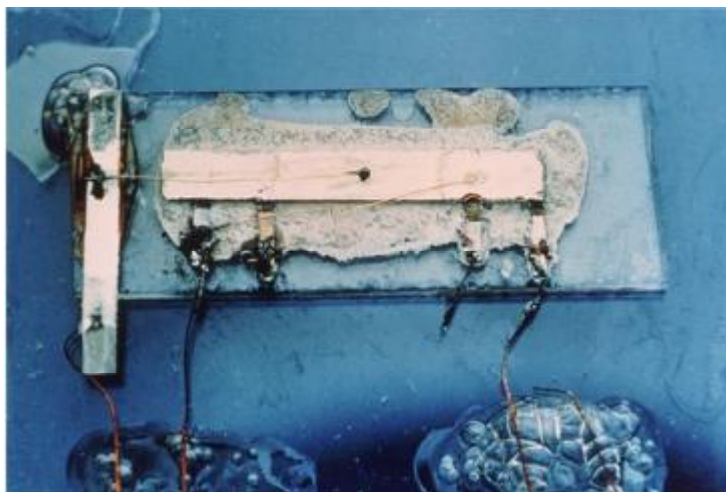


Рис. 2.3 Перша інтегральна схема розроблена Texas Instrument's [6]

2.1.4 Перший мікропроцесор (1971р.)

У 1971 році компанія Intel публічно представила перший у світі мікропроцесор - Intel 4004 (). У 1969 році невеличка японська компанія Nippon Calculating Machine, Ltd. (Згодом Busicom Corp.), що займалася виробництвом

калькуляторів, замовила у Intel 12 мікросхем, які повинні були використовуватися в новому настільному калькуляторі. Цей винахід відкрив шлях для розробки перших персональних комп'ютерів.

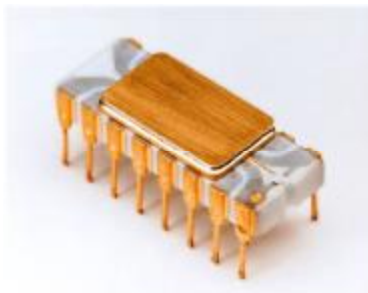


Рис. 2.4 Мікропроцесор Intel 4004 [7]

2.1.5 Давачі тиску на кремнієвих пластинах (1960-1970рр.)

Запропоновано новий метод часткового виготовлення МЕМС - анізотропне травлення кремнію. Цей метод лежить в основі процесу масової мікрообробки. У 1970-х роках розроблені мікромеханічні давачі тиску з використанням кремнієвої мембрани, розробленої Курт Петерсоном з дослідницької лабораторії ІВМ.

2.1.6 Винахід атомно-силового мікроскопа (1986р.)

У 1986 році фірма ІВМ розробила атомно-силовий мікроскоп для дослідження мікроповерхонь. В атомно-силовому мікроскопі поверхню сканує тонкий щуп, розташований на кінці консольної балки, яку називають кантилевером (див. рис. 2.5). Високоточне переміщення поверхні під щупом забезпечують п'єзоелектричні елементи, які змінюють свою довжину в залежності від прикладеної напруги. Рухаючись над нерівною поверхнею, щуп підіймається і опускається, і ці дуже малі вертикальні переміщення вимірюються за допомогою лазерного променя, який падає на верхню поверхню консольної балки з прикріпленим дзеркалом. Хоча вертикальні переміщення дзеркала дуже малі, відбитий від нього промінь відхиляється на достатній кут, щоб його можна було виміряти за допомогою матричного фотодетектора. Отриманий сигнал аналізується за допомогою електроніки й перетворюється в зображення поверхні. Для забезпечення постійної сили між

поверхнею та щупом і запобігання пошкоджень, використовується електронний механізм зворотного зв'язку. Кантилевер, як правило виготовляється з кремнію або нітриду кремнію.

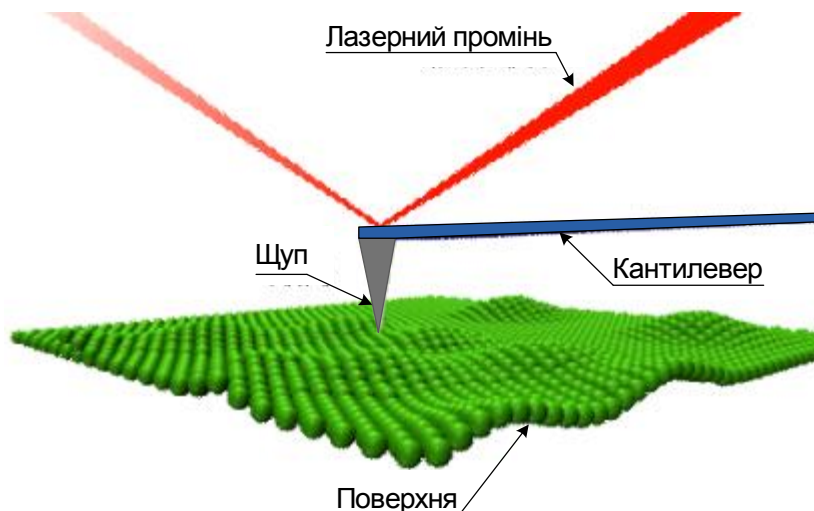


Рис. 2.5 Схема роботи атомно-силового мікроскопу [8]

2.1.7 Перші мікродвигуни (1988р.)

У 1988 році розроблені і виготовлені приводні двигуни електростатичного типу в Каліфорнійському університеті в Берклі. На рис. 2.6 показано знімок першого роторного електростатичного двигуна.

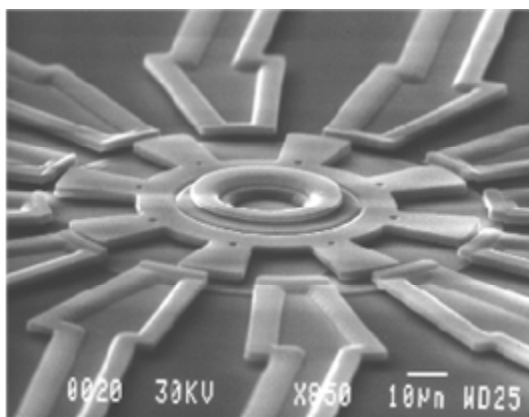


Рис. 2.6 Перший роторний електростатичний двигун [9]

2.1.8 Решітка Модулятора світла (1992р.)

Решітка модулятора світла (GLV) розроблена Солгардом в 1992 році. Технологія Grating Light Valve (GLV) являється засобом виготовлення модуляторів SLM на поверхні кремнієвого кристалу і включає послідовність мікроскопічних смуг. В її основі – простий оптичний принцип, який варіює

інтерференцію світла для контролю дифракції (огинання хвилями перешкод, відхилення від прямолінійного руху) на кожному GLV-пікселі. GLV – функціонує, як динамічна, дифракційна решітка, що налаштовується, яка представляє собою сукупність великого числа регулярно розміщених штрихів на кремнієвій поверхні, яка може переключати, ослаблювати і модулювати лазерний промінь із високою точністю.

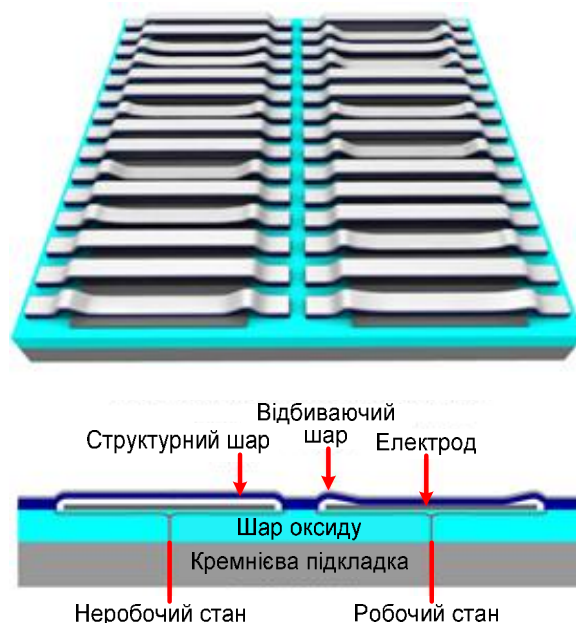


Рис. 2.1 Решітка модулятора світла [10]

2.1.9 Перші комерційні акселерометри (1993р.)

У 1993 році Analog Devices першою виготовила мікромеханічні акселерометри з високою чутливістю і надійністю. В автомобільній промисловості використовували цей акселерометр в подушках безпеки. Вони продавались за 5\$ (раніше, акселерометри макродавачі коштували близько 20\$). Це був дуже надійний пристрій, споживав дуже мало енергії, і був порівняно дешевим. Даний пристрій був закуплений всіма провідними автомобільними компаніями, що дало змогу збільшити наявність подушок безпеки в автомобілях.

2.1.10 Розвиток оптики наприкінці 1990-х, початку 2000-х

У 1999 році Lucent Technologies розробила перший оптичний комутатор мережі. Оптичні перемикачі оптоелектричних пристроїв. Комутатор підтримує

функцію перемикачів в мережі передачі даних. Ці MEMS оптичні перемикачі використовують мікродзеркала для перемикачів або відбивання оптичного каналу або сигналу з одного місця в інше. В даній області і далі спостерігається бурхливий розвиток.

2.1.11 Розвиток БіоMEMS наприкінці 1990-х, початку 2000-х

Вчені поєднали датчики і актуатори з новими напрямками біотехнології, а саме:

- систем доставки ліків;
- інсулінові помпи;
- дослідження ДНК-масивів;
- лабораторії на чіпі (LOC);
- глюкометри;
- мікрофлюїдика.

3 МІКРОСИСТЕМИ

3.1 Класифікація мікроелектромеханічних систем

Інформаційні процеси в електроніці і бурхливий розвиток технології призвели до створення нового класу мікроелектронних пристроїв – мікроелектромеханічних систем. Мікроелектромеханічні системи поєднують мікроелектроніку, яка базується на кремнієвій технології, з технологією механічної мікрообробки, внаслідок чого вдається реалізувати на одному кристалі нові мікропристрої, або по іншому їх називають “системи на чіпі” чи мікроелектромеханічні системи. Отже, МЕМС технологія – це технологія проектування та виготовлення пристроїв, які дають змогу розширити функціональні можливості мікроелектроніки сприймаючи неелектричну інформацію та керувати виконуючими мікропристроями.

У цьому випадку, інтегральні схеми (ІС) можна розглядати як “мозок” вбудованої системи, а пристрої сприйняття інформації (давачі) та виконуючі пристрої (актюатори) – як “очі” та “руки”.

Отже, вбудована система об’єднує в собі три основні складові (рис. 3.2):

- пристрої перетворення неелектричної інформації в електричні сигнали (давачі);
- мікропроцесорні системи обробки отриманої інформації;
- виконуючі пристрої (актюатори).

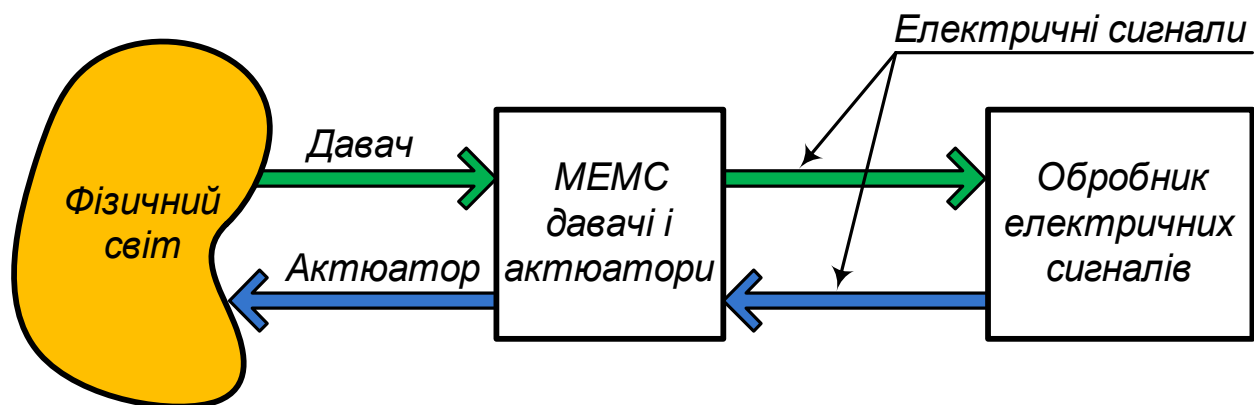


Рис. 3.1 Загальна схема вбудованої системи

Пристрої перетворення неелектричної інформації в електричний сигнал дають можливість зчитувати дані про стан зовнішнього середовища. До цих засобів належать давачі.

Мікропроцесорна система опрацьовує отриману інформацію та видає керуючий сигнал для виконуючого пристрою, який виконує ті чи інші дії. Як правило, виконуючі пристрої, або інакше їх називають актюаторами, які перетворюють енергію електричного сигналу в механічний рух.

Структурна схема основних компонентів мікроелектромеханічної системи зображена на Рис. 8.1. Вона включає такі галузі, як електроніка, матеріалознавство, спеціалізовані компоненти MEMS – давачі і актюатори.



Рис. 3.2 Структура компонентів мікроелектромеханічних систем

Особливістю цієї структурної схеми є те, що вона включає таку галузь науки, як матеріалознавство. Оскільки матеріали, що використовуються в мікроелектроніці, не дозволяють забезпечити повною мірою, необхідні вихідні характеристики давачів та актюаторів (Si, SiC, Si₃N₄, SiO₂, Al₂O₃, AlN). Тому, останнім часом, надзвичайно активно виконуються наукові роботи з дослідження нових матеріалів [11, 12], які в найближчому майбутньому будуть активно використовуватися в виробництві вбудованих систем.

Залежно від фізичних принципів дії давачів та актюаторів усі мікроелектромеханічні системи можна розділити на групи, які, в свою чергу,

залежать від таких галузей науки і техніки, як електрика, механіка, оптика та біологія (рис. 3.3).

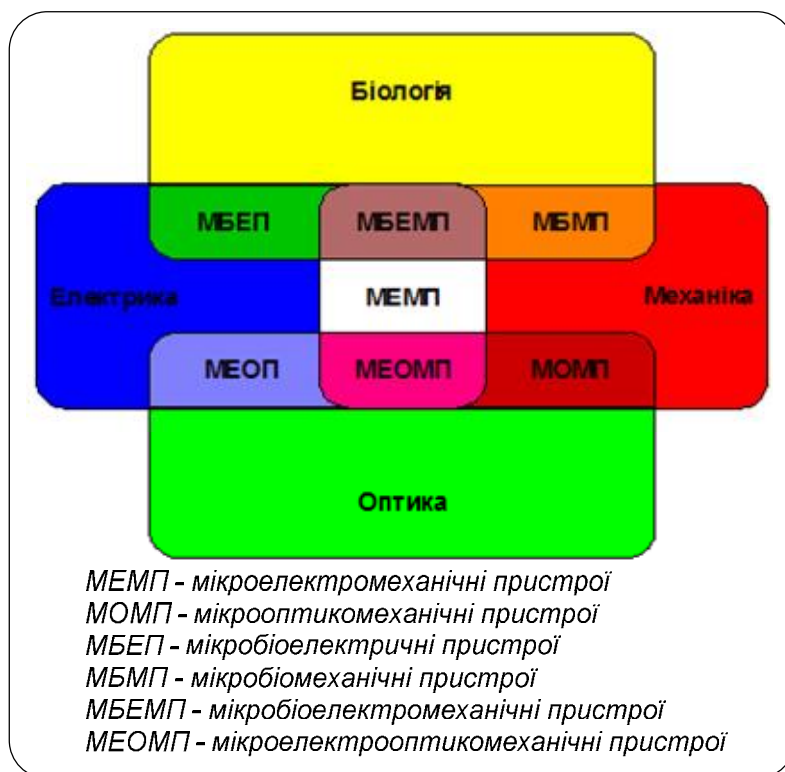


Рис. 3.3 Класифікація мікроелектромеханічних систем за фізичним принципом дії

Поєднання цих основних галузей науки дає змогу провести класифікацію мікроелектромеханічних систем за групами, як це показано на рис. 3.3.

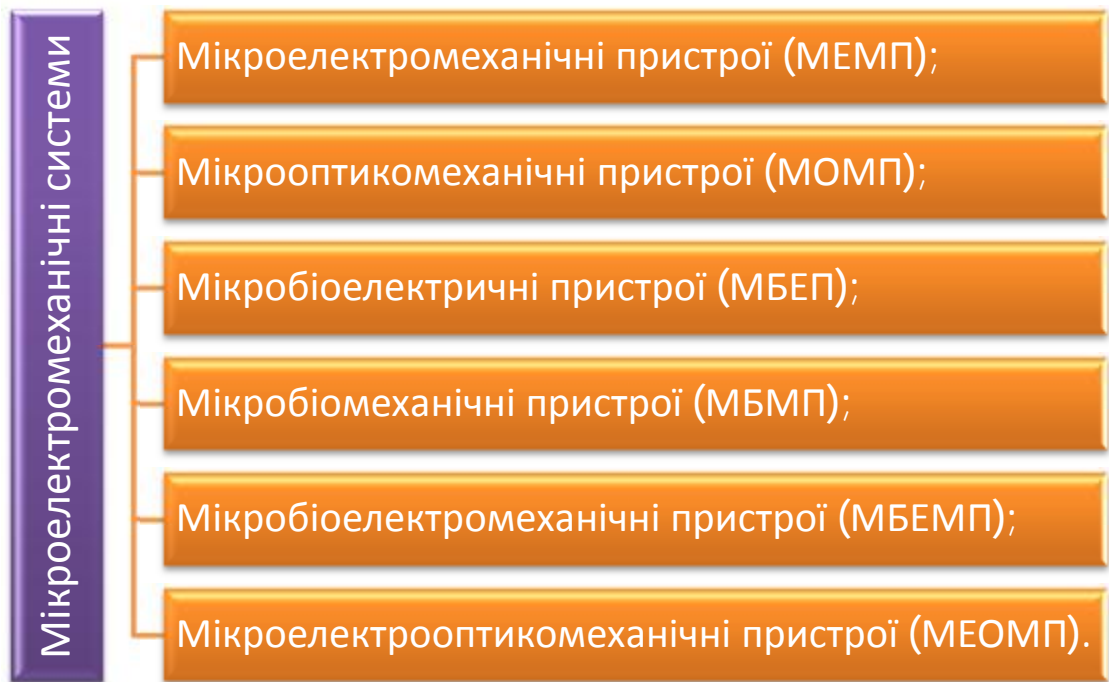


Рис. 3.4 Класифікація мікроелектромеханічних систем за групами

Треба зазначити, що в західній науковій пресі термін MEMS (Мікроелектромеханічні системи), досить часто застосовують до всіх зазначених вище мікропристроїв. Проведення такої класифікації дозволяє чітко розділити мікроелектромеханічні системи за фізичним принципом їх дії.

Розглянемо детальніше кожну з наведених вище груп мікроелектромеханічних систем.

МЕМП передбачають, що цей пристрій виконує перетворення електричної енергії в механічний рух чи механічні переміщення в електричний сигнал.

Мікрооптоелектромеханічні пристрої (МОЕМП) забезпечують виконання різних функцій за рахунок управління оптичним сигналом або перетворення оптичного впливу за допомогою електромеханічного мікропристрою. МОЕМП включає в себе широкий спектр пристроїв, включаючи оптичний перемикач, мікроболометри тощо. Ці пристрої, як правило, виготовлені з використанням мікрооптики і стандартної технології мікрообробки, використовуюючи матеріали, такі як кремній, діоксид кремнію, нітриду кремнію і арсеніду галію.

Електроmechanічні мікропристрої - мікропристрої, які забезпечують виконання функцій за рахунок перетворення електричної енергії в механічну;

Теплофізичні мікропристрої: пристрої, що забезпечують виконання функцій за рахунок накопичення і перетворення в мікрооб'ємах теплової енергії в інші види енергії;

Флюїдні мікропристрої: пристрої, що забезпечують виконання функцій за рахунок локалізації, перебігу, поділу, зберігання в мікро- і нано кількості рідини або газу, а також їх фізико-хімічних перетворень під дією зовнішніх електричних, магнітних, оптичних, механічних, теплових і хімічних впливів;

Біотехнічні мікропристрої: пристрої, що забезпечують виконання виконавчих функцій за рахунок інтеграції з об'єктами і речовинами біологічної природи;

Разом з тим варто зауважити, що дана класифікація може зазнати суттєвої зміни, оскільки з'явилися мікроелектромеханічні системи, що використовують для своєї роботи інші фізичні принципи [13-15].

Загалом мікроелектромеханічні системи можна розділити на дві великі групи. Перша група мікроелектромеханічних систем передбачає, що датчик, процесор та актюатор розміщені на одному напівпровідниковому кристалі та виготовлені за єдиним технологічним маршрутом. Розміри такого кристала на перевищують декількох квадратних сантиметрів. Назвемо цю групу мікроелектромеханічних систем – мікробудованими системами.

Інша група називається макробудованими системами. Особливістю макробудованих систем є те, що їх не можливо розмістити на одному напівпровідниковому кристалі. Окремі складові цієї системи, як правило, набагато більші за розмірами від розмірів напівпровідникового кристала і дозволяють виконувати великі механічні зусилля й переміщення. Разом з тим частини цієї макробудованої системи, такі як сенсор та мікропроцесор чи мікропроцесор і виконуючий пристрій можуть бути розміщені також на одному напівпровідниковому кристалі.

Загальна структура вбудованої системи показана на рис. 3.5. Кожна така система включає давач, що виконує роль чутливого елемента, який перетворює вхідні фізичні, хімічні та інші величини в електричний сигнал. Отриманий сигнал, як правило, є аналоговим. Тому наступний модуль системи виконує функцію приведення аналогового сигналу до необхідного рівня з подальшим перетворенням його в цифрову форму, що виконує АЦП [16, 17].

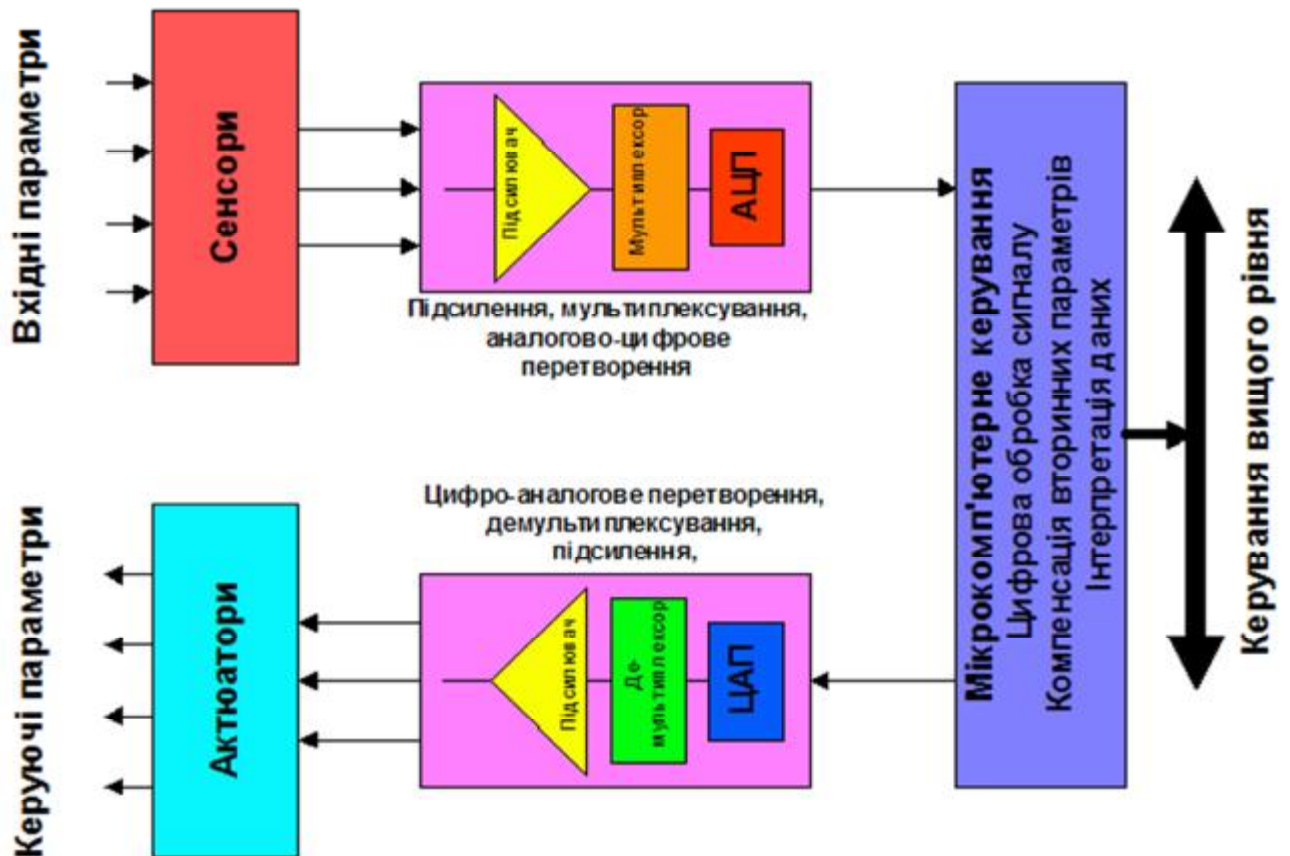


Рис. 3.5 Загальна структура мікросистеми

Мікропроцесорні засоби обробляють отриману цифрову форму вхідного сигналу згідно з заданим алгоритмом. До цього модуля можуть входити мікропроцесори, контролери, процесори сигналів, запам'ятовувальні пристрої та цифрові схеми. Вихідною інформацією блока мікропроцесорних засобів є генерація керуючого цифрового сигналу (або групи керуючих сигналів), який за допомогою ЦАП [18, 19] перетворюється в аналогову форму. Останній модуль в деяких мікробудованих системах може бути відсутній. Далі сигнал передається на пристрій розподілу аналогових та цифрових сигналів (аналогові

комутатори, демультіплексори, буферні регістри тощо.), з якого передається на виконуючий пристрій.

Потрібно зауважити, що макросистеми можуть включати в свою структуру мікросистеми або їх частини.

3.2 Структура мікроелектромеханічних систем

МЕМС складається з низки елементів, які призначені для виконання більше ніж однієї функції. Рішення про це приймається конструктором, якщо необхідно зменшити кількість елементів конструкції чи задля спрощення технологічних процесів. Але ще й досі використовуються такі елементи, про які можна сказати, що вони виконують ту чи іншу певну функцію. Загалом МЕМС можна розглядати як пристрій, що містить функціональні модулі: виконавчий механізм – мікрорушій для приведення у рух необхідних механізмів – інколи його називають мікроактюатором чи просто актюатором (з англ. actuator – виконавчий механізм); чутливий елемент, чи давач (з англ. sensor – давач, первинний вимірювальний перетворювач), що реагує на зміну певної фізичної величини і перетворює її до відповідного виду; керований механізм – завершальна ланка ланцюга керування (таких ланцюгів керування може бути кілька, і вони можуть бути різними) – такими механізмами можуть бути мікродзеркала, керовані мікроклапани, мембранні мікропомпи тощо; пристрої передавання енергії – для передавання енергії (руху, електричного струму, тиску рідин тощо) від однієї ланки до іншої ланки; пристрої керування (електричні чи механічні) – для приведення у дію відповідних актюаторів, часто з урахуванням інформації від давачів та відповідно до закладених принципів побудови МЕМС. Для виготовлення сучасних МЕМС використовується широка гама матеріалів: різноманітні метали у чистому вигляді та у сплавах, неметали, мінеральні сполуки та органічні матеріали. Звичайно, намагаються використовувати якомога меншу кількість різнорідних матеріалів, щоби покращити технологічність МЕМС та знизити собівартість продукції. Тому розширення спектра матеріалів прийнятне лише за наявності специфічних вимог до елементів пристрою [20].

промисловій продукції невпинно зростає з року у рік. Така популяризація МЕМС зумовлена широким спектром їхнього застосування чи не у кожній сфері діяльності людини. Такі прилади зручно та вигідно використовувати практично усюди завдяки їхнім перевагам над традиційними пристроями. Малі розміри, низьке споживання енергії, велика щільність розміщення елементів системи усередині, можливість створювати пристрої з набором функцій та параметрами, необхідними конкретному замовнику – ось основні привабливі характеристики, що впливають на прийняття рішення інженерами багатьох світових підприємств різних розмірів на користь збільшення частки використання МЕМС у своїй продукції.

3.3 Актюатори

Як було зазначено вище, одним з основних елементів МЕМС є актюатори – вузли, що виконують функцію перетворення одного виду енергії на інший вид (здебільшого, на механічну роботу). Для створення цих вузлів можуть використовуватися різні фізичні явища, і їхня кількість безперервно зростає. Часто застосовуються електростатичні, термоелектричні, п'єзоелектричні, осмотичні, гідравлічні, пневматичні, електромагнітні та інші типи актюаторів. Звичайно, кожен з цих видів має переваги для якогось конкретного випадку, що зумовлено технологічними умовами та конструкторським рішенням. Також не варто забувати про недоліки певних типів пристроїв за конкретних умов їхнього використання. Його дія ґрунтується на використанні сили притягання між електродами з різними зарядами. Для збільшення сили притягання застосовують електроди у вигляді гребенів, пальці яких розміщені у міжпальцевих проміжках іншого електрода. Ця конструкція дає змогу на малій площі виготовити електроди зі значною поверхнею. У таких конструкціях використовується втягування пальців одного гребеня у міжпальцеві проміжки іншого під дією електростатичної сили. Сила, яку розвиває такий актюатор, є незначною і залежить від напруги між електродами та від площі взаємодії електродів – залежно від використаних технологій сила, яку розвивають такі мікроактюатори, може сягати 1–10 мкН/мм² при нарузі 15 В [21]. Тому для

збільшення тягової сили часто користуються нарощуванням кількості електродів (т. зв. каскадний актюатор) чи збільшенням робочої напруги між електродами. Сам актюатор є простим у виготовленні і не вимагає використання великої кількості типів матеріалів – здебільшого для формування структури актюатора використовується кремній, що проводить електричний струм сам, а для покращання провідності використовується насичення різними домішками (n-p, кремній), для формування діелектрика застосовують оксид кремнію, що достатньо просто отримують окисненням кремнію, чи використовують властивості p-n-каналу. Взагалі кремнієва технологія для виготовлення МЕМС є найпривабливішою сьогодні, оскільки не вимагає значних змін технології виготовлення кремнієвих інтегральних мікросхем. Термоелектричні актюатори за дією нагадують реакцію біметалевої пластини на її нагрівання. Сама конструкція залежно від напрямку дії (горизонтальна – переміщення лежить у площині основи, вертикальна – у напрямку від основи вгору) має різний вигляд. На відміну від біметалевої пластини, де використовуються два типи металів з різними коефіцієнтами теплового розширення, в МЕМС актюаторах часто застосовують конструкції у вигляді петлі, що утворюється двома чи більшою кількістю пластин з різною площею поверхні. Одні кінці пластин жорстко закріплені на основі, а інші мають спільну точку кріплення. Через таку петлю пропускають електричний струм і пластини нагріваються. Завдяки різній площі їхніх поверхонь вони видовжуються по-різному. За певного з'єднання кінців такої петлі виникає результуюча сила, що переміщує кінець у бік холоднішої пластини. Звичайно, конструкція таких актюаторів може і бути іншою, але принцип функціонування залишається тим самим. Серед наявних конструкцій заслуговують на увагу також каскадні термоелектричні актюатори, в яких незначне переміщення одного елемента можна збільшити завдяки використанню кількох актюаторів, де кожен новий елемент прикріплений до “рухомого” кінця попереднього. Електромагнітні актюатори також поширені у МЕМС. Але потреба у виготовленні котушок достатньо великих розмірів, застосуванні феромагнітних

матеріалів чи постійних магнітів дещо гальмує застосування таких механізмів. Незважаючи на перелічені незручності, ці актюатори успішно використовуються багатьма виробниками МЕМС. Найпоширенішими конструкціями електромагнітних актюаторів є дві: одна – з нерухомими котушками керування та з рухомими елементами (якорями) з феромагнітних матеріалів; інша – з котушкою, поміщеною на рухомий елемент, і вся конструкція приладу перебуває у сильному магнітному полі постійного магніту, розміщеного над системою. Це саме магнітне поле може використовуватися іншими актюаторами у радіусі дії магнітного поля. Звичайно, конструкцію пристроїв вибирають залежно від багатьох чинників, зокрема враховується собівартість приладу, що зростає через ускладнення технологічного процесу. Доволі поширене використання п'єзоелектричного ефекту для побудови актюаторів МЕМС. Хоча такі актюатори і ускладнюють технологічний процес та збільшують розміри конструкції, але велика навантажувальна здатність цього актюатора компенсує зазначені недоліки. На практиці використовується ряд різноманітних конструкцій такого актюатора. Широкий спектр сучасної п'єзокераміки дає змогу максимально пристосувати актюатор до всіх вимог як конструкції, так і електронної системи приладу. Багато вчених та конструкторів МЕМС вважають, що у найближчому майбутньому найперспективнішими будуть гідравлічні та пневматичні актюатори. На сучасному етапі існують гідравлічні турбінні актюатори, що перетворюють потік рідини на обертовий рух турбіни, та актюатори осмотичного типу [22] – тиск рідини приводить у рух еластичну мембрану. Цілком зрозуміло, що для функціонування актюаторів таких типів недостатньо мати лише мембрани та турбіни. У цих випадках необхідно створювати мініатюрні компресорні системи на цій самій основі. Такі компресори часто мають вигляд мембранної помпи з приводом від п'єзоелектричного актюатора. Окрім компресорної системи, необхідно мати регульовальну та керуючу систему, що додатково ускладнює систему. Але все ж переваги таких актюаторів доволі відчутні – проста конструкція осмотичних актюаторів,

підведення та відведення робочої рідини здійснюється по малих каналах і може використовуватись багатьма системами, переносити теплоту тощо. Звичайно, розглянуті методи та способи приведення в рух не вичерпуються вищеописаними. Використання якогось конкретного типу актюатора зумовлюється, передусім, конструкторською доцільністю, доступними на певний період технологічними можливостями, та, звичайно, вартістю.

3.4 Давачі

Малі розміри МЕМС-давачів дають змогу понизити вплив маси давача при вимірюванні прискорень, зменшити небажані ефекти при медико - біологічних дослідженнях та ін. Малі розміри полегшують екранування, теплоізоляцію і термостабілізацію. Застосування в конструкції мікрокількостей чистих і рідкісних матеріалів, прецизійних сплавів не здорожує істотно вартість готового виробу. Мікродавачі незамінимі при динамічних вимірюваннях - із зменшенням розмірів знижується маса чутливих елементів і постійні часу реакції датчиків на зміну вимірюваного параметра.

Спектр наявних типів давачів в арсеналі конструктора значно ширший та різноманітніший, що зумовлено багатоплановим застосуванням МЕМС. Переважно використовуються ємнісні, п'єзоелектричні, тензорезистивні, терморезистивні, фотоелектричні давачі, давачі на ефекті Хола тощо. Так, ємнісні давачі часто використовуються для вимірювання переміщень різноманітних механічних елементів. Часто сам давач має вигляд гребенів електродів, що своїми пальцями входять у міжпальцеві проміжки іншого гребеневого електрода. Іншою конструкцією ємнісного давача можуть бути і дві пластини, одна з яких нерухома, а інша – рухома, наприклад, мембрана чи пружна балка тощо. Конструкція ємнісного давача забезпечує зміну відстані між пластинами чи площі цих поверхонь пластин, що розміщені у безпосередній близькості. Всі елементи та вузли багатьох МЕМС можна розділити на дві групи: група основних елементів та вузлів, призначених для безпосереднього виконання основної функції, заради якої було створено цей прилад, та інша група – група допоміжних елементів та вузлів, призначених для

забезпечення працездатності основної групи. Як приклад можна навести більшість вище перелічених давачів, які слугують для перетворення переміщень пружних первинних вимірювальних перетворювачів: пружних балок, мембран, пружин, стержнів, струн тощо. Також яскравим таким прикладом є використання гідравлічної системи (помпи, провідних каналів, клапанів та спеціальних електронних схем) для приведення в рух основних вузлів, які могли б використовувати й іншу енергію.

3.5 Пристрої керування

Електронні пристрої керування МЕМС виконують різні функції. Ураховуючи те, що сучасні електронні системи здебільшого ґрунтуються на цифрових технологіях, знайти пристрій без мікрокомп'ютера стає дедалі важче. Функції обміну інформацією між давачами та виконавчими механізмами саме й виконують мікроконтролери. Звичайно, поширене й використання аналогових систем, але найбільшою гнучкістю, функціональністю та зручністю для користувача все ж характеризуються цифрові системи на спеціалізованих мікрокомп'ютерах – спеціальних мікроконтролерах. Подання результатів вимірювання у цифровому вигляді є найприйнятнішим з погляду простоти побудови систем та якості опрацювання таких результатів на електронно-обчислювальних машинах. Інколи навіть використовується попереднє оброблення цих результатів всередині приладу МЕМС. Система керування попри функції інтерфейсу з системою користувача може виконувати й допоміжні функції щодо забезпечення роботи усієї системи. Це можуть бути функції формування певних електричних сигналів, функції самоперевірки, калібрування тощо.

4 ВИЗНАЧЕННЯ, КЛАСИФІКАЦІЯ ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ

4.1 Визначення

4.1.1 Визначення давач

Давач - пристрій, який реагує на фізичне збудження та генерує сигнал [23]. Інші можливі назви давача це перетворювач, давач та детектор.

Давач - пристрій, що отримує сигнал чи збудження та відповідає на них [24].

Давач - пристрій, що відповідає на фізичне збудження (тепло, світло, звук, тиск, магнетизм, рух) та передає результуючий імпульс (для вимірювання чи оперування) . (Webster, 3rd ed., 1999)

4.1.2 Визначення перетворювач

Перетворювач - пристрій, який активується одною системою та передає енергію (звичайно змінену) іншій системі. (New Collegiate Dictionary)

Перетворювач - субстанція чи пристрій, як, наприклад, п'єзоелектричний кристал, що перетворює вхідну енергію одного типу у вихідну енергію іншого типу [24].

Перетворювач - пристрій, який активується одною системою та передає енергію (звичайно змінену) іншій системі (динамік – перетворювач електричних сигналів у звукові хвилі) [23].

“Перетворювач” може також означати:

- давач;
- актюатора;
- може бути частиною давача;
- може бути надсистемою над давачем;

Багато давачів можуть працювати як актюатори (дуалізм), а також багато актюаторів можуть виконувати роль давачів. З вищеописаного випливає, що перетворювач це все вище перелічене.

4.1.3 Визначення актюатор

Актюатор - механізм для руху чи керування чимось непрямым чином [23].

Актюатор - той, що активує, механічний пристрій для руху чи керування чимось [23].

Аналізуючи вищеописані визначення для мікроелектромеханічних систем прийmemo наступні визначення:

Давач	• пристрій, що реагує на фізичне збудження;
Перетворювач	• пристрій для перетворення енергії одного типу в енергію іншого типу;
Актюатор	• пристрій чи механізм, що може виконувати фізичну дію.

4.2 Класифікація давачів

Класифікацію проведено базуючись на законах фізики та зручності розподілу. Також потрібно звернути увагу, що деякі пристрої не підлягають класифікації.

За способом живлення розрізняють активні та пасивні давачі. Активний давач: це той, який вимагає зовнішню енергію для функціонування. Приклади: вуглецевий мікрофон, термістори, давачі механічного напруження, давачі ємності та індуктивності і т.д.

Пасивний давач: генерує власний електричний сигнал та не вимагає джерела енергії. Прикладом пасивних давачів є: термоелементи, магнетичні мікрофони, п'єзоелектричні давачі.

За принципом перетворення енергії розрізняють *активні* та *пасивні* давачі, що відрізняються способами формування сигналу та схемами підключення.

Активний давач не потребує додаткового джерела енергії і у відповідь на зміну зовнішньої дії на його виході завжди з'являється електричний сигнал. Прикладом активних давачів є термопари, фотодіоди, п'єзоелектричні чутливі

елементи. На відміну від активного пасивний давач для своєї роботи потребує зовнішньої енергії, яку називають сигналом збудження. Під час формування вихідного сигналу пасивний давач тим чи іншим способом діє на сигнал збудження. Оскільки такі давачі міняють свої характеристики у відповідь на зміну зовнішньої дії, їх інколи називають параметричними. Активні давачі інакше називають генераторними: у них внаслідок зовнішньої дії, на виході появляється різниця електричних потенціалів, які є безпосередньо вихідним сигналом. В пасивних давачах, відбувається зміна їх параметрів, які моделюють сигнали збудження, і ця модуляція несе у собі інформацію про зміну зовнішньої дії [25].

Давачі можуть перебувати у безпосередньому контакті з об'єктом: розташовуватись на поверхні чи всередині об'єкта або не мати безпосереднього зв'язку з ним. Давачі, які не перебувають у безпосередньому зв'язку з об'єктом, називають безконтактними. У таких давачів обмін енергією між давачем і об'єктом може здійснюватись за допомогою магнітного поля (безконтактний індуктивний давач наближення), ультразвуковим сигналом (безконтактний ультразвуковий сигнал присутності) тощо. До безконтактних також відноситься більшість оптичних та інфрачервоних давачів наприклад інфрачервоні термометри і.т.д. Контактний давач, це давач, що вимагає прямого контакту зі збудником, наприклад: давачі механічного напруження, давачі температури.

Залежно від вибору точки відліку давачі можна поділити на абсолютні та відносні. Абсолютний давач визначає зовнішній сигнал в абсолютних одиницях, які не залежать від умов проведення вимірів, тоді як вихідний сигнал відносного давача в кожному окремому випадку може трактуватися по-різному. Прикладом абсолютного давача є термістори, давачі механічного напруження і т.д. Так, у давачеві із терморезисторним чутливим елементом електричний опір напряму залежить від абсолютної температури за шкалою Кельвіна. Прикладом відносного давача є термопара, оскільки сигнал на його виході є функцією градієнта температури на провідниках термопари. Тому визначити конкретну температуру за вихідним сигналом давача можна тільки відносно відомої

базової точки відліку. Іншим прикладом абсолютних та відносних давачів є давач тиску. Покази абсолютного давача відповідають тиску відносно абсолютного нуля за шкалою тисків, тобто відносно повного вакууму. Відносний давач визначає тиск відносно атмосферного, який не є нульовим [25].

Класифікація давачів за принципом перетворення енергії:

- активні (генераторні);
- пасивні (параметричні).

Класифікація давачів за способом живлення:

- активні;
- пасивні.

Класифікація за вибором точки відліку:

- абсолютні;
- відносні.

Класифікація за способом детектування:

- контактні;
- безконтактні.

Класифікація за фізичним принципом:

- Фотоелектричні (оптичні);
- Магнетоелектричні (на основі ефекту Холла);
- Термоелектричні;
- Резистивні;
- Фотомагнетичні;
- Ємнісні;
- Потенціометричні;
- Індуктивні;
- Індукційні;
- Ультразвукові;
- Термоеластичні;

- Термомагнетичні;
- Термооптичні;
- Електромеханічні;
- Магнеторезистивні;
- Фотоеластичні;
- і т.д.

Класифікація за характеристиками:

- Точність;
- Чутливість;
- Стабільність;
- Час реакції;
- Гістерезис;
- Швидкодія;
- Амплітудно-частотна характеристика;
- Амплітуда вхідного сигналу;
- Роздільна здатність;
- Лінійність;
- Стійкість;
- Ціна;
- Розміри та вага;
- Матеріали;
- Температура функціонування;
- і т.д.

Класифікація за сферою застосування:

- Для широкого кола;
- Військова сфера;
- Інфраструктура;
- Енергетика;
- Тепло;

- Виробництво;
- Транспорт;
- Авіація;
- Море;
- Космос;
- Наука;
- і т.д.

4.3 Класифікація актюаторів

Актюатори класифікуються за всіма вище переліченими параметрами як давачів, та додатково за типом руху:

- Лінійні;
- Колові;
- Одноосьові;
- Двоосьові;
- Трьохосьові;
- і т.д.

Класифікація актюаторів за потужністю:

- Актюатори малої потужності;
- Актюатори великої потужності.

На Рис. 7.1 представлено схему перетворення енергії в актюаторах.

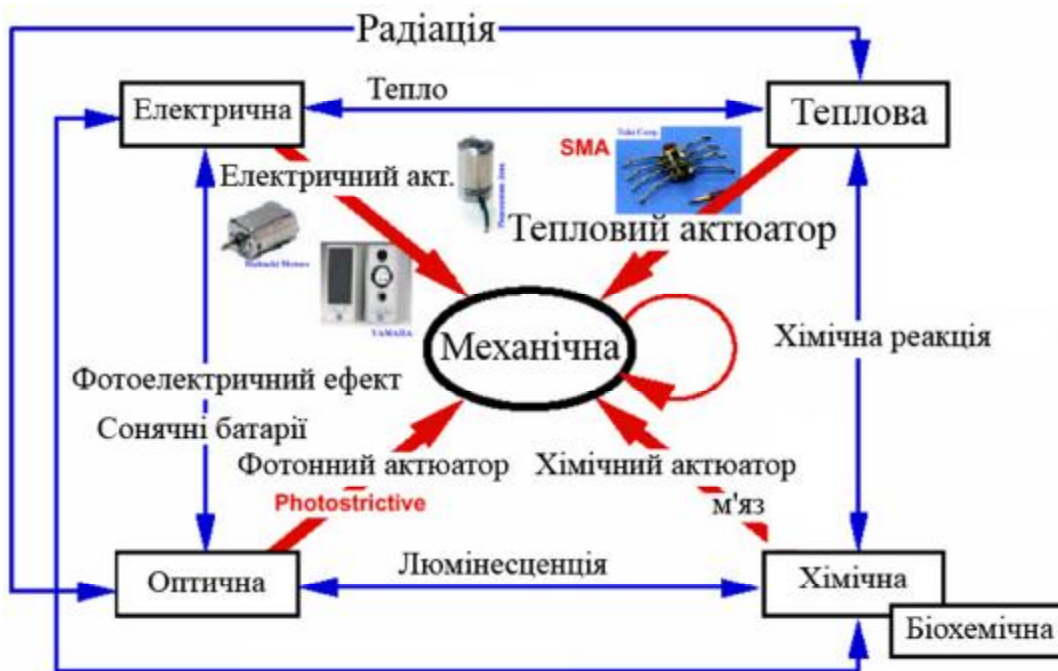


Рис. 4.1 Схема перетворення енергії в актюаторах

4.4 Характеристики датчиків та актюаторів

На рис. 4.2 представлено вхідні та вихідні дані датчиків та актюаторів. Як бачимо з рисунку у датчиків на виході є електричний струм, натомість у актюаторів струм є на вході, тобто можна зробити висновок що датчик та актюатора є пристроями протилежної дії. Виходом інколи може бути зміщення (термо-, магнетико-, а також п'єзоелектричні датчі). Деякі датчі поєднують вимірювання та актюацію.

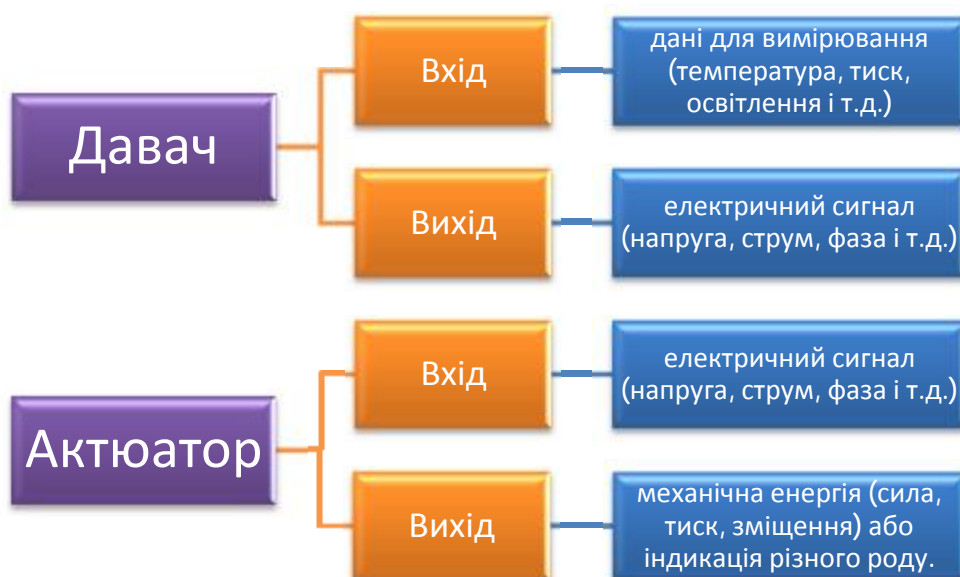


Рис. 4.2 Вхідні та вихідні дані датчиків та актюаторів

4.4.1 Передавальна функція

Передавальна функція - показує зв'язок вхідного та вихідного сигналів, інакше кажучи, передавальна функція відображає взаємозв'язок між вихідним електричним сигналом датчика s та зовнішньою дією $S = f(s)$ (рис. 4.3). Передавальна функція може бути як лінійною, так і нелінійною. У більшості випадків датчикі, які мають нелінійну передавальну функцію можна вважати лінійними на окремих невеликих діапазонах значень.

Можливі інші варіанти назви передавальної функції:

- передавальна характеристика;
- функція зв'язку характеристик входу та виходу;
- функція передачі;
- реакція.

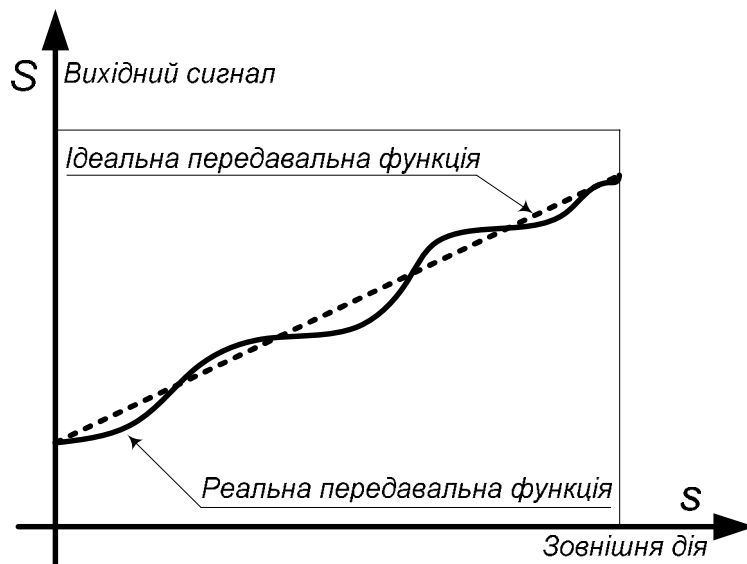


Рис. 4.3 Ідеальна та реальна передавальні характеристики датчиків

В більшості випадків передавальну функцію важко описати математично (представляється графічно), часто вона визначається за допомогою даних калібрування.

Найзручніший випадок це коли передавальна функція є лінійною. На Рис. 7.4 показано випадок де на відрізку від T_1 до T_2 передавальна функція є наближено лінійною.

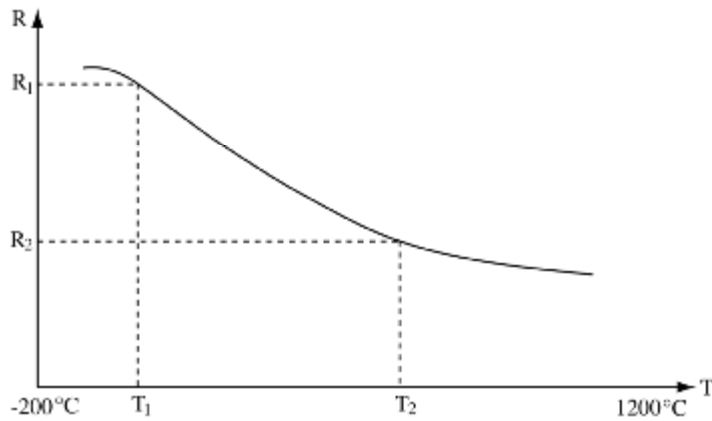


Рис. 4.4 Передавальна функція давача температури

Передавальна функція має наступні додаткові характеристики:

- насиченість
- чутливість
- гістерезис
- зона нечутливості
- інші.

4.4.2 Опір та узгодження опорів

Вхідний опір – відношення відносної напруги та результуючого струму через вхідний порт при відкритому не навантаженому вихідному порту.

Вихідний опір: відношення між відносною вихідною напругою та струмом замикання порта (визначення для пристроїв з двома портами).

Для давачів важливим є вихідний опір, натомість для актюаторів важливим є вхідний опір.

Опір є важливим, адже впливає на роботу пристрою. Наприклад на Рис. 7.5 (а) представлено 500-омний давач (вихідний опір) приєднаний до процесора, де на Рис. 7.5 (b) вхідний опір процесора невизначений, натомість на Рис. 7.5 (c) вхідний опір процесора визначений і становить 500 Ом. Як бачимо з цього випливає, що не врахування опору призводить до того, що змінюється напруга а відповідно пристрій може зіпсуватися, або невірно працювати.

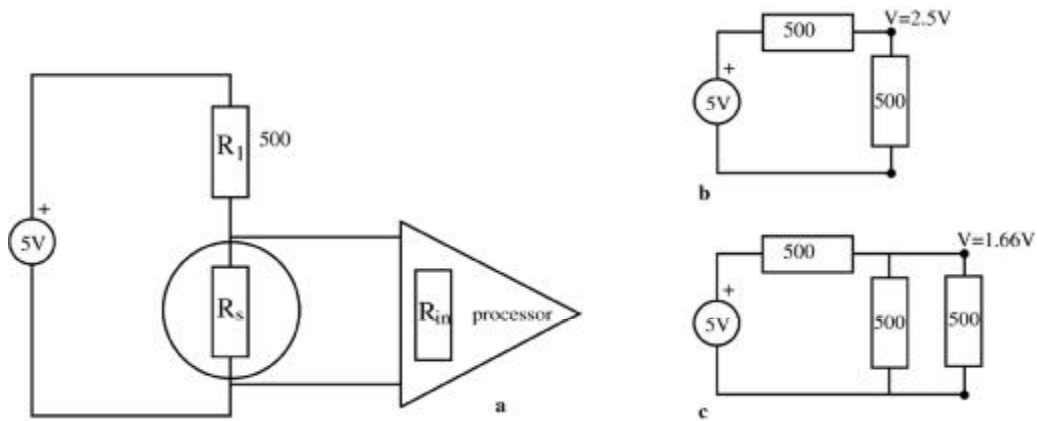


Рис. 4.5 Приклад впливу опору на роботу пристрою

Для давачів значення опору низькі – низький опір на процесорі. Це саме відноситься й до актюаторів. Узгодження опорів інколи виконується безпосередньо (С-mos пристрої мають дуже високий вхідний опір), часто потрібне коло узгодження, або узгодження опорів може бути орієнтованим по нижчому чи вищому значенню опору.

4.4.3 Діапазон та амплітуда

Амплітуда – мінімальне та максимальне значення сигналу.

Діапазон – різниця між максимальним та мінімальним значеннями.

Input full scale (IFS) – діапазон.

Output full scale (OFS) – різниця між найбільшою та найменшою амплітудами виходу давача, відповідно до його діапазону.

Динамічна амплітуда – відношення між максимальною та мінімальною границями, виражається в дБ.

Приклад характеристик давача температури:

- Діапазон вимірювань: $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Вихід: від 2.5В до 1.2В
- Амплітуда: $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Діапазон: $80 - (-30) = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$
- $IFS = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$
- $OFS = 2.5\text{V} - 1.2\text{V} = 1.3\text{V}$
- Динамічна амплітуда $= 20\text{Log}(140/30) = 13.38\text{дБ}$.

Вище перелічені характеристики так само, можуть бути застосовані і до актюаторів. Діапазон та FS можуть бути подані навіть тоді, коли мова йде про великі масштаби. Актюатори мають і інші важливі характеристики:

- максимальна сила, крутний момент, зміщення;
- прискорення;
- часові затримки і т.д.

4.4.4 Точність, похибка, нестабільність

Важливою характеристикою будь-якого давача є його точність. Коли мова йде про точність давача, найчастіше мається на увазі його неточність або похибка вимірювань. Похибка це відхилення від ідеалу [26]. Під похибкою вимірювань, зазвичай розуміють величину максимального розбігу між показами реального та ідеального давачів. На рис. 4.6 показана ідеальна та реальна передавальні характеристики.

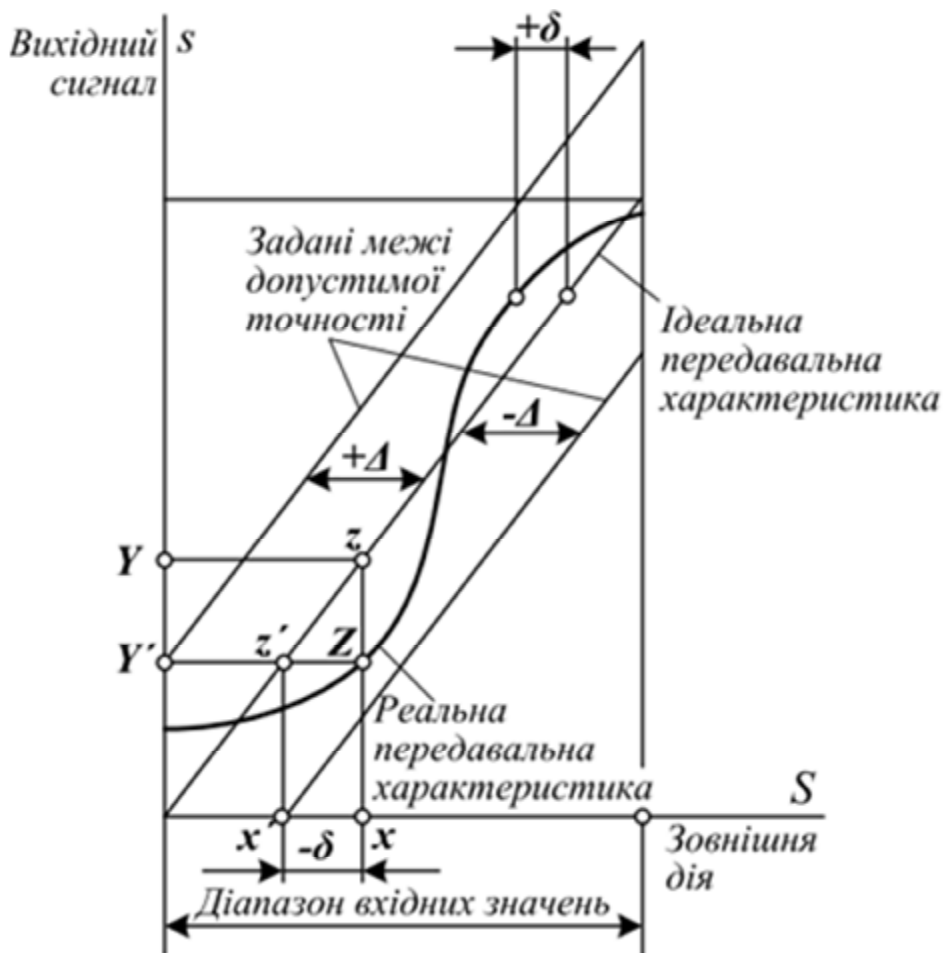


Рис. 4.6 Передавальна характеристика давачів з аналоговим виходом [26]

Реальна передавальна характеристика рідко співпадає з ідеальною. Проте вона не може бути більшою за $\pm D$ від ідеальної передавальної характеристики. З цього випливає, що різниця між реальною передавальною характеристикою та ідеальною δ повинна бути меншою або рівною Δ . Розглянемо приклад, коли вхідний сигнал давача дорівнює x . В ідеалізованому випадку вихідний сигнал повинен дорівнювати Y (див. рис. 4.6), що відповідає точці z на ідеальній характеристиці. Натомість по реальній передавальній характеристиці при значенні x ми потрапляємо у точку Z , і, отже, отримуємо вихідний сигнал, що дорівнює Y' , який відповідає точці z' на ідеальній вихідній характеристиці, який, своєю чергою, повинен відповідати вхідний сигнал x' . Оскільки $x' < x$, то похибка вимірів у цьому випадку дорівнює $-d$ [25].

Похибка давачів може бути подана у наступних одиницях:

- безпосередньо в одиницях вимірної величини;
- у відсотках від значення максимальної вимірної величини;
- в одиницях вихідного сигналу.

Джерелами походження похибок є:

- використані матеріали;
- стійкість конструкції;
- старіння;
- операційні похибки;
- похибки калібрування;
- похибки узгодження;
- шуми;
- інші.

Абсолютна похибка – різниця між точним та отриманим значенням по модулю. Наприклад: $e = |V - V_0|$, де (V_0 - точне значення, V - виміряне значення).

Похибка також може визначатися як відношення до діапазону, наприклад:

$$e = \frac{D_t}{t_{\max} - t_{\min}} * 100, \text{ де } t_{\max} \text{ та } t_{\min} - \text{максимальне та мінімальне значення}$$

параметру, яким оперує пристрій.

Наприклад, термістор використовується для вимірювання температури в межах від -30 до $+80$ °С, при цьому вихідний сигнал змінюється від 2.8В до 1.5В. З рис. 4.7 бачимо, що через похибки, точність вимірювання складає ± 0.5 °С.

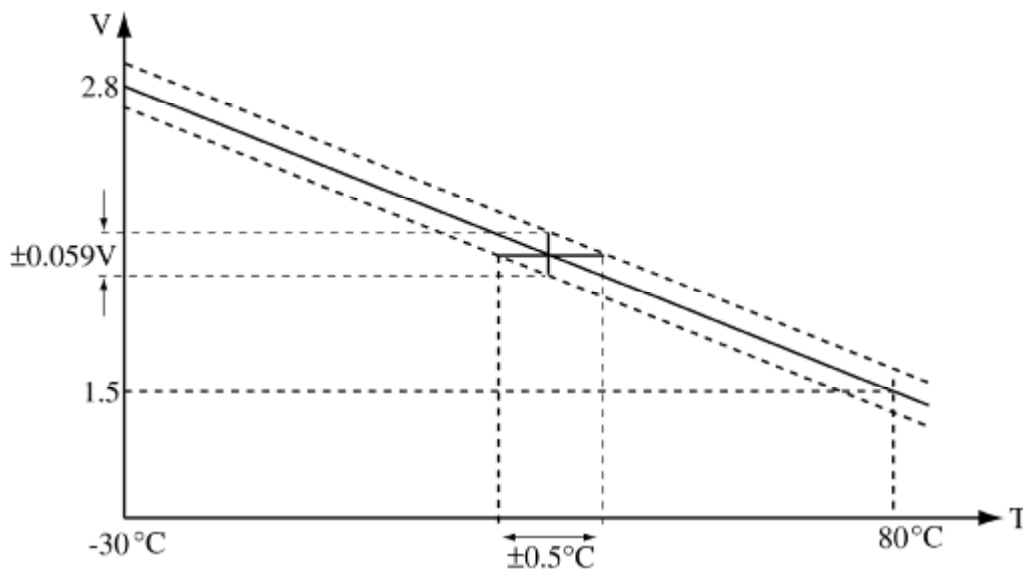


Рис. 4.7 Передавальна функція термістора

Існують також інші похибки:

- Статичні похибки: не залежать від часу.
- Динамічні: залежать від часу.
- Випадкові похибки якогось параметру в різні часові моменти.
- Систематичні похибки: постійні та незалежні від часу та умов.

Для лінійних передавальних функцій (ПФ):

- Похибка стала вздовж ПФ;
- Похибка збільшується чи зменшується;
- Границі похибок – дві обмежуючі лінії.

Границі похибок для нелінійних передавальних функцій характеризуються:

- Зміна похибки вздовж ПФ
- Максимальне відхилення від ідеалу
- Криві границь йдуть вздовж ПФ

4.4.5 Часова нестабільність

Часова нестабільність інколи також називається повторюваністю (англ. *Reproducibility*) - неможливість пристрою показувати те саме значення певної характеристики, при тих самих умовах, але в різний час. Часова нестабільність часто асоціюється з калібруванням та розцінюється як похибка.

Визначається як максимальна різниця показів вимірювання при тих самих умовах в різні моменти часу. Похибка представляється як відносна.

4.4.6 Чутливість

Чутливість - відношення зміни сигналу на виході вимірювального приладу, до зміни вимірюваної величини [27]. Чутливість визначається із наступної залежності:

$$S = \frac{DY / Y}{DX / X}, \quad (4.1)$$

де DY , DX - приріст вихідної і вхідної величини, Y , X - повні зміни вихідної та вхідної величини. Часто користуються поняттям відносної чутливості.

Іншими словами чим більша чутливість - тим краще давач або прилад реагує на мінімальні зміни вимірюваної величини. Наприклад, чим більше змінюється опір резистора в залежності від температури середовища (для термодавача), тим буде більшою чутливість термодавача. На рис. 4.8 показано передавальні функції двох давачів, які дають змогу вимірювати температуру в межах від -200 °С до 860 °С, однак давач під номером №1 має більшу чутливість, адже для того самого діапазону вимірювань його опір міняється від 18 до 400 Ом, натомість давача під номером 2 тільки від 18 до 150 Ом. Отже, чутливість давача під номером 1 є набагато більшою, а значить і точність давача під номером 1 буде більшою.

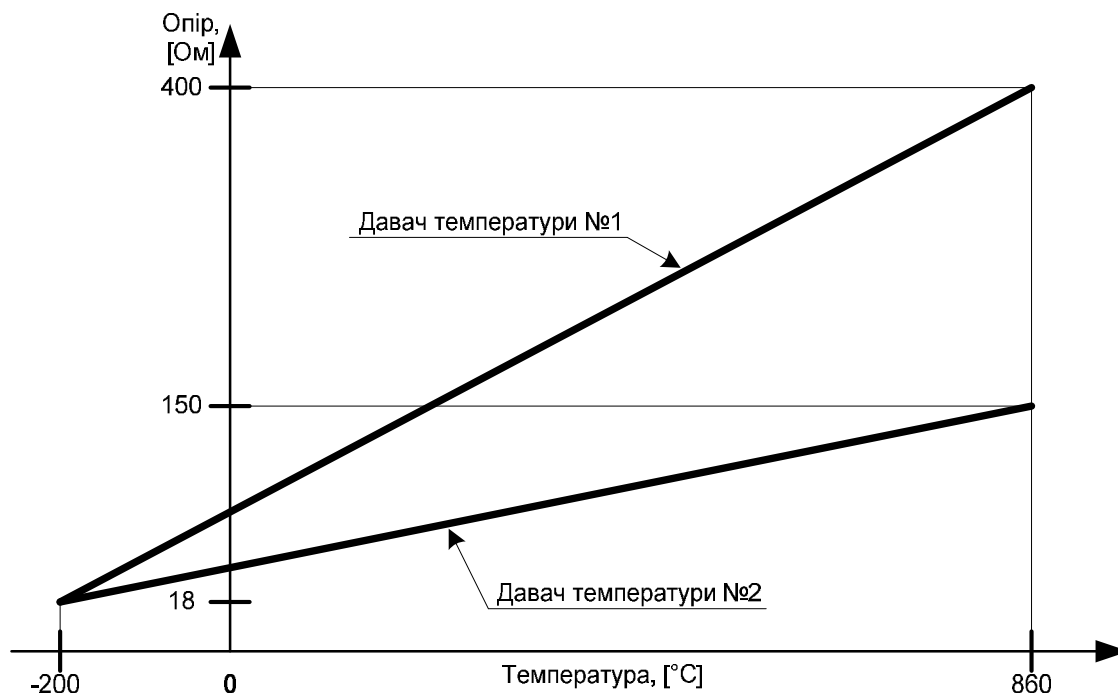


Рис. 4.8 Передавальна функція термодавачів із більшою та меншою чутливістю

Ще одним важливим параметром давача є поріг чутливості.

Поріг чутливості давача - найменше значення вхідної величини, що викликає зміну вихідної величини, яка може бути виміряна.

Чутливість давачів показує крутизну ПФ. Те саме відноситься й до актюаторів.

Давачі можуть бути лінійними ($S = \text{const}$) і нелінійними ($S = \text{var}$). У останніх чутливість залежить від вхідної величини.

Приклад для лінійної ПФ термодавача:

$$\frac{d}{dR}(aT + b) = 1 \quad \text{®} \quad \frac{dR}{dT} = a \frac{éWù}{êCú} \quad (4.2)$$

де a – крутизна ПФ, T - температура, R - опір.

Чутливість зазвичай відноситься до давачів, також може застосовується до актюаторів та мати високий ступінь нелінійності. Чутливість вимірюється як відношення вихідних одиниць до вхідних (Вт/°С, Н/В, В/°С, і. т.д.).

Аналіз чутливості є складною задачею, вирішення якої потребує врахування наступних критеріїв:

- наявності шумів;
- комбінована функція чутливостей різних логічних частин пристрою;
- пристрій може бути відносно складним з багатьма рівнями перетворень, в кожного з яких своя чутливість, свої шуми та свої характеристики;
- деякі властивості можуть бути невизначеними або наближеними;
- це саме стосується також актюаторів.

Аналіз чутливості є важливою задачею яка:

- надає інформацію з діапазону вихідного сигналу;
- надає інформацію про шуми та очікувані похибки;
- може надавати інформацію про можливі шляхи зменшення шумів та похибок;
- надає інформацію з вибору типів давачів, їх з'єднань та інших засобів для підвищення функціональності (підсилювачі, зворотній зв'язок и т.д.).

4.4.7 Надійність мікросистем

Для прикладу візьмемо систему, як на рис. 4.9, яка складається із n давачів, n каналів обробки інформації і n актюаторів. Надійність такої системи залежить від надійності всіх елементів [28, 29]. Приклад розрахунку експлуатаційної надійності такої системи представлено з урахуванням того, що надійність давачів, каналів обробки інформації та актюаторів є різною (хоча може бути і такою самою, це ще спростить розрахунки). Так як показано на рис. 4.9, у системі елементи одного класу становлять один для одного “гарячий запас”.

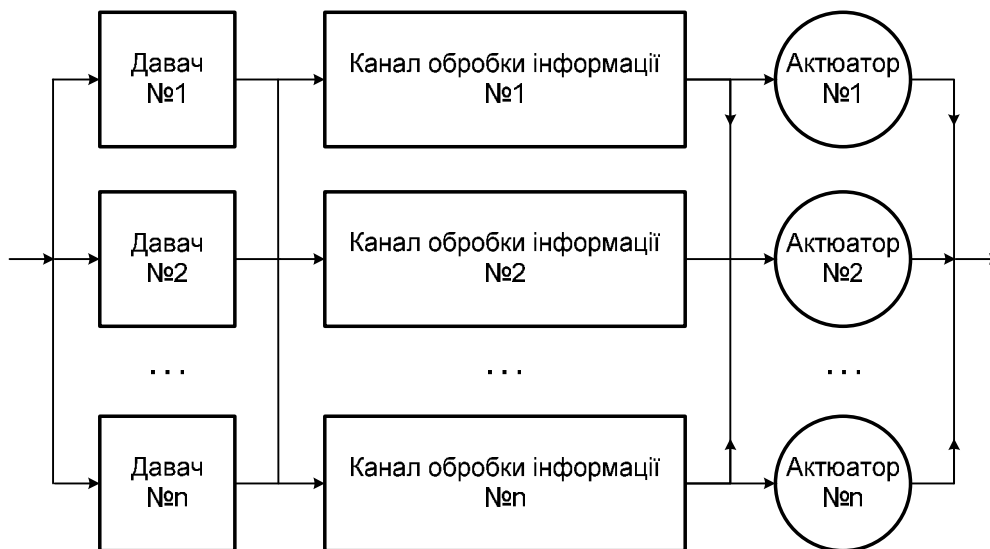
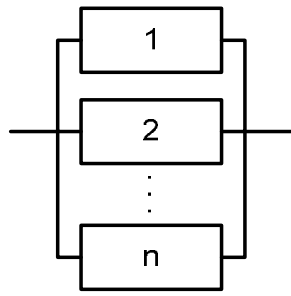


Рис. 4.9 Система із n давачів, n каналів обробки інформації і n актюаторів

У системі де є гарячий запас всі елементи працюють весь час, але при ушкодженні якогось із цих елементів система не перестає повністю працювати, а просто працює із неповною потужністю. Експлуатаційна надійність такої системи буде тим більша, чим буде більше елементів певного типу. У зв'язку із чим, при проектуванні мікросистем, надійність яких повинна бути високою (наприклад для літакобудування), рекомендується застосовувати два канали обробки інформації меншої потужності, замість одного потужнішого. Хоча з економічної точки зору один краще. Якщо, для літака запроектувати систему з одним каналом обробки, так як згадувалося вище, то вихід такої системи із ладу, може призвести до аварії. Натомість при застосуванні двох каналів обробки інформації меншої потужних, які становлять один для одного “гарячий запас” - при виході одного з ладу, другий залишиться працювати. У такій надзвичайній ситуації це б дало змогу пілотам долетіти до найближчого аеропорту і безпечно посадити літак. Так, наприклад у славнозвісному гелікоптері McDonnell Douglas AH-64 Apache всі важливі системи дублюються і при виході якоїсь системи із ладу відбувається переключення на резервну. Коли, мова іде не про два а про десятки давачів, чи актюаторів, то при виході одного з них із ладу – загальна потужність зменшиться на 10% при кількості 10 давачів, а при паралельній роботі 100 давачів – вихід одного із ладу зменшить загальну потужність системи тільки на 1%.



$$R_1 = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i)$$

Рис. 4.10 Розрахунок експлуатаційної надійності для паралельної структури

На даному етапі надійність каналів обробки інформації редукуємо до загальної надійності всіх каналів обробки, яка визначається за формулою як на рис. 4.10, відповідно система набуде вигляду як на показано на рис. 4.11.

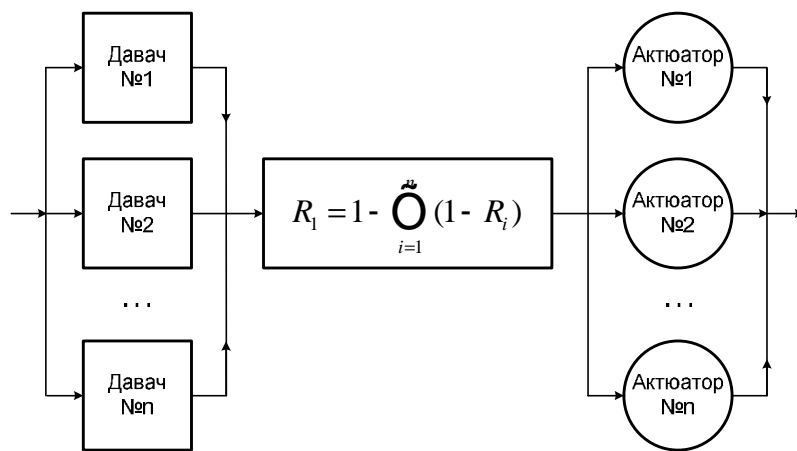


Рис. 4.11 Вигляд системи по редукації надійності каналів обробки інформації до загальної надійності

Наступним кроком так само як і для каналів обробки інформації, редукуємо надійність датчиків та актюаторів до загальної надійності. Після вищеписаних дій надійність системи набуде вигляду як на рис. 4.12.

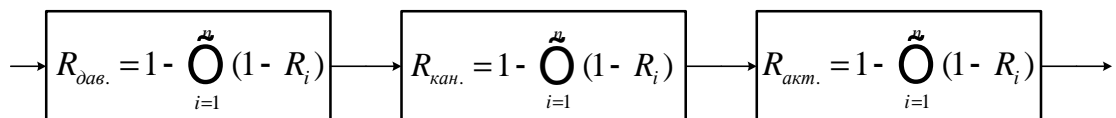


Рис. 4.12 Вигляд системи по редукації надійності актюаторів до загальної надійності

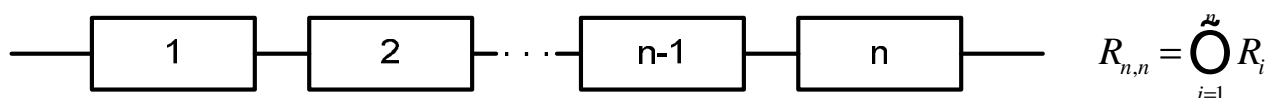


Рис. 4.13. Розрахунок експлуатаційної надійності для послідовної структури

Підставивши надійності всіх типів елементів розрахованих вище до формули як на рис. 4.13, отримаємо вираз для обчислення загальної надійності системи:

$$R_{заг.} = \prod_{i=1}^n (1 - R_{i_дав}) \times \prod_{i=1}^n (1 - R_{i_кан}) \times \prod_{i=1}^n (1 - R_{i_акт}) \quad (4.3)$$

де $R_{i_дав}$ - надійність i -того давача; $R_{i_кан}$ - надійність i -того каналу обробки інформації; $R_{i_акт}$ - надійність i -того актюатора.

4.4.8 Похибки

Для кращого розуміння виникнення та накладання похибок у мікросистемах, покажемо це на прикладі оптоволоконного давача тиску. Принцип роботи оптоволоконного давача тиску полягає в тому, що тиск змінює довжину волокна, і відповідно змінюється фаза на виході. У пристрої як на рис. 4.14 відбувається три кроки перетворення, відповідно похибки додаються.

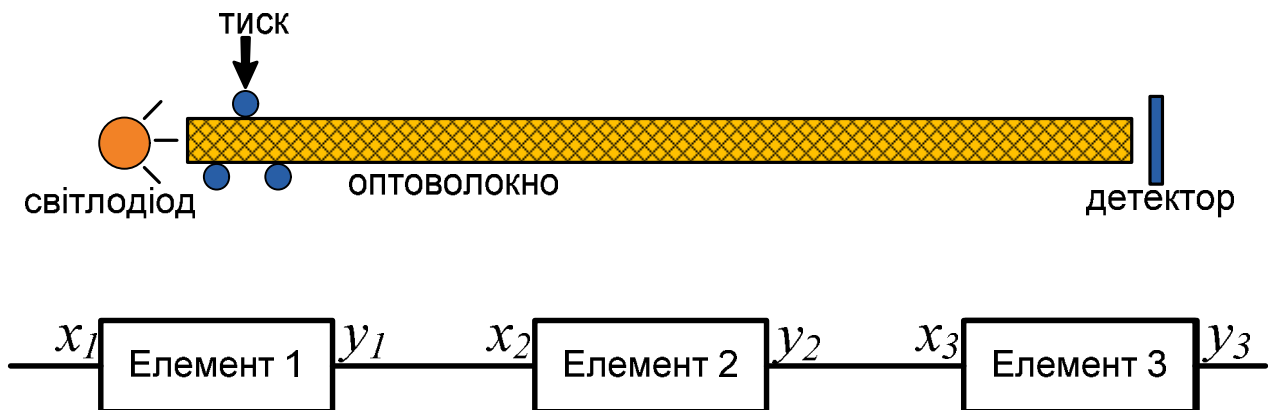


Рис. 4.14 Похибки оптоволоконного давача тиску

Індивідуальні чутливості становлять: $s_1 = \frac{dy_1}{dx_1}$, $s_2 = \frac{dy_2}{dx_2}$, $s_3 = \frac{dy_3}{dx_3}$,

звідси вираз для знаходження загальної чутливості набуде вигляду [30]:

$$S = s_1 \times s_2 \times s_3 = \frac{dy_1}{dx_1} \times \frac{dy_2}{dx_2} \times \frac{dy_3}{dx_3} \quad (4.4)$$

Проте, $x_2 = y_1$ (вихід перетворювача 1 є входом в перетворювач 2), а $x_3 = y_2$, підставивши це у вираз (4.4) отримаємо:

$$S = s_1 \times s_2 \times s_3 = \frac{dy_3}{dx_1}. \quad (4.5)$$

Перший вихід: $y_1 = y_1^0 + Dy_1 \times y_1^0$ – вихід без похибок.

Другий вихід: $y_2 = s_2 (y_1^0 + Dy_1) + Dy_2 = y_2^0 + s_2 Dy_1 + Dy_2$

Третій вихід: $y_3 = s_3 (y_2^0 + s_2 Dy_1 + Dy_2) + Dy_3 = y_3^0 + s_2 s_3 Dy_1 + s_3 Dy_2 + Dy_3$.

Останні три вирази це похибки сумування.

4.4.9 Гістерезис

Гістерезис – це різниця значень вихідного сигналу для одного і того ж вхідного сигналу, отриманого під час його зростання і спадання (рис. 4.15).

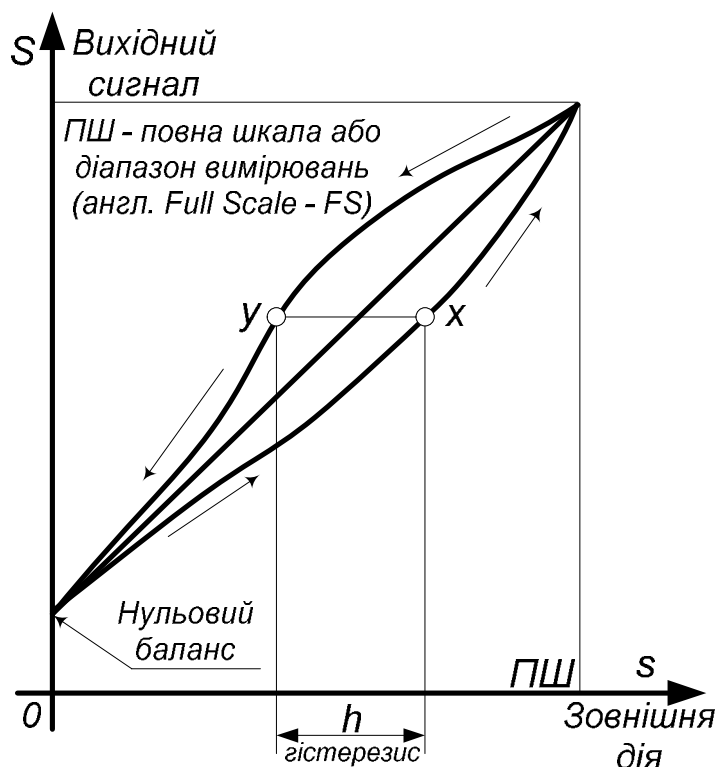


Рис. 4.15 Гістерезис давачів [26]

Типовою причиною виникнення гістерезису є тертя і структурні зміни матеріалів. Найбільший ефект гістерезису притаманний давачам на основі феромагнітних матеріалів.

У випадку вимірювання температури, коли вона зростає в точці 50°C на виході може бути 4.95В , натомість коли температура спадає, в точці 50°C на виході давача може бути 5.05В . Це відповідає похибці у $\pm 0.5\%$ (для вихідного

діапазону у 10 В (це ідеалізований варіант). Гістерезис присутній також і в актюаторах та навіть більш для них характерний, так як пов'язаний зі зміщенням.

4.4.10 Нелінійність

Нелінійність – максимальне відхилення L реальної передавальної функції від апроксимуючої прямої лінії. При проведенні декількох циклів калібрування вибирається найгірше із отриманих значень нелінійності. Зазвичай виражається або в процентах від максимального вхідного сигналу, або в одиницях вимірюваних величин (наприклад, в кПа або °С).

В залежності від способу проведення апроксимуючої лінії розрізняють кілька типів лінеаризації:

1) по кінцевих точках (визначаються вихідні значення, відповідні найбільшому і найменшому зовнішніх впливів, і через них проводиться пряма лінія (див. рис. 4.16 лінія 1): помилка нелінійності мінімальна в кінцевих точках і максимальна десь в проміжку між ними);

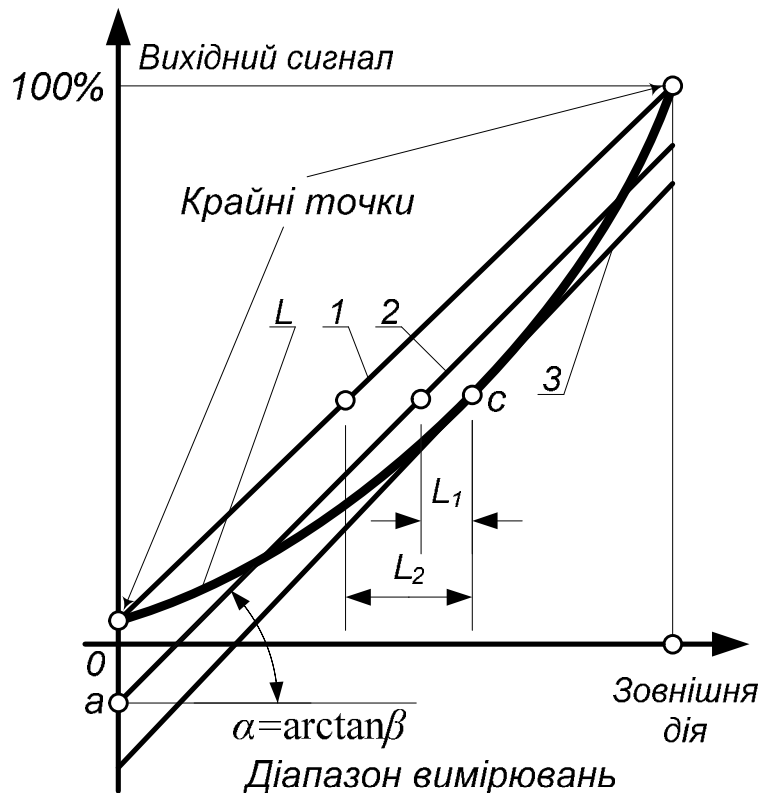


Рис. 4.16 Лінійні наближення нелінійної передавальної функції [26]

2) за методом найменших квадратів (в широкому діапазоні вимірюваних величин (краще в повному діапазоні) для ряду значень (n) зовнішніх впливів s вимірюються вихідні сигнали S . Після чого, застосовуючи лінійну регресію визначають значення коефіцієнтів a і b (див. рис. 4.16);

$$a = \frac{\sum S \sum s^2 - \sum S \sum s S}{n \sum s^2 - (\sum s)^2}, \quad b = \frac{n \sum S s - \sum s \sum S}{n \sum s^2 - (\sum s)^2}, \quad (4.6)$$

де \sum - сума n чисел.

3) лінеаризації в необхідному вузькому діапазоні вхідних сигналів (наприклад, медичні термометри повинні мати підвищену точність в діапазоні 37 °С ... 38 °С, а поза цією зоною точність може бути знижена. У цьому випадку калібрування проводять у вузькій області, де потрібна підвищена точність, після чого через калібровану точку проводиться апроксимуюча лінія (лінія 3 апроксимуюча – часто є дотичною до передавальної функції в точці калібрування s . див. рис. 4.16): найменше значення нелінійності досягається в зоні калібрувальної точки, а ближче до кінців діапазону вимірювання, лінійність значно погіршується).

4) незалежна лінеаризація (метод найкращої прямої) полягає в знаходженні лінії, що проходить посередині між двома паралельними прямими, розташованими, як можна, ближче одна до одної і охоплюють всі вихідні значення реальної передавальної функції.

В залежності від методу лінеаризації апроксимуючі лінії будуть мати різні коефіцієнти a і b . Отже, значення нелінійності, отримані різними способами, можуть суттєво відрізнятись один від одного.

Нелінійність визначається як максимальне відхилення від ідеальної лінійної ПФ (див. рис. 4.16). Нелінійність потрібно виводити з реальної ПФ або з кривої калібрування. Для проведення процедури калібрування можна скористатися точнішою апаратурою, або скористатися еталоном (наприклад чорне тіло, еталонний кілограм і т.д.). Точність після калібрування не може перевищувати точність еталона.

Існує нелінійність давача в вимірюваному діапазоні. Залежно від поточного діапазону вимірювання, коефіцієнт нахилу передавальної функції змінюється в деяких межах. При цьому, в специфікації вказуються або криві зміни точності за діапазоном, або найгірші показники нелінійності в тому чи іншому діапазоні, як показано на рис. 4.17. Похибки нелінійності суттєво впливають на точність.

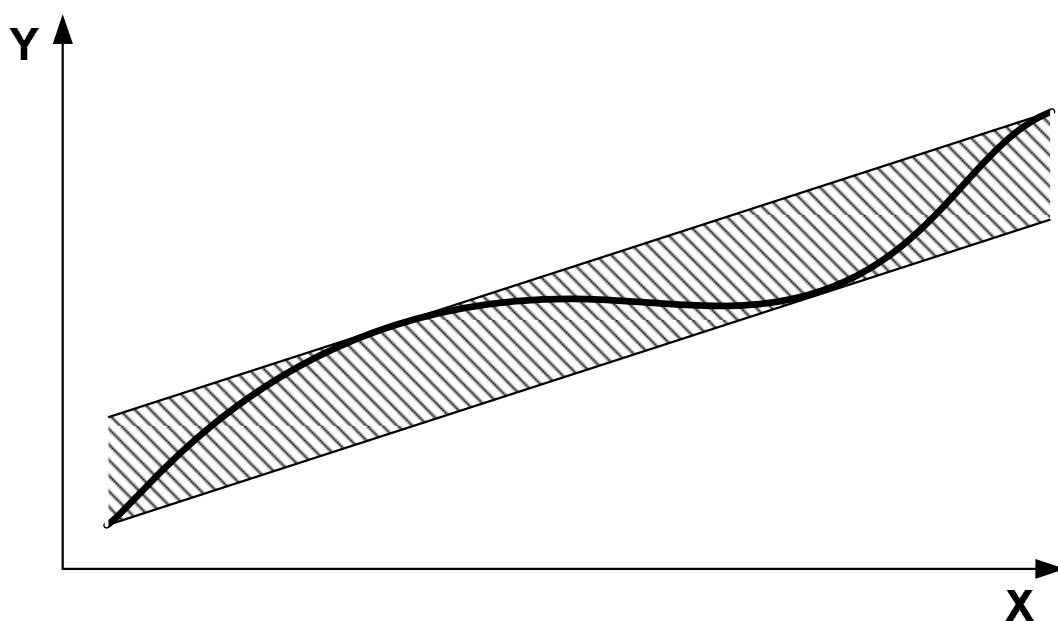


Рис. 4.17 Нелінійність давача

4.4.11 Насиченість

Насиченістю називається така властивість давачів та актюаторів, коли вони перестають реагувати на зміну входних параметрів. Зазвичай виникає на краях робочого діапазону та показує, що вихід вже не є функцією від входу або це є дуже нелінійна функція. Насиченості потрібно уникати – вона різко зменшує чи виключає чутливість. В актюаторів може призвести до втрати функціональності (втрати потужності і т.д.). На рис. 4.18, на прикладі характеристики термодавача, показано місця де виступає насиченість. Як бачимо з рисунку у даному випадку, там де виступає насиченість при зміні температури опір майже не міняється, відповідно неможливо визначити з бажаною точністю температуру.

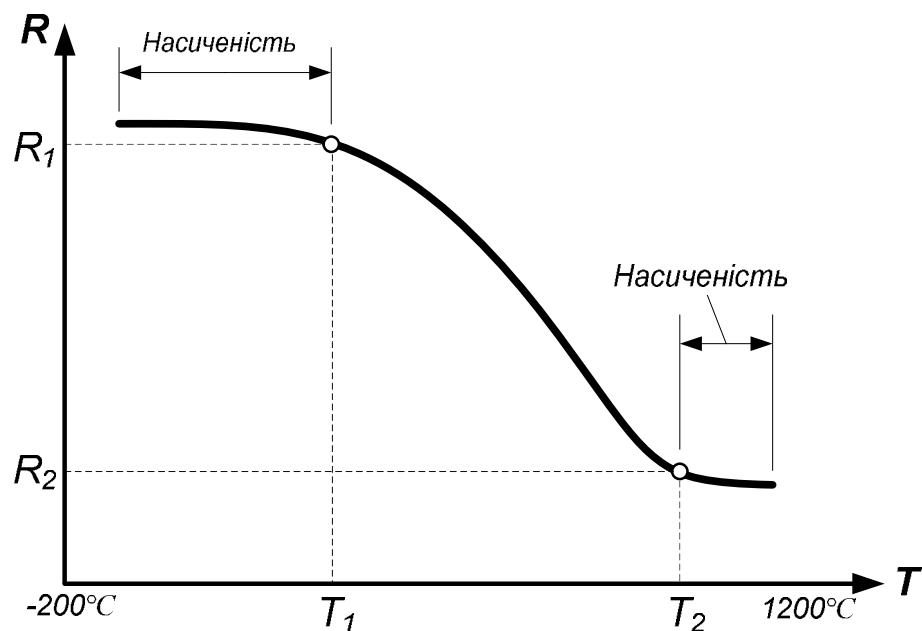


Рис. 4.18 Приклад насиченості давача температури

4.4.12 Частотна залежність

Частотною залежністю називається вміння пристрою відповідати на гармонічний вхідний сигнал. Частотна залежність визначається як функція – залежність певної характеристики від частоти, вона також визначає робочий діапазон сигналу для давачів та актюаторів та надає важливі параметри проектування [30]. Інколи вказується і фаза.

На рис. 4.19 показано важливі параметри проектування, а саме: полоса пропускання (B-A, в Гц), амплітуда “стабільності” (D-C в Гц), точки відрізання (точка A і B в Гц).

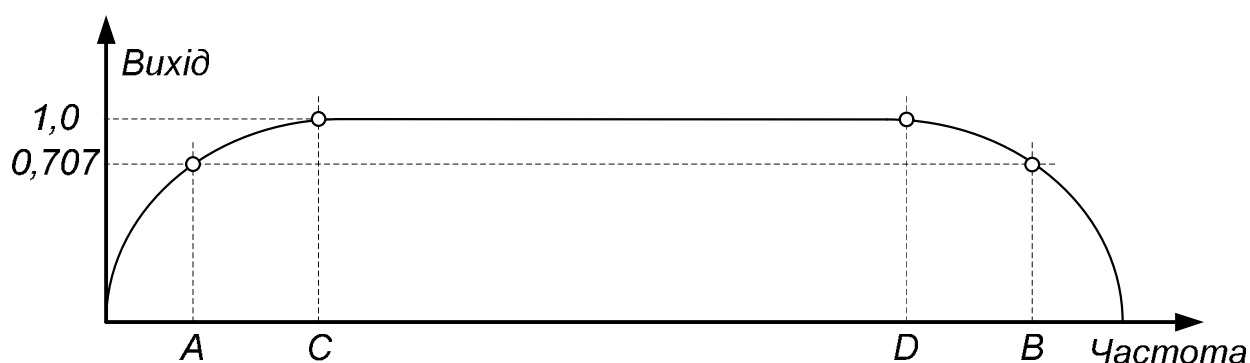


Рис. 4.19 Частотна залежність

Полоса пропускання - відстань у герцах між точками “половинної енергії”: $e_h=0.707e$, $p_h=0.5p$.

Точки “половинної енергії” також називаються точками трьох дБ. В цих точках вихідний сигнал спадає на 3 дБ:

$$10 \times \log 0.5 = 3 \text{ дБ, або}$$

$$20 \times \log \frac{\frac{\sqrt{2}}{2} \ddot{o}}{\ddot{o}} = 3 \text{ дБ.} \quad (4.7)$$

Зазвичай ці точки випадкові, проте вони стандартизовані. Вважається, що пристрій не несе користі за межами цих точок.

Амплітуда “стабільності”: максимальна ширина полоси, на якій вихід не залежить від частоти (з певною похибкою).

Резонуюча частота - частота, в якій спостерігається екстремум залежності.

Для кращого розуміння вищеписаних термінів на рис. 4.20 показано:

- полоса пропускання: 16.5кГц-70Гц=16.43 кГц
- амплітуда “стабільності”: 10 [кГц] -120 [Гц] = 9880 [Гц]
- точки обрізання: 70 [Гц] і 16.5 [кГц]
- резонанс: 12 [кГц].

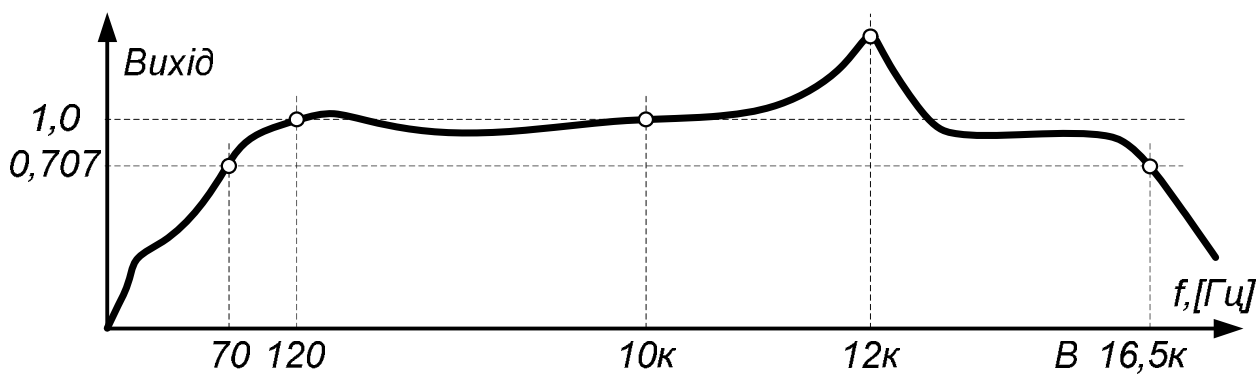


Рис. 4.20 Частотна характеристика пристрою

4.4.13 Час відклику

Час відклику показує час, потрібний для досягнення стабільного значення вихідним сигналом після зміни вхідного сигналу на 1 ступінь. Зазвичай визначається час, потрібний для досягнення 90% від стабільного стану. Час відклику залежить від інертності системи (механічної “m”, електричної. “L” і т.д.).

На прикладі давача температури час відклику це час, потрібний для того, щоб тіло давача досягло вимірюваної температури. Часові константи, присутні в пристрої як відповідь на ємності та індуктивності. Наприклад, в актюаторі час відклику залежить від маси самого актюатора та того, на що він впливає. Час відклику залежить також від часових констант, наслідуваних від ємнісних та індуктивних характеристик та від моменту.

Зазвичай потрібен малий час реакції, але не завжди. Великі затримки понижують якість вимірювання. Потрібно мати на увазі, що великі механічні системи мають великий час реакції, натомість у малих пристроїв реакція швидша, саме тому беручи за критерій час відклику МЕМС пристрої виграють у звичайних пристроїв. Проектуючи систему завжди потрібно брати до уваги давачі, які мають великий час відклику.

4.4.14 Калібрування

Калібруванням називається експериментальне визначення та уточнення характеристик передавальної функції (ПФ). Калібрування необхідно проводити, коли ПФ наперед невідома. Також калібрування потрібне, коли допуски пристрою повинні в дійсності бути меншими, ніж ті, що визначені виробником.

Приклад: використати термістор з 5% похибкою в діапазоні від 0 до 100°C, для вимірювання температури з точністю до $\pm 0.5^\circ\text{C}$. Єдиний шлях для реалізації цього є визначення ПФ пристрою.

Існують два поширені методи калібрування:

1) ПФ наперед відома:

- визначити крутизну ПФ з двох відомих значень для двох вхідних сигналів, якщо ПФ лінійна;
- виміряти вихідний сигнал;
- порахувати крутизну та точку перетину у $V = aT + b$;
- якщо ПФ комплексна, то потрібно більше точок: $V = aT + bT^2 + cT^3 + d$;
- 4 виміри для розрахунку: a,b,c,d;

- точки потрібно вибирати оптимально: у випадку лінійної ПФ взяти точки біля країв діапазону. В протилежному випадку взяти кілька точок на інтервалі найбільшого відхилення.

2) ПФ невідома:

- виміряти вихід R_i для мінімально прийнятної кількості точок T_i ;
- використовувати увесь діапазон;
- виміряти найкращий спосіб лінеаризації (наприклад, методом найменших квадратів);
- при потребі використати поліноміальне наближення;
- при великій кількості точок використати кусково-лінійну апроксимацію.

Калібрування інколи буває на вимогу. Дані про калібрування зазвичай надаються виробником, а процедури калібрування можуть бути включені до документації по проектуванню. Також необхідно пам'ятати, що похибки калібрування повинні бути оціненими та визначеними.

4.4.15 Роздільна здатність

Роздільною здатністю (РЗ) називається мінімальний крок зміни аргументу ПФ, на який вона може реагувати.

Приклад: цифровий вольтметр з кроком $0.1V$ використовується для виміру вихідного сигналу давача. Зміна параметрів середовища на вході давача, яка спричинить зміну значення вольтметра на $0.1V$, і є роздільною здатністю системи давач-вольтметр.

Роздільна здатність визначається всією системою, не тільки давачем. Власне РЗ давача може бути вищою за РЗ системи в цілому. Давач передає свої результати підсистемі аналізу. Будь-яка з цих підсистем може бути критичною для РЗ.

Роздільна здатність може визначатися одиницями вимірюваної величини ($0.5^{\circ}C$ - для давача температури, $1 Tл$ - для давача магнітного поля, $0.1mm$ для давача відстані і т.д.) або ж може бути відносною (наприклад - 0.1%).

В цифрових системах РЗ може бути в бітах, натомість в аналогових системах вихід не дискретний та РЗ може бути визначена як нескінченно мала.

РЗ актюатора – найменша можлива зміна на його виході. Приклад: кроковий електродвигун може виконувати 180 кроків за один оберт. Його РЗ становить, таким чином, $360^\circ/180=2^\circ$.

Градуирований аналоговий вольтметр має РЗ еквівалентну ціні його поділки (вища РЗ доступна тим пристроям, значення яких можна легко інтерполювати між поділками).

4.4.16 Інші параметри давачів

Надійність - статистична міра якості пристрою, що показує його можливість стабільно виконувати свої функції на протязі певного часу або певної кількості робочих циклів. Надійність подається у годинах, роках або циклах. Зазвичай надається виробником пристрою та базується на тестуванні життєвого циклу.

Нечутлива зона - відсутність адекватної реакції коло амплітудних значень на вході.

Живлення (excitation - “збудження”) - електрична енергія, необхідна для функціонування давача чи актюатора. Може визначати діапазон напруг, в якому працюватиме пристрій, діапазон струмів, розсіювання енергії, максимальне “збудження” як функцію температури, а інколи і частоти. Параметри живлення вказуються в документації до пристрою, їх дотримання гарантує нормальні умови роботи давача. Натомість недотримання вимог до живлення може призвести до некоректних результатів чи пошкодження пристрою.

5 ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ МСТ

Мікророзміри елементів і макрокількості одночасно оброблюваних виробів - дві головні особливості, які мікротехнології успадкували від мікроелектроніки. Перша особливість дозволяє виготовляти прецизійні унікальні вироби, розміри і взаємне розташування яких відтворюються з субмікронною точністю. Друга - робить ці пристрої дешевими і доступними для масових застосувань.

Розробка МЕМС - пристроїв це звичний для приладобудування шлях компромісів. Шлях до створення мікроелектромеханічних давачів, що відповідають тим або іншим «жорстким» вимогам, може відвести від розмірів мікрочіпа до «звичних» макрогабаритів для конструкції давача в цілому.

Технологія виготовлення мікроелектромеханічних систем розвивається на основі науково-технологічного прогресу мікроелектроніки в області групових прецизійних технологій виготовлення інтегральних схем (ІС) [31-37]. Разом з тим, присутня певна специфіка технологій виготовлення сенсорних та актюаторних підсистем, що потребує деяких абсолютно нових підходів до всіх складових циклу “проективання-виготовлення” елементів МСТ [38].

Зокрема, під час проектування мікросистем виникають нові задачі, які пов’язані з необхідністю моделювання не тільки задач схемотехніки і логіки роботи пристрою, але й паралельного розв’язання сукупності задач з таких наукових галузей, як механіка твердого тіла [39-43], термонапруження в матеріалах, газу - та гідродинаміки тощо.

Нові задачі треба розв’язувати і під час виготовлення мікросистем, так технології виготовлення мікросистем пов’язані з найхарактернішими відмінностями між стандартними виробами мікроелектроніки і мікросистем: якщо перші по суті є двовимірні інтегральні пристрої і механічно статичні, то мікросистеми – це реальні тривимірні структури, елементи яких мають мати можливість відносного механічного переміщення окремих складових МЕМС

[44]. Ці нові властивості потребують розвитку нових технологічних операцій, які мають забезпечувати тривимірне формоутворення інтегральних структур.

Технології виготовлення МСТ діляться на 2 типи: технології поверхневої та об'ємної обробки. Поверхневу обробку використовують для створення 2Б-структур на кремнієвих підкладках. Об'ємні технології, такі як DIRE (Deep Reactive Iron Etch) і LIGA (акронім з німецьких слів - lithography, electroplating, and molding), дають змогу створювати структури з великим аспектним співвідношенням.

На сьогоднішній день у світі найпоширенішими є наступні технології виготовлення мікросистем: технологія об'ємної мікрообробки [45], поверхневої мікрообробки [46], LIGA [47] і SIGA [47] технології, а також MUMPs процес. Класифікація технологій виготовлення мікросистем представлена на рис. 5.1.

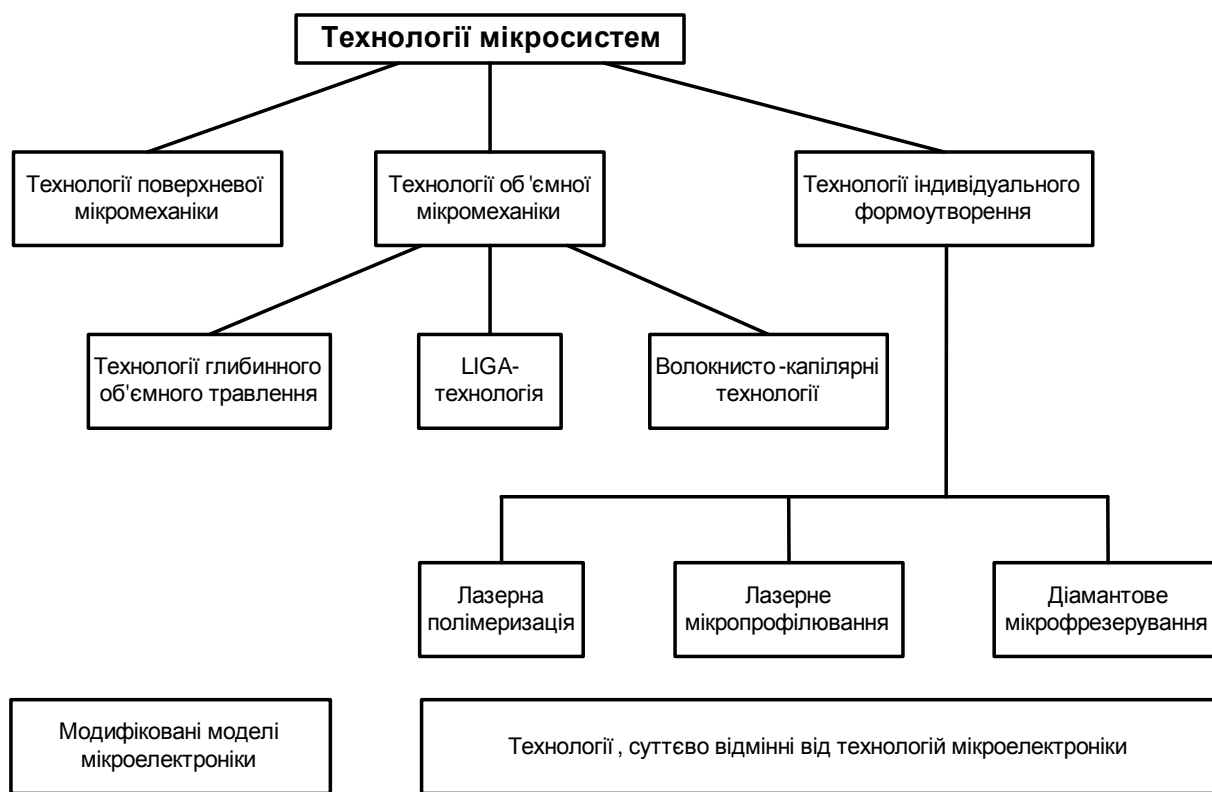


Рис. 5.1 Класифікація технологій виготовлення мікросистем

5.1 SIGA - технологія

Абревіатура SIGA технології означає – ультрафіолетова літографія, гальваніка і формовка. З особливостей цього процесу можна відмітити, що

існує можливість керувати шириною профілю і те, що технологія сумісна з технологією тонких плівок.

Етапи виготовлення MEMC за SIGA технологією показані на рис. 1.14 [48].

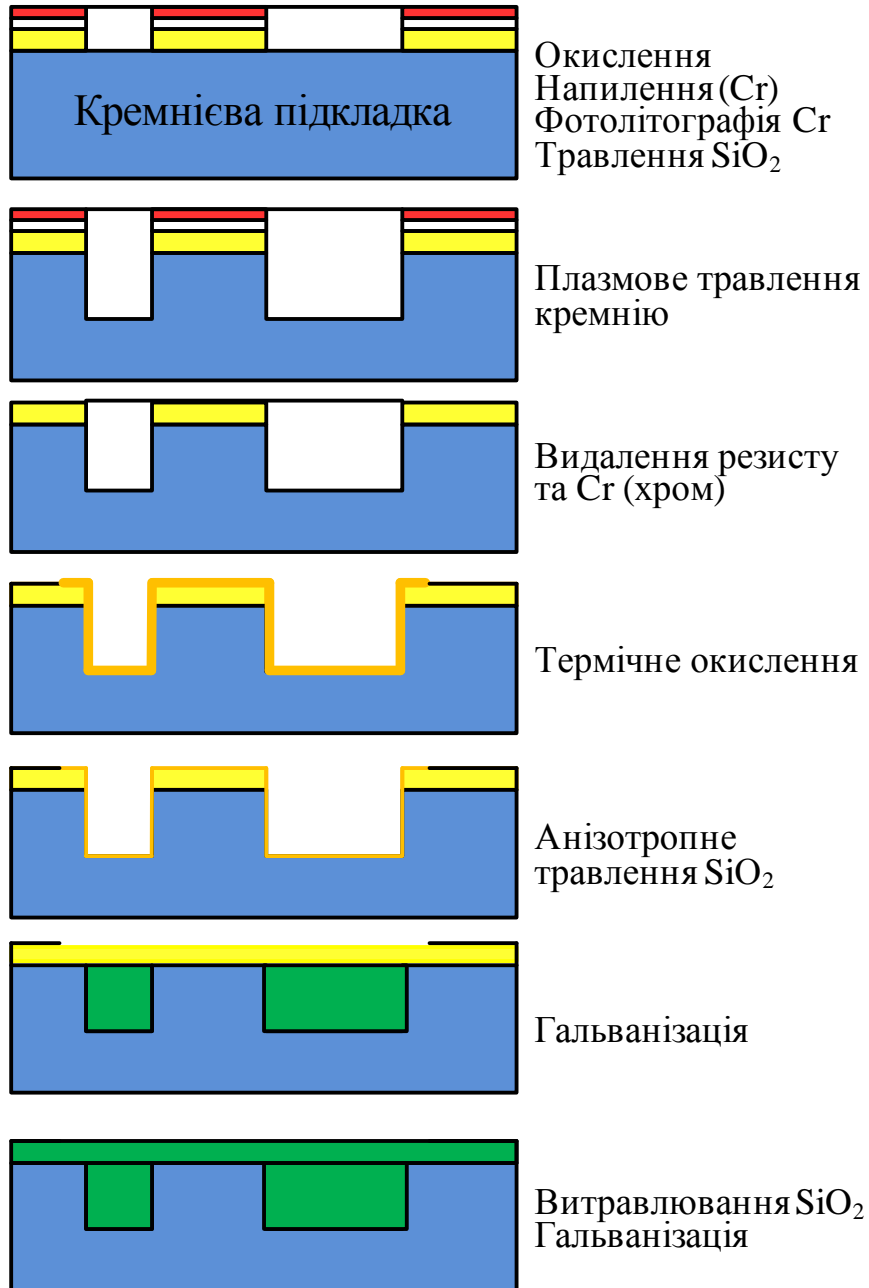
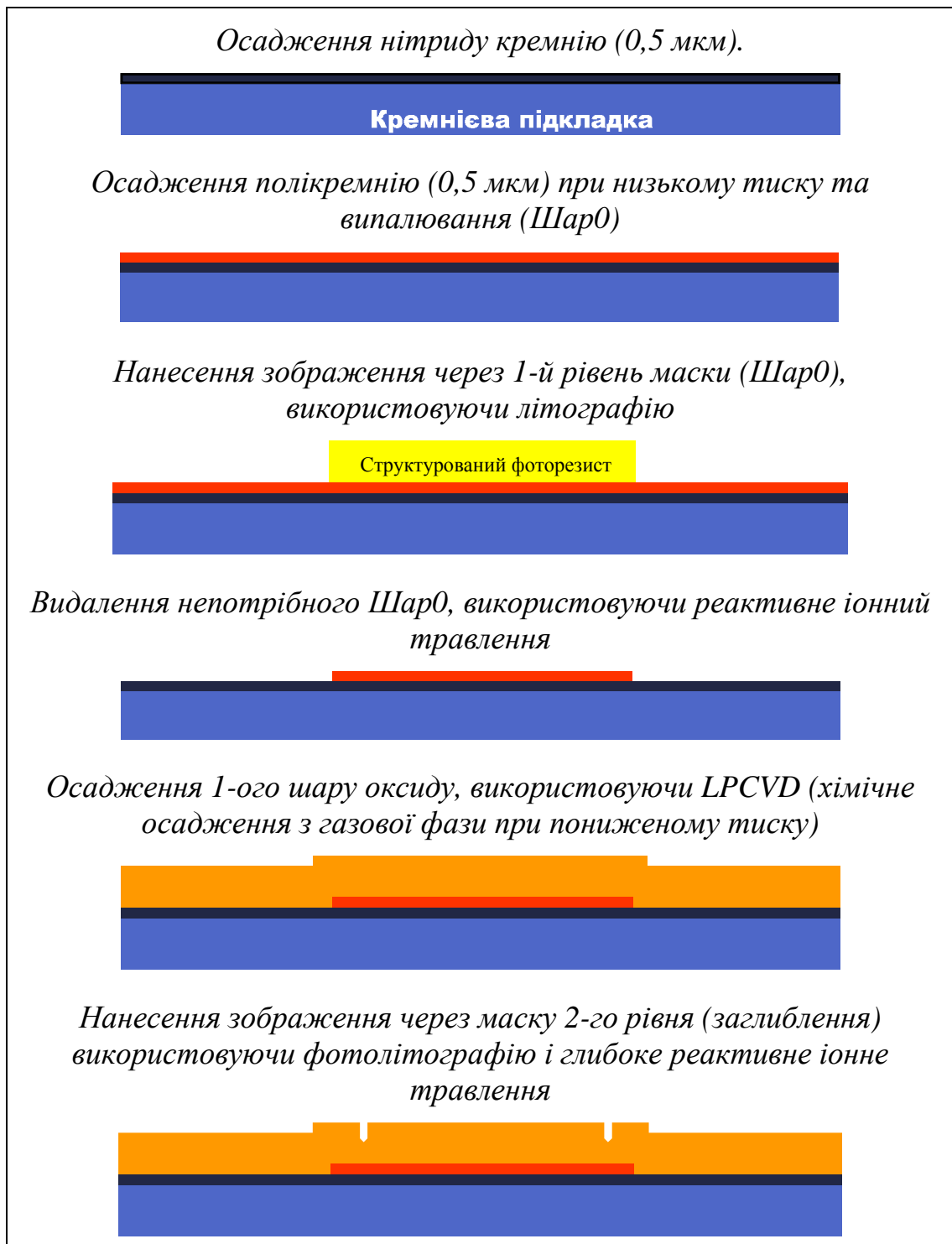


Рис. 5.2 Етапи виготовлення мікробудованих систем за SIGA технологією

5.2 MUMPs - технологія

MUMPs – аббревіатура, яка означає багатокористувацька технологія мікробудованих систем, це дуже відома комерційна програма, яка надає розробнику рентабельний доступ до поверхневої механічної обробки. Це

програма, що пропонується винятково Cropos, призначена для надання універсальної мікрообробки різним користувачам, які бажають проектувати і виготовляти мікросистеми [49-51]. Її почали використовувати в грудні 1992 р. Цей процес, можна вважати трампліном для того, щоб проектувати і перевіряти дослідні зразки мікробудованих систем і прискорювати процеси розвитку виробу. MUMPs - це процес три шарової полікристалічної поверхневої мікрообробки [52]. Детально етапи MUMPs проказані на рис. 5.3.



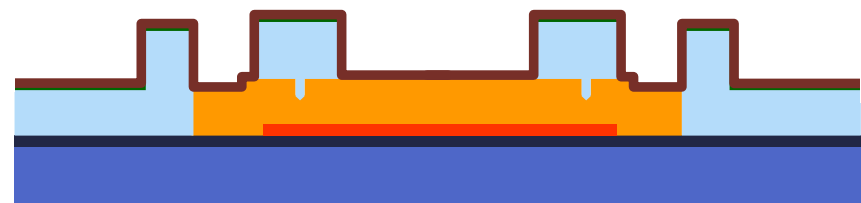
Глибоке реактивне іонне травлення



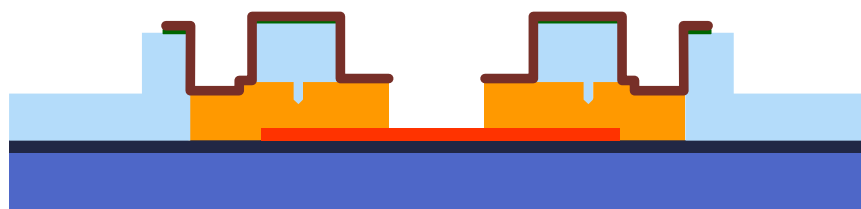
Нанесення осажденного шару чистого полікремнію (Полі1) використовуючи LPCVD, після чого осадження PSG (фосфорсилікатного скла) і випалювання при температурі 1050 °C



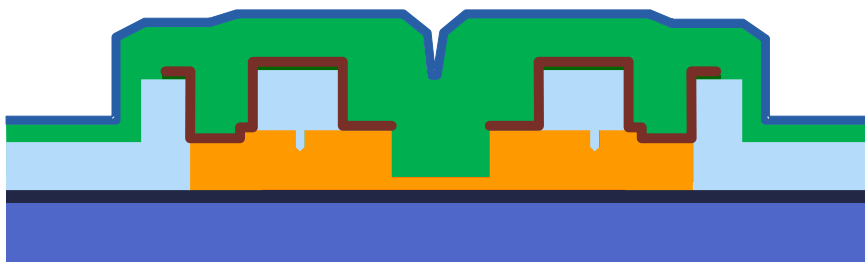
Нанесення зображення через 4-й рівень маски (Полі1), використовуючи фотолітографію і глибоке реактивне іонне травлення



Осадження 2-го шару оксиду. Нанесення зображення через маску 6-го рівня, використовуючи фотолітографію і глибоке реактивне іонне травлення



Осадження чистого полікремнію, потім нанесення PSG (фосфорсилікатне скло) шару жорсткої маски, потім випалювання



Нанесення зображення через маску 7-го рівня, використовуючи фотолітографію і глибоке реактивне іонне травлення

Нанесення зображення через маску 8-го рівня, використовуючи фотолітографію і відрив, потім видалення непотрібного фоторезисту і металу у ванні із розчинником

Реалізація структури, використовуючи HF

Рис. 5.3 Основні етапи виготовлення мікробудованих систем за MUMPs технологією

Вищенаведені технології використовуються для виготовлення МЕМС в залежності від їх функціонального призначення.

5.3 Об'ємна мікрообробка

Об'ємна мікрообробка - це виробничий процес, що йде від поверхні кремнієвої пластини вглиб, при якій хімічним травленням послідовно видаляються непотрібні ділянки кремнію, в результаті чого залишаються корисні механізми. Традиційним фотоспособом на пластині формується малюнок, що захищає ті ділянки, які необхідно зберегти. Потім пластини занурюються в рідкий витравлювач, в якості якого може використовуватися гідроксид калію, який витравлює незахищені ділянки кремнію. Технологія об'ємної мікрообробки відносно проста і недорога, і добре підходить для нескладних конструкцій.

5.4 Поверхнева мікрообробка

На противагу об'ємної мікрообробки, суть якої полягає в пошаровому видаленні матеріалу з поверхні пластини з допомогою травлення, при поверхневій мікрообробці відбувається послідовне нарощування шарів матеріалу на кремній.

Детально етапи кремнієвої поверхневої мікрообробки зображені на рис. 5.4.

1. Осадження ізолюючого шару і основи з полікремнію.
2. Осадження 1-го захисного шару і формування вхідного рисунка.
3. Осадження полікристалічного кремнію і формування зображення рисунка статора и ротора
4. Нанесення рисунка на 1-й та 2-й захисні шари
5. Травлення захисних шарів і вивільнення ротора

Рис. 5.4 Основні етапи технології виготовлення МЕМС з використанням кремнієвої поверхневої мікрообробки

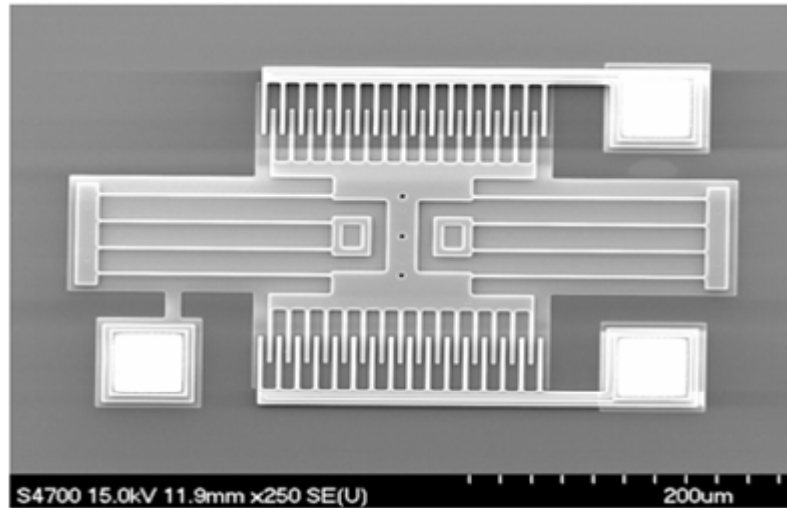


Рис. 5.5 Полікремнієвий резонатор, виготовлений методом поверхневої мікрообробки[53]

Типовий процес поверхневої мікрообробки являє собою повторювану послідовність нанесення на поверхню пластини тонких плівок, формування на плівці захисного малюнка методом фотолітографії і хімічного травлення плівки. Щоб створити рухомі механізми, в шарах чергують тонкі плівки конструкційного матеріалу (зазвичай це кремній) і заповнювача, званого також абляційним матеріалом (як правило, двоокис кремнію). З конструкційного матеріалу утворюються механічні елементи, а абляційний матеріал заповнює порожнечі між ними. На останньому етапі заповнювач видаляється травленням, після чого всі передбачені конструкцією елементи можуть рухатися.

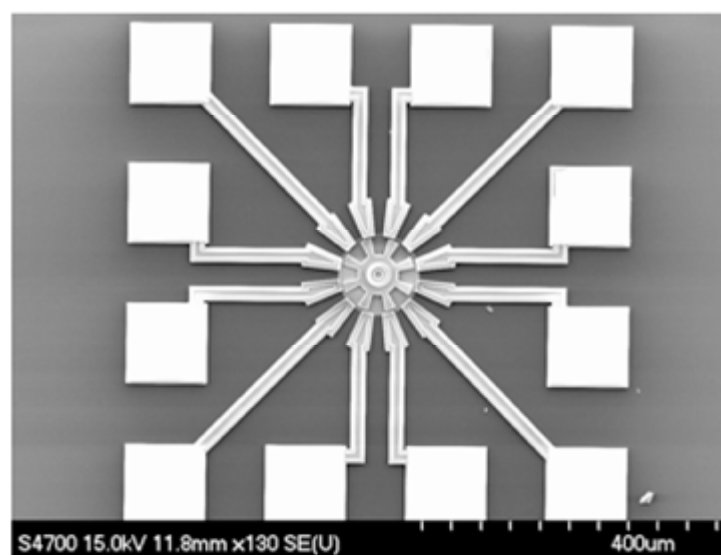


Рис. 5.6 Полікремнієвий мікромотор, виготовлений методом поверхневої мікрообробки [53]

Якщо в якості конструкційного матеріалу використовується кремній, а заповнювачем служить двоокис кремнію, фінальний етап полягає в зануренні пластини в плавикову кислоту, яка швидко витравлює заповнювач, натомість на кремній не чинить жодного впливу.

Зазвичай, на наступному кроці пластину розрізають на окремі кристали, які, в свою чергу, упаковуються в корпуси тієї або іншої конструкції.

Поверхнева мікрообробка вимагає більшої кількості технологічних операцій, ніж об'ємна, і, відповідно, вона дорожча. Поверхнева мікрообробка використовується для створення більш складних механічних елементів.

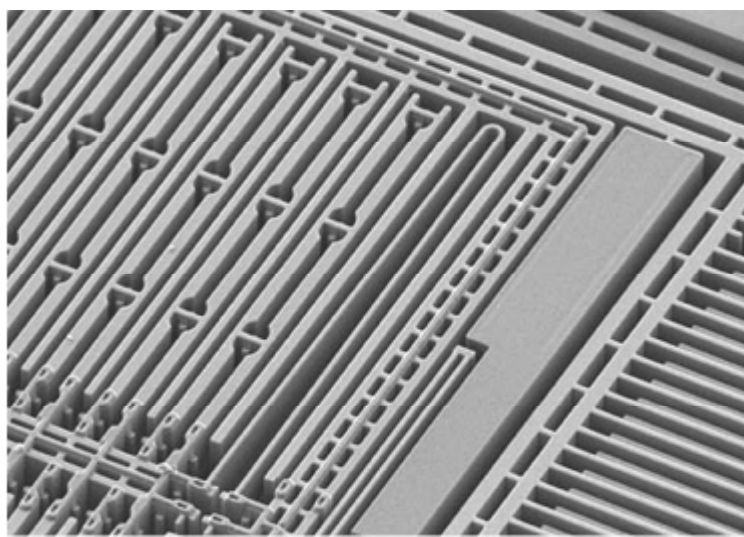


Рис. 5.7 MEMC давач прискорення [54]

5.5 Технологія виготовлення LIGA

LIGA технологія розроблена в Німеччині приблизно 40 років тому. Аббревіатура означає – рентгенолітографія, гальваніка і формування. Це технологія, що дозволяє методами рентгено-літографії створювати невеликі елементи з відносно великим співвідношенням висоти до ширини. Суть процесу полягає у використанні рентгенівського випромінювання від синхротрона для отримання глибоких, з прямовисними стінками топологічних структур у полімерному матеріалі [55-59]. Випромінювання синхротрона має надзвичайно малий кут відхилення променя. Джерелом випромінювання є високоенергетичні електрони (енергія $E > 1 \text{ ГэВ}$), які рухаються з порівняно

великими швидкостями. Глибина проникнення випромінювання досягає одиниць міліметрів. Це обумовлює високу ефективність експонування.

Основним недоліком і причиною обмеженого розповсюдження даної технології є необхідність використання синхротрона, унікального устаткування деяких ядерних дослідницьких центрів.

Таблиця 5.1

Основні операції LIGA ліга технології

Параметри процесу	Переваги	Недоліки
1. Рентгенолітографія (синхротрон) в поліметилметакрилаті $0 < d < 2$ мм.	Має найкраще відношення ширини каналу до довжини при мінімальних розмірах	Обмежена можливість комбінування з напівпровідниковою технологією (КМОН).
2. Гальваніка	Структури з високою роздільною здатністю топологічного зображення	Є обмеження на форму рельєфу і на створення вільно переміщуваних структур.
3. Дочірня і велика дочірня копія з полімерів або металу.	Жорсткий допуск	Обмежена точність по висоті
	Можливе створення вільно переміщуваних структур.	Висока складність виготовлення
	Різноманітність матеріалів	Надзвичайно дорогі маски та експонування

Процес виготовлення в типовому випадку починається з нанесення фотомаски на поверхню листа поліметилметакрилату (ПММА). Потім ПММА піддається дії рентгенівських променів високої потужності. Відкриті ділянки, не захищені маскою під дією рентгенівських променів видаляються, в результаті чого отримується шаблон деталі, яку необхідно виготовити. На наступному кроці відбувається заливка шаблону та його видалення за допомогою відповідного витравлювача, в результаті чого утворюються

виключно точні мікроскопічні механічні елементи. Детально етапи виготовлення MEMC по LIGA технології показані на рис. 5.8.

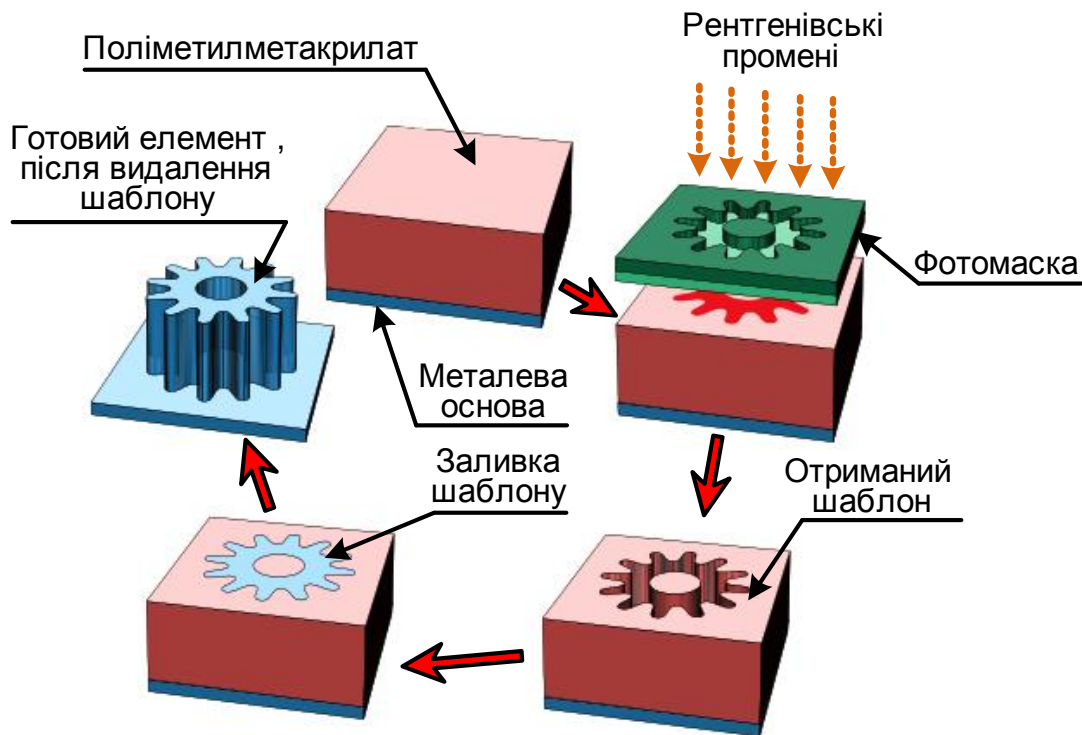


Рис. 5.8 Процес виготовлення шестерні з великим коефіцієнтом співвідношення висоти до ширини за допомогою технології LIGA [60]

Технологія LIGA відносно дешева і добре підходить для конструкцій, які вимагають великого коефіцієнта співвідношення висоти до ширини, чого не можна досягти за допомогою поверхневої мікрообробки.

5.6 Глибоке реактивне іонне травлення

У 1994 році, компанія Bosch, з Німеччини, розробила технологію глибокого реактивного-іонного травлення. Реактивне іонне травлення (Deep Reactive Ion Etching - DRIE) - технологія травлення, використовувана в мікроелектроніці. Для видалення матеріалу з підкладки використовується хімічно активна плазма. Плазма створюється при низькому тиску за допомогою газового розряду. Спільна дія хімічних реакцій, іонного розпилення і іонної активації призводить до руйнування матеріалу підкладки, утворення летких з'єднань і десорбції їх з поверхні. Дана технологія розроблена для мікро

пристроїв, у яких необхідно витравити глибокі отвори, або канавки. За такою ж технологією витравляються прорізи для високо-щільних конденсаторів DRAM (динамічна пам'ять з довільним доступом).

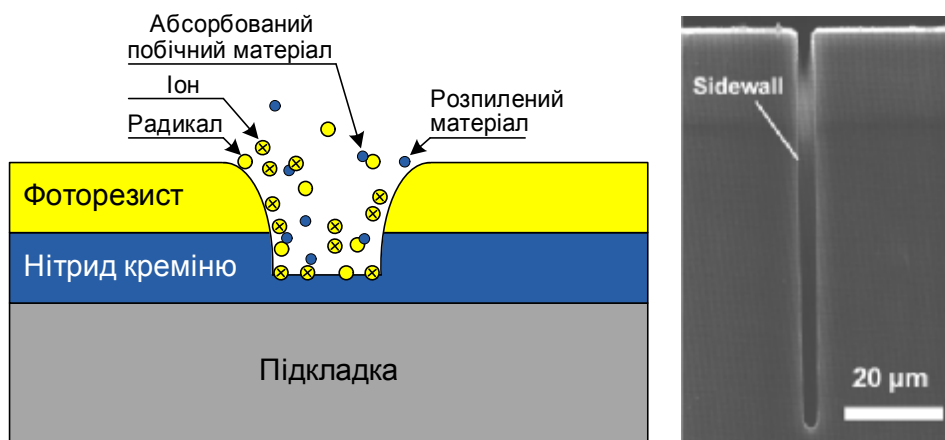


Рис. 5.9 Глибоке реактивне іонне травлення [61]

Від традиційної об'ємної мікрообробки глибоке реактивне іонне травлення відрізняється тільки тим, замість вологого хімічного травлення для створення фігур використовується плазма. Це дозволяє набагато гнучкіше управляти профілями травлення і суттєво розширити асортимент мікроелементів. Виробниче обладнання для іонного травлення вельми дороге, тому й прилади, створені за технологією DRIE, як правило, дорожчі приладів, зроблених з використанням традиційного вологого травлення.

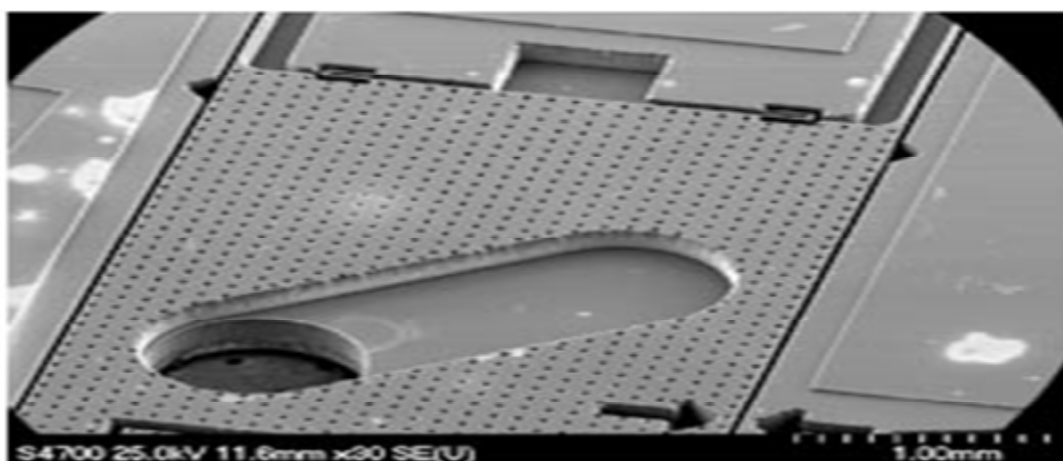


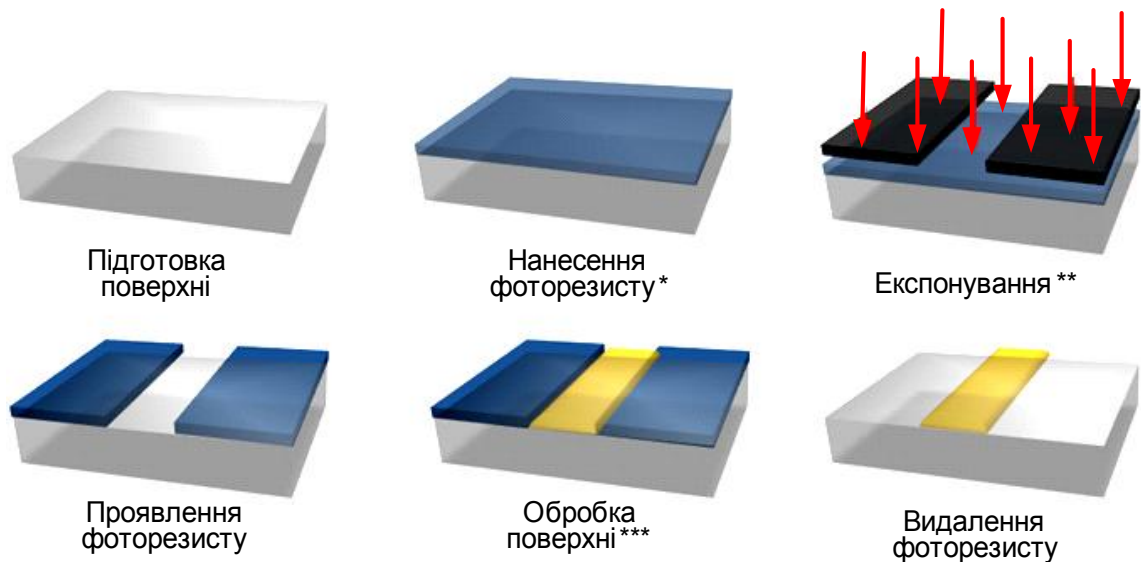
Рис. 5.10 МЕМС, сформована двостороннім глибоким реактивним іонним травленням [62]

5.7 Фотолітографія

Фотолітографія - процес формування на поверхні підкладки елементів приладів мікросистемної техніки за допомогою чутливих до видимого або ультрафіолетового світлового випромінювання матеріалів, здатних відтворювати задане взаємне розташування і конфігурацію цих елементів [63].

Суть процесу фотолітографії зводиться до того, що спочатку на оброблювану поверхню наноситься тонка фото чутлива полімерна плівка (фоторезист). Потім ця плівка засвічується через фотошаблон. Далі проексповані ділянки видаляються в проявнику. Одержаний шаблон використовується для наступного технологічного процесу, яким може бути: травлення, електроосадження, вакуумне напилення та інші. Після проведення одного з цих процесів залишки фоторезисту, який не видалився при проявленні видаляють.

Принципова відмінність фотолітографії від інших видів літографії полягає в тому, що експонування проводиться світлом (видимим або ультрафіолетовим), тоді як в інших видах літографії для цього використовується рентгенівське випромінювання (рентгенівська літографія), потік електронів (електронно-променева літографія) або іонів (іоннопроменева літографія). Детально етапи виготовлення МЕМС з використанням технології фотолітографії показані на рис. 5.11.



- * Фоторезист — полімерний світлочутливий матеріал .
- ** Експонування — процес опромінювання світлом фоточутливого матеріалу .
- ***Обробка поверхні може бути різною , наприклад електроосадження

Рис. 5.11 Процес виготовлення елементів МСТ за допомогою фотолітографії [64]

5.8 Матеріали для мікрообробки

Даний підрозділ призначений для роз’яснення анізотропних властивостей кремнію та його властивостей. Кремній є найпоширенішим матеріалом для підкладки. Він був успішним у мікроелектроніці і звідти емігрував в мікросистемну техніку з декількох причин:

- 1) кремнію є достатньо в природі, він недорогий, і може бути оброблений до ідеальної чистоти;
- 2) висока чіткість відтворення форм за допомогою фотолітографії, ідеально підходить для виготовлення високоточних МЕМС.

Інші кристалічні напівпровідники, включаючи германій (Ge) і арсенід галію (GaAs) використовується в якості матеріалів підкладки через подібність властивостей до кремнію, але кремній відрізняється від інших напівпровідників тим, що він може легко окислюватися утворенням хімічно інертного і електрично-ізолюючого поверхневого шару SiO₂ під дією пари.

Однорідність кристалічної структури кремнію надає йому електричні властивості, необхідні в мікроелектронних схемах, при цьому він також має необхідні механічні властивості.

Кремній утворює той же тип кристалічної структури, що і алмаз. Хоча міжатомні зв'язки кремнію набагато слабкіші, він важчий за більшість металів. Крім того, він стійкий до механічних впливів, та володіє більшою межею пружності ніж сталі в обох напрямках, розтягування і стиснення.

Монокристалічний кремній також має хороші показники у повторюваності циклів розтягування і стиснення.

Кристалічні орієнтації кремнію важливі при виготовленні МЕМС пристроїв, оскільки деякі з травильних розчинів, мають здатність витравлювати кристал з різною швидкістю в різних напрямках (рис. 5.12).

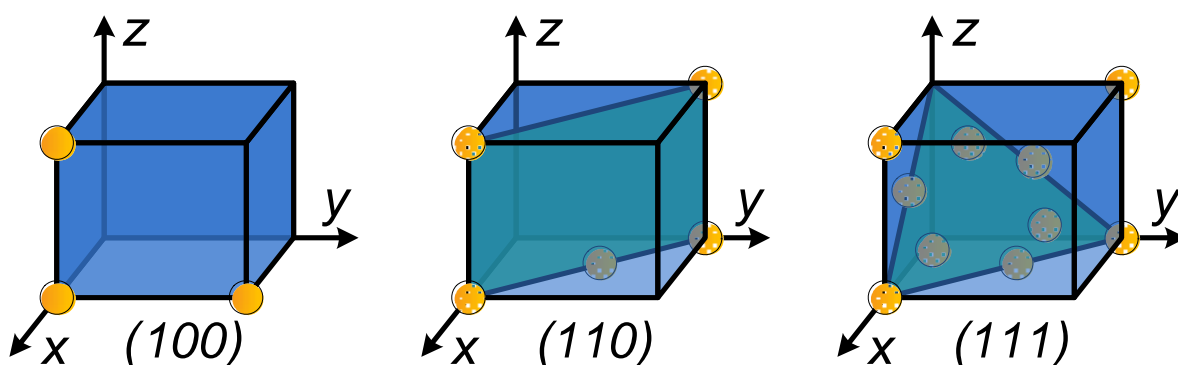


Рис. 5.12 Кристалографічні індекси площин кремнію [65]

Кремній є найпопулярнішим матеріалом, який використовується в якості підкладки для MEMS-пристроїв, але тривають дослідження і інших не напівпровідникових підкладок матеріалів, включаючи метали, кварцеві кристалічні ізолятори, кераміку і полімери.

5.9 Рідке хімічне травлення

Рідке травлення - це видалення непотрібного матеріалу через занурення (як правило, кремнієвої пластини) в рідку ванну хімічного витравлювача. Витравлювач може бути ізотропним або анізотропним.

Ізотропні витравлювачі – витравлюють матеріал з тією ж швидкістю у всіх напрямках, а, отже, видаляють матеріал під маскою з тією ж швидкістю, що і матеріал без маски. Приклад ізотропного витравлювання показано на рис. 5.13 а) та б). Найпоширенішим витравлювачем для кремнію є суміш

фтористоводневої кислота (HF), азотної кислоти (HNO^3) і оцтової кислоти (CH^3COOH). Ізотропні витравлювачі обмежені геометрією конструкції, яку піддають витравлюванню. Витравлювання може уповільнитись, а в деяких випадках (наприклад, в глибоких і вузьких каналах), воно може зупинитися через дифузію. Проте, цей ефект можна звести до мінімуму шляхом перемішування витравлювача, в результаті чого можна отримати структуру з майже ідеальними округлими поверхнями рис. 5.13 а) [66].

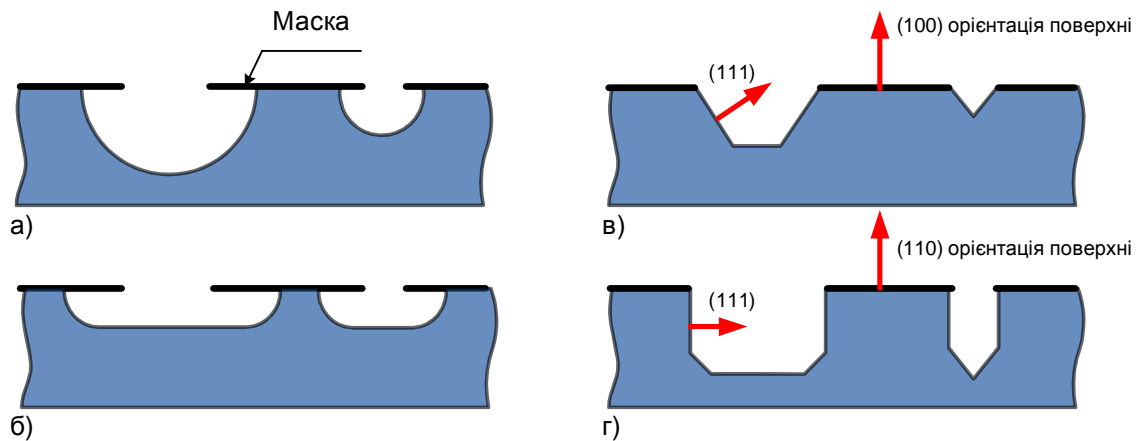


Рис. 5.13. Ізотропного травлення (а, б) та анізотропне витравлювання кремнію (в, г)

В якості анізотропного витравлювача використовується гідроксид калію (KOH), це найпоширеніший анізотропний витравлювач, оскільки він є відносно безпечним для використання. Форма утворених структур у підкладці залежить від кристалічної орієнтації кремнію у підкладці. Більшість таких анізотропних витравлювачів швидко прогресують в напрямку кристала перпендикулярно до площини (110) і швидко менше в напрямку, перпендикулярному до площини (100). У напрямку, перпендикулярному до площини (111) витравлювання відбувається набагато повільніше, або взагалі не відбувається. На рис. 5.13б) і г) показані приклади анізотропного травлення перпендикулярно до (100) і (110) кремнію.

5.10 Сплавлення

Для того, щоб сформувати складніші і великі MEMS структури, декілька елементів можуть бути з'єднані між собою у процесі, відомому як сплавляння.

Це метод, який дозволяє реалізувати практично безшовну інтеграцію декількох шарів і годиться для створення атомного зв'язку між кожним шаром, безпосередньо (використовуючи нагрівання під тиском) або використовуючи тонку плівку діоксиду кремнію (рис. 5.14). Отриманий композит має дуже малі залишкові напруження, за рахунок відповідних коефіцієнтів теплового розширення.

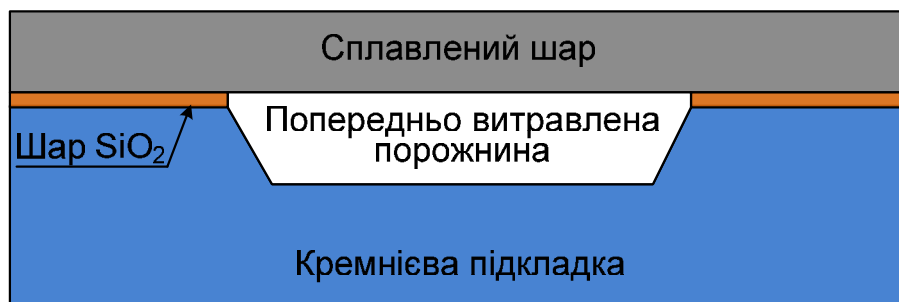


Рис. 5.14 Формування закритої порожнини методом сплавлення

Оскільки для створення МЕМС використовується те саме обладнання і ті технології, що і для виготовлення інтегральних схем, ніщо не заважає формувати електронні схеми на одному кристалі з мікромеханізмами.

6 ПРОЕКТУВАННЯ МЕМС

При виготовленні та експлуатації МЕМС зустрічається маса особливостей і проблем, обумовлених малими розмірами – наприклад проблема сухого тертя, чи небезпека поломки через сили поверхневого натягу. Тому проектування мікросистем надзвичайно важливий процес. Існує досить багато спеціальних програмних засобів, які дозволяють моделювати МЕМС пристрої.

6.1 Закони пропорційної мініатюризації

При вивченні мікросистем, наслідки пропорційного зменшення розмірів представляють особливий інтерес. Тобто приймається, що всі розміри і кути залишаються у фіксованому співвідношенні один з одним, а змінюється тільки масштаб довжини, наприклад, припустимо ізометричний масштаб. Механічні процеси описуються відповідними характерними числами, які повинні залишитися незмінними, для того, щоб процеси залишилися такими ж. Деякі числа залежать від розміру системи, а інші незалежні від нього.

При лінійному зменшення розмірів «масові» сили зменшуються в кубі, а «поверхневі» тільки в квадраті. Зростає вплив в'язкості, в пристроях різних приводів (що врівноважують, резонаторах тощо) найефективнішими виявляються електростатичні, а не звичні електромагнітні.

Платою за малі розміри часто виявляється падіння чутливості, збільшення ролі теплових шумів. Ставка на чутливіші напівпровідникові перетворювачі може обернутися збільшенням температурних похибок.

В процесі моделювання та проектуванні МЕМС давачів чи актюаторів необхідно враховувати багато фізичних явищ, а саме: пружні коливання, інерцію, поверхневий натяг, перехідні процеси при перенесенні тепла, конвекцію, механіку рідин та ін., саме тому нижче описано характеристичні числа, які описують ці явища.

6.1.1 Число Рейнольдса (механіка рідини).

Найвідоміше і найчастіше використовуване характеристичне число – це Число Рейнольдса, яке визначається із наступної залежності [67]:

$$R_e = \frac{\rho u L}{\eta} = \frac{u L}{\nu} \quad (6.1)$$

де u – середня швидкість текучого середовища; L - визначальний лінійний розмір [дорівнює діаметру, якщо поперечний переріз круглий]; ν - кінематична

в'язкість текучого середовища: $\nu = \frac{\eta}{\rho}$, η - динамічна в'язкість текучого

середовища; ρ - густина текучого середовища. Число Рейнольдса показує співвідношення між інерційними силами і силами тертя або в'язкості в потоці рідини або газу. Воно головним чином використовується для характеристики режиму потоку текучого середовища, як показано на рис. 6.1.

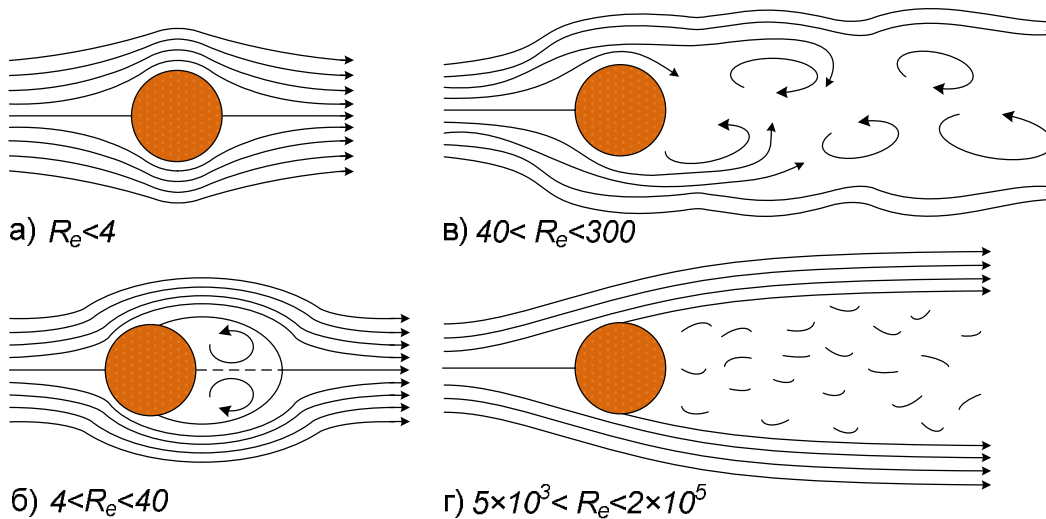


Рис. 6.1 Залежність режиму потоку текучого середовища від числа Рейнольдса: а) ламінарний потік $Re < 4$; б) формування попутного потоку $4 < Re < 40$; в) періодичний попутний потік $40 < Re < 300$; г) нерегулярний попутний потік $5 \times 10^3 < Re < 2 \times 10^5$ (відділення граничного шару)

При числі Рейнольдса нижче критичного, буде ламінарний потік; вище критичного, розвивається вихровий потік, швидкість і тиск якого змінюються стохастично біля середнього значення. Часто залежне від довжини число Рейнольдса використовується для того, щоб обчислити точну відстань, при якій потік стає не ламінарним, а вихровим. Якщо число Рейнольдса стає дуже

великим або занадто маленьким, це призводить до спрощення рівняння Нав'є - Стокса. Якщо кінематична в'язкість $\nu = \frac{\eta}{\rho}$ прямує до нуля, то число Рейнольдса прямує до нескінченності $Re \rightarrow \infty$. Випадок потоку ідеальної рідини (рівняння Ейлера) застосовується тоді, коли число Рейнольдса дуже велике. Випадок $Re \rightarrow 0$ отримується для дуже в'язких рідин ($\eta \rightarrow \infty$), для потоку рідини в вакуумних трубах ($\rho \rightarrow 0$), для потоку навколо маленьких тіл ($L \rightarrow 0$), і для потоків з низькою швидкістю ($v \rightarrow 0$). У цих випадках інерційними силами можна нехтувати, за допомогою чого нелінійна складова в рівнянні Нав'є-Стокса наближається до нуля і розв'язок істотно спрощується.

6.1.2 Число Коші (пружні коливання)

Число Коші характеризує рух або вібрацію та визначає співвідношення інерційних сил і сил пружності в твердому тілі [68]:

$$C_a = \frac{\rho}{E} \omega^2 L^2. \quad (6.2)$$

Число Коші залежить тільки від квадрата довжини L і частоти коливань ω , а також від властивостей матеріалу (від густини ρ і модуля Юнга E). Амплітуда частоти коливань обернено пропорційна довжині. З цього випливає, що механічні мікросистеми мають дуже високі власні частоти.

Хоча власні частоти обмежують робочий діапазон, мініатюрні системи проявляють значно покращені динамічні характеристики і менший час реакції.

6.1.3 Число Вебера (інерція, поверхневий натяг)

Число Вебера – критерій подібності у гідродинаміці, що базується на співвідношення інерційних сил і поверхневого натягу [69]:

$$W_e = \frac{\rho u^2 L}{\sigma_s}, \quad (6.3)$$

де u – це швидкість, ρ – густина і σ_s – поверхневий натяг, для води значення $\sigma_s = 0,073$ Н/м. Для великих чисел Вебера інерційні сили грають головну роль, в той час як для маленьких чисел Вебера сили поверхневого натягу є значними.

Число Вебера є важливим при формуванні хвиль на вільних поверхнях, для потоків рідини в капілярах і каналах, а також при формуванні крапель. Число Вебера пов'язує силу поверхневого натягу з об'ємними силами. При невеликих розмірах сили, пов'язані з поверхнею, домінують.

6.1.4 Число Фур'є (перехідний процес при перенесенні тепла)

Число Фур'є вказує на співвідношення між накопиченою енергією і проведеною тепловою енергією [70]:

$$F_0 = \frac{l}{C_p r} \frac{t}{L^2}. \quad (6.4)$$

Воно визначає ступінь проникнення і розповсюдження тепла в разі перехідного процесу при перенесенні тепла через коефіцієнт теплопровідності λ , питому теплоємність C_p і густину r . Число Фур'є обернено пропорційне квадрату довжини L і прямо пропорційне часу. Для $F_0 < 1$ тіло має однорідну температуру і перехідний ефект не має значення. Актюатори макродіапазону занадто повільні через свою теплову інерцію.

6.1.5 Число Фруда (механіка, конвекція, механіка рідини)

Число Фруда має важливе значення для всіх динамічних переміщень в гравітаційному полі [71]:

$$F_r = \frac{v^2}{gL}. \quad (6.5)$$

Воно характеризує співвідношення між інерційними силами і силами гравітації, та залежне від швидкості – v , прискорення вільного падіння – g і довжини L .

При великих значеннях числа Фруда дією сили тяжіння можна знехтувати, тоді як при малих значеннях числа Фруда можна нехтувати силами інерції. Так як число Фруда обернено пропорційне величині довжини, ефект гравітації зменшується при зменшенні розмірів.

6.2 Проектування мікросистем

Проектування - альтернатива багатокрокового процесу наближення рішення до оптимального (див. рис. 6.2):

- Пошук рішення, яке максимально задовольнятиме групу вимог;
- Вимоги можуть бути конфліктними між собою;
- Альтернативи повинні бути знайдені;
- Продуктивність – не є основною метою проектування;
- Мета часто замінюється на спрощення виробництва.

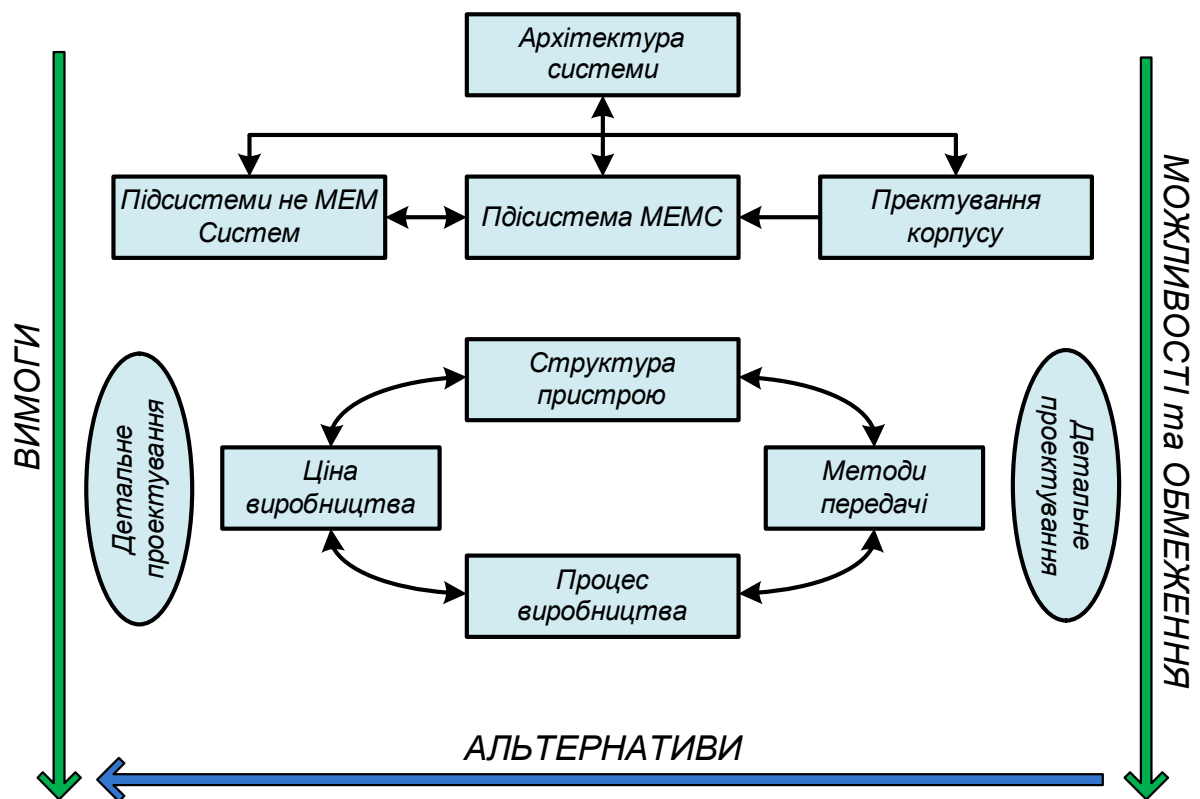


Рис. 6.2 Загальна схема проектування мікросистем

На початковому етапі проектування відбувається опис мікросистеми. Опис включає як електричні параметри системи, так і механічні.

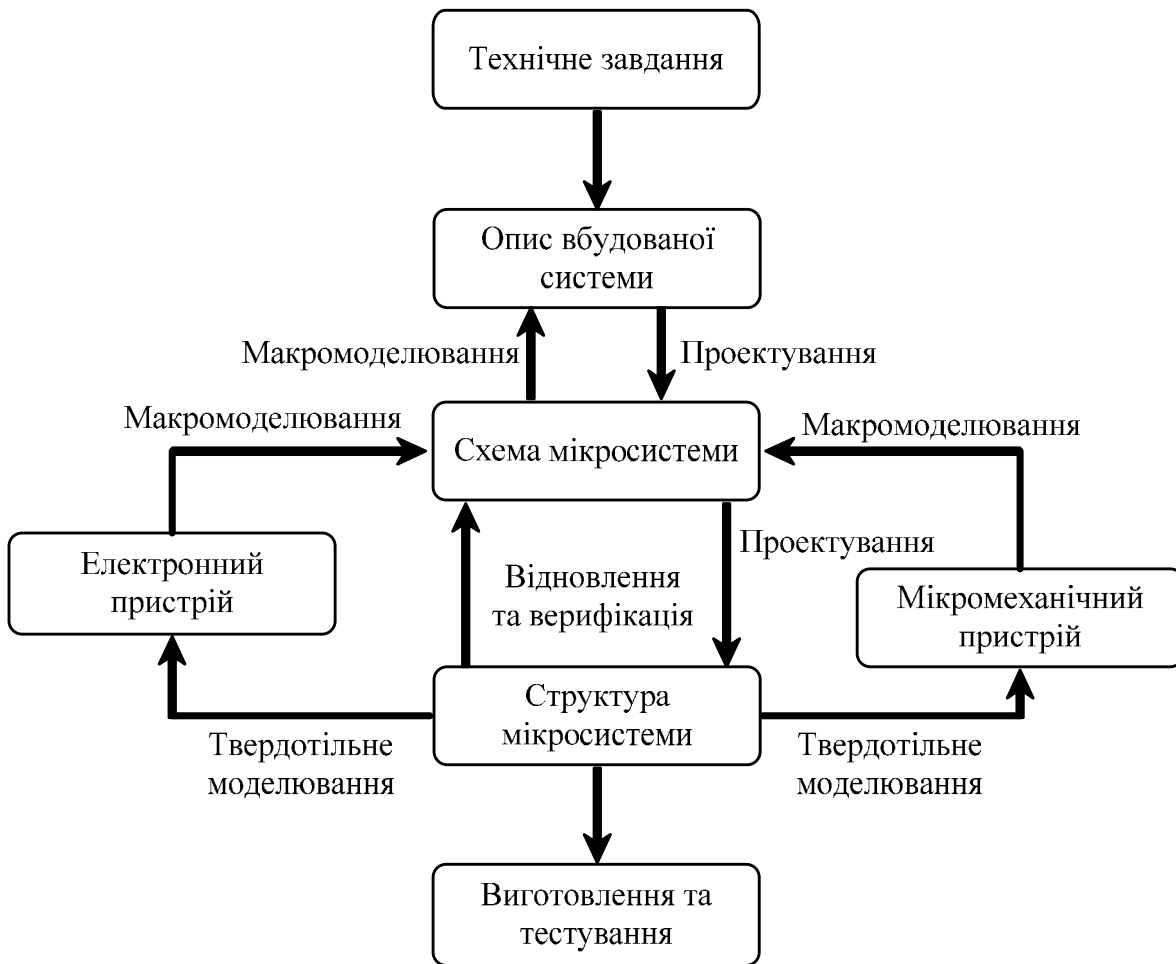


Рис. 6.3 Структурна схема проектування та виготовлення вбудованих систем

Наступний крок передбачає проектування електричної схеми вбудованої системи з подальшим її аналізом за допомогою відповідних програмних засобів [72, 73].

За результатами побудови першого наближення електричної схеми мікросистеми відбувається проектування конструкції механічної складової з подальшим моделюванням її вихідних характеристик. Такий аналіз дозволяє уточнити електричну схему заміщення та інтегрувати її у загальну схему виробу.

Ітераційний процес продовжується доти, поки всі вихідні електричні та механічні параметри не будуть задовольняти технічному завданню. Після цього проектування передбачає виготовлення та тестування мікросистеми.

Враховуючи те, що МЕМС є наукоємними пристроями, їх ефективне проектування неможливе без використання нових інформаційних технологій, програмних засобів, методів, моделей, методологій і алгоритмів.

Для розв'язання задач проектування МЕМС, як правило використовується блочно-ієрархічний підхід, який передбачає використання принципу ієрархічності для структурування представлень про об'єкти за ступенем деталізації описів та принцип декомпозиції (блочності, модульності) для розбиття представлень кожного рівня на складові (довершені блоки) з можливістю їх поблокового проектування [74, 75, 76]. Структурна схема процесу проектування та моделювання мікросистем представлена на рис. 6.3.

Системою в загальному вигляді називають об'єктивну єдність закономірно зв'язаних між собою об'єктів і явищ. Якісно оцінюючи складність систем, розрізняють великі системи, вбудовані системи, підсистеми (підсистеми), комплекси, пристрої. При цьому чіткої границі в проведенні класифікації не існує. В одному випадку комплекс може бути системою, а в іншому – пристроєм залежно від його функціонального призначення. Це свідчить про таке: система – поняття відносне і може використовуватися у всіх випадках проектування, коли для прийняття ефективного рішення необхідно враховувати взаємодію багатьох факторів і обмежень.

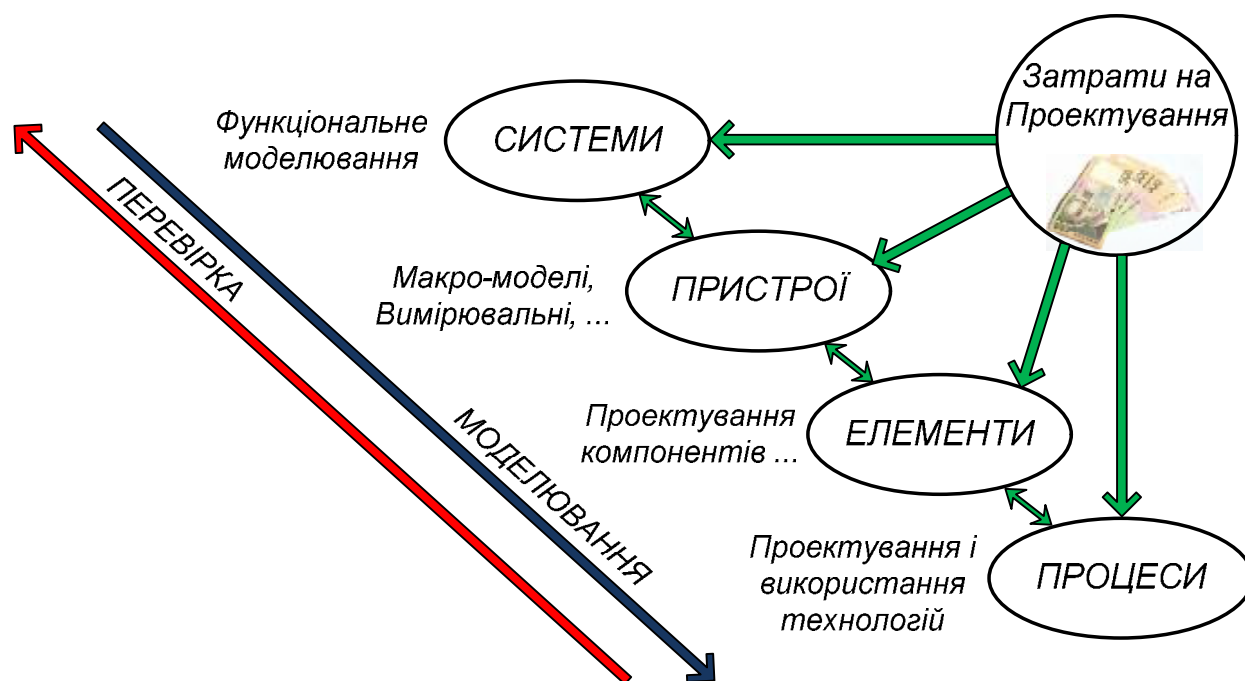


Рис. 6.4 Проектування та моделювання мікросистем

Оскільки МЕМС є складною системою то верхній рівень проектування можна розбити на блоки нижчого рівня проектування, і це буде другий рівень.

Оскільки блоки другого рівня також є складними об'єктами і їх можна розглядати як системи відносно до блоків третього рівня та доцільно з технічного погляду, розбити на простіші блоки, то кожний блок другого рівня можна описати як об'єднання блоків третього рівня. При потребі можна використовувати блоки четвертого і нижчих рівнів. Так процес продовжується доти, поки блоки m -го рівня вже недоцільно з певних міркувань піддавати декомпозиції на простіші. Блоки найнижчого рівня, як правило, називають базовими елементами.

Поділ на блоки виконується, як правило, за функціональною ознакою. Тобто, у випадку побудови елементів МЕМС, де для розроблення використовують три рівні на відміну від розроблення інтегральних схем (розроблення підсистеми обробки, збереження та передавання даних), перший рівень – МЕМС з набором функцій зазначених у технічному завданні, блоки другого рівня – це пристрої для контролю за станом навколишнього середовища, для збирання, опрацювання, збереження та видавання керуючих сигналів, пристрої для впливу на навколишнє середовище та ін., а блоки третього рівня – балки, пружини, інерційні маси, інтегральні транзистори, резистори, конденсатори тощо.

У процесі розроблення мікросистем переважно використовують класичне багаторівневе ієрархічне проектування [76, 77] “згори донизу”, “знизу догори”, паралельне їх поєднання, наскрізне тощо. Процес автоматизованого проектування мікросистем з врахуванням особливостей розроблення підсистеми збирання, опрацювання, збереження та видавання керуючих сигналів у формі інтегральної схеми передбачає чотири рівні, які мають класичні назви: перший – системний, другий – функціональний, третій – схемотехнічний, а четвертий – компонентний (див. рис. 6.5) [78].

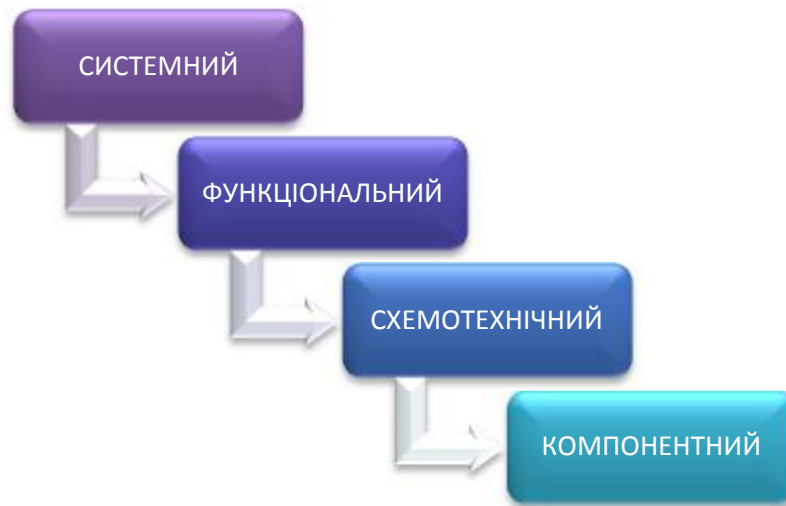


Рис. 6.5 Рівні проектування мікросистем

На системному рівні проектування розробляється технічне завдання для проектування вбудованої системи, на основі аналізу додаткових функцій, які належить виконувати вбудованій системі.

На сучасному етапі автоматизованого проектування саме електромеханічних, електромагнітних, п'єзоелектричних, електротеплових та інших елементів мікросистемної техніки використовується три рівні, тобто: системний, схемотехнічний та компонентний. Відсутній функціональний рівень. Складність фізичних процесів, які проходять в цих пристроях з мікронними розмірами, жорсткі вимоги до точності їх виготовлення (допуски на конструктивні параметри елементів мікросистемної техніки жорсткіші, ніж на елементи електронних схем), багатofункціональність елементів конструкції, необхідність оцінювання принципової можливості функціонування пристрою та можливості його реалізації за допомогою існуючих технологій, особливо в процесі проектування нових елементів МЕМС, потребують розв'язання задач, що знаходяться між системним та схемотехнічним рівнями (це задачі кінематики в механіці, які можна віднести до функціонального рівня проектування, задачі, пов'язані з розробленням алгоритмічного забезпечення МЕМС та ін.). Отже, у випадку проектування за підходом “згори вниз” (див. рис. 6.6) пристрій МЕМС розбивається на функціонально довершені модулі: блоки живлення, мікродавачі, модулі обробки, передавання та збереження інформації, виконавчих пристроїв тощо. У

цьому випадку маємо справу з схмотехнічним рівнем автоматизованого проектування [78].

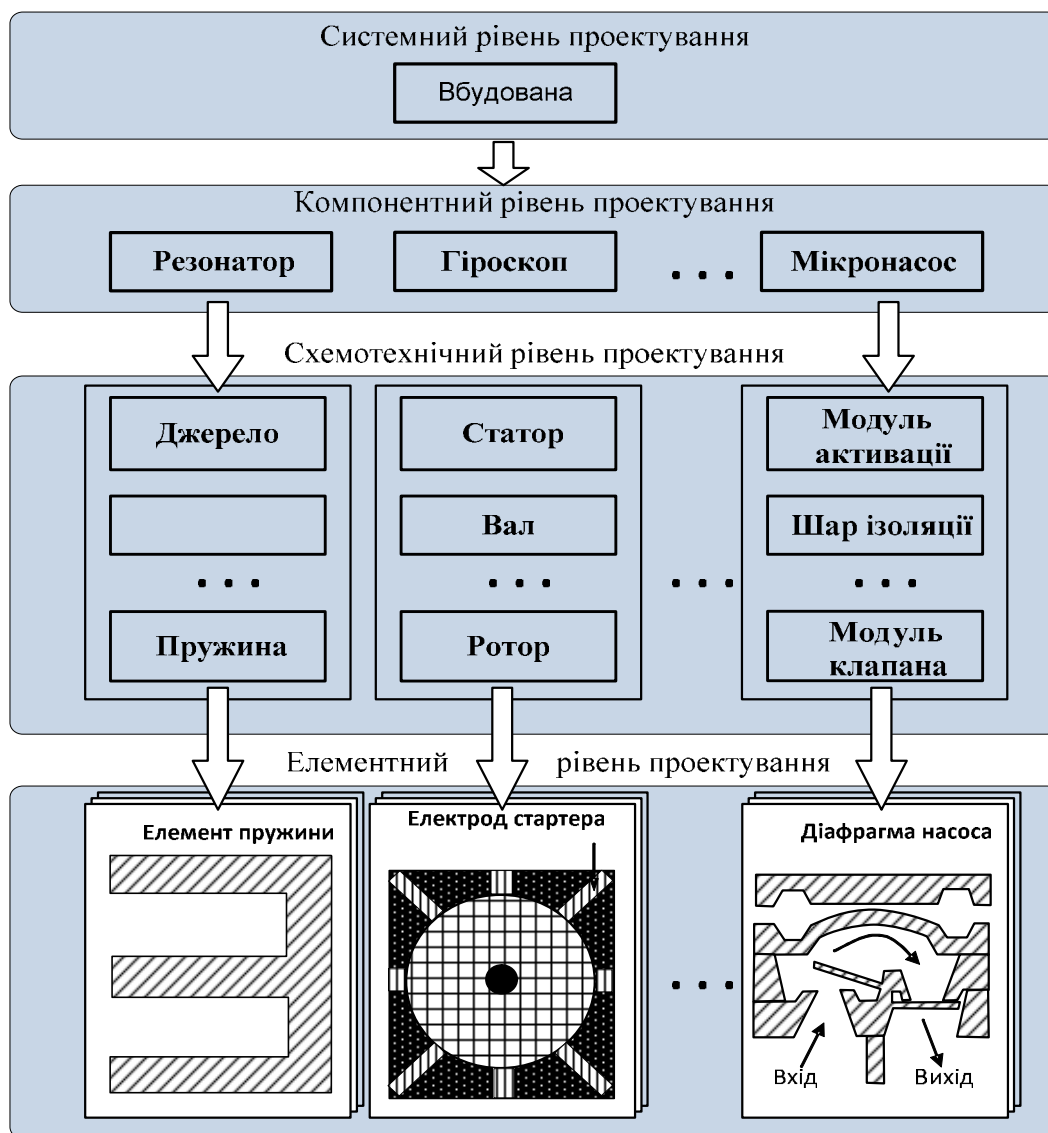


Рис. 6.6 Рівні проектування МЕМС “зверху-вниз”

Далі задача розроблення мікродавачів та мікроактюаторів розбивається на задачі проектування компонент (елементів), які є задачами компонентного рівня і пов’язані, наприклад, з розроблення статора двигуна чи джерела живлення електростатичного мікроактюатора. За потреби компоненти МЕМС можна піддати подальшій декомпозиції на елементи. У цьому випадку будемо мати справу з елементним рівнем, на якому розробляємо балки, анкери, пружини тощо.

Використання блочно-ієрархічного підходу для проектування МЕМС має низку переваг над іншими, зокрема: з простішими об’єктами проектування

зручніше працювати. Побудувати математичну модель цього об'єкта, провести моделювання, виконати верифікацію та тестування результатів розробки набагато простіше із елементами на елементному рівні. До того ж треба звернути увагу на таку особливість мікросистем: функціональні пристрої можуть належати до різних наукових областей, а розробник не може бути спеціалістом в усіх галузях науки та техніки, що може значно ускладнити процес розроблення як мікросистеми, так і її складових.

Підхід „знизу-вгору” (рис. 6.7) використовують у тому випадку, якщо необхідно побудувати подібний інтегральний пристрій, а значна частина складових МЕМС частково чи повністю вже спроектована. Цей вид розроблення МЕМС з кожним роком все частіше використовується, оскільки бібліотека розроблених елементів та мікроелектромеханічних систем з часом зростає. На перших етапах це стане можливим для окремих елементів МЕМС, потім компонент та підсистем і, в кінцевому випадку – цілих мікросистем.

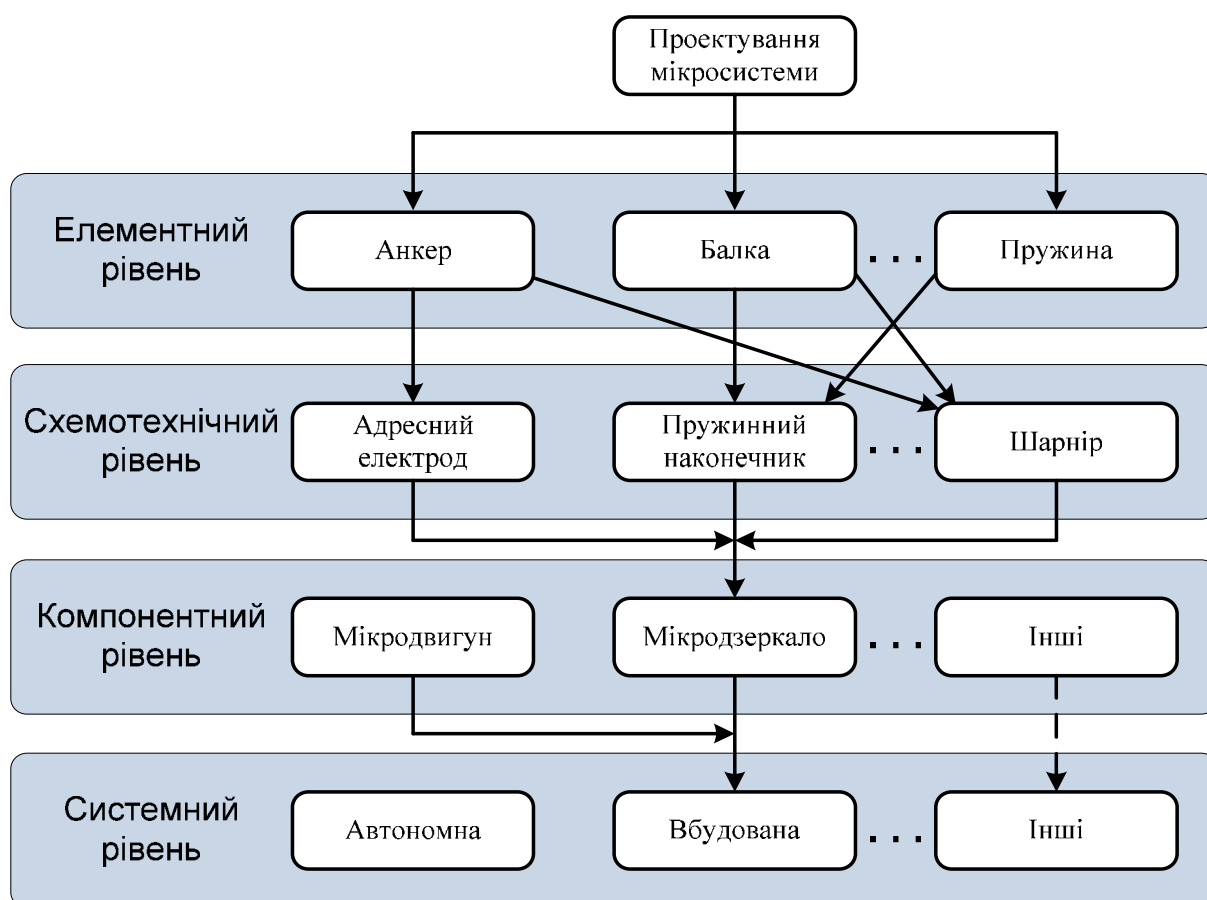


Рис. 6.7 Рівні проектування МЕМС “знизу-вгору”

Разом з тим, розробляти елементи мікроелектромеханічної системи доцільно паралельно, що дасть змогу на певних етапах значно прискорити процес проектування. Наприклад, розробляти мікродавачі, мікроактюатори та системи керування обробки і передавання даних можна паралельно.

6.3 Проблеми проектування мікросистем

Перераховувати конкретні застосування приладів MEMS можна надзвичайно довго, але всі ці прилади створені конструкторами MEMS як результат чіткого уявлення про можливості використовуваних технологічних процесів під час розв'язання поставленої задачі. Основними проблемами залишається розробка нових ефективних технологій формування об'ємних структур з різних матеріалів. Необхідно запропонувати технологію з достатньою роздільною здатністю для створення ще менших деталей та елементів з високими механічними характеристиками. Ще однією проблемою для мікросистемних технологій (МСТ) також є обмежений спектр матеріалів, що використовуються для виготовлення MEMS. Створення нових та залучення вже випробуваних матеріалів до мікросистемних технологій – основні задачі, що стоять перед технологами MEMS. Нові матеріали з унікальними властивостями та характеристиками можуть значно спростити конструкцію мікросистем чи розширити їхню функціональність. Істотними постають і питання проектування окремих елементів конструкції MEMS та усієї системи загалом. Щоб оцінити поведінку майбутньої конструкції у різних умовах експлуатації та вплив різноманітних навантажень, потрібно створювати складні математичні моделі для урахування багатьох чинників, що впливають на роботу MEMS. Щоб створити таку модель, необхідно залучати значні інформаційні ресурси: довідкові та експериментальні дані щодо характеристик конструктивних матеріалів, різноманітні складні фізико–математичні теорії та відповідне програмне забезпечення ЕОМ для забезпечення роботи таких моделей. Якісні та ефективні моделі значно пришвидшують вихід нової продукції, зменшують витрати на розроблення та модифікацію проміжних примірників. Тому для конструювання відповідного приладу MEMS фактично

неможливо обійтися без спеціальних комп'ютерних конструкторських програм. Сучасні програми конструювання, моделювання та аналізування дають конструктору змогу достатньо швидко створити модель такого приладу, використовуючи електронні бібліотеки конструктивних елементів, матеріалів тощо. Також робота з віртуальною моделлю майбутнього приладу дає змогу здійснити серію випробовувань та проаналізувати поведінку цього приладу в умовах нормальної роботи, перевантажень та нестандартних умов. Така перевірка дає змогу виявити помилки при конструюванні, виборі матеріалів конструкції, а також оптимізувати параметри окремих елементів для відповідного застосування ще на етапах проміжного проектування. Отже, використання програм моделювання та аналізу дає змогу пришвидшити розроблення робочого варіанта приладу, підібрати необхідні технологічні процеси та матеріали і зменшити обсяг випробовувань великої кількості дослідних зразків. Значна кількість рухомих елементів конструкції сучасного приладу MEMS є показником складності конструкції та довершеності технологій, що використовуються. Але це є одночасно і випробовуванням конструкторського рішення щодо зручності та продуманості послідовного відтворення усіх необхідних зв'язків – це так звана проблема збирання. Здебільшого намагаються створювати всі елементи об'єднаними в одну складну конструкцію, замінюючи елементи рухомого з'єднання на гнучкі пружні елементи. Але якщо така заміна є неприйнятною, тоді існують два виходи – або робити конструкцію такою, щоб рухомі елементи відділялися від решти на етапі однієї з останніх технологічних операцій так, щоб цей елемент вже перебував на своєму місці, або для його встановлення в необхідну позицію використовувати спеціальні пристрої – мікроманіпулятори з високою точністю позиціонування. Звичайно, у таких випадках перевагу надають проектуванню спеціального технологічного рішення без втручання у послідовність розташування та виготовлення елементів конструкції. Вимірювальна техніка 102 та метрологія, № 69, 2008 р. Попри проблему збирання, у таких випадках виникає проблема боротьби з тертям у місцях дотику, що зменшує ефективність

їхньої взаємодії. Для приладів МЕМС у зв'язку із способом виготовлення, а це, здебільшого, пошарове нарощування матеріалів, через недосконалість технологічних процесів та через надзвичайно малі розміри та сили, що характерні для такого типу приладів, навіть невелика для звичайного приладобудування шорсткість дотичних поверхонь надзвичайно сильно впливає на значення сили тертя та на ступінь зношення. Використання звичайних приладних олив є неприйнятним через їхню велику в'язкість та порівняно великі сили поверхневого натягу, що пов'язано з розміром їхніх молекул. Для рідкого змащення у таких випадках використовується етиловий спирт, як рідина з оптимальним розміром молекул та з низькими показниками поверхневого натягу.

Попри достатню кількість проблем, що вирішуються під час створення приладів МЕМС, вони є надзвичайно привабливими для замовників через велику кількість переваг над традиційними приладами мехатроніки. Значну роль тут відіграють низька маса конструкції, її малі розміри та енергоспоживання, що робить їх привабливими у тих напрямках, де значення сил, що формуються приладами, не відіграє ніякого значення, а лише необхідне для функціонування внутрішніх систем. Інколи прилади МЕМС використовуються лише через можливість виготовлення об'ємних мікроструктур – наприклад, для високочастотних гребневих фільтрів, мікроіндуктивностей та мікромікродіагностик (через малі розміри) тощо. Враховуючи вищевказане та надзвичайно швидкий рівень росту технологій, можна з впевненістю сказати, що сама галузь МЕМС має значні перспективи розвитку та розширення на тривалий період.

6.4 Електродинамічні аналогії в осциляторних системах

У даному підрозділі показано використання аналогій при проектуванні мікроелектронних систем на прикладі електродинамічної аналогії в осциляторних системах. Вперше ідею про подібність електричних та механічних коливних систем висловив в 1873 р. Максвелл. Він висунув гіпотезу про відповідність електромагнітного контуру механічній коливній системі, де в

основу електромеханічної аналогії була покладена відповідність між силою електричного струму і швидкістю руху матеріальної точки.

Ізоморфність електромагнітних і механічних коливань ілюстрована на рис. 6.8. У математичній формі її описуємо такими співвідношеннями:

$$\begin{aligned}
 Q_L &= -\frac{q_0^2 \omega^3 L}{2} \times \sin 2\omega t \quad \hat{U} \quad Q_a = -\frac{y_0^2 \omega^3 m}{2} \times \sin 2\omega t; \\
 Q_C &= -\frac{q_0^2 \omega}{2C} \times \sin 2\omega t \quad \hat{U} \quad Q_m = -\frac{y_0^2 \omega m}{2} \times \sin 2\omega t; \\
 Q_R &= \frac{q_0^2 \omega^2 R}{2} \times (1 - \cos 2\omega t) \quad \hat{U} \quad Q_r = \frac{y_0^2 \omega^2 r}{2} \times (1 - \cos 2\omega t),
 \end{aligned} \tag{6.6}$$

де $q = q_0 \cos \omega t$; $y = y_0 \cos \omega t$.

Із них випливає, що протягом періоду коливання $Q_{L,C,a,m} = 0$, тоді як $Q_{R,r} \neq 0$, тобто втрати в колі відбуваються завдяки наявності сил опору рухові механічного чи електричного осцилятора.

Ізоморфність вимушених електромагнітних та механічних коливань полягає в тому, що до коливного контуру можна підвести зовнішнє джерело енергії через індуктивний зв'язок, а в механічному контурі – за допомогою прикладання зовнішньої сили до матеріальної точки із зосередженою масою m , або як це зображено на рис. 6.8,а і б. Тут в електричному контурі реалізований ємнісний зв'язок, а в механічному зовнішня сила прикладена до вільного кінця пружини.

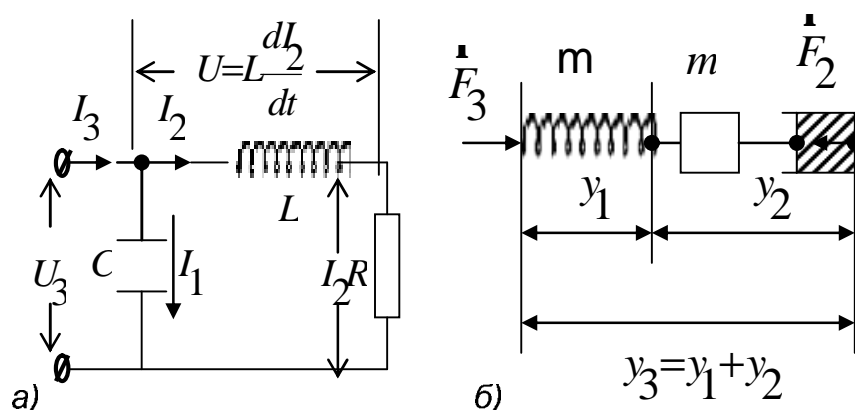


Рис. 6.8 Приклади поповнення енергії в електромагнітній та механічній коливних системах

В електромагнітному контурі відоме явище резонансу струмів, що є аналогом у механічному контурі резонансу швидкостей.

Якщо амплітудне значення швидкості вимушених коливань осцилятора виразимо через реактанси:

$$J_{3m} = \frac{F_{3m}}{\sqrt{r^2 + \frac{\omega^2}{e} W m - \frac{m \ddot{\phi}}{W \phi}}}, \quad (6.7)$$

то воно досягає свого найбільшого значення за умови $W m = \frac{m}{W}$.

Враховуючи електромеханічну аналогію (рис. 6.8) між законами Ньютона та Ома, можна зробити висновок, що величини $|Z_m| = \frac{F}{dy/dt}$ і $|Z_m| = \frac{U}{dq/dt}$

відіграють роль імпедансів механічного і електричного осциляторів. Для механічного осцилятора він визначає ту силу, яку треба надати, щоб його швидкість змінити на одиницю, тоді як для RLC - контуру електричний імпеданс дорівнює напрузі, яка збуджує в колі електричний струм силою в один ампер. Тому, за умови синусоїдного процесу в коливному контурі, він описується загальним диференціальним рівнянням

$$a \frac{d^2 V(W, t)}{dt^2} + b \frac{dV(W, t)}{dt} + l V(W, t) = A_0 \cos Wt \quad (6.8)$$

з розв'язком $V(W, t) = \tilde{L}(W) \times \exp(iWt)$. Оскільки рівняння для амплітуди $\tilde{L}(W)$ зручно виразити у комплексній формі як

$$\tilde{L}(W) = -i \frac{A_0}{a} \frac{1}{W \times \tilde{Z}},$$

то із (6.8) одержуємо вирази

$$\tilde{Z} = b + i \frac{\omega}{e} W \times a - \frac{l}{W \phi} \ddot{\phi} = \begin{cases} R + i \frac{\omega}{e} W \times L - \frac{1}{WC} \ddot{\phi} \\ r + i \frac{\omega}{e} W \times m - \frac{m}{W \phi} \ddot{\phi} \end{cases}$$

Це не що інше, як комплексні імпеданси електромеханічних коливних контурів. Отримані результати дають змогу стверджувати, що коли частота зовнішньої дії $W^2 a \neq l$, то швидкість зміни динамічних координат у контурі

відставатиме за фазою від темпу дії зовнішнього джерела. У випадку $W^2 a \ll$ швидкість зміщення та сила струму відставатимуть від фази зовнішньої дії. Лише за умови, що між ними фазовий зсув відсутній, амплітуда $V(W, t)$ різко зростатиме і настає резонанс швидкості руху механічного коливного контуру та сили електричного струму в електромагнітному контурі.

Ця електромеханічна аналогія між коливними процесами в системах дає можливість сформулювати узагальнений вираз для закону Джоуля-Ленца - як енергетичних втрат осцилятора, який зазнає вимушених коливань в дисипативному середовищі, усереднених протягом деякого періоду тривалості часу T . Для цього запишемо не загасні складові функцій $Q(W, b, t)$ та $A(W, b, t)$ в позначеннях рівняння (6.8) так:

$$Q(W, b, t) = -\frac{1}{2} b \frac{\ddot{y}}{\ddot{y}_m} W^2 \left[\frac{1}{2W} \sin[2(Wt - f)] + \frac{1}{2W} \sin[2(Wt - f)] \right]$$

$$A(W, b, t) = \frac{1}{2} \left[\frac{\ddot{y}}{\ddot{y}_m} W \sin f + \frac{1}{2W} \cos(2Wt - f) - \frac{\ddot{y}}{\ddot{y}_m} W \sin f - \frac{1}{2W} \cos(2Wt - f) \right]$$

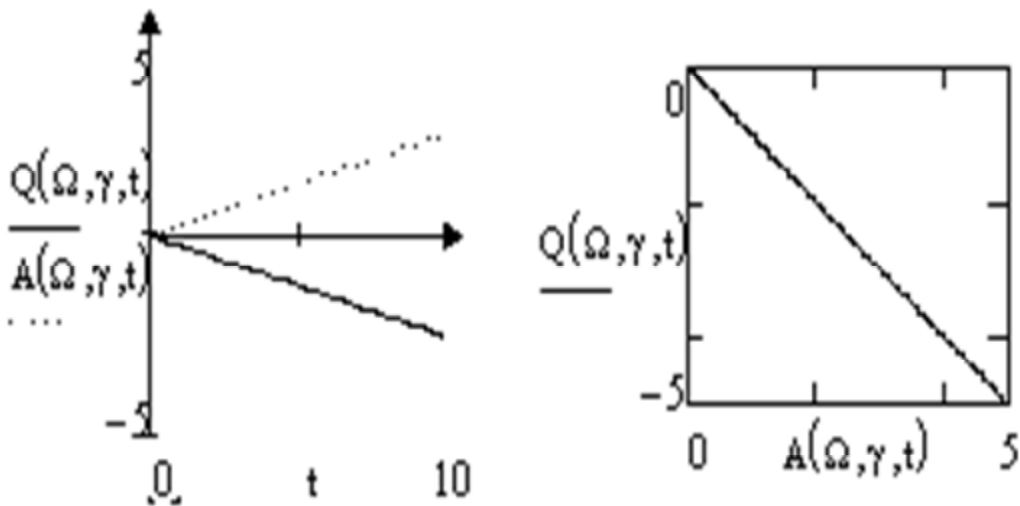


Рис. 6.9 Діаграма кореляційної динаміки розвитку активної та пасивної функцій

Вони дзеркально симетричні щодо часової осі. Тому динамічний баланс енергій у коливній системі визначатиметься співвідношенням між ними.

Потрібно також зауважити, що неосцилюючі складові перед дужками є не що інше, як потужності дисипативних втрат Джоуля – Ленца:

$$-\frac{1}{2} b \frac{\ddot{q}}{C} \dot{q}^2 W^2 \text{ та } \frac{1}{2} \frac{\ddot{F}}{C E} \dot{q} \times \frac{\ddot{q}}{C} \dot{q} W.$$

Механізм їх прояву наочно проілюстрований на рис. 6.10. Як видно із цього рисунка, де $2g = \frac{b}{a}$, зовнішнє джерело компенсує втрати енергії в колі, щоб підтримати в ньому вимушені коливання (рис. 6.10,а; на цьому рисунку знак дисипативної частини енергії вибраний протилежним, щоб відповідні графіки накласти один на інший і часова вісь скерована вертикально вгору). Ця компенсація чітко виражена в резонансній області (рис. 6.10,б). Для порівняння на рис. 6.11 зображені дисперсії інших складових функцій $Q(W, b, t)$ та $A(W, b, t)$.

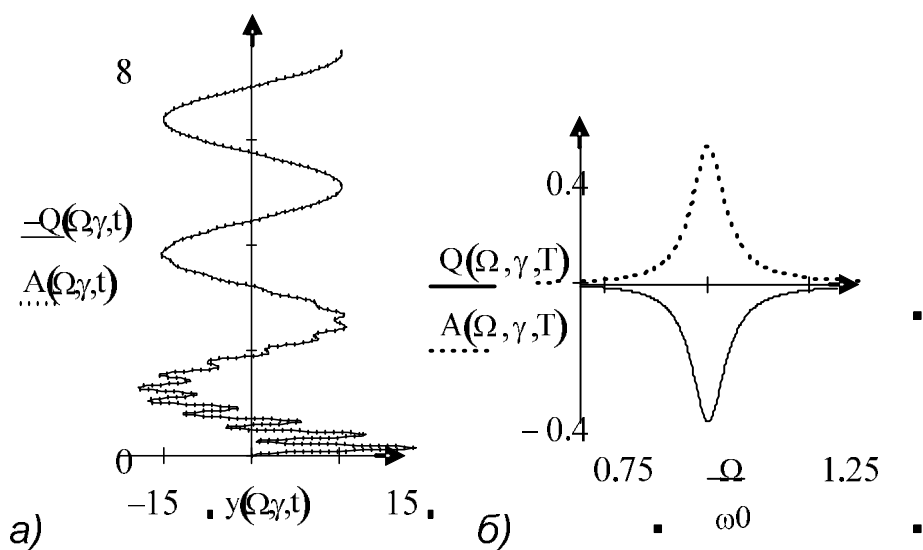


Рис. 6.10 Діаграми енергетичної амплітуди

На резонансній частоті обидві криві проходять через нульове значення, що й забезпечує синфазність швидкості зміни динамічного параметра коливного контуру та імпульсу дії на нього з боку зовнішнього джерела. З погляду електромеханічної аналогії між коливними процесами в електромагнітному та механічному контурах зауважимо, що основний зміст процесу в системах із зосередженими параметрами полягає в періодичному

взаємоперетворенні потенціальної енергії в кінетичну і магнітної $U = L \frac{d^2 q}{dt^2}$ в електричну. Оскільки ці фізичні величини з позицій їх осцилограм зсунуті за фазами на величину $\frac{\rho}{2}$, то це означає, що пружність зв'язку із станом рівноваги та інерційність осцилятора виступають як реактивні елементи, аналогічно ємності та індуктивності в електромагнітному контурі.

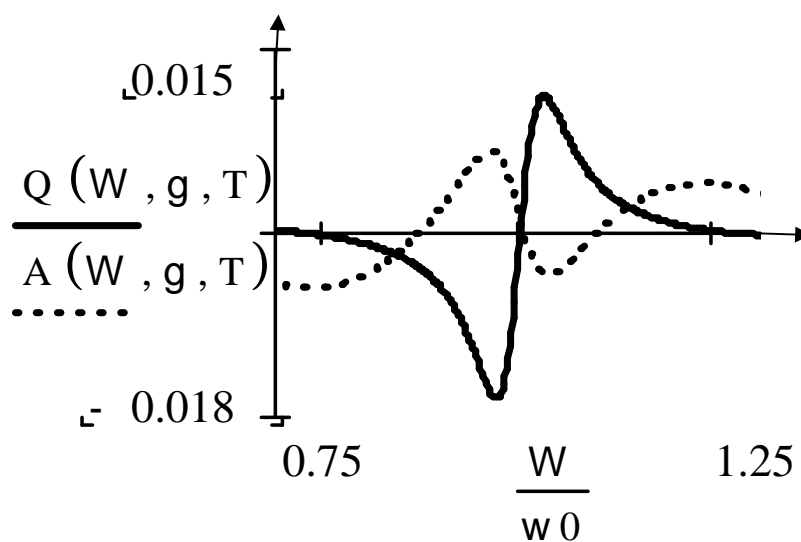


Рис. 6.11 Частотні осциляції функції $Q(W, b, t)$

7 ДАВАЧІ

7.1 Електромагнітні давачі

7.1.1 Основні засади електромагнетизму

Електричні та магнітні давачі та актюатори мають найширший ряд в порівнянні з іншими давачами по кількості типів давачів та по варіаціях в межах одного типу. Виникає це в силу наступних обставин:

- давач використовує електричні властивості матеріалів;
- існує багато електричних ефектів;
- вихідний сигнал майже завжди є електричним.

Більшість актюаторів є або електричними, або магнітними.

У даному розділі ми розглянемо наступні типи давачів та актюаторів:

- Давачі та актюатори, які базуються на електричних або електростатичних принципах:
 - включають мікроелектромеханічні давачі, які найчастіше базуються на електростатичній силі;
 - ємнісні давачі (вимірюють зазор, відстань, рівень, властивості матеріалів, вологість та інші показники, такі як сила, прискорення і тиск) і пов'язані з ними давачі.
- Магнітні давачі і актюатори, які базуються на статичному та квазістатичному магнітному полі:
 - мотори та вентиля для створення руху;
 - давачі магнітних полів (індуктивні давачі для позиціонування, переміщення тощо);
 - магнітострикційні давачі та актюатори.

Електричне поле - сила на одиницю заряду. Воно існує в заряджених тілах [79]. Електричне поле є статичне, якщо заряди не рухаються або рухаються зі сталою швидкістю. Залежить від часу, якщо заряди прискорені або сповільнені.

Рух зарядів в електропровідному середовищі або в просторі створює струм, а струм в свою чергу створює магнітне поле.

Магнітне поле є також статичним, коли струм є сталим або якщо струм змінюється з часом то існують електричне поле та спричинене ним магнітне поле. Це називається електромагнітним полем. Електромагнітне поле означає що існують електричне та магнітне поля. Електричне або магнітне поле можна розглядати як частини електромагнітного поля. Наприклад, електростатичне поле можна розглядати як незалежне від часу електромагнітне поле з нульовим магнітним полем. Принципи роботи електромагнітного поля описують рівняння Максвелла. Все що впливає на одну з цих величин може бути виміряне через електромагнітне поле.

7.2 Ємнісні давачі та актюатори

Ємнісні це ті давачі та актюатори, які базуються на електричному полі та працюють за фізичними принципами та ефектами електричного поля (ємність, заряд, збереження енергії). Деякі давачі такі як давачі заряду більш зрозумілі в термінах електричного поля. Отже до ємнісних відносяться такі давачі, в яких вимірювана величина перетворюється у значення ємності безпосередньо, чи при механічних переміщеннях. Основне застосування ємнісних давачів – вимірювання механічних переміщень (ємнісні мікрометри), вимірювання рівнів, тиску тощо. Ємнісні давачі прості за конструкцією, мають високу чутливість та відносно низьку інерційність. До їх недоліків слід віднести вплив зовнішніх електричних полів, паразитних ємностей, температури та вологості.

7.2.1 Ємність

Ємність – відношення між зарядом та потенціалом тіла. Вимірюється в фарадах, де 1 фарад = кулон/вольт [79]. Ємність можна визначити для двох електропровідних тіл, між якими є різниця потенціалів.

На Рис. 3.1 показано тіло B заряджене від акумулятора позитивним зарядом Q , і тіло A заряджене протилежними зарядом $-Q$, відповідно між ними

виникає ємність. У принципі будь-які два електропровідні тіла, незалежно від розміру та відстані між ними, мають ємність.

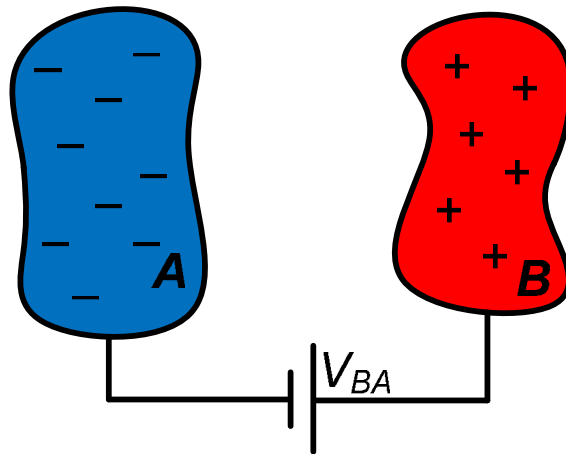


Рис. 7.1 Ємність між двома тілами

7.2.2 Конденсатор

Ємність плоского конденсатора визначається з наступної залежності:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} [\text{Ф}] \quad (7.1)$$

ϵ_0 – діелектрична проникність вакууму, $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ [Ф/м];

ϵ_r – відносна діелектрична проникність простору між площинами конденсатора;

S – площа конденсатора;

d - відстань між площинами.

Із формули (2.1) бачимо, що основними параметрами, які впливають на ємність та можуть змінюватися є:

- відстань між пластинами конденсатора;
- площа пластин;
- діелектрична проникність.

Отже, принцип роботи ємнісних давачів базується на зміні однієї із зазначених величин. Відповідно переміщення і все, що спричиняє переміщення (тиск, сила), зазор, діелектрична проникність (наприклад, в давачах вологи) можуть бути визначені за рахунок визначення зміни ємності.

Конденсатор є специфічним пристроєм. В конденсаторі електричне поле між двома площинами не тече поза простором між площинами. В більшості випадків, коли d не є малим, або площини не є паралельними, ми не можемо обчислити ємність на пряму.

7.2.3 Розрахунок ємності різних конструкцій конденсаторів

Приклад 1:

Розрахунок ємності конденсатора як на рис 7.2.

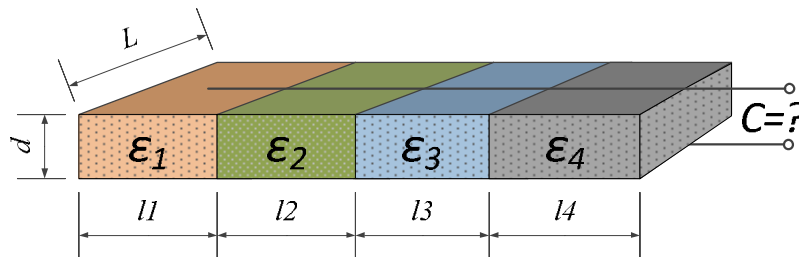


Рис 7.2. Розрахункова схема

Дано:

Електрична постійна - $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \frac{\text{Фл}}{\text{м}} = 8,85 \frac{\text{нФл}}{\text{м}}$

Діелектрична проникність: $\epsilon_1=1; \epsilon_2=5; \epsilon_3=4; \epsilon_4=10$.

$l_1=0,25; l_2=0,15; l_3=0,50; l_4=0,20$.

$L=20$ [см]

$d=17,7$ [мм]

Довжина	Ширина				Діелектрична проникність				Відстань	Електрична постійна
	l_1 , [м]	l_2 , [м]	l_3 , [м]	l_4 , [м]	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4		
L , [м]	l_1 , [м]	l_2 , [м]	l_3 , [м]	l_4 , [м]	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	d , [мм]	$\epsilon_0, \frac{\text{нФл}}{\text{м}}$
0,20	0,25	0,15	0,50	0,20	1	5	4	10	17,7	8,85

Розв'язок:

$$C = \frac{\epsilon_0 L}{d} (\epsilon_1 l_1 + \epsilon_2 l_2 + \epsilon_3 l_3 + \epsilon_4 l_4)$$

$$C = \frac{8,85 \frac{\text{нФл}}{\text{м}} \times 0,2 [\text{м}]}{0,0177 [\text{м}]} (1 \times 0,25 [\text{м}] + 5 \times 0,15 [\text{м}] + 4 \times 0,50 [\text{м}] + 10 \times 0,20 [\text{м}])$$

$$C = 100 \frac{\text{нФл}}{\text{м}} \times 5 [\text{м}] = 500 [\text{нФл}].$$

Приклад 2:

Розрахунок ємності конденсатора як на рис. 7.3.

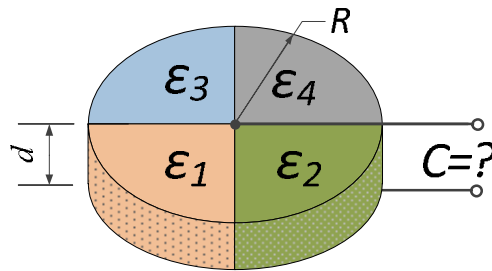


Рис. 7.3 Розрахункова схема

Вхідні дані

Радіус	Діелектрична проникність				Відстань	Електрична постійна	Розв'язок
R,[м]	ε ₁	ε ₂	ε ₃	ε ₄	d,[мм]	$\epsilon_0, \frac{\epsilon n \Phi \dot{u}}{\hat{\epsilon}_m \dot{u}}$	C, [пФ]
0,20	2	3	4	1	3,14	8,85	0,885

Розв'язок:

$$C = \frac{4\pi R^2 \times \epsilon_0}{4d} (\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 + \epsilon_4)$$

$$C = \frac{R^2 [м^2] \times \epsilon_0 \frac{\epsilon n \Phi \dot{u}}{\hat{\epsilon}_m \dot{u}}}{4 [м]} (\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 + \epsilon_4)$$

$$C = \frac{0,2^2 \text{ м}^2 \times 8,85 \frac{\epsilon n \Phi \dot{u}}{\hat{\epsilon}_m \dot{u}}}{4 [м]} (2 + 3 + 4 + 1) = 0,8850$$

$$C = 100 \frac{\epsilon n \Phi \dot{u}}{\hat{\epsilon}_m \dot{u}} \times 5 [м] = 500 [пФ] \text{ у всіх варіантах має вийти так само.}$$

Приклад 3:

Розрахунок ємності конденсатора, як на рис. 7.4.

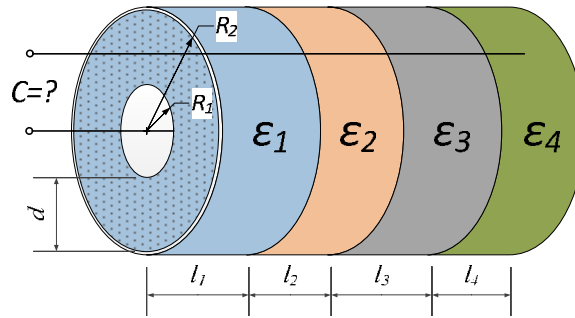


Рис. 7.4 Розрахункова схема

Дано:

$$d = R_1, P = 2\pi R_1,$$

Радіус	Ширина				Діелектрична проникність				Відстань	Електрична постійна
	$R_2 \approx R_1, [M]$	$l_1, [M]$	$l_2, [M]$	$l_3, [M]$	$l_4, [M]$	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3		
0,50	0,25	0,15	0,50	0,20	1	5	4	10	3,14	8,85

Розв'язок:

$$C = \frac{2\pi R_1 \epsilon_0}{\lambda} (\epsilon_1 l_1 + \epsilon_2 l_2 + \epsilon_3 l_3 + \epsilon_4 l_4)$$

$$C = 2 \times 0,5 [M] \times 8,85 \frac{\epsilon n \Phi \dot{u}}{\epsilon M \dot{u}} \times (1 \times 0,25 [M] + 5 \times 0,15 [M] + 4 \times 0,50 [M] + 10 \times 0,20 [M])$$

$$C = 1 \times 8,85 \frac{\epsilon n \Phi \dot{u}}{\epsilon M \dot{u}} \times 5 [M] = 44,25 [n\Phi] \text{ у всіх варіантах має вийти так само.}$$

Приклад 4:

Розрахунок ємності конденсатора типу куля в кулі, як на рис. 7.5.

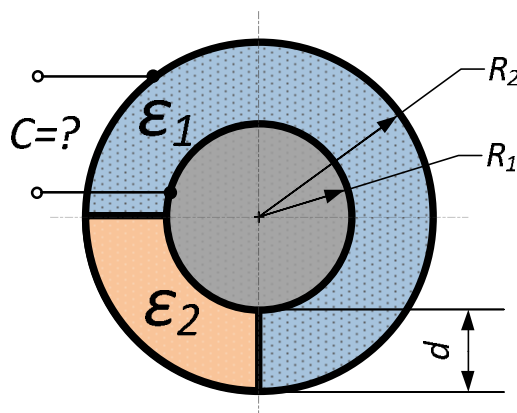


Рис. 7.5 Розрахункова схема

Дано:

$$d = R_1$$

Радіус	Діелектрична проникність		Відстань	Електрична постійна	Розв'язок
$R_2 \approx R_1, [\text{м}]$	ϵ_1	ϵ_2	$d, [\text{мм}]$	$\epsilon_0, \frac{\text{нФ}}{\text{м}}$	$C, [\text{пФ}]$
0,20	4	2	3,14	8,85	3,54

Розв'язок:

$$C = \frac{4\pi R_1^2 \epsilon_0}{4\pi} (\epsilon_1 + 3\epsilon_2), \quad C = R_1^2 \epsilon_0 (\epsilon_1 + 3\epsilon_2)$$

$$C = \frac{0,2^2 \frac{\text{нФ}}{\text{м}} \times 8,85}{[\text{м}]} \times (4 + 3 \times 2), \quad C = 0,354 \times 10 = 3,54 [\text{нФ}].$$

7.3 Ємнісні позиційні датчі та датчі переміщення

Позицію та переміщення можна виміряти трьома тривіальними шляхами. Перший спосіб полягає в тому, що одна площина рухається відносно іншої. У найпростішому випадку мова йде про зміну відстані між пластинами внаслідок зовнішнього фізичного впливу (Рис. 3.2) [25].

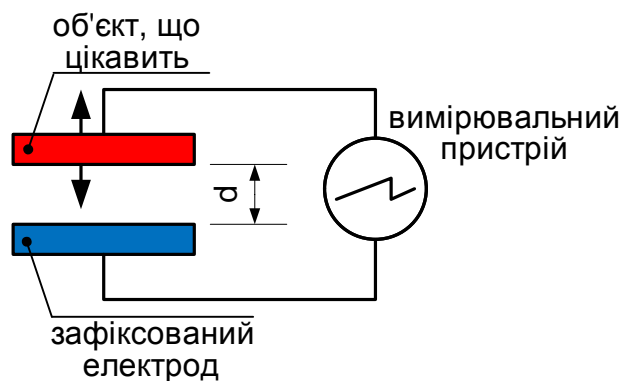


Рис. 7.6 Датч лінійного переміщення

Оскільки ємність конденсатора змінюється обернено пропорційно величині зазору між пластинами, визначення ємності при інших відомих параметрах дає змогу визначити відстань між пластинами. Зміну ємності можна визначити різними способами (наприклад, вимірюючи його імпеданс), проте в будь-якому випадку конденсатор необхідно включити в електричний ланцюг.

При такому вимірюванні необхідне з'єднання з об'єктом дослідження, адже одна частина закріплена, а інша рухається під дією об'єкту дослідження. Відповідно зміна позиції об'єкту, що нас цікавить, спричиняє зміну товщини діелектрика (d), а це спричиняє зміну ємності. Даний тип датчиків використовується для вимірювання невеликих переміщень до 1 мм, тому, що результат є лінійним, доки величина переміщення є малою.

Другий спосіб вимірювання переміщення, це коли площини (електроди конденсатора) залишаються нерухомими, а переміщається діелектрик (Рис. 3.3). Переваги даного способу: лінійність, діапазон переміщення є більший і рівний ширині конденсатора.

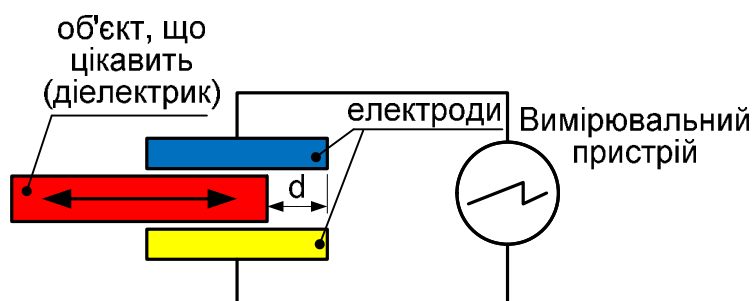


Рис. 7.7 Датчик лінійного переміщення з рухомих діелектриком

Переміщення діелектричної пластини між обкладинками конденсатора призводить до зміни його ємності. Пластина може бути механічно пов'язана з об'єктом, який цікавить. Наприклад, діелектрик може бути приєднаним до поплавка, який вимірює рівень рідини, або діелектрик може переміщатись об'єктом, позицію або переміщення якого вимірюють. Крім того, якщо сам об'єкт має властивості діелектрика і має відповідні габарити - він може бути використаний безпосередньо в якості діелектричного середовища в конденсаторі.

Третій спосіб вимірювання переміщення полягає у тому, що електроди закріплені нерухомо, а переміщається об'єкт, переміщення якого необхідно зафіксувати.

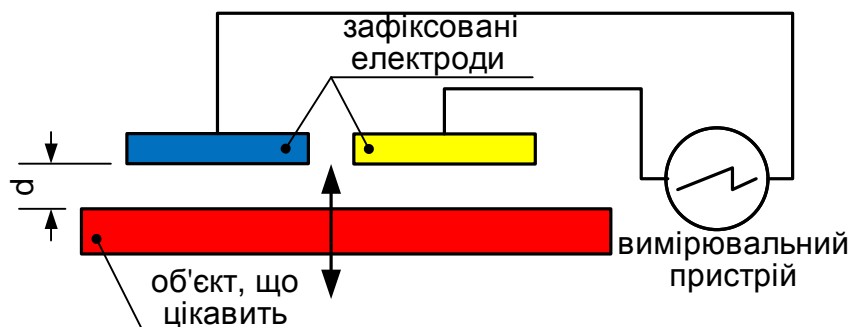


Рис. 7.8 Давач лінійного переміщення з нерухомими електродами

Цей метод є найбільш практичним, оскільки давач є незалежним і не вимагає механічного з'єднання. Більшість ємнісних давачів використовують даний метод.

7.4 Давачі зазору

Зазвичай, пустий циліндричний провідник є одною площиною давача (див. Рис. 3.5), друга площина є диском, який розміщений внизу циліндра.

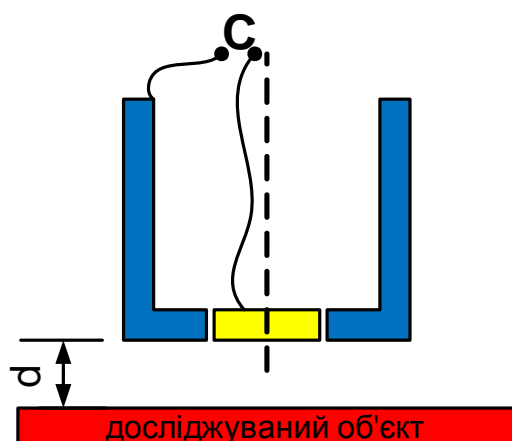


Рис. 7.9

Увесь давач може бути закритий екраном або може бути інкапсульованим в циліндричну пластикову капсулу. Ємність давача C залежить від розмірів, властивостей матеріалів та структури. Коли до давачу приближається будь-який матеріал, давач фіксує ріст діелектричної провідності та ємності. Залежність відстані до об'єкту є нелінійною. Чим менша відстань d , тим більша чутливість давача [80]. Розміри давача дуже впливають на діапазон та чутливість. Давачі великого діаметру можуть вимірювати великий діапазон.

7.5 Позиційний давач

Застосовують також диференційні ємнісні перетворювачі, в яких при переміщенні центральної пластини ємність одного конденсатора збільшується, а другого – зменшується. Поки пластина знаходиться посередині, її потенціал рівний нулю $C_1=C_2$. Коли пластина рухається вгору, її потенціал зростає, коли пластина рухається вниз, її потенціал стає від'ємним. Використовується для фіксування незначних переміщень, інакше ємність буде дуже малою і її важко буде виміряти.

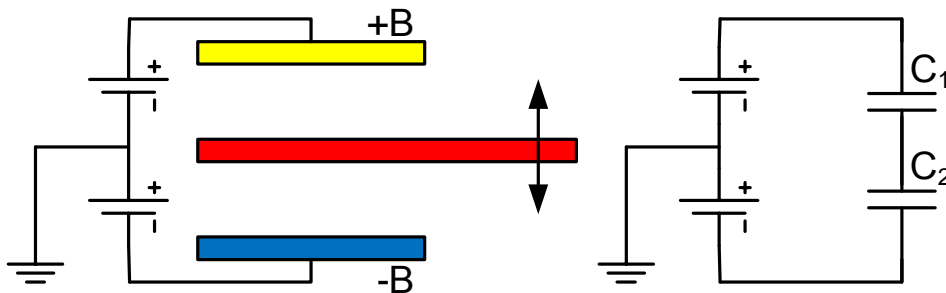


Рис. 7.10

Інші позиційні давачі та давачі зазору та переміщення [81]:

- Поворотний (кутовий) позиційний давач.
- Давачі лінійного переміщення:
 - Інтегровані давачі
 - Бокові давачі
 - Поршневі давачі
- Інші.

На Рис. 3.7 представлено різні модифікації давачів лінійних переміщень.

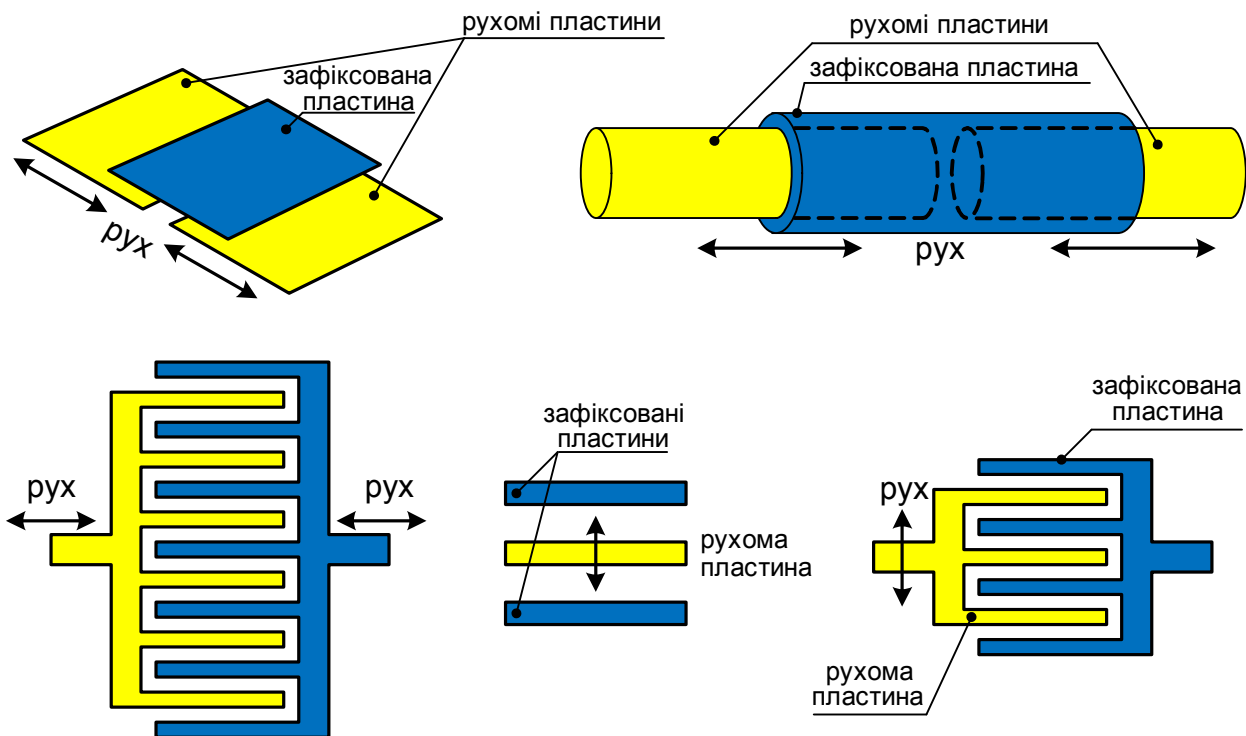


Рис. 7.11 Різні модифікації давачів лінійних переміщень

7.6 Ємнісні давачі рівня рідини

Ємнісні перетворювачі також застосовуються для вимірювання рівня рідини. Ємність між електродами залежить від рівня рідини, оскільки діелектрична проникність контрольованої рідини відрізняється від повітря. Рівень рідини може бути вимірним будь-яким позиційним давачем або давачем зазору. Позиція поверхні рідини вимірюється напряму або за допомогою поплавка, який змінює ємність лінійного конденсатора або поворотного конденсатора. Існують інші методи, які також є лінійними і можуть мати великий діапазон вимірювання.

Давач рівня рідини складається із двох концентричних циліндрів ємністю C . Ємність конденсатора довжиною L , внутрішнім радіусом a і зовнішнім радіусом b визначається із наступної залежності:

$$C = \frac{2\pi L \epsilon_0 \epsilon_r}{\ln \frac{b}{a}} [\Phi], \quad (7.2)$$

Якщо рідина наповнює конденсатор до висоти h , ємність становить:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{b}{a}} (h\epsilon_r + L - h) [\Phi]. \quad (7.3)$$

Ємність є лінійною, для h в межах від 0 до L . Вимірювання рівня рідини можна проводити в будь-якому електронепровідному середовищі.

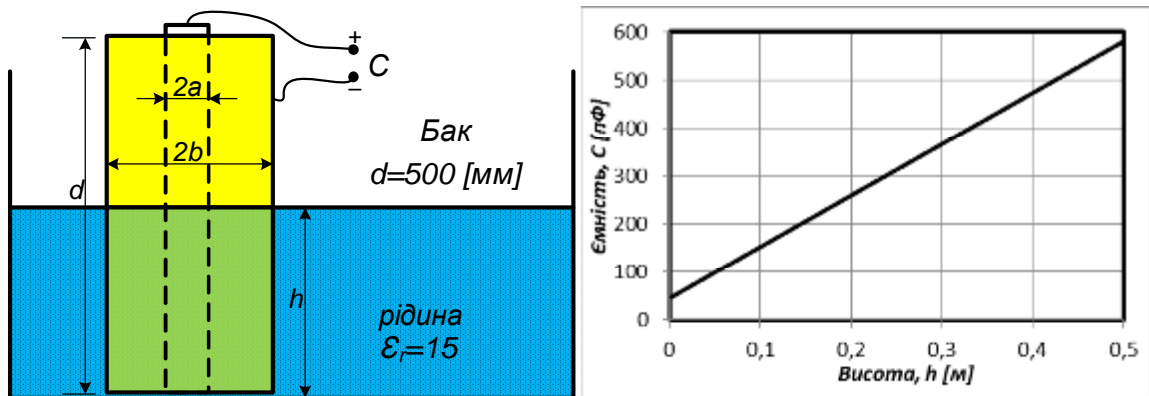


Рис. 7.12 Давач рівня рідини із спільною віссю

Отже підсумовуючи вищесказане, ми можемо зробити наступні висновки, що ємнісні давачі є прості та міцні. Вони корисні в багатьох інших давачах, наприклад тиску, акустичних давачах та ін. У МЕМС давачах ємності є малими, а зміна ємностей ще менша, відповідно потрібні спеціальні методи передачі/перетворення.

7.7 Магнітні давачі та актюатори

Магнітні давачі та актюатори працюють за законами та ефектами магнітного поля. Густина магнітного потоку називається магнітною індуктивністю. Тому ці давачі називають індуктивними давачами. У даному розділі розглядатиметься індуктивність, магнітні кола та магнітні сили.

7.7.1 Магнетизм

Для того, щоб зрозуміти, що таке магнетизм, розглянемо постійний магніт. Він діє на інший магніт в просторі. Можна сказати, що навколо магніту існує поле, через яке він взаємодіє. Це силове поле є результатом магнітного поля. Магнітне поле можна також отримати проводячи струм через котушку. Якщо два поля є однаковими, значить їхні джерела живлення (напруга, що створює магнітні поля) є однаковими. Явище створення електричного поля

(електричного струму) змінним магнітним полем називається електромагнітною індукцією.

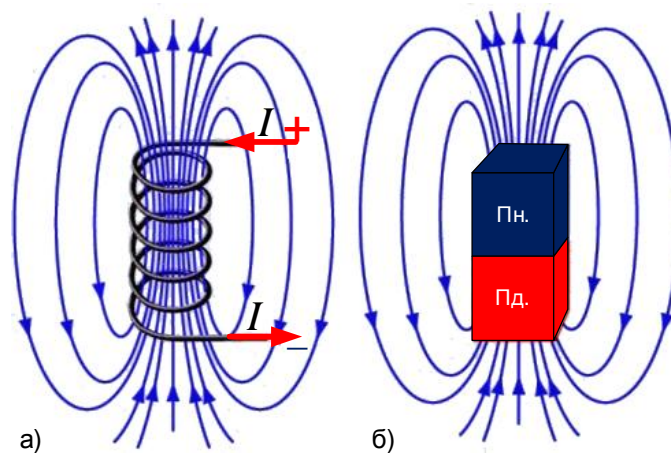


Рис. 7.13

Магніт притягує або відштовхує інший магніт – це дає нам першу очевидну взаємодію магнітних полів. Магніт також діє на залізо, але не діє на мідь. Висновок: є різні типи матеріалів відносно їх магнітних властивостей. Магнітні властивості залежать від проникності матеріалів - μ [Гн/м].

7.8 Індуктивні давачі зазору

Більшість індуктивних давачів базуються на принципах самоіндуктивності, взаємоіндуктивності або трансформації. Індукторам потрібен струм для вимірювання (пасивні прилади). Початкове магнітне поле є заданим – давачі можуть вимірювати зміну магнітного поля. Найпоширенішою величиною вимірювання є позиція, переміщення та склад матеріалу. Індуктивність та індукцію в основному вимірюють неявно.

Індуктивність вимірюється за допомогою джерела змінного струму та вольтметра або містка Уїтстона. Вимірюючи напругу, що проходить через індуктор, можна визначити повний опір $Z = R + j\omega L$, та індуктивність L – міра віддаленості котушки від поверхні.

Додавання феромагнітного стержня збільшує індуктивність давача. Найчастіше використовують залізо або ферит. Захисний щит може бути розміщений навколо давача, щоб збільшити чутливість.

Індуктивні давачі зазору мають в своїй будові котушку (індуктор) та генерують магнітне поле. Індуктивність котушки залежить від розмірів, кількості витків та середовища. Напряга та діаметр котушки визначають поле. Принцип роботи індуктивного давача зазору полягає у наступному: коли давач наближається до поверхні - індуктивність котушки збільшується, якщо поверхня є феромагнетиком.

7.9 Механічні давачі сили

Силу можна вимірювати різними способами. Найпростіший – використати тензодавач та прокалібрувати вихідний результат в одиницях сили. Інші методи включають вимірювання прискорення маси ($F = m \times a$), вимірювання зміщення пружини під впливом сили ($x = k \times F$), вимірювання тиску, спровокованого силою та жоден з цих методів не є прямим методом вимірювання сили, а більшість з них є складними.

Базовий метод вимірювання сили полягає у вимірюванні сили натягу за допомогою деформації давача. Давач часто забезпечений кріпленнями. Цей тип давачів використовується для виміру сили в таких місцях як механічні станки, підвіски двигуна і т.д.

Давачі сили включають досить велику кількість різних давачів, які базуються на багатьох принципах. На рис. 7.14 представлено основні типи давачів сили.

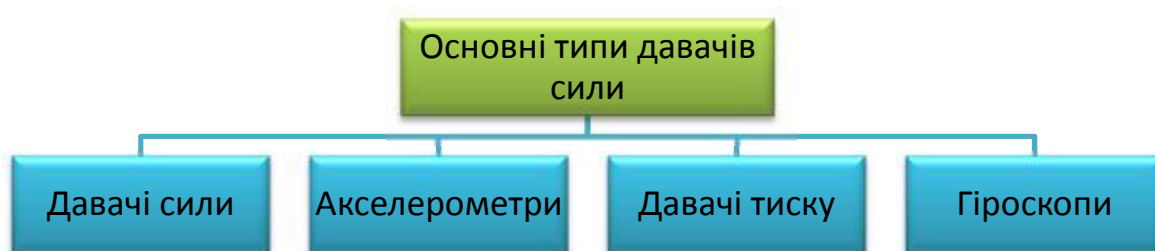


Рис. 7.14 Основні типи давачів сили

Деякі з цих давачів використовуються там, де відношення до механіки непряме, наприклад: вимірювання температури через розширення газів в об'ємі (пневматичний давач температури), деякі механічні давачі не виконують рух чи не піддаються дії сили, наприклад оптоволоконний гіроскоп.

7.9.1 Тензодавачі

Тензодавач – основний інструмент для виміру сили. Тензодавачі дають змогу також виміряти деформацію. Деформація може бути спричинена напруженням, силою, обертальним моментом та низкою інших фізичних впливів, включаючи зміщення, прискорення чи позицію. Основний принцип будь-якого давача сили – зміна опору при деформації [82].

Тензодавачі є різних конструкцій та типів (рис. 7.15). Будь-який давач, що змінює опір під впливом напруження, розглядається як тензодавач. Ми обмежимося двома типами, які покривають більшість тензодавачів на сьогоднішній день, а саме тензодавачами на провідниках та напівпровідниках.

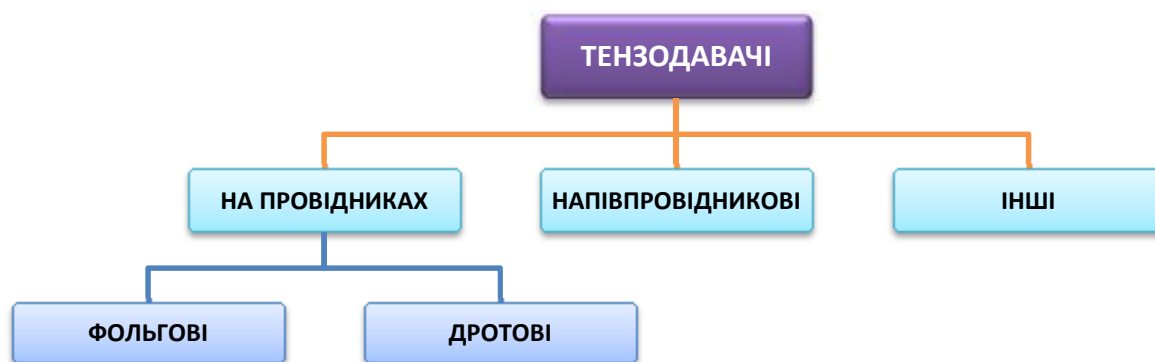


Рис. 7.15 Типи тензодавачів

Тензодавачі часто використовуються для визначення деформації вигинання, кручення, а також повздовжньої деформації структур.

Властивості тензодавачів змінюються в залежності від застосування. Більшість металічних пристроїв мають номінальний опір в межах 100-1000 Ом. Розміри становлять від 3х3 мм до довжин порядку 150 мм, хоча при потребі можуть бути будь якого розміру. Для прикладу типова чутливість становить 5 мВ/В. Чутливість тензодавача - це відношення вихідної напруги сигналу $U_{\text{сигн.}}$ до вхідної напруги живлення $U_{\text{живл.}}$ тензометричного містка. Як правило, в паспортних даних до тензодавачів чутливість (номінальна) позначається C_n . Наприклад, якщо вказано $C_n = 2\text{мВ/В}$ і номінальне навантаження $E_{\text{мах}} = 10\text{т}$ (тонн), то слід розуміти, що при $U_{\text{живл.}} = 10\text{В}$ і впливі вантажу масою 1 т., $U_{\text{сигн.}} = 2\text{мВ}$.

Зазвичай тензодавачі використовуються для вимірювання деформацій порядку 2-3 мкм/м. Більші деформації вимірюються спеціалізованими пристроями.

Тензодавачі на напівпровідниках є меншими за розмірами та можуть мати більший опір. Їх використання обмежене низькими температурами, однак вони є дешевшими і часто інтегруються в інші пристрої.

У багатьох галузях промисловості та і не тільки ми стикаємось із задачею, коли необхідно виміряти величину деформації конструкції чи якогось об'єкту. Для таких цілей використовують тензодавачі тиску, які дають змогу перетворити рівень деформації в певну величину. Завдяки цьому можна визначити її значення.

Тензодавачі ваги і тиску - це пристрої, які дають змогу перетворити механічну деформацію тіла в електричний сигнал, який дозволяє визначити рівень розтягування і стиснення конкретного предмета. Він є резистивним перетворювачем.

Тензодавачі можуть використовуватися в будь-яких галузях, наприклад: атомній, фармацевтичній, металургійній та інших. На Рис. 5.2 представлено основні сфери застосування тензодавачів.



Рис. 7.16 Сфери застосування тензодавачів

Основні переваги тензодавачів:

- висока точність вимірювання;
- підходять для вимірювання статичних і динамічних напружень, при цьому, не спотворюють отримані дані. Це дуже зручно при використанні пристроїв в транспортних засобах або екстремальних умовах роботи;
- невеликі розміри дозволяють використовувати такі датчики практично в будь-яких вимірювальних пристроях.

Але, у тензодатчиків є і певні недоліки. Будь який датчик такого типу має властивість до зниження чутливості при перепадах температури. Для точнішого вимірювання потрібно проводити досліди тільки при кімнатній температурі і вологості не більше 30%, або використовувати температурну компенсацію. Тензодатчик із температурною компенсацією є значно точнішими і дорожчими.

Тензодатчик використовуються для вимірювання деформації у твердих тілах. На їх основі будують датчики ваги, тиску, сили, переміщення, моменту, прискорення, вібрації, натягу, крутного моменту, залишкових напружень у механічних конструкціях і деталях машин після їх обробки і т.д. Принцип дії тензорезистора заснований на зміні електричного опору твердого тіла, при його деформації силою.

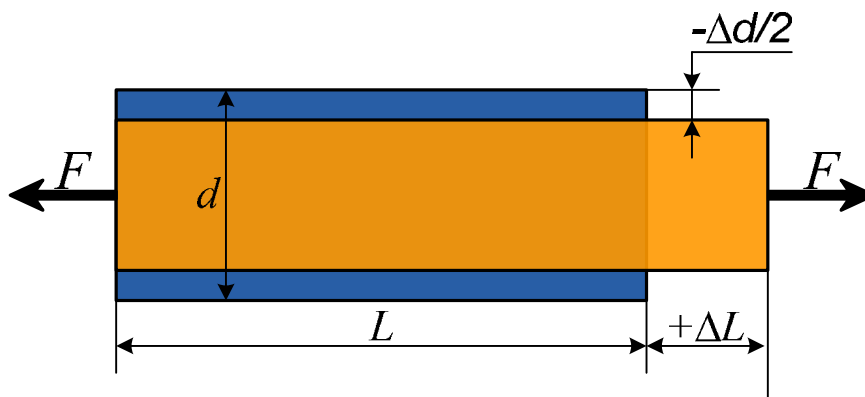


Рис. 7.17 Деформація [82]

Опір твердого тіла довжиною L та площею поперечного перерізу S визначається за формулою:

$$R = r \frac{L}{S} \quad (7.4)$$

де r - питомий опір. При прикладанні до тіла розтягуючої сили F (див. рис. 7.17) відбувається деформація тіла. У даному випадку збільшується довжина тіла на DL і зменшується площа поперечного перерізу на DS . У більшості тіл змінюється також питомий опір на величину Dr . У випадку, коли ці прирости малі, шляхом логарифмування і подальшого диференціювання обох частин формули (7.4) для R отримаємо:

$$\frac{DR}{R} = \frac{Dr}{r} + \frac{DL}{L} + \frac{DS}{S}. \quad (7.5)$$

Оскільки площа поперечного перерізу провідника пропорційна його характерному поперечному розміру (у випадку круглого перерізу $S = \pi d^2 / 4$, для прямокутного перерізу $c \cdot d$ площа $S = kd^2$, якщо $c = kd$), то при $Dd \ll d$ в обох випадках можна одержати співвідношення $\frac{DS}{S} = 2 \frac{Dd}{d}$. Звідси:

$$\frac{DR}{R} = \frac{Dr}{r} + \frac{DL}{L} + \frac{Dd}{d} = \frac{Dr}{r} + (1 + 2n) \frac{DL}{L} = \frac{Dr}{r} + (1 + 2n)e \quad (7.6)$$

де $n = \frac{Dd}{d} / \frac{DL}{L}$ - коефіцієнт Пуассона, для металів $n = 0,25 \dots 0,40$; $e = \frac{DL}{L}$ - відносне видовження (відносна деформація) тіла. Величина e є безрозмірною, однак, оскільки вона вимірюється тисячними і мільйонними частками, для зручності оперування числами використовують безрозмірні одиниці виміру, такі як $мм/м$, $мкм/м$, а в зарубіжній літературі найчастіше застосовується одиниця мікрострейн (microstrain) або мікрос, рівна 10^{-6} .

У металів питомий опір змінюється незначно, тому:

$$\frac{DR}{R} \gg (1 + 2n)e, \quad (7.7),$$

тобто відносна зміна опору, лінійно залежить від відносної зміни довжини.

Чутливість тензорезистора до зміни його довжини характеризується коефіцієнтом відносної тензочутливості GF ("Gauge Factor"):

$$GF = \frac{DR}{R} / \frac{DL}{L} = \frac{DR}{R} / e, \quad \text{або} \quad e = \frac{DR}{R} / GF, \quad (7.8)$$

або, використовуючи (7.6), одержимо:

$$GF = (1 + 2n) + \frac{Dr / r}{e} \quad (7.9)$$

Коефіцієнт тензочутливості GF для більшості металевих тензодавачів приблизно дорівнює $GF \gg 2$, для вісмуту $GF = 22$.

Для вимірювання сили за допомогою тензорезисторів використовують закон Гука, згідно з яким для пружної деформації механічне напруження s пропорційно відносній деформації e :

$$s = K \times e,$$

де K - модуль пружності.

Напругою s називається фізична величина, чисельно рівна пружній силі F , що припадає на одиницю площі поперечного перерізу тіла S (рис. 7.17):

$$s = \frac{F}{S}.$$

Використовуючи наведені вище співвідношення, можна виразити величину сили через відносну зміну опору тензорезистора у вигляді:

$$F = Ss = SK e \quad (7.10)$$

Підставивши замість e його значення з (7.8), одержимо:

$$F = SK \frac{DR}{R \times GF}.$$

Таким чином, вимір сили за допомогою тензорезистора зводиться до виміру його опору або напруги на виході міста вимірювального, яка залежить від опору [83].

7.9.2 Дротові тензодавачі

В найпростішому вигляді тензодавач це провідник, закріплений з двох кінців (рис. 7.18), і коли до них прикладено силу, то його деформація призводить до зміни опору. Цей метод використовувався в минулому та є прийнятним, однак на сьогоднішній день є не практичним з точки зору того, що його конструкція повинна бути приєднання до системи і має малу зміну опору.

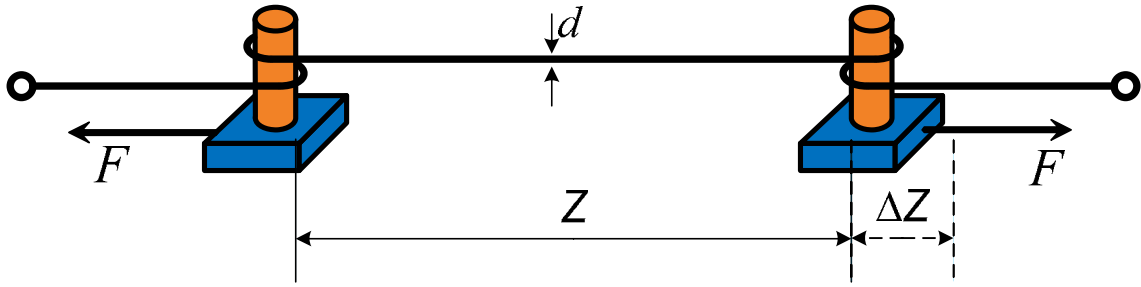


Рис. 7.18 Тензодавач із провідника

Визначення деформації: ϵ металевий дріт довжини L , провідності s та площею поперечного перерізу A .

Опір провідника відповідно становить:

$$R = \frac{L}{sA} \quad (7.11)$$

Прологарифмувавши вираз 2.1 отримаємо наступну залежність:

$$\log R = \log \frac{\rho L}{sA} = \log \frac{\rho}{s} + \log \frac{L}{A} = -\log s + \log \frac{\rho L}{A} \quad (7.12)$$

Диференціюючи обидві сторони, отримаємо:

$$\frac{dR}{R} = -\frac{ds}{s} + \frac{d(L/A)}{L/A} \quad (7.13)$$

Відповідно зміна опору провідника відбуватиметься з двох причин, при зміні провідності, або зміні форми провідника.

Для малих деформацій (лінійних), обидві зміни є лінійними функціями від деформації, ϵ .

Розглядаючи обидві зміни:

$$\frac{dR}{R} = S_s \epsilon \quad (7.14)$$

де, S_s – чутливість пристрою.

Будь-який тензодавач має сталу чутливість, яка знаходиться в межах 2 – 6 для більшості металевих тензодавачів та 40 – 200 для напівпровідникових. Існує просте лінійне співвідношення між опором давача та його деформацією.

На рис. 7.19 показано провідник та напруження, прикладене вздовж нього. Напруження, яке в ньому виникає внаслідок прикладання сили F , визначається із наступної залежності:

$$s = \frac{F}{A} = E \frac{dL}{L} = Ee, \quad (7.15)$$

де s – напруження [Н/м^2]; E – модуль Юнга [Н/м^2]; $e = dL/L$ – відносна деформація.

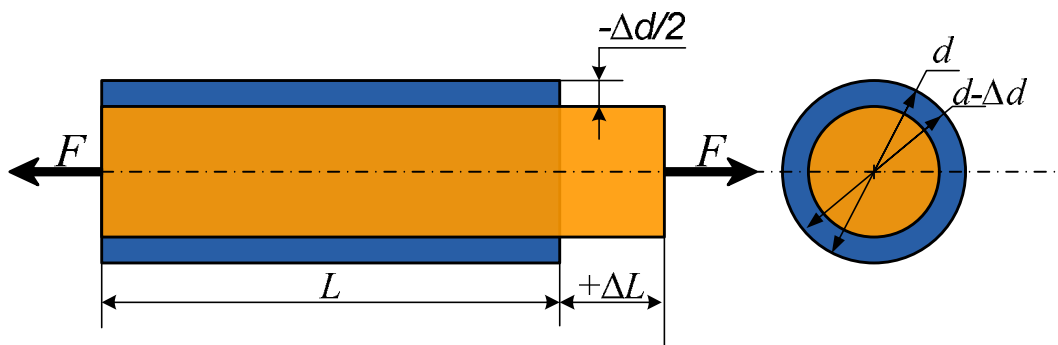


Рис. 7.19 Деформація провідника при дії зовнішньої сили

7.9.3 Фольгові тензодавачі

Більш практична конструкція тензодавача складається з тонкого шару провідника розміщеного на ізоляційній підкладці. Витравлений таким чином, щоб сформувати довгий звивистий провідник. У фольгових тензорезисторів чутливий елемент виготовляється з фольги товщиною декілька мікрон. Їх виготовляють методом фототравлення, що робить їх відносно недорогими. Найпоширенішим матеріалом для виготовлення тензодавачів є сплав з 60% міді та 40% нікелю. Матеріали, які зазвичай використовуються для виготовлення тензодавачів представлено в табл. 7.1.

Для кращого розуміння принципу роботи тензодавачів на рис. 7.20 а представлено фото тензодавача, на рис. 7.20 б) показано, що у стані спокою опір такого давача може становити наприклад 50 Ом, натомість при дії розтягуючої сили (рис. 7.20 б), цей опір збільшиться до 80 Ом. Знаючи залежність зміни опору давача від сили, що діє на нього (передавальну функцію), ми визначимо вартість цієї сили.

Властивості матеріалів для тензодавачів

Матеріал	Коефіцієнт відносної чутливості ("Gauge Factor")	Питомий опір [Wmm^2/m]	Коефіцієнт теплового розширення [$10^{-6}/^\circ\text{K}$]	Коефіцієнт лінійного теплового розширення [$10^{-6}/^\circ\text{K}$]	Максимальна температура [$^\circ\text{C}$]
Константан (Cu60Ni40)	2.0	0.48	5	12.5	400
Ніхром (Ni80Cr20)	2.0	1.3	100	18	1000
Манганін (Cu84Mn12Ni4)	2.2	0.43	10	17	
Нікель Ni	-12	0.11	6000	12	
Хромель (Ni65Fe25Cr10)	2.5	0.9	300	15	800
Платина Pt	5.1	0.1	2450	8.9	1300
Елінвар (Fe55Ni36Cr8Mn0.5)	3.8	0.84	300	9	
Платина-іридій (Pt80Ir20)	6.0	0.36	1700	8.9	1300
Платино-родій (Pt90Rh10)	4.8	0.23	1500	8.9	
Вісмут Ві	22	1.19	300	13.4	

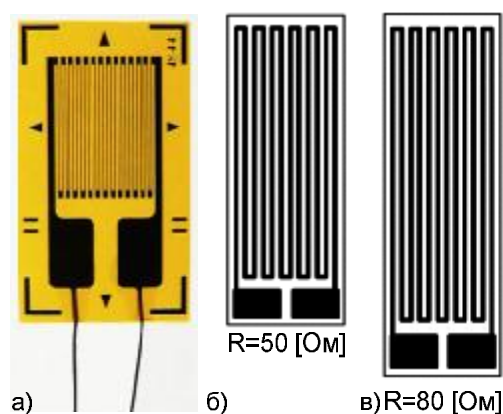


Рис. 7.20 Тензодавачів: а) фото; б) опір тензодавача у стані спокою; в) опір тензодавача при дії сили

Тензодавачі також можуть використовуватися для того, щоб вимірювати деформації по різних осях простим використанням кількох давачів в одному. Деякі з них представлені на рис. 7.21.

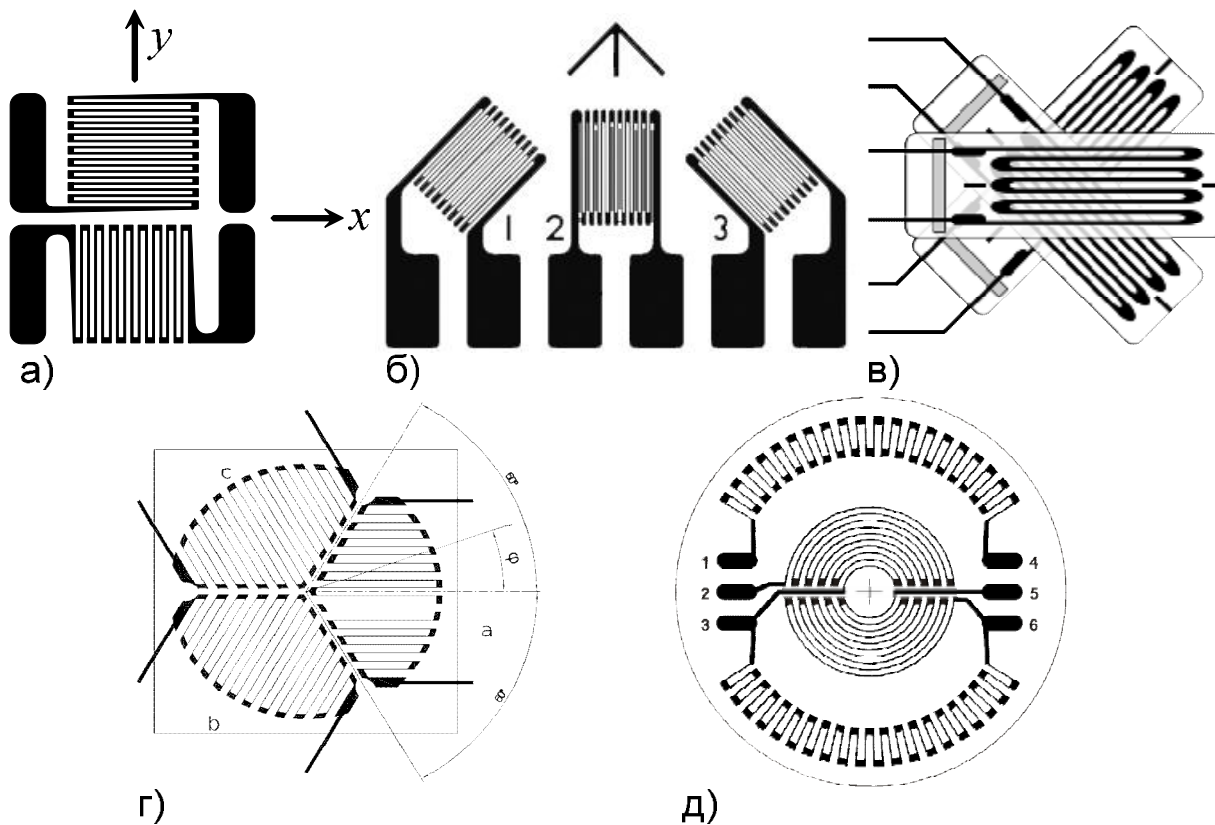


Рис. 7.21 Різні конструкції тензодавачів на провідниках

Плоский напружений стан на поверхні деталі, що досліджується характеризується трьома складовими тензора напружень σ_x , σ_y , τ_{xy} . Обчислити ці складові можна за трьома вимірним компонентам тензора деформацій e_x, e_y, g_{xy} при відомому модулі пружності E і коефіцієнті Пуассона μ [84]:

$$s_x = \frac{E}{1 - \mu^2} (e_x + \mu e_y), s_y = \frac{E}{1 - \mu^2} (e_y + \mu e_x), t_{xy} = G g_{xy}, G = \frac{E}{2(1 + \mu)}. \quad (7.16)$$

Однак деформацію зсуву g_{xy} безпосередньо виміряти не можна, тому що тензодавачі реагують лише на лінійні деформації e_x, e_y та не чутливі до деформацій зсуву. Дана проблема вирішується наступним чином. В певній точці тіла вимірюють лінійні деформації e_a, e_b та e_γ в трьох напрямках під кутами α, β , і γ відносно осі x (рис. 7.22). Така система давачів називається *розеткою*.

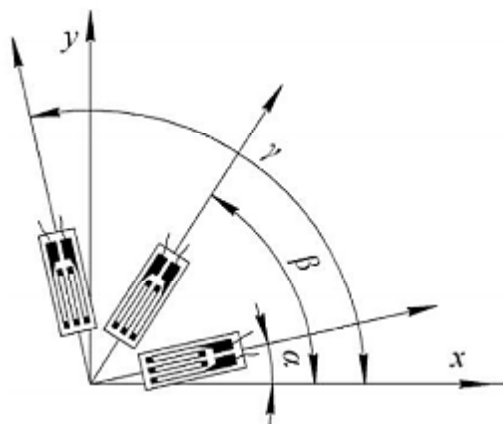


Рис. 7.22 Орієнтація давачів відносно осі x [84]

Ключовою особливістю тензометричних розеток є їх здатність визначити повний напружено-деформований стан досліджуваного об'єкту.

7.9.4 Напівпровідникові тензодавачі

Всі напівпровідники мають властивість змінювати опір при деформації, що і стало поштовхом до їх використання у тензодавачах. Найпоширеніший матеріал для виготовлення напівпровідникових тензодавачів, це монокристал кремнію, завдяки його властивостям та простоті використання. Коефіцієнт чутливості напівпровідникових тензодавачів – може сягати 90...200, що робить їх придатними для вимірювання мікроскопічних деформацій і виготовлення високочутливих давачів. Такі давачі можуть працювати навіть без додаткового підсилення електричного сигналу. Однак даний тип давачів є чутливим до температури, а також має недостатню лінійність, що обмежує область їхнього застосування.

Виготовлення тензодавачів відбувається шляхом розпилення на основу збагачуючого матеріалу (зазвичай бору чи арсеніду для р- чи n-типу) для отримання потрібного базового опору. Субстрат забезпечує деформацію пристрою. На рис. 7.23 представлена конструкція тензодавача на напівпровіднику.

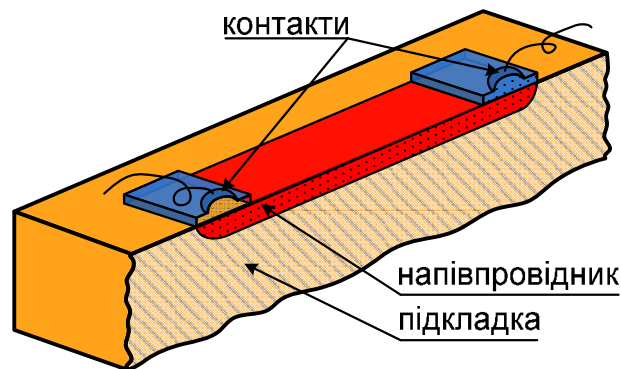


Рис. 7.23 Конструкція тензодавача на напівпровіднику в розрізі

Інші конструкції тензодавачів на напівпровідниках представлені на рис.

7.24.

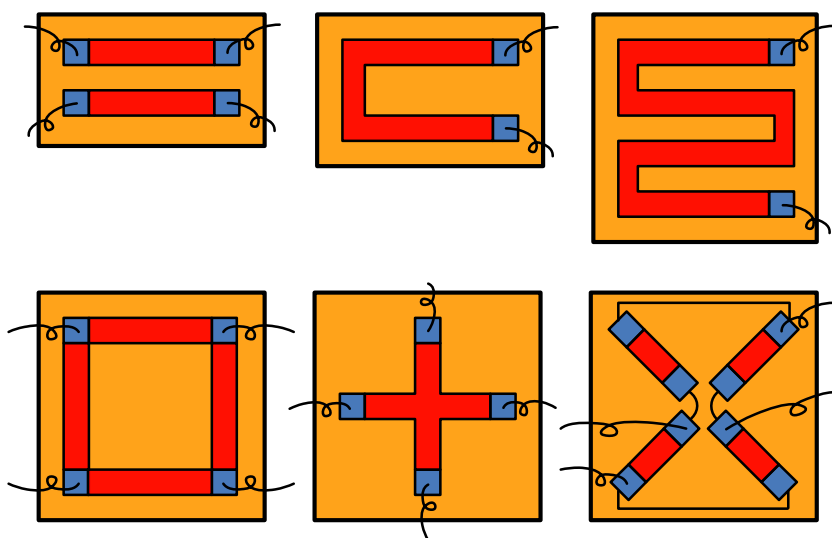


Рис. 7.24 Різні види конструкцій тензодавачів на напівпровідниках

Найбільшою різницею між тензодавачами на напівпровідниках та провідниках є те, що тензодавачі на напівпровідниках мають нелінійну ПФ, яка є квадратичною.

7.9.5 Похибки тензодавачів

В тензодавачах виникає низка похибок. А саме через температуру – в провідниках, а особливо у напівпровідниках, опір змінюється при зміні температури. Зміна температури може бути викликана як зовнішнім середовищем так і струмом, який протікає через тензодавач. В металічних давачах ці зміни відносно малі, однак в напівпровідниках цим не можна знехтувати, тому використовують компенсаційні давачі температури для обходу цих похибок.

Однією з причин виникнення похибок є сама деформація, яка з часом призводить до деформації самого давача. Похибку пов'язану із деформацією можна обійти, виконуючи періодично калібрування. Можна також уникнути похибки деформації, якщо не піддавати давач значним тривалим деформаціям де це можливо.

Більшості тензодавачів характеризується наступними параметрами:

- кількістю циклів роботи;
- максимальною деформацією (3% - типово для провідників, 1% - для напівпровідників);
- температурні характеристики, специфічні для використання з конкретним матеріалом (алюміній, сталь, карбонова сталь) для конкретного типу завдання;
- типова точність – 0.2-0.5%.

7.9.6 Інші тензодавачі

Для спеціалізованого застосування використовують оптоволоконні тензодавачі. Принцип дії полягає у тому, що зміна довжини волокна змінює фазу світла в волокні. Вимірюючи фазу, прямим чи інтерферометричним методом, можна отримати моментальне значення деформації. Сам пристрій та електроніка для нього набагато складніші, ніж для простих тензодавачів.

Існують рідинні тензодавачі, в яких деформований контейнер заповнений електролітом. Інший тип, вузько спеціалізований - пластиковий тензодавач, який виготовляють з тонких жилок на базі графіту чи вуглецю на підкладці з камеді. Дуже висока чутливість (до 300). Проте, вони складні для використання та неточні.

7.10 Тактильні давачі

Тактильні давачі є давачами сили, проте, їх застосування ширше, ніж може здатися з назви. Вважається, що ці давачі просто повинні фіксувати наявність сили. В такому випадку простий перемикач може бути давачем

дотику. Цей підхід широко використовується у клавіатурах, де використовувалися мембрани, до яких прикладається сила.

В багатьох застосуваннях датчиків дотику часто важливо виміряти розподіл сили по певній площі, саме тому використовують масиви із датчиків, або можна використати “розподілений” датчик. Вони зазвичай виконані з п’єзоелектричних плівок. Приклад показано на рис. 7.25.

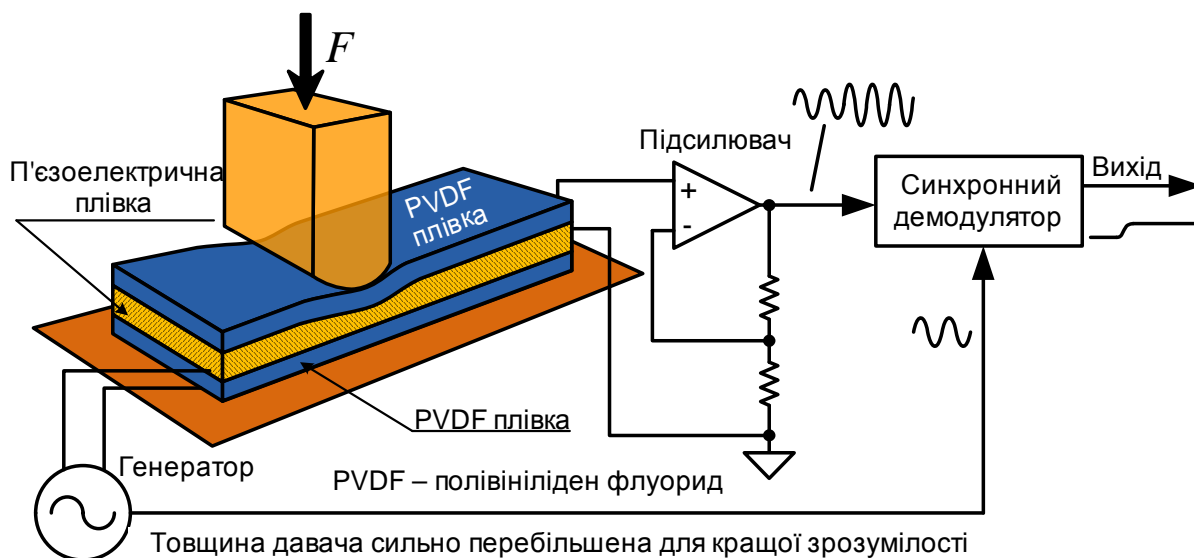


Рис. 7.25 Принцип роботи розподіленого тактильного датчика

Принцип роботи: Плівка з полівініліден флуориду чутлива до деформацій. До нижньої плівки прикладено змінний струм. Вона стискається та розширюється періодично. При деформації верхньої плівки, її сигнал та амплітуда і/або фаза вихідного сигналу змінюється, що і є мірою деформації.

7.11 Датчики температури

Датчики температури призначені для неперервного вимірювання та контролю температури на поверхні чи у середовищі твердих тіл, у рідких та газоподібних середовищах (пара, вода, сипучі матеріали, хімічні реагенти тощо).

На рис. 7.26 представлена історія розвитку температурних датчиків.

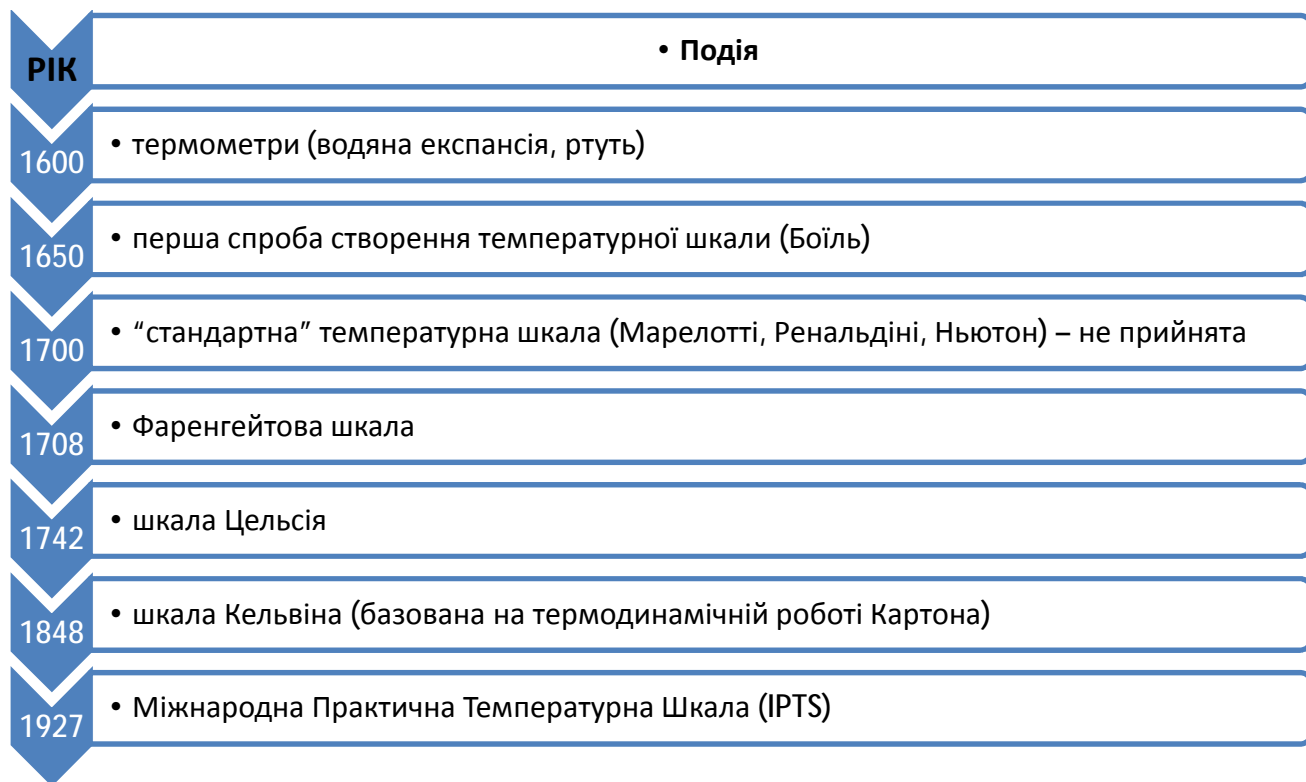


Рис. 7.26 Розвиток температурних давачів

Принцип вимірювання температури полягає у передачі невеликої порції теплової енергії від об'єкта вимірювання до давача, який перетворює теплову енергію в електричний сигнал. Коли контактний давач температури розташовують всередині об'єкта, температуру якого необхідно виміряти, або на його поверхні, між об'єктом дослідження і давачем відбувається передача тепла за рахунок явища теплопередачі. При такому принципі вимірювання чутливий елемент давача або розігрівається або охолоджується. У безконтактних давачів так само як і у контактних відбувається охолодження або нагрівання чутливого елемента, але передача тепла відбувається за допомогою випромінювання.

Безконтактні давачі використовуються для швидкого вимірювання температури об'єктів, коли встановлення контактних давачів є неможливим, або є багато об'єктів дослідження, температуру яких необхідно визначити. Наприклад для визначення ефективності опалювальної системи у багатоповерховому будинку шляхом вимірювання температури всіх батарей шляхом встановлення контактних давачів займе набагато більше часу, чим вимірювання пірметром, який має безконтактний давач температури.

Зазвичай використовується два основних методи вимірювання температури: *рівноважний* та *прогнозований*. Рівноважний метод вимірювання температури полягає у тому, що вимірювання проводять тоді, коли між досліджуваним об'єктом і чутливим елементом давача, наступить теплова рівновага, іншими словами коли температура досліджуваного об'єкта і давача буде такою самою. Натомість у методі прогнозування під час вимірювання температури не потрібно чекати, доки наступить теплова рівновага, а значення температури визначають за швидкістю зміни температури чутливого елемента.

При використанні рівноважного методу для вимірювання температури теоретично, потрібно нескінченно довгий час для досягнення абсолютної температурної рівноваги між об'єктом дослідження і давачем. Оскільки зазвичай вимірювання температури проводять з заданою точністю, то у більшості випадків вважають, що за інтервал від 5 до 10 постійних часу настає квазірівноважний стан, взявши до уваги, що перехідний процес встановлення температури давача, як правило, відповідає експоненціальній характеристиці [25].

Типовий контактний давач складається з таких компонентів:

- чутливого елемента;
- виводів, якими можуть бути пластинки або провідники, а за наявності комутаційної головки вони під'єднуються до відповідних терміналів;
- захисного корпусу – спеціальної оболонки чи покриття, що захищає чутливий елемент від оточуючого середовища.

Типовий безконтактний оптичний давач температури, складається з таких частин:

- чутливого елемента, що реагує на електромагнітне випромінювання;
- опорної конструкції з низькою теплопровідністю;
- герметичного корпусу, заповненого інертним газом (аргоном або азотом) чи сухим повітрям;
- захисного віконця, прозорого для випромінювання досліджуваного діапазону хвиль.

Вимірювана давачами температура може виступати на виходах як аналоговий лінійний сигнал (струм чи/та напруга), як цифровий код або бути логічним сигналом («Увімкнено»/«Вимкнено»). У випадку логічного сигналу на виході давачів температури їх зазвичай називають давачами-реле і їх розглядають як реле контролю температури.

Давачі температури можуть бути одно-блочними або двоблочними. У випадку двоблочного давача, що трапляється частіше, він складається з двох функціональних частин: давача і перетворювача (актюатора).

Залежно від того, для яких вимірів призначений контактний давач, і наскільки достеменним буде результат вимірів, на практиці застосовують давачі, побудовані на трьох різних типах чутливих елементів:

- термоперетворювачах опору;
- термісторах;
- термоелектричних перетворювачах.

Термістори є, по суті, термоперетворювачами опору. Принцип роботи одних і других полягає у зміні опору провідника, чи у разі термістора – напівпровідника, від температури. Термін термістор утворився внаслідок об'єднання двох слів: термічний та резистор.

Термістор (терморезистор) – напівпровідниковий резистор, активний електричний опір якого залежить від температури; термістори випускаються у вигляді стрижнів, трубок, дисків, шайб і бусинок; розміри варіюються від декількох мкм до декількох см; на їх основі розроблені системи і пристрої дистанційного та централізованого вимірювання і регулювання температури, протипожежної сигналізації та теплового контролю, температурної компенсації різних елементів електричного кола, вимірювання вакууму та швидкості руху рідин і газів та ін.

Термоперетворювачі опору виготовляють із міді або платини; вони відзначаються високою точністю (до 0,1 °С), стабільністю показів, наближеністю характеристики до лінійної, взаємозамінністю.

7.12 Давачі тиску

Великий сегмент ринку МЕМС пристроїв посідають давачі тиску [85]. Найчастіше МЕМС давачі тиску базуються на використанні зміни ємності вбудованого електричного конденсатора та електричного опору вбудованих у конструкцію чутливого елемента п'єзо-опорів [86]. Вони мають мікронні розміри і виготовляються найчастіше з кремнію, полікремнію та інших напівпровідникових матеріалів [87]. В більшості випадків ці технологічні особливості і визначають вихідні параметри пристрою. МЕМС давачі тиску використовують в різних областях науки та техніки. В більшості випадків це є високотехнологічні пристрої: військова техніка, космос, автомобілебудування, мобільні технології, побутові пристрої та інше [85, 88].

7.12.1 Принцип роботи та конструкція

Давач тиску ємнісного типу, який виготовляється з використанням МЕМС технологій включає у свою конструкцію чутливий елемент у формі тонкої пластини, ємнісний конденсатор, який включає дві обкладинки перша з них розміщена на тонкій пластині і має можливість виконувати переміщення під дією прикладеного тиску, а друга жорстко з'єднана з корпусом конструкції і немає можливості виконувати переміщення та елементи корпусу. Дана конструкція з реальними розмірами в мікронах зображена на рис. 7.27.

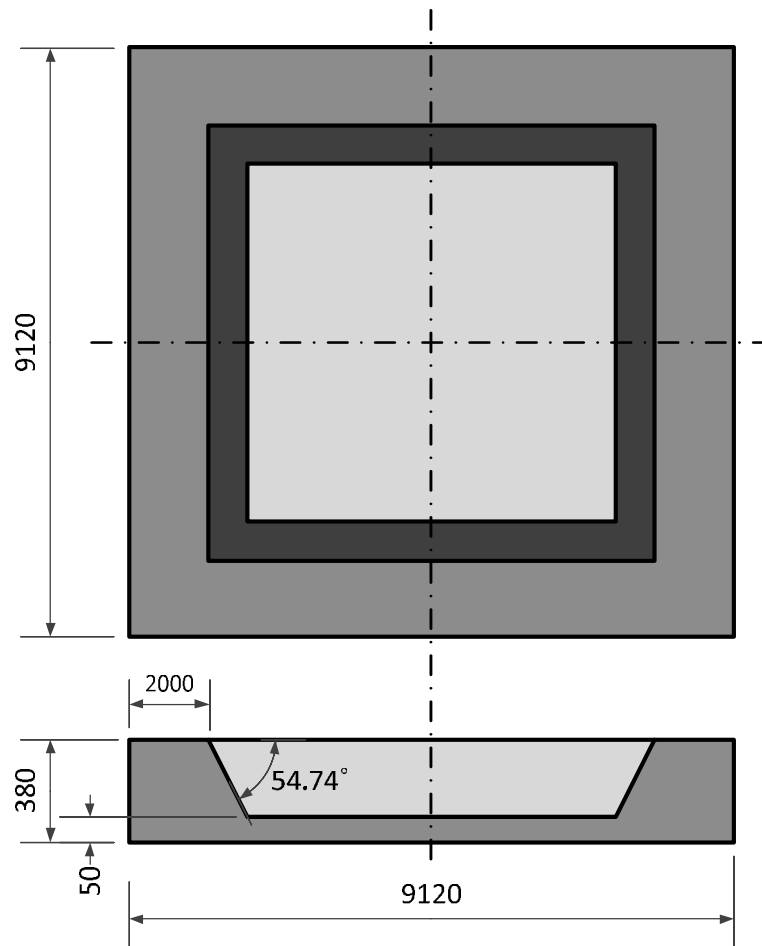


Рис. 7.27 Конструкція ємнісного МЕМС давача тиску

Принцип роботи давача тиску базується на впливі вимірюваного тиску на пружний елемент у формі тонкої пластини. В силу того, що вона має можливість виконувати переміщення, то, в залежності від величини прикладеного тиску, ці переміщення будуть приймати різні значення. Разом з тим необхідно зауважити, що переміщення будуть генерувати напруження, які не мають перевищити критичні значення для певного матеріалу. При рівності чи перевершенні цього значення відбувається руйнування чутливого елемента. В інженерії використовується так званий коефіцієнт запасу, який визначає наскільки близько ми можемо наблизитись до критичного значення, в даному випадку, напруження. Зміщення пластини призводить до зменшення відстані між обкладинками електричного конденсатора, яка призводить на зміну вихідних параметрів електричної схеми, що включає даний конденсатор. Ємність електричного конденсатора залежить від конструкції пружного елемента, яка, в свою чергу – від технологічних параметрів.

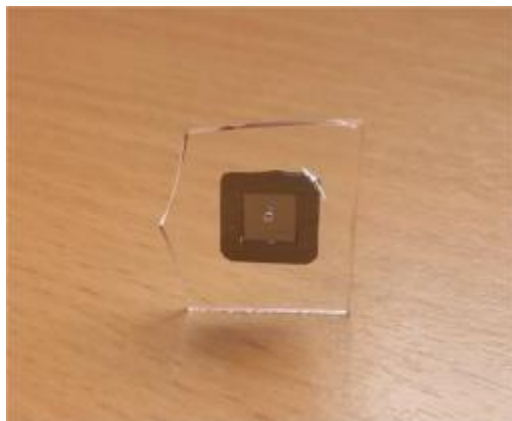


Рис. 7.28 Приклад конструкції пружного елемента давача тиску (запроектований і виготовлений у відділі Мікроінженерії і фотовольтаїки Вроцлавської політехніки)

Давач тиску це пристрій, фізичні параметри якого змінюються залежно від тиску вимірюваного середовища (рідини, газу, пари). У давачах тиску, тиск вимірюваного середовища перетворюється в логічний (дискретний), стандартний аналоговий або цифровий сигнал.

Принцип дії будь-якого давача тиску полягає у первинному перетворенні тиску, який діє на давач, в електричний сигнал. У конструкцію практично усіх давачів тиску входять давачі, які володіють відомою площею поверхні, деформація або переміщення яких під дією тиску визначаються в процесі вимірювань. Тобто багато давачів тиску реалізуються на основі давачів елементів переміщення або сили, причиною виникнення якої є також переміщення (складені давачі).

Загалом давач тиску складається з первинного перетворювача тиску, який містить чутливий елемент і приймач тиску, схеми вторинної обробки сигналу (актюатора), різних за конструкцією корпусних деталей і пристрою виводу. Основною відмінністю одних давачів від інших є точність реєстрації тиску, яка залежить від принципу перетворення тиску в електричний сигнал: тензорезистивний, п'єзорезистивний, ємнісний, індуктивний, резонансний, іонізаційний тощо.

Давачі тиску класифікуються за:

- типом вимірюваного тиску:

- абсолютного тиску – призначені для вимірювання величини абсолютного тиску рідких і газоподібних середовищ. Опорним тиском є вакуум. Повітря з внутрішньої порожнини давача відпомповане. Наприклад, барометр (рис.102, а) – окремий випадок давача абсолютного тиску;
- надлишкового тиску – призначені для вимірювання величини надлишкового тиску рідких і газоподібних середовищ. Опорний тиск – атмосферний, тобто одна сторона мембрани з'єднана з атмосферою;
- диференціального тиску – призначені для вимірювання різниці тиску середовища і використовуються для вимірювання витрати рідин, газу, пари, рівня рідини. Тиск подається на обидві сторони мембрани, а вихідний сигнал залежить від різниці тисків;
- специфікою:
 - гідростатичного тиску – призначені для вимірювання величини гідростатичного тиску контрольованого середовища і перетворюють його в значення рівня. Тиск стовпа рідини залежить тільки від його висоти і від густини самої рідини, але не залежить від форми й об'єму резервуара. Вони можуть бути надлишковими або диференціальними давачами тиску, до яких подається тиск середовища і для порівняння інший вхід з'єднується з атмосферою або з областю надлишкового тиску у випадку резервуара під тиском. Давачі гідростатичного тиску застосовуються для вимірювання рівня однорідних рідин у резервуарах без істотного руху рідини і можуть використовуватися для в'язких рідин, суспензій і паст. Конструктивно гідростатичні давачі бувають двох типів: мембранні і заглибні. У першому випадку тензорезистивний або ємнісний давач безпосередньо з'єднаний з мембраною і весь давач знаходиться в нижній частині резервуара, при цьому розташування мембрани давача відповідає мінімальному рівневі. У

випадку заглибного давача мембрана знаходиться в рідині і передає тиск на тензорезистивний давач через стовп. Гідростатичні давачі забезпечують високу точність при невисокій вартості і простоті конструкції;

- вакуум-метричного тиску (розрідження) – призначені для вимірювання величини вакуум-метричного тиску. Опорний тиск у цих давачах атмосферний. Однак, на відміну від давачів надлишкового тиску, вимірюваний тиск є меншим від атмосферного, тобто існує розрідження щодо атмосфери;
- надлишкового тиску-розрідження – сполучення давачів надлишкового і вакуум-метричного тисків, тобто вимірюють як тиск, так і розрідження;
- конструктивним виконанням:
 - зовнішні давачі тиску;
 - вбудовані давачі тиску;
- принципом дії:
 - прямої дії – перетворюють зовнішній вплив безпосередньо в електричний сигнал, використовуючи відповідне фізичне явище;
 - складені давачі тиску – містять декілька перетворювачів зовнішньої дії середовища;
- принципом перетворення тиску в електричний сигнал:
 - тензорезистивні;
 - п'єзорезистивні;
 - ємнісні;
 - резонансні;
 - індуктивні;
 - п'єзоелектричні;
 - іонізаційні тощо;
- номінативним вимірювальним діапазоном:

- високого і надвисокого тиску ($P > 60$ МПа);
- низького і наднизького тиску ($P < 0,1$ МПа);
- середнього тиску ($0,1 < P < 60$ МПа);
- типом вимірюваного середовища:
 - неагресивні гази і рідини;
 - агресивні гази і рідини;
 - харчові середовища;
 - в'язкі середовища;
 - абразивні середовища;
- типом вихідного сигналу:
 - аналогові;
 - цифрові;
 - з логічним.

Практично всі давачі тиску виготовляються сьогодні за допомогою об'ємної мікрообробки. По ряду параметрів вони перевершують традиційні давачі тиску, тому що набагато дешевші, виключно надійні, технологічні і мають хорошу відтворюваність параметрів.

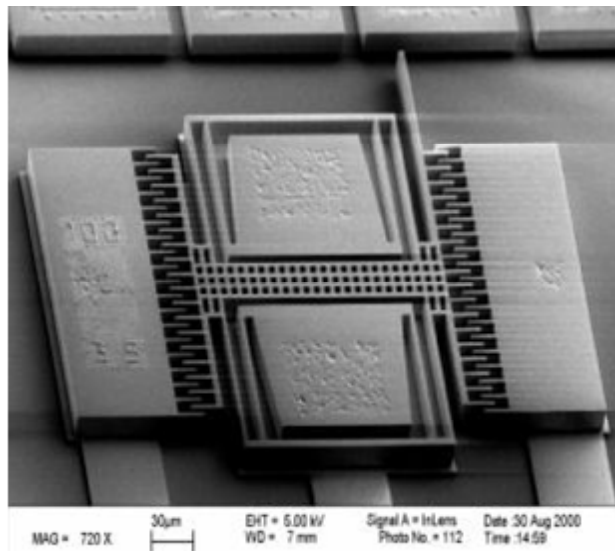


Рис. 7.29 Давач тиску для особливо надійних авіаційних і промислових додатків

У будь-якому сучасному автомобілі обов'язково є кілька мікромеханічних давачів тиску. Типовий приклад їх використання - вимірювання тиску у впускному колекторі двигуна.

7.13 Давачі кута - гіроскопи

Гіроскоп - пристрій, здатний реагувати на зміну орієнтації основи, на якій його встановлено, відносно інерціального простору. У більш традиційному розумінні гіроскоп – пристрій, що містить швидкообертове тверде тіло, яке має три обертальні ступені вільності, тобто можливість обертання навколо трьох взаємно-перпендикулярних осей. Усім відома дитяча іграшка - дзига, являє собою приклад гіроскопа.

Гіроскоп має три характерні властивості:

- стійкість напрямку головної осі в інерціальному просторі, тобто здатність гіроскопа ефективно опиратися зовнішнім діям, які прагнуть змінити напрямок його головної осі у просторі (інерціальному);
- прецесії: якщо на гіроскоп діє постійний момент сил, який прагне змінити напрямок головної осі, то головна вісь набуває обертання з постійною кутовою швидкістю у площині, яка проходить через головну вісь і вісь прикладеного моменту сил; швидкість цього обертання (прецесії) обернено пропорційна кутовій швидкості власного обертання гіроскопа;
- нутації: якщо на гіроскоп подіяв ударний імпульс сил, який прагне змістити напрямок його головної осі, то головна вісь починає здійснювати коливання (з великою частотою і вельми малою амплітудою), описуючи у просторі конічну поверхню з вершиною у точці підвісу; частота нутації прямо, а амплітуда нутації обернено пропорційні величині власної кутової швидкості гіроскопа.

Сучасні гіроскопи ґрунтуються на вимірюванні вібраційних та хвильових параметрів резонаторів різних типів (механічних, оптичних тощо). Принципи їхньої дії ґрунтуються на ефектах Саньяка, Фермі, Брайана (інерції стоячих хвиль у пружному кільці та у осесиметричних оболонках), ефекті інерції, поляризації пружних хвиль, зсуву тощо [89].

Для забезпечення обертання ротора гіроскопа з високою швидкістю застосовуються спеціальні гіромотори. Для управління гіроскопом і зняття з нього інформації використовуються давачі кута і давачі моменту.

7.13.1 Сфери використання гіроскопів

На сьогоднішній день МЕМС гіроскопи знайшли широке застосування в різних галузях техніки: автомобільна промисловість (системи підвіски та гальмування), військова промисловість (артилерійські снаряди з корекцією траєкторії, торпеди), фото- та відеотехніка (стабілізатори зображення) та багато інших [90].

Прилади, що використовують властивості гіроскопа, застосовуються в ряді галузей науки і техніки, зокрема в системах навігації і системах керування рухомими транспортними засобами (суден, літальних і космічних апаратів, ракет, торпед тощо).

Гіротеодоліт - гіроскопічний пристрій, призначений для визначення азимута і широко використовується при проведенні маркшейдерських, геодезичних, топографічних та інших робіт. Гіроскопічне орієнтування точніше магнітного і займає менше часу, ніж астрономічне вимірювання азимута [91].

Значне здешевлення виробництва МЕМС-гіроскопів призвело до того, що їх почали масово використовуватися в смартфонах та ігрових приставках. Поява МЕМС-гіроскопа в смартфоні Apple iPhone 4 (див. рис. 7.30) відкрила свого часу нову революцію в 3D-іграх і в формуванні доповненої реальності. Гіроскоп надає програмі дані про те, як орієнтований смартфон по сторонах світу, а програма пов'язує ці дані з віртуальним світом. Таким же чином, але вже не в грі, можна використовувати гіроскоп для формування доповненої реальності.

Нижче подано зображення гіроскопа який використовувався в Iphone 4.

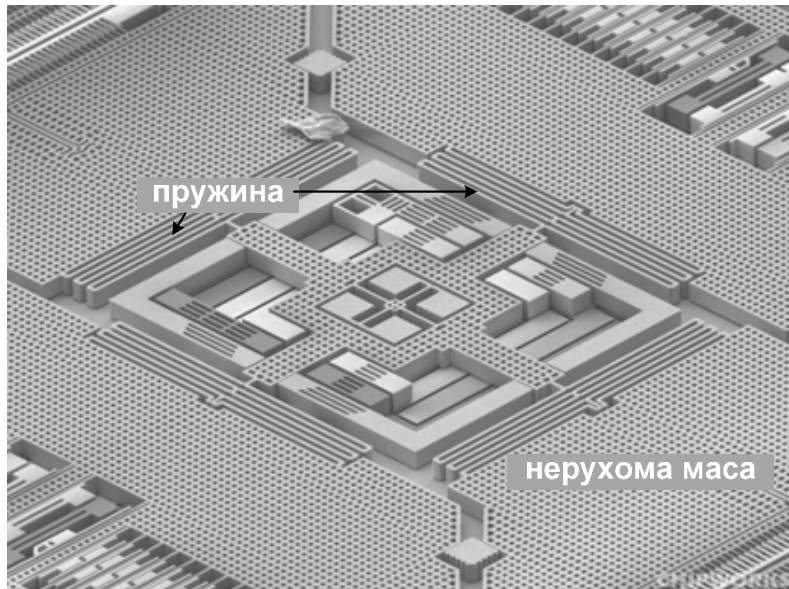


Рис. 7.30 Гіроскоп Iphone 4[92]

Вперше ігровий контролер, що вміє визначати своє положення в просторі, був випущений компанією Nintendo - Wii Remote для ігрової приставки Wii, але в ньому використовується тільки тривимірний акселерометр. Тривимірний акселерометр не здатен давати точне вимірювання параметрів обертання при високодинамічних рухах. І саме тому в новітніх ігрових контролерах, крім акселерометра, використовуються гіроскопи [91].

7.13.2 Конструкція гіроскопу та принцип роботи

MEMS гіроскоп є одним з найскладніших MEMS як за принципом дії, так і за конструкцією. Існують різні конструкції мікромеханічного гіроскопа, такі, як: камертонна, карданна, кільцева, вібраційного колеса.

MEMS гіроскопи зараховують до вібраційних гіроскопів. Основна відмінність мікромеханічних вібраційних гіроскопів від традиційних полягає в тому, що їх вихідний сигнал має вібраційний характер, крім того в конструкціях цих гіроскопів відсутні елементи, що обертаються. Всі MEMS вібраційні гіроскопи використовують той самий фізичний принцип роботи, але мають різний характер власного руху чутливого елемента. Чутливий елемент може здійснювати крутильні (кільцева конструкція) або поступальні коливання (камертонна конструкція) [93].

На рис. 7.31 зображено двомасову конструкцію мікромеханічного гіроскопа камертонного типу [94].

Принцип роботи такого гіроскопа полягає в наступному. Чутливі елементи приводять в протифазні вимушені гармонійні коливання з частотою, близькою до резонансу в площині XOZ , за допомогою електростатичних віброприводів. У разі обертання платформи, на якій встановлено гіроскоп, відносно вісі чутливості приладу (вісь вимірювання z) з кутовою швидкістю ω – виникає протилежно напрямлена Коріолісова сила інерції. Сила інерції Коріоліса змінюється з частотою вимушених коливань, а їх модуль пропорційний кутовій швидкості ω . Коріолісова сила інерції спричиняє поступальні коливання чутливих елементів в площині YOZ . Амплітуда цих коливань є пропорційною величині кутової швидкості обертання платформи ω , а їх фаза – напряму [95].

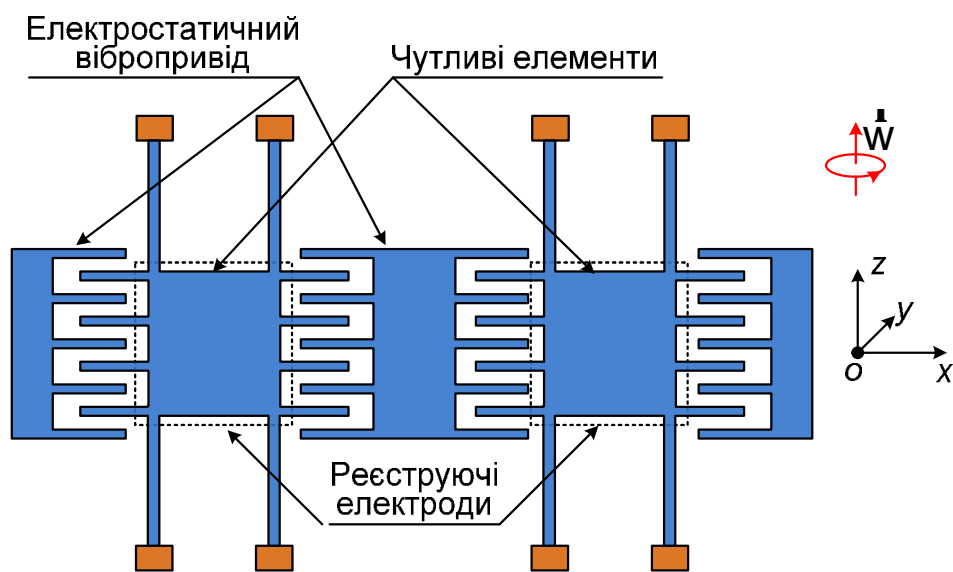


Рис. 7.31 Двомасова конструкція мікромеханічного гіроскопа камертонного типу [37]

Архітектура гіроскопів є подібною до акселерометрів. Багато з цих пристроїв мають конденсаторну структуру. В основі гіроскопів лежить механічний елемент, що працює за принципом камертона і використовує ефект Коріоліса для перетворення кутової швидкості в силу для переміщення чутливої структури. У гіроскопі як на рис. 7.31 два чутливі елементи

знаходяться в постійному русі, причому в протилежних напрямках. При зміні кутової швидкості починає діяти сила Коріоліса $\dot{\vec{F}}_{Coriolis}$ (див. рис. 7.32).

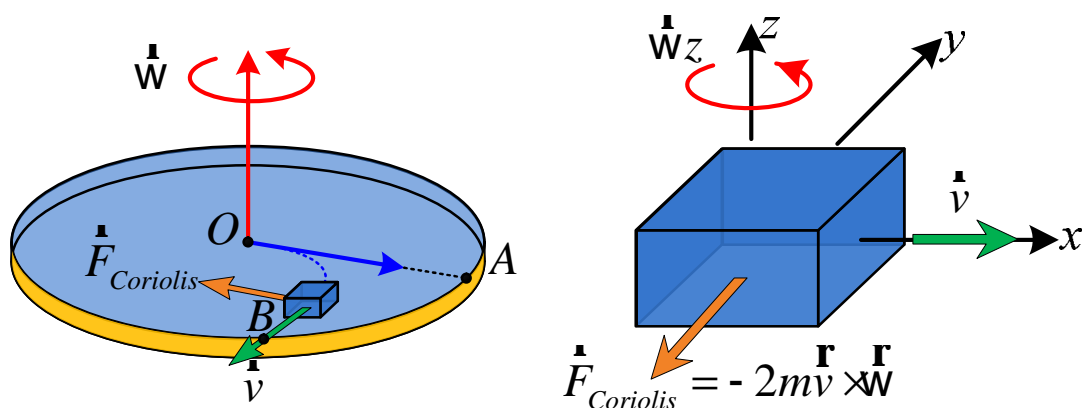


Рис. 7.32 Дія сили Коріоліса

При цьому напрямок сили Коріоліса перпендикулярний напрямку руху мас. Сила Коріоліса викликає зсув мас, пропорційний величині кутової швидкості. Можна сказати, що в загальному випадку сила Коріоліса визначається як:

$$\dot{\vec{F}}_{Coriolis} = -2m\dot{\mathbf{v}} \times \dot{\mathbf{W}} \quad (7.17)$$

де $\dot{\mathbf{W}}$ – кутова швидкість; m – маса об'єкта; $\dot{\mathbf{v}}$ – швидкість об'єкта.

Сила Коріоліса ортогональна вектору швидкості. У разі радіального руху, вона відхиляє об'єкт вправо, змушуючи його рухатися по траєкторії OB . Оскільки система має конденсаторну структуру, то будь-яке зміщення викликає зміну електричної ємності. І таким чином кутова швидкість перетворюється в електричний параметр.

Крім того, оскільки Земля обертається, то сила Коріоліса виявляється і в глобальних масштабах, це потрібно враховувати при проектуванні інерційних мікросистем. Так наприклад у північній півкулі сила Коріоліса направлена вправо від руху (рис. 7.33), тому праві береги річок в північній півкулі крутіші – їх підмиває вода під дією цієї сили. У південній півкулі все відбувається навпаки. Саме силою Коріоліса пояснюється в три рази більше зношення правої рейки залізничної колії, ніж лівої.

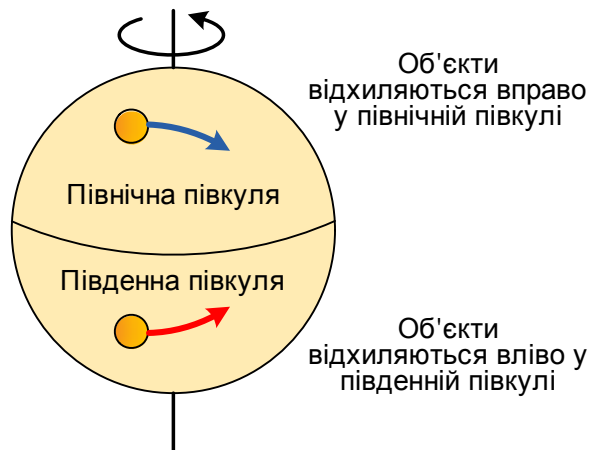


Рис. 7.33 Дія сили Коріоліса у різних півкулях землі

Досягнення в MEMS технологіях та темпи їхнього розвитку привели до здешевлення, високої продуктивності MEMS гіроскопів з низьким енергоспоживанням і меншими розміром. Це поєднання дає широкі можливості, та перспективу.

MEMS гіроскопи у більшості випадках не вимагають повторного калібрування, тим не менш, для складних і точних систем, таких як навігація і обчислення, повторне калібрування рівня нульової ставки та чутливості після того як гіроскоп встановлений на друкованій платі є необхідним.

7.14 Інерційні давачі

Акселерометри мають досить давню історію розвитку. У звичайних механічних акселерометрах інерційна маса зміщується під дією прискорення і впливає на тензодавач. Такі пристрої досить об'ємні, мають низьку відтворюваність, погану стійкість до ударів і малу довговічність. Значно кращими параметрами володіють п'єзоелектричні давачі прискорення, в яких фізична деформація кристалічної структури призводить до зміни її провідності. Однак найкращими характеристиками володіють ємнісні напівпровідникові мікродавачі, в яких паралельно рухомі пластини утворюють змінний конденсатор. Переваги давачів такого типу, в яких поєднуються переваги інтегральної технології і ємнісного методу вимірювання, наведені в таблиці 7.2.

Таблиця 7.2

Переваги ємнісних напівпровідникових давачів

Переваги напівпровідникових датчиків	Переваги ємнісного методу
Низька вартість завдяки масовому виробництву	Висока лінійність
Можливість здійснення додаткових функцій (самотестування, зміна діапазону вимірювання)	Висока чутливість
Висока відтворюваність	Просте самокалібрування і самотестування
Висока стійкість до ударів і перевантажень	Легка реалізація ланцюгів зворотного зв'язку
Функціональна закінченість (датчик і схема обробки на одному кристалі)	Сумісність з КМОП-технологією
Малі габарити	Широкий діапазон робочих температур

7.14.1 Ємнісний інерційний датчик

Принцип роботи ємнісного інерційного датчика показаний на рис. 7.34.

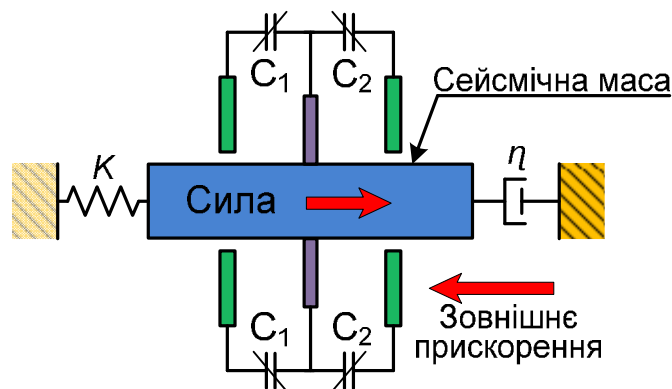


Рис. 7.34. Структурна схема інерційного датчика

Три пластини утворюють послідовне з'єднання двох конденсаторів. При цьому дві крайні жорстко закріплені, а центральна може зміщуватися під дією інерційних сил. Зміна відстані між пластинами призводить до зміни ємності обох конденсаторів. Така конструкція, під назвою G-Cell, наведена на рис. 7.34. Вона включає в себе чотири пластини з полікристалічного кремнію, три з яких утворюють обкладки конденсаторів, а четверта використовується для реалізації функції самотестування.

Закінчений інерційний датчик являє собою не тільки чутливий елемент G-Cell (рис. 7.35), а й інтегровану в той же кристал досить складну схему обробки сигналу.

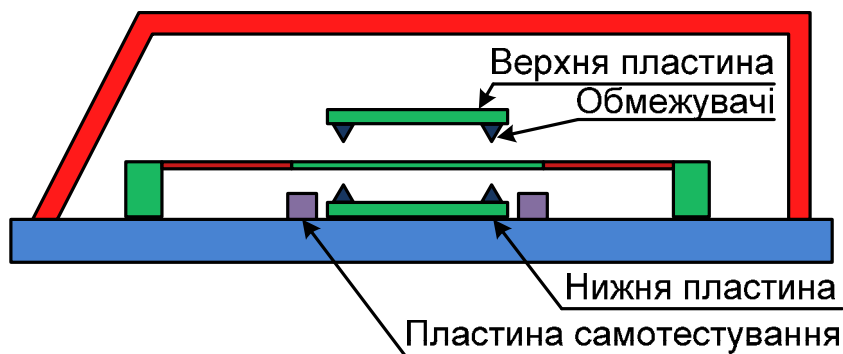


Рис. 7.35. Конструкція напівпровідникового інерційного давача

У зв'язку з тим, що зміщення центральної пластини є дуже малими, відповідно зміна ємності є теж дуже малою. Тому краще вимірювати різницю між ємностями двох конденсаторів, а не абсолютне значення. При такі методиці струм подається по черзі на кожен з конденсаторів давача G-cell протягом фіксованого часового інтервалу. При цьому напруга на виході інтегратора, зворотно пропорційна ємності конденсатора. Далі сигнал надходить до фільтрів для зменшення шумів, після чого зазвичай сигнал ще підсилюється і проводиться температурна компенсація. Для прикладу на рис. 7.36 наведена типова форма імпульсу на виході інерційного давача з номінальним діапазоном $\pm 40\text{г}$ при дії зовнішньої ударної сили уздовж чутливої осі.

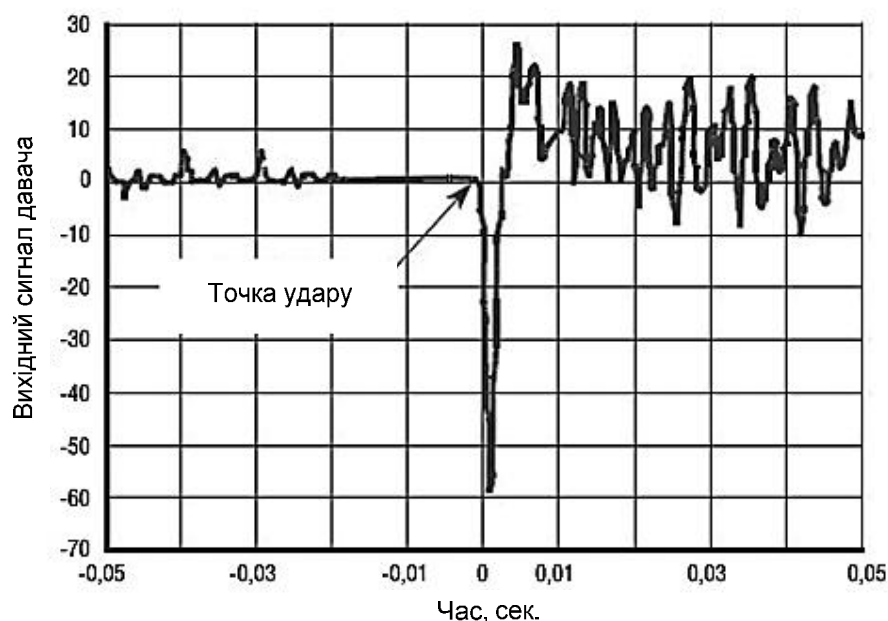


Рис. 7.36. Типова форма імпульсу на виході інерційного давача при ударній дії

7.14.2 Сфери використання інерційних давачів

У автомобільній промисловості акселерометри найбільше використовуються у системах повітряних подушок безпеки. У таких системах акселерометри визначають зміну прискорення, а контролери приймають рішення, чи при такій зміні можуть відбутися серйозні пошкодження пасажирів і відповідно чи є необхідність активувувати подушки. Разом з цим акселерометри можуть використовуватися, щоб визначити рух під великими кутами нахилу або втрату управління автомобілем. У цьому випадку давачі встановлюються на передачі, рульовій тязі і колесах автомобіля. При втраті зчеплення із дорогою або керування автомобілем, мікроконтролери використовують дані акселерометрів, щоб визначити напрям і положення автомобіля і внести корективи. Ще одним дуже поширеним застосуванням в автомобільній галузі є протиугінні системи, в яких інерційні давачі фіксують хитання і удари по автомобілю, що охороняється.

Інерційні давачі здатні вимірювати нахил, рух, положення, силу ударів і вібрацію, вони здійснили прорив у багатьох інших галузях, серед яких побутова, промислова, комп'ютерна, геодезична, будівельна та медична техніка:

Автомобільна електроніка:

- Подушки безпеки;
- Давачі критичного крену;
- Креш-тести;
- Динамічний контроль;
- Гальмівна система;
- Протиугінна система;
- Адаптивна підвіска.

Промислова / громадянська електроніка:

- Інклінометри;
- Захист жорстких дисків РС;
- MP3-програвачі;
- Електронні компаси;

- Ергономічний інструмент;
- Стабілізатори зображення;
- Прокрутка тексту в PDA;
- Маніпулятори для систем віртуальної реальності;
- Охоронні системи;
- GPS-навігатори;
- Логгером подій / чорні ящики;
- Контроль навантаження / вивантаження товару;
- Ударні вимикачі;
- Акустичне обладнання;
- Контроль постави;
- Сейсмографи;
- Робототехніка.

Медична / спортивна електроніка:

- Фізіотерапевтичне та реабілітаційне обладнання;
- Крокоміри;
- Спортивно-медичне обладнання;
- Спортивно-діагностичне обладнання.

7.14.3 Конструкція та принцип роботи MEMS акселерометра

MEMS акселерометр використовується у багатьох галузях, а саме – автомобільних системах подушок безпеки, комп'ютерних приставках, мобільних телефонах, ноутбуках, цифрових відеокамерах робототехніці тощо. У кожному із випадків розмір і точність є найкритичнішими характеристиками роботи давача [96].

Давач для вимірювання прискорення працює за тими самими принципами, що і система пружина-маса [97, 98], схематично наведена на рис. 7.37. Проте замість пружини у акселерометра використовується система з подвійно-зігнутих гнучких балок. Маса замінюється заданою масою пристрою. Для визначення зміщень на кожній стороні пристрою розташовано ємнісний давач. Чутливість цих давачів є пропорційною довжині маси. Ці давачі

повертають електричний сигнал пропорційно до визначених зміщень. Застосовуючи закон Гука до другого закону Ньютона можна легко визначити прискорення, яке отримує маса: $kx = ma$.

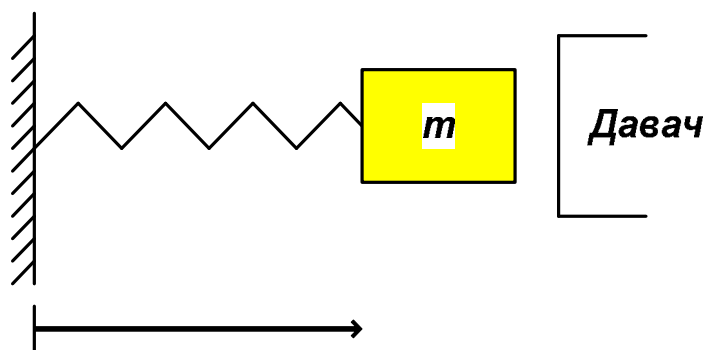
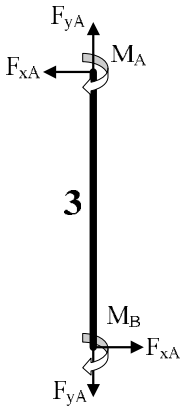
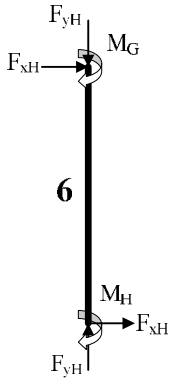
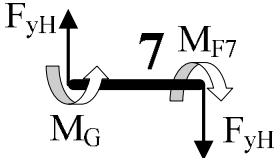
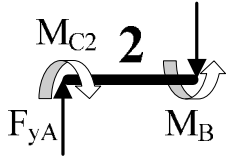


Рис. 7.37 Схема системи пружина-маса із давачем визначення зміщень

Спрощена конструкція MEMS акселерометра представлена на рис. 7.38 [99]. Вузькі балки конструкції формують відповідність пружин для всієї системи. Маса пристрою показана посередині, а анкери прикріплені до MEMS субстрату. В ідеалі, ніжки (балки) структури мають бути якомога довгими, а маса якомога більшою. Тоді отримано максимальне зміщення і зросте чутливість прискорення (визначення мінімально можливого прискорення). Проте, максимальні розміри кристалу обмежують розміри акселерометра, які ми мінімізуємо для виготовлення більшої кількості пристроїв з однієї пластини. Ці два фактори знаходяться у повній суперечності при знаходженні оптимального варіанту.

<p style="text-align: center;"><i>Балка 3:</i></p> $M_B = F_{xA} L_3 - M_A \quad q_B = -\frac{F_{xA} L_3^2}{2EI} + \frac{M_A L_3}{EI}$ $x_A = d, \quad -x_b = -d - \frac{F_{xA} L_3^2}{6EI} + \frac{M_A L_3^2}{2EI}$	
<p style="text-align: center;"><i>Балка 6:</i></p> $M_G = F_{xM} L_3 - M_H \quad q_G = -\frac{F_{xM} L_3^2}{2EI} + \frac{M_H L_3}{EI}$ $-x_G = -d - \frac{F_{xM} L_3^2}{6EI} + \frac{M_H L_3^2}{2EI}$ <p style="text-align: center;"><i>Рівняння:</i></p> $x_B = x_G$	
<p style="text-align: center;"><i>Балка 7:</i></p> $M_{F7} = -F_{yH} L_2 - M_G \quad q_F = q_G + \frac{F_{yH} L_2^2}{2EI} - \frac{M_G L_2}{EI}$ <p style="text-align: center;"><i>Рівняння:</i></p> $y_F = 0 = q_G L_2 + \frac{F_{yH} L_2^3}{6EI} + \frac{F_{xH} L_2^3}{6EI} - \frac{M_G L_2^2}{2EI}$	
<p style="text-align: center;"><i>Балка 2:</i></p> $M_{C2} = -F_{yA} L_2 + M_B \quad q_C = q_B + \frac{F_{yA} L_2^2}{2EI} - \frac{M_B L_2}{EI}$ <p style="text-align: center;"><i>Рівняння:</i></p> $y_C = 0 = q_B L_2 + \frac{F_{yA} L_2^3}{6EI} - \frac{M_B L_2^2}{2EI}$	

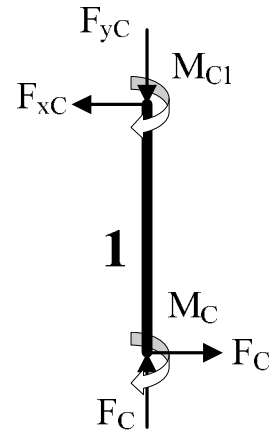
Балка 1:

$$q_D = 0 = q_C - \frac{F_{xC} L_1^2}{2EI} + \frac{M_{C1} L_1}{EI}$$

$$x_D = 0 = x_B + q_C L_1 - \frac{F_{xC} L_1^3}{6EI} + \frac{M_{C1} L_1^2}{2EI}$$

отже

$$M_{C1} = f(q_C, x_B) \quad F_{xC} = F_{xD} = f_2(q_C, x_B)$$



Балка 5:

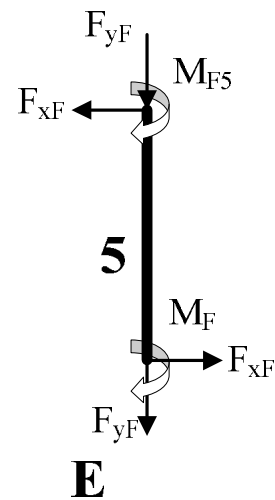
$$q_E = 0 = q_F - \frac{F_{xF} L_1^2}{2EI} + \frac{M_{F5} L_1}{EI}$$

$$x_E = 0 = x_B + q_F L_1 - \frac{F_{xF} L_1^3}{6EI} + \frac{M_{F5} L_1^2}{2EI}$$

отже $M_{xF} = f_1(q_F, x_B) \quad F_{xE} = F_{xF} = f_2(q_F, x_B)$

Рівняння:

$$F_{xA} + F_{xH} + F_{xE} + F_{xD} = 0$$



Балка 4:

$$M_{C4} = M_{C1} = M_{C2} \quad M_{F4} = M_{F7}$$

$$F_{y4} = F_{yD} - F_{yA} = F_{yE} - F_{yH}$$

$$M_{C4} + M_{F4} + F_{y4} L_B = 0$$

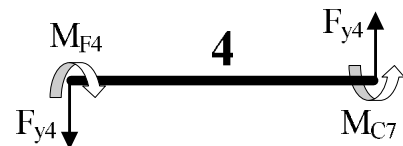
Рівняння:

$$q_C = q_F - \frac{F_{y4} L_B^2}{2EI} - \frac{M_{F4} L_B}{EI} =$$

$$= q_F + \frac{L_B}{2EI} (M_{C1} + M_{C2} - M_{F7} - M_{F5})$$

$$y_C = 0 = q_F L_B - \frac{F_{y4} L_B^3}{6EI} - \frac{M_{F4} L_B^2}{EI} =$$

$$= q_F L_B + \frac{L_B^2}{EI} (M_{C1} + M_{C2} - 2M_{F5} - 2M_{F7})$$



8 АКТЮАТОРИ – ВИКОНАВЧІ МЕХАНІЗМИ

Мікроактюатор (складова частина мікросистем) – це пристрій, який перетворює енергію в керований рух. Мікроактюатори мають розміри від декількох квадратних мікрометрів до одного квадратного сантиметра. Діапазон застосування мікроактюаторів надзвичайно широкий і різний, і він постійно зростає. Вони використовуються в робототехніці, в керуючих пристроях, в космічній галузі, в біомедицині, дозиметрії, у вимірювальних приладах, в технологіях для розваг, автомобілебудуванні і в домашньому господарстві.

Основні використовувані методи отримання активації (рух, деформація, приведення в дію) в таких пристроях можуть бути зведені до наступних: електростатичний, магнітний, п'єзоелектричний, гідравлічний і тепловий. Найбільш перспективними методами вважаються п'єзоелектричний і гідравлічний, хоча й інші мають важливе значення. Електростатична активація застосовується приблизно в однієї третини актюаторів, і, ймовірно, це найбільш загальний і добре відлагоджений метод. Його головні недоліки - це знос і злипання. Магнітні актюатори зазвичай потребують відносно великого електричного струму (тобто багато енергії). Також на мікроскопічному рівні при використанні електростатичних методів активації, одержуваний вихідний сигнал на відносну одиницю розмірності краще, ніж при використанні магнітних методів, тобто при одному і тому ж розмірі електростатичний пристрій видає кращий вихідний сигнал. Теплові актюатори теж споживають відносно велику кількість електричної енергії і головний їх недолік в тому, що велика частина тепла розсіюється. В даний час розробляються мікроактюатори, засновані на ефекті пам'яті форми, які можуть бути зменшені до субмікронних розмірів.

8.1.1 Тертя і знос

Правила пропорційної мініатюризації призводять до факту, що на мікрорівні поверхневі сили в порівнянні з об'ємними мають більше значення. З цього випливає, що для мікроактюаторів тертя має дуже велике значення. Крім

того, через свої маленькі маси мікромеханічні елементи мають малу силу інерції, що веде до високих динамічних характеристик, і отже вони часто працюють з високою робочою частотою та швидкістю.

З одного боку тертя веде до втрат, яке є причиною погіршення функціонування елементів, з іншого боку тертя призводить до зносу, який негативно впливає на функціональну поведінку і веде до прискореного старіння та, в кінцевому рахунку, поломці компонента. Тертя є ключовим фактором, який визначає не тільки ефективність, але і довговічність. Однак тертя не завжди супроводжується зносом, можливо тертя і без зносу.

Тертя – це явище, що впливає на поверхневий шар матеріалу і практично не зачіпає об'ємні характеристики. Це результат взаємодії контактних областей поверхонь. Важливі фактори, що впливають на величину тертя: стан поверхні, поверхнева топологія і взаємодіючі матеріали. Порівняно з традиційним машинобудуванням в мікросистемах з'являється тертя твердих тіл (сухе тертя). Для мікромоторів сила поверхневого натягу настільки велика, що істотно впливає на їх функціонування. Тому в якості підшипників ковзання використовують підшипники сухого тертя, які, однак, можуть бути забезпечені молекулярними мастильними плівками для зменшення тертя і зносу. В цьому випадку характеристики мастила і контактної поверхні стають головними чинниками. Характеристики матеріалів для мастильних плівок молекулярної товщини змінюються. Слід зауважити, що на сьогоднішній день ще не існує загальноприйнятих методів застосування молекулярних плівок товщиною в кілька нанометрів. В цьому випадку шорсткість поверхні має більш високу важливість, ніж товщина використовуваної в мікросистемах плівки, яка лежить в межах від декількох десятків до декількох сотень нанометрів.

Класична інженерна модель макроскопічного тертя має такі суттєві характеристики:

- Сила тертя залежить тільки від нормальної сили F_N і завжди діє в напрямку протилежному напрямку руху.
- Сила тертя не залежить від величини поверхні зіткнення.

- Сила тертя не залежить від швидкості ковзання.
- Сила тертя спокою завжди більша сили тертя руху.
- Сили тертя залежать тільки від двох матеріалів, які ковзають один по одному.

Наступна формула, названа законом Кулона – Амонтона, виражає ці співвідношення: $F_1 = \mu F_N$, де F_1 і F_N - це тангенціальна і нормальна складова сили і μ – кінетичний коефіцієнт тертя. Деякі коефіцієнти сухого тертя ковзання μ для різних пар матеріалів представлені в таблиці 8.1.

Таблиця 8.1

Коефіцієнти сухого тертя ковзання μ для різних пар матеріалів

Матеріал	μ	Матеріал	μ
алюміній / алюміній	1,0–1,4	тефлон / сталь	0,04
нікель / нікель	0,53–0,8	Al 2 O 3 / Al 2 O 3	0,40
сталь / сталь	0,42–0,57	кремній / Al 2 O 3	0,18
алмаз / алмаз	0,1–0,15	сталь / сапфір	0,15
мідь / мідь	1,2–1,5	нікель / вольфрам	0,30

Будь-яка поверхня має нерівності і поверхневу шорховатість, що призводить до того, що фактична область контакту складається з окремих контактних точок.

Так як виключно точки контакту роблять внесок в генерацію сили, напруга в точках контакту відповідно висока, і межа плинності матеріалу s_m може бути досягнута при відносно малих силах. В межах контактних точок відбуваються еластичні та пластичні деформації, за допомогою чого загальна сумарна площа контакту A стає прямо пропорційною тиску і обернено

пропорційною межі плинності, $A = \frac{P}{s_m}$. У контактних областях сили

міжатомної взаємодії діють між суміжними ділянками речовини, які протистоять дотичному напруженню s_s . В цьому випадку сили тертя переносяться тільки в область контакту. Таким чином, сила тертя стає

пропорційною фактичній площі контакту і коефіцієнт тертя знаходиться за формулою $m = \frac{S_s}{S_m}$. Ця модель дає можливість пояснити тертя Кулона, оскільки тертя стає пропорційним навантаженні і не залежить від заданої площі. Сума точок області знаходяться в реальному контакті і зростає із збільшенням навантаження через залучення більшої області в адгезійній взаємодії деформацією. Модель також пояснює, чому різні поверхні матеріалів мають різний коефіцієнт тертя – атомні поверхні мають різні міжмолекулярні зв'язки. Деякі застосування цієї ідеї можуть підтвердити висновок про те, що грубі поверхні можуть мати менше тертя, ніж дуже добре відполіровані, оскільки більша частина поверхні знаходиться в контакті. Головна роль мастила – тримати поверхні роздільно.

Знос, який супроводжує тертя, частково можна представити у вигляді такої картини. У середині точок контакту відбувається сильне навантаження на матеріал, яке призводить до пластичних деформацій з одного боку, та з іншого боку, через злипання точок контакту, до формування тріщин на поверхні контактуючого матеріалу, і в результаті до необоротних змін. Для зносу характерні наступні механізми:

- Адгезія (злипання)
- Абразивний знос (стирання)
- Ерозія через розрив оксидних покриттів
- Втома.

Внаслідок адгезії може здійснюватися перенесення речовини між точками контакту і відбуватися спотворення кристалічної решітки. Сили адгезії збільшуються для речовин, які мають більшу взаємну адгезійну подібність або хімічну розчинність, створюючи більший знос при контакті схожих поверхонь, ніж при різномірних. Ідеальним для запобігання тертя є матеріал, який чинить опір утворенню хімічних зв'язків з безліччю інших матеріалів. Ця хімічна інертність знайдена в деяких матеріалах, таких як тефлон. На атомному рівні було визначено, що сухе тертя іноді менше, ніж рідке, бо рідина надає більший

фактичний контакт між поверхнею і рідиною, що призводить до набагато більшого адгезійного тертя. Текстурування може бути насамперед використано для зменшення стікції (злипання) і тертя спокою, так як більш нерегулярні поверхні мають меншу стікцію. Текстурування також може виконувати деяку допомогу мастильним матеріалам.

8.2 Різні типи мікроактюаторів

Мета мікроактивації – це отримання сили, яка могла б виробляти механічне переміщення. Порівняно з електромагнітним перетворенням енергії, яке переважає у традиційній інженерії рухомих механізмів, в мікроактивації можна використовувати багато інших принципів, які за функціональними або ціновими характеристиками було неефективно використовувати в макротехнологіях.

Розпочнемо з фундаментального відношення: зміна накопиченої енергії системи W є причиною появи сили F :

$$F = \frac{dW}{ds} \quad (8.1)$$

Якщо запас енергії змінюється між двома станами W_1 і W_2 , ми отримуємо:

$$F = \frac{DW}{Ds} = \frac{W_1 - W_2}{Ds} \quad (8.2)$$

Якщо надалі припустити, що один з двох станів енергії дорівнює нулю, тоді одержувана сила стає прямо пропорційною накопиченій енергії: $F \sim W$.

З цієї причини, накопичена енергія та / або щільність енергії має ключове значення для оцінки працездатності будь-якого актюатора. Так як будь-яке перетворення енергії пов'язано з втратами, то і працездатність також пропорційна коефіцієнту корисної дії h , з яким одна форма енергії може бути перетворена в іншу. Потужність і працездатність системи характеризується також часом, який необхідний для отримання та витрати запасу енергії. Цей часовий інтервал може бути оцінений з тимчасової константи, яка є

характерною для конкретного принципу активації. Рішення, який принцип активації використовувати, повинно прийматися, враховуючи досяжну щільність енергії, швидкість зміни стану (тимчасова константа t) і ефективність використання енергії h . Залежно від цих величин потужність системи можна виразити таким чином:

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{dW}{ds} \frac{ds}{dt} = F \cdot V : h \frac{D}{t} \quad (8.3)$$

Слід зауважити, що запас енергії збільшується із збільшенням об'єму. Таким чином, ми маємо третю степінь величини, яка характеризує розмір λ (наприклад, m^3), а коли ми маємо справу з силою, то у нас друга степінь (m^2). Однак, так як в деяких важливих випадках досяжна щільність енергії також залежить від розміру, то ця залежність – третя степінь величини характеризує розмір – не завжди правильна. Для мікросистем це призводить до такого важливого факту: стануть привабливими для використання ті принципи перетворення енергії, які не відповідають макродіпазону. Взагалі зв'язок між силою і величиною, що характеризує розмір може бути описаний співвідношенням $F \sim l^h$. Типові значення показника степеня h для різних принципів перетворення енергії зведені у таблиці 8.2.

Таблиця 8.2

Ефект	Щільність енергії $\frac{eV \times \mu}{\hat{e} m^3 \hat{t}}$	Перерахунок сили $c \times \lambda = F : l$	Константа часу [мс]	ККД η
П'єзоелектричний	$2 \cdot 10^5$	2	\ll мех.	0,3
Електромагнітний	105	від 2 до 4	\ll мех.	$<0,01$
Електростатичний	104	2	\ll мех.	0,5
Біметалічний	106	2	<50	10 –4
Термопневматичний	$<5 \cdot 10^5$	2	10	0,1
Сплавів, запам'ятовуючих форму	$3,5 \cdot 10^5$	2	<50	0,01

Перераховані принципи відрізняються по досяжній щільності енергії, тимчасовій константі і по виходу енергії. Ці співвідношення визначають досяжну силу і щільність енергії. Типова щільність енергії для основних принципів перетворення, що використовуються сьогодні, лежить всередині діапазону $w = 10^5 - 10^6 \frac{Вт \cdot с}{м^3}$. Однак, так як швидкодія, виражена через тимчасову константу, відрізняється сильно, то щільність енергії w змінюється в ширшому діапазоні, від $10^{-6} - 10^0 \frac{Вт \cdot с}{м^3}$. Гідравлічні і пневматичні актюатори досягають найвищої щільності енергії. Можна навіть сказати, що не існує в мікродіапазоні актюаторів з більшою щільністю енергії. Придатну до використання механічну енергію отримуємо з щільності енергії і коефіцієнта корисної дії. Ефективність (ККД) залежить від принципу дії і розміру. Отже, в мікродіапазоні деякі принципи активації мають однакову працездатність.

8.3 Актюатор як компонент мікросистемної техніки

Актюатор – це механічний пристрій, який перетворює різні види енергії (електрична, хімічна, термічна) в механічну роботу, випромінювання тепла або світла [100]. На сьогодні широкого застосування зазнали термічні, термопневматичні, п'єзоелектричні, електростатичні і магнітні актюатори [101].

Термоактюатори розроблені одними з перших і знайшли своє застосування в механізмах горизонтального і вертикального повороту структур елементів МЕМС [102]. Принцип роботи термоактюаторів полягає в тепловому розширенні структурних матеріалів елементів МЕМС, внаслідок чого виконується механічна робота.

Подальший розвиток термоактюатори отримали у вигляді термопневматичних актюаторів. Даний тип актюаторів містить нагрівальний елемент і герметичну порожнину з пружною мембраною. Нагрівач являє собою напівпровідниковий резистор. Електричний струм, протікаючи через резистор, нагріває його. У результаті відбувається розширення газового середовища в герметичній області, що в свою чергу призводить до деформації мембрани.

Іншими поширеними актюаторами є п'єзоелектричні актюатори. Вони можуть бути як достатньо простими, так і складними пристроями. Це пов'язано з тим, що в основу роботи п'єзоелектричних актюаторів покладено зворотний п'єзоелектричний ефект: під дією електричного поля в п'єзоелектриках з'являється механічна деформація. Механічна робота в простих актюаторах виконується за рахунок лінійного розширення п'єзоелемента під дією електричного струму, а у складних, таких як мікродвигуни, використовуються нетривіальні, багатокomпонентні конструкції, які дають змогу перетворювати цю деформацію в обертальний або поступальний рух.

Наступним типом актюаторних елементів MEMS є електростатичні актюатори. У загальному вигляді електростатичний актюатор містить рухомий і нерухомий електроди. Принцип дії даних актюаторів полягає у виникненні електростатичної сили між рухомим і нерухомим електродами. На рухомий електрод, при подачі відхиляючої напруги, починає діяти електростатична сила, яка спричиняє його переміщення.

Магнітні актюатори є новим типом актюаторних елементів MEMS. Принцип їхньої роботи полягає в деформації полі-кремнієвих балок або мембран, з нанесеним на них шаром пермаллою (NiFe), під дією зовнішнього магнітного поля. Основний недолік магнітних актюаторів – необхідність використання зовнішніх джерел магнітного поля.

В даний час актюаторні елементи MEMS техніки широко використовуються при створенні актюаторних мікросистем, таких як мікронасоси, інтегральні мікродзеркала і мікромеханічні ключі.

8.4 Температурні актюатори

В макросвіті процеси теплопередачі є досить інерційними, однак, завдяки малим розмірам, робоча частота для мікросистем з термоелементами сягає сотні герц. Основною перевагою термоелементів є їх конструктивна і технологічна простота, створювана актюатором сила у порівнянні з іншими типами активації елементів МСТ і відсутність рухомих частин для більшості

давачів з термоелементами, дає змогу значно підвищити їх граничні навантаження.

В даний час актюаторні елементи мікросистемної техніки широко використовуються при створенні актюаторних мікросистем, таких як мікропомпи, інтегральні мікродзеркала і мікромеханічні ключі [101].

Мікроактюатор - це пристрій, який перетворює різні види енергії (електрична, хімічна або термічна) в механічну роботу (керований рух), випромінювання тепла і світла. Мікроактюатори мають розміри від декількох квадратних мікрометрів до одного квадратного сантиметра. Діапазон використання мікроактюаторів надзвичайно широкий та різноманітний, і він з кожним роком зростає. Мікропристрої цього типу використовують в робототехніці, керуванні космічних апаратів, біомедицині, дозиметрії, вимірних пристроях, в технологіях з галузі розваг, автомобілебудуванні, в побутових приладах, тощо.

Основні принципи перетворення енергії в актюаторах ґрунтуються на мікрозбудженні (генерація сил, які продукують механічний рух).

8.5 Теплові актюатори

Теплові виконуючі мікропристрої (теплові актюатори) використовують як лінійне (або об'ємне) розширення рідини (чи газу), так і деформацію форми пластин внаслідок біметалевого ефекту, що має місце при зміні температури. В даний час розроблені термічні, термопневматичні, п'єзоелектричні, електростатичні та магнітні актюатори [103-107].

Теплові актюатори можуть створювати відносно великі сили, але немає конструкції, яка б дозволяла це зробити з позиції ефективного використання енергії. Результат поліпшується при збільшенні різниці між коефіцієнтами теплового розширення та при великій зміні температури, однак досягнуте ККД все одно залишається відносно малим. Газу і рідини мають набагато більший коефіцієнт теплового розширення, ніж тверді тіла, і це можна використовувати в термопневматичних мікроактюаторах.

Термоактюатори були розроблені одними з перших і використовувалися в давчачах вимірювання та визначення потоків рідини і газів у якості нагрівальних елементів [106, 108].

Основне застосування термоактюатори знайшли в механізмах горизонтального і вертикального повороту структур елементів МСТ [108, 109].

8.6 Принцип роботи термоактюатора

Принцип роботи термоактюатора заснований на тепловому розширенні структурних матеріалів. Якщо при однорідному нагріванні температура твердого тіла зростає на ΔT , то тіло відчуває деформацію, яка описується наступним виразом (рис. 8.2) [108]:

$$e = a + \Delta T \quad (8.4)$$

де a – коефіцієнт теплового розширення; ΔT - температура.



Рис. 8.1. Перетворення вхідної енергії в роботу актюатора

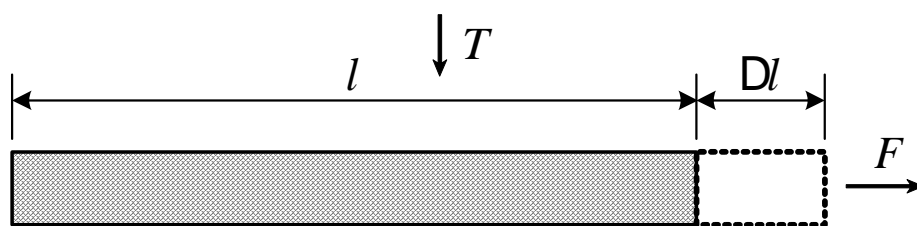


Рис. 8.2 Деформація термоактюатора при нагріванні

Деформацією твердого тіла називається зміна його розмірів і об'єму:

$$e = \frac{\Delta l}{l}, \quad (8.5)$$

де Δl – абсолютне видовження; l - початковий розмір тіла.

Підставивши (8.5) в (8.4), отримаємо вираз, що дозволяє визначати абсолютне видовження термоактюатора:

$$\Delta l = l \times \alpha \times \Delta T. \quad (8.6)$$

Напруженням називається фізична величина, що дорівнює пружній силі, що припадає на одиницю площі перерізу тіла:

$$s = \frac{F_m}{S}, \quad (8.7)$$

де F - сила, S - площа перерізу, розташована перпендикулярно нормалі сили F .

Відповідно до закону Гука, сила розтягування або стиснення, прикладена до тіла у формі стрижня, викликає зміну довжини тіла Δl . Величина Δl залежить від розмірів стрижня, матеріалу та величини прикладеної сили:

$$s = E \times \epsilon, \quad (8.8)$$

де E - модуль Юнга.

Підставивши (8.4) і (8.7) в (8.8), отримаємо вираз для визначення сили, створюваної термоактюатором [108]:

$$F_m = w \times h \times E \times \alpha \times \Delta T, \quad (8.9)$$

де w - ширина; h - товщина.

Теплова деформація залежить від кристалографічної орієнтації структурного матеріалу. Таким чином, для анізотропних середовищ, вираз (8.4) набуде вигляду:

$$e_{ij} = a_{ij} \times \Delta T, \quad (8.10)$$

Термоактюаторні елементи МСТ виготовляються за технологією поверхневої мікрообробки і MUMPs-технології.

8.6.1 Переваги теплових мікроактюаторів

Проста конструкція, робочими елементами є резистор нагріву і для використання біметалічного ефекту плівкова структура.

В якості активних елементів застосовуються майже будь-які матеріали, які крім різних коефіцієнтів розширення повинні мати достатню міцність. Зазвичай в якості нагрівача використовуються резистори звивистої форми, які

можна легко виготовити з використанням тонко– або товстоплівкової технології.

8.6.2 Недоліки мікроактюаторів

В даний час нагрівальний елемент споживає дуже багато енергії для того, щоб тепловий актюатор зміг розвинути відносно велику силу, тобто у теплових актюаторів невисокий ККД.

Нагрівальний елемент необхідно охолоджувати, щоб повернути актюатор в початкове положення, а значить тепло повинно бути розсіяно в навколишнє середовище. Це природно займає деяку кількість часу і обмежує швидкодію.

8.7 Електроактюатори

Електро-тепловим мікроактюаторам [110, 111], що працюють за рахунок теплового розширення, викликаного джоулевим нагрівом на сьогоднішній день приділяється багато уваги [112-116]. Ці пристрої можуть мати мікророзміри і виготовляються найчастіше з полікремнію, але теоретично можуть бути виготовлені з будь-якого провідного матеріалу.

Електроактюатори в основному використовуються для позиціонування мікродзеркал та переміщення мікро пристроїв. Для збільшення ефективної сили можна об'єднати декілька актюаторів. При проектуванні електроактюаторів перед проектантом ставиться задача спроектувати конструкцію, яка б забезпечила необхідне переміщення при заданій напрузі нагріву.

Електроактюатор, який використовується в мікроелектромеханічних системах (MEMS) працює на основі теплового розширення між тонкою балкою і пластиною. Різниця потенціалів, що прикладається до електричних контактних майданчиків індукує протікання між ними струму. Опір, який чинить полі кремній струму, що протікає у актюаторі зумовлює створення джоулевого нагріву (Joule heating). Опір в тонкій балці більший ніж у пластині, таким чином, тонка балка нагрівається більше, ніж пластина, що призводить до вигину вістря у сторону пластини. Максимальна деформація відбувається на

кінці приводу. Вартість відхилення вістря є функцією прямо пропорційною до різниці потенціалів. Таким чином, вартість відхилення вістря може бути точно відкалібрована залежно від прикладеної напруги. Конструкція типового електроактюатора з прикладеною напругою та без представлена на рис. 8.3. Як бачимо з рисунку при нагріванні протіканні струму через актюатор тонка балка нагрівається швидше і до більшої температури у зв'язку з чим відбувається відхилення вістря в сторону пластини.

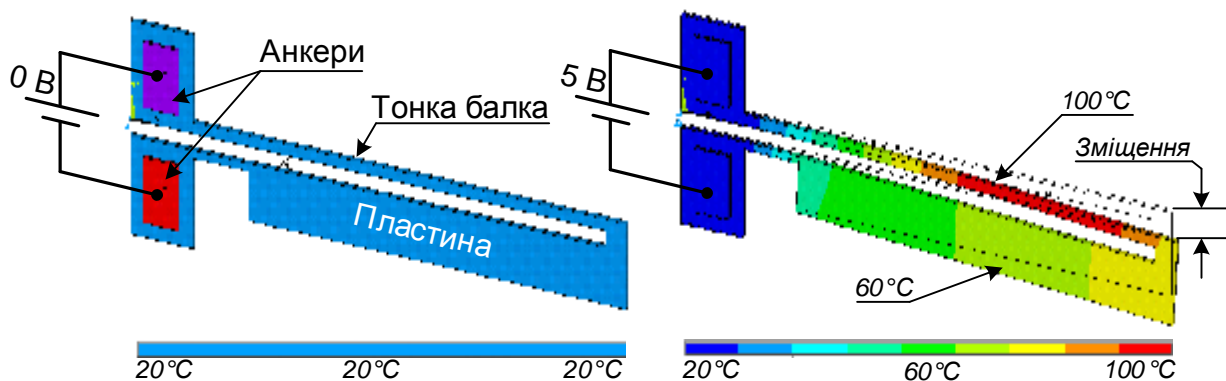


Рис. 8.3 Конструкція електроактюатора з прикладеною напругою та без

8.8 Термопневматичні актюатори

Подальший розвиток термоактюатори отримали у вигляді термопневматичних актюаторів. Даний тип актюаторів містить нагрівальний елемент і герметичну порожнину з пружною мембраною (рис. 8.4).

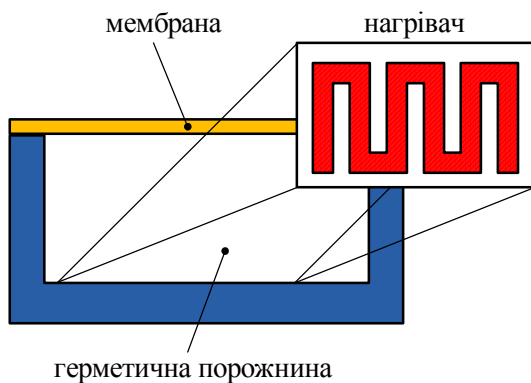


Рис. 8.4. Термопневматичний актюатор

Нагрівач є напівпровідниковий резистор меандрового типу. Електричний струм, протікаючи через резистор, нагріває його. Кількість теплоти, що виділяється в нагрівачі, визначається наступним чином [117]:

$$Q = \frac{U^2 t}{R}, \quad (8.11)$$

де U - напруга на нагрівачі; t - час проходження струму через нагрівач; R - опір нагрівача.

У результаті відбувається розширення газового середовища в герметичній області, що в свою чергу призводить до деформації мембрани [117]. Так як обсяг герметичної порожнини залишається постійним, то зміна тиску в порожнині описується наступним виразом [117]:

$$p_T = p_0 \times b \times T \quad (8.12)$$

де p_0 - тиск газу до нагрівання, b - коефіцієнт об'ємного розширення; T - температура нагрівання.

Коефіцієнт об'ємного розширення практично однаковий у всіх газів і з хорошим наближенням рівний коефіцієнту об'ємного розширення ідеального газу: $b = 0,003661 \text{ K}^{-1}$ [117].

Сила, створювана термопневматичним актюатором визначається з наступної залежності [117]:

$$F_{mn} = S \times p_0 \times b \times T, \quad (8.13)$$

де S - площа мембрани.

Термопневматичні актюатори виготовляються за технологією об'ємної мікрообробки і LIGA-технології.

8.9 П'єзоелектричні актюатори

Простішим варіантом термопневматичного актюатора є п'єзоелектричний актюатор. Даний тип актюаторів містить п'єзоелектричний диск і пружну мембрану (рис. 8.5) [118].

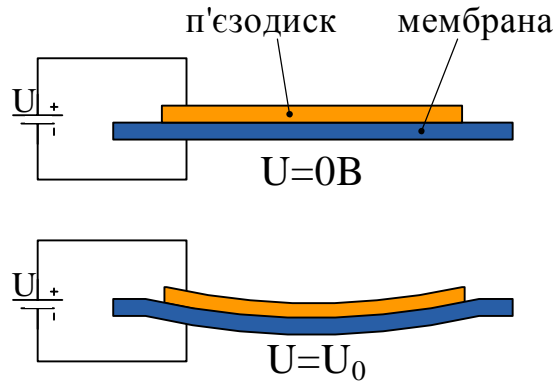


Рис. 8.5 Структура п'єзоелектричного актюатора

В основу роботи п'єзоелектричних актюаторів покладено зворотний п'єзоелектричний ефект: під дією електричного поля в п'єзо-електродах з'являється механічна деформація.

При зворотному п'єзоелектричному ефекті електричне поле і деформацію актюатора пов'язують ті ж п'єзоелектричні коефіцієнти, які пов'язують напругу і поляризацію при прямому ефекті [118]:

$$e_{ij} = p_{ij} \times E_i, \quad (8.14)$$

де e_{ij} – тензор відносної деформації; p_{ij} – тензор п'єзо коефіцієнтів матеріалів; E_i – напруженість електричного поля.

Як матеріали п'єзо електриків використовуються кварц, $LiTaO_3$ і ZnO [118].

Даний тип актюаторних елементів виготовляється з використанням технології об'ємної мікрообробки і LIGA-технології.

8.10 Електростатичні актюатори

Наступним типом актюаторних елементів МСТ є електростатичні актюатори. У загальному вигляді електростатичний актюатор містить рухомий і нерухомий електроди (рис.3.5) [104,105,108, 119,120].

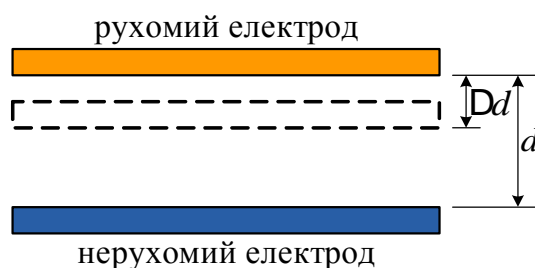


Рис. 8.6. Електростатичний актюатор

В якості рухомого електрода виступають консольні балки і мембрани.

Принцип дії даних актюаторів заснований на виникненні електростатичної сили між рухомим і нерухомим електродами.

При подачі відхиляючої напруги на нерухомий електрод відносно рухомого, на останній починає діяти електростатична сила, що визначається виразом [121]:

$$dF_{en} = E \times dq, \quad (8.15)$$

де – E напруженість електричного поля; q – заряд електрона.

Оскільки [121]

$$dq = C \times dU; \quad (8.16)$$

$$E = \frac{U}{d}, \quad (8.17)$$

вираз (8.15) прийме вигляд [121]:

$$dF_{en} = \frac{C}{d} \times U \times dU, \quad (8.18)$$

тоді електростатична сила, що діє на рухомий електрод визначатиметься з наступного виразу [121]:

$$dF_{en} = \frac{C}{d} \times U \times dU = \frac{C \times U^2}{2 \times d}, \quad (8.19)$$

де U – відхиляюча напруга; d - відстань між рухомими і нерухомими електродами; C – ємність, створювана рухомими і нерухомими електродами, яка визначається із наступної залежності:

$$C = \frac{\epsilon \times \epsilon_0 \times S}{d}, \quad (8.20)$$

де ϵ – відносна діелектрична проникність повітряного зазору; ϵ_0 – електрична постійна (8.85×10^{-12} Ф/м); S – площа рухомого електрода.

Підставивши (8.20) в (8.19), отримаємо вираз для визначення сили, що діє на рухомий електрод [121]:

$$F_{el} = \frac{1}{2} \frac{\epsilon \times \epsilon_0 \times S}{d^2} U^2, \quad (8.21)$$

При подачі відхиляючої напруги U між рухомим і нерухомим електродами виникає електростатична взаємодія і рухомий електрод притягується до нерухомого. У міру відхилення рухомого електрода від початкового положення відстань між електродами d буде зменшуватися, що, відповідно до виразу (8.21), призводить до збільшення електростатичної сили F_{el} . Отже, при розрахунку електростатичної сили, що діє на рухомий електрод відносно нерухомого, необхідно враховувати вже виконане відхилення [121]:

$$F_{el} = \frac{1}{2} \frac{\epsilon \times \epsilon_0 \times S}{(d - \Delta d)^2} U^2, \quad (8.22)$$

При виготовленні електростатичних актюаторів можуть використовуватися технології поверхневої та об'ємної мікрообробки і MUMPs-технологія. У електростатичних актюаторів переміщення є невеликі, напруга є великою, а сила малою. Вони є поширеними у MEMS, адже зазвичай мають лінійну передавальну характеристику та є точними.

8.11 Електромагнітні актюатори

Магнітні актюатори є новим типом актюаторних елементів МСТ. Електромагнітні актюатори базуються на одній з двох сил:

- *електрична сила* (притягання між протилежно зарядженими зарядами або відштовхування однакових зарядів);
- *магнітна сила* (притягання між провідниками, по яких тече струм в одному напрямку, або відштовхування між провідниками, по яких тече струм в різних напрямках).

Принцип їх роботи заснований на деформації полі-кремнієвих балок або мембран, з нанесеним на них шаром пермалою (NiFe), під дією зовнішнього магнітного поля (рис. 8.7).

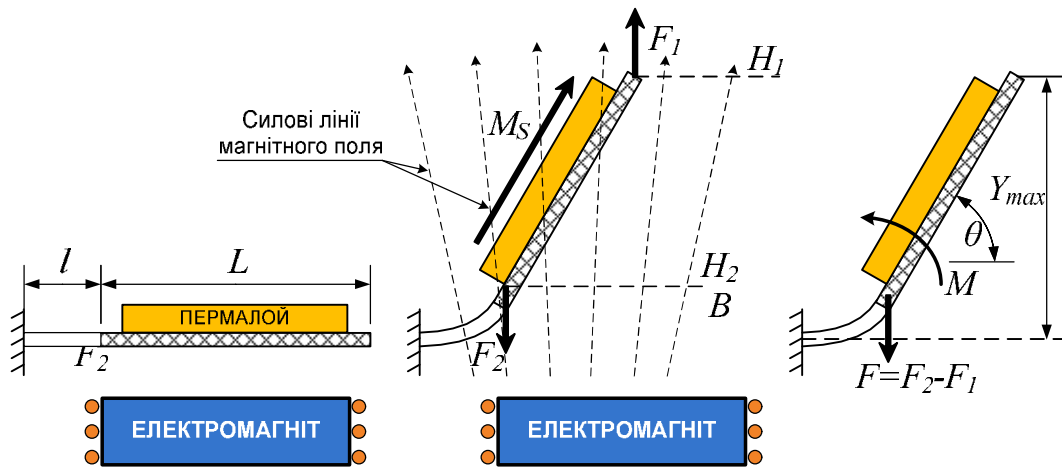


Рис. 8.7. Магнітний актюатор

Коли зовнішнє магнітне поле дорівнює нулю структурна пластина паралельна площині підкладки. Коли зовнішнє магнітне поле $H_{зовн}$, прикладено по нормалі до площини структурної пластини, всередині пермалоевої ділянки виникає вектор намагніченості M і він згодом взаємодіє з $H_{зовн}$. Взаємодія створює обертаючий момент ($M_{маг}$) і невелику силу, що впливає на вільний кінець консольної балки, при цьому змушуючи її згинатися.

При дії зовнішнього магніту, пермалоевий матеріал розглядається як матеріал, що має постійний плоско паралельний вектор намагніченості з величиною рівній намагніченості насичення $M_{нас}$. При переміщенні в зовнішнє магнітне поле генерується дві компоненти сили. Величина обох, як F_1 (яка діє на верхню грань), так і F_2 (яка діє на нижню грань) розраховується наступним чином:

$$F_1 = M_{нас} \cdot \mu_0 \cdot T \cdot H_1;$$

$$F_2 = M_{нас} \cdot \mu_0 \cdot T \cdot H_2,$$

де H_1 і H_2 - напруженість магнітного поля на верхній і нижній межі пластини (у поточній конфігурації $H_1 < H_2$). Величина H_1 і H_2 лінійно залежить від відповідної відстані до поверхні електромагнітного джерела. Пластина разом з пермалоевою ділянкою розглядається як тверде тіло, так як вона суттєво товстіша за консольну балку. Ґрунтуючись на цьому припущенні, систему сил, спрощують, переміщаючи F_1 до сполучення із F_2 . Результатом є обертовий

момент, що діє проти годинникової стрілки й зосереджена сила, що впливає на нижню грань структурної пластини. Цей результат можна представити як:

$$M_{маг} = F_1' \cdot L' \cdot \cos\varphi$$

$$F = F_2 - F_1,$$

де φ - кут між напрямом напруженості магнітного поля і площиною актюатора; L_{NiFe} – довжина шару NiFe.

Обертний момент завжди прагне зменшити повну енергію в системі актюатора, вирівнюванням вектора намагніченості з силовими лініями зовнішнього магнітного поля.

Прикладом магнітного мікроактюатора іншої конструкції може служити лінійний мотор рис. 8.8. Магніт, розташований в каналі, рухається вперед–назад при перемиканні струму в обмотках, то з одного, то з іншого боку каналу.

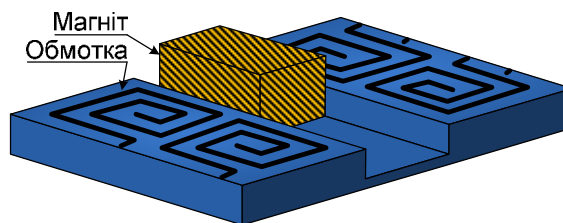


Рис. 8.8 Магнітний мікроактюатор

Загальна проблема, пов'язана з магнітним актюатором, полягає в тому, що обмотки двовимірні (тривимірні обмотки дуже важко виготовити на мікрорівні). Також обмежений вибір магнітного матеріалу – вибираються тільки ті матеріали, які легко обробити на мікрорівні, і виходить, що не завжди матеріал магніту вибирається оптимально. Багато в чому через це магнітні актюатори споживають велику кількість енергії і розсіюють багато тепла. Слід зазначити, що для виготовлення мікроскопічних компонентів (розміром до декількох міліметрів) електростатичні пристрої зазвичай вигідніше магнітних, однак при більших розмірах магнітні пристрої перевершують електростатичні.

8.12 Ємнісні актюатори

Принцип роботи ємнісного актюатора полягає у тому, що до двох площин конденсатора прикладають протилежні заряди, відповідно ці заряди притягують площини одна до одної згідно закону Колумба.

Механічний рух площин – актюація. Сила з якою притягуються дві пластини конденсатора визначається з наступної залежності:

$$F = \frac{CV^2}{d} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r SV^2}{d^2}. \quad (8.23)$$

З даної залежності випливає, що створена сила є пропорційною до ємності, відстані між площинами та потенціалу між площинами. Для дуже малих ϵ – сила є малою.

На Рис. 3.13 показано конструкцію та схему електростатичного актюатора (електростатичний динамік), принцип дії якого полягає у тому, що верхня пластина притягується або відштовхується від нижньої зафіксованої пластини. Такий рух можна використати для позиціонування або для відтворення звуку.

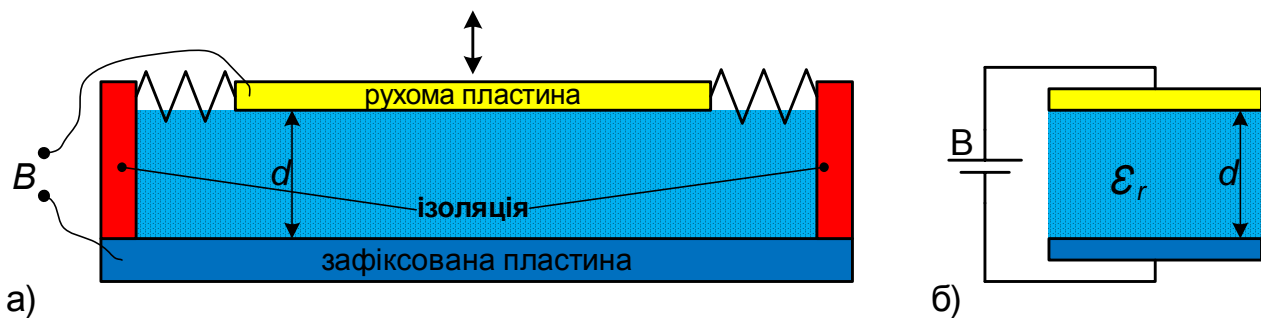


Рис. 8.9 Конструкція та схема електростатичного актюатора

8.13 Біметалеві термоактюатори

Розглянемо біметалевий актюатор, конструкція якого зображена на рис. 8.10. Вона включає двошарову балку, один шар якої виготовлений з діелектрика (кремній), а інший шар з металу (наприклад алюміній). Коефіцієнти теплового розширення кремнію та алюмінію різні. При нагріванні, один з матеріалів розширюється швидше, ніж інший, і балка, відповідно, вигинається. Вигин завжди відбувається в сторону матеріалу, який має менший коефіцієнт теплового розширення. Нагрівання актюатора відбувається за

рахунок прикладання електричної напруги, можливе гарячим повітрям чи рідиною.

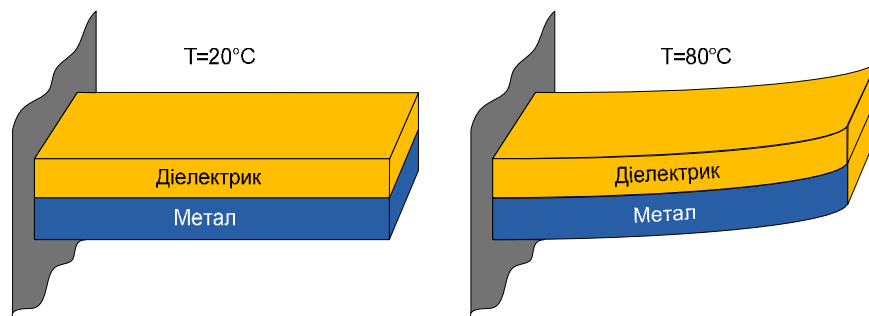


Рис. 8.10 Конструкція біметалічного актюатора

Переміщення вільного кінця затисненої біметалічної пластини на довжині L в залежності від її температури може бути визначене із наступної залежності [122]:

$$B = R \frac{e}{e} - \cos \frac{\pi}{2} \frac{L}{\rho} \frac{\Delta T}{\Delta T} \quad (8.24)$$

де величина R визначається із залежності [123]:

$$R = \frac{E_1^2 h_1^4 + 4E_1 E_2 h_1^3 h_2 + 6E_1 E_2 h_1^2 h_2^2 + 4E_1 E_2 h_2^3 h_1 + E_2^2 h_2^4}{6E_1 E_2 (h_1 + h_2) h_1 h_2 e}, \quad (8.25)$$

де – E_1 – модуль Юнга першого матеріалу;

E_2 – модуль Юнга другого матеріалу;

h_1 – товщина першого матеріалу;

h_2 – товщина другого матеріалу;

e – різниця деформацій, обчислюється за наступною формулою:

$$e = (a_1 - a_2) \Delta T,$$

де – a_1 коефіцієнт теплового розширення першого матеріалу;

a_2 коефіцієнт теплового розширення другого матеріалу;

ΔT приріст температури відносно початкової, при якій балка не має вигину.

8.14 Математична модель електроактюатора

Наведемо приклад розрахунку вихідних характеристик двошарового термоактюатора.

Теплоємність визначається з наступного виразу:

$$C_u = C_{uSi} + C_{uAl}. \quad (8.26)$$



Рис. 8.11 Конструкція двошарового термоактюатора

Наприклад, знаючи швидкість перемикання можна визначити тепловий опір, який визначається з виразу:

$$R_{\eta} = \frac{t}{C_u}. \quad (8.27)$$

Припущення про постійну температуру консолі може бути перевірене за допомогою довжини розсіювання тепла:

$$d = 2 \sqrt{\frac{l}{c_p r}} t. \quad (8.28)$$

Для кремнію довжина розсіювання тепла рівна 1.8 мм, а для алюмінію це значення рівне 1.95 мм. У порівнянні з всіма геометричними розмірами довжина розсіювання тепла дуже велика, отже, гіпотеза про постійну температуру консолі виправдана.

Електрична потужність нагрівання визначається з виразу:

$$DT(t=t) = P_{el} \cdot R_{\eta} \cdot (1 - e^{-1}). \quad (8.29)$$

Максимально можливе збільшення температури для потужності нагріву розраховується по формулі:

$$DT_{\max} = P_{el} \cdot R_{\eta}. \quad (8.30)$$

Теплове розширення балки (без сили стиснення пружини) визначається з наступного виразу:

$$y_{\text{менл}} = \frac{1}{2} \frac{a}{s} \cdot D T \cdot l^2. \quad (8.31)$$

Для досягнення максимальної ефективності теплового пристрою жорсткість пружини s вибирається таким чином, щоб сила протидії зменшувала прогин вдвічі.

$$y_{\text{мех}} = \frac{y_{\text{менл}}}{2} = \frac{F}{3EI} l^3 = \frac{c y}{3EI} l^3. \quad (8.32)$$

Механічна робота, що здійснює механічне переміщення отримується з виразу:

$$W_{\text{мех}} = \frac{c}{2} y^2. \quad (8.33)$$

Електрична енергія, яка подається для виконання цієї механічної роботи визначається з виразу:

$$W_{\text{ел}} = P_{\text{ел}} \cdot t. \quad (8.34)$$

Ефективність пристрою рівна:

$$h = \frac{W_{\text{мех}}}{W_{\text{ел}}}. \quad (8.35)$$

Математична модель термоактюатора, що наведена вище має ряд особливостей. До її переваг можна віднести простоту, що дає змогу провести швидкий аналіз вихідних характеристик цього пристрою. З іншого боку ця перевага досягається за рахунок погіршення точності розрахованих вихідних параметрів, що є її недоліком.

Набагато вищою точністю вихідних даних характеризуються математичні моделі, які враховують нелінійні та нестационарні процеси в таких пристроях і описуються системами рівнянь в часткових похідних. Для розв'язання яких, як правило, використовують чисельні методи (метод скінчених різниць, метод скінчених елементів та інші).

8.15 Математична модель мікроактюатора на базі рівнянь в часткових похідних

Розглянемо актюатор, який складається з двошарової пластини довжиною l , ширини w та висоти $h = S_{Si} + S_{Al}$. На верхній площині актюатора розміщений нагрівальний елемент (див. рис. 8.12).

Принцип дії такого пристрою є наступний. При нагріванні конструкції актюатора нагрівальним елементом пристрій виконує переміщення в напрямку осі y за рахунок різних коефіцієнтів теплового розширення, оскільки один матеріал розширюється швидше ніж інший.

Математична модель для визначення розподілу температури в термоактюаторі включає систему рівнянь теплопровідності:

$$r_{Si} c_{Si} \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(l_{Si} \text{grad} T_{Si}), \text{ при } h \hat{=} S_{Si}, \quad (8.36)$$

$$r_{Al} c_{Al} \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(l_{Al} \text{grad} T_{Al}), \text{ при } h \hat{=} S_{Al}, \quad (8.37)$$

де r_{Si} і r_{Al} – густина Si і Al, відповідно; c_{Si} і c_{Al} – коефіцієнти теплоємності Si та Al; l_{Si} і l_{Al} – коефіцієнти теплопровідності Si та Al; T_{Si} і T_{Al} – температура пластин кремнію та алюмінію.



Рис. 8.12 Конструкція двошарового термоактюатора

З початковою умовою $T_{Si} = T_{Al} = T_0$, при $t = t_0$, та граничними умовами:

на границі поділу двох середовищ:

$$T_{Al} = T_{Si} \text{ та } \int_{Si} \frac{\partial T_{Si}}{\partial n} = \int_{Al} \frac{\partial T_{Al}}{\partial n}; \quad (8.38)$$

на площині ABCD:

$$T_{Si} = T^*; \quad (8.39)$$

на площині ADEG, DCFE, BHDC та GHFE:

$$\frac{\partial T}{\partial n} + a(T - T_{ST}) = 0; \quad (8.40)$$

на площині ABHG:

$$\frac{\partial T}{\partial n} + a_{Al}(T - T_0) = 0, \text{ для } h \hat{=} S_{Al}; \quad \frac{\partial T}{\partial n} = 0, \text{ для } h \hat{=} S_{Si}, \quad (8.41)$$

де T^* – температура поверхні термоактюатора, яка визначається нагрівальним елементом; a_{Al} , a_{Si} – коефіцієнт теплообміну з навколишнім середовищем для Si та Al; T_{St} – температура навколишнього середовища; T_0 – початковий розподіл температури в Si/Al пластині.

При моделюванні теплових деформацій та напружень в пластинах термоактюатора, використана інформація про те, що термодформації прямопропорційні зміні температур ΔT , тобто:

$$e_T = a\Delta T, \quad (8.42)$$

де e_T – термодформація, a – коефіцієнт теплового розширення матеріалу, ΔT – перепад температур.

Співвідношення, які зв'язують напруження з деформаціями при врахуванні теплових впливів є наступні:

$$s = D(e - e_T) = D(e - a\Delta T), \quad (8.43)$$

де e – деформації, які зумовлені силовим впливом, $s_T = De_T$ – температурні напруження, а D – матриця напруження.

У випадку наявності в конструкції залишкових напружень, попередній вираз прийме наступну форму:

$$s_T = s_0 + D(e - e_0 - e_T), \quad (8.44)$$

де s_0 – початкові напруження в конструкції термоактюатора, а e_0 – початкові деформації.

Для розв’язання тривимірної задачі використано метод скінчених елементів.

Переміщення будь-якої точки термоактюатора в декартовій системі координат записується в наступному вигляді:

$$\{d\} = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix}, \quad (8.45)$$

де u, v, w – переміщення в напрямку осі x, y та z , відповідно.

У випадку покриття тривимірної області елементами у формі тетраедра апроксимаційна формула має такий вигляд $u = a + bx + cy + dz$ і переміщення цього елемента визначається дванадцятьма переміщеннями його вузлів:

$$\{d\}^e = \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_m \\ d_p \end{Bmatrix}, \quad (8.46)$$

де $\{d_i\} = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{Bmatrix}$ і т.д.

Матриця деформацій враховує шість компонент деформації:

$$\{e\} = \begin{Bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \\ g_{xy} \\ g_{yz} \\ g_{zx} \end{Bmatrix} = [B]\{d\}^e = \begin{bmatrix} B_1 & B_2 & B_m & B_p \end{bmatrix} \{d\}^e, \quad (8.47)$$

де $[B]$ – матриця деформацій, V – об’єм тетраедра,

$$[B_i] = \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} b_i & 0 & 0 \\ 0 & c_i & 0 \\ 0 & 0 & d_i \\ c_i & b_i & 0 \\ 0 & d_i & c_i \\ d_i & 0 & b_i \end{bmatrix}, \{e_T\} = \begin{bmatrix} aT \\ aT \\ aT \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (8.48)$$

де a_i, b_i, c_i, d_i – значення коефіцієнтів для елемента e в i -му вузлі.

$$[D] = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1 & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & \nu & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix}$$

де E – модуль пружності матеріалу, а ν – коефіцієнт Пуассона матеріалу.

Матриця жорсткості $[k]$ та матриця вузлових сил $\{F\}_{e_0}$ визначається з виразу:

$$[k] = [B]^T [D] [B] V, \{F\}_{e_0} = - [B]^T [D] \{e_0\} V. \quad (8.49)$$

В кінцевому випадку для стаціонарної задачі отримаємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь, для розв'язку якої використовуються прямі або ітераційні методи.

8.16 Мікротурбіни

Ідея створення мініатюрної турбіни виникла давно. Поступово втілюючи її в перші експериментальні зразки, дослідники одночасно вели пошук області застосування подібних пристроїв. Спочатку здалося цікавим зайнятися

проектуванням мініатюрних розвідувальних літаків для американської армії, але потім стало ясно: потужні і компактні джерела живлення для мобільної техніки є актуальнішою задачею.



Рис. 8.13 Ротор мікротурбіни діаметром 4 мм [124]



Рис. 8.14 Мікротурбіна [124]

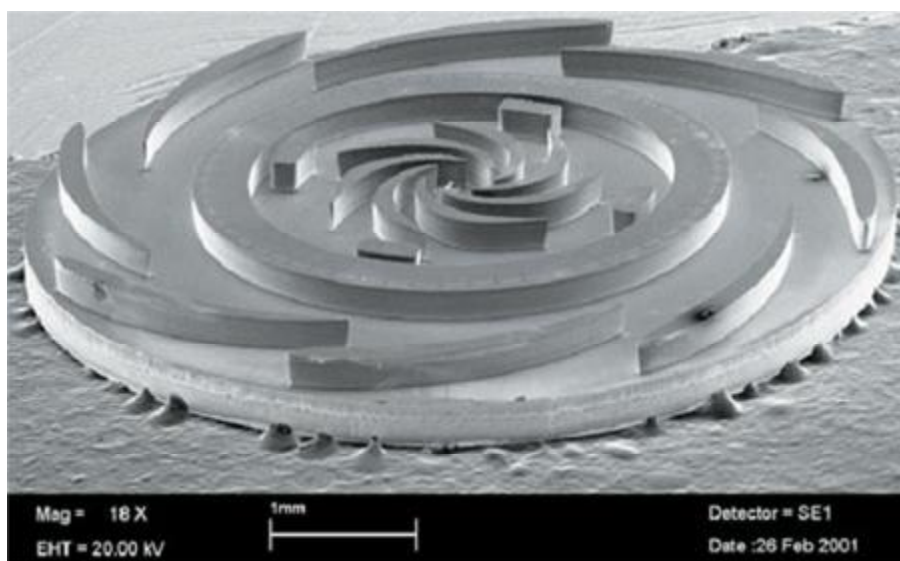


Рис. 8.15 Ротор мікротурбіни [124]

Турбіна на чіпі зможе працювати близько дев'яти або десяти годин на обсязі дизельного палива, який вміщується в баку розміром з батарейку формфактору D, і виробляти при цьому до 20 ват електроенергії. Звичайне дизельне паливо при спалюванні виділяє в кілька десятків більшу (в перерахунку на одиницю об'єму) енергію, ніж літій-іонний акумулятор: 13200 Вт • год /кг проти 1400 Вт • год / кг.

Для початку згадаємо основні елементи конструкції звичайної турбіни. Вона складається з компресора, камери згоряння і ротора. Компресор і ротор розташовуються на загальній осі і, грубо кажучи, являють собою вентилятори. Повітря нагнітається всередину турбіни через впускний отвір за допомогою обертових лопатей компресора. Потім стислий повітряний потік потрапляє в камеру згоряння, де розпорошується і підпалюється паливо, наприклад гас. Утворюється вихлоп, який за рахунок особливостей конструкції камери згоряння направляється в сторону лопастей ротора.

З точки зору фізичних процесів перешкод для мініатюризації немає - закони термодинаміки інваріантні щодо розмірів. Цього не можна сказати про гідродинаміку та механіку. В'язкість рідини і турбулентність починають відігравати істотну роль в мікроскопічних системах. Межі розмірів для турбіни визначаються можливостями обраної технології виробництва.

Деталі мікротурбіни виготовляються за допомогою фотолітографії на окремих кремнієвих пластинах. Потім їх прецизійно стикують і "склеюють" під впливом високих температур. Площа одного пристрою становить близько 1-2 см² і на одній стандартній пластині діаметром 200-300 мм одночасно формується велика кількість однакових компонент. На рис. 8.13-рис. 8.15 показано взірець турбіни з ротором діаметром 4 мм і довжиною лопатей 200 мікрон. Готовий пристрій складається з п'яти-шести кремнієвих шарів. Щоб звільнити ротор, його "витравлюють" з обох боків: спочатку пластину обробляють окремо, а потім приклеюють її лицьовою стороною до загального пакету і вже з іншого боку дотравлюють перемички.

Звичайно ж, на папері все виглядає просто, на ділі ж творці мікротурбін зіткнулися з безліччю проблем. Зокрема, виготовлення заглиблення в тисячі мікрон за допомогою літографічних технологій – завдання дуже непросте. З одного боку, навіть дуже "швидкісні" методи травлення не в змозі забезпечити продуктивність вище 1 мікрона в хвилину, а з іншого – вони мають досить низьку точність.

Щоб отримати плавний струмінь повітря, необхідно заокруглити всі поверхні і внутрішні порожнини турбіни. Відхилення від оптимальної форми виливається в зниження і так невисокого ККД. Так, якщо впускний отвір має діаметр 2 мм, відхилення від правильного кута кривизни призводить до втрати 5% ефективності компресора. На жаль, у вертикальному напрямку (по відношенню до площини пластини) стандартним літографічним способом неможливо відтворити криволінійні поверхні. Тому доводиться йти на компроміс, шукати нові рішення, наприклад вводити ступінчастість. Оригінальний вихід з цієї ситуації був знайдений завдяки напівтоновій літографії.

З іншого ж боку, літографічна технологія дозволила реалізувати цікаву схему подачі палива: через 90 абсолютно однакових отворів паливо впорскують у безпосередній близькості від впускного повітряного каналу. Таким чином без додаткових систем виходить досить однорідна повітряно-паливна суміш. Підпал здійснюється нагрівальним елементом. Вибираючи джерело енергії, дослідники зупинилися на водні, який найбільше підходить для експериментальної установки. Цей газ відрізняється енергоємністю, високою швидкістю згоряння (у п'ять разів більшою, ніж метан і пропан) і широким діапазоном умов для займання.

Щоб ротори турбіни і компресора змогли обертатися, їх необхідно забезпечити осями і підшипниками. На жаль, можливість застосування магнітного кріплення відпала внаслідок несумісності сучасних магнітних матеріалів з високотемпературним режимом роботи мікротурбіни і відсутності промислово розвинених технологій для їх обробки в мікромасштабах. В

результаті була створена комбінована система з гідростатичного і гідродинамічних підшипників ковзання. У статичному тиск нагнітається зовнішнім джерелом, і воно залишається стабільним, а в динамічному - змінюється разом зі швидкістю обертання ротора турбіни (нею і нагнітається).

Відцентрова сила, яка прагне зрушити ротор в напрямку, перпендикулярному до його осі, контролюється за рахунок гідродинамічного циліндричного підшипника ковзання. Тиск між краєм камери і ротором створюється за рахунок його обертання і росте разом з оборотами турбіни. У напрямку, паралельному осі, ротор утримується на місці за допомогою двох циліндричних виступів, які мають як спіральні борозни (гідродинамічний підшипник), так і ряд мініатюрних сопел-отворів діаметром 12 мікрон кожне (гідростатичних підшипників). За результатами розрахунків, за наявності 700-мікронного виступу-підстави зі спіральними канавами глибиною 1,5 мікрона ротор повинен "здійнятися" над ним вже при 80000 обертів на хвилину.

Проблематичним виявилось тестування мікроскопічних пристроїв. Фактично необхідно створювати не менш складну, ніж турбіна, апаратуру для контролю за потоками всередині неї. Для відпрацювання технології вчені виготовили пробний компресор, який в 75 разів перевершує за своїми розмірами мікротурбіни (хоча у макросвіті зазвичай все відбувається навпаки, і теорію відпрацьовують на зменшеному в кілька разів прототипі).

Цікаво, що мікронний масштаб турбіни дозволяє домогтися неможливої для "макротехнологій" питомої потужності. Відношення потужності до маси мікротурбіни може досягати 100:1. Причиною цього є відмінність у залежностях обсягу (і, відповідно, маси) і площі перетину від лінійних розмірів. Якщо перша - кубічна, то друга квадратична.

Ефективність мініатюрної камери згоряння наблизилася до 100%, що відповідає значенням, отриманим в повно-розмірних системах. Температура вихлопу сягає 2070 °С. Проводилися тести з етиленом і пропаном, які показали в порівнянні з воднем зниження ККД до 90% і 60% відповідно. Для таких видів палива потрібні камери згоряння більшого об'єму, ніж описані вище. Для

підвищення ефективності камери зсередини покривають платинонікелевою фольгою - каталізатором. Це в кілька разів збільшило тепловіддачу при використанні пропану (порівняно зі звичайною конфігурацією).

Для нормальної роботи турбіни потрібні керуючі схеми, які відстежують частоту обертання ротора, тиск, температурний режим і надходження палива. Складність полягає в необхідності розмістити дані схеми в безпосередній близькості від робочої камери турбіни, а в настільки мікроскопічній системі практично відсутній температурний градієнт. Таким чином, електроніка і давачі будуть нагріті чи не до температури вихлопу (з урахуванням наявності систем охолодження - до 870 °С). Задачу вирішили виготовленням давачів обертів і температури з полікристалічного кремнію, який є стійким до нагрівання.

Клапани для подачі палива (газоподібного в даному випадку) в описуваній мікротурбіні мають діаметр 1 мм і відкриваються за допомогою електростатичних сил, а закриваються за рахунок дії спеціальних кремнієвих пружин і гідродинамічних сил.

Варто відзначити незвичайну конструкцію електрогенератора турбіни, адже електричний контакт з ротором неможливий. Тому непровідний ротор покрили мікронним шаром речовини з низькою провідністю, на який через повітряний зазор (2-3 мікрона) "проектується" електричне поле статора. На поверхні статора проводять безліч смуг шириною 4 мікрони, орієнтованих паралельно осі ротора і, отже, перпендикулярно площині його обертання. Полярність кожного провідника статора динамічно контролюється електронікою, і залежно від співвідношення між частотою перемикачів і частотою обертання ротора система функціонує як мотор, гальмо або генератор. Максимальна напруга і частота генератора обмежені можливостями керуючих схем на рівні 300 В і 2 МГц.

Однак розглянуте вище рішення має істотний недолік: при такому малому зазорі між краєм ротора і статором починають діяти сили в'язкості, які знижують ККД до 40-50%. Тому група дослідників взялася за проектування магнітної системи і домоглася певних успіхів. Використання чотириполюсного

статора і магнітного ротора призвело до зростання ККД до 60%. Але магнітні матеріали чутливі до високих температур, і навіть спеціально підібрані склади втрачають свої властивості при 760 °С. Є надія, що в найближчому майбутньому вдасться розробити матеріали, стійкі до температур більше 1000°С.

8.17 Давачі випромінювання - мікроболометри

Болометри в широкому сенсі - це прилади для виміру енергії електромагнітного випромінювання. Болометри, використовуються для детектування ІЧ-випромінювання, є резистивними пристроями, чутливими до нагріву. Болометр винайдений Самуелем Пірпонтотом Ленглі в 1878 р. Основний компонент болометра - дуже тонка пластинка (наприклад, з платини або іншого провідного матеріалу), зачорнена для кращого поглинання випромінювання. Через свою малу товщину пластинка під дією випромінювання швидко нагрівається і її опір підвищується. Для вимірювання малих відхилень опору пластинки її включають у вимірювальний міст, який балансують у відсутність засвічення.

Напівпровідниковий болометр складається з двох плівкових термісторів (товщиною до 10 мкм). Один з термісторів, безпосередньо піддається опроміненню, є активним. Другий - компенсаційний. Він екранований від зовнішнього випромінювання і призначений для компенсації змін температури навколишнього середовища. Обидва термістори поміщаються в один герметичний корпус.

Болометричний давач складається з резистивних шарів оксиду ванадію (VO_x) або аморфного кремнію (α -Si). Ці шари реєструють зміни електричного опору під впливом температури. Використання чистого аморфного кремнію має ряд переваг перед складними з'єднаннями різних оксидів ванадію: структура аморфного кремнію завжди одноманітна, і, по перше, відрізняється просторовою однорідністю на піксельному рівні, а, по друге, його температурна поведінка є прогнозованою, саме це робить давач придатним для використання в умовах дії температури довкілля, яка змінюється. Окрім високої чутливості до

змін температури, давачі на основі α -Si мають меншу кількість непридатних пікселів, що говорить про їх якість.

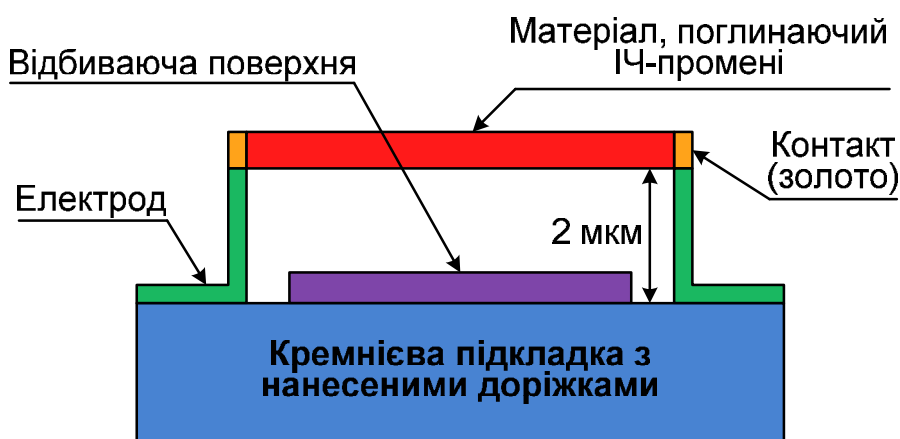


Рис. 8.16 Конструкція мікроболометра

Мікроболометричний давач так само складається з резистивних шарів оксидів ванадію або аморфного кремнію. Вакуум, в якому працює давач, забезпечує ізолюваність пікселів один від одного. Використання германію забезпечує високі оптичні характеристики в діапазоні хвиль 8-14нм.

У порівнянні з квантовими детекторами вартість мікроболометрів значно нижча, працюють вони в широкій смузі і не вимагають охолодження. Варто відмітити, незважаючи на досить високі показники мікроболометрів, квантові детектори володіють більшою чутливістю. Так, наприклад, чутливість мікроболометрів GWIC на оксиді ванадію лежить в межах від 40 до 80 мК, тоді як чутливість шведських давачів IRnova складає від 10 до 30 мК. [125]

Традиційні мікроболометри також визначають IR-сигнали в напівпровіднику, використовуючи термоелектричний ефект. Зміна в опорі вимірюється і переводиться в температури, які з двовимірним масивом детекторів і ROIC можуть бути представлені графічно. Стандартні розміри ґрат зазвичай бувають двох видів – 320*240 або 160*120 - при цьому розширення виходить однаковим, але, як і у випадку з відеокамерами, велика матриця дозволяє захопити велику область огляду з найменшими спотвореннями. Хоча матриці більшого розміру дорожчі, намітилася тенденція переходу саме до них, аж до розміру 640*480.

Мікроболометр, виконаний як масив фокальної площини, є формою МЕМС-пристрою, яка використовує масив малих елементів - детекторів випромінювання. Кожен елемент детектування мікроболометра включає мембрану, підвішену над підкладкою, для того, щоб забезпечувалася теплова ізоляція. Мембрана передбачає температурно-чутливий елемент, наприклад на основі модифікацій оксиду ванадію VOX, і два електрода, що зв'язують температурно-чутливий матеріал і ROIC на підкладці. Випромінювана ІЧ-енергія, що отримується кожним детектором мікроболометра, збільшує температуру детектора. Зміна в температурі наводить зміну в опорі кожного детектора, що реєструється мультиплексною інтегрованою схемою, розміщеною на тій же напівпровідниковій підкладці.

Існуючі схеми ROIC розробляються з метою досягнення сумісності з вимогами вхідного імпедансу відповідних елементів детектування. МЕМС-мікроболометри зазвичай досить добре чутливі до випромінювання, оскільки окремі детектори мають дуже малі теплові маси і термічно ізольовані від мультиплексної схеми і підкладки.

Хоча інфрачервоні пристрої цього типу зазвичай адекватно виконують функції, що відповідають призначенню, їх недоліки включають обмеження відносно теплової маси мембрани, складність в урівноваженні механічної напруги між шарами в мембрані, відносно високі рівні шумів, відносно низький температурний коефіцієнт опору (TCR), де TCR - стандартний показник теплової енергії і чутливості датчика. Чутливість головним чином обмежується теплопровідністю кожного пікселя. Швидкість роботи визначається відношенням теплоємності до теплового опору. Зниження теплоємності збільшує не лише швидкість роботи, але і теплові флуктуації - шуми. Збільшення теплопровідності підвищує швидкість роботи, але знижує чутливість (а для того, щоб вона зросла, треба підвищувати TCR і базовий опір).

Підхід до рішення деяких проблем VO_x- мікроболометрів ґрунтується на застосуванні аморфного (некристалічного) кремнію в якості термочутливого

матеріалу. Аморфний кремній характеризується більшим значенням TCR, що забезпечує більший рівень чутливості. Це зазвичай досягається за рахунок забезпечення низького рівня допущання або його відсутності. Так як ефективний опір кожного детектора пов'язаний з рівнем допущання, забезпечується високий базовий опір кремнію, тому виникає проблема погодження високого вихідного імпедансу із вхідним імпедансом ROIC.

Технологія VO_x-мікроболометрів була розроблена Honeywell в середині 1980-х років по контракту з US Department of Defense. Після чого з 1990-х ліцензії на цю технологію купували різні виробники. Приклад мікроболометрів наведено на рис. 8.17.

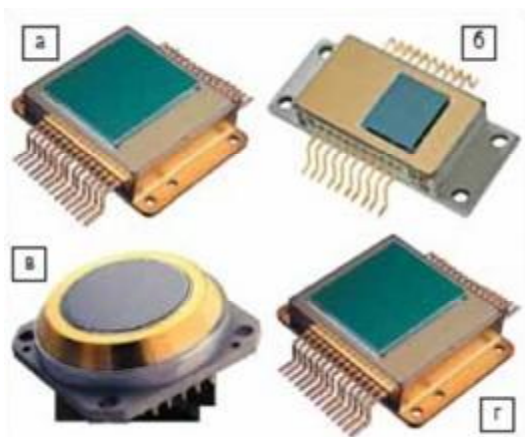


Рис. 8.17 а) FPA детектор UL 03 04 з розмірами матриці пікселів 384*288
б) двомірний детектор UL 02 05 1 з розмірами матриці пікселів 160*120
в) двомірний модуль UL 03 08 1 з розмірами матриці пікселів 384*288
г) UL 04 17 1 – ІЧ-детектор з розмірами 640*480 і кроком 25 мк

8.17.1 Інтеграція IR-давачів в автомобільні ІЧ-камери нічного бачення

В квітні 2006 року відомий виробник теплових камер компанії Flir Systems Inc. надала необхідні ліцензії компанії Autoliv Inc. для інтеграції IR-давачів в автомобільні ІЧ-камери нічного бачення. Основу пристроїв складають не охолоджувані ІЧ-болометри FLIR Indigo Systems Division – давачі із оксиду ванадію з розмірами матриці 320*240 пікселів на основі технології Flir Autovox.

Система нічного бачення від Autoliv NightVision, створена на основі ІЧ-камер, значно покращує видимість в темний час доби, дозволяючи водію оглядати відстань більше 500 м при ідеальних умовах (і до 300 м в будь-яких умовах). Це в 5 разів далше за фари, при цьому можна яскравіше бачити

об'єкти в темному місці між двома зустрічними автомобілями, оглядати області, навколишні дороги, виявляти тварин чи дітей, які вибігають на дорогу.

Autoliv надає ці системи різним автовиробникам, адже вони відкалібровані таким чином, щоб бути особливо чутливими до температури людей і тварин.

8.17.2 Мікроболометри

Мікроболометри є прикладом мікроелектромеханічних систем (МЕМС), які використовуються для вимірювання електромагнітного випромінювання. Принцип роботи досить простий: матеріал з високим коефіцієнтом температурного опору (ТКО) піддається випромінюванню і нагрівається, отже, змінюється його опір. Така зміна опору може бути виміряна, після чого обчислюється потужність падаючого випромінювання. Мікроболометри в основному використовуються для вимірювання інфрачервоного випромінювання в тепловізорах. В даний час багато виробників пропонують тепловізійні камери на основі мікроболометричних масивів [126-128]. Тим не менш, дослідження в цьому напрямку є актуальними і потребують подальших вдосконалень конструкції, таким чином, щоб камери мали більшу чутливість і працювати з більшою частотою кадрів.

Основні параметри болометрів:

- опір активного термістора при номінальній температурі;
- робоча напруга;
- чутливість при певній частоті модуляції світлового потоку;
- поріг чутливості;
- стала часу;
- рівень власних шумів.

Болометр чутливий до всього спектру випромінювання. Але застосовують його в основному в астрономії для реєстрації випромінювання з довжиною хвилі субміліметрової (проміжних між НВЧ та інфрачервоним): для цього діапазону болометр - найчутливіший давач. Джерелом теплового

випромінювання може бути світло зірок чи Сонця, що пройшло через спектрометр і розкладене на тисячі спектральних ліній, енергія в кожній з яких дуже мала.

Напівпровідникові болометри застосовуються, наприклад, в системах орієнтації, для дистанційного вимірювання температури об'єктів.

8.17.3 Загальна архітектура мікроболометра

Різні реалізації мікроболометра відрізняються за формою, але загальна структура пристрою завжди залишається тою самою: квадратна пластина знаходиться над підкладкою і кріпиться на тонких ніжках. Тонкі опори необхідно термічно відокремити від підкладки. Мікроболометр містить два типи матеріалів: один активний матеріал з високим коефіцієнтом термічного опору (ТКО), та ізолятора. Зазвичай тонкий шар активного матеріалу розташований між двома мембранами, виготовленими з діелектрика. Для забезпечення максимальної зміни опору в тонкому активному шарі в залежності від зміни температури активний матеріал проектується у вигляді спіралі (див. рис. 8.18). Ізолююча мембрана дозволяє збільшити площу, яка поглинає тепло випромінювання і в той же час не міняє свою електричну поведінку. Ізоляція також підсилює структуру з механічної точки зору. Типова структура мікроболометра представлена на рис. 8.18.

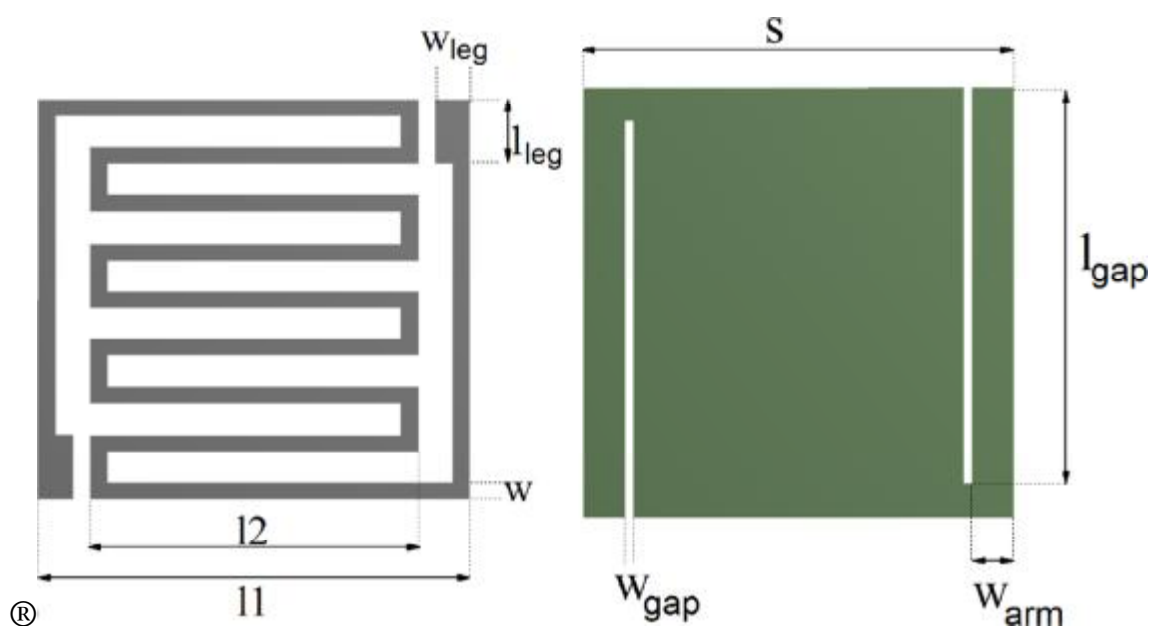


Рис. 8.18 Форма активного шару (ліворуч) та ізолюючої мембрани (праворуч)

Необхідні властивості матеріалу активного шару - це електричний опір, теплопровідність і тепловий коефіцієнт опору. Ізолюючі мембрани повинні охоплювати всю структуру і мати зазори уздовж опорних ребер активного матеріалу. Необхідні властивості матеріалу ізолюючого шару - це теплопровідність, густина і теплоємність. Всі перераховані вище параметри і їхні символи, які використовуються для опису конструкції мікроболометра наведені в таб. таблиця 8.3.

Таблиця 8.3

Список геометричних і матеріальних параметрів

Ім'я	Символ
Розмір активного шару	l_1
Активний шар (внутрішній розмір)	l_2
Активний шар – ширина	w
Активний шар – висота (нанометрів)	h
Анкера – довжина	l_{leg}
Анкера – ширина	w_{leg}
Анкера – висота	h_{leg}
Ширина ізолятора	S
Товщина ізолятора (зверху)	h_t
Товщина ізолятора (знизу)	h_b
Довжина прорізу ізолятора	l_{gap}
Ширина прорізу ізолятора	w_{gap}
Ширина рукава ізолятора	w_{arm}
Електричний опір активного матеріалу	R
Теплопровідність активного матеріалу	κ
Температурний коефіцієнт опору активного матеріалу	α
Теплопровідність ізолюючого матеріалу	κ_i
Густина ізоляційного матеріалу	ρ
Питома теплота ізоляційного матеріалу	c

8.17.4 Модель мікроболометра

Метою створення моделі болометра є можливість швидкого аналізу на ранній стадії процесу проектування, що дозволить проектанту підібрати оптимальні параметри мікроболометра. Таким чином, можна використовувати

просту RC еквівалентну модель електричного кола [129] (див. рис. 8.19). Хоча такий підхід є значно спрощеним по відношенню до використання скінченних елементів при моделюванні, однак на початковому етапі проектування може використовуватися для перевірки адекватності моделі. Аналітична модель має перевагу в тому, що дозволяє проектанту аналітично обчислити температуру мікроболометра в кожен момент часу. Наступним кроком опишемо, як отримують всі вихідні параметри мікроболометра.

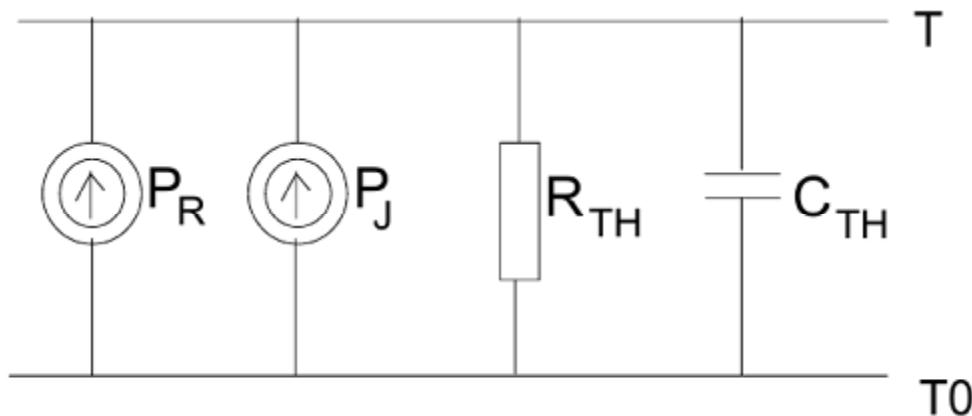


Рис. 8.19. Модель мікроболометра (P_R - потужність випромінювання, P_J - Джоулева теплота, R_{TH} - термічний опір, C_{TH} - теплова потужність) [130, 131]

8.17.5 Електрична складова

Передбачається, що опір діелектрика значно вищий, ніж у активного матеріалу. Отже, струм зміщення тече тільки через активний шар і тільки в цьому матеріалі виникає джоулеве тепло. Основним параметром в цій області є опір активного шару. Щоб отримати цей параметр, в першу чергу необхідно розрахувати загальну довжину активного шару, використовуючи відповідні розміри.

Після того, як визначена загальна довжина активного шару, ми можемо розрахувати електричний опір, використовуючи добре відому формулу:

$$R = r \frac{l_a}{w_a h_a} \quad (8.50)$$

де r питомий опір матеріалу, l_a - довжина, w_a - ширина і h_a висота активного матеріалу. Маючи значення електричного опору і струм зміщення, можна

визначити джоулеве тепло в активному шарі, використовуючи наступну залежність:

$$P = I^2 R \quad (8.51)$$

За даною формулою ми визначимо перший параметр (P_J) електричного кола, що представлено на рис. 8.19.

8.17.6 Теплова складова

Розрахунок теплових параметрів є складнішим, оскільки потрібно врахувати активний та ізолюючий шари. Однак, можна зробити деякі припущення, які суттєво спрощують наступний аналіз. Результати стаціонарного теплового аналізу, виконаного в системі ANSYS показано на рис. 8.20.

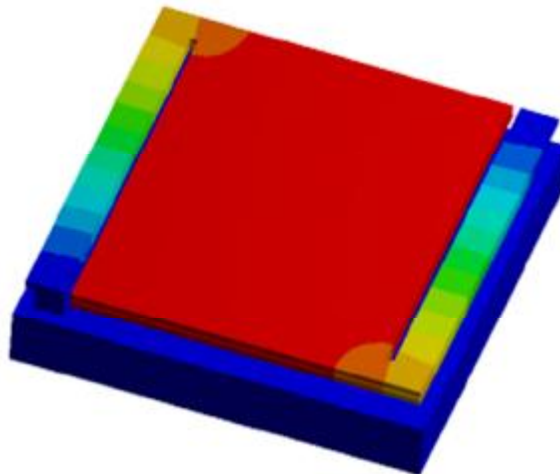


Рис. 8.20. Стаціонарне теплове моделювання мікроболометра, проведене в ANSYS [132]

Як видно з рис. 8.20, температура підкладки практично дорівнює температурі навколишнього середовища. Також з рисунку бачимо другу особливість, що температура мембрани розподілена практично рівномірно. Таким чином, спад температури відбувається тільки вздовж опорних ніжок. Іншими словами, тепловий опір опорних ніжок значно вищий за тепловий опір мембрани і підкладки. Отже, в моделі необхідно враховувати тільки тепловий опір опорних ніжок. Слід зазначити, що кожна опорна ніжка складається з трьох шарів: ізоляція знизу активного шару, активний шар та ізоляція зверху мембрани.

$$R_{TH} = \frac{1}{k} \frac{l_{arm}}{w_{arm} h_{arm}} \quad (8.52)$$

У цьому випадку, загальний опір трьох шарів розраховують шляхом обчислення спочатку теплового опору кожного шару, а потім визначається загальний тепловий опір, як паралельне з'єднання трьох окремих опорів. Роз'яснення параметрів, необхідних для рівняння (8.52) представлені у таблиці 8.3.

Коли мова йде про теплову потужність, необхідну для перехідного моделювання, то вона може бути розрахована за формулою (8.53):

$$C_{TH} = r c V \quad (8.53)$$

Для розрахунку об'єму V в рівнянні (8.53), необхідно припустити, що об'єм активного шару значно менший, ніж об'єм ізоляційного матеріалу а, отже, ним можна знехтувати. Тому нам необхідно визначити тільки об'єм ізоляції. Для цього ми використовуємо геометричні розміри з таблиці 2.1. Таким чином, ми отримуємо два інші параметри моделі, R_{TH} - термічний опір та C_{TH} - теплову потужність.

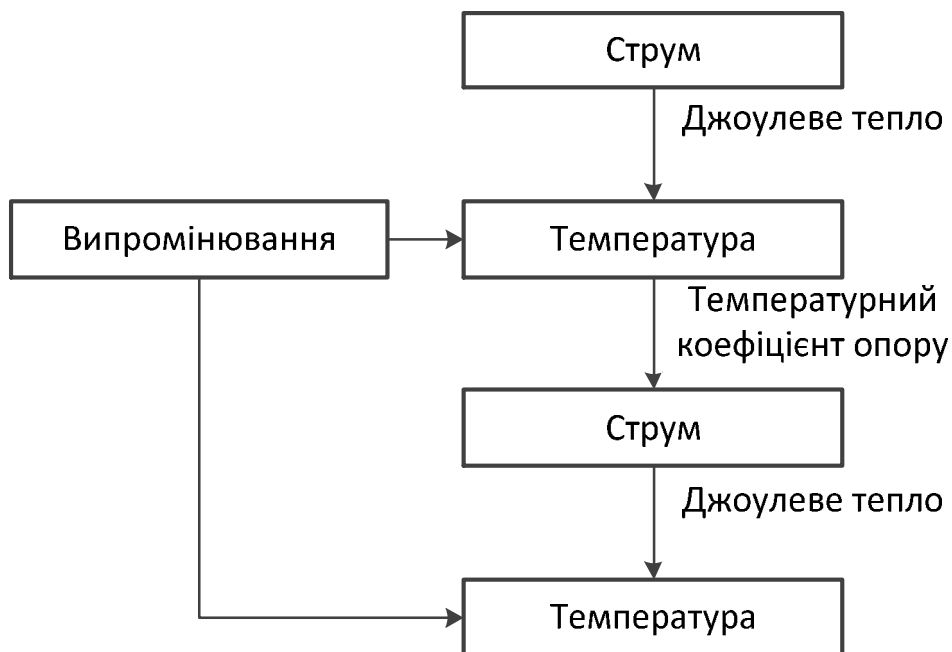


Рис. 8.21. Зв'язок між електричними і тепловими параметрами на прикладі одного кроку ітерації [130]

Слід зазначити, що теплова складова впливає на електричну складову, так як опір активного шару є функцією температури. Цим ефектом не можна знехтувати, так як матеріали, які використовуються в мікроболометрах мають високий температурний коефіцієнт опору (ТКО). Це означає, що опір може значно змінюватися зі зміною температури. Як правило, в складних системах це завдання вирішується ітераційно, однак, після ретельного аналізу, встановлено, що у випадку моделювання мікроболометра, один крок ітерації дає вже прийнятні результати. Причина цього в тому, що зміна температури пристрою досить мала, в діапазоні декількох градусів. Таким чином, пропонується використовувати підхід, як показано на рис. 8.21. Пропонується спочатку обчислити опір при кімнатній температурі, одночасно враховуючи збільшення температури за рахунок струму і випромінювання. Розраховане значення температури використовується в подальшому для обчислення нового значення електричного опору, яке, в свою чергу, використовується для обчислення кінцевої температури.

8.18 Цифрові мікродзеркальні пристрої

Дисплейні технології - найважливіше застосування технологій оптичних МЕМС або МОЕМС, на основі яких будуються актюатори або давачі. Аббревіатура МОЕМС розшифровується як мікрооптичні електромеханічні системи (Micro-Optical-ElectroMechanical Systems, MOEMS).

На відміну від звичайних МЕМС, МОЕМС включають оптику і працюють з оптичними сигналами.

МОЕМС - це виготовлені методом мікротехнологій оптичні компоненти або оптоелектронні пристрої та системи, що включають хвилеводи, дифракційні решітки, мікродзеркала та інші елементи, які можуть змінювати, модулювати шлях світлового променя або спектрально модифікувати світловий промінь.

Мікродзеркала - вельми часто згадуються в різних джерелах як елементи МОЕМС. Мікродзеркала виготовляються на кристалі і активуються електростатичними, тепловими, магнітними (електромагнітними) засобами і

призначені для направлення та / або сканування світлового променя. Їх застосування - дисплеї, сканери, оптичні перемикачі та інші оптоелектронні компоненти.

Головні застосування МОЕМС включають:

- *давачі: детектування оптичних сигналів, обробка, комунікаційні функції;*
- *актюаторні: обробка і генерація зображень.*

МОЕМС-актюатори сьогодні використовуються в дисплейних системах для створення зображення безпосередньо на екрані в реальному часі або для представлення зображень на записуючому засобі, а також для сканування штрих-кодів або в пристроях читання запису оптичних накопичувачів інформації.

Цифрові мікродзеркальні пристрої (DMD) були винайдені доктором Ларрі Хорнбеком і доктором Вільямом Е. "Ед" Нельсоном з компанії Texas Instruments (TI) в 1987 році. Вони є ядром DLP технології, яка використовується для відео-проекції. Дзеркала розташовані в матриці і мають два стани, "увімкнено" або "вимкнено". В першому стані, світло від лампи проектора відображається в лінзу і пікселі на екрані світяться. У вимкненому стані, світло спрямовується в інше місце (як правило, на радіатор), що робить піксель темним.

Найчастіше використовуються інтегральні мікродзеркальні пристрої з електростатичною активацією. Цифрові мікродзеркальні пристрої займають вагомe місце в сучасних технологіях, їх використовують в найрізноманітніших напрямках де мова йде про відтворення зображення чи контроль світлового потоку. Багато інститутів та наукових центрів займаються розробкою та дослідженням цих пристроїв.

Мікродзеркала вивчалися протягом тривалого часу, перш ніж ставли комерційним продуктом. Texas Instruments розробила мікродзеркальні матриці для відображення відео: цифрові мікродзеркальні пристрої.

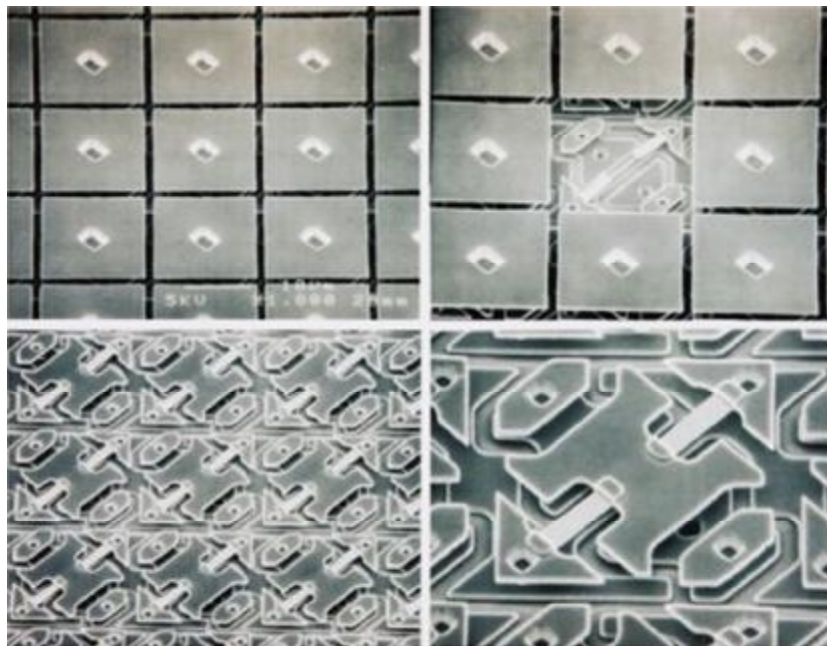


Рис. 8.1 Фотографії DMD [133]

Схожі на DMD пристрої розроблені Фраунгоферським інститутом напівпровідникових технологій (Fraunhofer-Institut für Siliziumtechnologie). Використовуються вони виключно в наукових цілях. Дзеркала в пристроях Фраунгоферського інституту є більшими.



Рис. 8.2 Мікродзеркальні матриці розроблені Фраунгоферським інститутом кремнієвих технологій [134]

Мікродзеркала можуть не тільки перемикатися між двома станами, насправді вони обертаються безперервно. Це використовується для управління

інтенсивністю і напрямком падаючого світла. Сила і напрямок падаючого світла визначається станом дзеркала, який контролюється електростатичними актюаторами.

DMD проект почався як деформований дзеркальний пристрій в 1977 році, з використанням мікромеханічних, аналогових модуляторів світла. Перший аналоговий DMD продукту TI DMD2000 принтер авіаквитків, який використовували DMD замість лазерного сканера.

DMD чіп має на своїй поверхні кілька сотень тисяч мікроскопічних дзеркал, розташованих в прямокутних масивах, які відповідають за пікселі в зображенні, яке буде відображатися. Дзеркала можуть індивідуально повертатися $\pm 10-12^\circ$, у стані ввімкненому або виключеному.

Для отримання відтінків сірого, дзеркала включається і вимикається дуже швидко, і ставлення на час від часу визначає відтінок виробництва (виконавчі широтно-імпульсні модулі). Сучасний DMD чіп може виробляти до 1024 відтінків сірого кольору (10 біт).

Дзеркала самі зроблені з алюмінію і близько 16 мікрометрів в діаметрі. Через малий масштаб, шарнір не є проблемою, і тести показали, що навіть 1 трильйон (10^{12}) операцій, не викликають помітних пошкоджень. Тести також показали, що петлі не можуть бути пошкоджені при нормальних ударах і вібраціях, так як вона поглинається DMD надбудовою.

Дві пари електродів керують положенням дзеркала електростатичного притягання. Кожна пара має один електрод з кожного боку петлі, з однієї з пар, щоб виступати на ярмо а інші діють безпосередньо на дзеркало. Велику частину часу, рівні заряди зміщення застосовуються до обох сторін одночасно. Замість того щоб гортати в центральному положенні, як і слід було очікувати, це насправді тримає дзеркало в його нинішньому положенні. Це тому, що сила тяжіння на сторони вже нахилена по відношенню до дзеркала ще більше, оскільки ця сторона знаходиться ближче до електродів.

Для переміщення дзеркала, потрібний стан спочатку завантажується в SRAM клітинку, розташовану під кожним пікселем, який також підключений

до електродів. Як тільки всі осередки SRAM були завантажені, напруга зсуву знімається, що дозволяє заряду з осередку SRAM переважати, рухоме дзеркало.

Зміщення системи використовується, тому що це зменшує рівень напруги, необхідний для вирішення пікселів, так що вони можуть керуватися безпосередньо з осередку SRAM, а також тому, що напруга зсуву може бути видалена в той же час для всього чіпа.

8.18.1 Інтегральні мікродзеркала

Інтегральні мікродзеркала з електростатичною активацією знаходять широке застосування в мініатюрних робототехнічних системах (в якості оптичних ключів) і обробки зображень (для відхилення лазерного променя і/або світлового потоку).

На рис. 8.22 наведена структура мікродзеркала, виготовленого з допомогою технології об'ємної мікрообробки.

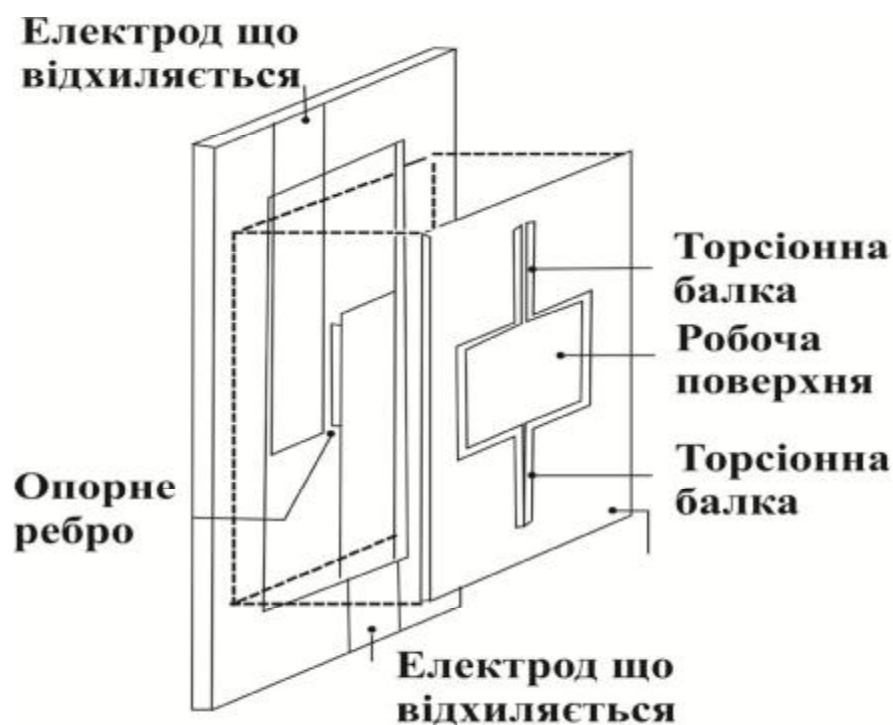


Рис. 8.22 Мікродзеркало з електростатичною активацією, виготовлене з використанням технології об'ємної мікрообробки.

Для відхилення структури мікродзеркала використовуються два електростатичних актюатора. Структуру мікродзеркала заземлюють і на електроди що відхиляються поперемінно подають напругу. Між структурою

мікродзеркала і електродами виникає електростатична сила, яка відхиляє мікродзеркало то в одну то в іншу сторону. Рух мікродзеркала здійснюється за рахунок повороту торсійних балок.

Виготовлення мікродзеркала з допомогою технології об'ємної мікрообробки затрудняє його використання в інтегральних мікрооптоелектричних системах.

На рис. 7.27 наведена структура інтегрального мікродзеркала з електростатичною активацією, виготовленого з використанням MUMPs-технології.

Відхилення структури мікродзеркала здійснюється з допомогою електростатичного актюатора, створюваного пластинами, виконаними із шару полікремнію (poly0) і другого структурного шару (poly2).

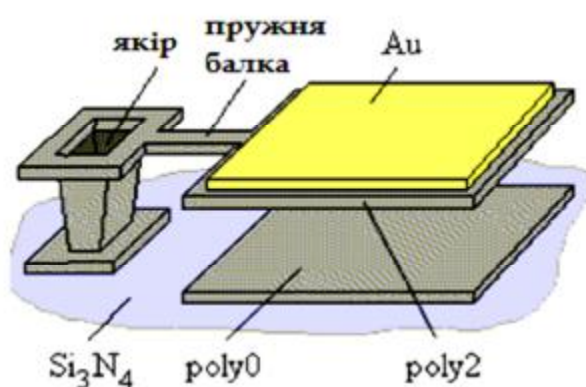


Рис. 8.23 Інтегральне мікродзеркало з електростатичною активацією, виготовлене з використанням MUMPs-технології

Структуру мікродзеркала заземляють (poly2) і на електрод що відхиляється (poly0) подають живлення. Між структурою мікродзеркала і електродом що відхиляється виникає електростатична сила, яка відхиляє мікродзеркало. Рух мікродзеркала здійснюється за рахунок вигину пружної консольної балки.

Недостатком даної структури являються відсутність функціональної можливості відхилення мікродзеркала в обидві сторони і втрата площі кристалу, пов'язана з необхідністю розташування якоря (anchor2) і пружної консольної балки мікродзеркала.

На рис. 8.24 наведена структура інтегрального мікродзеркала з електростатичною активацією, виготовлена за технологією поверхневої мікрообробки.

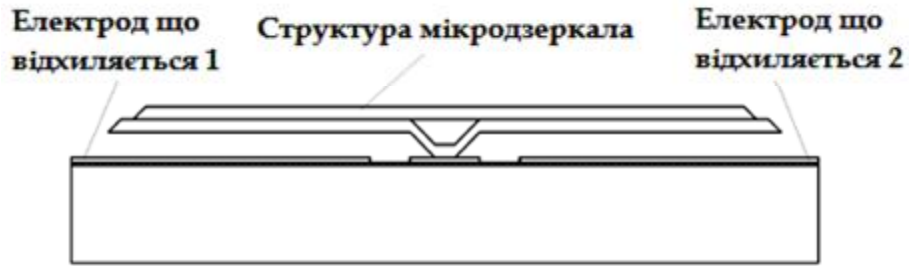


Рис. 8.24 Структура інтегрального мікродзеркала з електростатичною активацією

При подачі струму на один з електродів що відхиляється між ним і структурою мікродзеркала виникає електростатична сила, яка притягує мікродзеркало до електроду що відхиляється. Коли відхиляюча напруга пропадає, мікродзеркало під дією сили пружності повертається в початкове положення.

На даний час розроблено достатньо велику кількість одно-і двоосних мікромеханічних дзеркал з електростатичною активацією.

На рис. 8.25 - рис. 8.26 представлені структури інтегральних мікродзеркал з електростатичною активацією, що отримали найширше поширення.



Рис. 8.25 Інтегральне двоосне дзеркало, виготовлене за технологією об'ємної мікрообробки

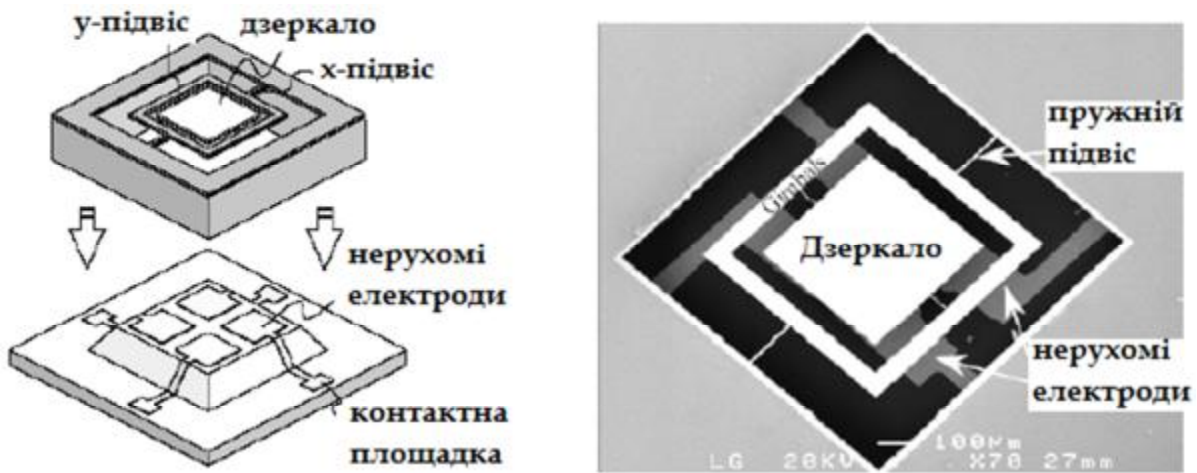


Рис. 8.26 Двоосне мікродзеркало, виготовлене з використанням технології мікрообробки

Для отримання великого кутового відхилення мікродзеркала необхідно забезпечити велику відстань між структурою мікродзеркала і електродом, що відхиляється. Використання технології поверхневої мікрообробки при виготовленні мікродзеркала не дозволяє отримати великих переміщень, а застосування об'ємної мікрообробки знижує інтеграцію елементів МСТ з ІС. Для усунення даного недоліку при виготовленні мікродзеркала по технологіях поверхневої мікрообробки застосовується самозбирання з використанням мікродвигунів.

На рис. 8.27 представлено інтегральне двоосне мікродзеркало, виготовлене з використанням технології самозбирання з допомогою електростатичних мікродвигунів.

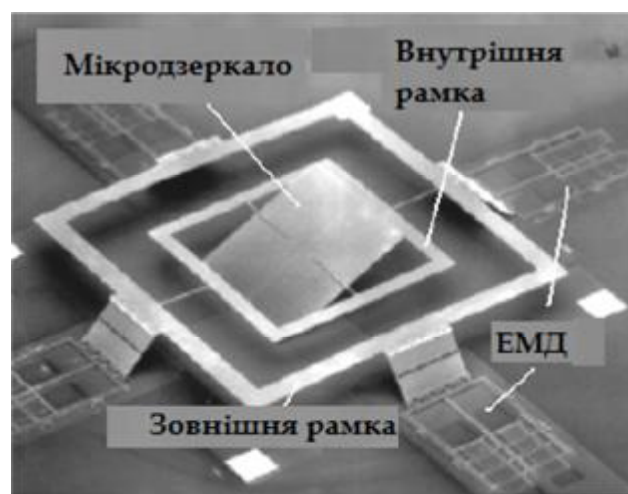


Рис. 8.27 Інтегральне мікродзеркало з ЕМД

Даний мікромеханічний пристрій виготовляється за MUMPs-технологією.

Для зменшення енергоспоживання електростатичних актюаторів, які входять в склад мікродзеркала, доцільно використовувати гребінчасті структури, що володіють більшою ємністю в порівнянні з плоскими.

На рис. 7.32 представлено інтегральне мікромеханічне дзеркало з гребінчастими електростатичними актюаторами. Інтегральні мікродзеркала відхиляються від свого початкового положення (рис. 8.28).

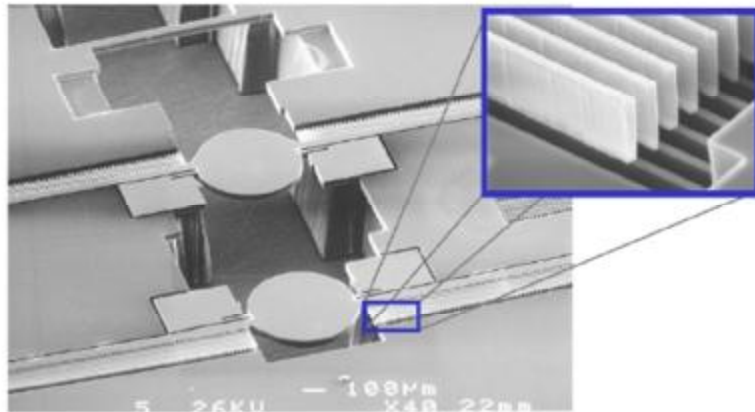


Рис. 8.28 Інтегральне мікромеханічне дзеркало

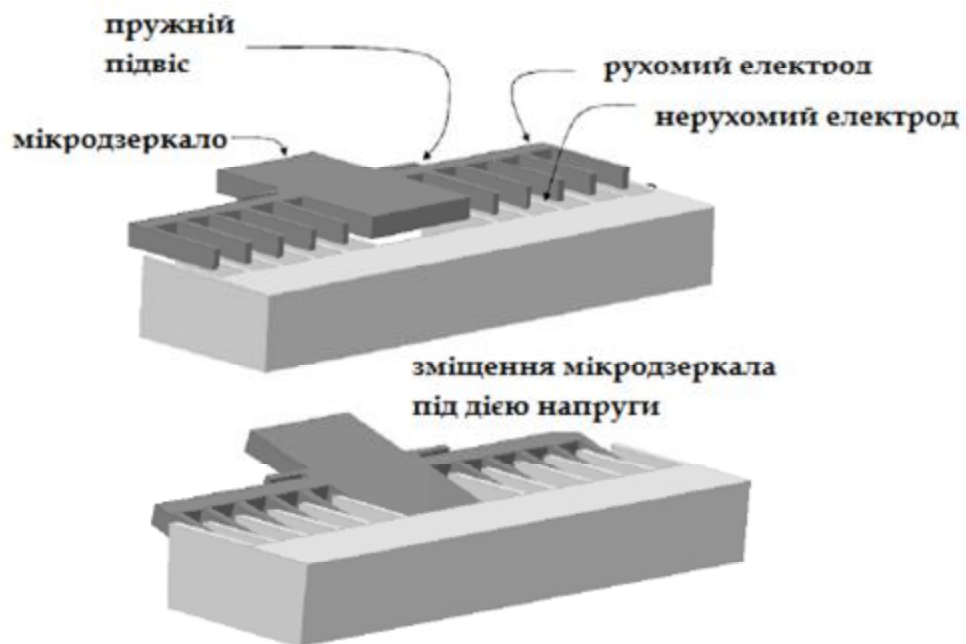


Рис. 8.29 Переміщення інтегрального мікромеханічного дзеркала під дією відхиляючої напруги

Є кілька видів систем з використанням DLP-пристроїв. Деякі з них використовують 3 DMD, по одній для кожного кольору. Деякі з них використовують один DMD пристрій, з системним фільтром кольору.

Переваги DLP-систем в порівнянні з існуючими, такими як плазма, LCD, або електронні пучки - це співвідношення між джерелом світла і відображенням світла. Мікротехнологія також дає дуже високу продуктивність, зниження вартості пристроїв, оскільки попит на ринку зростає.

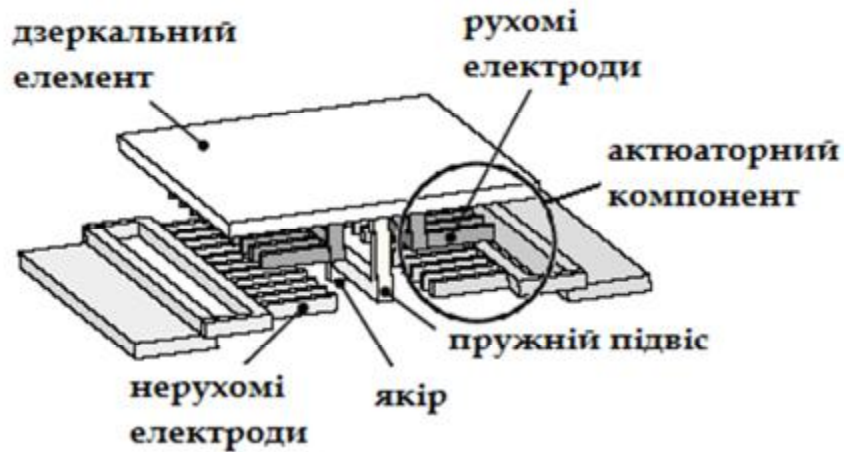
8.19 Інтегральні мікромеханічні ключі

Інтегральні мікромеханічні ключі знаходять широке застосування в мініатюрних робототехнічних системах в якості логічних елементів.

В даний час розроблено досить велику кількість мікромеханічних ключів, що виготовляються з алюмінію і золота, що звужує сфери їх застосування, тому що металеві ключі чутливіші до прискорення, ніж мікромеханічні, виконані з напівпровідникових матеріалів. Крім того, при виготовленні інтегральних мікромеханічних ключів з металу необхідно використовувати додатковий ізоляційний шар, що ускладнює їх виготовлення в одному технологічному процесі спільно з іншими елементами МСТ і ІС.

Мікромеханічні ключі, в яких в якості структурного матеріалу використовується полікремній, виготовляються за допомогою технології поверхневої мікрообробки, що в свою чергу дає змогу виготовляти їх в одному технологічному процесі спільно з іншими елементами МСТ.

Принцип дії мікромеханічних ключів може бути електростатичним, магнітним або електромагнітним. Кожен з перерахованих принципів має свої переваги і недоліки. Електромагнітна активація мікромеханічних ключів дозволяє знизити напруги спрацьовування, але при високому споживанні струму. Перевага мікромеханічних ключів з електростатичною активацією полягає у відсутності споживання струму, а недолік - висока напруга спрацьовування (5-100 В). Ключі з таким видом активації застосовуються в мікросистемах, для яких важливим фактором є низька споживана потужність.



Більшість мікромеханічних ключів з електростатичною активацією рухомого елемента, містять консольну балку. Область, до якої безпосередньо приєднана консольна балка прийнято називати витоком. Область, розташована під консольною балкою і використовується для створення електростатичної сили, називається затвором. Область, з якою відбувається механічний контакт консольної балки при її відхиленні від первинного положення, за рахунок дії електростатичної сили, називається областю стоку.

На рис. 8.30 наведена структура інтегрального мікромеханічного ключа. Мікромеханічний ключ може працювати в інверсному і нормальному режимах (рис. 8.31).

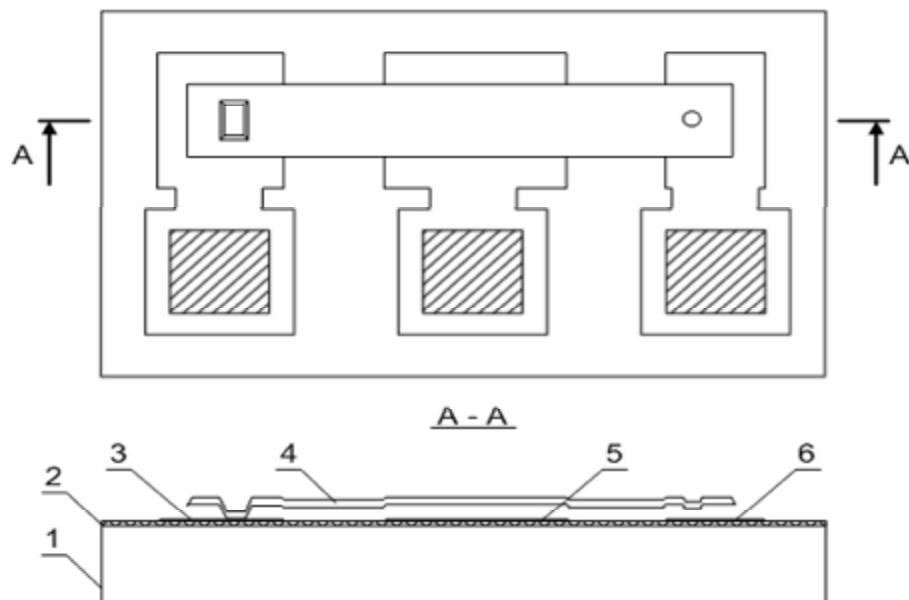


Рис. 8.30 Структура інтегрального мікромеханічного ключа: 1-підкладка, 2 - діелектрик; 3-область витоку; 4 - консольна балка, 5 - область затвору; 6 - область стоку

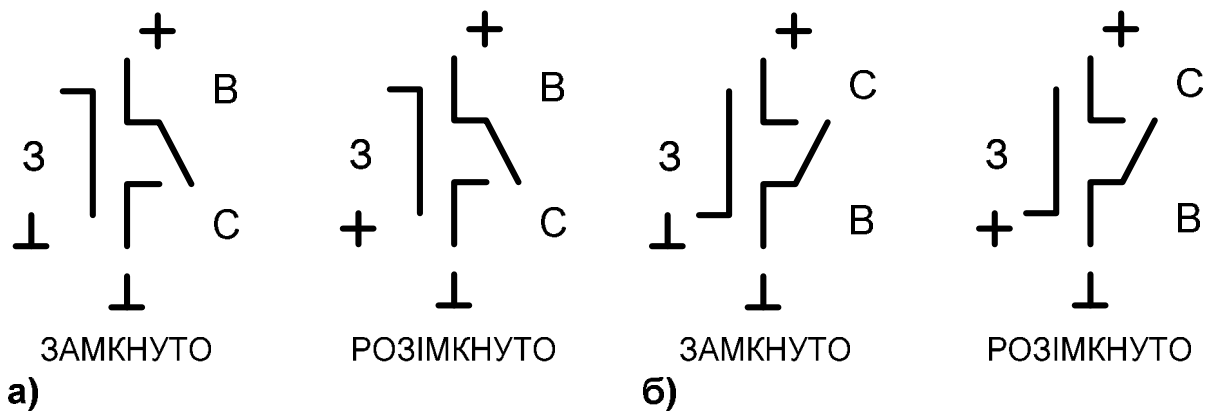


Рис. 8.31 Умовні позначення мікромеханічного ключа: **а** - інверсний режим роботи; **б** - нормальний режим роботи

При інверсному режимі роботи область витоку підключена до шини живлення, а область стоку - до шини нульового потенціалу. При відсутності напруги відхилення між областю затвора і консольною балкою, об'єднаною з областю витоку, виникає електростатична сила, яка притягує консольну балку до затвора. Це призводить до виникнення електричного контакту між виток і стоком. Інтегральний мікромеханічний ключ замкнутий. При подачі напруги відхилення між затвором і консольною балкою, остання повертається у вихідне положення, тоді мікромеханічний ключ знаходиться в розімкнутому стані.

При нормальному режимі роботи область стоку підключена до шини живлення, а область витоку - до шини нульового потенціалу. За відсутності напруги відхилення між областю затвора і консольної балки, остання перебуває у вихідному положенні і електричний контакт витік-стік відсутній. Інтегральний мікромеханічний ключ знаходиться в розімкнутому стані. При подачі напруги відхилення на область затвора щодо консольної балки між ними виникає електростатична сила.

На рис. 1.14 показані залежності електростатичної сили від величини зазору між консольною балкою і областю затвора при різних значеннях напруги відхилення (суцільна лінія) і сили пружності від величини зазору (пунктирна лінія).

Коли прикладена напруга досягає порогового значення включена, консольна балка притягується до нижніх електродів. Це призводить до виникнення електричного контакту між виток і стоком. Мікромеханічний

ключ знаходиться в замкнутому стані. При зменшенні напруги відхилення до деякого граничного значення вимкнута консольна балка повертається в початкове положення. Мікромеханічний ключ знаходиться в розімкнутому стані.

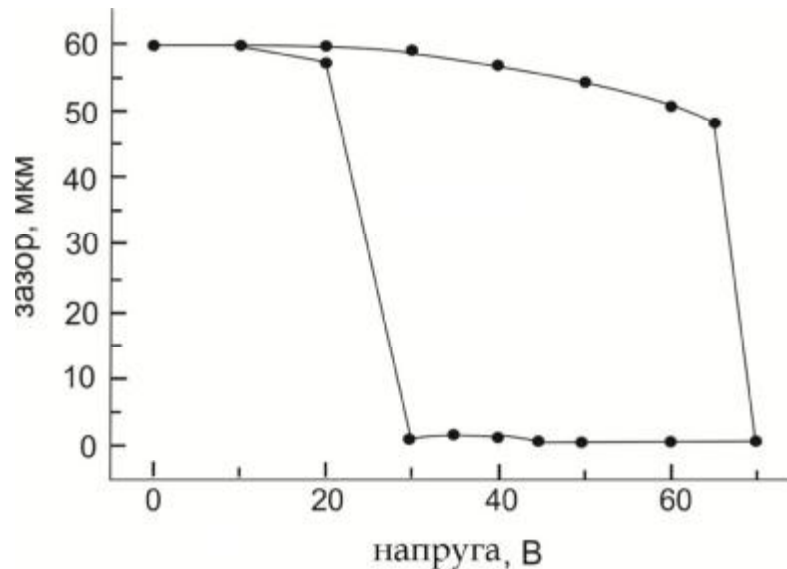


Рис.1.14 Залежність зміни зазору від прикладеної напруги

(при товщині балки 0,5 мкм і площі області затвору $4 \cdot 10^4$ мкм²): 1 - перехід з розімкнутого стану у замкнутий; 2 - перехід із замкнутого стану в розімкнений;

Позбутися гістерезису можна тільки, якщо мікромеханічний ключ буде замикатися, до того як консольна балка досягне точки втрати стабільності. При цьому порогові напруги включення і виключення будуть однаковими.

У відсутності напруги відхилення мікромеханічний ключ має високий імпеданс через повітряний зазор. Оскільки мікромеханічні ключі мають ємнісну природу, то для роботи їм не потрібна безперервна подача постійного струму. Для перемикання ключа у замкнутий або розімкнутий стан необхідна електростатична енергія, рівна $0,5 \cdot C \cdot U^2$. Таким чином, перемикання мікромеханічного ключа визначається ємністю і прикладною напругою.

При проектуванні мікромеханічних ключів необхідно враховувати такий ефект як прилипання консольної балки до поверхні кристала. В основі даного ефекту лежить дія мікроскопічних сил на поверхні контактів і, отже, цей ефект у сильному ступені залежить від морфології поверхні контактів. Проблема залипання рухомих частин особливо гостро стоїть для ключів з металевими

контактами.

8.19.1 Параметри мікромеханічних ключів

Основними елементами будь-якого електричного кола є: джерело електричної енергії, навантаження або підключені пристрої і замкнутий контур для забезпечення протікання струму. Якщо будь-який з цих елементів відсутній, струму в ланцюзі не буде, і, отже, електрична енергія від джерела не дійде до підключених пристроїв. При розробці мікромеханічних ключів істотними є наступні параметри:

- *тривалість перехідних процесів;*
- *час перемикання;*
- *перехідні процеси при комутації;*
- *комутована потужність сигналу;*
- *узгодження вхідних / вихідних ланцюгів;*
- *ширина смуги пропускання;*
- *втрати, що вносяться мікромеханічними ключами;*
- *розв'язка входу від виходу;*
- *послідовний опір;*
- *напруга спрацьовування;*
- *термін служби;*
- *резонансна частота;*
- *узгодження по амплітуді і фазі.*

Тривалість перехідних процесів залежить від швидкості зміни стану ключа. Для операції включення вона визначається як час наростання вихідного сигналу з 10% до 90% від його значення, а для операції вимикання - як час спаду вихідного сигналу з рівня 90% до рівня 10%. Іншими словами, тривалість перехідних процесів - це час, необхідний для зміни вихідної напруги на 1 дБ від стану спрацьовування. Для простого механічного ключа цей час визначається від моменту відриву рухливого контакту від одного стаціонарного контакту до моменту його зіткнення з іншим стаціонарним контактом.

Час переключення також визначається швидкістю перемикання ключа з

одного стану в інший. Однак тут при операції включення цей час визначається від моменту досягнення керуючою напругою рівня 50% до моменту переходу вихідним сигналом рівня 90%. Аналогічно, при вимиканні ключа час вимірюється до моменту досягнення сигналом 10% рівня від початкового значення. Отже, час перемикання характеризує реакцію ключа на зміну керуючої напруги. До часу, необхідного для механічного перемикання, або часу перехідних процесів можуть додаватися різні додаткові складові, наприклад, час затримки чи наростання керуючого сигналу. Механічні ключі мають менше швидкодія, ніж електронні, їх швидкість перемикання лежить в діапазоні від мікросекунд до мілісекунд в залежності від матеріалу і конструкції.

Перехідні процеси при комутації ключа - це експоненціальні зменшуючі сплески напруги у вхідних та / або вихідних ланцюгах ключа, викликані зміною керуючого сигналу. Перехідні процеси комутації є важливою характеристикою роботи ключів. У процесі перемикання виникають і електромеханічні, і електромагнітні перехідні процеси. Електромеханічні перехідні процеси виникають через механічне переміщення елементів ключа, а електромагнітні - через взаємодію електричних і магнітних полів електричних компонентів системи.

Комутована потужність сигналу - характеристика, що показує, наскільки ефективно ключ пропускає сигнал. Найчастіше передача потужності визначається точкою компресії 1 дБ, що походить з підсилювальної техніки.

Передбачається, що потужність вихідного і вхідного сигналів пов'язана лінійною залежністю. Але на практиці ця умова виконується тільки до якогось рівня потужності, так званої максимальної. Точка компресії 1 дБ визначається як максимальний рівень вхідної потужності, при якому вихідна потужність стає на 1 дБ менше, ніж в лінійній області.

Під узгодженням вхідних/вихідних ланцюгів мається на увазі узгодження їх імпедансів, що часто є для ключів непростим завданням. Вхідні і вихідні ланцюги ключа повинні бути погоджені як у включеному, так і відключеному станах. Це необхідно для зниження впливу ключів на роботу всієї системи.

Неправильне узгодження іноді призводить до небажаних відбиттів сигналів всередині ланцюга, які можуть стати причиною виходу системи з ладу. Хоча на практиці ідеального узгодження вдається досягти дуже рідко, все ж необхідно прагнути утримувати відбиття сигналів в межах допустимих рівнів.

Ширина смуги пропускання є важливою характеристикою ключів. Як правило, ключі не мають нижньої межі частоти робочого діапазону, а мають тільки верхню межу. Для електромеханічних ключів це пояснюється втратами, зумовленими опорами і паразитними зв'язками, що обмежують їх швидкодію.

Внесені втрати високочастотних пристроїв показують ефективність передачі сигналів. Для ключів вносяться втрати визначаються тільки для включеного стану, коли відбувається передача сигналу. Вони виражаються через коефіцієнт передачі, вимірюваний в дБ, між вхідними та вихідними висновками перемикачів пристроїв. На практиці бажано, щоб внесені втрати мікромеханічних ключів були мінімальними.

Розв'язка входу від виходу визначається в момент відсутності передачі сигналу. Її мірою також є коефіцієнт між вхідними та вихідними висновками перемикача у вимкненому стані, тобто коли немає передачі сигналу. Велике значення цього коефіцієнта, що вимірюється в дБ, відповідає дуже малій зв'язок між входом і виходом пристрою що перемикається. Бажано, щоб у ключів цей коефіцієнт був максимальним. У мікросистемах значення цього коефіцієнта може зменшитися через виникнення зв'язку між механічними частинами та лініями передач, що викликає появу струмів витоку.

Послідовний опір. На практиці ключ часто включається послідовно з лінією передачі сигналу. Будь-який опір, внесений ключем під час передачі сигналу (у включеному стані), викликає зниження рівня сигналу. На низьких частотах такий вплив ключа можна виразити у вигляді послідовного опору, що грає роль під час проходження сигналу.

Напруга спрацьовування. Для всіх ключів, що працюють в автоматичних системах, необхідний сигнал управління, що координує їх стан (вкл / викл). Рівень напруги таких сигналів для різних ключів може сильно відрізнятися. У

сучасних електромеханічних ключах це напруга бажано знизити до рівня, на якому працюють інші компоненти схеми.

Термін служби для механічних перемикаючих пристроїв, до складу яких входять механічні частини, є досить важливою характеристикою. Поломки таких частин, викликані втомою матеріалу або несприятливими оточуючими умовами, знижують термін служби всієї системи.

Резонансна частота. Всі рухомі частини механічних ключів мають свою власну резонансну частоту, яку можна виразити через їх масу і коефіцієнт пружності. На цих частотах потенційна і кінетична енергії входять в резонанс, що обмежує максимальну швидкість перемикавання, але ніяк не впливає на частоту переданих сигналів.

Узгодження по фазі і амплітуді є важливою характеристикою багатоканальних ключів, оскільки вона визначається конструкцією всього пристрою і параметрами окремих каналів: їх довжиною і втратами в них. Тому, як правило, для кожного каналу визначаються свої фазові і амплітудні характеристики.

Незважаючи на те, що багато з мікромеханічних ключів володіють відмінними характеристиками - низькими внесеними втратами і високим коефіцієнтом розв'язки зазвичай аж до частоти декількох сотень МГц, вони мають дуже низьку швидкодію. Зазвичай час перемикавання таких ключів складає 2-50 мс, і вони розраховані тільки на кілька мільйонів перемикавань. Це обумовлено тим, що електромеханічні ключі здійснюють реальний розрив і з'єднання лінії передач всередині пристрою. Максимальна швидкодія таких ключів (їх швидкість перемикавання) визначається механічною резонансною частотою рухомих частин.

8.20 Електромагнітний мікрогенератор

Мікрогенератор складається з рухомої магнітної маси, встановленої на пружинах, яка переміщається відносно котушки під дією вібрації. У цьому випадку ЕРС задається таким рівнянням:

$$e = -N \frac{df}{dt} \quad (8.54)$$

де, e - це електрорушійна сила (ЕРС) в вольтах, f - магнітний потік, N - кількість витків котушки. Відносний рух між котушкою і магнітним полем викликає протікання струму в котушці [135]. У найпростішому випадку, коли котушка рухається в перпендикулярному магнітному полі постійної сили, максимальна ЕРС в котушці визначається рівнянням (8.54). Максимальна ЕРС на котушці задається рівнянням:

$$e = NBlv \quad (8.55)$$

де N - число витків в котушці, B - сила магнітного поля, l - являє собою довжину обмотки котушки ($2\pi r$), v - швидкість руху котушки через магнітне поле.

На практиці переміщення конструкції магніту є простішим у реалізації, оскільки це дозволяє уникнути підведення дротів. Є дві істотні переваги мікрогенератора з рухомим магнітом. Рухомий магніт прикріплений до пружини збільшить сейсмічну маса системи, і таким чином збільшить електричну потужність [136].

8.20.1 Аналітична модель

Схема простого електромагнітного генератора представлена на Рис. 16.1.

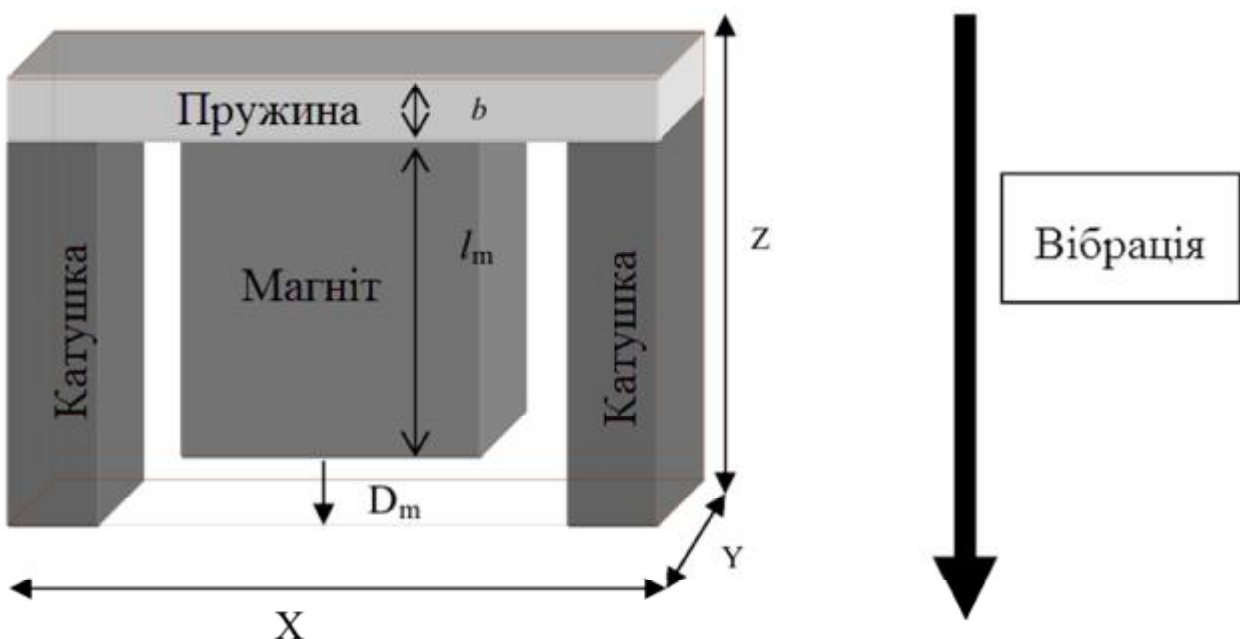


Рис. 8.32 Схема електромагнітного генератора [137]

На цьому етапі ми не будемо вдаватися в подробиці виготовлення такого пристрою, але розглянемо принципи роботи, щоб показати різні обмеження конструкції. У цій структурі передбачається, що котушка залишається нерухомою, а магніт рухається при наявності вібрацій. Оскільки магніт має більшу масу, ніж котушка, рух магніту є вигіднішим, ніж рух котушки. Механічна енергія залежатиме від рівня вібрації і прискорення, якому піддається пристрій. Максимальне зміщення - D_m визначається різницею між зовнішнім розміром генератора Z та товщиною пружини b і довжиною магніту l_m . Якщо припустити, що амплітуда вібрацій синусоїдальна, тоді $D_m = (Z - b - L_m)$, швидкість маси v може бути виражена наступною формулою:

$$v = \omega D_m \quad (8.56)$$

$$v = \omega (Z - b - L_m) \quad (8.57)$$

Потужність, що підводиться до активного навантаження, R_L , може бути визначена з наступної залежності:

$$P = \frac{1}{2} i^2 R_L \quad (8.58)$$

де i - струм, що тече через коло; R_L - опір навантаження. Формула для визначення індукованого струму є наступною:

$$i = \frac{e}{R_L + R_c} \quad (8.59)$$

У цьому рівнянні, R_c являє собою опір котушки, а e індукована електрорушійна сила (ЕРС) на котушці, яка визначається з наступних формул:

$$e = - \frac{df}{dt} \quad (8.60)$$

де $f = BA$, $dA = lds$, $df = BdA = Bl ds$.

Звідси, $e = \frac{\partial l s}{\partial t} \ddot{\phi} Bl = v Bl = \omega D_m Bl$, тоді рівняння енергії набуде вигляду:

$$P = \frac{R_L \omega e \dot{\phi}^2}{2 C (R_C + R_L) \phi} \quad (8.61)$$

$$P = \frac{R_L (vBl)^2}{2(R_C + R_L)^2} \quad (8.62)$$

Опір котушки може бути розрахований з наступної залежності:

$$R_C = \frac{l_c r}{\frac{1}{4} \rho d_1^2} \quad (8.63)$$

де ρ - густина матеріалу котушки.

8.20.2 Моделювання магнітного поля електромагнітного мікрогенератора

Концепція магнітного поля електромагнітного генератора показана на рис. 8.33. Вона складається з постійного магніту, який прикріплений до пружини і котушки.

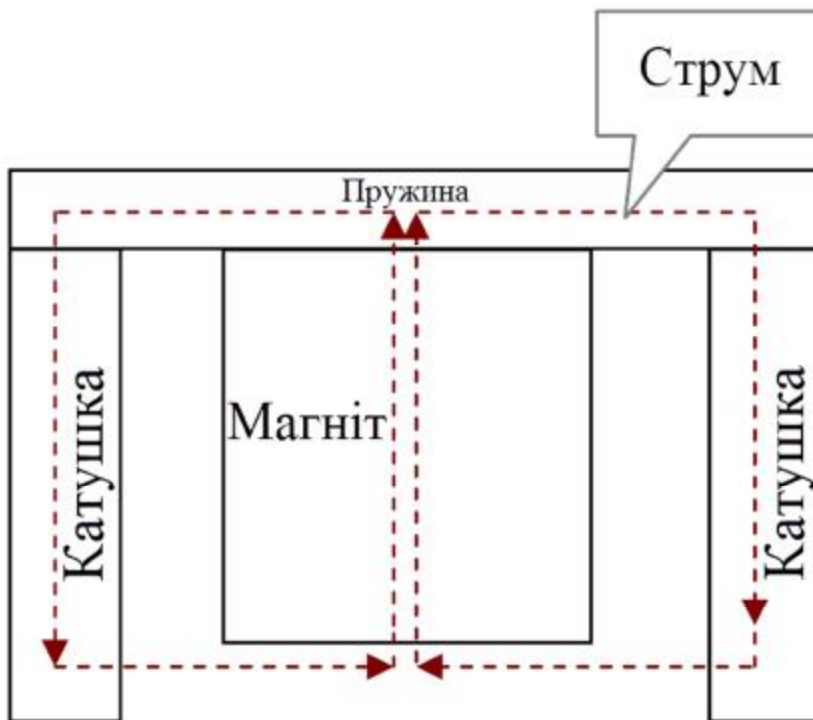


Рис. 8.33 Шлях магнітного потоку в електромагнітному генераторі [138]

Постійний магніт можна змоделювати за допомогою моделі як на рис. 8.34. Система координат знаходиться в центрі по відношенню до магніту.

Нехай (x_1, x_2) , (y_1, y_2) і (z_1, z_2) це позиції країв магніту по відношенню до осей x , y , z , як показано на рис. 8.34 та рис. 8.35 [138].

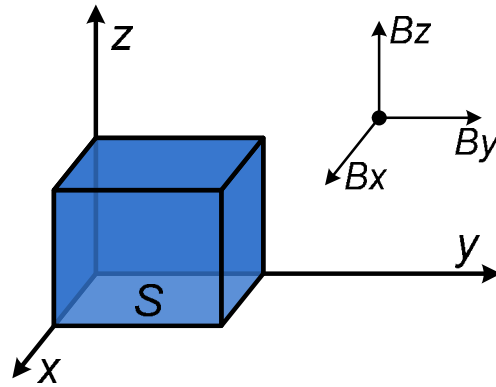


Рис. 8.34 Прямокутна геометрія магніту

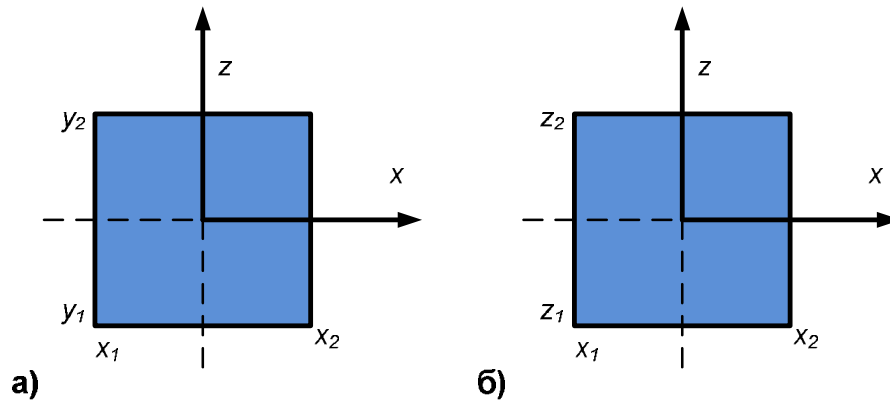


Рис. 8.35 Поперечний переріз магніту: (а) площина x - y , (б) площині x - z

Постійний магніт повинен рухатися в напрямку z , так що магнітний потік буде діяти на котушку в площині x - y . Таким чином, складові векторів щільності магнітного потоку прямокутного магніту на загальній поверхні зовнішнього магніту будуть B_x і B_y , і вони визначаються з наступних рівнянь [138]:

x - компонента:

$$B_x(x, y, z) = \frac{\mu_0 M_S}{4\pi} \mathbf{\hat{a}} \mathbf{\hat{a}} (-1)^{k+m} \ln[F(x, y, z, x_m, x_1, y_1, y_2, z_k)] \quad (8.64)$$

де

$$F(x, y, z, x_1, x_m, y_1, y_2, z_k) = \frac{(y - y_1) + [(x - x_m)^2 + (y - y_1) + (z - z_k)^2]^{\frac{1}{2}}}{(y - y_2) + [(x - x_m)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_k)^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (8.65)$$

y - компонента:

$$B_y(x, y, z) = \frac{\mu_0 M_S}{4\rho} \sum_{k=1}^2 \sum_{m=1}^2 (-1)^{k+m} \ln[H(x, y, z, x_1, x_2, y_m, z_k)] \quad (8.66)$$

де

$$H(x, y, z, x_1, x_2, y_m, z_k) = \frac{(x - x_1) + [(x - x_1)^2 + (y - y_m) + (z - z_k)^2]^{\frac{1}{2}}}{(x - x_2) + [(x - x_2)^2 + (y - y_m)^2 + (z - z_k)^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (8.67)$$

Рівняння (8.64) і (8.66) використовуються для прямокутного магніту. В якості матеріалу магніту часто використовується неодим-залізо-бор (NdFeB) у зв'язку з тим, що цей матеріал має високу щільність магнітного потоку, яка дорівнює 1,4 Тесла.

8.20.3 Обмеження при проектуванні мікрогенератора

Аналіз конструкції електромагнітних мікрогенераторів дав змогу виявити ряд обмежень.

1. Вихідна потужність прямо-пропорційна масі. Це не одразу видно з рівнянні (8.62). Тим не менш, збільшення маси магніту дозволить збільшити щільність магнітного поля (В), і це призведе до значного збільшення потужності

2. Вихідна потужність пропорційна квадрату частоти збудження коливальних. Це впливає безпосередньо з рівняння (8.62), тому що вхідна частота входить в обчислення швидкості генератора (v), як це видно з рівняння (8.57).

3. Вихідна потужність пропорційна квадрату довжини котушки. Це впливає з рівняння 2.9. Збільшення довжини котушки призведе, до збільшення вихідної потужності.

4. Вихідна потужність обернено пропорційна квадрату опору котушки. Знову ж таки, це впливає з рівняння (8.62). При збільшенні опору котушки відбувається зниження вихідної потужності.

8.20.4 Конструкція електромагнітного мікрогенератора

На рис. 8.36 показана схема електромагнітного мікрогенератора. Система складається з двох частин: верхня - масового пружинна і нижня - котушка.

Вертикальну поляризацію постійного магніту утворює інерційна маса прикріплена до центру пружини. Котушка складається з ряду мідних проводів, які намотані навколо пластикового корпусу.

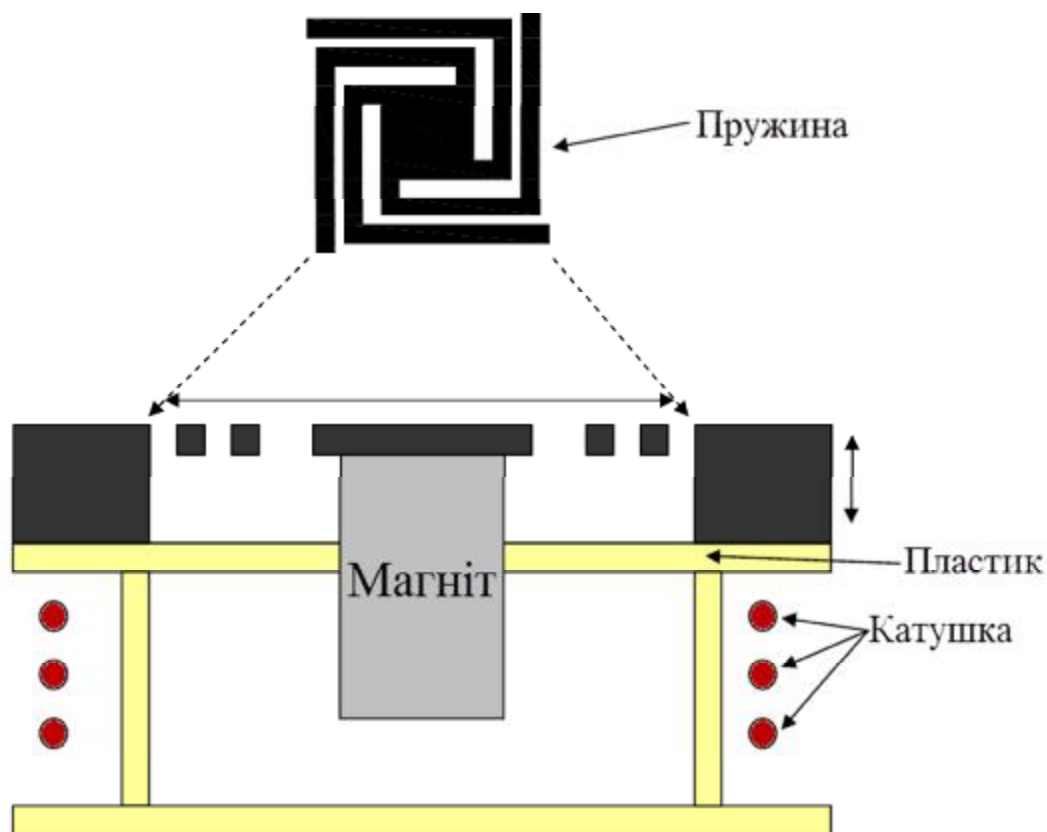


Рис. 8.36 Схема мікрогенератора в розрізі [137]

Потенційними перевагами конструкції як на рис. 8.36 є:

1. Пружина консольного типу забезпечує більші відхилення і лінійні переміщення пружини, а також зменшує затухання коливань.
2. Рухомий магніт прикріплений до середини пружини забезпечує збільшення інерційної маси мікрогенератора.
3. Для отримання великої кількості витків котушки, можна використати спіральні трубки.

8.20.5 Принцип роботи мікрогенератора

Принцип дії пристрою полягає в наступному: коли корпус вібрує, магніт під дією сейсмічної маси переміщається відносно котушки. Це відносне зміщення, має синусоїдальну амплітуду, і викликає магнітний потік у котушці. Це, в свою чергу, індукує напругу на обмотці котушки у відповідності з

законом індукції Фарадея. Кількість електроенергії, що виробляється залежить від сили магнітного поля, швидкості відносного руху і кількості витків котушки. Напруга на котушці визначається законом Фарадея з рівнянні (8.67).

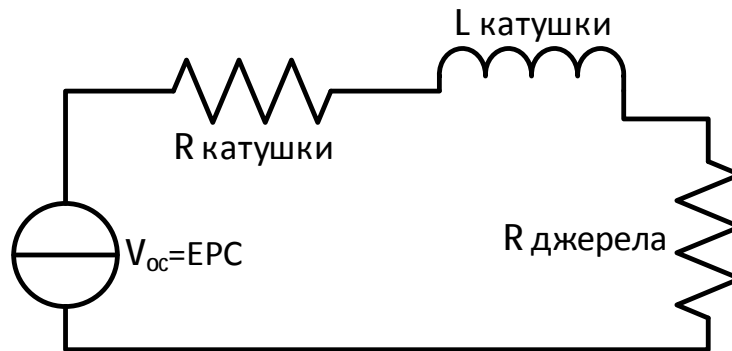


Рис. 8.37 Спрощена еквівалентна модель схеми електромагнітного мікрогенератора

Еквівалентна схема мікрогенератора представлена на рис. 8.37 показує схему розрахунку електроенергії, що виробляється.

8.20.6 Теоретичні дослідження конструкції плоскої пружини

Передбачається, що консольні балки в плоскій пружині є прямими і мають прямокутний поперечний переріз. Як показано на рис. 8.38, товщина пружини по відношенню до ширини є не дуже великою. Всі навантаження і реакції є перпендикулярні до осі балки і лежать в поздовжній площині симетрії.

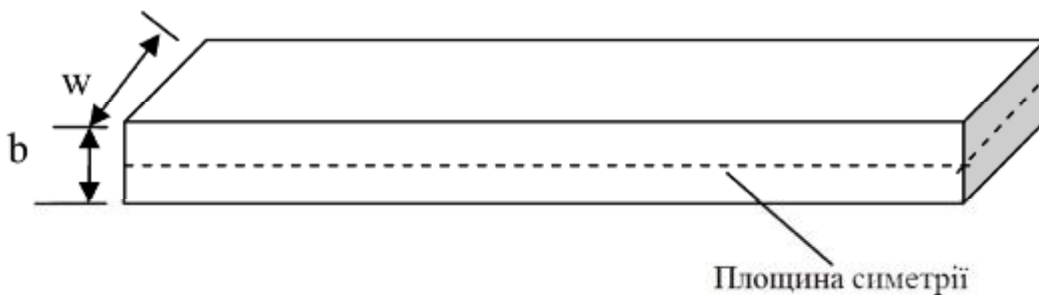


Рис. 8.38 Консольна балка у вихідному положенні

Напруження консольної балки $Stress(T) = \frac{F}{A}$, де F прикладена сила, A - площа поперечного перерізу балки, яка в результаті деформації прикладеної сили, виражається як:

$$Strain(\epsilon) = \frac{\Delta l}{l},$$

де D - розширення, l - початкова довжина балки. Так відношення деформації і напруження консольної балки може бути виражена як [139]:

$$E = \frac{T}{e}$$

де E - модуль Юнга матеріалу балки. Як показано на рис. 8.38, для балки з прямокутним поперечним перерізом, з шириною w і товщиною b момент інерції дорівнює:

$$I = \frac{wb^3}{12}$$

Статичні прогини D визначаються з основного рівняння пружинного маятника:

$$D = \frac{F}{k} \quad (8.68)$$

де F - прикладена сила, k - постійна пружини. Відхилення консольної балки для випадку зосередженої сили F , прикладеної до вільного кінця балки, як показано на рис. 8.39 визначається з рівняння:

$$D = \frac{Fl^3}{3EI} \quad (8.69)$$

де l - довжина променя, I - це другий момент площі поперечного перерізу балки, а E - модуль Юнга матеріалу балки.

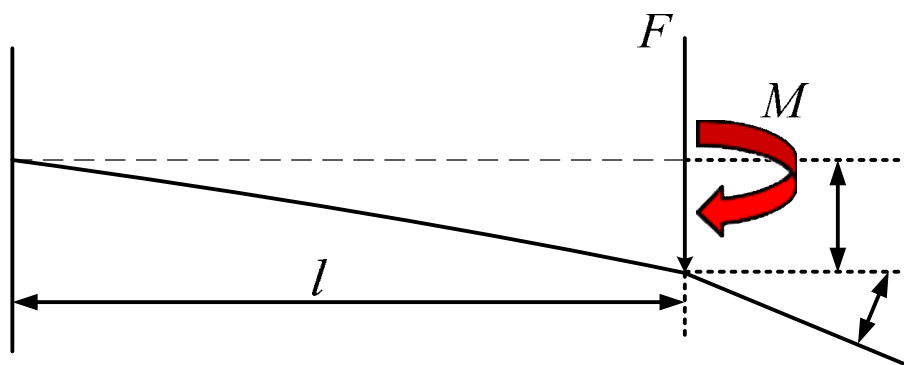


Рис. 8.39. Основна схема відхилення консольної балки з зосередженою силою F на вільному кінці балки і моментом M , прикладеним до вільного кінця балки

Для пружини із чотирьох балок жорсткість може бути визначена із залежності [140]:

$$k = \frac{4Eb^3w}{l^3} \quad (8.70)$$

де b, w і l це товщина, ширина і середня довжина балки пружини; E - модуль пружності матеріалу пружини. Підставляючи рівняння (8.70) в рівняння $D = \frac{Fl^3}{3EI}$ (8.69) ми визначимо статичний прогин для чотирьох променів пружини.

$$D = \frac{Fl^3}{4Eb^3w} \quad (8.71)$$

8.20.7 Коливання системи маса-пружина

На рис. 8.40 показана типова система маса-пружина, яка складається з маси m , яка закріплена на пружині з жорсткістю k і коефіцієнтом демпфірування c . Передбачається, що маса буде переміщатися тільки в напрямку x , а маса пружини є дуже малою в порівнянні з масою m і не береться до уваги. Якщо маса збуджується зовнішньою силою $F(t)$, то до даної системи можна застосувати другий закон Ньютона [141].

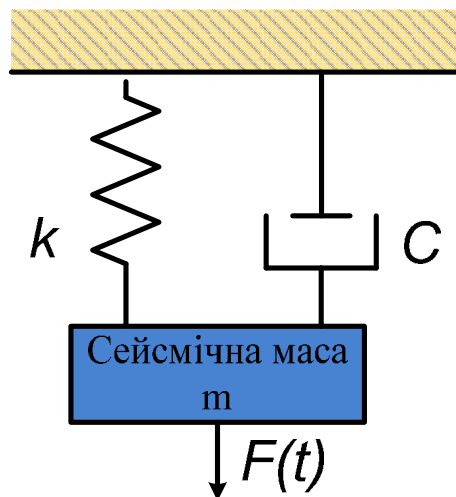


Рис. 8.40 Пружина з одним ступенем свободи

Власна частота або резонансна частота системи визначається з виразу:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (8.72)$$

8.20.8 Вибір матеріалу

Велика сейсмічна маса і висока резонансна частота плоскої пружини залежить від властивостей матеріалу. При порівнянні різних матеріалів необхідно брати до уваги такі основні властивості, як модуль Юнга (E), який визначає жорсткість пружини. В таблиці 8.4 наведені властивості матеріалів, що використовувалися для мікромеханічних пружин. Як видно з таблиці *SU-8*, арсенід галію ($GaAs$) і мідь (Cu), мають менший модуль Юнга, ніж кремній. Відповідно пружина з кремнію дасть змогу з тією самою сейсмічною масою отримати більше відхилення при дії такої самої сили. Також ці матеріали мають дуже низьку межу текучості в порівнянні з межею текучості кремнію. Таким чином для пружних елементів мікрогенератора найкраще використовувати кремній в якості найкращого матеріалу, який має як хороші механічні властивості, так і високу межу текучості. При кімнатній температурі і при прикладеному навантаженні, кремній може бути пружно-деформований. Крім того кремній є відносно недорогий матеріал, і має доступні стандартні процеси виготовлення.

Таблиця 8.4

Властивості матеріалів, що використовувалися для механічних пружин

Матеріал	Модуль Юнга (ГПа)	Коефіцієнт пуассона	Густина (гр/см ³)	Границя текучості (МПа)
Кремній	190	0,22	2,30	7000
Арсенід галію	75	0,31	5,30	2000
Мідь	110	0,35	8,94	69
SU-8	3	0,22	1,19	179,4

8.21 Електростатичні мікродвигуни

Для плоского конденсатора накопичена енергія U може бути розрахована за формулою:

$$U = \frac{CV^2}{2} \quad (8.73)$$

де C - ємність і V – напруга між пластинами конденсатора.

Коли пластини конденсатора переміщуються назустріч одна одній, робота, що здійснюється силою взаємодії між ними, може бути розрахована, як зміна U залежно від зміни відстані (x). Сила розраховується за формулою:

$$F_x = V^2 \frac{dC}{dx} / 2 \quad (8.74)$$

Існує кілька варіантів реалізації електростатичних актюаторів на основі плоско-паралельних конденсаторів. Проте для генерації великих сил, які будуть здійснювати корисну роботу такого пристрою, необхідно, щоб при зміні відстані сильно змінювалися ємності. При проектуванні електростатичних гребеневих мікродвигунів це і є основною вимогою (рис. 8.41).

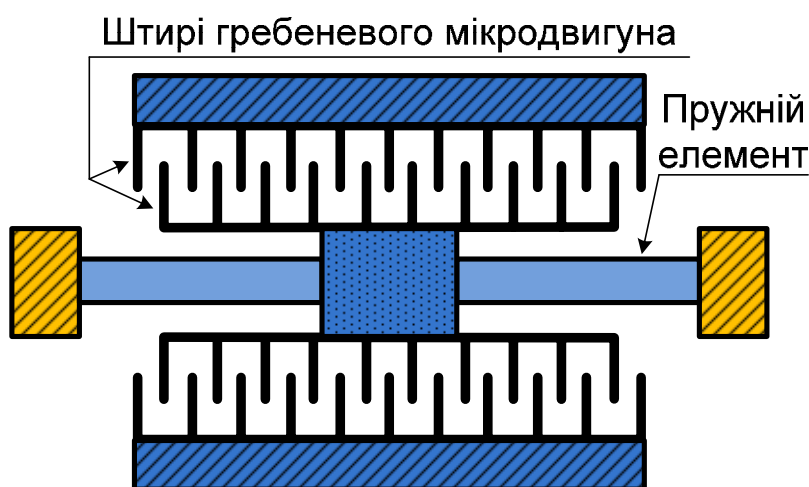


Рис. 8.41 Гребеневий мікродвигун

Гребеневі мікродвигуни складаються з великої кількості зустрічно-стрижневих штирів (рис. 8.41). При прикладанні напруги, з'являється сила взаємодії між штирями і вони починають рухатися. Збільшення ємності пропорційно кількості штирів, таким чином, для генерації великих сил, потрібна велика кількість штирів. Однією з потенційних проблем такого пристрою буде те, що якщо поперечна відстань між штирями не однакова з обох сторін, (або якщо пристрій поламано), то можливий рух штирів під прямим кутом до правильного напрямку і з'єднання їх один з одним. Гребеневі двигуни особливо поширені серед пристроїв, отриманих поверхневою мікрообробкою.

Двигуни кочення названі так за дією розгойдування, покладеному в основу їх принципу роботи. На рис. 8.42 (а, б) показана конструкція двигуна кочення, отриманого за допомогою технології поверхневої мікрообробки. Ротор – це круглий диск. Під час роботи знизу розташовані послідовно електроди, один за одним, включають і вимикають. Диск послідовно притягається до кожного електроду; край диска контактує з діелектриком, розташованим над електродами. У такій манері він повільно обертається по колу; роблячи один оборот навколо своєї осі сукупністю кількох змін напруги на статорі.

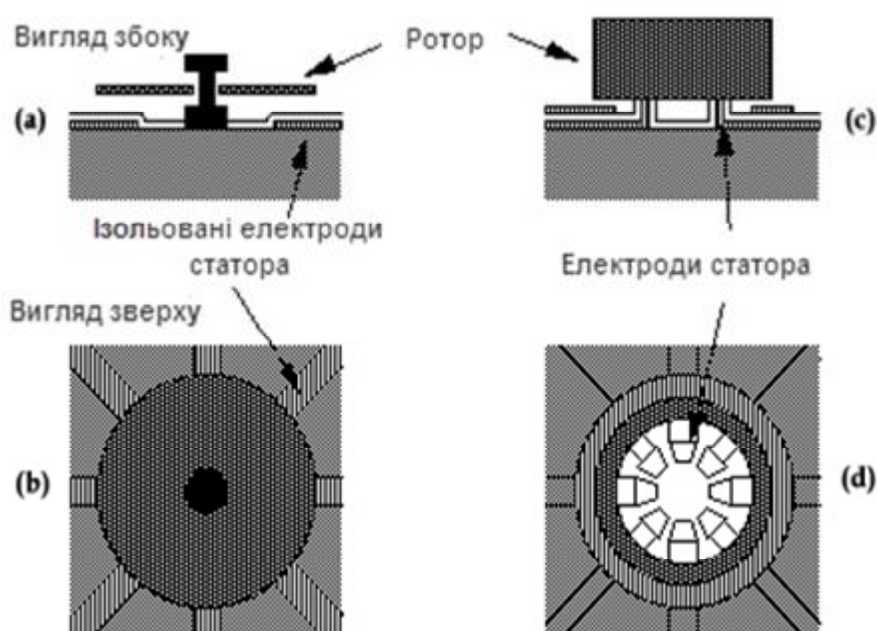


Рис. 8.42 Конструкція двигуна кочення

Інша конструкція двигуна кочення представлена на рис. 8.43. Ротор, що знаходиться всередині статора, формує вісь двигуна. Електричне поле розгойдує ротор всередині статора, і тертя обертає ротор. Проблеми можуть виникнути, якщо швидко зноситься ізоляція на електродах статора, тоді відбудеться зчеплення або злипання з ротором.

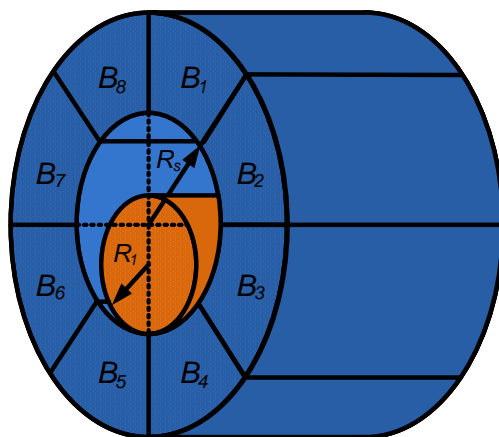


Рис. 8.43 Двигун кочення

Проблема моторів отриманих поверхневою мікрообробкою – це їх дуже маленькі вертикальні розміри, тому так важко досягти більшої зміни ємності при русі ротора. Для подолання цих проблем можна використати ЛІГА технологію.

1) Переваги:

- вигідність пропорційного зменшення розмірів
- легкість мініатюризації

2) Недоліки

- для більшості електростатичних актюаторів частинки пилу і поверхневі дефекти можуть бути причиною поломки внаслідок малих повітряних зазорів
- висока напруга
- для двигунів обертання - короткий термін життєдіяльності через тертя.

8.22 Гідравлічні актюатори

Гідравлічні мікроактюатори мають значний потенціал, оскільки вони можуть передавати досить багато енергії від зовнішнього джерела по дуже вузьким трубкам. Цей факт можна використовувати в таких місцях, як наконечник катетера, змонтованого мікрохірургічного інструменту.

Для виробництва мікротурбін може використовуватися LIGA технологія (рис. 8.44). Ця мікротурбіна забезпечує енергією ріжучий мікроінструмент.

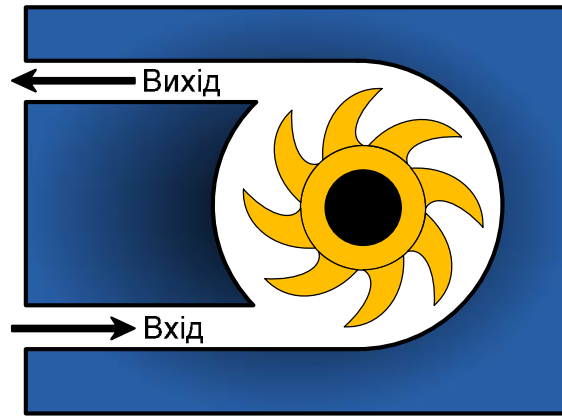


Рис. 8.44 Гідравлічна мікротурбіна

До особливостей гідравлічних мікроактюаторів можна віднести те, що він має досить великі розміри, високий рівень вихідних сил і може мати вкрай низьке тертя.

Перші роботи з мікронасосів були написані в 1970-і роки, а розробки на основі мікротехнологій були розпочаті в 1980-і роки. МЕМС на основі мікронасосів були розроблені в 1990-і роки. Мікронасос є основним компонентом системи постачання лікарських засобів, який забезпечує механізм приведення в дію для доставки питомого об'єму терапевтичних агентів / ліків з резервуара. Вимоги, які є важливими у доставці ліків включають мінімальні витрати в порядку 10 мкл в хвилину або більше, невеликі розміри і високу надійність [142]. Зазвичай мікронасос складається з таких компонентів: діафрагми мембрани, камери приводу, мікроканалів, мікроклапанів, входу, виходу.

8.22.1 Класифікація мікропомп

Причиною, чому зменшені насосні пристрої називають МЕМС системами, це те, що їх виготовляють за допомогою технології мікрообробки [143]. Використання такої технології дозволяє створювати деталі, що за розмірами рівні близько 1 мм. Потреба в таких деталях існує у різних галузях. Так, у медицині їх застосовують, до прикладу, для кардіостимуляторів. З точки зору авіаційної промисловості, мініатюрні деталі потрібні для систем, котрі дозволяють виготовлення приладів, метою яких є контроль потоків повітря та рідин. Ще однією галуззю промисловості, де знайшли застосування МЕМС є

автомобілебудування, а також, охоронні системи. Перевагою застосування технології є надійність та зменшення витрат при серійному виробництві[144].

Розробка технологій мікронасосів внесла варіації до специфікації, а вимоги до системи породили різні типи мікронасосів, які будуть розглянуті в цьому розділі, в тому числі їх принципи роботи.

В останні роки найбільш важливим розвитком MEMS і NEMS в біомедицині є система мікрогідродинамічної трансдермальної доставки лікарського засобу (англ. TDD - transdermal drug delivery). Такі системи мають справу з рухом фармацевтичних сполук через шкіру, щоб досягти великого кола кровообігу для подальшого розподілу в тілі людини. Схематичне зображення трансдермальної системи зображено на рисунку рис. 8.45. Системи доставки лікарських речовин складаються з мікронасосів, мікроголок, резервуару, датчиків мікропотoku, датчика кров'яного тиску та потрібної електронної схеми для необхідних операцій.

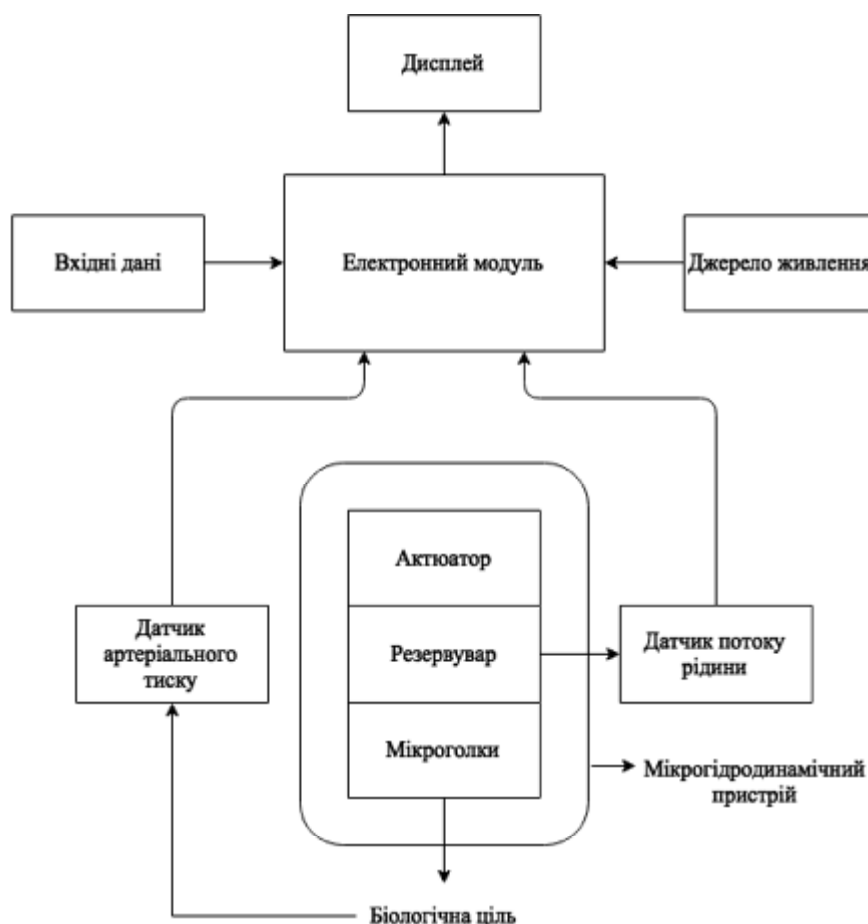


Рис. 8.45 Схематичне зображення трансдермальної системи доставки ліків

Мікронасоси можна розділити на дві категорії: один тип має механічні з'єднання, що рухаються, і відомий як механічний мікронасос; інший - не має рухомих частин і відомий як немеханічний мікронасос (*таблиця 8.5*)

Привід є необхідною частиною мікронасоса, яка перетворює енергію в рух. Він використовується для забезпечення зусилля для потоку текучого середовища в мікронасосів. Привід бере енергію від електрики, тепла, тиску рідини, тиску повітря і перетворює його в якийсь рух. У більшості мікронасосів, описаними в літературі, приведений в дію диск кріпиться за допомогою мембрани, яка використовується для передачі текучого середовища.

Таблиця 8.5

Класифікація мікропомп

Класифікація мікропомп	
Механічні	Немеханічні
Електростатичні	Магнітогідродинамічні
П'єзоелектричні	Електрогідродинамічні
Електромагнетичні	Електроосмотичні
Термопневматичні	Електричного змочування
Ефекту пам'яті форми	Типу бульбашки
Біметалеві	Електрохімічні

8.22.2 Механічні мікронасоси

Мікропомпи, основою роботи яких є механічне зміщення.

Вони використовують рух твердого тіла (такого як шестерні або діафрагми) або рідини, щоб генерувати різницю тисків, необхідну для переміщення текучого середовища. Найбільш поширеними мікропомпами механічного зміщення є мембранні насоси. Їх механізми приведення в дію різні. Їм потрібен фізичний привід для перекачування і вони мають рухомі частини. Актюатор повинен запустити себе за допомогою мертвого об'єму (V_0) в камері. Потік текучого середовища досягається за рахунок коливальних і обертальних сил тиску. Коливання створюють тиск (ΔP), який є функцією від ударного

об'єму ΔV всередині камери і вводиться в дію за допомогою актюатора. Ступінь стиснення визначається як:

$$\varepsilon = \frac{\Delta V}{V_0} \quad (8.75)$$

Приклади механічних мікронасосів включають п'єзоелектричні, електростатичні, термопневматичні, електромагнітні, біметалеві і сплаву з ефектом пам'яті форми [144].

8.22.3 Електростатичні мікронасоси

Вони використовують електростатичні сили в їх механізмі приведення в дію. Різниця тисків, індукованого мембранного прогину в насосній камері змушує рідину в резервуарі текти в мікроканали. Електростатична сила визначається як електрична сила тяжіння і відштовхування викликаного електричним полем, де однойменні заряди відштовхуються, різнойменні заряди притягуються. Електростатична сила, що наноситься на електростатичні пластини може бути виражено рівнянням:

$$F = \frac{dW}{dX} = \frac{1}{2} \left(\varepsilon A \frac{V^2}{X^2} \right), \quad (8.76)$$

де F є електростатичною силою тяжіння, W накопиченою енергією, ε - діелектричною проникністю, A – це площа поверхні електродів, X - відстань між електродами і V - прикладена напруга. виготовлення цих механізмів на електронному чіпі, як правило, вважається легким, але електростатичний привід має тільки невеликий хід і прогин діафрагми можна легко контролювати за допомогою прикладеної напруги. Схематичне зображення електростатичної помпи зображено на рис. 8.46.



Рис. 8.46 Схематичне зображення електростатичної мікропомпи

Основні переваги електростатичних мікронасосів: низьке енергоспоживання і швидке реагування [145].

8.22.4 П'єзоелектричні мікронасоси

Перетворення механічної енергії в електричний сигнал (напруга), і навпаки, називається п'єзоелектричним ефектом. Такі мікронасоси складаються з корпусу, мембрани й найважливіше - п'єзорезистивного елемента [146].

Стрес, який застосовується до таких матеріалів буде змінювати відстань між позитивними і негативними зарядами, викликаючи поверхневу поляризацію. П'єзоелектричний ефект відноситься до зв'язку між механічною деформацією і електричною поляризацією.

$$\varepsilon = S^E \sigma + dE, \quad (8.77)$$

де S^E - тензор напруг і деформації, σ - тензор п'єзоелектричного заряду і E - електричне поле. П'єзоелектричний механізм знаходить широке застосування в зворотно-поступальних рухах мікронасосів доставки лікарських засобів та інших біомедичних засобах. На рисунку рис. 8.47 зображено схематичне зображення конструкції п'єзоелектричної мікропомпи.

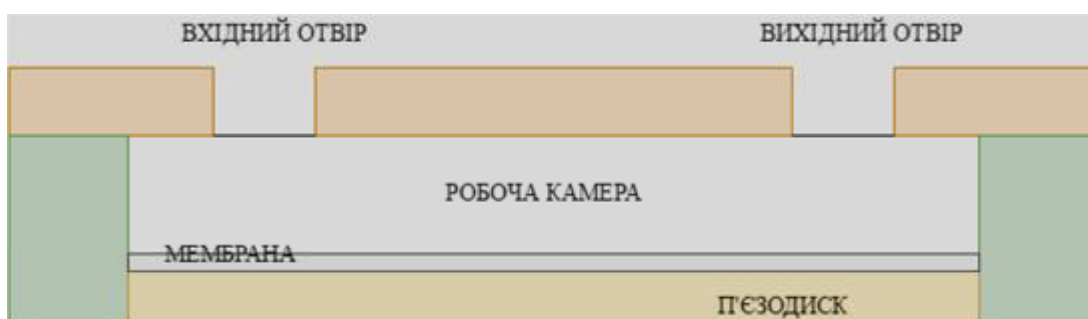


Рис. 8.47 Схематичне зображення конструкції п'єзоелектричної мікропомпи

Основні переваги п'єзоелектричних приводів включають в себе швидку реакцію і просту структуру. Їх виготовлення, тим не менш, є складним, а саме, це обробка п'єзоелектричних матеріалів [146].

8.22.5 Термопневматичні мікронасоси

У цих типах мікронасосів, камера сповнена повітря періодично і по черзі розширюється і стискається за допомогою пари нагрівача і охолоджувача. Періодична зміна в обсязі камери дає мембрані регулярний імпульс, тому

рідина може витікати. На рис. 8.48 зображено схематичне зображення термопневматичного мікронасоса.



Рис. 8.48 Схематичне зображення конструкції термопневматичного мікронасоса

Цей тип створюється за рахунок навантаження і зміщення мембрани, це дає змогу для рідини бути переданою в центр диска, що обертається за допомогою теплового розширення повітря. Термопневматичні насоси легко виготовити, оскільки вони є структурою без рухомих компонентів і саме так, тепла енергія надходить в насос через периферію інфрачервоного обладнання, що дозволяє накачування, коли диск знаходиться в ротатії.

Підвищення тиску в рідині виражається у вигляді:

$$\Delta P = E \left(\beta \Delta T - \frac{\Delta V}{V} \right) \quad (8.78)$$

де ΔP - це зміна тиску, E - об'ємний модуль пружності, β - коефіцієнт теплового розширення, а ΔT - підвищення температури; $\frac{\Delta V}{V}$ - зміна обсягу у відсотках [147].

8.22.6 Мікропомпи з ефектом пам'яті форми

Сплави з ефектом пам'яті форми (англ. Shape Memory Alloy) є металами, які показують дві унікальні властивості, такі як псевдопружність і пам'ять форми.

Діафрагма таких мікронасосів зроблена в основному з титану / нікелевого сплаву ($TiNi$), який є вельми відповідним матеріалом для приведення в дію мікропомпи, через його властивість швидко повертатись у попереднє

становище після деформації і зусиль можливості приведення в дію для великих швидкостей накачування і високих робочих тисків [148].

На рис. 8.49 зображено схематичне зображення конструкції мікропомпи.

Його висока вихідна робота на одиницю об'єму робить його придатним в розмірах для МЕМС застосувань. Вони можуть змінювати свою форму при впливі на стимул. Ефект пам'яті форми включає в себе перетворення фаз між двома твердими фазами: аустенітна фаза (при високих температурах) і фази мартенситу (при низьких температурах) [149].



Рис. 8.49 Схематичне зображення конструкції мікропомпи з ефектом пам'яті

Основні переваги мікронасосів це те, що вони мають високе відношення сили до обсягу, здатність відновлювати напругу трансформації і деформації при нагріванні і охолоджувальних процесах, високою демпфуючою здатністю, хімічну стійкість і біосумісність. Їх недоліками є необхідність в конкретних матеріалах, відносно високий рівень споживання електроенергії і можливість неконтрольованої деформації внаслідок температурної чутливості [150].

8.22.7 Біметалеві мікропомпи

Біметалічні функції приведення в дію по-різному функціонують для різних коефіцієнтів теплового розширення (КТР) матеріалів. Мембрана біметалевого мікронасоса виготовлена з двох різних металів, що мають різні КТР.

Об'єднуючий механізм різнорідних матеріалів і їх схильність до змін температури викликають температурні напруги, так як коефіцієнти металів розрізняються, забезпечуючи тим самим спосіб для приведення в дію.

На рис. 8.50 зображено схематично конструкцію біметалевої мікропомпи.

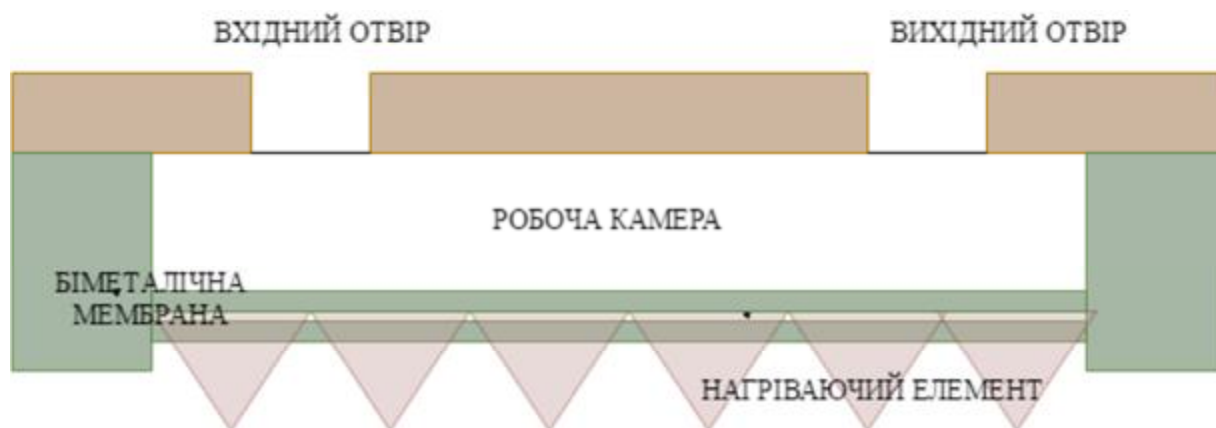


Рис. 8.50 Схематичне зображення конструкції біметалевої мікропомпи

Реалізація надзвичайно проста, але відхилення діафрагми може бути досягнуто тільки за рахунок теплового чергування. Ключовою перевагою є те, що біметалічні мікронасоси вимагають відносно низьких напруг, ніж інші типи мікронасосів. Їх основним недоліком є їх непристосованість до високої частоти роботи [151].

8.22.8 Електромагнетичні мікронасоси

Типовий магнітний мікронасос має камеру з впускним і випускним клапанами, гнучкою мембраною, постійним магнітом і набором приводних котушок. Або магніт або набір котушок може бути прикріплений до мембрани. На рис. 8.51 показано схематичне зображення помпи. Сила магніту може змінюватися шляхом зміни електричного струму через котушки. Струм, який проходить через котушки створює магнітне поле, яке створює тяжіння або відштовхування між котушками і постійним магнітом, який забезпечує зусилля приводу. Електромагнітне приведення в дію здійснюється за допомогою соленоїда плунжера. Зусилля, що розвивається приводом залежить від прикладеного струму і частоти обертання [152].

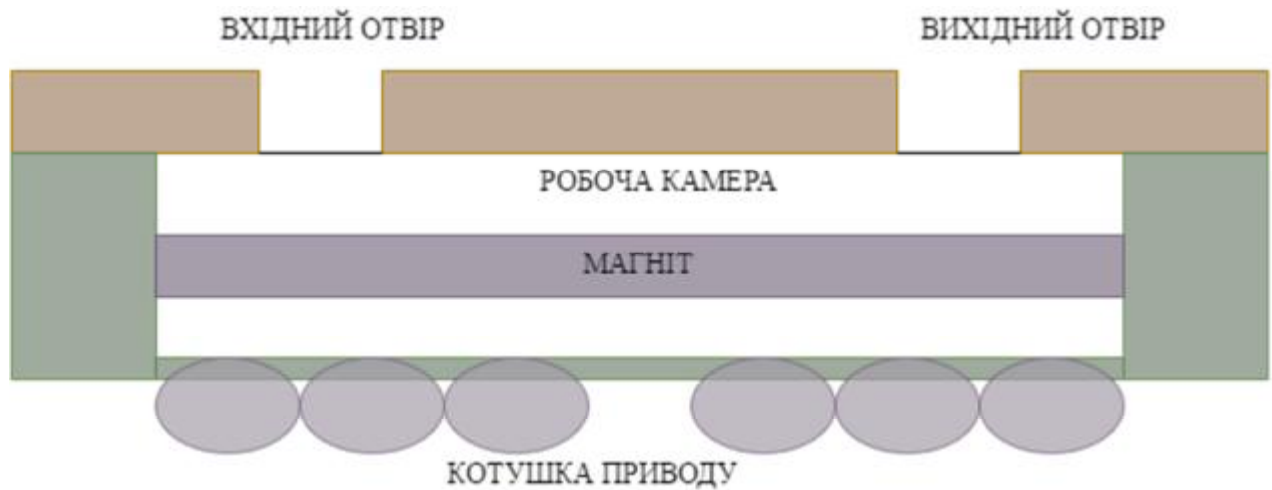


Рис. 8.51 Схематичне зображення конструкції електромагнетичної мікропомпи

Їх основними функціями є високе енергоспоживання і тепловиділення. Їх недоліком є складність в мініатюризації, завдяки розміру необхідної котушки соленоїда. Також недоліком є інтеграція магнітів, сердечників або мікрокотушки для компактності і малих розмірів [153].

8.22.9 Немеханічні мікронасоси

Цей тип насоса має перетворити специфічну немеханічну енергію (електроосмотичний, електрогідродинамічний, магнітогідродинамічний, електрозмочування і т.д.) в кінетичний імпульс для приводу зразка рідини в мікроканали. Немеханічні насоси можуть бути додатково класифіковані як електричні, хімічні або магнітні. Електро- і магнітокінетичний мікронасоси перетворюють електричну і магнітні енергію в рух рідини. Насос працює безперервно, тому результуючий потік, як правило, є постійним / стійким. Електрокінетичні мікронасоси часто використовують електричне поле, щоб витягнути іони всередині каналу накачування, в свою чергу, захоплюючи за собою рідини передачею імпульсу через в'язкості.

Магнітно-кінетичні мікронасоси зазвичай використовують силу Лоренца від об'ємної рідини для приводу потоку мікроканалу. Динамічні насоси зазвичай не мають клапанів; вони отримують спрямування в залежності від спрямованості напрямку прикладеної сили [154].

8.22.10 Магнітогідродинамічні насоси (МГД)

МГД концепція мікронасосів є новою. Серед найбільш ранніх було розроблено модель в 1999 році. Такі мікронасоси використовували принцип сили Лоренца, що діє на рухомі заряди в рідині. МГД відноситься до потоку електропровідної рідини в електричному і магнітному полях. Типова структура МГД мікронасосів досить проста; мікроканали, дві стіни, обмежені електричним полем, котре генерує електроди і двох стін, обмеженими різнополярними магнітами, генеруючих магнітне поле. Сила Лоренца є джерелом рушійної сили; вона перпендикулярна як електричному так і магнітному полям [155].

На рис. 8.52 зображено схематично конструкцію помпи.

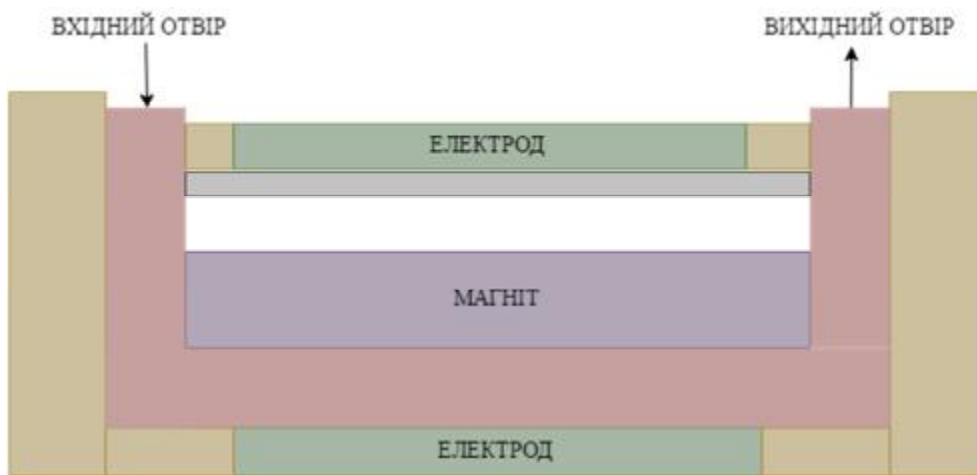


Рис. 8.52 Схематичне зображення МГД мікропомпи

МГД тиск мікронасосів і швидкість потоку є:

$$\Delta P = J_y B_x L \quad (8.79)$$

$$Q = |J_y B_x| \frac{\pi r_0^4}{8\eta} \quad (8.80)$$

J_y – щільність струму, B_x щільність магнітного потоку, L відстань між електродами r_0 одна половина гідравлічного діаметра мікроканалу, η в'язкість [156].

МГД мікронасоси можуть легко перекачувати більшість з водних розчинів, використовуваних в біологічних застосуваннях. Вони можуть перекачувати рідини з високою провідністю, тому придатні для медичних / біологічних застосувань. Їх основним недоліком є бульбашки, які генеруються

при іонізації; вони впливають на швидкість потоку. Генерація бульбашок зменшується шляхом зміни напрямку прикладеної напруги. Механізм змінного струму поліпшить їх продуктивність [157].

8.22.11 Електрогідродинамічні мікронасоси (ЕГД)

ЕГД насоси індукують потік через використання електростатичної сили на діелектричні рідини. Механізм, що дозволяє трансдукцію електричної енергії в механічну в ЕГД мікронасоса є електричне поле, що діє на індуковані заряди в рідині. На рис. 8.53 зображено схематичну будову ЕГД мікропомпи.

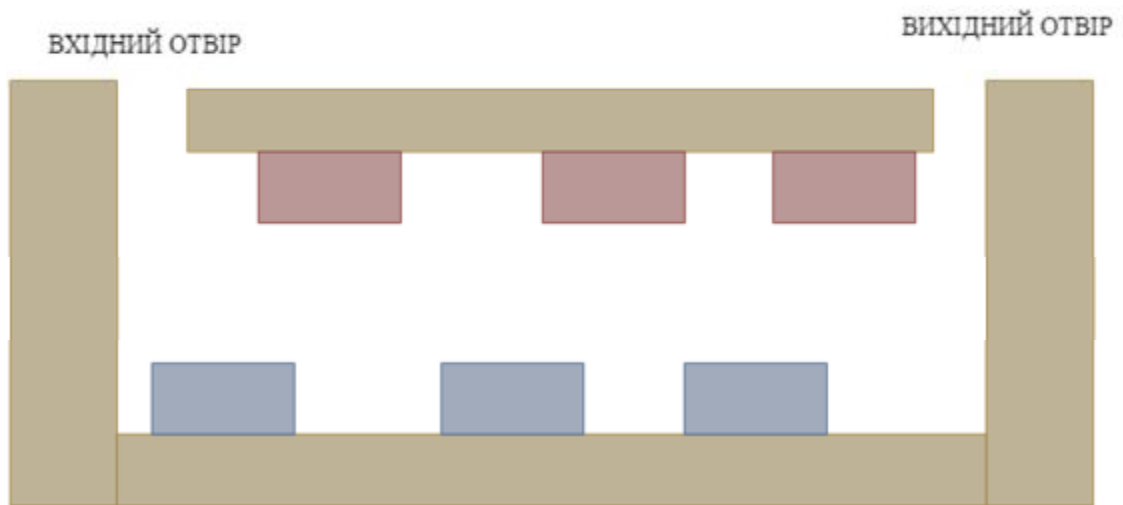


Рис. 8.53 Схематичне зображення ЕГД мікропомпи

Потік рідини маніпулює взаємодією електричних полів з зарядами, котрі вони індукують в рідині. Рідина повинна мати низьку провідність і бути діелектриком. Електрична щільність сили F_e тіла в результаті прикладеного електричного поля з величиною E :

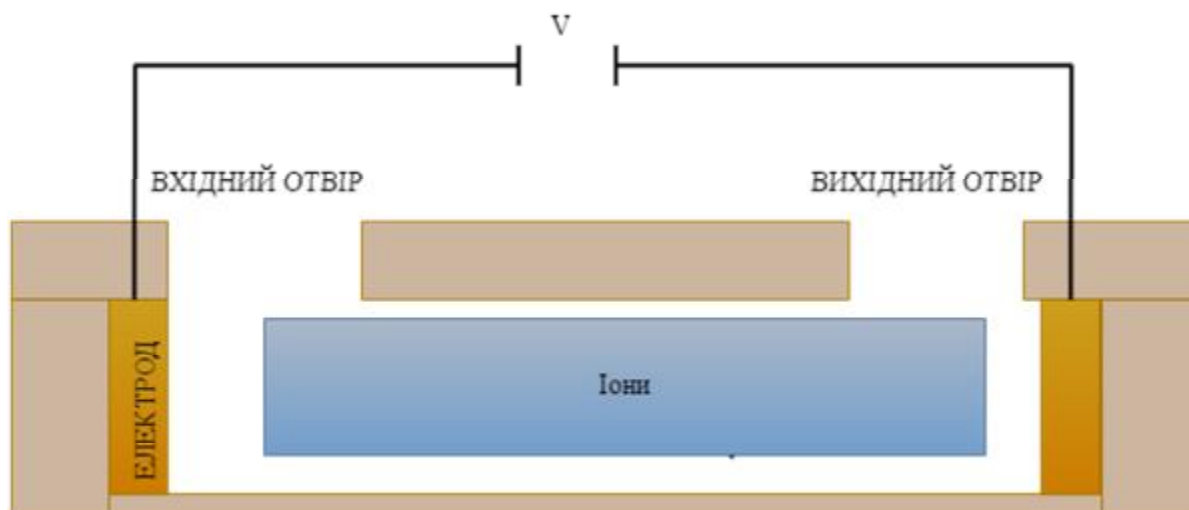
$$F_e = qE + P \cdot \nabla E - \frac{1}{2} E^2 \nabla \varepsilon + \frac{1}{2} \nabla \left[E^2 \left(\frac{d\varepsilon}{dT} \right) \rho \right], \quad (8.81)$$

де q - щільність заряду, ε - діелектрична проникність рідини, ρ - щільність рідини, T - температура рідини і P - вектор поляризації [158].

8.22.12 Електроосмотичні мікронасоси (ЕО)

Вони використовують поверхневий заряд, штучно розроблений за допомогою електродів або спонтанно розробленої, які генеруються, коли рідина входить в контакт з контактною стінкою. Негативно заряджені іони, які

генеруються в рідині, захищають поверхневий заряд. Вони можуть маніпулюватись за допомогою постійного або змінного електричного поля. Обидва були досліджені в більшості в останні роки [159]. На рис. 8.54. зображено схематичну будову електроосмотичної мікропомпи.



*Рис. 8.54 Схематичне зображення електроосмотичної мікропомпи
Електроосмотичні мікронасоси з постійним струмом*

Їх конструкція використовує кварцові або скляні капіляри з електродами, які забезпечують електричне поле вздовж стінок каналу. У каналах на основі діоксиду кремнію, коли електролітичний розчин вступає в контакт з стінками каналу, поверхневі силанольних груп спонтанно депротонують, залишаючи негативно заряджену границю. Застосування постійного електричного поля збільшує дію на рідині поблизу стінки капіляра за рахунок збільшення щільності заряду. Заряди реагують на електричне поле. Рух рідини всередині мікроканалу провокується грузлими силами. У розчині, індукований поверхневий заряд притягує позитивно заряджені іони і відштовхує негативно заряджені іони. Подвійний електричний шар утворюється вздовж стінки капілярів. Центральний канал має нейтральну щільність заряду [160]

Дві основні проблеми в області ЕО мікронасосів є: блокування мікроканалів бульбашками і низький тиск (типове значення ЕО мікронасосів з відкритим каналом). Великі струми, які генеруються в відкритому каналі можуть виробляти бульбашки; електроліз і реакції на електродах виробляють

іони, які можуть забруднити зразок і генерувати бульбашки. Високий тиск може бути побудований з використанням дуже невеликих каналів або шляхом підтримки каналу щільно упакованим. Деякі з недоліків ЕО мікронасосів часто полегшуються шляхом контролю упаковки частинок в каналі [161].

Електроосмотичні мікронасоси зі змінним струмом

Електроосмотичні насоси зі змінним струмом є життєздатним мікромасштабним насосним механізмом для провідних або електролітичних розчинів. На відміну від депротонування на поверхні каналу в потоці електроосмотичних насосів зі змінним струмом, електроди, розташовані на границі каналу забезпечують заряд, необхідний для встановлення подвійного електричного шару. Асиметричні електроди викликають електричне поле і утворюють розсіяні заряди шару уздовж поверхні електрода.

Перевага електроосмотичних насосів зі змінним струмом включає в себе можливе досягнення високих швидкостей при дуже малих напругах, менше 10В.

Крім того, якщо напругу збільшують в межах діапазону, потік може бути змінено, що робить цей тип насоса двонаправленим. Було виявлено, що швидкість зворотніх потоків може бути більшою, ніж швидкості прямого потоку [162].

8.22.13 Насос на електрозмочуванні

Електрозмочування (англ. electrowetting) тягне за собою зміну змочуваності за рахунок прикладеного електричного потенціалу. У електрозмочуванні, рідина транспортується за допомогою поверхневого натягу, межа поділу фаз сили домінує на мікрорівні. Напруга подається на діелектричному шарі, зменшуючи міжфазну енергію твердих і рідких поверхонь, в результаті чого утворюється потік рідини. Нагрівання рідини не потрібно. Реакція відбувається швидше, і споживання енергії нижче, як в порівнянні з термокапілярними мікронасосами. Рідкі метали контактуючи з електролітичними розчинами розробляють заряджені інтерфейси, які діють як конденсатори за рахунок електрохімічних реакцій. [163]

Рідкий метал є більш змочуваним (тобто має більш низький поверхневий натяг) в області з високою щільністю заряду, ніж в області малої щільності заряду. Поверхневий натяг нижче, праворуч, ніж ліворуч від ртуті. Градієнт поверхневого натяг викликає рух праворуч від рідкого металу.

Створення тиску за допомогою приведення в дію СМР визначається за формулою:

$$\Delta\rho_{CEW} = 2q_0 \Delta\phi \left[\frac{1}{D} + \frac{1}{W} \right], \quad (8.82)$$

де $\Delta\phi$ це різниця потенціалів між двома кінцями рідкого металу, q_0 –початковий заряд на одиницю площі в подвійному електричному шарі при відсутності прикладеного потенціалу і D та W відповідно глибина і ширина каналу.[164]

Існує підвищений інтерес до включення методів доставки рідини на електрозмочуванні в додатках в лабораторії-на-чипі. На рис. 8.55 зображено конструкцію помпи.

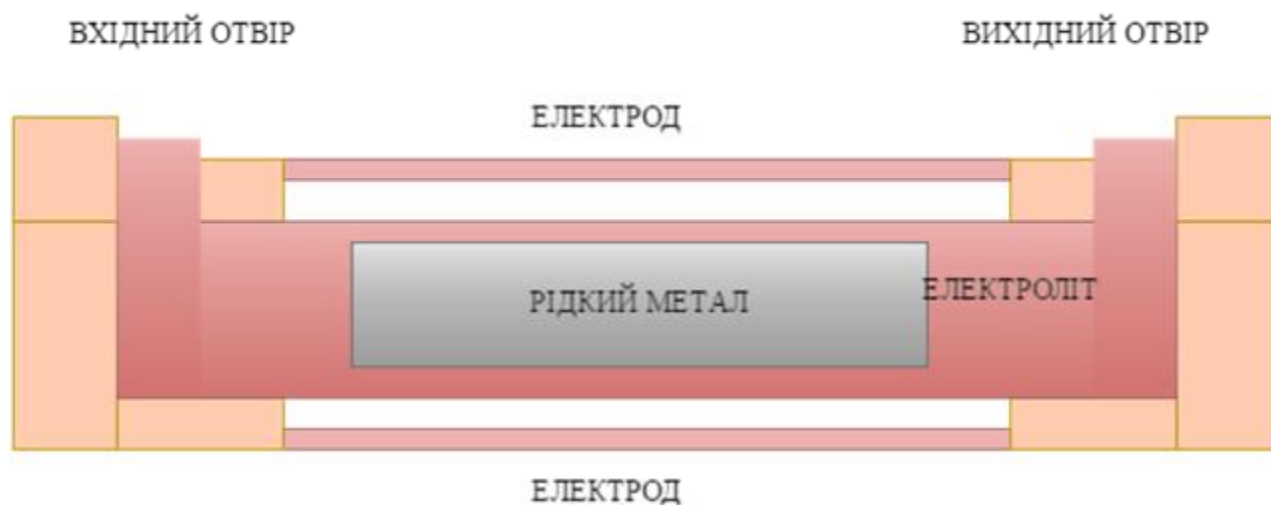


Рис. 8.55 Схематичне зображення конструкції помпи на електрозмочуванні

Принцип використовує масив електродів індивідуально контрольованих на переміщення крапель в будь-яких площинних напрямках на поверхні таким чином, щоб вони змогли брати участь з іншими краплями в процесах змішування і / або хімічних реакціях [165].

8.22.14 Мікропомпи бульбашкового типу

Насосний ефект в них заснований на періодичному розширенні і руйнуванні бульбашок, що генеруються в мікроканалах. Обсяг бульбашки збільшується і згортається періодично шляхом контрольованого введення напруги. Зміна обсягу в камері досягається за допомогою механізму дифузора / сопла, який також визначає напрямок потоку. Основна перевага даного типу мікронасосу - можливе змішування двох або більше видів доз протягом циклів розширення / руйнування бульбашок. Основним недоліком є потреба у частому нагріванні, відповідно, обмежуючи застосування [166].

На рис. 8.57 зображено конструкцію помпи.

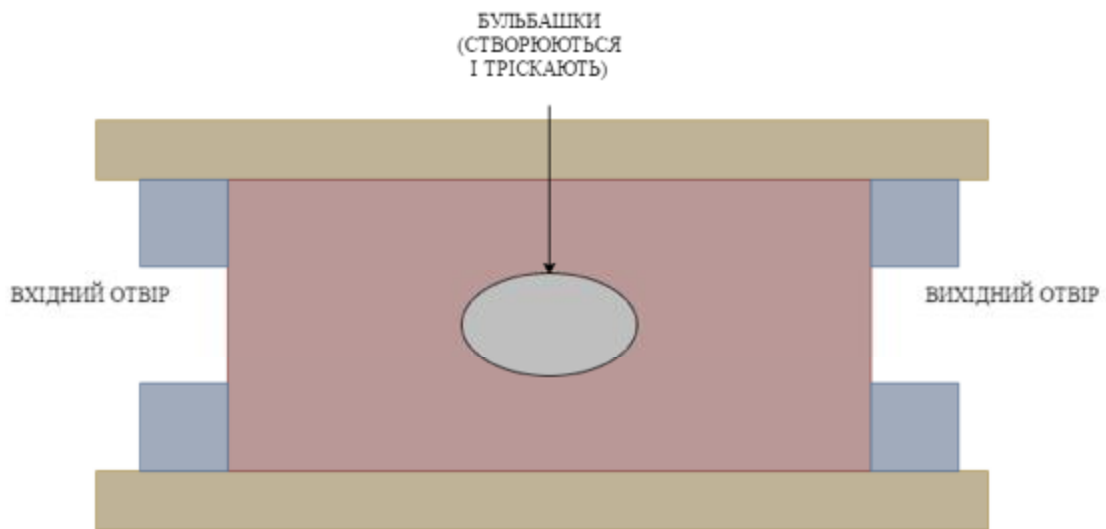


Рис. 8.56 Схематичне зображення конструкції помпи бульбашкового типу

8.22.15 Електрохімічні мікронасоси

Їх дія використовує бульбашки, які створюються електрохімічно в мікроканалах. Застосування постійного струму, спричиняє електроліз води між двома платиновими електродами в сольовому розчині, генеруючи газ і, отже, тиск, який, в свою чергу переміщує рідкі розчини всередині чипу. Цей насос дуже ефективний при накачуванні обсягів мл розчину. Він також споживає мало енергії [167]. На рис. 8.57 зображено конструкцію помпи.

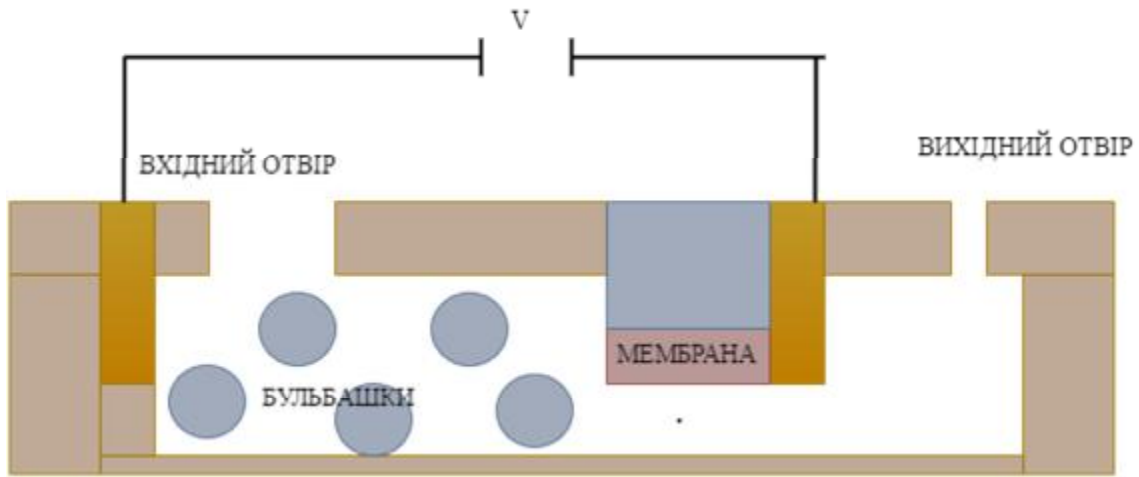


Рис. 8.57 Схематичне зображення конструкції електрохімічної помпи

Найбільш поширеною особливістю електрохімічних мікронасосів є генерація бульбашок шляхом електролізу, в якому вода розкладається на газоподібний водень (H_2) і кисень (O_2). Ключовим компонентом є бульбашковий резервуар, який заповнюється розчином окислювально-відновного електроліту. Він використовує бульбашкову силу, що генерується електрохімічною реакцією в процесі електролізу. Вона потребує електроди для подачі електроенергії, а також проточні канали, електроліз камери (для утворення бульбашок) і впускний і випускний резервуари [168]. Проектування і будівництво цього типу мікронасосів відносно прості. Насоси такого типу також можуть бути легко інтегрованими з іншими системами мікроканалів.[169]

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. <http://microart.kiev.ua/gallery/time>
2. І.В. Артюхов, В.Н. Кеменов, С.Б. Нестеров. Нанотехнології, біологія та медицина. Матеріали 9-й науково-технічній конференції "Вакуумна наука і техніка" -М .: МІЕМ, 2002, с.248-253
3. <http://www.gradusnik.ru/rus/doctor/nano/w58k-nanomed2/>
4. http://www.beatriceco.com/bti/porticus/bell/belllabs_transistor.html
5. BUILDING A MICRO PRESSURE SENSOR IN THE STEM CLASSROOM Matthias W. Pleil, Ph.D. PI – Southwest Center for Microsystems Education University of New Mexico, 2010.
6. (First Integrated Circuit Invented by Jack Kilby) <http://newscenter.ti.com/index.php?s=32902&item=884>
7. <http://www.intel.co.uk/content/www/uk/en/history/museum-story-of-intel-4004.html>
8. BINNIG, Gerd; QUATE, Calvin F.; GERBER, Ch. Atomic force microscope. Physical review letters, 1986, 56.9: 930.
9. Southwest Center for Microsystems Education, www.scme-nm.net, last visited on September 30, 2010.
10. Solgaard, “Integrated Semiconductor Light Modulators for Fiber-Optic and Display Applications”, Ph.D. Dissertation, Stanford University, 1992a.
11. Tilli, Markku, et al., eds. Handbook of silicon based MEMS materials and technologies. William Andrew, 2015.
12. Bandi, T., H. Shea, and A. Neels. "Mechanical properties of MEMS materials: reliability investigations by mechanical-and HRXRD-characterization related to environmental testing." SPIE Sensing Technology+ Applications. International Society for Optics and Photonics, 2014.
13. Göpel, Wolfgang; Hesse, J.; Zemel, J. N. (Hrsg.): Sensors: a comprehensive survey, Vol.2/3 Chemical and Biochemical Sensors. VCH, Weinheim, New York, Basel (1994)

14. Hauptmann, Peter: Sensoren: Prinzipien und Anwendungen. Hanser, München, Wien (1990)
15. Tabib-Azar, Massood: Integrated Optics, Microstructures, and Sensors. Kluwer, Boston, Dordrecht, London (1995)
16. Федорков Б. Г. ,Телец В. А, Микросхеми ЦАП и АЦП: функціонування, параметри, застосування. □ М.: Енергоатомиздат, 1990.
17. Марцинкявичус А. К. и др. Быстродействующие интегральные микросхемы ЦАП и АЦП и измерение их параметров. - М.; Радио и связь, 1988.
18. Федорков Б. Г. ,Телец В. А, Микросхеми ЦАП и АЦП: функціонування, параметри, застосування. - М.: Енергоатомиздат, 1990.
19. Марцинкявичус А. К. и др. Быстродействующие интегральные микросхемы ЦАП и АЦП и измерение их параметров. - М.; Радио и связь, 1988.
20. Implications of Emerging Micro and Nanotechnology Committee on Implications of Emerging Microand Nanotechnologies, National Research Council ISBN: 0309–50521–6, 266 pages, 6x9, (2002).
21. Status of the MEMS industry 2007 Edition. Sample of the analysis – © 2007, Yole Développement SARL.
22. Yu-Chuan Su, Liwei Lin, Albert P. Pisano A. Water-Powered Osmotic Microactuator // JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS, VOL. 11, NO. 6, DECEMBER 2002.
23. New Collegiate Dictionary, <http://websters.yourdictionary.com>
24. American Heritage Dictionary, 3rd ed., 1996
25. Бурштинський М.В., Хай М.В., Харчишин Б.М. Давачі. Навчальний посібник. – 2-ге вид. доповн. – Львів: ТзОВ „Простір М”, 2014. – 202 с.
26. J. Fraden: Handbook of modern sensors, Springer 1996.
27. ДСТУ 2681-94 Державна система забезпечення єдності вимірювань. Метрологія. Теміни та визначення.
28. Канарчук В.Є. Надійність машин: Підручник / В.Є. Канарчук, С.К. Полянський, М.М. Дмитрієв. — К.: Либідь, 2003. — 424 с. — ISBN966-06-0215-4.

29. Brand, Oliver, et al. Reliability of MEMS: testing of materials and devices. Eds. Osamu Tabata, and Toshiyuki Tsuchiya. John Wiley & Sons, 2013..
30. Засоби та методи вимірювань не електричних величин: підручник / Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець, Б.І. Стадник, О.В. Івахів, Т.Г. Бойко, А. Ковальчик; В.о. Ін-т інновац. технологій і змісту освіти; За ред. Є.С. Поліщук. — Львів : Бескид Біт, 2008. — 618 с.
31. Моделювання фізичних процесів у кристалах. / Кособуцький П. С., Лобур М. В., Лопатинський І. Є., Рудавський Ю.К., Прокопчук О. І. - Львів, НУ "Львівська політехніка", 2002, с. 192.
32. Кособуцький П. С., Лобур М. В., Лопатинський І. Є. Фізичні основи напівпровідників та електронних структур. Навчальний посібник – Львів, НУ "Львівська політехніка", 2001, с. 348.
33. Бубенников А. Н. Моделирование интегральных микротехнологий, приборов и схем. М. – 1989.
34. Антонетти П., Антониадиса Д., Даттона Р., Оулдхеми У. МОП - СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов. Пер с англ. – М., 1988.
35. Малышева И. Л. Технология производства интегральных микросхем. – М., 1991.
36. Бубенников А. Н., Садовников А. Д., Физико-технологическое проектирование биполярных элементов кремниевых БИС – М., 1991.
37. Основы технологий кремниевых интегральных схем. Окисление диффузия эпитаксия. Пер. с англ. /Под ред. Р. Бургера и Р. Донована. – М., 1969.
38. Пятышев Е.Н., Лурье М.С. Микротехнологии и микроэлектромеханические системы – новое научно-техническое направление // Научно-технич. Вестн. СПбГТУ. 1999. № 3. С. 101-112.
39. Годовицын И.В., Шелепин Н.А, Лыженкова Г.А. Формирование поверхностных микромеханических структур из пленок поликремния,

получаемых на промышленных установках осаждения ИЗОТРОН // Изв. вузов. Электроника. 1997. №2. С. 49-54.

40. Shelepin N.A. and Godovitsin I.V. Fabrication of polysilicon surface-micromachined structures using FAB 1C processes // Proceeding of the IIIrd NEXUSPAN Workshop on Microsystems in Environmental Monitoring, 13-14 December. 1996. Moscow Russia.

41. Шелепин Н.А. Конструктивно-технологический базис микросенсорных систем // Сб. тез. Всеросс. научно-техн. конф. "Электроника и информатика-97" МИЭТ 1997. Ч. 1. С. 211-212.

42. Качяев И.А., Котов В.Н., Клиндухов В.Г., Кухаренко А.П. Микроэлектронные сенсорные системы: опыт создания и применения // Микросистемная техника 1999. № 1. С. 32-35.

43. Hogan H. Invasion of The Micromachines // New Scientist, 1996, 29 June. P. 28-33.

44. Kassegne, Samuel. "ME 685: MEMS Design and Application." (2014).

45. Wagner, Hans-Joachim Entwicklung von Technologien zur Herstellung von piezoelektrisch angeregten mikroelektromechanischen Resonatorstrukturen in Silizium und Quarz. Shaker, Aachen (1995)

46. Bustillo, J. M., R. T. Howe, and R. S. Muller, "Surface Micromachining for Microelectromechanical Systems," // in Integrated Sensors, Microactuators, Microsystems (MEMS), pp. 1559-1561, K. D. Wise (ed.). Proceedings of the IEEE, Vol. 86, No. 8, Aug. 1998.

47. Menz, Wolfgang; Mohr, Jürgen: Mikrosystemtechnik für Ingenieure. // VCH, Weinheim, New York, Basel, 2. Aufl. (1997)

48. Olsson, O. Larsson, J. Holm, L. Lundblad, O. Öhman and G. Stemme, "Valve-less diffuser micropumps fabricated using thermoplastic replication," // Sensors and Actuators A 64, (1998) 63 – 68.

49. J. Lacey, "Optical switching and its impact on optical networks", // Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 2001. OFC2001, Volume: 2, 2001 Page(s): TuW3-1 -TuW3-3

50. Plummer, James D. et.al. Silicon VLSI Technology: Fundamentals, Practice and Modeling :Prentice Hall, 2000. pp 50-60.
51. Koester, David, et.al. PolyMUMPs Design Handbook, rev. 9.0. July 2003.
52. Koester, D. A.; Mahadevan, R.; Shishkoff, A. & Markus, K. W. SmartMUMPs design handbook including MUMPs introduction and design rules. MEMS Technology Center - MCNC, Research Triangle Park, NC 27709, 1996.
53. <https://www.memsnet.org/about/what-is.html>
54. MEMS accelerometers, gyroscopes, pressure sensors, touch sensors, etc. <http://www.findmems.com/kionix/chipworks-teardown-of-the-motorola-droid-x-smart-phone-shows-a-kionix-kxtf9-accelerometer-design-win>
55. Bacher W et al (1995). The LIGA technique and its potential for microsystems - A survey // IEEE Trans, on Industrial Electronics 42: 431441.
56. W. Ehrfeld, V. Hessel, H. Lowe, Ch. Schulz, L. Weber. Materials of LIGA technology // Microsystem Technology. -1999. - №5. - pp. 105-112.
57. A. Both, W. Bacher, M/ Hecke, K.-D. Muller, R. Ruprecht, M. Strohmann. Fabrication of LIGA-acceleration sensors by aligned molding // Microsystem Technology. -1996. - №2. - pp. 104-108
58. W. Menz, W. Bacher, O. F. Hagen, J. Mohr, D. Seidel. Combination of LIGA with other microstructure technologies // Microsystem Technology. -1996.- №2.-pp. 162-166.
59. В.А. Колясников, Т.Я. Рахимбабаев. Микрожидкостные системы и их реализация с использованием LIGA-технологии // Микросистемная техника.- 1999.-№1. С. 15-21.
60. <https://www.mems-exchange.org/MEMS/fabrication.html>
61. Franssila, Sami. "Deep Reactive Ion Etching." Introduction to Microfabrication, Second Edition (2010): 255-270.
62. High-Aspect Ratio MEMS Fabrication Technologies: <https://www.memsnet.org/mems/fabrication.html>

63. Raj, Ewa, Zbigniew Lisik, and Włodzimierz Fiks. "Influence of the manufacturing technology on microchannel structure efficiency." *Materials Science and Engineering: B* 176.4 (2011): 311-315.

64. Smith, Bruce W., and Kazuaki Suzuki, eds. *Microlithography: science and technology*. Vol. 126. CRC press, 2007.

65. Donnarumma, Gesualdo, Janusz Wo, and Zbigniew Lisik. "Anisotropic drift diffusion model for 4H-, 6H-SiC devices simulation." *Semiconductor Device Research Symposium, 2009. ISDRS'09. International. IEEE, 2009.*

66. Kovacs, G.T.A., *Micromachined Transducers Sourcebook*, McGraw-Hill, New York, NY, 1998.

67. ДСТУ 3651.2-97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Фізичні сталі та характеристичні числа. Основні положення, позначення, назви та значення.

68. Massey B. S.; Ward-Smith J. *Mechanics of Fluids* (7th ed.). Cheltenham: Nelson Thornes, 1998. ISBN 0-7487-4043-0.

69. Arnold Frohn; Norbert Roth (27 March 2000). *Dynamics of Droplets*. Springer Science & Business Media. pp. 15–. ISBN 978-3-540-65887-0.

70. Основи тепломасообміну: Підручник. / С. М. Василенко, А. І. Українець, В. В. Олішевський. За ред. І. С. Гулого; Нац. ун-т харч. технологій. К.: НУХТ, 2004. - 250 с. - ISBN 966-612-030-5

71. Frank M. White, *Fluid Mechanics*, 4th edition, McGraw-Hill (1999), 294.

72. Смеркло Л., Невзоров В., Берген В. Та ін. Принцип побудови основних компонентів САПР для потужних МОН ПТ // Вісник НУ „Львівська політехніка”. Сер. Радіоелектроніка та телекомунікації.- 2002, №443, с. 95-99..

73. Семенец В.В., Хаханова И.В., Хаханов В.И. Проектирование цифровых систем с использованием языка VHDL.– Харьков: ХНУРЭ.– 2003.– 492 с

74. Петренко А. И., Семенков А. И. Основы построения систем автоматизированного проектирования. □ К.: Вища школа., 1984. – 296 с.

75. Teslyuk V., Pereyma M., Karkulyovskyy V., Lobur M. Features of microelectromechanical systems design // Proc. of the 2nd Inter. Conf. of Young Scientists "Perspective Technologies and Methods in MEMS Design" (MEMSTECH 2006).– Lviv–Polyana, Ukraine, 2006. – P. 67–70.
76. Vasyl Teslyuk, Mykhaylo Lobur, Pavlo Denysyuk, Konstantin Kolesnyk. Methodology of the Automated MEMS Design. //Proc.of the III International Conference of Young Scientists MEMSTECH'2007, May, 23–26, Lviv, Polyana, 84–85.
77. Петренко А. И. Основы автоматизации проектирования. – К.: Техніка, 1982. – 295 с.
78. Теслюк В.М. Розроблення інформаційної технології аналізу та синтезу МЕМС. Вісник Національного університету "Львівська політехніка": Комп'ютерні науки та інформаційні технології. № 629.- Львів: Видавництво НУ"Львівська політехніка",2007.–С. 175-182.
79. Коршак, Є. В. "Фізика 11 клас." Київ, Генеза (2004).
80. Бараночников, Михаил. Микромагнитоэлектроника. Vol. 2. Litres, 2015.
81. Jon S. Wilson (2005). Sensor Technology Handbook. Newnes. p. 94. ISBN 0-7506-7729-5.
82. Папушин Ю. Л., Білецький В.С.;Основи автоматизації гірничого виробництва. — Донецьк: Східний видавничий дім, 2007. — 168 с.
83. Wang L., Tan K.C. Modern Industrial Automation Software Design. Principles and Real-World Applications. - John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey. 2006. - 313 p.
84. Мехеда В.А. Тензометрический метод измерения деформаций: учеб. пособие / В.А.Мехеда. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 56 с.
85. Stephen Beeby, MEMS Mechanical Sensors, Artech House, 2004, pp.269

86. Introduction to the principals of Smart Pressure Devices, March 9, 2011: http://www.smartec-sensors.com/assets/files/pdf/Datasheets_pressure_sensors/SPDfamilies.pdf
87. Jan A. Dziuban, Technologia i zastosowanie mikromechanicznych struktur krzemowych i krzemowo-szklanych w technice mikrosystemów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004.
88. Jha, A. R., MEMS and nanotechnology-based sensors and devices for communications, medical and aerospace applications., CRC Press, 2008, p.401
89. Визначення оптимальних конструктивних параметрів МЕМС гіроскопа залежно від його технічних характеристик / А. І. Головатий, М. В. Лобур, Я. М. Новіцький // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка". - 2008. - № 613. - С. 93-99. - Бібліогр.: 6 назв. - укр.
90. Yazdi N., Ayazi F. and Najafi K. Micromachined Inertial Sensors // Proc IEEE. – Aug. 1998. –Vol. 86, No. 8.
91. Електронний ресурс] / М. Габитов // 3D – новости. – 2011. – С. 25. – Режим доступу до журналу: <http://www.3dnews.ru>
92. Стаття «Як смартфони відчують світ. Частина 1» за посиланням <http://www.ferra.ru/ru/techlife/review/mems-part-1/>
93. Головатий А.І., Лобур М.В. Новіцький Я.М. Визначення оптимальних конструктивних параметрів мікроелектромеханічної системи залежно від його технічних характеристик. Вісник Національного університету "Львівська політехніка": Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. №613. – Львів: Видавництво НУ "Львівська політехніка", 2008.– С. 93-100.
94. Report of Yole Developpment, MEMS Gyro Markets, April 2006, Lyon, France.
95. Yongsik Lee, Dissertation “A Study Of Parametric Excitation Applied To A MEMS Tuning Fork Gyroscope”. – P. 4–8, University of Missouri-Columbia, August, 2007.

96. Лобур М.В., Теслюк В.М., Колесник К.К., Перейма М.Є., Денисюк П.Ю. Математична модель давача ємнісного типу // Вісник Національного університету «Львівська політехніка»: Електроенергетичні та електромеханічні системи. - 2003. – № 487. – С. 145 - 151.

97. Lobur M., Teslyuk V., Kolisnyk K., Denysyuk P., Kernytskyu K. Examining of influence of two-layer actuator geometric dimensions on output mechanical parameters // Proc. of Inter. Conf. on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science, (TCSET'2004). – Lviv-Slavsko, 2004. - P. 88 – 91.

98. Lobur M., Teslyuk V., Kolesnyk K., Denysyuk P., Kernytskyu K., Rayeskyu P. Mathematical model of capacitive type integral pressure sensor // Proc. of the 11-th Intern. Conf. on Mixed Design of Integrated Circuits and Systems (MIXDES'2004).- Szczecin, Poland, - 2004.

99. Kureichik V.M. et all Some new features in Genetic Solution of the Traveling Salesman Problem, Proc. of the Second Intl. Conf. Adaptive Computing in Engineering, Design and Control, Plymouth, UK, 1996, pp. 294-296.

100. Berkeley sensor & actuator center. URL: <http://www-bsac.eecs.berkeley.edu>

101. Judy J.W., Muller R.S., Zappe H.H. Magnetic microactuation of polysilicon flexure structures // Journal of microelectromechanical systems.– 1995.– vol.4, №4.– pp.162-169.

102. Ebefors T., Kälvesten E., Stemme G. New small radius joints based on thermal shrinkage of polyimide in V-grooves for robust self-assembly 3D microstructures // J. Micromech. Microeng.– 1996.– №8.– pp.188-194.

103. Корляков А.В., Лучинин В.В. Перспективная элементная база микросистемной техники // Микросистемная техника.– 1999.– №1.– С.12-15.

104. Соколов Л.В. Твердотельные микроприборы и микросистемы с интегрированными микромеханическими структурами // Зарубежная электронная техника.– 1998.– №2.– С.62-79.

105. Распопов В.Я. Микромеханические приборы. Учебное пособие.– Тул. гос. университет: Тула, 2002.–392 с.
106. Petersen K.E. Dynamic micromechanics on silicon: techniques and devices // IEEE Trans. on Electron Devices.– 1978.– vol. ED-25, №10.– pp.1241-1250.
107. Judy J.W., Muller R.S., Zappe H.H. Magnetic microactuation of polysilicon flexure structures // Journal of microelectromechanical systems.– 1995.– vol.4, №4.– pp.162-169.
108. Соколов Л.В. Давачные твердотельные микроприборы и микросистемы на основе MEMS-технологии // Зарубежная электронная техника.– 1999.– №1.– С.93-116.
109. Ebefors T., Kälvesten E., Stemme G. New small radius joints based on thermal shrinkage of polyimide in V-grooves for robust self-assembly 3D microstructures // J. Micromech. Microeng.– 1996.– №8.– pp.188-194.
110. NIMBAL GIRIJA M., SV HALSE, and FIRDOUS G. NAZIYA. "Modelling and Simulation of Thermal Actuator Using Polysilicon Material." Journal of Pure Applied and Industrial Physics Vol 3.3 (2013): 193-228.
111. JOHN K. SAKELLARIS „Finite Element Analysis of Micro - Electro - Mechanical Systems by using the ANSYS software”. 7th WSEAS International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines, Venice, Italy, November 21-23, 2007: 115-120.
112. Sheeparamatti, B. G., J. S. Kadadevarmath, and M. S. Hebbal. "FEM Simulation of Novel Thermal Microactuator." International Journal of Recent Trends in Engineering (Electrical & Electronics) 1.4 (2009).
113. Krijnen, Gijs, and Niels Tas. "Micromechanical Actuators." MESA+ Research Institute, Transducer Technology Laboratory, University of Twente, Enschede, The Netherlands (2000).
114. Kolesar, E. et al.; "Single- and double-hot arm asymmetrical polysilicon surface micromachined electrothermal microactuators applied to realize a microengine"; Thin Solid Films; 2002; pp. 530-538; Elsevier Science B. V.; USA.

115. Lioa, K.; Chueh, C.; Chen, R.; "A Novel Electro-Thermally Driven Bi-directional Microactuator"; International Symposium on Micromechatronics and Human Science; 2002; pp. 267-274; IEEE; USA.

116. Mykhaylo Melnyk, Andriy Kernytskyy, Mykhaylo Lobur, Michal Szermer, Piotr Zajac, Wojciech Zabierowski. Study of Characteristics of MEMS Thermo-Electric Actuators. Proceeding of the X-th International Conference MEMSTECH'2014 "Perspective Technologies and Methods in MEMS Design", 22-24 June 2014, Lviv, Ukraine.-Pp. 39-41.

117. Olsson A., Stemme G., Stemme E. A valve-less planar fluid pump with two pump chambers // Sensors and Actuators.– 1995.– №46-47.– pp.549-556.

118. Piezo film sensors. Technical manual.– Measurement Specialties, Inc.– 89p.

119. MEMS technologies. URL: <http://tima.imag.fr>.

120. Berkeley sensor & actuator center. URL: <http://www-bsac.eecs.berkeley.edu>

121. Коноплев Б.Г., Лысенко И.Е. Моделирование микрозеркала с электростатической активацией // Микросистемная техника.– 2002.– №12.– С.22-25.

122. Болштянский А. П., Балакин П. Д. Гидравлический тракт переменного сопротивления в устройствах амортизаторов // Омский научный вестник. – 2007. – №. 3 (60).

123. Clyne T.W. Residual stresses in surface coatings and their effects on interfacial debonding/ Key Engineering Materials (Switzerland). Vol. 116-117, pp. 307-330. – 1996.

124. Epstein, Alan H., et al. "Shirtbutton-sized gas turbines: The engineering challenges of micro high speed rotating machinery." Proceedings, 8th Int'l Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Honolulu, HI. 2000.

125. <http://www.npk-photonica.ru/images/ustroystvo-kamer-dlinnovolnovogo-ik-diapazona-lwir-kamera-pdf104204.pdf>

126. Bhan R. K., Saxena R. S., Jalwania C. R., and Lomash S. K., "Uncooled Infrared Microbolometer Arrays and their Characterisation Techniques," *Def. Sci. J.* 59, 580–590 (2009).

127. Matolin, D., Posch, C., Wohlgenannt, R., Maier, T., "A 64x64 pixel temporal contrast microbolometer infrared sensor", *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, pp.1644-1647, 18-21 May 2008

128. Wang H., Xinjian Y., Lai J., Li Y., "Fabricating microbolometer array on unplanar readout integrated circuit", *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, Vol. 26(5), pp.751–762.

129. Vedel, C., Martin, J., Ouvrier Buffet, J., Tissot, J., Vilain, M. and Yon, J., "Amorphous silicon based uncooled microbolometer IRFPA", *Proceedings SPIE-Infrared Technology Applications XXV*, 1999, Vol. 3698, 276-83

130. Janicki, M., Zajac, P., Szermer, M., & Napieralski, A. (2014, April). Compact thermal modeling of microbolometers. In *Thermal, mechanical and multi-physics simulation and experiments in microelectronics and microsystems (eurosime)*, 2014 15th international conference on (pp. 1-4). IEEE.

131. ZAJĄC, Piotr, et al. Analytical tool for electro-thermal modelling of microbolometers. In: *Thermal, mechanical and multi-physics simulation and experiments in microelectronics and microsystems (eurosime)*, 2014 15th international conference on. IEEE, 2014. p. 1-6.

132. Melnyk, M., Kernytskyy, A., Lobur, M., Szermer, M., Zajac, P., Maj, C., & Zabierowski, W. (2015, June). Custom method for automation of microbolometer design and simulation. In *Mixed Design of Integrated Circuits & Systems (MIXDES)*, 2015 22nd International Conference (pp. 301-304). IEEE.

133. Hornbeck, Larry J. "The DMD TM projection display chip: a MEMS-based technology." *Mrs Bulletin* 26.04 (2001): 325-327.

134. Фраунгоферський інститут кремнієвих технологій:
<http://www.isit.fraunhofer.de/en.html>

135. Amirtharajah R. and Chandrakasan A.P., Self-powered signal processing using vibration-based power generation. *Solid-State Circuits, IEEE Journal of*, 1998. 33(5): p. 687-695.
136. Williams C.B. and Yates R.B, Analysis of a microelectric generator for microsystems. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1996. 52(1-3): p. 8-11.
137. Awaja, Nibras. "Electromagnetic micropower generation-system design and analyses." (2010).
138. Furlani E. P., *Permanent Magnet and Electromechanical Devices: Materials, Analysis, and Applications*. 2001, San Diego: California Academic.
139. Тимошенко, С. П. "Сопротивление материалов, ч. IМ, Физматгиз, 1960; Сопротивление материалов, ч. II. М." Л., ГИТТЛ (1946).
140. Blevins R. D. , *Formulas for natural frequency and mode shape*, New York : Van Nostrand Reinhold Co.,1979.
141. Thomson W.T., *Theory of vibration with applications*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1972.
142. Nisar, A.; Afzulpurkar, N.; Mahaisavariya, B.; Tuantranont, A. MEMS-based micropumps in drug delivery and biomedical applications. *Sens. Actuators B* 2008, 130, 917–942.
143. L. Cao, S. Mantell, D. Polla, *Sensor Actuat. A: Phys.*, 94 (2001) 117.
144. C. Zhang, D. Xing, Y. Li, *Biotechnol. adv.*, 25 (2007) 483.
145. F. Amirouche, Y. Zhou, T. Johnson, *Microsyst. Technol.*, 15 (2009) 647.
146. Q. Cui, C. Liu, X.F. Zha, *The Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, 36 (2008) 516.
147. F. Van de Pol, H. Van Lintel, M. Elwenspoek, J. Fluitman, *Sensor Actuat. A: Phys.*, 21 (1990) 198.
148. E. Makino, T. Mitsuya, T. Shibata, *Sensor Actuat. A: Phys.*, 88 (2001) 256.
149. W.L. Benard, H. Kahn, A.H. Heuer, M.A. Huff, *J. Microelectromech. S.*,7 (1998) 245.
150. W. Benard, H. Kahn, A. Heuer, M. Huff, *IEEE Int. Conference*, (1997) 361.

151. Y. Yang, Z. Zhou, X. Ye, X. Jiang, ASME,59 (1996) 351.
152. S. Shoji, M. Esashi, J. Micromech. Microeng., 4 (1994) 157.
153. N. Maluf, K. Williams, Introduction to microelectromech. s. eng., Artech house publishers, (2004).
154. Y. Song, T.S. Zhao, J. Micromech. Microeng.,11 (2001) 713.
155. V. Patel, S.K. Kassegne, Sensor Actuat. B: Chem., 122 (2007) 42.
156. J. Jang, S.S. Lee, Sensor Actuat. A: Phys., 80 (2000) 84.
157. J. Eijkel, C. Dalton, C. Hayden, J. Burt, A. Manz, Sensor Actuat. B: Chem., 92 (2003) 215.
158. N.T. Nguyen, H. XIAOYANG, C. TOH KOK, J. Fluids Eng., 124 (2002) 384.
159. Y. Ai, S.E. Yalcin, D. Gu, O. Baysal, H. Baumgart, S. Qian, A. Beskok, J. colloid interf. sci., 350 (2010) 465.
160. N. Islam, A. Zaman, J. Wu, IEEE Int. Conference, (2008) 27.
161. P. Wang, Z. Chen, H.C. Chang, Sensor Actuat. B: Chem., 113 (2006) 500.
162. H.A. Rouabah, B.Y. Park, R.B. Zaouk, H. Morgan, M.J. Madou, N.G. Green, J. Micromech. Microeng., 21 (2011) 350.
163. E. Colgate, H. Matsumoto, J. Vac. Sci. Technol. A, 8 (1990) 3625.
164. K.S. Yun, I.J. Cho, J.U. Bu, C.J. Kim, E. Yoon, J. Microelectromech. S., 11 (2002) 454.
165. J. Lee, H. Moon, J. Fowler, T. Schoellhammer, C.J. Kim, Sensor Actuat. A: Phys., 95 (2002) 259.
166. X. Geng, H. Yuan, H. Oguz, A. Prosperetti, J. Micromech. Microeng., 11 (2001) 270.
167. E. Kjeang, N. Djilali, D. Sinton, J. Power Sources, 186 (2009) 353.
168. Y. Yoshimi, K. Shinoda, M. Mishima, K. Nakao, K. Munekane, J. Artif. Organs, 7 (2004) 210.
169. W.Y. Sim, H.J. Yoon, O.C. Jeong, S.S. Yang, J. Micromech. Microeng., 13 (2003) 286.