

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Факультет електроніки
Кафедра мікроелектроніки**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Дмитро ТАТАРЧУК

«__» _____ 20__ р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою «Мікро- та наноелектроніка»

спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка»

на тему: «Вібраційні датчики на основі електрокерованого п'єзоелектричного ефекту»

Виконав (-ла):

студент (-ка) II курсу, групи ДП-21мп

Фіцай Руслан Петрович _____

Керівник: проф.каф.МЕ, д.ф.-м.н., проф.,

Корольок Дмитро Володимирович _____

Консультант з нормоконтролю: доц.каф.МЕ, к.ф.-м.н., с.н.с.,

Свечніков Георгій Сергійович _____

Консультант з інформаційних питань: проф.каф.МЕ, д.ф.-м.н., проф.,

Поплавко Юрій Михайлович _____

Рецензент: Посада, науковий ступінь, вчене звання,

Прізвище, ім'я, по батькові _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2023 року

РЕФЕРАТ

Актуальність теми. Актуальність теми надзвичайно важлива в сучасному світі науки і технології, адже тема п'єзoeлектрики відкриває безмежні можливості для створення нових матеріалів та пристроїв, що мають великий потенціал у різних галузях. Ось кілька аспектів, що підкреслюють актуальність цієї теми:

Споживчі та медичні технології: п'єзoeлектрика має важливе застосування в сучасних медичних технологіях, таких як ультразвукова діагностика, нейростимулятори та інше. Дослідження в галузі електрокерованого п'єзoeлектричного ефекту дозволить поліпшити ефективність цих пристроїв та розширити їх можливості.

Зелена енергія: завдяки ефекту п'єзoeлектрики, ми можемо конвертувати механічну енергію у електричну, що відкриває можливості для створення альтернативних джерел енергії. Дослідження в цій галузі спрямовані на розвиток п'єзoeлектричних матеріалів для використання у сучасних енергетичних системах.

Сенсорні системи: п'єзoeлектрика використовується для створення чутливих сенсорних систем, які виявляють різні параметри, включаючи тиск, вологість, температуру і т.д. Зростання інтересу до інтернету речей (IoT) і сенсорних технологій робить електрокерований п'єзoeлектричний ефект актуальним для розробки більш чутливих та надійних сенсорів.

Матеріалознавство та нанотехнології: дослідження п'єзoeлектричних матеріалів розширюють можливості створення нових матеріалів з унікальними властивостями. Створення таких матеріалів має важливе значення для розвитку нових матеріалів у нанотехнологіях та електроніці в майбутньому

Мета дослідження електрокерованого п'єзоелектричного ефекту полягає в розширенні знань та розуміння цього феномену і доведення його практичного застосування в різних галузях науки та технології.

Завдання дослідження:

Теоретичний аналіз п'єзоелектричної теорії: провести детальний огляд і аналіз основних концепцій, що стосуються п'єзоелектрики.

Вибір матеріалів і дослідницьких методів: визначити п'єзоелектричні матеріали для дослідження та визначити методи дослідження.

Оцінка практичних застосувань: дослідити можливість впровадження п'єзоелектричних матеріалів і пристроїв у різні галузі.

Об'єкт дослідження. П'єзоелектричні матеріали

Предмет дослідження. Електрокерований п'єзоелектричний ефект та його застосування.

Наукова новизна полягає в розширенні можливостей використання п'єзоелектрики у різних галузях та в розробці нових матеріалів; пристроїв; технологій, які сприяють покращенню сучасних вже існуючих технологій та вирішенню важливих завдань у науці.

Ключові слова: п'єзоелектрика, п'єзоелектричний ефект, п'єзоелектричні матеріали

Abstract

Relevance of the topic. The relevance of the topic is extremely important in the modern world of science and technology, because the topic of piezoelectricity opens up endless possibilities for creating new materials and devices that have great potential in various fields. Here are some aspects that emphasize the relevance of this topic:

Consumer and medical technologies: piezoelectricity has important applications in modern medical technologies, such as ultrasound diagnostics, neurostimulators, and more. Research into the electrically controlled piezoelectric effect will improve the efficiency of these devices and expand their capabilities.

Green energy: thanks to the effect of piezoelectricity, we can convert mechanical energy into electrical energy, which opens up opportunities for creating alternative energy sources. Research in this area is aimed at developing piezoelectric materials for use in modern energy systems.

Sensor systems: piezoelectricity is used to create sensitive sensor systems that detect various parameters, including pressure, humidity, temperature, etc. The growing interest in the Internet of Things (IoT) and sensor technologies makes the electrically controlled piezoelectric effect relevant for the development of more sensitive and reliable sensors.

Materials science and nanotechnology: research on piezoelectric materials is expanding the possibilities for creating new materials with unique properties. The creation of such materials is essential for the development of new materials in nanotechnology and electronics in the future

The purpose of the study of the electrically controlled piezoelectric effect is to expand the knowledge and understanding of this phenomenon and to prove its practical application in various fields of science and technology.

Objectives of the study

Theoretical Analysis of Piezoelectric Theory: Conduct a detailed review and analysis of the basic concepts related to piezoelectrics.

Selection of materials and research methods: Identify piezoelectric materials for research and determine research methods.

Evaluation of practical applications: to investigate the feasibility of implementing piezoelectric materials and devices in various industries.

Object of research. Piezoelectric materials

Subject of research. Electrically controlled piezoelectric effect and its application.

The scientific novelty is to expand the possibilities of using piezoelectricity in various fields and to develop new materials; devices; technologies that contribute to the improvement of modern existing technologies and the solution of important problems in science.

Keywords: piezoelectricity, piezoelectric effect, piezoelectric materials

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ.....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. П'ЄЗОЕЛЕКТРИКА.....	9
1.1 Загальні характеристики п'єзоелектрики.....	11
1.2 П'єзоелектричний ефект.....	15
1.2.1 Прямий п'єзоелектричний ефект.....	20
1.2.2 Зворотний п'єзоелектричний ефект.....	23
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1.....	28
РОЗДІЛ 2. П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНІ ДАТЧИКИ.....	30
2.1 Як працюють п'єзоелектричні датчики?.....	31
2.2 Застосування п'єзоелектричних датчиків.....	32
2.3 Принцип роботи.....	39
2.4 Електричні властивості.....	41
2.5 Конструкція датчика та чутливі матеріали.....	43
2.6 П'єзоелектричний датчик вібрації.....	44
2.7 Застосування промислових датчиків вібрації.....	49
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2.....	50
ВИСНОВКИ.....	51
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	53

Перелік скорочень, умовних позначень, термінів

PVF2 - полімерне покриття складається з 80% полівінілденфториду і на 20% з акрилу, володіє високою стійкістю до механічних пошкоджень.

НВЧ - надвисокочастотне випромінювання

PZT - п'єзоелектричний матеріал, який використовується у виробництві п'єзоелектричних пристроїв.

CVD - хімічне осадження з газової фази

ALD - атомно-шарова епітаксія

HVAC - опалення, вентиляція та кондиціонування повітря

Сейсмічна маса - це маса, яка рухається під впливом сейсмічних коливань. Чим більша маса, тим більша індуктивність.

Інерційність датчика - це властивість об'єкта залишатися у спокої або рухатися з постійною швидкістю, якщо на нього не діють зовнішні сили. Чим більша інерційність датчика, тим більша буде його опір зміні стану (у випадку сейсмічних коливань - зміні руху), що також може призвести до більшої індуктивності.

ВСТУП

Електроніка – одна з галузей, яка формує сучасний світ та визначає наше щоденне життя. З кожним роком вона стає все більшою частиною нашого оточення, допомагаючи розв'язувати складні завдання та вдосконалюючи нашу комунікацію, транспорт, медицину, енергетику та багато інших аспектів життя. Проте зростаючі вимоги до компактності, ефективності та надійності електронних пристроїв ставлять виклики перед інженерами та науковцями.

В сучасному світі, ми стикаємося з обмеженими ресурсами енергії, потребою в бездротовому живленні та вимогою до мініатюризації пристроїв. У цьому контексті електрокерований п'єзоелектричний ефект, який виявився відкриттям більше століття тому, знову стає актуальним. Цей феномен дозволяє перетворювати механічну енергію у електричний сигнал та навпаки. Його властивості і можливості роблять його надзвичайно цікавим для використання в сучасній електроніці.

Магістерська дисертація присвячена вивченню та аналізу можливостей застосування електрокерованого п'єзоелектричного ефекту в електроніці. Метою цього дослідження є розгляд різних аспектів цього ефекту, виявлення його потенціалу для створення більш компактних та ефективних електронних пристроїв, а також дослідження нових напрямків розвитку сучасної електроніки.

У світі, де наші потреби у електронних пристроях ростуть, а ресурси скорочуються, розуміння та використання електрокерованого п'єзоелектричного ефекту стає ключем до досягнення сталого розвитку та створення більш ефективних та стійких електронних систем. Ця дисертація стане спробою розкрити потенціал цього ефекту та його важливість для сучасної електроніки.

РОЗДІЛ 1. П'ЄЗОЕЛЕКТРИКА, П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИЙ ЕФЕКТ

П'єзоелектрика - це електричний заряд, який накопичується в певних твердих матеріалах, таких як кристали, деякі види кераміки та біологічні речовини, такі як кістки, ДНК та різні білки, у відповідь на механічне навантаження.[1] Слово "п'єзоелектрика" означає електрику, що виникає внаслідок тиску та прихованого тепла. Воно походить від давньогрецького (πίεζω) "стискати або тиснути" та (ἑλεκτρον) "бурштин" (давнє джерело електричного струму)[2].

П'єзоефект виникає внаслідок лінійної електромеханічної взаємодії між механічним та електричним станами в кристалічних матеріалах без інверсійної симетрії[3]. П'єзоефект є оборотним процесом: матеріали, що демонструють п'єзоефект, також демонструють зворотний п'єзоефект - внутрішню генерацію механічної деформації під дією прикладеного електричного поля. Наприклад, кристали титанату цирконату свинцю генерують вимірювану п'єзоелектрику, коли їх статична структура деформується приблизно на 0,1% від початкового розміру. І навпаки, ті ж самі кристали змінюють приблизно 0,1% свого статичного розміру, коли до них прикладається зовнішнє електричне поле. Зворотний п'єзоелектричний ефект використовується у виробництві ультразвукових хвиль[4].

Французькі фізики Жак і П'єр Кюрі відкрили п'єзоелектрику в 1880 р.[5] П'єзоелектричний ефект був використаний у багатьох корисних додатках, включаючи виробництво і виявлення звуку, п'єзоелектричний струменевий друк, виробництво електроенергії високої напруги, як генератор годинника в електронних пристроях, в мікровагах, для приводу ультразвукового сопла і в надтонкому фокусуванні оптичних збірок. Він є основою для скануючих зондових мікроскопів, які розрізняють зображення на рівні атомів. Його використовують у звукознімачах деяких гітар з електронним підсиленням і як тригери в більшості сучасних електронних барабанів.[6]

П'єзоефект також знаходить повсякденне застосування, наприклад, генерування іскор для запалювання газових кухонних і опалювальних приладів, ліхтарів і запальничок.

П'єзоелектрика досліджує питання, яке знаходиться на перетині двох класичних наукових галузей: по-перше, механіки деформованого твердого тіла, а по-друге - електродинаміки суцільних середовищ. Диференціальні рівняння електродинаміки встановлюють зв'язок між векторами електричного поля E , електричної індукції D , магнітного поля H і магнітної індукції B . Майже всі п'єзоелектрики є діелектриками, і в них виникають п'єзоелектричні ефекти. П'єзоелектричні ефекти виникають на швидкостях, значно менших за швидкість світла. У цьому випадку магнітними ефектами можна знехтувати, і замість електродинаміки використовувати рівняння електростатики в діелектриках, коли $\text{rot}E = 0$, $\text{div}D = 0$ [7].

П'єзоелектрик - це твердотільний перетворювач механічної енергії в електричну (прямий ефект) або, навпаки, електромеханічний перетворювач (зворотний ефект). При цьому механічно індукована електрична поляризація прямо пропорційна деформації, тобто це непарний (лінійний) ефект, який можливий лише в нецентросиметричних матеріалах. П'єзоефект характеризується різними п'єзоелектричними модулями - тензорами третього рангу, залежно від комбінації граничних умов, за яких п'єзоефект використовується або вивчається. Взаємозв'язок механічних та електричних властивостей у п'єзоелектриках характеризується коефіцієнтом електромеханічного зв'язку, квадрат якого показує, наскільки енергія, прикладена до п'єзоелектрика перетворюється в інший вид енергії. Параметри п'єзоелектричного ефекту можна керувати електричним полем, змінюючи п'єзоелектричні фільтри і параметрами поверхневих акустичних хвиль [7].

1.1 Загальні характеристики п'єзоелектрики

Як відомо, властивості, що описуються тензорами непарних рангів, можуть мати лише кристали, що належать до 21 нецентросиметричного класу точкової симетрії. З них 20 класів виявляють п'єзоелектричний ефект, кількісною характеристикою якого є тензор третього рангу d_{ijk} (тензор п'єзоелектричних коефіцієнтів). Як і всі тензори матеріалу непарних рангів, цей тензор зникає в кристалах, що мають центр симетрії, тому лінійний електромеханічний ефект в центросиметричних середовищах неможливий.

Справа в тому, що п'єзоелектричний ефект не може виникнути в центросиметричних кристалах, оскільки будь-яка механічна дія (яка має центр симетрії) на центросиметричний кристал призводить до виникнення групи симетрії з центром симетрії, причому дії розтягування, стискання або зсуву є центросиметричними діями. Іншими словами, після будь-якої рівномірної деформації центросиметричний кристал залишається центросиметричним. Наявність центру симетрії в деформованому кристалі означає, що немає причин для механічно індукованої електричної поляризації, оскільки в такому кристалі відсутні полярні напрямки.

Прояв п'єзоефекту в піроелектриках очевидний, оскільки вони мають своєрідну полярну вісь, тому будь-яка їхня деформація призводить до електричної поляризації. Але в полярно-нейтральних кристалах також існують полярно-чутливі напрямки, хоча вони повністю компенсуються*). П'єзоефект у цих кристалах виникає тоді, коли спрямований зовнішній вплив (що діє в певному напрямку) робить полярно-нейтральну структуру такого кристала "нескомпенсованою"; таким чином, в результаті спрямованого механічного впливу в полярно-нейтральному кристалі

виникає особливий полярний напрямок. Тому всі полярно-нейтральні кристали слід віднести до п'єзоелектриків.

П'єзоелектричні матеріали включають об'ємну кераміку, керамічні тонкі плівки, багат шарову кераміку, монокристали, полімери та кераміко-полімерні композити. За останні роки було розроблено і випробувано велику кількість різноманітних п'єзоелектричних плівкових матеріалів для різних мікросистем і мікроелектронних компонентів. Плівкові та об'ємні п'єзоелектрики можуть бути використані також у мікрохвильових пристроях. Особливе значення мають п'єзоелектричні композити різних класів, в яких можна отримати параметри, що значно перевершують параметри однорідних п'єзоелектричних матеріалів [3]. Нові релаксорно-сегнетоелектричні кераміки та кристали демонструють надзвичайно високу ефективність п'єзоелектричного перетворення енергії, що становить інтерес, зокрема, для медичних пристроїв візуалізації та для інших застосувань, таких як спеціальні приводи для промислового неруйнівного контролю.

Практичне застосування приладів і пристроїв, що використовують у своїх конструкціях п'єзоефект, дуже широке і постійно розширюється [5]. Найбільш важливими науково-технічними галузями використання п'єзоефекту є

- п'єзоелектроніка (п'єзотехніка об'ємних акустичних хвиль), що включає розробку п'єзоприймачів, п'єзотрансформаторів і п'єзодвигунів, адаптерів, мікрофонів, п'єзоелектричних резонаторів і п'єзофільтрів

- акустоелектроніка (п'єзоелектрична техніка поверхневих хвиль), де розробляються мікроелектронні перетворювачі інформації: лінії затримки, фільтри, датчики зовнішніх впливів, конвертори тощо

- акустооптика, яка використовує взаємодію оптичних хвиль з акустичними, що дозволяє розробляти дефлектори, оптичні фільтри та інші оптичні пристрої;

-сучасні енергетичні пристрої, такі як п'єзоелектричні генератори енергії, п'єзоелектричні двигуни тощо.

Як відомо, деякі вироби, такі як годинники, фотоапарати, мобільні телефони, телевізори, комп'ютери, п'єзоелектричні запальнички стали предметами повсякденного життя. Багато електронних пристроїв неможливі без використання п'єзоелементів. Це випромінювачі та антени гідролокаторів, стабілізатори частоти в комп'ютерах, електронні пристрої відліку часу, мережеві фільтри та лінії затримки в радіо- і телефонному зв'язку, датчики для вимірювання прискорення, вібрації, акустичної емісії неруйнівного контролю, п'єзоперетворювачі та п'єзодвигуни, медичні ультразвукові апарати та медичні прилади різного призначення тощо.

Функціональне призначення п'єзоелементів, які використовуються в годинниках, п'єзоперемикачах, телевізорах і мобільних телефонах, досить різноманітне, але в основі цих пристроїв лежить одне і те ж фізичне явище - п'єзоелектрика, тобто здатність деяких кристалів, кераміки, текстур і композитів виробляти електрику, змінюючи свою форму або розмір. І навпаки, вони можуть змінювати свої розміри або форму під впливом електричної напруги.

Одним із сучасних напрямків п'єзоелектроніки є перетворення будь-якого руху в електричний струм. Наприклад, перетворення енергії людини в енергію живлення різних електронних пристроїв: спеціальні п'єзоелектричні передачі, розроблені для солдатів, дозволяють використовувати електричний струм, що генерується при їхньому русі, і тим самим позбутися зайвої ваги батарейок. Значних переваг можна досягти за допомогою нанотехнологій: встановлено, що зі зменшенням розмірів п'єзоперетворювача зростає його здатність генерувати енергію. Експериментально доведено, що наночастинки розміром близько 20 нанометрів виробляють вдвічі більше струму, ніж монолітний п'єзоелектрик. Запропоновано десятки способів застосування нанотехнологій - від зарядки енергії мобільного телефону від голосу

споживача і до пристрою, що дозволяє читати думки людини (що надзвичайно важливо для неврології) [7].

Деякі приклади сучасних енергетичних пристроїв на основі п'єзоелектрики:

-Гасителі коливань для вертольотів і літаків; зокрема, розроблена спеціальна конструкція підшипника, в якій тертя послаблює вібрації, для створення якої не потрібні спеціальні механізми (втулки підшипників виготовлені з п'єзоелектричного матеріалу, причому електрична напруга змушує п'єзоелектрик стискатися і розширюватися стискатися і розширюватися, створюючи вібрацію, яка зменшує тертя);

-П'єзоелектричні перетворювачі, що встановлюються в реактивних літаках з метою економії енергії (і, відповідно, палива), в яких вібрації фюзеляжу та крил безпосередньо трансформуються в електрику;

-Розроблено світлофори з електроприводом, акумулятори яких заряджаються від шуму автомобілів на перехрестях вулиць від шуму автомобілів на перехрестях вулиць;

-Проведені експерименти з перетворення енергії морських хвиль в електроенергію (приливні електростанції в США). Наступний приклад - п'єзоелектрична система експериментально працює в Японії на перехресті залізничних станцій для перетворення енергію коливань платформи в електрику [7].

1.2 П'єзоелектричний ефект

П'єзоелектрика є однією з основних властивостей кристалів, полімерів кераміки та рідких кристалів. Існує кілька способів описати п'єзоелектричний ефект [8]. Мабуть, найпоширенішим є визначення, що матеріал є п'єзоелектричним, якщо прикладання зовнішньої механічної напруги викликає розвиток внутрішнього діелектричного зміщення. Це зміщення проявляється у вигляді внутрішньої електричної поляризації або поверхневого електричного заряду. Через те, що пружне напруження і діелектричне зміщення трансформуються під час обертання координатної осі (рис. 1), п'єзоелектричні константи, що описують лінійну залежність, утворюють тензор третього порядку. Спрощене математичне формулювання п'єзоефекту наведено нижче. Детальніші трактування п'єзоелектричного ефекту та ефекту Конверса можна знайти в літературі.

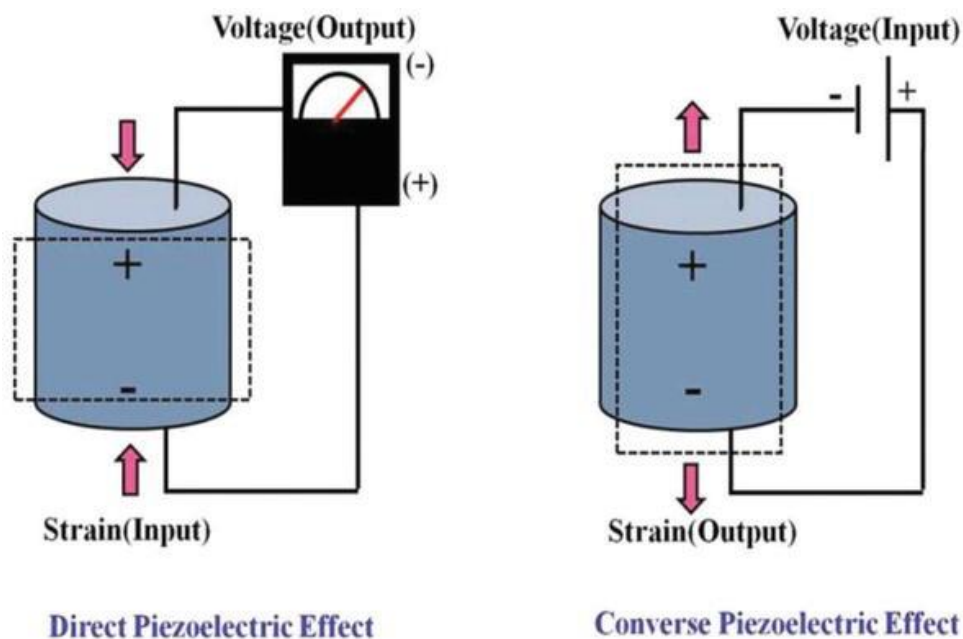


Рисунок 1 - П'єзоелектричний ефект

(<https://cdnintech.com/media/chapter/77225/1512345123/media/F1.png>)

Слід зазначити, що п'єзоелектричний ефект тісно пов'язаний з симетрією кристалів. Всі кристали поділяються на 32 точкові групи. Кристали, що належать до 11 центросиметричних точкових груп, не можуть проявляти п'єзоелектричний ефект. Кристали, що належать до нецентросиметричної точкової групи О, також не проявляють п'єзоелектричного ефекту. Майже всі інші неметалеві кристали, що належать до решти 20 точкових груп, проявляють п'єзоелектричний ефект певної величини, хоча деякі з них дуже малі.

П'єзоелектричне явище можна описати так:

$$P_i = P_i^0 + d_{ijk} E_j T_k \quad (1)$$

де P_i - компонент вектора поляризації, P_i^0 - спонтанна поляризація і T_{jk} - компонент тензора напружень. Коефіцієнт d_{ijk} називається п'єзоелектричним коефіцієнтом і є компонентом тензора третього рангу.

До п'єзоелектричних матеріалів, які в даний час привертають велику наукову увагу, відносяться п'єзоелектричні напівпровідники, такі як арсенід галію, які мають широкий спектр цікавих властивостей [9]. Існуюча мета з цими матеріалами полягає в інтеграції п'єзопристрою і напівпровідникових компонентів на одній підкладці. Останнє десятиліття стало свідком бурхливого розвитку досліджень поверхневих акустичних хвиль. Останнім часом дослідження були зосереджені на шаруватих системах, що містять п'єзоелектрики. Іншим важливим застосуванням поверхневих акустичних хвиль стала розробка мініатюрних високочастотних фільтрів "об'ємної структури" з використанням кристалів ніобату і танталату літію для застосування в побутовій електроніці.

Дослідження поверхневих акустичних хвильових резонаторів з об'ємною структурою наразі є дуже активним напрямком. П'єзоелектричні полімери, тонкі плівки та композити набувають все більшого значення. Про це свідчить низка

нещодавніх міжнародних конференцій, присвячених PVF2 та іншим п'єзоелектричним полімерам.

З моменту першого відкриття п'єзоелектрики застосування п'єзоелектричних матеріалів стрімко зростало. Робота Ланжевена відкрила широку область ультразвуку, яка зараз включає в себе виявлення, неруйнівну оцінку, акустичну електрику, акустооптику і візуалізацію, обробку сигналів, фізичну акустику, медичну акустику і т.д.

Ранні роботи Кейді та Ніколсона призвели до створення засобів керування частотою, включаючи резонатори, генератори та фільтри [10]. Спочатку в цій галузі використовувалися низькі частоти близько 100 кГц. З часом з'явилася потреба в більш високих частотах. Більшість височастотних п'єзоелектричних фільтрів, що випускаються в даний час, засновані на теорії мультимедійного резонатора Оноє. Слід зазначити, що теорія Оноє була натхненна теорією енергетичних пасток Шоклі.

Сьогодні п'єзоелектричні пристрої можна знайти в телевізорах, радіоприймачах, наручних годинниках, невеликих комп'ютерних іграх, автомобілях тощо. У багатьох системах зв'язку та навігації використовується велика кількість дуже точних п'єзоелектричних резонаторів для контролю, генерації та селекції частоти.

Можна помітити, що навіть для кварцу, який є оригінальним п'єзоелектричним матеріалом, темпи покращення властивостей цих пристроїв все ще перебувають у фазі прискорення. Наприклад, стабільність кварцових джерел частоти покращується на порядок кожні п'ять-шість років.

П'єзоелектричні матеріали завжди відігравали дуже важливу роль в акустиці. Останнім часом вони знайшли широке застосування як генератори, передавачі та детектори поверхневих акустичних хвиль.

Серед багатьох біологічних матеріалів, які проявляють п'єзоелектричні властивості, кістка належить до найбільш досліджених. Бур виміряв різні комплексні п'єзоелектричні константи бичачої кістки як функцію частоти, температури та відносної вологості. Присутність води в кістці в деяких п'єзоелектричних константах

призводить до виникнення п'єзоелектричної релаксації, в інших - зміщує частоту релаксації, так само як і температура. Ця п'єзоелектрична релаксація також була якісно пояснена двофазною моделлю. Втрати в цьому випадку пояснюються максвеллівсько-вагнерівською дисперсією, яка виникає внаслідок іонної провідності.

Може здатися, що фізичний механізм п'єзоелектричної релаксації за рахунок електричних і механічних взаємодій між різними фазами відрізняється від п'єзоелектричної релаксації, описаної в попередніх розділах. Основні елементи п'єзоелектричної релаксації, однак, сумісні для молекулярних точкових дефектів, для двовимірних дефектів, таких як доменні границі, і для тривимірних дефектів, таких як тонкодисперсні фазові матеріали. У будь-якому випадку існує зв'язок між електричними і механічними втратами, який можна описати релаксацією дефектів, які одночасно є як електричними, так і пружними диполями. Неоднорідна система тягне за собою вищий ступінь складності, наприклад, суперпозицію незв'язаних втрат, втрат на електропровідність, розподіл орієнтації локальних польових ефектів та інші. Тому теоретичне трактування є більш зрозумілим у двофазній моделі.

П'єзоелектрична кераміка призначена для виготовлення електромеханічних перетворювачів, що використовуються в механічних частотних фільтрах, які знаходять застосування в системах зв'язку на великі відстані. Ця кераміка повинна відповідати специфікаціям, які можуть бути досягнуті лише шляхом використання всіх можливостей, що надаються фізичними ефектами фероелектричних матеріалів. Необхідний позитивний температурний коефіцієнт частотної сталої реалізується за допомогою пружних аномалій в області сегнетоелектричних фазових переходів.

Кварцові резонатори були пристосовані для комунікацій, але останніми роками переважно для наручних годинників, оскільки кварцовий генератор, який включає п'єзоелектричний кварцовий резонатор, має дуже стабільну частоту. Завдяки кварцовим резонаторам точність часу в наручних годинниках швидко покращилася. Кварцові резонатори для наручних годинників складають понад 60% від загальної кількості кварцових резонаторів, що виробляються в Японії. У цій статті

розглядаються характеристики, деталі технічних досягнень, методи аналізу, технологія виробництва і, нарешті, майбутні тенденції розвитку кварцових резонаторів для наручних годинників.

Останнім часом електронні наручні годинники набули широкого розповсюдження, маленькі і красиві, з високою точністю і багатьма функціями. Цьому завдячуємо розробці різних деталей годинника, в тому числі й інтегральних схем. Серед них особливо виділяється розробка кварцового резонатора для наручних годинників, який виробляє стандарт часу (частоти).

Пружні коливання кварцового резонатора перетворюються в електричні коливання за допомогою п'єзоелектрики, оскільки кристал кварцу стійкий до температури навколишнього середовища, часу, що минув, та інших різних умов; частота генератора кварцового резонатора надзвичайно стабільна. Тому він використовується в галузі бездротового зв'язку, а нещодавно був адаптований для наручних годинників і годинників. Тут показано відсоток кварцових резонаторів за галузями, вироблених в Японії. Як зазначено, кварцові резонатори для наручних годинників і годинників становлять 64,6% від загальної кількості і 40,4% від валового обсягу продажів [11].

1.2.1 Прямий п'єзоелектричний ефект

П'єзоефект завжди є результатом дії сили на полярний кристал, причому силою може бути механічна напруга або електрична напруга, а реакцією кристала - електрична поляризація або механічна деформація. Прямий п'єзоефект є результатом механічної дії; для спрощення задачі далі розглядатимемо лише однорідні та центрально-симетричні дії на п'єзоелектрик. По відношенню до конкретного п'єзоелектричного зразка механічні напруження можуть бути поздовжніми, поперечними, розподіленими і гідростатичними.

Найпростіший випадок поздовжнього п'єзоефекту продемонстровано на рис. 2: у зразку з полярного кристала під дією від'ємного або додатного напруження виникає електрична поляризація, яка демонструє лінійну залежність від напруги [7].

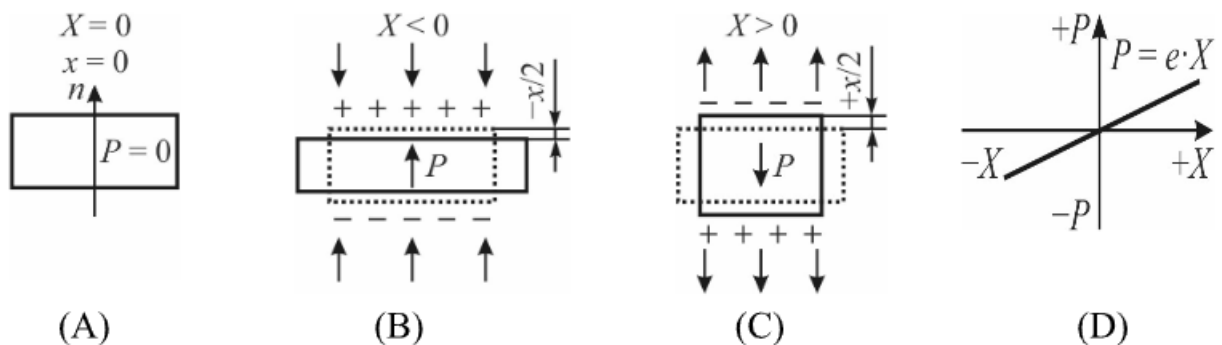


Рисунок 2 - Прямий п'єзоефект: А - пластинка полярного кристала з вертикально спрямованою полярною віссю; В - до пластини прикладено стискаюче напруження - X ; С - до пластини прикладено розтягуюче напруження $+X$; D - лінійна залежність індукованої поляризації від прикладеного напруження [7].

Відповідно до першого спостереження п'єзоелектричного ефекту братами Кюрі, рівняння прямого п'єзоефекту можуть мати вигляд:

$$P_i = d_{ijk} X_{jk}, \quad (2)$$

де P_i - компоненти вектора поляризації (тензора першого рангу); $i, j, k = 1, 2, 3$ відповідно до декартових осей x, y та z ; X_{jk} - компоненти механічного напруження (тензор другого рангу); та d_{ijk} - компоненти п'єзоелектричного модуля (тензор третього рангу). Повторювані індекси j і k у цьому виразі означають підсумовування; таким чином, подані в скороченому вигляді рівняння прямого п'єзоелектричного ефекту, в розгорнутому вигляді матимуть вигляд трьох рівнянь і кожне з яких має по шість доданків у правій частині.

Основні застосування прямого п'єзоелектричного ефекту. Існують різні інженерні підходи для порівняння п'єзоелектричних матеріалів. Для п'єзоелектриків призначених для використання в якості приймачів акустичних сигналів, необхідно забезпечити високу чутливість при низькому рівні шуму. Якщо такі п'єзоприймачі застосовуються в рідких середовищах, їх називають гідрофонами, якщо такі пристрої використовуються в повітрі - мікрофонами, то їх називають мікрофонами. Загалом, в електроніці, приладобудуванні та медичній техніці таке використання п'єзоелектриків можна узагальнити такими поняттям "п'єзоелектричні сенсори".

П'єзоелектричні сенсорні елементи можуть бути використані або в простій пластинчастій формі, або у вигляді багат шарової структури, в якій окремі пластини з'єднані між собою за допомогою розміщених між ними електродів. Наприклад двошаровий датчик потужності. Коли до цього датчика прикладається зовнішня сила, одна його частина розширюється, а інша стискається, що призводить до подвоєння вихідного сигналу (подвійні датчики можна вмикати паралельно або послідовно). П'єзоелектричний датчик має дуже високий вихідний опір, тому для узгодження з наступними електронними схемами необхідно використовувати спеціальні інтерфейси, що представляють собою перетворювачі напруги в струм, або підсилювачі напруги з високим вхідним опором[7].

Датчики вібрації, що використовують прямий п'єзоелектричний ефект, широко застосовуються в літаках, електрогенераторах, акселерометрах тощо. Ці датчики

працюють в частотному діапазоні 2 Гц-5 кГц і характеризуються високим ослабленням шумів, високою лінійністю і широким температурним діапазоном (особливо, коли в якості чутливих елементів використовуються кристали кварцу). в якості чутливих елементів). При застосуванні п'єзоелектричних кристалів в акселерометрах акселерометрах п'єзоелектричні кристали розташовуються між корпусом та інерційною масою, що робить діючу силу пропорційною діючу силу пропорційною прискоренню. Керамічні п'єзоелектричні плівки також використовуються в керамічні п'єзоелектричні плівки: в цьому випадку вони є мікросенсорами, які зазвичай наносяться на кремній. При формуванні інтегрованих кремнієвих мікросенсорів на кремній наносять тонкі плівки п'єзоелектричної кераміки наносять на кремнієву консоль. П'єзоелектричний сигнал посилюється за допомогою мікроелектронною схемою, вбудованою в один мікропристрій з п'єзоелектричним сенсором[7].

П'єзоелектричні мікрофони працюють в акустичному діапазоні, який сприймається людиною, проте ця назва може використовуватися також для ультразвукових та інфразвукових детектори ультразвукових та інфразвукових хвиль. По суті, мікрофон - це датчик тиску, пристосований для перетворення звукових звукові хвилі в широкому спектральному діапазоні. Мікрофони характеризуються чутливістю, спрямованістю, смугою пропускання, динамічним діапазоном, розмірами, вартістю тощо. Важливою умовою для використання мікрофонів є узгодження акустичних опорів середовища і пристрою. Для приймачів звуку величина акустичного опору визначає умови для узгодження з середовищем.

П'єзоелектричні генератори високої напруги дуже прості за своєю конструкцією і можуть забезпечувати як високу напругу (для створення, наприклад, іскри), так і значну потужність яку можна використовувати в п'єзоелектричному гасителі коливаль. Використання п'єзоелектричних керамічних циліндрів з діаметром близько 10 мм і довжиною близько 15 мм, можна отримати електричні імпульси напругою 15 - 25 кВ з часовим інтервалом близько 50 мікросекунд[7].

1.2.2 Зворотний п'єзоелектричний ефект

У випадку зворотного п'єзоефекту рушійною силою переважно є електричне поле E , тоді як індукованою реакцією зазвичай є механічна деформація x (або, якщо це неможливо, то виникає механічна напруга). Як уже згадувалося раніше, прикладена до будь-якого діелектрика електрична напруга викликає його деформацію, оскільки заряджені частинки матеріалу зміщуються в процесі електричної поляризації. Завдяки цьому механізму у всіх діелектриках виникає квадратичний електромеханічний ефект (електрострикція), але зазвичай він дуже малий.

Однак у діелектриках з нецентральною симетричною структурою важливим є інший ефект, а саме важливим є інший ефект, а саме, лінійний електромеханічний ефект. Цей зворотний п'єзоелектричний ефект був другим спостереженням, зробленим братами Кюрі, і його узагальнене рівняння має вигляд

$$x_n = d_{nj} E_j, \quad (3)$$

де $i = 1, 2, 3$ та $n = 1, 2, \dots, 6$ відповідно до позначок матриці, d_{nj} - п'єзоелектричний модуль у матричному записі. Видно, що компонент деформації x_n прямо пропорційна величині електричного поля E_j , прикладеного до п'єзоелектрика. Найпростіша модель зворотного поздовжнього п'єзоефекту показана на рис. 3.

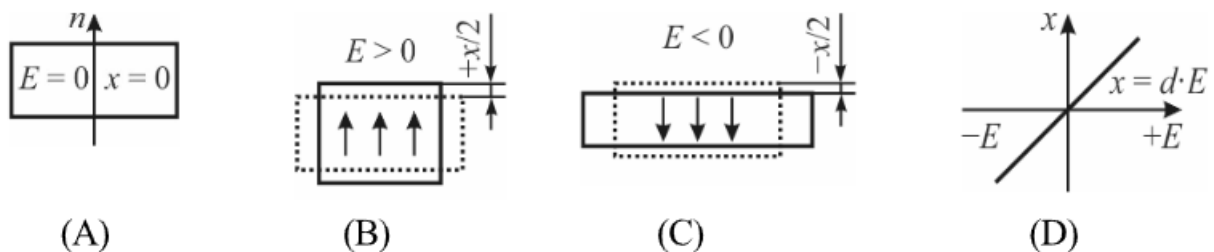


Рисунок 3 - Зворотний п'єзоефект: А - полярний кристал з вертикально спрямованою полярною віссю n ; В - прикладання електричного поля електричне поле

призводить до розширення кристала; C - при зміні знаку електричного поля кристал стискається; D - лінійна залежність електричного поля від деформації [7].

На рисунку символічно показано, як п'єзоелектричний зразок розширюється або стискається під дією електричного поля, прикладеного вздовж полярної осі n кристала. Зі зміною електричної полярності змінюється знак деформації змінюється зі зміною електричної полярності (зверніть увагу, що в реальних експериментах навіть у сильному електричному полі величина відносної деформації x не перевищує одного відсотка).

Застосування зворотного п'єзоефекту в електроніці ґрунтується на перетворенні електричної енергії в механічну, переважно для генерування звуку та ультразвуку в рідкому або повітряному середовищі. П'єзоелектрики також використовуються при контакті з твердим тілом, в якому збуджуються ультразвукові або гіперзвукові хвилі; крім того, зворотний п'єзоелектричний ефект є фізичною основою п'єзоелектричних приводів і двигунів.

Перетворювачі енергії, в залежності від частотного діапазону, поділяються на чотири типи: (1) перетворювачі звуку, тобто зумери, вібратори, мобільні мікрофони, високочастотні динаміки, сирени тощо; (2) пристрої для ультразвукової техніки, які використовуються у випромінювачах високої інтенсивності для зварювання та різання, миття та очищення матеріалів, датчиках рівня рідини, дисперсійних розпилювачах, генераторах туману, інгаляторах, зволожувачах повітря; (3) ультразвукові вимірювачі відстані в повітряному середовищі, що використовуються як далекоміри відстані для автотранспорту, датчики присутності та руху в охоронних системах, як рівнеміри, як пристрої для дистанційного керування, в пристроях для відлякування птахів, тварин та сільськогосподарських шкідників тощо; (4) високочастотні ультразвукові пристрої, що застосовуються для обладнання для випробування матеріалів та неруйнівного контролю, діагностики в медицині та промисловості, ліній затримки тощо; (4) високочастотні ультразвукові медицині та промисловості, лініях затримки тощо.

У рідких середовищах п'єзокераміка в основному використовується як випромінювач ультразвуку випромінювачами ультразвуку, що мають високий коефіцієнт електромеханічного зв'язку і високу механічну добротність. Такі випромінювачі застосовуються в ультразвуковій гідролокації (гідролокатори) та для далекого підводного зв'язку. Ультразвук широко використовується також у промисловості для очищення поверхні [7].

У твердому середовищі застосовують тонкі плівки п'єзоелектриків-напівпровідників (оксиду цинку, сульфід кадмію або нітриду алюмінію) застосовуються, в більшості випадків, для пружних хвиль, що працюють в надвисокочастотному діапазоні (НВЧ), тобто в гіперзвуковому діапазоні. У деяких випадках дуже тонкі пластини ніобату літію, отримані шляхом іонного ніобату літію, отримані шляхом іонного травлення, використовуються в мікрохвильовому діапазоні для генерування гіперзвуку в середовищі. Якщо випромінювачем звуку є тонка плівка, нанесена на поверхню твердого тіла, то, крім п'єзоелементів крім п'єзокераміки, доцільно використовувати осаджені з парової фази кристалічні плівки CdSe та інші п'єзоелементи, технологія напилення яких добре відпрацьована в електроніці. П'єзоелектричні випромінювачі звуку та ультразвуку входять до складу п'єзоелектричних перетворювачів, що використовуються для випромінювання акустичних коливань, переважно в рідких і твердих середовищах[7].

П'єзоелектричні випромінювачі, виготовлені з монокристалів, використовуються у високочастотному діапазоні частот до тих пір, поки не буде досягнута межа міцності (на частотах понад 200МГц товщина передавача-випромінювача становить кілька мікрометрів). У мікрохвильовому діапазоні використовуються п'єзоелектричні випромінювачі на основі п'єзоелектриків-напівпровідників (зширокою електронною зоною). Застосування тонкого високоміцного п'єзоелектрика, що працює на резонансній частоті поздовжніх або поперечних коливань, дозволяє досягти частот до 75 ГГц. П'єзоелектричні випромінювачі цих типів використовуються в основному в акустоелектроніці.

Скануючий акустичний мікроскоп з високою роздільною здатністю є одним з найбільш вражаючих досягнень сучасної п'єзoeлектроніки, оскільки з його допомогою стає можливим неруйнівний контроль субмікронних елементів аж до нанометрових розмірів, що дозволяє проводити дослідження без пошкодження поверхні сканованих кристалів мікросхем, які не витримують впливу пучків електронного мікроскопа, а також рентгенівського.

П'єзoeлектричні актуатори - це твердотільні пристрої, подібні до актуаторів, заснованих на магнітострикційного ефекту та актуаторами на основі теплового розширення. Діапазон регульованого переміщення в п'єзoeлектричних приводах схожий, але в порівнянні з магнітними і тепловими приводами, у випадку застосування п'єзoeлектриків точність регулювання переміщення набагато вища. Саме тому п'єзoeлектричні приводи використовуються в тунельних і атомно-силових мікроскопах, які добре відомі своєю дуже високою (атомною) роздільною здатністю. Ще однією перевагою п'єзoeлектричних актуаторів є їхня висока швидкість роботи. Ця унікальна особливість, разом з технологією багатошарових актуаторів технологією багатошарових актуаторів, відкриває для них широкі можливості застосування. Основні недоліки п'єзoeлектричних матеріалів є висока електрична напруга, невелика деформація і можливий гістерезис, тобто неоднозначна залежність деформації від керуючого поля.

П'єзoeлектричні мікропозиціонери забезпечують можливість отримання електрично керованих механічних деформацій. Відносна деформація в сильних електричних полях, в п'єзoeлектричних кристалах і кераміці може досягати 10^{-3} - 10^{-2} ; зазвичай електромеханічні елементи (з'єднані в батарею для зменшення керуючої напруги) можуть розвивати значні зусилля. Такі мікропозиціонери використовуються в оптичних системах зв'язку та в оптичному приладобудуванні, оскільки електрично керовані механічні зсуви порівнюються або навіть перевищують довжини оптичних хвиль. Зокрема, вони є незамінними зокрема, вони незамінні при розробці багатoeлементних орбітальних телескопів з апертурою в десятки метрів.

У п'єзоелектричних двигунах використовуються найрізноманітніші коливання п'єзоелектричних елементів: стискання-розтягування, згинання, зсув, кручення і радіальні коливання. Поєднання цих типів коливань дозволило створити велику кількість різноманітних конструкцій п'єзомоторів, багато з яких наразі лише проходять інженерну перевірку. Важливо розробити більш довговічні матеріали, що дозволить вивести термін служби п'єзоелектричного двигуна на сучасний рівень. В електронних пристроях п'єзомотори використовуються в годинниках і фотоапаратах, стрічкових накопичувачах та інших механічних приводах, магнітофонах і електрофонах, а також використовуються в робототехніці. Перевагами п'єзодвигунів є економічність і простота конструкції конструкція, висока стабільність, можливість миттєвого вмикання і вимикання, а також відсутність магнітних полів (що особливо важливо для електромеханічних пристроїв магнітного запису)[7].

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

П'єзоелектричний ефект виникає в кристалах або поляризованій кераміці, для яких електрична напруга з'являється на поверхні матеріалу під дією зовнішнього тиску. Подібно до піроелектричного ефекту, це явище пов'язане з асиметричною структурою матеріалу, яка дозволяє іонам рухатися більш легше рухатися вздовж однієї осі, ніж вздовж інших. Під дією тиску протилежні сторони п'єзоелектрика набувають протилежних зарядів, в результаті чого на матеріалі з'являється напруга.

П'єзоелектричний перетворює механічну енергію в електричну або, навпаки, електричну в механічну енергію в електричну або, навпаки, електричну в механічну. Першим спостерігався механоелектричний ефект, який з цієї причини був названий "прямим" п'єзоефектом. П'єзоефект - це непарний (лінійний) ефект, при якому механічно індукована поляризація прямо пропорційна деформації; і навпаки навпаки, при зворотному п'єзоефекті електрично індукована деформація прямо пропорційна величині електричного поля. Обидва п'єзоелектричні ефекти можуть відбуватися лише в не центрально-симетричних кристалах і структурах.

П'єзоелектричний ефект описується п'єзоелектричними константами - тензорами третього рангу. Математичні співвідношення, що описують п'єзоелектрику або електрострикцію, залежать від комбінації певних граничних умов, в яких використовується або досліджується п'єзоелектрик. Основні механічні умови зводяться або до можливості деформацій (якщо кристал вільний), або до їх неможливості (коли кристал затиснутий). Граничні електричні умови полягають у тому, що кристал може бути короткозамкненим або розімкненим.

П'єзоелектрика - це лінійний електромеханічний ефект. При цьому з електричних властивостей кристалів тільки діелектрична поляризація, що характеризується кристалів до п'єзоефекту має відношення лише поляризація діелектрика (що характеризується діелектричною проникністю) п'єзоефекту. До

механічних властивостей п'єзоелектриків відносяться пружність, твердість, міцність та інші; але для п'єзоелектричного ефекту найбільш важливими механічними властивостями є пружність (яка залежить від сил зв'язку атомів у кристалі) і швидкість поширення пружних хвиль в п'єзоелектрику (яка, крім пружності, залежить від питомої густини).

РОЗДІЛ 2. П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНІ ДАТЧИКИ

П'єзоелектричні датчики - це електронні компоненти, які здатні перетворювати механічний або тепловий вплив в електричний сигнал. Вони працюють за принципом електромеханічного зв'язку. П'єзоелектрика - це явище, яке полягає в тому, що деякі матеріали виробляють електричну напругу, коли піддаються механічному впливу, і навпаки.

Вони використовують п'єзоелектричний ефект для вимірювання електричного потенціалу, викликаного застосуванням механічної сили до п'єзоелектричного матеріалу. Вони засновані на принципі електромеханічного перетворення енергії і в першу чергу вимірюють силу, а також інші величини, такі як тиск, прискорення, температура і деформація, шляхом перетворення отриманих даних в електричний заряд.

П'єзоелектричні датчики використовуються для вимірювання згинання, дотику, вібрації та ударів. Вони використовуються в таких галузях, як охорона здоров'я, аерокосмічна промисловість, побутова електроніка та ядерне приладобудування. Вони важливі, оскільки вібрація та удари скорочують термін служби електронних та електромеханічних систем, тому делікатні виводи та з'єднувальні дроти схильні до навантажень. Внаслідок ударів та імпульсних поштовхів може виникнути переривчастий збій, що призводить до виходу системи з ладу.

2.1 Як працюють п'єзоелектричні датчики?

П'єзоелектричні датчики працюють за принципом п'єзоелектричного ефекту. П'єзоелектрика походить від грецького слова *piezein*, що буквально означає стискати або натискати. Як впливає з останнього, ми стискаємо кристали кварцу, щоб створити електричну напругу. Отже, п'єзоелектричні датчики працюють, застосовуючи механічну енергію до кристала в наступних етапах:

1. П'єзоелектричний кристал розміщується між двома металевими пластинами, які знаходяться в ідеальному балансі (навіть якщо вони розташовані не симетрично), і не проводить електричний струм.
2. Металеві пластини прикладають до матеріалу механічну силу або напругу. Електричні заряди, витіснені в кристалі, виходять з рівноваги. Надлишкові негативні та позитивні заряди з'являються на протилежних сторонах граней кристала.
3. Металева пластина збирає ці заряди і виробляє напругу, яка посиляє електричний струм по ланцюгу. Це перетворюється на п'єзоелектрику.

Для визначення п'єзоелектричного ефекту важливо розуміти поведінку п'єзоелектричних кристалів. П'єзоелектричні датчики, засновані на п'єзоелектричному ефекті, можуть працювати під дією поперечних, поздовжніх або зсувних сил і є нечутливими до електричних полів та електромагнітного випромінювання. Реакція також дуже лінійна в широкому діапазоні температур, що робить його ідеальним датчиком для складних умов експлуатації [12].

2.2 Застосування п'єзоелектричних датчиків

П'єзоелектричні датчики є універсальними інструментами для вимірювання різних процесів[13]. Вони використовуються для забезпечення якості, управління процесами, а також для досліджень і розробок у багатьох галузях промисловості. П'єр Кюрі відкрив п'єзоефект у 1880 році, але тільки в 1950-х роках виробники почали використовувати п'єзоефект у промислових сенсорах. З тих пір цей принцип вимірювання використовувався все ширше і став зрілою технологією з відмінною надійністю.

Вони успішно застосовуються в різних галузях, наприклад, у медичному,[14] аерокосмічному, ядерному приладобудуванні, а також як датчик нахилу в побутовій електроніці[15] або датчик тиску в сенсорних панелях мобільних телефонів. В автомобільній промисловості п'єзоелементи використовуються для контролю згоряння палива при розробці двигунів внутрішнього згоряння. Датчики або безпосередньо монтуються в додаткові отвори в головці блоку циліндрів, або свічка запалювання оснащується вбудованим мініатюрним п'єзоелектричним датчиком.

Розвиток п'єзоелектричних технологій безпосередньо пов'язаний з низкою притаманних їм переваг. Високий модуль пружності багатьох п'єзоелектричних матеріалів можна порівняти з модулем пружності багатьох металів і сягає 106 Н/м^2 . Незважаючи на те, що п'єзоелектричні датчики є електромеханічними системами, які реагують на стиснення, чутливі елементи показують майже нульовий прогин. Це забезпечує п'єзоелектричним датчикам міцність, надзвичайно високу власну частоту і відмінну лінійність у широкому амплітудному діапазоні. Крім того, п'єзоелектрична технологія нечутлива до електромагнітних полів і радіації, що дозволяє проводити вимірювання в суворих умовах. Деякі матеріали, що використовуються (особливо фосфат галію або турмалін), надзвичайно стабільні при високих температурах, що

дозволяє датчикам мати робочий діапазон до 1000 °С. Турмалін демонструє піроелектричний ефект на додаток до п'єзоелектричного; це здатність генерувати електричний сигнал при зміні температури кристала. Цей ефект також характерний для п'єзокерамічних матеріалів. Gautschi в Piezoelectric Sensorics (2002) пропонує цю порівняльну таблицю характеристик:

Принцип дії	Деформація чутливість [V/με]	Поріг [με]	Відношення діапазону до відношення діапазону до порогу
П'єзоелектричний	5.0	0.00001	100,000,000
П'єзорезистивний	0.0001	0.0001	2,500,000
Індуктивний	0.001	0.0005	2,000,000
Ємнісний	0.005	0.0001	750,000
Резистивний	0.000005	0.01	50,000

Таблиця 1 - порівняльну таблицю характеристик Gautschi в Piezoelectric Sensorics (2002)

Одним з недоліків п'єзоелектричних датчиків є те, що їх не можна використовувати для дійсно статичних вимірювань. Статична сила призводить до фіксованої кількості заряду на п'єзоелектричному матеріалі. У звичайній електроніці зчитування недосконалість ізоляційних матеріалів і зменшення внутрішнього опору датчика спричиняє постійну втрату електронів і призводить до зменшення сигналу.

Підвищена температура викликає додаткове падіння внутрішнього опору і чутливості. Основний вплив на п'єзоелектричний ефект полягає в тому, що зі збільшенням навантаження тиску і температури чутливість знижується через утворення двійників. У той час як кварцові датчики необхідно охолоджувати під час вимірювань при температурах вище 300 °C, спеціальні типи кристалів, такі як фосфат галію GaPO_4 , не утворюють двійників до температури плавлення самого матеріалу.

Однак неправда, що п'єзоелектричні датчики можна використовувати лише для дуже швидких процесів або в умовах навколишнього середовища. Насправді, численні п'єзоелектричні додатки проводять квазістатичні вимірювання, а інші додатки працюють при температурах вище 500 °C.

П'єзоелектричні датчики також можна використовувати для визначення ароматів у повітрі шляхом одночасного вимірювання резонансу та ємності. Комп'ютерно-керована електроніка значно розширює спектр потенційних застосувань п'єзоелектричних датчиків[16].

П'єзоелектричні сенсори також зустрічаються в природі. Колаген у кістках є п'єзоелектричним, і дехто вважає, що він діє як біологічний датчик сили.[17] П'єзоелектричність також виявлена в колагені м'яких тканин, таких як ахіллове сухожилля, стінки аорти та серцеві клапани.[18] Також є деякі варіанти п'єзоелектричних вимикачів, які можна застосовувати в різних сферах.

Ось найкращі варіанти п'єзоперемиків, які ви можете спробувати для різних промислових або медичних застосувань:

П'єзо-кнопка 30 мм

30-міліметрова п'єзо-кнопка - це передове рішення, розроблене для складних застосувань, де надійність має першорядне значення. Ця кнопка має твердотільний вихід, що забезпечує надзвичайно довгий термін служби - понад 50 мільйонів циклів.

Ідеальна для жорстких умов експлуатації, плоска поверхня натискання повністю закрита, що захищає її від потрапляння рідини або забруднень.

Ця особливість робить його особливо придатним для застосування в медичній та харчовій промисловості, де суворі стандарти чистоти є обов'язковими. Цілісна конструкція вимикача забезпечує високоефективне ущільнення, що гарантує вражаючий клас захисту IP68 і IP69K. Цей рівень захисту забезпечує стійкість до пилу та води, що робить кнопку надзвичайно довговічною в різних промислових умовах.



Рисунок 4 - П'єзо-кнопка 30 мм

<https://ehpruexzv8r.exactdn.com/wp-content/uploads/2019/04/30mm-piezo-switches-ringillum.jpg?strip=all&lossy=1&ssl=1>

Пластиковий п'єзо-кнопковий електричний вимикач

Пластиковий п'єзоелектричний кнопковий вимикач - це універсальне рішення для безперешкодної інтеграції в різні електронні системи. Завдяки приводу діаметром 25 мм і монтажному отвору діаметром 22,2 мм цей перемикач має компактну, але функціональну конструкцію, що підходить для широкого спектру застосувань. Працюючи за нормально відкритим принципом миттєвої дії, перемикач забезпечує точний час імпульсу спрацювання 125-300 мілісекунд.

Це забезпечує швидку та ефективну роботу. Його заглиблена поверхня додає додатковий рівень захисту та естетичної привабливості. Ущільнення IP68 забезпечує надійний захист від проникнення пилу і води, що робить його придатним для роботи в складних умовах. Крім того, пластиковий п'єзо-кнопковий вимикач доступний зі світлодіодами на 12 і 24 В, що дозволяє налаштувати параметри підсвічування.



Рисунок 5 - Пластиковий п'єзо-кнопковий електричний вимикач

<https://ehpruexzv8r.exactdn.com/wp-content/uploads/2019/07/plastic-piez-switch-green.jpg?strip=all&lossy=1&ssl=1>

16 мм п'єзо-сенсорний перемикач

16-міліметровий п'єзо-сенсорний перемикач - це витончене рішення, розроблене для зручної взаємодії з користувачем і тривалої роботи. Завдяки металевій поверхні, що легко чиститься, цей перемикач не лише має елегантний зовнішній вигляд, але й полегшує обслуговування, що робить його ідеальним для застосувань, де гігієна має вирішальне значення.

Завдяки вражаючому терміну служби в 50 мільйонів циклів, вимикач гарантує довговічність і надійність. Крім того, його міцна конструкція включає в себе варіанти ущільнення IP68 або IP69K. Це забезпечує чудовий захист від пилу, води та миття під високим тиском, що робить його придатним для використання в складних умовах [24].



Рисунок 6 - 16 мм п'єзо-сенсорний перемикач

<https://ehpruexzv8r.exactdn.com/wp-content/uploads/2019/04/16mm-piezo-switches-ring-red.jpg?strip=all&lossy=1&ssl=1>

2.3 Принцип роботи

Спосіб розрізання п'єзоелектричного матеріалу визначає один з трьох основних режимів його роботи:

-поперечний

-поздовжній

-зсув

Поперечний ефект:

Сила, прикладена вздовж нейтральної осі (y), переміщує заряди вздовж напрямку (x), перпендикулярно до лінії дії сили. Величина заряду Q_x залежить від геометричних розмірів відповідного п'єзоелемента. Коли розміри мають a, b, d значення

$$Q_x = d_{xy} F_y b / a \quad (4)$$

де a - розмір на одній лінії з нейтральною віссю, b - розмір, що співпадає з віссю генерації заряду, а d - відповідний п'єзоелектричний коефіцієнт [14].

Поздовжній ефект:

Кількість заряду, що витісняється, строго пропорційна прикладеній силі і не залежить від розміру та форми п'єзоелемента. З'єднання декількох елементів механічно послідовно і електрично паралельно - єдиний спосіб збільшити вихід заряду. Результуючий заряд становить

$$Q_x = d_{xx} F_x n \quad (5)$$

де d_{xx} п'єзоелектричний коефіцієнт для заряду в напрямку x, що вивільняється силами, прикладеними вздовж напрямку x (у пКл/Н). F_x - прикладена сила в напрямку x [Н] та n відповідає кількості складених елементів.

Ефект зсуву:

Створений заряд точно пропорційний прикладеній силі і генерується під прямим кутом до сили. Заряд не залежить від розміру та форми елемента. Для n елементів, з'єднаних механічно послідовно і електрично паралельно, заряд дорівнює

$$Q_x = 2d_{xx} F_x n \quad (6)$$

На відміну від поздовжнього і зсувного ефектів, поперечний ефект дозволяє точно налаштувати чутливість в залежності від прикладеної сили і розміру елемента.

2.4 Електричні властивості

П'єзоелектричний перетворювач має дуже високий вихідний опір і може бути змодельований як джерело пропорційної напруги та мережа фільтрів. Напруга V на джерелі прямо пропорційна прикладеній силі, тиску або деформації.[19] Вихідний сигнал пов'язаний з цією механічною силою так, ніби він пройшов через еквівалентну схему.

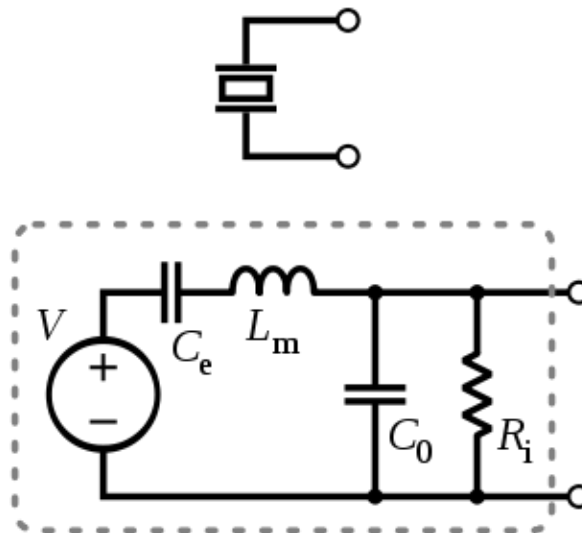


Рисунок 7 - Схематичне зображення та електронна модель п'єзоелектричного датчика

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/85/Piezoelectric_sensor_electrical_model.svg/330px-Piezoelectric_sensor_electrical_model.svg.png

Детальна модель включає вплив механічної конструкції датчика та інші неідеальності.[20] Індуктивність L_m обумовлена сейсмічною масою та інерційністю самого датчика. C_e обернено пропорційна механічній пружності датчика. C_0 являє собою статичну ємність датчика, що виникає внаслідок інерційної маси нескінченного розміру.[20] R_i - це опір витoku ізоляції елемента датчика. Якщо датчик підключений

до опору навантаження, він також діє паралельно з опором ізоляції, збільшуючи частоту зрізу високих частот.

Для використання в якості датчика зазвичай використовується плоска ділянка частотної характеристики між відсіченням високих частот і резонансним піком. Навантаження і опір витоку повинні бути достатньо великими, щоб низькі частоти, які становлять інтерес, не були втрачені. У цій області можна використовувати спрощену модель еквівалентної схеми, в якій C_s представляє ємність самої поверхні сенсора, визначену за стандартною формулою для ємності паралельних пластин[20][21].

Його також можна моделювати як джерело заряду паралельно з ємністю джерела, причому заряд прямо пропорційний прикладеній силі.

2.5 Конструкція датчика та чутливі матеріали

П'єзоелектрична технологія дозволяє вимірювати різні фізичні величини, найчастіше тиск і прискорення. Для датчиків тиску використовується тонка мембрана і масивна основа, що гарантує, що прикладений тиск цілеспрямовано навантажує елементи в одному напрямку. В акселерометрах до кристалічних елементів прикріплюють сейсмічну масу. Коли акселерометр рухається, інваріантна сейсмічна маса навантажує елементи відповідно до другого закону Ньютона $F=ma$.

Основна відмінність у принципі роботи між цими двома випадками полягає в тому, як вони прикладають зусилля до чутливих елементів. У датчиках тиску тонка мембрана передає зусилля на елементи, тоді як в акселерометрах зусилля прикладає прикріплена сейсмічна маса. Датчики часто чутливі до більш ніж однієї фізичної величини. Датчики тиску показують хибний сигнал, коли вони піддаються вібрації. Завдяки ретельному узгодженню цих елементів, сигнал прискорення (що виходить з компенсаційного елемента) віднімається від комбінованого сигналу тиску і прискорення, щоб отримати справжню інформацію про тиск.

Вібраційні датчики також можуть збирати енергію механічних коливань, яка в іншому випадку витрачається даремно. Це досягається завдяки використанню п'єзоелектричних матеріалів для перетворення механічної деформації в корисну електричну енергію [22].

Три основні групи матеріалів використовуються для п'єзоелектричних датчиків: п'єзоелектрична кераміка, монокристалічні матеріали та тонкоплівкові п'єзоелектричні матеріали. Керамічні матеріали (наприклад, кераміка PZT) мають п'єзоелектричну константу/чутливість, яка приблизно на два порядки вища, ніж у природних монокристалічних матеріалів, і можуть бути виготовлені за допомогою недорогих процесів спікання. П'єзоефект у п'єзокераміці є "тренованим", тому її

висока чутливість з часом погіршується. Ця деградація сильно корелює з підвищенням температури.

Менш чутливі природні монокристалічні матеріали (фосфат галію, кварц, турмалін) мають вищу - при обережному поводженні майже необмежену - довгострокову стабільність. Існують також нові монокристалічні матеріали, доступні на ринку, такі як ніобат свинцю-магнію-титанат свинцю (PMN-PT). Ці матеріали пропонують покращену чутливість порівняно з PZT, але мають нижчу максимальну робочу температуру і наразі є складнішими у виробництві через те, що складаються з чотирьох компонентів проти трьох компонентів PZT.

Тонкоплівкові п'єзоелектричні матеріали можуть бути виготовлені за допомогою розпилення, CVD (хімічне осадження з газової фази), ALD (атомно-шарова епітаксія) тощо. Тонкоплівкові п'єзоелектричні матеріали використовуються там, де в методі вимірювання використовується висока частота (> 100 МГц) і/або малий розмір є перевагою в застосуванні.

2.6 П'єзоелектричний датчик вібрації

П'єзоелектричні датчики вібрації також можна розділити на п'єзоелектричні датчики акселерометра, п'єзоелектричні датчики сили та імпедансні головки.

П'єзоелектричний датчик акселерометра

Механічна приймальна частина п'єзоелектричного датчика акселерометра заснована на принципі механічного прийому інерційного прискорення, а електромеханічна частина використовує позитивний п'єзоелектричний ефект п'єзоелектричного кристала. Принцип полягає в тому, що деякі кристали (такі як штучно поляризована кераміка, п'єзоелектричні кристали кварцу тощо, різні п'єзоелектричні матеріали мають різні п'єзоелектричні коефіцієнти, які, як правило, можна знайти в таблиці характеристик п'єзоелектричних матеріалів) деформуються під дією зовнішньої сили в певному напрямку, заряди будуть генеруватися на його кристалічній поверхні або поверхні поляризації. Це перетворення механічної енергії (сили, деформації) в електричну (заряд, електричне поле) називається позитивним п'єзоефектом. Перетворення електричної енергії (електричне поле, напруга) в механічну (деформація, сила) називається зворотним п'єзоефектом.

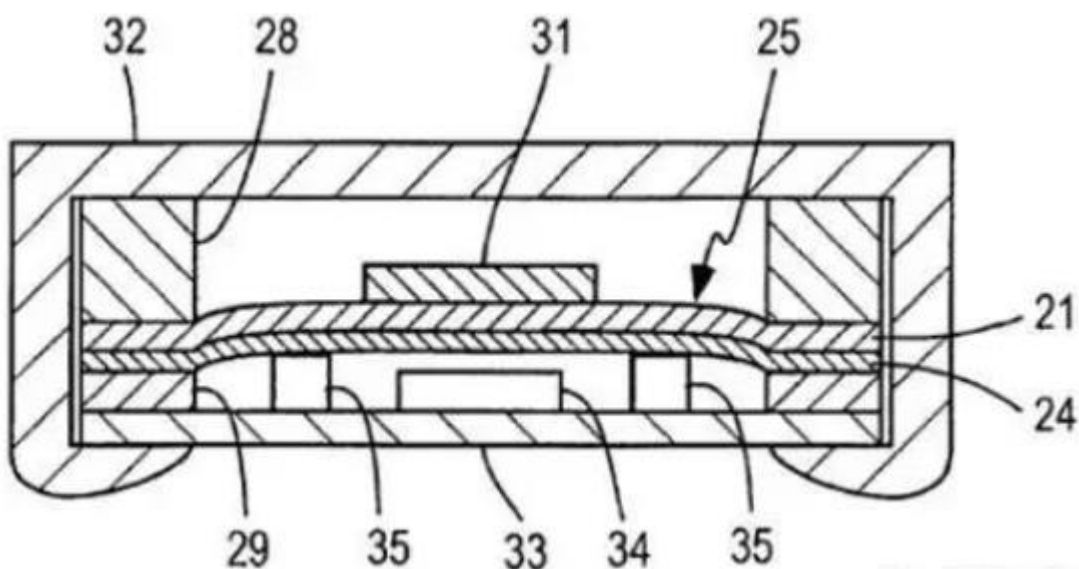


Рисунок 8 - П'єзоелектричний датчик акселерометра

<https://files.easybom.com/blogimg/20220408/16494003147284.png>

Тому п'єзоелектричний ефект кристала можна використовувати для виготовлення датчика навантаження. При вимірюванні вібрації, оскільки сила на п'єзоелектричний кристал є силою інерції інерційного масового блоку, кількість згенерованих зарядів пропорційна прискоренню, тому п'єзоелектричні датчики є датчиками акселерометрів.

П'єзоелектричний датчик сили

При вібраційних випробуваннях, крім вимірювання вібрації, часто необхідно вимірювати динамічну силу збудження, прикладену до зразка. П'єзоелектричні датчики сили мають переваги широкого частотного діапазону, великого динамічного діапазону, невеликих розмірів і невеликої ваги, тому вони широко використовуються. Принцип роботи п'єзоелектричного датчика сили полягає у використанні п'єзоелектричного ефекту п'єзоелектричного кристала, тобто вихідний сигнал заряду п'єзоелектричного датчика сили пропорційний зовнішній силі.



Рисунок 9 - П'єзоелектричний датчик сили

<https://files.easybom.com/blogimg/20220408/16494003147283.png>

Імпедансна головка

Імпедансна головка є комплексним датчиком. Вона поєднує в собі п'єзоелектричний датчик сили і п'єзоелектричний датчик прискорення, і її функція полягає у вимірюванні реакції руху точки з одночасним вимірюванням сили збудження в точці передачі сили.

Тому імпедансна головка складається з двох частин, одна частина - датчик сили, а інша - датчик акселерометра. Її перевага полягає в тому, що реакція точки вимірювання гарантовано відповідає реакції точки збудження.

Під час використання малий кінець (вимірювальний кінець) підключається до конструкції, а великий кінець (вимірювальний прискорення) до штока прикладання сили збудника. Сигнал сили збудження вимірюється з "вихідної клеми сигналу сили", а сигнал відгуку прискорення вимірюється з "вихідної клеми сигналу прискорення".



Рисунок 10 - Імпедансна головка

<https://files.easybom.com/blogimg/20220408/16494003147285.png>

Імпедансні головки зазвичай витримують лише невеликі навантаження, тому їх можна використовувати лише для вимірювання легких конструкцій, механічних деталей та зразків матеріалів. Незалежно від того, чи це датчик сили, чи імпедансна головка, її елементом перетворення сигналу є п'єзоелектричний кристал, тому її вимірювальна лінія повинна бути підсилювачем напруги або підсилювачем заряду [23].

2.7 Застосування промислових датчиків вібрації

Хоча включення датчиків вібрації в програму промислового технічного обслуговування може здатися складним завданням, перевірка активів на наявність надмірної вібрації ще ніколи не була такою простою. Для моніторингу вібрації просто встановіть датчик і почніть отримувати дані. За лічені хвилини ви матимете інформацію, необхідну для прийняття рішень на основі даних.

Додавши бездротові трикоординатні датчики вібрації з безперервним потоком даних до програм технічного обслуговування і забезпечення надійності, можна отримати доступ до даних на рівні заводу або в глобальному масштабі. Хмарне програмне забезпечення може зберігати і передавати дані, надаючи вам практичну інформацію про стан ваших активів. Вібраційний скринінг - це економічний спосіб моніторингу більшої кількості активів шляхом автоматичного збору даних, що дозволяє командам виконувати прогнозоване технічне обслуговування.

Моніторинг стану корисний для майже 90% обладнання. Включивши промислові датчики вібрації в свої програми технічного обслуговування і забезпечення надійності, ви і ваша команда отримаєте чітке уявлення про стан і ефективність ваших активів.

Система опалення, вентиляції та кондиціонування

Вентилятори та компресори мають вирішальне значення для забезпечення належного функціонування системи HVAC. Переглядайте віддалені вимірювання на розумних пристроях, зберігаючи безпечну відстань від обладнання. Допоможіть своїй команді виявити проблеми до того, як вони виникнуть, встановивши віддалені датчики вібрації, щоб підтримувати циркуляцію повітря та охолодження машин.

Продукти харчування та напої

Трансмисії, охолоджувачі та барабани керують процесом виробництва продуктів харчування та напоїв. Прості цих систем можуть створювати хвилеподібні ефекти на всій виробничій лінії. Дані в режимі реального часу та історичні дані допомагають відстежувати тенденції, аналізувати та інтерпретувати інформацію, зібрану з активів.

Вода та стічні води

Окрім фінансових витрат, прості насосів на водорозподільчих та очисних станціях можуть негативно вплинути на доступ споживачів та якість води. Встановлення датчиків вібрації на некритичних об'єктах гарантує, що бригади водоканалів зможуть проводити більше технічного обслуговування власними силами, зменшуючи витрати та мінімізуючи маршрутизацію на основі часу.

Нафта і природний газ

Оператори нафтогазових компаній стикаються з екстремальними погодними умовами, пилом і піском на своїх об'єктах у віддалених районах. Інженерам і технікам потрібні надійні технології, що відповідають суворим вимогам таких місць. Перевірте стан об'єкта, просто зателефонувавши на телефон, без необхідності виїжджати на периметр об'єкта.

Автомобільна промисловість

Розширені програми моніторингу стану здоров'я для об'єктів на рівні підприємства можуть заборонити витрати, але це не обов'язково. З такою великою кількістю активів, економічно ефективно встановлення датчиків вібрації є ключовим моментом. Прості у встановленні датчики дозволяють командам економічно ефективно розширити покриття по всьому заводу.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

Датчики, засновані на принципах п'єзоелектричності, представляють собою важливий клас сенсорів у сучасній технології. Під час цього дослідження було показано, що п'єзоелектричні датчики виявляють великий потенціал у різних галузях застосування завдяки своїм унікальним властивостям та можливостям.

Однією з ключових переваг п'єзоелектричних датчиків є їх висока чутливість до різноманітних механічних сигналів та подразників. Це дозволяє їм точно вимірювати тиск, температуру, рух чи вібрацію в реальному часі.

Крім того, вони мають компактні розміри, низьку вартість виробництва та можуть працювати у широкому діапазоні умов, що робить їх вельми привабливими для використання в різних пристроях і системах.

Цей розділ підкреслив потужний потенціал п'єзоелектричних датчиків у вимірюваннях, контролі та різноманітних технологічних застосуваннях. Їхні унікальні властивості і висока чутливість відкривають широкі перспективи для подальших досліджень та розвитку сучасних сенсорних технологій.

ВИСНОВКИ

За основою змісту, магістерська робота присвячена дослідженню та застосуванню вібраційних датчиків на основі електрокерованого п'єзоелектричного ефекту. Робота розглядає загальні характеристики п'єзоелектрики, особливості прямого та зворотного п'єзоелектричних ефектів, а також принципи функціонування, конструкцію та електричні властивості п'єзоелектричних датчиків.

Вона детально розглядає різноманітні застосування цих датчиків у промисловості, зокрема вібраційних датчиків, а також їх роль у вимірюванні та спостереженні за вібраціями в різних галузях. Висновки до кожного розділу систематизують отримані знання та результати досліджень у сфері п'єзоелектричних вібраційних датчиків, можливі їх перспективи та важливість у різних секторах технологій та промисловості.

П'єзоелектрика - це лінійний електромеханічний ефект. При цьому з електричних властивостей кристалів тільки діелектрична поляризація, що характеризується кристалів до п'єзоефекту має відношення лише поляризація діелектрика (що характеризується діелектричною проникністю) п'єзоефекту. До механічних властивостей п'єзоелектриків відносяться пружність, твердість, міцність та інші; але для п'єзоелектричного ефекту найбільш важливими механічними властивостями є пружність (яка залежить від сил зв'язку атомів у кристалі) і швидкість поширення пружних хвиль в п'єзоелектрику (яка, крім пружності, залежить від питомої густини).

Датчики, засновані на принципах п'єзоелектричності, представляють собою важливий клас сенсорів у сучасній технології. Під час цього дослідження було показано, що п'єзоелектричні датчики виявляють великий потенціал у різних галузях застосування завдяки своїм унікальним властивостям та можливостям.

Однією з ключових переваг п'єзоелектричних датчиків є їх висока чутливість до різноманітних механічних сигналів та подразників. Це дозволяє їм точно вимірювати тиск, температуру, рух чи вібрацію в реальному часі. Крім того, вони мають компактні розміри, низьку вартість виробництва та можуть працювати у широкому діапазоні умов, що робить їх вельми привабливими для використання в різних пристроях і системах.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Holler, F. James; Skoog, Douglas A.; & Crouch, Stanley R. (2007). "Principles of Instrumental Analysis" (6th ed.). Cengage Learning. ISBN: 978-0-495-01201-6. Page 9.
2. Harper, Douglas. "Piezoelectric." Online Etymology Dictionary.
3. Gautschi, G. (2002). "Piezoelectric Sensorics: Force, Strain, Pressure, Acceleration and Acoustic Emission Sensors, Materials and Amplifiers." Springer. DOI: 10.1007/978-3-662-04732-3. ISBN: 978-3-662-04732-3.
4. Krautkrämer, J., & Krautkrämer, H. (1990). "Ultrasonic Testing of Materials." Springer. ISBN: 978-3-662-10680-8. Pages 119–149.
5. Manbachi, A., & Cobbold, R.S.C. (2011). "Development and Application of Piezoelectric Materials for Ultrasound Generation and Detection." *Ultrasound*, 19(4), 187–196. DOI: 10.1258/ult.2011.011027. S2CID: 56655834.
6. Dempsey, Joe (June 24, 2020). "How Do Electronic Drums Work?" Studio D. Archived from the original on October 1, 2019. Retrieved July 27, 2021.
7. Poplavko, Y., & Yakymenko, Y. (2023). "Functional Dielectrics for Electronics: Fundamentals of Conversion Properties."
8. Abrahams, S.C., Levinstein, H.J., & Reddy, J.M. (1966). "J. Phys. Chem. Solids 27(1966)1019." DOI: 10.1016/0022-3697(66)90074-6. A.W. Warner, G.A. Coqin and J.L. Fink, J. Appl. Phys. 40(1969)4353. <https://doi.org/10.1063/1.1657197>
10. Yamada, T., Iwasaki, H., & Niizeki, N. (1970). "J. Appl. Phys. 41(1970)4141." DOI: 10.1063/1.1658426.

11. Chandra Sekhar, B., Dhanalakshmi, B., Srinivasa Rao, B., Ramesh, S., Venkata Prasad, K., Subba Rao, P.S.V., & Parvatheeswara Rao, B. (2021). "Piezoelectricity and Its Applications."
12. <https://www.sensor-works.com/how-do-piezoelectric-sensors-work/>.
13. Jiao, Pengcheng; Egbe, King-James I.; Xie, Yiwei; Matin Nazar, Ali; Alavi, Amir H. (July 3, 2020). "Piezoelectric Sensing Techniques in Structural Health Monitoring: A State-of-the-Art Review".
14. "Research & Development." Facialteam. November 15, 2021. Retrieved February 20, 2023.
15. Moubarak, P., et al. "A Self-Calibrating Mathematical Model for the Direct Piezoelectric Effect of a New MEMS Tilt Sensor." IEEE Sensors Journal, 12(5) (2011), pp. 1033–1042.
16. Wali, R. Paul (October 2012). "An Electronic Nose to Differentiate Aromatic Flowers Using Real-Time Information-Rich Piezoelectric Resonance Measurement."
17. Lakes, Roderic (July 8, 2013). "Electrical Properties of Bone - A Review." University of Wisconsin. Retrieved September 1, 2013.
18. Rini, Matteo (2019). "Soft Biological Tissues Can Be Piezoelectric."
19. "Interfacing Piezo Film to Electronics." Measurement Specialties. March 2006.
20. Vázquez Carazo, Alfredo (January 2000). "Novel Piezoelectric Transducers for High Voltage Measurements" (Document). Universitat Politècnica de Catalunya. p. 242.
21. Karki, James (September 2000). "Signal Conditioning Piezoelectric Sensors" (PDF). Texas Instruments. Retrieved December 2, 2007.
22. Ludlow, Chris (May 2008). "Energy Harvesting with Piezoelectric Sensors" (PDF). Mide Technology. Retrieved May 21, 2008.

23. <https://www.easybom.com/blog/a/vibration-sensor-types-and-applications>
24. <https://www.langir.com/news/piezoelectric-effect>
25. Поплавко, Ю.М., Якименко, Ю.І. (2013). "П'єзоелектрики."