

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Центр заочної, дистанційної та вечірньої форм навчання

Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота магістра

**ФІЗИЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРИНЦИПИ ФУНКЦІОНУВАННЯ
СЕНСОРІВ ПРИСКОРЕННЯ**

Студентка гр. ЕП.мдн – 91к



Я.В.Чередникова

Науковий керівник,
канд. фіз.-мат. наук, доцент



Н. М. Опанасюк

Завідувач кафедри ЕЗПФ
д-р фіз.-мат. наук, професор

І. Ю. Проценко

Суми – 2020

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Центр заочної, дистанційної та вечірньої форм навчання
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики
Спеціальність 171 – Електроніка, освітня програма
«Електронні інформаційні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри ЕЗПФ

І.Ю.Проценко
«30» листопада 2020 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Чередникова Ярослава Вікторівна

Тема роботи **ФІЗИЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРИНЦИПИ
ФУНКЦІОНУВАННЯ СЕНСОРІВ ПРИСКОРЕННЯ**

затверджена наказом по університету від «23» жовтня 2020 р. , № 1648-III

2. Термін здачі студентом закінченої роботи 15 грудня 2020 року

Вихідні дані до роботи (актуальність, мета): Вимірювання фізичних величин використовується в різних галузях науки і техніки і є гарантом забезпечення ефективності технологічних процесів та високої якості продукції. Одним з таких датчиків неелектричних величин і є сенсор прискорення, або акселерометр. Акселерометри використовуються в автомобільній промисловості, в жорстких дисках для активації механізму захисту від пошкоджень, ноутбуках, нетбуках телефонах, тому актуальним питанням є фізичні та технологічні принципи функціонування сенсорів прискорення , їх конструктивні особливості та принципи роботи

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що належить їх розробити)

1. Загальна характеристика датчиків неелектричних величин та сенсорів прискорення
2. Класифікація сенсорів прискорення та їх конструктивні особливості
3. Порівняльна характеристика та принципи функціонування сучасних акселерометрів

Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Слайди № 1-5: мета, задачі; літературний огляд стосовно конструктивних особливостей та принципу роботи датчиків неелектричних величин та сенсорів прискорення (акселерометрів).
2. Слайди №: 6 – 8: Класифікація сенсорів прискорення та їх конструктивні особливості.
3. Слайди № 9-11: Порівняльна характеристика та принципи функціонування сучасних акселерометрів.
4. Слайд № 12: Висновки.

6. Дата видачі завдання 01.12.2020 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістрів	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз літературних даних огляд стосовно конструктивних особливостей та принципу роботи датчиків неелектричних величин та сенсорів прискорення (акселерометрів)	до 03.12.2020 р.	
2.	Класифікація сенсорів прискорення, їх конструктивні особливості та принцип роботи	до 09.12.2020 р.	
3.	Порівняльна характеристика та принципи функціонування сучасних акселерометрів	до 14.12.2020 р.	
4.	Підготовка тексту магістерської роботи.	до 15.12.2020 р.	
5.	Попередній захист роботи	18.12.2020 р., 12 ⁰⁰	
6.	Захист роботи в екзаменаційній комісії	23.12.2020 р., 13 ³⁰	

Магістрант



Чередникова Я.В.

Керівник роботи



Опанасюк Н.М.

РЕФЕРАТ

Мета кваліфікаційної роботи магістра полягає в визначенні фізичних та технологічних принципів функціонування сенсорів прискорення, огляду сучасних промислових акселерометрів.

В першому розділі було розглянуто фізичні характеристики сенсорів прискорення, їх класифікація.

В другому розділі оглянуто загальні відомості про сенсори прискорення та акселерометри на основі технології МЕМС, а саме МЕМС на базі об'ємної та поверхневої мікрообробки.

В третьому розділі проведено огляд сучасних промислових МЕМС-акселерометрів та виконано порівняльний аналіз експлуатаційних характеристик МЕМС – акселерометрів.

У результаті проведеного аналізу та дослідженню порівняльних характеристик встановлено, що існує велика кількість різних типів акселерометрів і в залежності від галузі застосування до них пред'являються різні вимоги такі, як чутливість, вихідні дані та розміри.

Робота викладена на 27 сторінках, зокрема, містить 7 рисунків, 2 таблиці, список використаних джерел із 14 найменувань.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ПРИНЦИП ВИМІРЮВАННЯ, ДАТЧИК, МЕМС (MICROELECTROMECHANICALSYSTEM), СЕНСОР.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. СЕНСОРИ ПРИСКОРЕННЯ ТА ПРИНЦИПИ ЇХ ФУНКЦІОНУВАННЯ	7
1.1 Вимірювання неелектричних величин та їх перетворення.....	7
1.2 Фізичні характеристики сенсорів.....	8
1.3 Класифікація сенсорів.....	9
РОЗДІЛ 2. СЕНСОРИ ПРИСКОРЕННЯ	11
2.1 Загальні відомості.....	11
2.2 Класифікація датчиків прискорення.....	12
2.2.1 Ємнісні датчики.....	13
2.2.2 П'єзоелектричні датчики.....	14
2.2.3 Тензорезистивні датчики.....	16
2.3 Акселерометри на основі технології MEMS.....	16
2.3.1 MEMS-акселерометри на базі об'ємної мікрообробки.....	19
2.3.2 MEMS-акселерометри на базі поверхневої мікрообробки.....	20
РОЗДІЛ 3. ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРИНЦИПИ ФУНКЦІОНУВАННЯ СУЧАСНИХ АКСЕЛЕРОМЕТРІВ	22
3.1 Огляд сучасних промислових MEMS- акселерометрів.....	22
3.2 Порівняльний аналіз експлуатаційних характеристик MEMS акселерометрів.....	23
ВИСНОВКИ	27
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	28

ВСТУП

В даний час все гостріше настає необхідність забезпечити безвідмовну роботу машин і різного роду технологічного та іншого обладнання в різних сферах виробництва та інших сферах людської діяльності. Безвідмовна робота – це відсутність аварій, збоїв, і, отже, збереження людських життів та здоров'я, збереження навколишнього середовища, і, врешті-решт, зниження матеріальних втрат, неминучих при аваріях саме такі принципи можуть забезпечити різноманітні датчики.

Мікроелектромеханічні системи (МЕМС) – це безліч мікропристроїв найрізноманітніших конструкцій і призначення, які вироблені подібними методами з використанням модифікованих групових технологічних прийомів мікроелектроніки. Перша – це розмір, друга – наявність рухомих частин і призначення до механічних впливів. Основною причиною поширення мікроелектромеханічних систем є відносно низька вартість їх виготовлення, висока надійність, групова технологія виготовлення, низька ціна.

За останні роки значно підвищуються вимоги до проектування пристроїв різного технологічного призначення. Особливо це стосується МЕМС, адже на їх проектування та перепроєктування у випадку незадовільних результатів потрібні величезні ресурси. Тому розробка методів та алгоритмів для підвищення ефективності автоматизованого проектування МЕМС є актуальною задачею на сьогодні [1].

Акселерометри використовують в жорстких дисках для активації механізму захисту від пошкоджень, така технологія захисту використовується в основному в ноутбуках, нетбуках і на зовнішніх накопичувачах, телефони, комунікатори, ігрові приставки та ноутбуки також частіше всього зараз виготовляють з акселерометрами (датчиками прискорення), тому метою моєї роботи є саме дослідження та порівняння принципів роботи сучасних сенсорів прискорення.

РОЗДІЛ 1. СЕНСОРИ ПРИСКОРЕННЯ ТА ПРИНЦИПИ ЇХ ФУНКЦІОНУВАННЯ

1.1. Вимірювання неелектричних величин та їх перетворення

Для того, щоб виміряти будь-яку неелектричну величину, то потрібно її завчасно перетворити в електричний сигнал. Це перетворення здійснюється за допомогою первинних перетворювачів.

Принцип вимірювання – це фізичне явище, покладене в основу вимірювання (наприклад, вимір температури тіла за змінного розміру) [3].

Вимірювальні перетворення розділяють на перетворення зі зміною і без зміни роду фізичної величини. Технічний засіб перетворення фізичної величини (або вимірювальний перетворювач, сенсор) – це засіб вимірювальної операції (вимірювального перетворення), який реалізує задану залежність між інформативними параметрами вихідного і вхідного сигналів (фізичних величин), формує сигнал вимірювальної інформації, зручний для подальшого використання, але непридатний для безпосереднього сприйняття оператором. Як стверджують автори роботи [4], методи перетворення фізичних величин і вимірювальні засоби (обладнання й перетворювачі) умовно поділяють на аналогові і цифрові.

Аналогове вимірювальне перетворення – це вимірювальна операція, за якої вхідна фізична величина перетворюється в аналогову (безперервну) вихідну, величина якої функціонально пов'язана з величиною вхідної фізичної величини. Аналоговий сигнал містить більше інформації, ніж цифровий. Однак цифровий сигнал більш зручний для подальших перетворень. Аналогові методи перетворення фізичних величин забезпечують доступність використання у вимірювальній техніці великої кількості різноманітних фізико-технічних ефектів. Нерідко аналогові методи є єдиною можливістю сприйняття й перетворення фізичної величини. Тому ці методи засновані на використанні безперервних фізичних процесів, які широко використовують у вимірювальній техніці, особливо у сенсорах [3].

У цифрових вимірюваннях числове значення виробляється у вимірювальному обладнанні або виводиться з нього за рахунок використання операцій з числами (дискретними сигналами). За цифрового методу інформацію (дискретні значення сигналів) обробляють послідовно в часі, тривалість обробки швидко зростає при підвищенні вимог до точності. Цифрові методи відображення вимірюваних величин більш точні, чим аналогові. Тому вибирати той або інший метод вимірювання необхідно в кожному конкретному випадку на основі аналізу, виконаного з урахуванням усіх вимог і обмежень.

1.2. Фізичні характеристики сенсорів

За останні роки у вимірювальній техніці виділилася самостійна галузь, яку назвали сенсорикою (від англ. sense – почувати, сприймати). Сенсорика вивчає техніку конструювання, виготовлення і застосування сенсорів (датчиків).

Цетуючи авторів роботи [1], можна зробити такі дослідження, що у руслі загального напрямку технічного прогресу істотні зміни торкнулися й сенсорів. На зміну електромеханічним і електровакуумним приладам прийшли твердотільні (напівпровідникові, п'єзоелектричні, сегнетоелектричні) обладнання. Розвиток техніки вимірювання магнітних і електричних полів, електромагнітних хвиль, малої кількості речовини в рідких і газоподібних середовищах значно розширили можливості вимірювання на віддалених, важкодоступних об'єктах, що й рухаються. Це зробило обов'язковим розміщення сенсорів безпосередньо поблизу об'єкту [1].

Загальні тенденції до мініатюризації й комп'ютеризації торкнулися й сенсорної техніки. При цьому сигнал сенсора у більшості випадків аналоговий, а для обробки в мікропроцесорі або ЕОМ необхідний цифровий. Таке перетворення здійснюється інтерфейсним обладнанням, яке містить аналого-цифровий перетворювач (АЦП). Останнім часом поряд зі створенням сенсорів, які вже мають цифровий сигнал на виході, спостерігається тенденція

конструктивного об'єднання сенсорів з мікропроцесорним обладнанням. Сучасні напівпровідникові технології дозволили також розширити сфери використання сенсорів, підвищити їхню точність, надійність, швидкодію, зручність сполучення з електронними вимірювальними схемами. Сучасні напівпровідникові, оптоелектронні та інші перетворювачі фізичних величин швидко революціонізують техніку, науку, побут. Вони найчастіше добре узгоджуються із цифровою обчислювальною технікою, виготовляються за високопродуктивними технологіями, які забезпечують їхню малу вартість за досить високих метрологічних характеристик. Вихідний сигнал сучасних сенсорів, як правило, цифровий, що виключає необхідність у додатковій його обробці за допомогою АЦП, зменшує енерговитрати, розміри й вартість електронних схем, збільшує час безвідмовної роботи, підвищує їхню надійність і ефективність [3].

1.3. Класифікація сенсорів

Ще відносно недавно люди використовували в основному прості сенсори, що дають тільки первинну, необроблену інформацію про об'єкти і процеси, за якими ведеться спостереження.

Класифікувати сенсори можна за різними характеристиками. Наприклад: активні і пасивні перетворювачі (пасивний отримує енергію від об'єкту дослідження, активний – отримує зовнішнє живлення).

Також класифікують по розмірності (одиничні, одномірні, двомірні, об'ємні); по зоні локалізації (контактні та ємнісні, дистанційні); по фізичному принципу дії датчика; за фізичною природою вимірюваної величини.

Розглянемо функціональну схему простого сенсора на рисунку 1.1. Головними його складовими частинами є чутливий елемент і сигналізатор. Реагуючи на той чи інший вплив з боку об'єкта спостереження, чутливий елемент змінює свій стан, а сигналізатор видає про це якийсь зрозумілий

користувачеві сигнал. Цей сигнал і є носієм інформації про об'єкт спостереження.

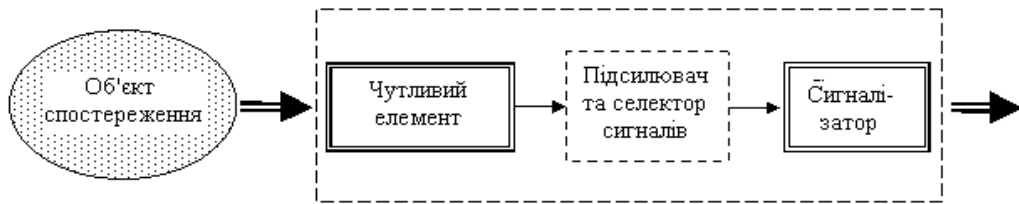


Рисунок 1.1 - Функціональна схема простого сенсора[2].

З розвитком техніки і зростанням вимог з боку прикладних областей (промисловості, наукових досліджень, медицини, технології) в сенсорах також почали виконувати спочатку просту, а з часом все більш складну обробку інформації. Функціональна схема такого сенсора наведена на рис. 1.2.

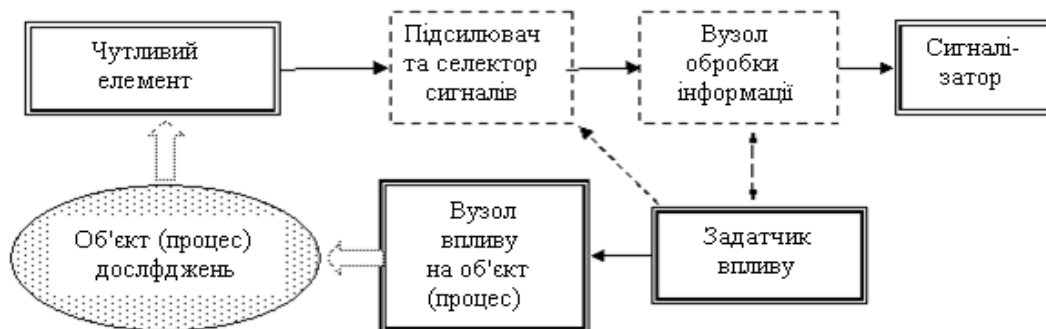


Рисунок 1.2 - Функціональна схема "активного" сенсора[4].

На відміну від «пасивних», «активні» сенсори самі якимось спеціальним чином впливають на об'єкт спостереження (предмет або процес) і сприймають викликані цим зміни [5].

РОЗДІЛ 2. СЕНСОРИ ПРИСКОРЕННЯ

2.1. Загальні відомості

Датчик – це свого роду це засіб вимірювань, що є конструктивно завершеним пристроєм та виконує функцію лінійного перетворювача, представляє собою складні пристрої, які часто використовуються для виявлення і реагування на електричні або оптичні сигнали. Як стверджують автори роботи [4], прилади, які служать для вимірювання прискорень, називаються акселерометрами. Ці прилади застосовуються при дослідженні рухів або вібрацій частин машин, в авіації, на транспорті [4].

Характеристики датчиків поділяються на статичні, які характеризують датчик у статичному режимі, і динамічні, що характеризують його в динамічному режимі. Статичним режимом датчика називається режим роботи, коли на вході датчика діє стала фізична величина. Динамічним режимом роботи технічного пристрою вважається режим роботи, в якому динамічні характеристики пристроїв, обумовлені інерційністю, істотно впливають на результат роботи.

Акселерометр, який вимірює лінійне прискорення, тобто прискорення поступального руху тіла, складається з інертної маси M , пружного елемента U і демпфера D (рисунок 2.1). Конструкція акселерометра повинна бути такою, щоб інертна маса M могла переміщуватися вздовж однієї прямої, яку називають віссю акселерометра. У контрольованому об'єкті, що рухається з прискоренням a в напрямку осі акселерометра, на масу M діє сила інерції, яка згідно з другим законом Ньютона дорівнює Ma . Під дією цієї сили інертна маса M починає рухатися, деформує пружний елемент U , який протидіє руху. Щоб в цій механічній системі не виникали тривалі коливання, використовується демпфер D , який теж чинить опір руху інертної маси M з силою, пропорційною швидкості її руху, і перетворює енергію коливального руху в тепло [4].

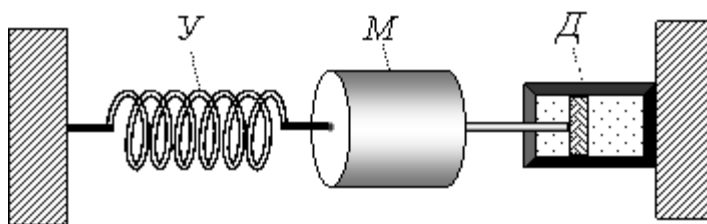


Рисунок 2.1- Принципова механічна схема акселерометра [4].

2.2. Класифікація датчиків прискорення

Класифікація акселерометрів проводиться за будь - якою ознакою, наприклад, по характеру залежності вихідної величини від вимірюючого приладу прискорення або за типом датчика переміщення інерційної маси. Такі класифікації не дають повного представлення про принцип дії та компоновки того чи іншого акселерометра, це визначили автори роботи [5]. Розглянемо класифікацію акселерометрів за призначенням, характерними ознаками та конструктивними факторами [5].

За призначенням розрізняють:

- акселерометри для виміру лінійних прискорень при ударах (вимірювання прискорення різко вираженого імпульсного типу);
- акселерометр для зміни прискорення приладів, рух яких просторово обмежений (для виміру прискорень руху окремих частин механізмів);
- акселерометри для виміру прискорення рухомих об'єктів.

По вимірювальному значенню контролюючого прискорення:

- акселерометри, що вимірюють потенційне значення прискорення контролюючого руху;
- акселерометри, що вимірюють середнє значення діючого прискорення за деякий невеликий проміжок часу;
- акселерометри, що вимірюють максимальне значення контролюючого прискорення (так звані «граничні акселерометри»).

За структурною схемою: акселерометри з розімкнутим ланцюгом взаємодії (компенсаційного типу) та акселерометри з замкнутим ланцюгом.

За типом датчика зміщень інерційної маси:

- з датчиками потенціометричного типу;
- з датчиками індукційного типу;
- з ємкісними датчиками;
- з індукційними датчиками;
- з п'єзоелектричним датчиками;
- з датчиками оптичного тіла;
- з ламповими перетворювачами переміщень.

Також класифікують датчики за фізичною природою вихідної величини:

- акселерометри з вихідною величиною механічного характеру (кутове або лінійне переміщення);
- акселерометри з вихідною величиною часового характеру (частота, період).

Всі вищеперераховані ознаки за якими складена класифікація, являються основними в характеристиці акселерометрів. Вони дають достатньо повне уявлення як про принцип дії, так і про конструктивні характеристики акселерометрів [5].

2.2.1. Ємнісні датчики

Ємнісний датчик – перетворювач параметричного типу, в якому зміна вимірюваної величини змінюється згідно зміни ємності конденсатора.

Типова конструкція акселерометра, що наглядно показана на рисунку 2.2, складається із рухомої сейсмічної маси, яка прикріплена до підкладки, та двох обкладок. Між обкладками та сейсмічною масою розміщуються електроди, які і будуть фіксувати зміну ємності зі зміщенням сейсмічної маси. Варто зауважити, що за такої побудови конструкції зміщення будуть відбуватись лише вздовж однієї осі.

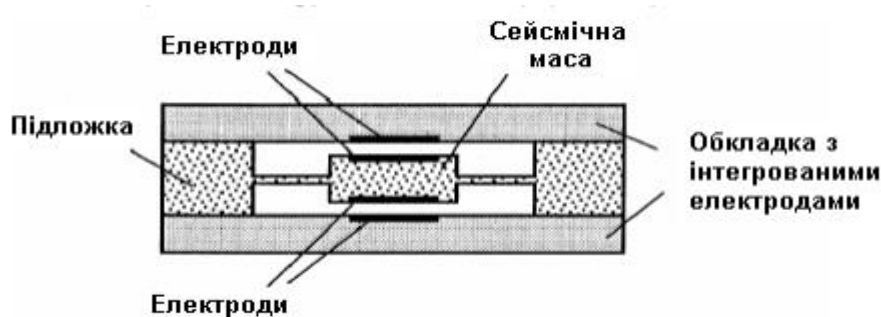


Рисунок 2.2 – Конструкція ємнісного акселерометра: 1 - підкладка, 2 - електроди, 3 - сейсмічна маса, 4 - обкладка з інтегрованими електродами. Адаптовано з [5].

Ємнісні сенсори прискорення мають декілька переваг, а саме [5]: висока чутливість, низький рівень шумів та дрейфу струму, низька чутливість до температури, а також мале значення розсіювання потужності. Недоліком ємнісного сенсора є значне ускладнення вимірювальної електроніки. Електронна схема спряження має бути розташована якнайближче до сенсора, щоб зменшити паразитні ємності. Для того, щоб запобігти електромагнітним завадам, на пристрої встановлюють відповідне екранування [5].

2.2.2. П'єзоелектричні датчики

П'єзоелектричні акселерометри є найпоширенішими нині приладами, які використовуються для вимірювання прискорень і вібрацій, що пояснюється, перш за все, простотою конструкції, широким частотним і динамічним діапазонами, міцністю, надійністю і стабільністю параметрів цих приладів. Роботи по їх вдосконаленню для підвищення точності та достовірності вимірювань є нагальними та актуальними. П'єзоелектричні датчики можна розділити на два великих класи в залежності від фізичних ефектів, що лежать в їх основі.

До першого класу відносяться датчики, що використовують прямий п'єзоэффект. Ці перетворювачі надалі ми будемо називати п'єзодатчиками на

прямому п'єзоефекті. Вони використовуються для вимірювання лінійних та вібраційних прискорень, динамічних і квазістатичних тисків і зусиллі, параметрів звукових і ультразвукових полів [6].

До другого, не менш великого класу п'єзодатчиків відносяться так звані резонансні п'єзодатчики. В їх основі може лежати зворотний п'єзоефект (резонансні п'єзодатчики на основі п'єзоелектричних резонаторів), а також зворотний і прямий п'єзоефекти (резонансні п'єзодатчики на основі п'єзоелектричних трансформаторів). Крім того, в їх основі лежать інші фізичні ефекти (тензочутливість, акустична чутливість, термочутливість і ін.), що дозволяє використовувати їх для вимірювання статичних і динамічних тиску і зусиль, лінійних і вібраційних прискорень, концентрації речовин в газах, в'язкості, кутів нахилу [6]. Широкий діапазон температур дозволяє використовувати п'єзокерамічні перетворювачі від + 400 до -270°C.

Також існують плівкові п'єзоелектричні датчики прискорення, що виконуються на основі багат шарової п'єзоелектричної полімерної плівки. Багат шарова плівка закріплена на підкладці з окису алюмінію, і до неї приєднана інерційна маса з порошкового металу. При зміні швидкості руху датчика в результаті дії інерційних сил відбувається деформація плівки. Завдяки п'єзоефекту виникає різниця потенціалів на межах шарів плівки, що залежить від прискорення. Чутливий елемент датчика володіє надзвичайно високим вихідним опором. Це дозволяє вимірювати змінні прискорення з порівняно низькою частотою. Датчики цього типу мають погану повторюваність характеристик в серійному виробництві, високу чутливість до зміни температури і тиску. Вони не можуть контролювати постійні прискорення і гравітаційні сили. Основна область застосування - схеми управління надувними подушками безпеки [6].

Таким чином, застосування п'єзокерамічних елементів відкриває широкі перспективи в різних областях науки і техніки.

2.2.3. Тензорезистивні датчики

Тензорезистивний датчик – датчик, що перетворює величину деформації в зручний для виміру сигнал (зазвичай електричний), основний компонент тонзометра (прилад для вимірювання деформацій). Існує багато способів вимірювання деформацій: тензорезистивний, п'єзоелектричний, оптико-поляризаційний, п'єзорезистивний, волоконно-оптичний або просте зчитування показань з лінійки механічного тензодатчика. Серед електронних тензодатчиків найбільше поширення отримали тензорезистивні датчики.

Такі датчики зазвичай представляють собою спеціальну пружну конструкцію з закріпленням на ній тензорезистором та іншими допоміжними деталями. Після калібрування, по зміні опору тензорезистора можна визначити ступінь деформації, що буде пропорційна силі, прикладеній до конструкції.

Недоліками тензорезистивного акселерометра являється низька витривалість та власна частота ударних прискорень великої амплітуди та тривалості імпульсу. Тензорезистивні акселерометри виробляють на основі твердотільних матеріалів, що мають електричну чутливість до механічних дій.

Існують різні типи датчиків [7]: датчики сили (вимірюють зусилля та навантаження); датчики тиску (вимірювання тиску в різних середовищах); акселерометри (датчики прискорення); датчики переміщення.

Найбільш типовим прикладом застосування тензодатчиків є ваги. В залежності від конструкції, застосовуються тензодатчики різного типу: консольні; s – образні; «шайба»; «бочка».

2.3. Акселерометри на основі технології MEMS

Все більш широкого використання набувають мікроелектромеханічні прилади. За допомогою технології MEMS (MicroElectroMechanicalSystem – мікроелектронно-механічні системи) можна механічні переміщення елементів мікросхеми перетворювати у електричні сигнали, зокрема

цифрові[10]. Освоєння технології 3D механічних структур, відкрило шлях до створення надмініатюрних електромеханічних систем.

Мікроелектромеханічні технології характеризуються малою масою, габаритами, низьким споживанням електроенергії, можливістю функціонувати в жорстких умовах експлуатації, а також невеликою вартістю у порівнянні з традиційними аналогами. Область застосування в них надзвичайно широка.

Зазвичай MEMS поділяють на два типи: сенсори – вимірювальні пристрої та актуатори – виконуючі прилади, які займаються іншим завданням, тобто перетворенням сигналів в ті чи інші дії. На практиці MEMS - акселерометри побудовані таким чином, щоб відділити один від одного складові частини – грузик та підвіс, корпус та обкладки конденсатора. Структура виробництва MEMS, заключається в тому, що у більшості випадків в одній деталі тут вдається комбінувати відразу декілька предметів.

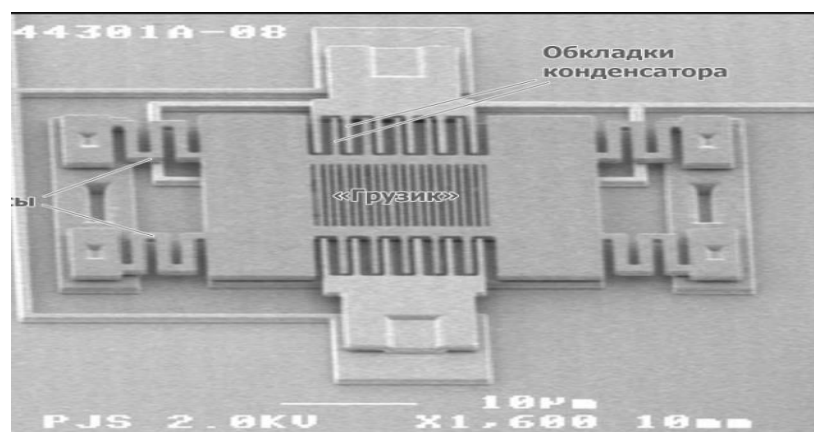


Рисунок 2.3 – Приклад простого мініатюрного MEMS-акселерометра[8].

Найбільш складними MEMS - пристроями є мікромеханічні гіроскопи (ММГ), які з'явилися на ринку відносно недавно. До відома, створення мікромеханічного гіроскопу (ММГ) призвело до революційного процесу у сучасних інерційних технологіях.

Сучасні MEMS - гіроскопи побудовані ідентично акселерометрам, просто в них значення прискорень по вісям перераховуються в значеннях кутів повороту – конструкція приблизно така сама, але на виході інша величина.

До теперішнього часу вирішені основні проблеми побудови ММГ, створені експериментальні зразки, освоєний серійний випуск закордонними фірмами, але залишається проблема підвищення точності і створення приладів навігаційного класу точності. Вирішення зазначеної проблеми пов'язані з проведенням досліджень динаміки і похибок MEMS, які основані на врахуванні збурюючих факторів, які впливають на рух чутливих елементів приладів.

Прикладом класичного гіроскопа є ротор в карданному підвісі [10]. При обертанні ротора він буде зберігати незмінним своє положення в просторі незалежно від руху підстави. Таким чином можна вимірювати кут повороту підстави, а відповідно і корабля /літака.



Рисунок 2.4 – Ротор в карданному підвісі (класичний приклад гіроскопа)[11].

Цілком очевидно, що класичний гіроскоп не може застосовуватися в електроніці. Для цього використовуються вібраційні мікромеханічні гіроскопи - датчики кутової швидкості. Чутливий елемент таких приладів закріплений, при спробі його повороту виникає коріолісова сила, пропорційна кутовий швидкості. Такі датчики мають невеликі габарити (близько 10x10x2 мм) і можуть бути легко інтегровані в друковану плату.

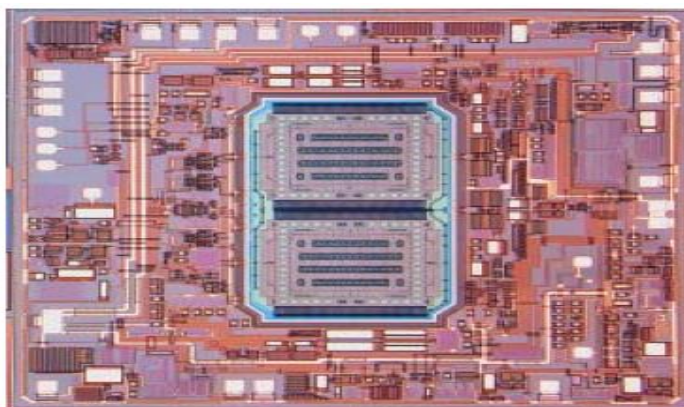


Рисунок 2.5 – Зовнішній вигляд кристалу гіроскопа iMEMS [10]

2.3.1. MEMS - акселерометри на базі об'ємної мікрообробки

Мікроелектромеханічні системи - нова технологія виготовлення мікроскопічних механізмів, що використовує старі інструменти і методи, розроблені для індустрії інтегральних схем. Такі механізми виготовляються на стандартних кремнієвих пластинах.

При виготовленні МЕМС використовується кілька основних технологій, які ми розглянемо нижче, посилаючись на авторів [9].

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, захищає ті ділянки, які необхідно зберегти. Потім пластини занурюються в рідкий травитель, в якості якого може використовуватися гідроксид калію, «з'їдає» незахищені ділянки кремнію. Технологія об'ємної мікрообробки відносно проста і недорога, і добре підходить для не надто складних додатків, критичних до ціни.

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

надійність виготовлених об'ємної мікрообробки датчиків тиску роблять їх ідеальними компонентами також і для різних медичних програм.

2.3.2. MEMS – акселерометри на базі поверхневої мікрообробки

На противагу об'ємної мікрообробки, суть якої полягає в пошаровому видаленні матеріалу з поверхні пластини за допомогою травлення, при поверхневій мікрообробки відбувається послідовне нарощування шарів матеріалу на кремній. На рисунку 2.6 представлений приклад резонатора, зробленого методом поверхневої обробки [6].

Типовий процес поверхневої мікрообробки - це повторювана послідовність нанесення на поверхню пластини тонких плівок, формування на плівці захисного малюнка методом фотолітографії і хімічного травлення плівки. Щоб створити рухливі, що функціонують механізми, в шарах чергують тонкі плівки конструкційний матеріал (зазвичай це кремній) і заповнювач, званого також абляційним матеріалом (як правило, двоокис кремнію). Конструкційний матеріал утворює механічні елементи, а абляційний матеріал заповнює порожнечі між ними. На останньому етапі заповнювач видаляється травленням, і конструкційні елементи набувають рухливість і функціональність[11].

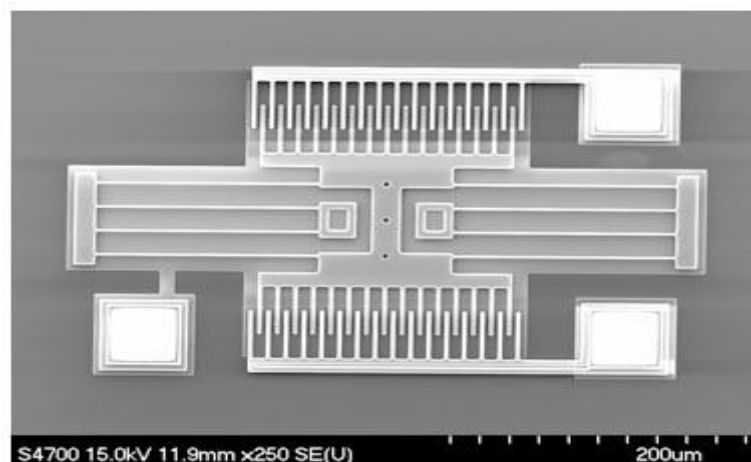


Рисунок 2.6 - Полікремнієвий резонатор, зроблений методом поверхневої мікрообробки[11].

Якщо в якості конструкційного матеріалу використовується кремній, а заповнювачем служить двоокис кремнію, фінальний етап полягає в зануренні пластини в кислоту, яка швидко витрує заповнювач, залишаючи кремній недоторканим. Потім, в типовому випадку, пластини розрізаються на окремі кристали, які, в свою чергу, упаковуються в корпуси тієї чи іншої конструкції, відповідної необхідному додатком [10].

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

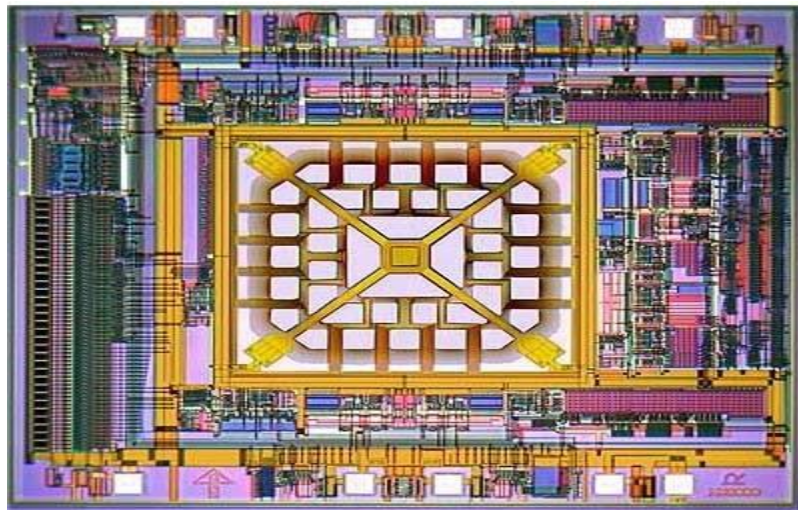


Рисунок 2.7 – Двохосьовий термальний акселерометр [11].

Оскільки для створення МЕМС використовується те ж обладнання і ті ж технології, що і для виготовлення інтегральних схем, ніщо не заважає формувати електронні схеми на одному кристалі з мікромеханізмом. Це дозволяє забезпечувати мікромашини інтелектом і створювати дуже цікаві пристрої [11].

РОЗДІЛ 3. ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРИНЦИПИ ФУНКЦІОНУВАННЯ СУЧАСНИХ АКСЕЛЕРОМЕТРІВ

3.1. Огляд сучасних MEMS – акселерометрів

Велика популярність MEMS - акселерометрів і гіроскопів обумовлена їх широким потенціалом для використання як у побутовій, так і в промисловій техніці. MEMS - датчики широко застосовуються і в автомобільній промисловості для управління подушками безпеки, і в охоронній сигналізації, в навігаційних системах для обчислення пройденого шляху або визначення маршруту проходження. З 2008 р. компанія STMicroelectronics займає лідируючі позиції у виробництві MEMS - датчиків руху для портативної і побутової електроніки, охоронних, автомобільних і навігаційних систем.

В даний час STMicroelectronics - світовий лідер у виробництві MEMS - акселерометрів, що можна побачити з таблиці 3.1. Компанія випускає датчики на базі 200-мм кремнієвих пластин, що забезпечує більш низьку собівартість, у порівнянні з конкурентами.

Таблиця 3.1 – Динаміка доходів основних виробників MEMS [13]

Виробник	Прибуток 2015р., Млн. дол.	Прибуток 2018р., Млн. дол.	Тип MEMS - продукції
STMicroelectronics	96,8	221,2	Акселерометри, гіроскопи
Analog Devices	74,7	68,9	Акселерометри, гіроскопи
Epson Toyocom	35,9	62,2	Гіроскопи, МЭМС-генератори
Panasonic	46,4	49,2	МЭМС- гіроскопи
Avago Technologies	143,5	210,9	П'єзоакустичні МЭМС-фільтри
Texas Instruments	305,0	174,9	МікрозеркальніDLP- модулятори для проекційнихтелевізорів
Knoles	93,7	119,8	МЭМС-мікрофони

Акселерометри ST (STMicroelectronics), в залежності від моделі, здатні вимірювати прискорення або вібрацію в одному або одночасно двох і трьох напрямках. Значення зміщення вимірюється і в залежності від типу вихідного інтерфейсу перетворюється в аналоговий або цифровий вихідний сигнал.

Об'єднання акселерометра і гіроскопа дозволяє створювати інтегровані інерційні системи (Inertial Movement Units, IMU).

На даний момент різко зростає кількість MEMS-пристроїв у складі дорогих мультимедійних телефонів і переносних накопичувачів на магнітних дисках, де вони, як правило, забезпечують роботу систем стрес-захисту, вловлюючи небезпечні для життя пристрої прискорення, як стверджують автори[14].

У останні декілька років стали доступні інерційні пристрої нового типу з компактними чутливими елементами (наприклад, датчики кутових швидкостей і акселерометри та гіроскоп на основі технології MEMS) з низькою вартістю і малими габаритами.

3.2. Порівняльний аналіз експлуатаційних характеристик MEMS акселерометрів

При виборі акселерометра необхідно враховувати діапазон вимірювальних прискорень, температурну стабільність та частотний діапазон. Для пристроїв, які працюють в спеціальних умовах необхідно також враховувати робочий діапазон температур та величину максимально допустимого перенавантаження [15].

Акселерометри можна використовувати в будь-якому пристрої, робота якого зв'язана з переміщенням, нахилом, вібрацією.

Розглянемо та порівняємо основні типи акселерометрів в таблиці 3.2 [17].

Перша цифра в найменуванні вказує число осей датчика (2 або 3). Далі йдуть дві цифри номера розробки. Перша буква в суфіксі означає тип вихідного інтерфейсу (D - digital або A - analog).

Таблиця 3.2 – Типи акселерометрів та їх характеристики [17]:

Тип	Число вісей	U _{пит} , В	Інтерфейс	Чутливість, В/g	Діапазон виміру, g	Тип корпусу, розміри, мм
AIS326DQ	2	3...3,6	SPI	—	±2/±6	QFPN-28 7×7×1,9 мм
AIS226DS						SO-16L
LIS202DL	2	2,16...3,60	I ² C/SPI	—	±2/±8	LGA 3,0×5,0×1,0
LIS244AL		2,40...3,60	Аналоговий	0,42	±2	LLGA 4,0×4,0×1,5
LIS302DL	3	2,16...3,60	I ² C/SPI	—	±2/±8	LGA 3,0×5,0×1,0
LIS331AL		3,00...3,60	Аналоговий	0,478	±2	LLGA 3,0×3,0×1,0
LIS3LV02 DL		2,16...3,60	I ² C/SPI	—	±2/±6	LGA 4,0×7,5×1,0
LIS3LV02 DQ						QFPN 7,0×7,0×1,9
LIS3L02A L		2,40...3,60	Аналоговий	0,66	±2	LGA 5,0×5,0×1,6
LIS331DL		2,16...3,60	I ² C/SPI	—	±2/±8	LLGA 3,0×3,0×1,0

Розглянемо більш детально основні характеристики деяких акселерометрів [17]:

- STAIS226DS, AIS326DQ – дво - і трьохосьовий акселерометри, призначені для автомобільної промисловості і мають робочий діапазон температур -40 ... 105 ° С. Смуга пропускання: 640 Гц. Є функція само тестування;

- LIS202DL - ультракомпактний двовісний акселерометр з низьким споживанням енергії. У нього є вбудовані інтелектуальні функції, в тому числі розпізнавання одинарного і подвійного клацання. Акселерометр можна запрограмувати на виявлення простих користувальницьких дій, наприклад, зв'язати функцію подвійного клацання з апаратним перериванням, завдяки чому дзвінок мобільного телефону приглушається в кишені одним рухом. Користувач може вибрати один з двох стандартних цифрових інтерфейсів: SPI або I2C. Вбудовані функції самотестування дозволяють перевіряти функціонування датчика після подачі напруги на плату;

- LIS244AL, LIS344AL - дуже компактні дво- і трьохвісний акселерометри для вимірювання невеликих величин прискорення. Вони об'єднують в одному корпусі двовісний MEMS-датчик і інтерфейсну мікросхему, яка виробляє в реальному часі два незалежних вихідних аналогових напруги: одне для поперечного, інше - для поздовжнього напрямків. Акселерометри мають дуже низьким рівнем шумів при мінімальному споживанні енергії, що особливо важливо для систем з батарейним харчуванням. Вбудовані елементи самотестування дозволяють контролювати механічну і електричну частини пристрою. Сенсори призначені для широкого спектру апаратури, критичною до розмірів корпусу і споживання енергії: призначені для користувача інтерфейси; охоронні системи; дистанційне керування об'єктами; управління споживанням енергії з урахуванням руху, спортивні та медичні прилади. Акселерометри LIS244ALH, LIS344ALH аналогічні серіям LIS244AL і LIS344AL, але мають два діапазони вимірювань: ± 2 або $\pm 6g$;

- LIS302DL - багатофункціональний датчик прискорення для систем захисту жорстких дисків, створення безконтактних інтерфейсів в сучасних мобільних телефонах і ноутбуках. Акселерометри випускаються в пластмасовому корпусі з габаритами $3 \times 5 \times 0,9$ мм, що значно економить місце і мінімізує вагу мобільних апаратів. Відмінні риси цих приладів - низьке споживання енергії (1мВт) і висока стійкість до вібрації і ударів з прискоренням до 10000g. Для зчитування даних вибирається один з двох доступних стандартних інтерфейсів - SPI або I2C. Крім того, є два незалежних порту для виведення програмованих сигналів переривання. Два окремих сигналу переривання можуть формуватися при перевищенні величини вільного падіння або менша, ніж визначено користувачем. Обидва сигнали використовуються для контролю перевищення встановлених користувачем порогів для будь-яких значень в діапазоні вимірюваних прискорень.

На сьогоднішній день тривісний цифровий MEMS-акселерометр LIS302DLH, що забезпечує високу точність і стабільність з 16-розрядних

перетворенням, є найтоншим у світі серед подібних пристроїв - товщина його корпусу становить всього 0,75 мм, а площа підстави - 3×5 мм [18].

Низька напруга живлення і мале споживання роблять його ідеальним для використання в приладах з батарейним живленням. Мікросхема в стані спокою і відсутності змін сигналу знаходиться в режимі зниженого енергоспоживання з автоматичною активацією при виявленні руху. Діапазон вимірювання вхідних сигналів: ± 8 мВ. Вимірюваний сигнал передається через послідовні інтерфейси I2C / SPI в форматі, що забезпечує безпосереднє підключення до системного процесору без використання додаткових компонентів. Датчик LIS302DLH повністю сумісний з іншими раніше розробленими трьохвісьними акселераторами сімейства Piccolo, включаючи LIS302DL і LIS35DE, забезпечуючи тим самим високий рівень масштабування продукції (збереження сумісності при розширенні функціональних можливостей). Додатки на базі цифрового акселерометра LIS302DLH включають в себе функції виявлення руху; тривожної сигналізації про зміну орієнтації в просторі; виявлення стану вільного падіння; моніторингу рівня вібрації.

LIS3LV02DL - трьохвісний цифровий лінійний акселерометр з програмованим 12- або 16-розрядним поданням даних. Датчик підтримує два з цифрових інтерфейсів (SPI / I2C), має низьку потужність споживання і високу роздільну здатність. При подачі напруги харчування сенсор виробляє процедуру самотестування, що дозволяє користувачеві бути впевненим в справності пристрою [19].

Отже, розроблені спочатку для автомобільних систем розгортання подушок, акселерометри стрімко розширюють свою область застосування. Це дозволяє удосконалити технологію отримувати більш економічні, недорогі та надійні прилади, і акселерометри стають все більш привабливими для широкого спектру нових розробок.

ВИСНОВКИ

1. У теперішній час акселерометри широко використовуються в промисловості та комп'ютерній техніці, включаючи переносні пристрої типу мобільних телефонів, планшетів і ноутбуків, для того, щоб відстежувати їх положення в просторі і надавати додаткові функції, пов'язані з цим. Показано що простіші датчики використовуються в механічних приводах жорстких дисків (чого в майбутньому не буде).
2. Існує велика кількість різних типів акселерометрів і в залежності від галузі застосування до них пред'являються різні вимоги: чутливість, вихідні дані та розміри.
3. Проведено класифікацію та проаналізовано різні типи акселерометрів. Показано, що для вимірювання швидкозмінного прискорення застосовують акселерометри з високою власною частотою 10-20000 Гц, що дозволяє вимірювати прискорення вібрацій від 0,001g до 3000g.
4. Проведено аналіз технічних характеристик застосування мікросистемних технологій, що дозволяють виготовляти досить чутливі акселерометри, гіроскопи і суміщені гіроскопи-акселерометри в невеликих габаритах разом з необхідними для проведення вимірювань електронними схемами. Промислово випускаються одно-, дво- і тривісні акселерометри і гіроскопи-акселерометри, в тому числі інтелектуальні, здатні виконувати безліч сервісних функцій. Ці функції дозволяють їх широко застосувати в майже всіх галузях життєдіяльності людини.
5. Розглянуто інерціальні пристрої нового типу з компактними чутливими елементами (наприклад, датчики кутових швидкостей і акселерометри на основі технології MEMS) з низькою вартістю і малими габаритами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Budnyk M. M., Minov Yu. D., Voytovych I. D. Et alSupersensitivemagnetocardiographic system for early identification and monitoring of heart diseases (hardware) // Управляющие системы и машины. – 2004. – №6. – С. 21 – 30.
2. Budnyk M., Voytovych I., Gapelyuk A. Et alComputer-aided bioimagnetic investigation systems // Управляющие системы и машины (УСиМ). – 1995. – № 3. – С. 31–46.
3. Chen Po-Jui, Rodger D. C., Humayun M. S. and Tai Yu-Chong. Unpowered spiral tube parylene pressure sensor for intraocular pressure sensingSensors and Actuators A // Physical. – March. - 2006. – 127, № 2. – P. 276 – 282.
4. Вуйцик В., Готра З.Ю., Готра О.З, Григорьев В.В., Калита В., Мельник О.М. Мікроелектронні сенсори фізичних величин: Науково – навчальне видання. - За редакцією З.Ю. Готри. - Львів: Ліга – прес. - 2003.-299 с.
5. Yin Y., Fang Z., Liu Y., Han F. Temperature-insensitive structure design of micromachined resonant accelerometers // Sensors. – 2019. - V19, №7. - P.1544.
6. Мещанінов С. К., Співак В. М., Орлов А. Т. Електронні методи і засоби біомедичних вимірювань. – Київ: Кафедра, 2016. – 211 с.
7. Егоров А. А., Егоров М. А., Чехлова Т. К., Тимакин А.Г. Исследование компьютеризированного интегрально-оптического датчика концентрации газообразных веществ // Квантовая электроника. - 2008. - Т. 38, № 8. - С. 787-790.
8. Литвиненко В. В., Майструк А. П. Автомобильные датчики, реле и переключатели. Краткий справочник. - Москва: ЗАО «КЖИ «За рулем», 2008. - 230 с.
9. Шарапов В. М., Полищук Е. С. Датчики: справочное пособие. - Москва: Техносфера. - 2012. – 408 с.

10. Fontanella R., Accardo D., Moriello R. S. L., Angrisani L., De Simone D. MEMS gyros temperature calibration through artificial neural networks // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2018. – V. 279 .- P. 553-565.
11. Lu Q., Shen C., Cao H., Shi Y., Liu J. Fusion Algorithm-Based Temperature Compensation Method for High-G MEMS Accelerometer // *Shock and Vibration*.- 2019. - P.1-13.
12. Datasheet. LYPR540AH MƏMC motion sensor: 3 axis analog output gyroscope.
13. AN2041 Application note LIS3LV02DQ: 3-axis — $\pm 2g/\pm 6g$ Digital Output Low Voltage Linear Accelerometer.
14. Casson A.J., Galvez A.V. , Jarchi D. Gyroscope vs. accelerometer easurements of motion from wrist PPG during physical exercise // *ICT Express*. - 2016, V. 2, № 4.- P. 175 - 179.
15. D. Catenazzo, B. O’Flynn, M. Walsh, December. On the use of wireless sensor networks in preventative maintenance for industry 4.0, in: 2018 / 12th International Conference on Sensing Technology (ICST), IEEE - 2018, P. 256–262.
16. U. Vanmathi, H. Jadhav, A. Nandhini, M.R. Kumar, Accelerometer based home automation system using IoT, in: *Soft / Computing for Problem Solving*, Springer, Singapore. - 2020. – P. 855–861.
17. Pak M., Fernandez F.V. , Dundar G. Comparison of QMC-based yield- aware Pareto front techniques for multi-objective robust analog synthesis// *Integrat. VLSI J*. -2016 .- V. 55, № 9. - P. 357–365
18. Messina M., Njuguna J., Palas C. Mechanical structural design of aMEMS-based piezoresistive accelerometer for head injuries monitoring: acomputational analysis by increments of the sensor mass moment of inertia // *Sensors*. - 2018. - V. 18, № 1.- P.289
19. Yang, W., Fang, B., Tang, Y. Y., & Qin, X. A Temperature Compensation Model for Low Cost Quartz Accelerometers and Its Application in Tilt Sensing. *Mathematical Problems in Engineering*. - 2016.
20. Chen Y., Xie Y., Song L., Chen F., Tang T. (2020). A Survey of Accelerator rchitectures for Deep Neural Networks // *Engineering*.-2020. - V6, №3 - P 264-274.