

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

Розробка побутового п'єзогенератора

Галузь знань 14 Електрична інженерія
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

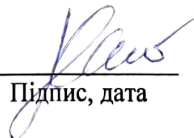
Шифр БРМА 23.00.00.000 ПЗ

Виконав студент
4 курсу група ЕМ-19


Підпис

Єфремов В.В.
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата

д.т.н., проф. Скиба М.Є.
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата


Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
Зав. кафедри МАЕЕС


Підпис, дата

д.т.н., проф. Поліщук О.С.
Ініціали, прізвище

20 06 2023 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

Освітній рівень бакалавр

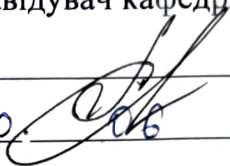
Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітня програма Електропобутова техніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС



20.06.2023

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Єфремов Вадим Вікторович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи **Розробка побутового п'єзогенератора**

керівник роботи **Скиба М.Є., д.т.н, професор**

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 1 03 2023 р. № 5

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 20.06.23 р.

3. Вихідні дані до роботи: **технологічні передумови виникнення п'єзо ефекту, типові пристрої що працюють на п'єзо ефекті**

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1 Огляд та аналіз технології та пристроїв для отримання електроенергії на основі явища п'єзо ефекту

2 Розробка пристрою побутового п'єзогенератора

3 Розробка конструкції та системи керування побутового п'єзогенератора

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

Аркуш 1. П'єзоелектричний ефект. Документ технологічний (A1). Аркуш

2. Пристрої для генерування енергії на основі п'єзо ефекту. Документ

оглядовий (A1). Аркуш 3. Схема пристрою для генерування

електроенергії. Документ ілюстраційний (A2). Побутовий

п'єзогенератор. Схема структурна функціональна (A2). Аркуш 4.

Побутовий п'єзогенератор Схема електрична принципова (A1). Аркуш 5.

Побутовий п'єзогенератор. Документ ілюстраційний

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

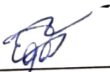
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН


Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1 Огляд та аналіз технології та пристроїв для отримання електроенергії на основі явища п'єзоефекту	05.05.23р.	
2 Розробка пристрою побутового п'єзогенератора	20.05.23р.	
3 Розробка конструкції та системи керування побутового п'єзогенератора	20.06.23р.	

Студент


Підпис

Евдокимов. І. В.
Ініціали, прізвище

Керівник роботи


Підпис

Скиба М.Є.
Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

до бакалаврської кваліфікаційної роботи студента
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

1. Прізвище, ім'я та по батькові **Єфремов Вадим Вікторович**

2. Тема бакалаврської роботи

Розробка побутового п'єзогенератора

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента _____

4. Об'єм магістерської роботи: креслень 5 арк., сторінок записки **63**

5. Основні розділи розрахунково-пояснювальної записки:

1 Огляд та аналіз технології та пристроїв для отримання електроенергії на основі явища п'єзо ефекту

2 Розробка пристрою побутового п'єзогенератора

3 Розробка конструкції та системи керування побутового п'єзогенератора

Висновки

Перелік джерел посилання

Підпис студента _____

" 26 " 06 2023 р.

РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 4 від " 30 " 06 2023 р.

Оцінка проекту ЕК _____

Рекомендації ЕК _____

Особливі відмітки _____

Технічний секретар _____

" 30 " 06 2023 р.

ЗМІСТ

	стор.
Вступ.....	6
1 Огляд та аналіз технології та пристроїв для отримання електроенергії на основі явища п'єзоефекту	8
1.1 Огляд і аналіз явища п'єзоелектричного ефекту та перспективи застосування у побутових приладах.....	8
1.2 Огляд та аналіз пристроїв для отримання електричної напруги на основі п'єзоефекту	19
2 Розробка пристрою побутового п'єзогенератора	32
2.1 Схеми коливань та переміщень п'єзокерамічних зразків та формули, що характеризують п'єзоелементи	32
2.2 Основні розрахунки п'єзоелементів побутового п'єзогенератора.....	40
2.2.1 Розрахунки геометричних розмірів п'єзоелектричного перетворювача	40
2.2.2 Розрахунки енергетичних характеристик побутового п'єзогенератора	42
3 Розробка конструкції та системи керування побутового п'єзогенератора	45
3.1 Розробка конструкції побутового п'єзогенератора	
3.2 Розробка системи датчика вібрації побутового п'єзогенератора	48

БРМА 23.00.00.000 ПЗ					
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата	
Виконав		Сфремов В.			Розробка побутового п'єзогенератора
Перевір.		Скиба М.Є			
Н.контр.		ПУНДИК С			Літера
Затвер.		Поліщук			Аркуш
					Аркушів
					у
					4
					63
					ХНУ.ЕМ-19

3.3. Розробка структурної схеми роботи побутового п'езогенератора на основі п'езоефекту	49
3.4 Розробка системи керування побутового п'езогенератора на основі п'езоефекту	50
3.5 Розробка програми для забезпечення роботи побутового п'езогенератора на основі п'езоефекту	56
Висновки	58
Перелік посилань	59
Додатки	61

ВСТУП

З кожним роком людство потребує все більше енергетичних ресурсів, у тому числі невідновлюваних. До них відносяться газ, вугілля, нафта та ін. Питання обмеження видів сировини, що використовується в усьому світі для забезпечення зростаючих потреб людства в електроенергії, викликало плутанину серед багатьох вчених та інженерів.

Тому головним завданням інженерів сьогодні є розробка альтернативних джерел енергії та пристроїв, які можуть використовувати ці технології.

Особливо це стосується розвитку нетрадиційних та альтернативних джерел енергії. Це включає сонячну, вітрову, припливну та іншу енергію, яка змінює фізичні та хімічні властивості речовини для створення альтернативних джерел енергії.

Екологічні вітрові турбіни доступні не скрізь. Для цього потрібна місцевість з постійними досить сильними вітрами, переважно одного напрямку.

Ще одним екологічно чистим самовідновлюваним джерелом енергії є сонячні батареї. Однак вони ефективні лише в південних регіонах, де спостерігаються переважно сонячні дні, а хмарність не заважає їм отримувати достатню кількість сонячної енергії, забезпечуючи рентабельність навіть із дорогими сонячними елементами. Тому такі батареї в основному використовуються в космосі на супутниках і космічних апаратах, де економічно вигідно їх встановлювати.

Згадані вище відновлювані джерела енергії забезпечують велику кількість енергії та продовжують використовуватися, незважаючи на зазначені вище негативні фактори.

Однак існує сфера з низьким енергоспоживанням, де ефективність споживання енергії невелика. Це стосується таких застосунків, як мала побутова техніка, мобільні телефони та бездротові сенсорні системи для моніторингу та діа-

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

гностики технічного стану різних технічних об'єктів.

Цей тип обладнання не потребує потужного джерела енергії. Тому в таких пристроях часто використовують автономні електрохімічні джерела електричної енергії (мініатюрні акумулятори або батарейки).

Йдеться про використання термоелектричних і п'єзоелектричних ефектів у матеріалах для отримання електроенергії.

Виробництво електроенергії з перерахованими ефектами малопотужне, але технологія не стоїть на місці і, можливо, через кілька років така генерація займе місце в генеруванні електричної енергії.

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ТА УСТАТКУВАННЯ ОТРИМАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ П'ЄЗОЕФЕКТУ

1.1 Огляд та аналіз явища п'єзоелектричного ефекту та перспективи його застосування у побуті

П'єзоелектричні матеріали (п'єзоелектрики), особливо п'єзокераміка, мають властивість утворення електричного заряду на їх поверхні при деформації під впливом зовнішнього механічного тиску. Цей ефект, названий прямим п'єзоелектричним ефектом, був відкритий братами Кюрі в 1880 році. П'єр Кюрі і Жак Кюрі першими виявили прямий п'єзоелектричний ефект у кристалах турмаліну. Вони виявили, що коли на кристал прикладається механічний тиск у певному напрямку, на протилежній стороні кристала з'являється заряд, пропорційний тиску та протилежної полярності. Пізніше вони виявили, що кварц та інші кристали мають подібну дію. Незабаром, після цього був також підтверджений зворотний п'єзо ефект. Це означає, що будь-який такий матеріал між двома електродами змінюватиме свою форми в результаті прикладення до нього електричної напруги.

Перший ефект тепер використовується для вимірювань, а другий – для збуджуючої механічної напруги, деформації та вібрації.

Для визначення п'єзоелектричного заряду на край кристалічної пластини нанесено металеве покриття. Якщо кришка відкрита, під час деформації на кришці буде різниця потенціалів. При змиканні пластин, на пластинах утворюється наведений заряд, рівний за величиною заряду поляризації, але протилежний за знаком, а в процесі деформації в ланцюзі з'єднувальних пластин виникає електричний струм.

Розглянемо основні особливості п'єзо ефекту на прикладі кристалів кварцу. Кристали кварцу SiO_2 доступні в різноманітних кристалографічних модифікаціях. Кристали, які нас цікавлять (а-кварц), належать до так званої тригональ-

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ної кристалічної системи і зазвичай мають форму, зображену на рисунку 1.1. Вони схожі на шестигранні призми, оточені двома пірамідами, але з більшою кількістю граней. Такі кристали характеризуються чотирма кристалографічними осями, які визначають важні напрямки всередині кристала.

Одна з цих осей, Z , сполучає вершини піраміди. Інші три X_1 , X_2 , X_3 перпендикулярні до осі Z і з'єднують протилежні ребра шестикутної призми. Орієнтація по осі Z є п'єзоелектрично неактивною. При стисненні або розтягуванні в цьому напрямку поляризація не виникає. Навпаки, стиснення або розтягування в напрямку, перпендикулярному до осі Z , призводить до електричної поляризації. Вісь Z називається оптичною віссю кристала, а осі X_1 , X_2 і X_3 п'єзоелектричними або електричними осями.

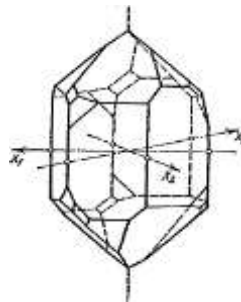


Рисунок 1.1 – Кристал кварцу

Розглянемо пластинку кварцу, яка вирізана перпендикулярно до однієї з п'єзоелектричних осей X . Вісь, перпендикулярну до осей Z і X позначимо через Y (рис.1.2).

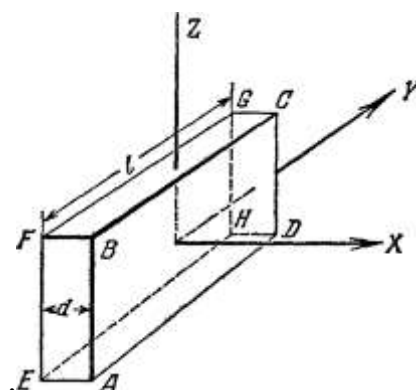


Рисунок 1.2 – Кварцова пластинка, яка вирізана перпендикулярно до п'єзоелектричної осі

Тоді, якщо розтягнути пластину вздовж осі X , то виявимо, що в перпендикулярних до неї площинах $ABCD$ і $EFGH$ з'являються різноіменовані поляризаційні заряди. Такий п'єзоелектричний ефект називають поздовжнім. Зміна знака деформації, тобто від розтягування до стиснення, змінює знак поляризаційного заряду протилежним чином.

Поява певного знака поляризаційного заряду з певним типом деформації (розтягнення або стиснення) вказує на те, що кінці осі X нерівні, і осі X можна призначити певним напрямком (на рисунку 1.1 вказано стрілкою). Це означає, що для цього перетворення знак заряду залежить від того, чи спрямована вісь X уздовж зовнішньої нормалі чи уздовж внутрішньої нормалі. Така вісь з нерівними кінцями називається полярною. На відміну від полярних осей X_1 , X_2 та X_3 , кінці осі Z ідентичні і неполярні.

П'єзоелектричний ефект пояснюється наступним чином. В іонних кристалах електричний момент існує навіть за відсутності зовнішнього електричного поля внаслідок центральної розбіжності позитивних і негативних іонів. Однак ця поляризація, зазвичай, непомітна, оскільки вона компенсується поверхневими зарядами. При деформації кристала електричний момент кристала змінюється внаслідок відносного переміщення позитивних і негативних іонів у решітці. Ця зміна електричного моменту проявляється як п'єзоелектричний ефект.

На рисунку 1.3 проілюстровано появу п'єзоелектричного ефекту у кристалах кварцу.

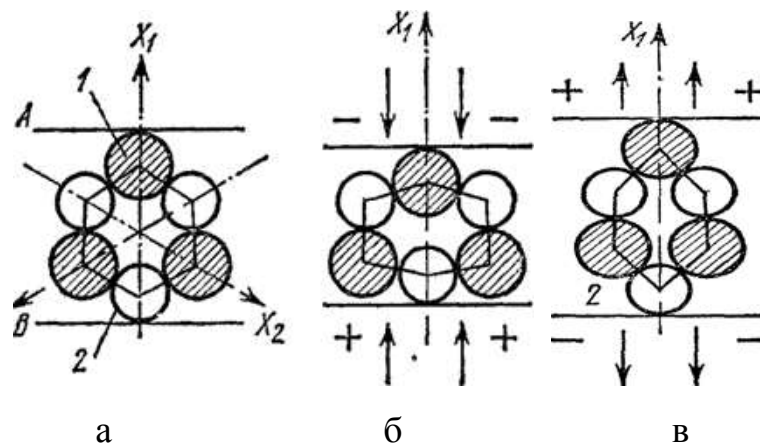


Рисунок 1.3 – Схема виникнення п'єзоелектричного ефекту у кристалах кварцу

На рисунку схематично показані проекції позитивних іонів Si (заштриховані кружечки) і негативних іонів O (незафарбовані кружечки) на площину, перпендикулярну до оптичної осі Z. Ця цифра не відповідає дійсному розташуванню іонів в елементарних гніздах кристалів кварцу, іони не компланарні і їх кількість вище, ніж показано. Однак симетрія іонного взаємного розташування передана точно і достатня для якісного пояснення.

Схема на рисунку. 1.3, а - відповідає недеформованому кристалу. Площина А, перпендикулярна до осі X1, має позитивний проектований заряд, а площина В, паралельна їй, має негативний проектований заряд.

Стиснення по осі X1 (рис. 1.3, б) деформує базове гніздо. У той же час, позитивні іони 1 і негативні іони 2 «виштовхуються» в щілини, зменшуючи виступаючі заряди (позитивні на грані А і негативні на грані В). Це те саме, що негативні заряди, що з'являються на гранях А і В. Грань Б має позитивний заряд. Зворотне відбувається, коли ми розтягуємо вздовж осі X1 (рис. 1.3, в). Іони 1 і 2 «виштовхуються» зі щілини. Тому на стороні А з'являється додатковий позитивний заряд, а на стороні В – негативний.

П'єзоефект можуть мати також деякі полікристалічні діелектрики з упорядкованою структурою (текстурою), наприклад керамічні матеріали й полімери. Діелектрики, що володіють п'єзоефектом, називають п'єзоелектриками.

Ці явища можна спостерігати на прикладі п'єзоелектричних матеріалів, які використовуються як датчики та генератори сигналів.

Ці матеріали повинні генерувати електричну енергію за допомогою механічних впливів, таких як стиснення. Крім того, ці матеріали повинні деформуватися під напругою. Ці матеріали умовно поділяються на дві групи: кристалічні та керамічні вироби. ЦТС - відомий як цирконат титанат свинцю, титанат барію та ніобат літію є прикладами створених людиною п'єзоелектричних матеріалів, які мають сильніші ефекти, ніж кварц та інші природні матеріали.

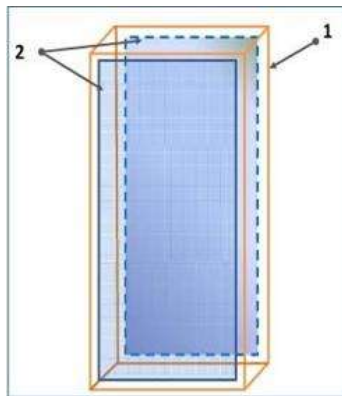
Порівняйте штучно отриманий цирконат титанат свинцю ЦТС з природним елементом кварцом. Тому ЦТС може створювати набагато вищі напруги

барію, широко використовуваної п'єзоелектричної кераміки з відносно простою структурою елементарної комірки. Титанат барію $VaTiO_3$, як і багато інших п'єзокерамічних матеріалів, має структуру, подібну до перовскіту ($CaTiO_3$), і названий на честь цього класу матеріалів. Елементарною коміркою при високих температурах, критичною коміркою, яку також називають точкою Кюрі, є куб. Коли температура падає нижче цього критичного значення, елементарна комірка спотворюється у квадрат до одного зі своїх країв.

Це також змінює відстань між позитивно та негативно зарядженими іонами (рис. 1.4, для $VaTiO_3$ замість $Pb - Ba$). Зміщення іона від початкового положення дуже мале. Це кілька відсотків параметрів елементарної комірки. Однак такий зсув розділяє центри притягання заряду в центрі комірки, що призводить до появи електричного дипольного моменту. Залежно від співвідношення енергій диполі сусідніх елементарних комірок кристала в деяких областях орієнтовані в одному напрямку, утворюючи так званий домен.

Усі елементарні комірки деформуються механічним стисненням або розширенням, що діє на п'єзоелектричні пластини паралельно напрямку поляризації. У той же час, центри тяжіння зарядів у майже паралельних елементарних комірках переміщуються відносно один одного, тим самим створюючи заряди на поверхні. Для двох випадків п'єзоелектричного перетворення енергії розглянемо, що взагалі відбувається в п'єзоелектриках.

П'єзоелектричний елемент (ПЕ) – п'єзоелектричне тіло з певними розмірами, геометрією та орієнтацією відносно головної кристалографічної осі (напрямок поляризації у випадку п'єзокераміки), з провідним покриттям (електродами) (рис. 1.5). Таким чином, п'єзоелемент є електричним конденсатором із твердим (кристалічним або керамічним) діелектриком. Характерною рисою таких конденсаторів є наявність п'єзоелектричних властивостей у діелектрика, який заповнює простір між електродами.



1 - пластина з п'єзоелектрика ; 2 - електроди із провідного матеріалу,
що накладені на грані пластини

Рисунок 1.5 – Схема п'єзоелемента

Нижче ми покажемо важливість існування п'єзоєфекту та його вплив на електричні та механічні властивості п'єзоелемента. Коли п'єзоелементи використовуються як електромеханічні перетворювачі, їх розміщення вибирається відповідно до вимог для досягнення максимальної ефективності. Зовнішні сили (механічні та електричні), що діють на п'єзоелементи, можуть бути розподіленими або зосередженими. Розподілені сили забезпечують більш ефективну деформацію. Тому електроди використовуються для більш ефективної поляризації п'єзоелектричного об'єму. Вони охоплюють всю площу грані п'єзо і створюють рівномірно розподілену механічну напругу. Накладка з еластичного матеріалу концентрує силу, що діє належним чином на поверхні п'єзоелемента, перетворюючи зовнішню силу в розподілену.

Зовнішня сила деформує п'єзоелемент, викликаючи його поляризацію та створюючи протилежний заряд на електродах. Величину заряду або результуючу напругу можна виміряти за допомогою відповідного вимірювального пристрою, підключеного до електродів п'єзоелемента. Зовнішня сила передає енергію п'єзоелементу у вигляді пружної деформації. Її можна розрахувати, якщо відомі величина діючої сили і твердість п'єзоелемента. Одночасно з деформацією п'єзоелемента на його електродах виникає напруга. Отже, частина енергії, яку надає п'єзоелементу зовнішня сила, є електричною, і оскільки напруга між

електродами і ємність п'єзоелемента відомі, їх значення можна розрахувати.

Зовнішня механічна сила, що діє на п'єзоелемент, постачає граничну енергію W_0 у вигляді енергії пружної деформації та енергії заряду ємності п'єзоелемента. Нехай W_m - енергія пружної деформації п'єзоелемента, W_e - електрична енергія, що заряджає його ємність, тоді повна енергія W_0 , передана п'єзоелементу, дорівнює їх сумі. Як і в будь-якому оборотному перетворювачі, існує протилежний ефект (п'єзоелектричний відгук), при якому напруга, створена прямим п'єзоелектричним ефектом (вже зворотний п'єзоелектричний ефект), створює механічну напругу та деформацію, які протидіють зовнішній силі. Це проявляється у збільшенні твердості п'єзоелемента. Коли напруга, викликана п'єзоелектричним ефектом, зникає, наприклад, через замикання електродів п'єзоелектричного елемента, зворотний п'єзоелектричний ефект повинен зникати, а твердість п'єзоелектричного елемента повинна зменшуватися.

Подібні міркування можливі для зворотного п'єзо ефекту, тобто впливу зовнішньої електричної сили на п'єзоелемент. У той же час, зовнішнє джерело живлення забезпечує п'єзоелемент енергією у вигляді зарядної енергії за рахунок електростатичної ємності п'єзоелемента і механічної енергії за рахунок пружної деформації. Знову ж таки, відбувається зворотний процес. Якщо щільно затиснути п'єзоелемент, щоб запобігти його деформації, можна побачити зміну ємності. Цей факт легко спостерігати для сильних п'єзоелектриків, але для слабких п'єзоелектриків, таких як кварц, зміна ємності невелика (близько 1%). Розглядаючи термодинаміку, до такого висновку легко дійти. З п'єзоелектричної теорії відомо, що подібно до того, як коефіцієнт діелектричної проникності п'єзоелектриків залежить від механічних умов, модуль пружності п'єзоелектриків також залежить від електричних умов. Це не дивно, оскільки п'єзоелектрика за визначенням вимагає зв'язку між пружними та діелектричними властивостями. Отже, п'єзоелектричні властивості матеріалу не можна описати без визначення механічних і електричних граничних умов, включаючи пружні та діелектричні коефіцієнти.

Явища п'єзоефекту можуть бути зворотної та прямої дії. Схематичні зображення прямого (рис. 1.6 а, б) і зворотного (рис. 1.6, в, г) п'єзоефектів проілюстровано на рисунку.

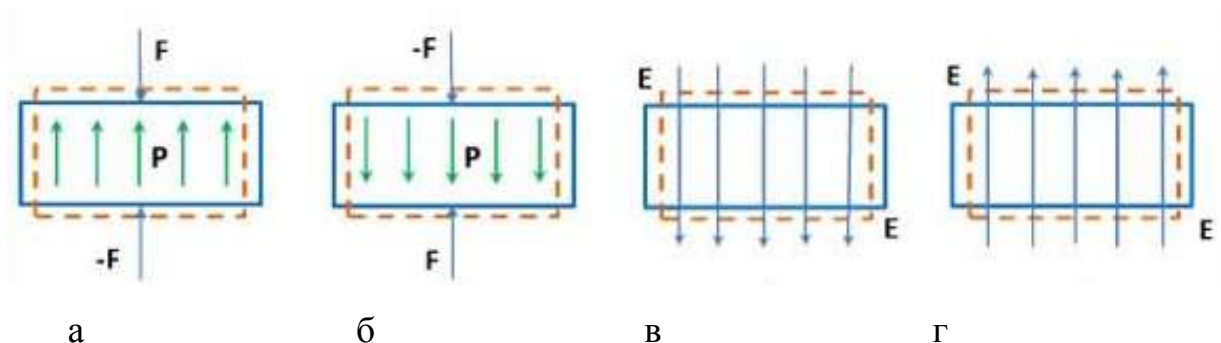


Рисунок 1.6 – Схематичні зображення прямого (а, б) та зворотного (в, г) п'єзоефектів

На рисунку 1.6 стрілками P і E позначені зовнішні впливи: механічні сили та напруженості електричного поля. Штриховою лінією показаний контур п'єзоелектрика для зовнішніх впливів, а суцільною – контур деформації п'єзоелектрика (для наочності збільшений у кілька разів). P - вектор поляризації.

Зовнішні механічні сили, що діють на п'єзокристал в певному напрямку, викликають не тільки внутрішні механічні напруги і деформації (як в інших твердих тілах), але й електричну поляризацію, в результаті чого виникають різні за знаком заряди зв'язків. Якщо напрямок механічної сили зміниться в протилежний бік, то напрямок поляризації і знак заряду зміняться на протилежні. Це явище називається прямим п'єзоефектом (рис. 1.7).

Між двома металевими пластинами поміщають п'єзоелектричний матеріал (кераміку або кварц). Для створення електричного заряду необхідно застосувати механічну силу (стиск або розширення). Коли прикладається механічна сила, на металевій пластині починає накопичуватися електричний заряд.

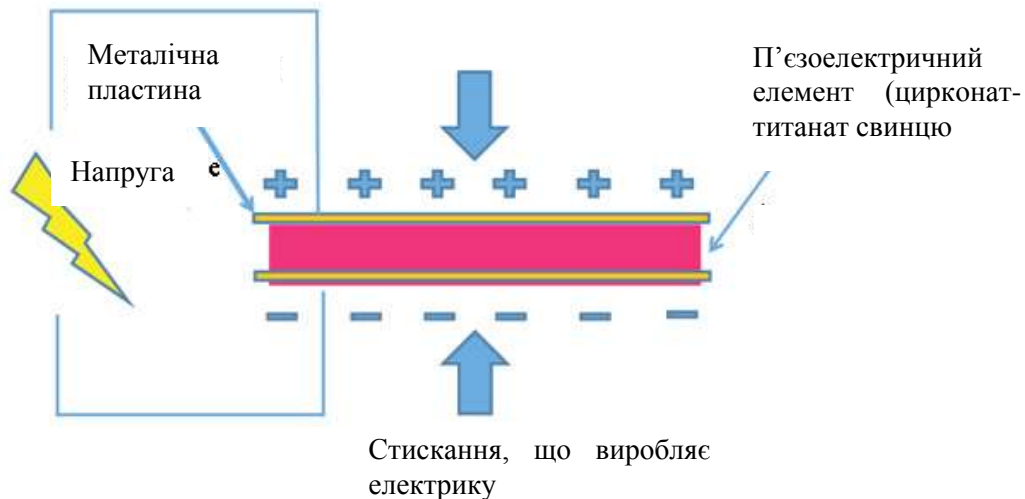


Рисунок 1.7 – Прямий п'єзоэффект.

Тому п'єзоелектричний ефект працює як мініатюрна батарея. Мікрофони, датчики тиску, ехолот та інші чутливі пристрої працюють за допомогою цього ефекту.

П'єзоэффект зворотний. Коли на п'єзоелемент, скажімо кристал, діє електричне поле відповідного напрямку, воно створює в ньому механічну напругу і деформацію (рис. 1.8). При зміні напрямку електричного поля в протилежний бік відповідно змінюються в протилежний бік напрямки напружень і деформацій. Це явище називається зворотним п'єзоэффектом. Він полягає в тому, що при подачі напруги на п'єзокристал відбувається механічна деформація тіла, під час якої тіло розширюється або стискається.

Зворотний п'єзоелектричний ефект значно сприяє розвитку акустичної техніки. Приклади включають звукові стовпи, сирени та дзвони. Перевагою таких колонок є те, що вони дуже тонкі, що робить їх практично незамінними для використання в невеликих пристроях, таких як мобільні телефони. Цей ефект також широко використовується в медичних ультразвукових датчиках і гідроакустичних датчиках.

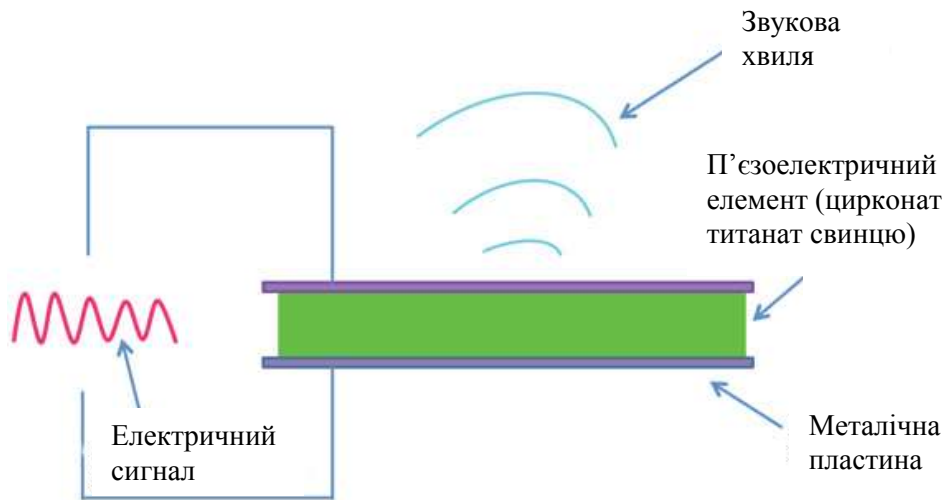


Рисунок 1.8 – Зворотній п'єзоефект.

Прямий та зворотний п'єзоефект лінійні і описуються лінійними залежностями, що зв'язують електричну поляризацію P з механічною напругою t : $P = dt$.

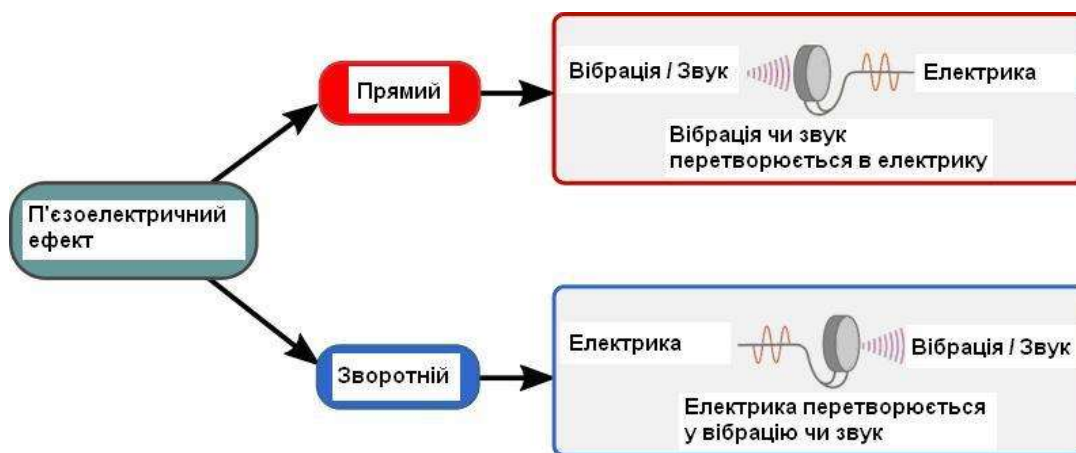


Рисунок 1.9 – Схема прямого та зворотного п'єзоефектів

Деформація п'єзоелемента, викликана п'єзоефектом, дуже мала в абсолютному вираженні. До прикладу, кварцова пластина товщиною 1 мм під дією напруги у 100 В змінює свою товщину усього на $2,3 \cdot 10^{-7}$ мм. Незначність п'єзоелектричної деформації пояснюється її дуже високою твердістю.

1.2 Огляд та аналіз обладнання для отримання напруги на основі п'єзо ефекту

П'єзоелектричні матеріали використовуються в різних галузях, таких як медичне обладнання, контроль промислових процесів, обладнання для виробництва напівпровідників, побутова техніка, системи управління зв'язком і різні вимірювальні інструменти. Комерційні системи з використанням п'єзоелектричних матеріалів - насоси, швейні машини, датчики (тиску, обledenіння, кутової швидкості тощо), оптика, лазерні принтери, двигуни для камер з автофокусом тощо. При цьому сфера застосування цих матеріалів постійно розширюється. Застосування п'єзо, як правило, діляться на чотири категорії: сенсори, силові приводи, генератори та перетворювачі.

У генераторах п'єзоелектричні матеріали можуть генерувати напругу, достатню для створення іскри між електродами, тому їх можна використовувати як електроди для запалювання палива, газових плит і зварювального обладнання. Крім того, він може накопичувати електричну енергію, вироблену п'єзоелектричними елементами. Такі генератори є відмінними твердотільними акумуляторами для електронних схем.

У датчиках п'єзоелектричні матеріали перетворюють фізичні параметри, такі як прискорення, тиск і вібрацію, в електричні сигнали.

У силових приводах п'єзоелектричні матеріали перетворюють електричні сигнали в точно контрольовані фізичні переміщення, які визначають точність механічних інструментів, лінз і дзеркал. Для перетворювачів п'єзоелектричні перетворювачі можуть як генерувати ультразвукові сигнали з електричної енергії, так і перетворювати входні механічні коливання в електричні. П'єзоелектричні пристрої використовуються для вимірювання відстані, потоку та рівня рідини. Перетворювачі також використовуються для генерації ультразвукових коливань для очищення, свердління, зварювання, шліфування кераміки та медичної діагностики.

В даний час існує багато практичних застосувань явища прямого п'єзоелектричного ефекту в пристроях генерації електроенергії.

- п'єзозапальничка для подачі високої напруги на спеціальний блискавкозахист від руху пальця. Сьогодні кожен курець може носити в кишені свою «електростанцію».

- як чутливий елемент в ехолотах, мікрофонах, головках детекторів звуку в електронних телефонах, приймальних елементах в гідрофонах.

- контакт в п'єзоелектричних запальниках (наприклад, стрільба з гранатомета);

- датчики у вигляді силочутливих елементів, такі як датчики тиску газу та рідини, датчики вимірювання сили.

Зворотний п'єзоелектричний ефект можна використовувати для:

- п'єзоелектричні керамічні аудіосигнали, такі як музичні листівки та різні будильники, використовуються в широкому діапазоні побутової техніки від звичайних годинників до кухонних приладів.

- позиціонер для переміщення головки жорсткого диска скануючого тунельного мікроскопа з високоточною системою позиціонування. В. Система позиціонування голки.

- гідроакустичний передавач (сонар);

- ультразвуковий передавач для ультразвукового очищення води (промислова ультразвукова ванна, ультразвуковий очищувач).

- п'єзоелектричний двигун;

- струменевий принтер для подачі чорнила

П'єзогенератори зворотної і прямої дії застосовуються одночасно при:

- спеціальний датчик поверхневої акустичної хвилі.

- ультразвукова лінія затримки для спеціальної електроніки.

- пристрої на основі впливу спеціальних поверхневих акустичних хвиль.

- п'єзотрансформатор для зміни високочастотної напруги.

- кристалічний генератор як стандарт частоти.

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Більшість використовуваних п'єзогенераторів виробляють невеликі струми. Окремі п'єзоелектричні елементи можуть генерувати високі напруги, які порушують розрядний проміжок, змушуючи струм протікати через випрямляч, а потім через запам'ятовуючий пристрій, наприклад іоністор.

П'єзоелементи є реверсивними електромеханічними перетворювачами. Він може перетворювати механічну енергію в електричну і навпаки.

Багато сучасних електронних пристроїв використовують для роботи п'єзоелектричний ефект. Наприклад, під час використання деяких пристроїв виявлення звуку використовуваний мікрофон працює на основі вищевказаних ефектів. П'єзоелектричні кристали перетворюють звукову енергію в електричні сигнали, які можуть використовуватися смартфонами, комп'ютерами та іншими електронними пристроями.

П'єзоелектричний ефект також зробив можливим розвиток деяких передових технологій. Наприклад, ехолот високого класу використовує невеликі високочутливі мікрофони та керамічні звукові датчики на основі п'єзоелектричного ефекту.

Перетворювачі, засновані на використанні прямого п'єзоефекту, називаються генераторними. Він має механічний вхід і електричний вихід. Перетворювачі, що працюють на використанні зворотного п'єзоефекту, називаються моторними перетворювачами. Він має електричний вхід і механічний вихід. Відомо багато п'єзоелектричних пристроїв, які працюють як на прямому, так і на зворотному ефекті.

Прямі ефекти використовуються, наприклад, у мікрофонах, датчиках, датчиках механічної сили, руху та прискорення, побутових газових запальничках. Цей контрефект був основою для розробки телефонів, гучномовців, ультразвукових передавачів, реле, двигунів тощо.

П'єзоелектричні перетворювачі, або п'єзотрансформатори (скорочено п'єзотрансформатори), відомі і застосовуються на практиці. Принципова схема пристрою п'єзоелектричного трансформатора наведена на рисунку 1.10. Це

описує квадрупольну форму п'єзоелектричного перетворювача лише з електричними входами та виходами.

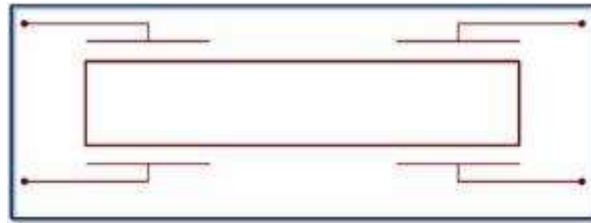


Рисунок 1.10 - П'єзоелектричний трансформатор

Робота п'єзотрансляторів заснована на використанні як прямого, так і зворотного п'єзоефекту. Коли на вхідний електрод п'єзотрансформатора подається напруга, зворотний п'єзоефект деформує весь п'єзоелемент, у результаті чого на вихідному електроді виникає електрична (вторинна) напруга. Прямий п'єзоефект. П'єзотрансформатор має подвійне перетворення енергії: електричну в механічну і механічну в електричну. Як і електромагнітні трансформатори, п'єзоелектричні трансформатори використовуються для перетворення напруги. Вибираючи розмір і положення електрода, можна отримати різні значення коефіцієнта перетворення. П'єзотрансформатори зазвичай використовуються в резонансному режимі і досягають більш високих значень коефіцієнта перетворення (порядку сотень).

За останні роки створено кілька експериментальних зразків п'єзогенераторів різного призначення. Вібращі можна розділити на два різних класи, поздовжні та поперечні, які відрізняються за типом вібращі.



Рисунок 1.11 – П'єзогенератор на взутті

П'єзогенератор, який повторює поздовжню вібрацію. У цьому пристрої один п'єзоелемент розміщено на підніжці взуття та може генерувати певну потужність під час швидких рухів, наприклад бігу. Пристрій був винайдений в Луїзіанському технічному університеті і виготовлений у вигляді спеціального спірального пластинчастого п'єзоелемента.

Через крихкість п'єзокерамічних матеріалів, в даний час, важко забезпечити надійність і довговічність таких пристроїв. Однак ця ідея добре працює при використанні гнучких п'єзополімерних листів. Однак наразі такі речовини досліджуються

Було опубліковано повідомлення про можливість отримання електричної енергії за допомогою різних механічних енергетичних впливів. Рух хвиль і вітру. Вплив дорожнього шуму. Навантаження внаслідок руху машини або людини. частота серцевих скорочень тощо

На основі всіх цих можливостей були винайдені різноманітні винаходи.

споживачеві. У той же час факторні струми знаходяться в діапазоні наноампер і навіть пікоампер, враховуючи коливання дорожнього навантаження.

Сонар був винайдений Льюїсом Ніксоном у 20 столітті. Спочатку він використовувався для виявлення айсбергів. Однак інтерес до пристрою значно зріс, оскільки його використовували для визначення місцезнаходження підводних човнів під час Першої світової війни. Сьогодні ехолот є широко використовуваним пристроєм для багатьох різних застосувань. На рисунку 1.13 показано, як працює гідролокатор.

Принцип роботи дуже простий. Передавачі використовують зворотний п'єзоелектричний ефект, щоб посилати звукові хвилі в певному напрямку. Коли хвиля вдаряється об об'єкт, вона відбивається туди, де її приймає приймач. На відміну від передавачів, приймачі використовують прямий п'єзоелектричний ефект. Він перетворює відбиті звукові хвилі в електричні сигнали та надсилає їх до електронної системи, де сигнали обробляються далі. Розрахувати відстань від джерела сигналу до зазначеного об'єкта за часовими характеристиками переданого та прийнятого сигналів.

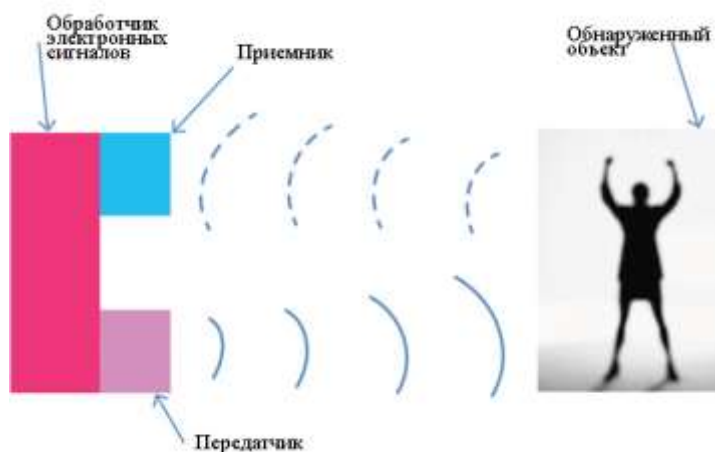


Рисунок 1.13 – Гідролокатор (сонар)

П'єзоелектричний динамік і зумер. Такі пристрої використовують для ге-

змінного магнітного поля (електромагнітного поля) на п'єзоелектричний генератор його нанорозмірні елементи постійного магніту 5 міцно з'єднані з кінчиками нанорозмірних стовпів 2 (або з кінчиками нанорозмірних стовпів нерухомо). Елемент 2, занурений у краплеподібний елемент 7), здійснює вібраційний рух, який передається елементу у вигляді моменту, прикладеного до верхньої частини нанорозмірної опори 2, так що нанорозмірна опора 2 починає вібрувати або обертатися в площині, перпендикулярній підложці 1. Коли нанорозмірна опора 2 струшується або згинається внаслідок п'єзоелектричного ефекту, що створюється на поверхні контакту зі струмопровідним дротяним електродом 3, генерується різниця потенціалів, і різниця потенціалів передається на струмопровідний дротяний електрод 3. Струмопровідний дротяний електрод 3 розміру замикається, і струм починає надходити до струму навантаження.

Таким чином, заявлений п'єзоелектричний генератор може виробляти електроенергію під впливом зовнішнього змінного магнітного поля (електромагнітного поля) і не тільки використовуватися як джерело живлення для різноманітних мікро- та нанопристроїв, але й завжди можна створювати портативні джерела живлення, які генерувати енергію. Завдяки флуктуаційній енергії зовнішніх магнітних полів (включаючи коливання магнітного поля Землі) або фоновому електромагнітному випромінюванню.

Спосіб генерації електричних імпульсів (рис. 1.15) полягає у наступному. Під час детонації вибухової речовини в генераторі ударної хвилі 1 в момент $t=0$ виникає п'єзоелектричний перетворювач, розташований в корпусі 4, що складається щонайменше з однієї п'єзоелектричної пластини 2 і електроізоляційного матеріалу 3 навколо неї буде створено UV1 форми. Його передня поверхня перпендикулярна до електродів 5 п'єзоелектричної пластини 2, а напрямок поширення передньої поверхні, вказаний стрілкою, проходить у напрямку OZ і, таким чином, паралельний електродам.

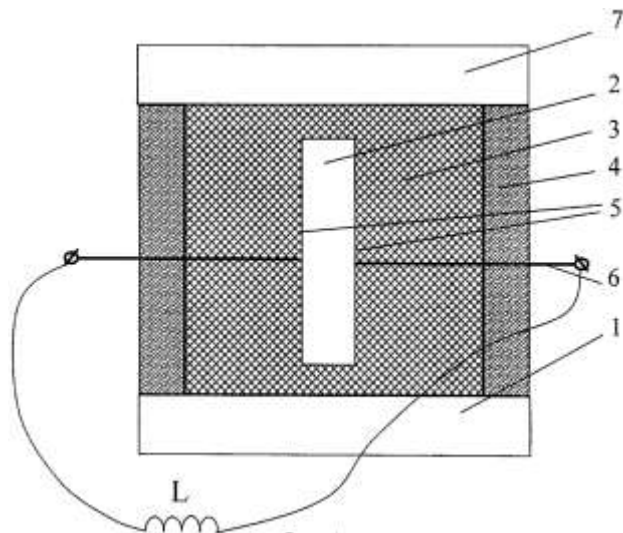


Рисунок 1.15 – Спосіб генерування імпульсу електричного в індуктивному навантаженні вибухового п'єзогенератора

Ударна хвиля поширюється в напрямку OZ зі швидкістю U , а в напрямках OY і $O(-Y)$ зі швидкістю вибухової детонації D . При перетворенні енергії ударної хвилі в електричну в об'ємі п'єзоперетворювача на вихідній клемі 6 утворюється імпульс струму. У момент часу $t = y / 0,2D$ ударні хвилі, що розділяють клин, досягають країв п'єзопластини в напрямках OY і $O(-Y)$, а амплітуда струму є значенням ударного навантаження I_0 . Кут збіжного п'єзоперетворювача є клин UV_2 , утворений включеним генератором ударної хвилі 7.

Збіжна клиноподібна UV_2 утворена двома косими ударними хвилями, передні поверхні яких паралельні відповідним переднім поверхням розбіжної UV_1 і перпендикулярні електродам 5 п'єзоелектричної пластини 2. Збіжний клин UV_2 поширюється в напрямках OY , $O(-Y)$ і $O(-Z)$ з однаковою швидкістю, що призводить до розбіжного клина VB_1 . Рух п'єзоелектричного перетворювача закінчується в момент $T = 2 \frac{\Delta}{t}$, коли дві хвилі клина стикаються. При цьому максимальне значення п'єзоструму становить $2I_0$.

Винахід відноситься до електротехніки для перетворення енергії механічного тиску в електричну, яка може бути використана для створення додаткових джерел енергії підводних енергосистем (рис. 1.16). Технічним досягненням є

підвищення ефективності вироблення енергії та розширення діапазону використання п'єзоелектричних перетворювачів.

Система генерації електроенергії включає основу, п'єзоелектричний перетворювач, встановлений на основі, і засіб для механічного навантаження на п'єзоелектричний перетворювач. П'єзоелектричний перетворювач встановлений на елементі конструкції підводного човна, який не з'єднаний жорстко з корпусом підводного човна і має положення спрацьовування, яке дозволяє йому взаємодіяти з корпусом підводного човна таким чином, що п'єзоелектричний перетворювач проходить через корпус підводного човна і при зануренні і зміні глибини на датчики передається тиск води за бортом.

Пропонована система генерації електроенергії містить основу 3, встановлений на основі 3 п'єзоелектричний перетворювач 1 і засіб для механічного навантаження перетворювачів 1. Необхідною основою служать елементи конструкції підводного човна, не з'єднані жорстко з корпусом 2.

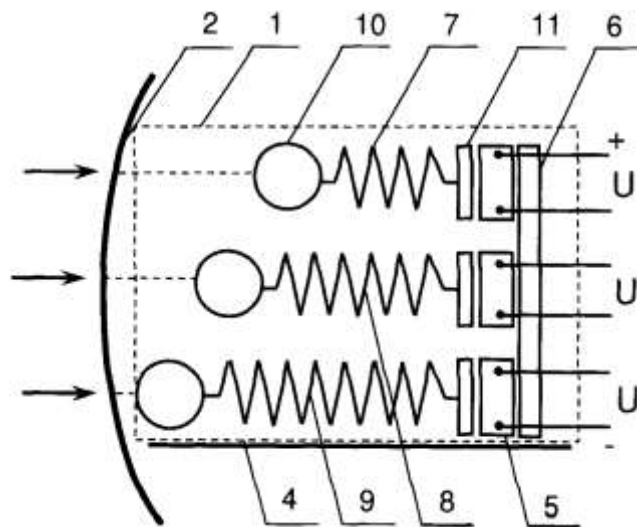


Рисунок 1.16 – П'єзогенератор

Таким елементом у цій конструкції може бути палуба 3 підводного човна, що спирається на кронштейни 4 і не з'єднується жорстко з корпусом 2. Крім того, перетворювач 1 може бути встановлений на елементі конструкції судна, жо-

рстко з'єднаному з палубою 3 (не показано).

Перетворювачі 1 має робоче положення, яке дозволяє йому взаємодіяти з корпусом 2 таким чином, що тиск води за бортом передається через корпус 2 на перетворювач 1 у міру зміни глибини занурення підводного човна. У цьому випадку корпус 2 функціонує як механічний навантажувальний пристрій для перетворювача 1.

У пропонованій системі можуть бути передбачені засоби транспортування перетворювача 1 з робочого положення в положення спокою, де перетворювач 1 відокремлений від корпусу 2 і виключається їх взаємодія. Ці засоби можуть бути, наприклад, у формі напрямних (не показано). При цьому підбирач 1 має можливість наведення, наприклад, рукою.

Кожен перетворювач 1 може включати в себе безліч п'єзоелектричних елементів 5, розташованих на загальній основі 6. Оптимальна кількість п'єзоелементів 5 - 2-3 з точки зору ремонтпридатності. Крім того, кожен перетворювач 1 може включати в себе пружинні демпфери 7, 8 і 9, які взаємодіють з п'єзоелементом 5 і корпусом 2 судна, через які тиск води на борту передається на п'єзоелемент 5. Корпус 2 при зміні глибини занурення

Кожен з амортизаторів 7, 8, 9 може мати на одному кінці штовхач 10, наприклад, сферичний штовхач, для взаємодії з корпусом 2 для оптимального розсіювання горизонтальної складової стискаючої сили на корпус 2. Це стає можливим. корабля. З протилежного боку амортизаторів 7, 8, 9 може бути встановлена пластина 11, що примикає до п'єзоелемента 5 і забезпечує передачу тиску від корпусу 2 судна.

Висновок розділу 1

У результаті вивчення та аналізу технології виробництва електроенергії та пристроїв, які використовують п'єзоефект, ми дійшли висновку, що цей ефект можна використовувати при проектуванні та розробці джерел електроенергії з низькою потужністю, які можна використовувати в повсякденному житті. .

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

2 РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ ПОБУТОВОГО П'ЄЗОГЕНЕРАТОРА

2.1 Розробка схеми коливань та переміщень п'єзокерамічних зразків та формули, що характеризують п'єзоелементи

Застосування механічного стиснення або розширення до п'єзоелектричних пластин паралельно напрямку поляризації деформує всі елементарні комірочки. У той же час центри тяжіння зарядів у майже паралельних елементарних комірочках переміщуються відносно один одного, тим самим створюючи заряди на поверхні.

Співвідношення між прикладеною силою та результатом п'єзовідповіді визначається такими факторами: п'єзоелектричні властивості п'єзокераміки, розмір і форма зразка, напрям електричних і механічних збурень.

П'єзоелектричні матеріали за своєю суттю є анізотропними кристалами. На рисунку 2.1 показано різні напрямки та осі орієнтації п'єзоелектричних матеріалів. Осі 1, 2 і 3 відповідають осям X, Y і Z класичної декартової системи координат, а осі 4, 5 і 6 визначають осі обертання. Напрямок осі 3 є напрямком поляризації. Така орієнтація створюється високою напругою постійного струму, що утворюється між електродами під час виготовлення.

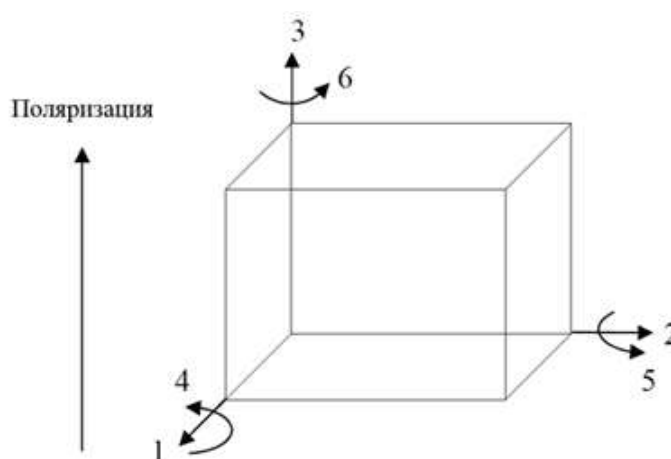


Рисунок 2.1 – Напрямок і просторова орієнтація осей п'єзоелектричного матеріалу

П'єзоелементи характеризуються такими властивостями: відносна діелектрична проникність. резонансна частота, коефіцієнт електромеханічного зв'язку; пружна стала. п'єзоелектрична стала. Коефіцієнт Пуассона - це температурний коефіцієнт. швидкість старіння. механічний фактор. Температура Кюрі Густина.

1) Відносна діелектрична постійна. Відносна діелектрична постійна ϵ відношенням діелектричної проникності матеріалу (у цьому випадку ϵ_{33}^T та ϵ_{11}^T) до діелектричної проникності у вакуумі (ϵ_0).

$$\frac{\epsilon_{33}^{T(S)}}{\epsilon_0} \text{ та } \frac{\epsilon_{11}^{T(S)}}{\epsilon_0}, \quad (2.1)$$

де $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$, Ф/м

Верхні показники вказують на граничні умови, що діють на матеріал при визначенні значення діелектричної проникності. Зокрема, показник T вказує на те, що (в цьому випадку) діелектрична проникність вимірюється на вільному (незатиснутому) зразку. Крім того, показник S вказує на те, що вимірювання проводилися при постійній деформації (затиснутому стані) п'єзокераміки. Перший індекс вказує напрямок зміщення діелектрика, а другий індекс вказує напрямок електричного поля. Формула для розрахунку відносної діелектричної проникності така:

$$\frac{\epsilon_U^T}{\epsilon_0} = \frac{tC}{\epsilon_0^2 S}, \quad (2.2)$$

де ϵ_U^T - діелектрична проникність (одна із двох ϵ_{11}^T чи ϵ_{33}^T), Ф/м;

t – відстань між електродами пристрою, м;

S – площа електрода, м²;

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

C – ємність, Ф.

2) Резонансна частота.

Осібна частота пластини по товщині f_0 підраховується по наступній формулі:

$$f_0 = \frac{c}{2t}, \quad (2.3)$$

де c – швидкість звуку в матеріалі., м/с .

3) Коефіцієнти електромеханічного зв'язку.

Коефіцієнти електромеханічного зв'язку k_p , k_{33} , k_{15} , k_t , k_{31} описують здатність п'єзоелемента перетворювати енергію з електричної в механічну і навпаки. Квадрат коефіцієнта електромеханічного зв'язку визначається як відношення накопиченої перетвореної енергії одного типу (механічної чи електричної) до вхідної енергії другого типу (електричної чи механічної). Показник степеня вказує на відносний напрямок і коливальний характер електричних і механічних величин. Вони можуть бути пов'язані з режимами коливань простих перетворювачів певної геометрії. k_p позначає відношення електричної та механічної енергій тонкого диска, поляризованого в напрямку товщини та віброуючого радіально (плоский режим). (рис.2.2).

Коефіцієнт k_{31} відноситься до довгого тонкого стрижня з електродами на його довгій поверхні. Природа вібрації - деформація стиску по довжині. k_t відноситься до тонких дисків або пластин і визначає деформацію стиску по товщині. k_{33} відповідає подовженому стрижню з електродами на обох кінцях, поляризованими по довжині. Природа вібрації - деформація стиску по довжині. k_{15} являє собою енергію, перетворену на коливання зсуву вздовж товщини.

Цей коефіцієнт можна розрахувати за допомогою резонансної та антирезонансної частот за такою формулою:

Пружні властивості п'єзоелектричних матеріалів характеризуються пружною податливістю ($S_{IJ}^{E,D}$) або пружною жорсткістю ($C_{IJ}^{E,D}$). Межа пружної течучості визначає величину деформації, яка виникає під впливом прикладеного механічного навантаження. Ефективний модуль пружності короткозамкнутого електрода менший, ніж у стаціонарного електрода, тому що кераміка під впливом механічної напруги виробляє електричну реакцію, яка протидіє виниклій деформації.

Крім того, оскільки жорсткість змінюється залежно від напрямку, електричні та механічні умови надаються для точного визначення значення. Верхній індекс E означає, що вимірювання проводяться в постійному електричному полі (коротке замикання). З іншого боку, експонента D вказує на граничний стан, тобто постійне електричне зміщення (індукцію). Це означає, що вимірювання проводяться без навантаження. Цифра під першою вказує напрямок деформації, а друга цифра вказує на напрямок механічної напруги.

5) П'єзоелектричні постійні.

П'єзоелектричний модуль d це відношення механічної деформації до прикладеного поля електричного (Кл/Н) :

$$d_{33} = \frac{\Delta x_s}{U_s}, \quad (2.5)$$

де Δx_s – зміна товщини пластини, м,

U_s – прикладена напруга, В.

Корисно пам'ятати, що чим вище значення d_{ij} , тим вище механічне зміщення, яке зазвичай досягається в конструкції ультразвукових перетворювачів. d_{33} використовується при додатку сили вздовж осі поляризації. d_{31} використовується, як і раніше, коли сила прикладена перпендикулярно до осі поляризації під час створення заряду на електроді. d_{15} показує, що заряд накопичується в

електродах перпендикулярно до початкової поляризації, а результуючі механічні коливання є коливаннями зсуву.

П'єзоелектрична константа тиску g_{ij} – це співвідношення отриманої напруги до прикладеного тиску:

$$U_e = g_{33} dp_x, \quad (2.6)$$

де U_e – отримана напруга, В; d - товщина, м; p_x – прикладений тиск, Па.

Індекс «33» показує, що електричне поле і механічна напруга спрямовані по осі поляризації. Індекс «31» означає, що тиск прикладається під прямим кутом до осі поляризації, при цьому напруга знімається з тих же самих електродів, що й у випадку «33». Індекс «15» має на увазі, що прикладена напруга є зсувною і результуюче електричне поле перпендикулярне до осі поляризації. Високе значення g_{ij} веде до більших вихідних напруг, що є бажаним для сенсорів.

Індекс «33» вказує на те, що електричне поле і механічна напруга спрямовані вздовж осі поляризації. Індекс «31» означає застосування тиску перпендикулярно до осі поляризації при знятті напруги з того самого електрода, що й для «33». Індекс «15» означає, що прикладена напруга є напругою зсуву, а результуюче електричне поле перпендикулярно до осі поляризації. Більш високі значення g_{ij} призводять до більш високих вихідних напруг, що є бажаним для датчика.

б) Коефіцієнт Пуассона.

Коефіцієнт Пуассона – це співвідношення відносного поперечного стиску до відповідного відносного поздовжнього видовження:

$$\mu = -\frac{\Delta a l}{\Delta l a}, \quad (2.7)$$

де μ – коефіцієнт Пуассона;

Δa – абсолютне збільшення товщини, м;

a – товщина після деформації, м;

Δl – абсолютне збільшення довжини, м;

l – довжина після деформації, м.

7) Температурні коефіцієнти.

Температурний коефіцієнт позначає зміну різних властивостей матеріалу (ємність, резонансна частота, розміри) при зміні температури і визначається за формулою:

$$TKЧ = \frac{1}{\Delta t} \frac{f(t_1) - f(t_2)}{f_{20}} \cdot 10^6, \quad (2.8)$$

де $TKЧ$ – температурний коефіцієнт резонансної частоти, ppm/°C;

$f(t_1)$ – частота резонансна при температурі t_1 , Гц;

$f(t_2)$ – частота резонансна при температурі t_2 , Гц;

f_{20} – частота резонансна при температурі 20°C, Гц;

Δt – різниця температур $\Delta t = t_2 - t_1$, °C.

$$TKE = \frac{1}{\Delta t} \frac{C(t_1) - C(t_2)}{C_{20}} \cdot 10^6, \quad (2.9)$$

де TKE – температурний ємності коефіцієнт, ppm/°C;

$C(t_1)$ – ємність при температурі t_1 , Ф;

$C(t_2)$ – ємність при температурі t_2 , Ф;

C_{20} – ємність при температурі 20°C, Ф.

$$TKЛР = \frac{1}{\Delta t} \frac{l(t_1) - l(t_2)}{l_{20}} \cdot 10^6, \quad (2.10)$$

де $TKLP$ – температурний коефіцієнт лінійного розширення, ppm/°C,

$l(t_1)$ – довжина зразка при температурі t_1 , м,

$l(t_2)$ – довжина зразка при температурі t_2 , м,

l_{20} – довжина при температурі 20°C, м.

8) Швидкість старіння.

Швидкість старіння — це міра змін резонансної частоти та ємності з часом. Щоб обчислити цю швидкість, після поляризації з'єднайте разом електроди перетворювача та нагрівайте зразок протягом визначеного часу. Резонансна частота та ємність вимірюються кожні 2^n (1, 2, 4, 8) днів. Швидкість старіння розраховується за такою формулою:

$$AR = \frac{1}{\log t_2 - \log t_1} \frac{X_{t_2} - X_{t_1}}{X_{t_1}}, \quad (2.11)$$

де AR – швидкість старіння для резонансної частоти чи ємності;

t_1, t_2 – число днів після поляризації зразка;

X_{t_1}, X_{t_2} – резонансна частота чи ємність через t_1 і t_2 днів після поляризації зразка.

9) Механічна добротність.

Добротність — це кількісна характеристика властивостей резонансних коливальної системи, що вказує на те, як часто амплітуда вимушеної вібрації при резонансі перевищує амплітуду вимушеної вібрації на частотах, значно нижчих за резонансну частоту, при тій самій амплітуді сили збудження. Коефіцієнт добротності дорівнює відношенню власної частоти резонансної системи, ω , до ширини смуги частот, $\Delta\omega$, на межі, де енергія вимушеної вібрації системи становить половину резонансної частоти.

$$Q_m = \frac{f_a^2}{2\pi f_r Z_r C (f_a^2 - f_r^2)}, \quad (2.12)$$

де Q_m – механічна добротність;

f_r – частота резонансна, Гц;

f_a – антирезонансна частота, Гц;

Z_r – опір при резонансі, Ом;

C – ємність, Ф.

Продукти, що використовують п'єзоелектричний резонанс, потребують високої механічної добротності.

10) Температура Кюрі.

Температура Кюрі – це температура, при перевищенні якої п'єзоелектричний матеріал втрачає свої якісні властивості .

11) Щільність.

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (2.13)$$

де ρ – щільність, кг/м³; m – маса, кг; V – об'єм, м³.

2.2 Основні розрахунки п'єзоелементів побутового п'єзогенератора

2.2.1 Розрахунки геометричних розмірів перетворювача п'єзогенератора

Довжина хвилі визначається за формулою:

$$\lambda_1 = \frac{v_1}{f_p} = \frac{5200}{25} = 0,208 \text{ м}, \quad (2.14)$$

Площі випромінювання п'єзоелементів побутового п'єзогенератора

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$\lambda_1 = \frac{v_s}{f_p} = \frac{2600}{25} = 0,104. \quad (2.15)$$

$$S = \left(\frac{\lambda_p}{2}\right)^2 = \left(\frac{0,06}{2}\right)^2 = 9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2. \quad (2.16)$$

Відносна довжина п'єзоелементів побутового п'єзогенератора:

$$X = \frac{l_x}{\lambda_x} = \frac{0,026}{0,104} = 0,25 \text{ м}. \quad (2.17)$$

Коефіцієнт асиметрії А вибирається із інформаційного джерела [10].

Коефіцієнт механічної трансформації накладки випромінюючої вибирається із інформаційного джерела [10].

Резонансна довжина стрижня п'єзокерамічного:

$$l = \frac{\lambda_x}{2} = \frac{0,104}{2} = 0,052 \text{ м}. \quad (2.18)$$

Довжина п'єзоелементів (п'єзоблока) щодо вузлової точки:

$$l = \frac{A \cdot l_x}{A + 1} = \frac{0,5 \cdot 0,026}{0,5 + 1} = 8,66 \cdot 10^{-3} \text{ м}. \quad (2.19)$$

Площа п'єзоелементів (п'єзоблока):

$$l = \frac{l_x}{A + 1} = \frac{0,026}{0,5 + 1} = 0,017 \text{ м}. \quad (2.20)$$

$$S_1 = \frac{S_{x1}}{k} = 0,15 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2. \quad (2.21)$$

Розрахунки площі п'єзоелемента.

$$S_n = \frac{S_{x1}}{k_m} = \frac{9 \cdot 10^{-4}}{6} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2. \quad (2.22)$$

Діаметр п'єзоелемента знаходимо за формулою:

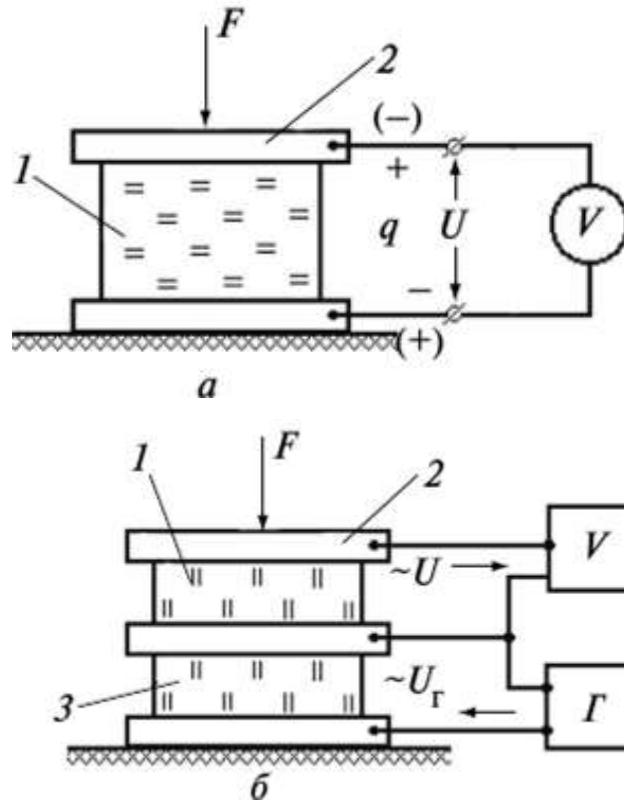
$$D_n = \frac{\lambda_1}{2} = 0,03 \text{ м} \quad (2.23)$$

Товщина стінки визначається за формулою:

$$\Delta R_k = \frac{S}{\pi D_n} = \frac{1,5 \cdot 10^{-4}}{3,14 \cdot 0,0} = 1,59 \cdot 10^{-3} \text{ м}. \quad (2.24)$$

2.2.2 Розрахунки енергетичних характеристик п'єзоелементів побутового п'єзогенератора

П'єзоефектом володіють багато кристалічних матеріали (кварц, турмалін, солі заліза та ін.) і спеціальна штучна поляризаційна п'єзокераміка (титанат барію, титанат свинцю, цирконат свинцю тощо). Рисунок 2.3 ілюструє описаний ефект.



1 - п'єзоелементи вимірювальні; 2 - пластини контактні; 3 - модуляційний п'єзоелемент; V - вольтметри; Г- генератор; F- сила; U - напруга вимірювана; U_Г- напруга на виході генератора; q - заряд електричний

Рисунок 2.3 - Схеми п'єзоелектричних датчиків з одним (а) і двома (б) п'єзоелементами

Напруга на вході із вольтметра визначається за формулою:

$$U = \frac{q}{C_0 + C_1 + C_2} \quad (2.25)$$

де q - заряд, Кл;

C₀ - ємність п'єзодатчика пристрою, Ф;

C₁ - ємність сполучних дротів, Ф;

C₂ - вхідна ємність вольтметра, Ф.

Значення заряду q, яке виникає на п'єзоелементі при його деформації силою F, Н визначається співвідношенням:

$$q = \delta \cdot F \quad (2.26)$$

де δ - коефіцієнт п'єзомодуля, Кл/Н.

П'єзомодуль δ залежить від матеріалу п'єзоелемента. До прикладу, для кварцу $\delta = 10^{-12}$ Кл/Н; для п'єзокераміки $\delta = 10^{-10}$ Кл/Н.

Висновки до розділу 2.

Було проведено основні геометричні та енергетичні параметри розрахунків п'єзоелементів побутового п'єзогенератора на основі роботи п'єзоелементів та явища прямого п'єзоефекту.

3 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ТА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОБУТОВИМ П'ЄЗОГЕНЕРАТОРОМ

3.1 Розробка конструкції п'єзогенератора

Суть розробки малопотужного побутового п'єзогенератора полягає, перш за все, у підборі необхідного обладнання, яке входить до складу генератора.

Щоб спроектувати генератор струму малої потужності, нам спочатку потрібно виготовити конструкцію, що складається з масивної опори та тензодатчика для встановлення п'єзоелектричного елемента.

Тому, коли п'єзоелемент розміщено на тензометричній балці, застосування сили до вільного кінця призведе до значно більшого руху та вібрації, ніж якби п'єзоелемент застосовувався безпосередньо.

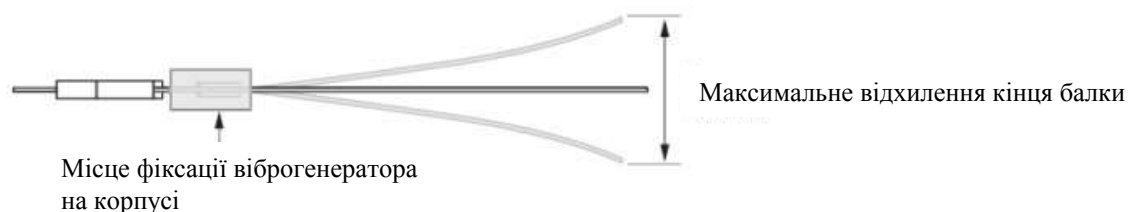


Рисунок 3.1 – Спосіб кріплення п'єзодатчика на корпусі тензобалки

Приклад граничного прогину балки пезогенераторів показаний у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Граничні прогини балки п'єзогенераторів

Найменування	Граничне відхилення кінчика пластини, дюйм	Найменування	Граничне відхилення кінчика пластини, дюйм
V20W	0,1	V21BL	0,18
V25W	0,15	V22B	0,03
V21B	0,06	V22BL	0,12

Таблиця 3.2. Електричні характеристики п'єзогенераторів

Найменування	Ємність однієї пластини при 100 Гц, нФ	Опір однієї пластини при 100 Гц, Ом	Ємність однієї пластини при 120 Гц, нФ	Опір однієї пластини при 120 Гц, Ом
V20W	69	390	69	340
V25W	130	210	130	175
V21B	26	950	26	770
V21BL	26	950	26	770
V22B	9	2400	9	2000
V22BL	9	2400	9	2000

На рисунку 3.2 представлена схема встановлення тензобалки та закріпленого на ній п'єзоелектричного датчика для генерування та фіксування переміщень в результаті дії сили на тензобалку.

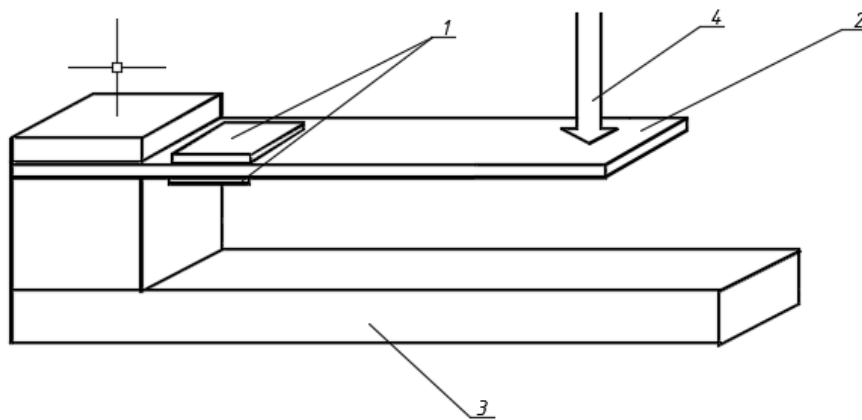


Рисунок 3.2. Схема п'єзогенератора на згинальних коливаннях:

- 1 – п'єзоелектричний елемент; 2 – металева пластина; 3 – масивна опора;
4 – прикладена зовнішня сила

Вони відрізняються як складом, так і дизайном. Залежно від застосування, цей тип PG був випробуваний з різними схемними рішеннями.

Мікроп'єзогенератор (MkPG) і макроп'єзогенератор (PG). Принцип роботи

цього МкРГ легко зрозуміти з наведеної нижче схеми (рис. 3.3).

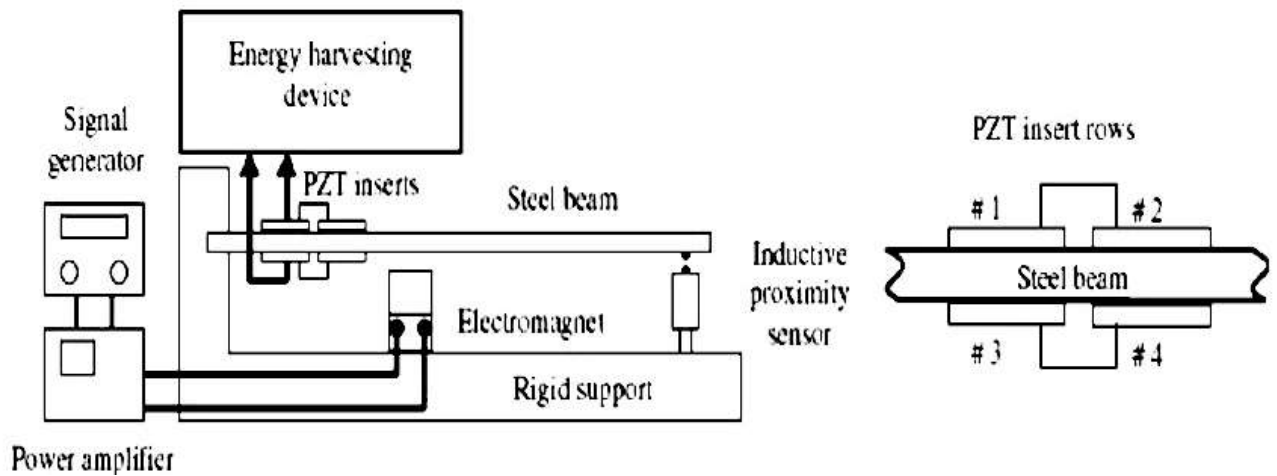


Рисунок 3.3 - Принципова схема блоку мікроп'єзогенератора (МкРГ)

Такий МкРГ, що включає в себе кантилевер товщиною 0,1 мм і іншими розмірами 5x1 мм при амплітуді коливань, на вільному кінці пластини 0,1 мм генерує вихідну потужність 1,6 мВт.

Можна створити і такий зразок, який включає в себе кілька п'єзодатчиків на одній тензометричній балці. Його принципова схема наведена на рисунку 3.4. Такий спосіб дає змогу при дії певного навантаження на датчик генерувати більшу величину напруги.

Можна створити зразок, що містить кілька п'єзодатчиків на тензодатчику. Принципова схема: П'єзоелектричні елементи. Цей метод дозволяє генерувати більшу напругу при заданому навантаженні на датчик.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата
-----	------	---------	--------	------

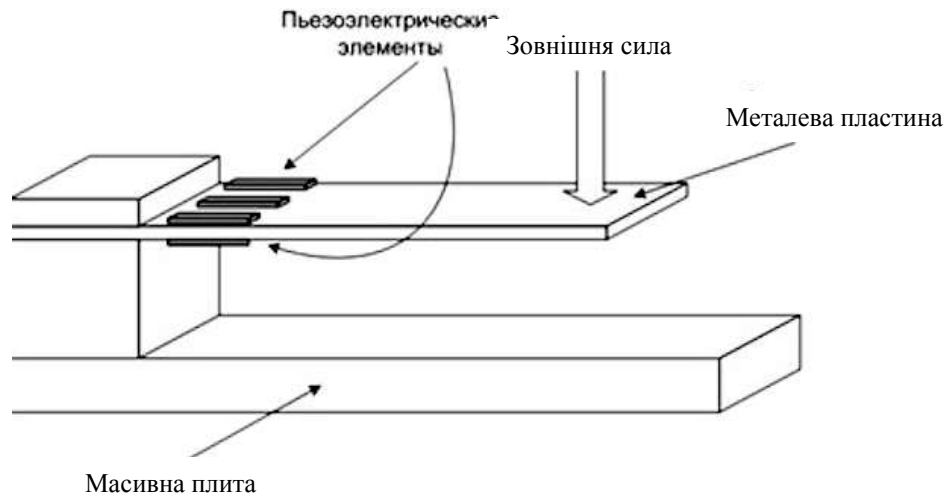


Рисунок 3.4 - Принципова схема блоку п'єзогенератора (ПГ) із декількома елементами

Вихідна потужність ПГ (акумулятора) для цього виду енергії становила 4,6 мВт при вібрації пластини з частотою 60 Гц. Після модифікацій, пов'язаних із синхронізацією (синфазним) сигналу напруги та використанням нової схеми для виконання бічного зміщення п'єзокантилевера, була отримана вихідна потужність п'єзогенератора 12,3 мВт.

3.2 Розробка системи датчика вібрації для п'єзоелектричного побутового

По-перше, необхідно вибрати датчик вібрації для отримання параметрів руху та вібрації та перетворення механічного руху та вібрації в електричну енергію.

П'єзодиск (рис. 3.5) складається з мембрани з п'єзоелектричними властивостями. Прямий п'єзоелектричний ефект - коли мембрана стискається, на її краях генерується електрика. Він використовується в нашому датчику вібрації.



Рисунок 3.5 – П'єзодиск

Структура п'єзодатчика показана на малюнку 3.6 і виглядає так.

П'єзоелектричний матеріал міститься в захисному мідному корпусі з попередньо зібраними електричними роз'ємами. Захисний корпус забезпечує електроізоляцію та захист від вологи та активних забруднень. Наявність роз'ємів у вигляді штекерів дозволяє з'єднувати пристрої без пайки. Завдяки невеликій товщині (приблизно 0,61–0,86 мм) продукт є високонадійним і міцним, що дозволяє використовувати його в пристроях зі складною геометрією, з яких можна виготовляти мультитип'єзоматриці. У датчиках, механізмах для збирання енергії та інших тактильних застосуваннях.

Захисний мідний кожух
 Високопродуктивний п'єзошар
 Попередньо прикріплені дроти
 Високопродуктивний п'єзошар
 Захисний мідний шар

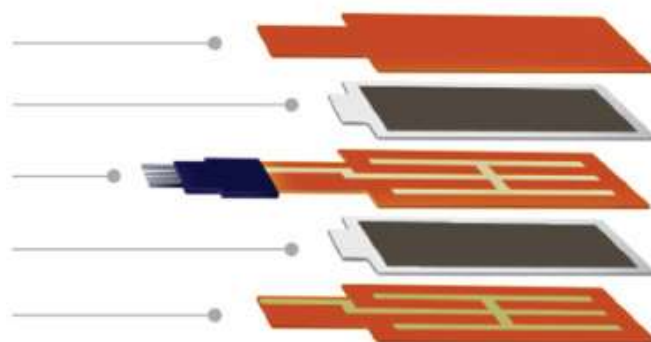


Рисунок 3.6 – Внутрішня будова п'єдатчиків

Зворотний п'єзоефект - відбувається механічне переміщення мембрани під дією електричного поля, яке викликає звукові хвилі, які ми чуємо. Викорис-

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

товується в наших генераторах.

Датчик вібрації (рис. 3.7) вже виявляє невеликі деформації п'єзодиска і видає аналоговий сигнал, пропорційний його силі. Датчик вібрації складається з п'єзоелектричного дискового чутливого елемента, який підключений до електронної схеми обробки сигналу через гвинтові клеми.

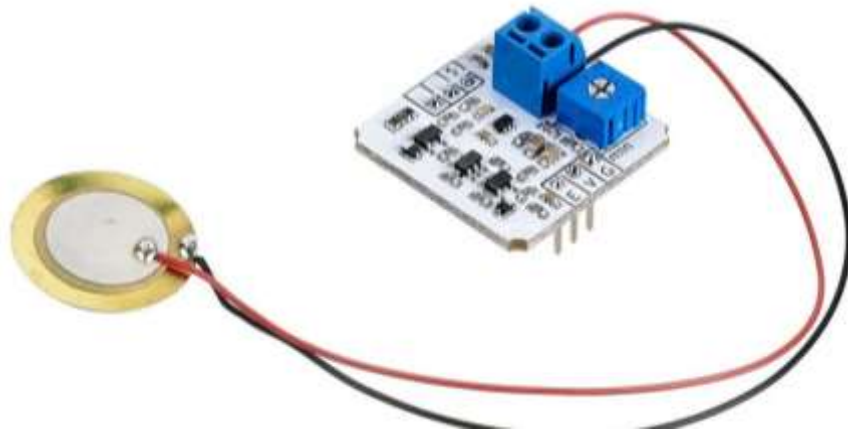


Рисунок 3.7 – Загальний вигляд датчика вібрації

3.3 Розробка структурної схеми роботи п'єзогенератора напруги на основі п'єзоефекту

Подальша розробка п'єзоелектричного побутового генератора напруги вимагає розробки структурно-функціональної схеми, яка визначає всі елементи, задіяні в системі, та їхні взаємозв'язки.

На рисунку 3.8 зображено структурну схему п'єзоелектричного генератора напруги.

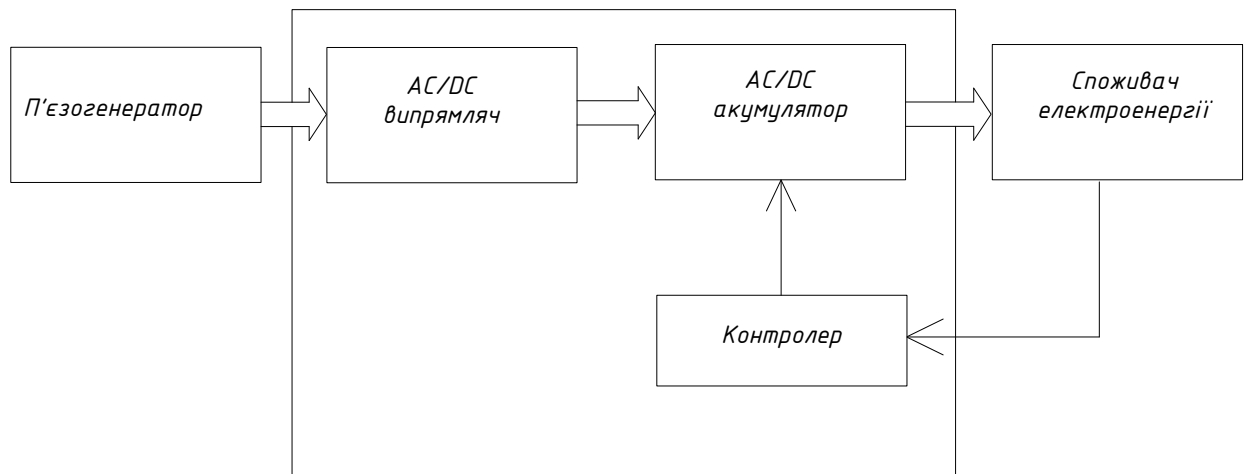


Рисунок 3.8 - Структурна схема роботи п'єзоелектричного побутового генератора напруги

Сюди входять генератори, випрямлячі напруги, акумулятори, які зберігають вироблену електроенергію на випадок, якщо її необхідно зберігати в надлишку, споживачі напруги та відповідають за розподіл і споживання виробленої електроенергії. Містить безпосередньо контролер.

Метод обробки сигналу. Аналоговий сигнал від п'єзодиска - це змінна напруга. Частина сигналів позитивна, а частина негативна. Мікроконтролер може оцифрувати лише позитивні напруги. Коли сигнал надсилається необробленим до АЦП контролера, оцифровується лише позитивна напівхвиля. Крім того, без попереднього підсилення сигнал майже не відрізнити від цифрового шуму.

Перша частина електроніки модуля підсилює нульове значення сигналу від п'єзодиска, підтягуючи його до середньої напруги живлення.

Індивідуальні вимірювання максимумів амплітуди вібрації не дають інформації про загальний рівень вібрації. Щоб отримати достовірну інформацію, вимірювання слід проводити якомога частіше, а отримані значення інтегрувати. Результатом є значне скорочення ресурсів мікроконтролера.

У другій частині електронної розводки модуля до схеми додається апаратне усереднення амплітуд сигналів. Датчик видає аналоговий сигнал в діапазоні від нуля до напруги живлення. Вихідна напруга пропорційна рівню вібрації протягом останніх кількох сотень мілісекунд. Ця функція модулів може значно спростити ваш код.

3.4 Розробка системи керування п'єзогенератором побутовим на основі п'єзо ефекту

На рисунку 3.9 та 3.10 зображено схему монтажу для забезпечення передачі сигналу від п'єзодатчика датчика до плати керування.

До складу схеми монтажу входять: МІС1 - клемник підключення п'єзодатчика; R7 – потенціометр; R1 ... R14 – резистори; X1 - клемник підключення плати керування генератором; X2 - клемник підсиленого сигналу від п'єзодатчика; RN1 – мікросхема керування; ІС1...ІС4 – мікросхеми керування; D1...D2 – діоди; С1...С5 – конденсатори.

Для регулювання чутливості ми передбачили на модулі подстроєчний потенціометр R7 (рис. 3.10). Він буде потрібен, якщо потрібно змінити чутливість сенсора або змінити поріг спрацьовування обладнання не торкаючи прошивання мікросхеми.

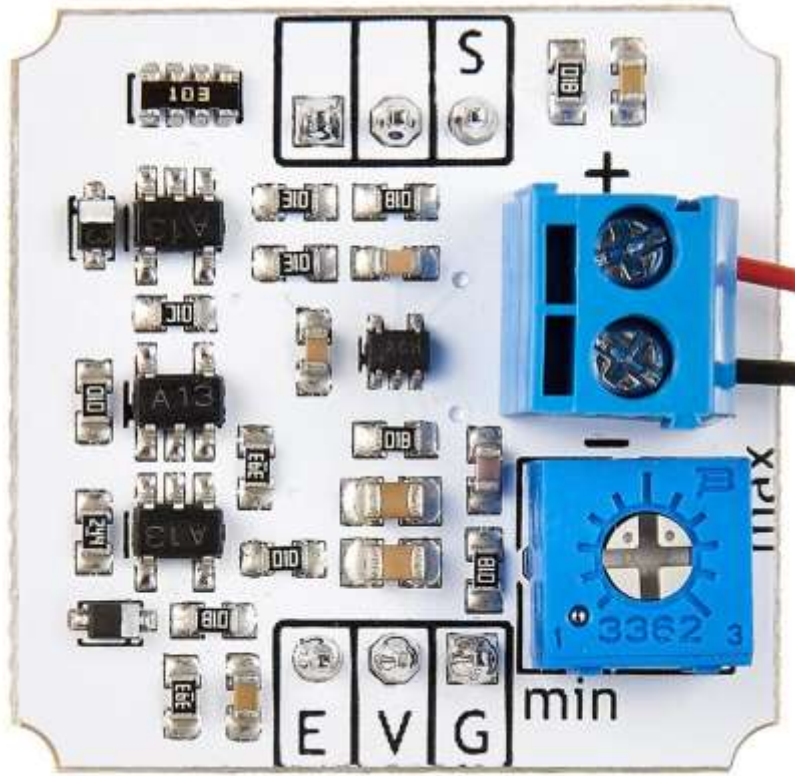


Рисунок 3.9 - Датчик вібропереміщень (вид загальний)

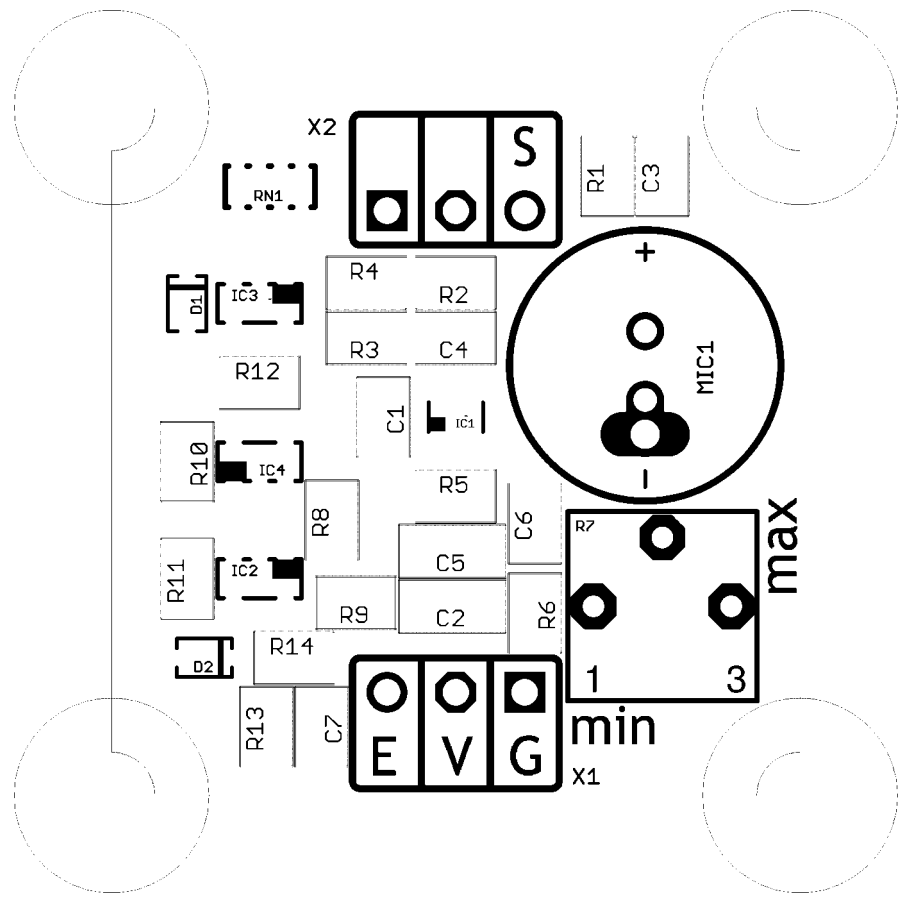


Рисунок 3.10 - Датчик вібропереміщень (схема монтажна)

Також розроблено схему електричну принципову із підбором керуючих елементів та вказуванням їх номіналів.

Таблиця 3.3 – Набір елементів схеми електричної принципової

<i>MIC1</i>	<i>Клемник підключення п'єзодатчика</i>
<i>R7</i>	<i>Потенціометр номінал 100 кОм</i>
<i>X1</i>	<i>Клемник підключення плати керування.</i>
<i>X2</i>	<i>Клемник підсиленого сигналу.</i>
<i>RN1</i>	<i>Термістор 10 кОм</i>
<i>D1..D2</i>	<i>Діоди</i>
	<i>Мікросхеми</i>
<i>IC1</i>	<i>MAX4466EXK</i>
<i>IC2</i>	<i>LMV321M5</i>
<i>IC3</i>	<i>LMV321M5</i>
<i>IC4</i>	<i>LMV321M5</i>
	<i>Резистори номіналом</i>
<i>R1</i>	<i>1 кОм</i>
<i>R2</i>	<i>1 кОм</i>
<i>R3</i>	<i>1 МОм</i>
<i>R4</i>	<i>1 кОм</i>
<i>R5</i>	<i>1 кОм</i>
<i>R6</i>	<i>1 кОм</i>
<i>R7</i>	<i>10 кОм</i>
<i>R8</i>	<i>1 кОм</i>
<i>R9</i>	<i>100 кОм</i>
<i>R10</i>	<i>100 кОм</i>
<i>R11</i>	<i>240 кОм</i>
<i>R12</i>	<i>10 кОм</i>
<i>R13</i>	<i>39 кОм</i>
<i>R14</i>	<i>1 кОм</i>
	<i>Конденсатори маркуванням</i>
<i>C1</i>	<i>100 пF</i>
<i>C2</i>	<i>10 μF</i>
<i>C3</i>	<i>4,7 μF</i>
<i>C4</i>	<i>10 пF</i>

На рисунку 3.11 показано схему електричну принципову п'езогенератора.

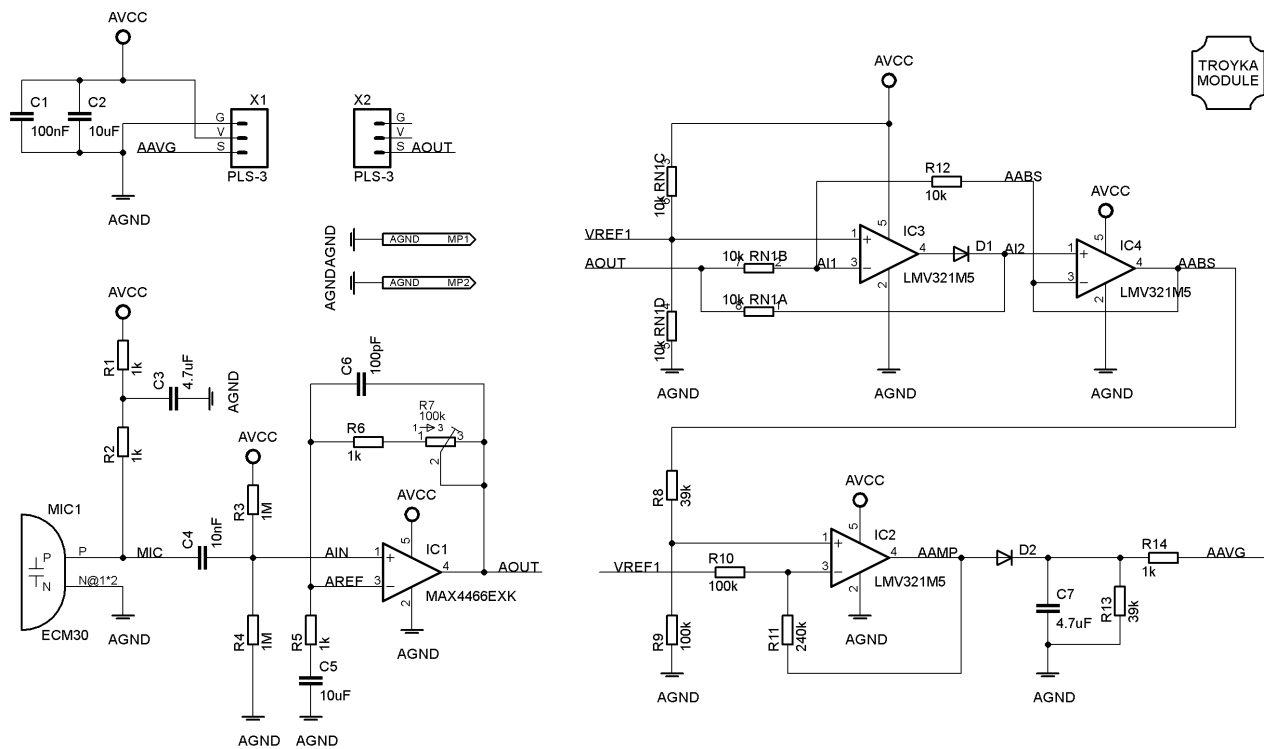


Рисунок 3.11 - Схема електрична принципова роботи п'езогенератора

Датчик вібрації в зборі приєднується до схеми керування через дві пари Тройка-контактів. (рис. 3.12).

Перша група.

Сигнальний канал (E) - оброблений сигнал датчика вібрації. Підключіть до аналогового піну мікроконтролера.

Живлення канал (V) - з'єднати з робочою напругою мікроконтролера.

Заземлення канал (G) - з'єднати з піном GND мікроконтролера.

Друга група

Сигнальний канал (S) - посилений сигнал із п'езодиска (п'езодатчика). Підключити до аналогового піну мікроконтролера.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата
-----	------	---------	--------	------

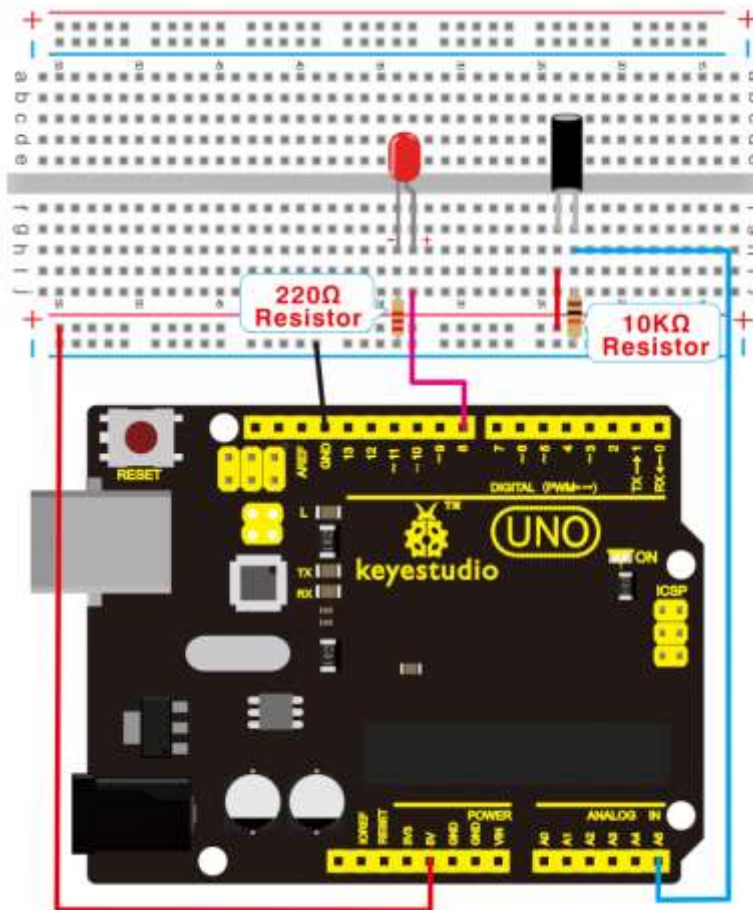


Рисунок 3.12 - Схема підключення датчиків переміщення до системи керування

Кожен п'єзогенератор складається з двох п'єзоелементів, які можна незалежно з'єднувати паралельно (подвоєння струму, що рекомендується для більшості застосувань) і послідовно (подвоєння напруги). У типовій конструкції п'єзоелемент коливається навколо своєї осі в двох протилежних напрямках, створюючи змінний струм на виході генератора. Типова схема ввімкнення віброгенератора включає випрямляч і контролер заряду акумулятора (рис. 3.13).

При установці генератора один кінець кріпиться до вібраційної основи, а інший кінець залишається вільним. Ефективність такої системи залежить від результуючої резонансної частоти маятника. Генератори вібрації виготовляються в різних формах і розмірах і підходять для різних діапазонів робочих частот. Точне налаштування параметрів вібрації здійснюється за допомогою ваг. Потужність генератора визначається частотою та амплітудою вібрації.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

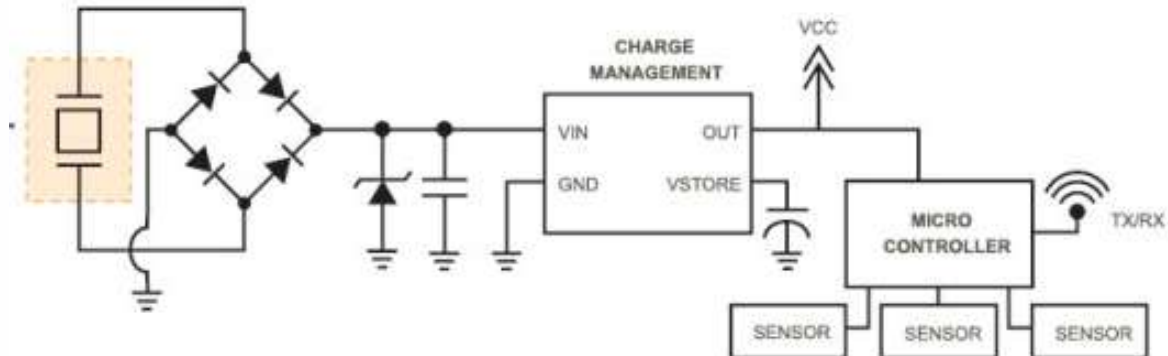


Рисунок 3.13 - Типова схема бездротового устіткування із віброгенератором

Було розроблено п'єзоелектричний генератор для генерування напруги малих величин та приведено його ілюстрацію на рисунку 3.14 та у графічній частині бакалаврської роботи.

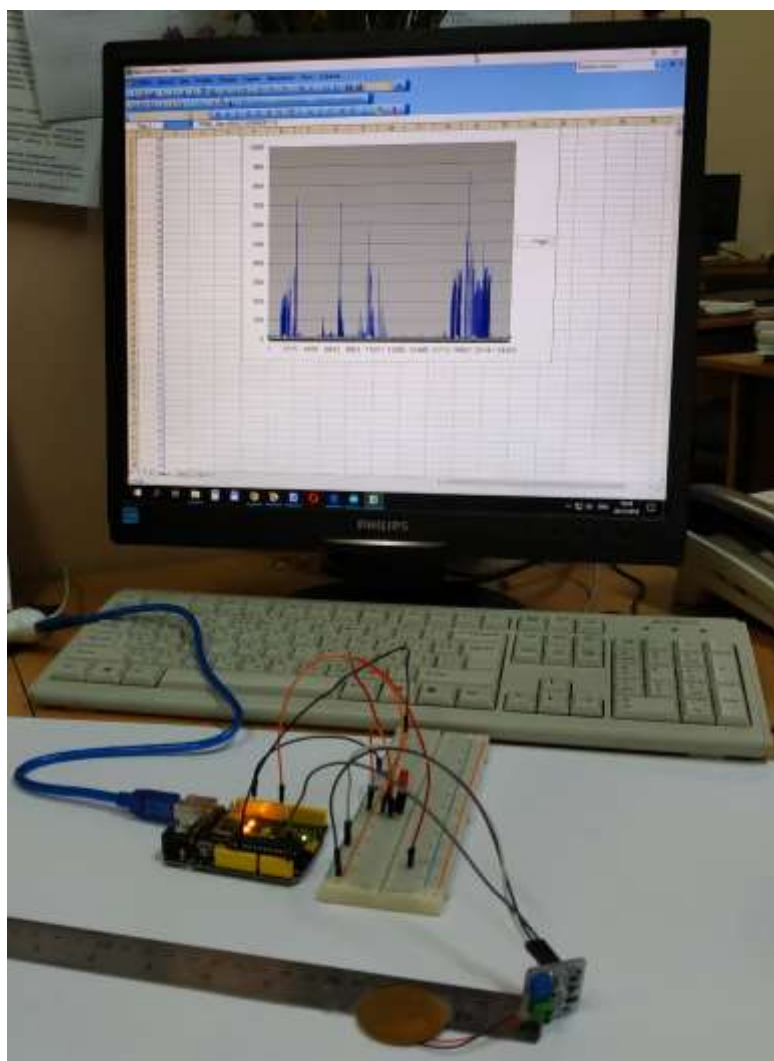


Рисунок 3.14 - П'єзоелектричний побутовий генератор

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата
-----	------	---------	--------	------

3.5 Розробка програмного забезпечення для роботи п'єзогенераторів на основі п'єзоефекту

Програма для обробки та виведення показників генерування напруги на базі Arduino.

```
const int tiltPin = 5;
const int ledPin = 8;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(ledPin, OUTPUT);
}

void loop()
{
  int qw = analogRead(tiltPin);
  if (qw > 512) // Если напряжение на пине сенсора больше чем 512 еди-
ниці (т.е. 2,5V) ...
  {
    digitalWrite(ledPin, HIGH); // включити світодиод
  }
  else // Иначе ...
  {
    digitalWrite(ledPin, LOW ); // выключити світодиод
  }
  Serial.println(qw);
}
```

За допомогою програми і за результатами зняття показників вібрації з тензобалки за допомогою датчиків у програмі Excel було оброблено результати вібрацій та побудований потрібний графік .

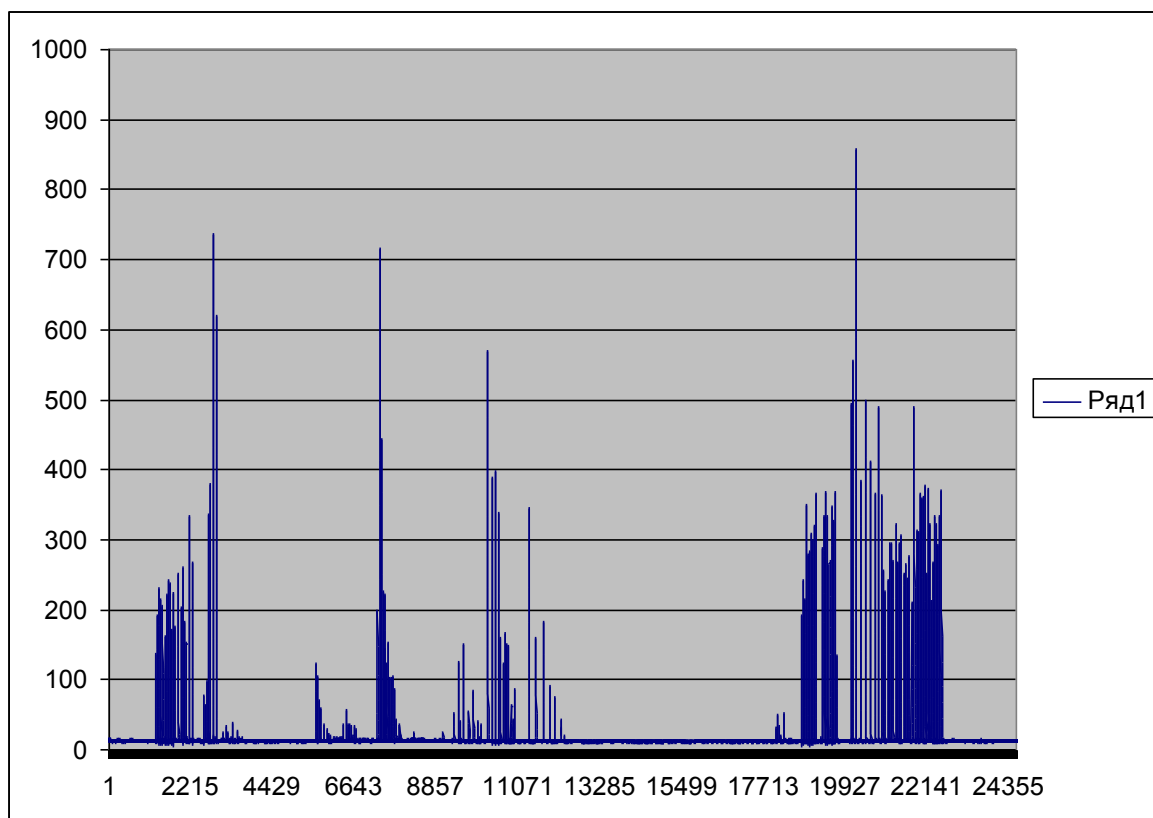


Рисунок 3.15 - Графік генерування напруги у системі На Arduino

Максимальне значення генерованої напруги, яке було отримане в результаті вібропереміщення балки з тензодатчиками було 10 В.

Висновки до розділу 3.

Розроблено конструкцію, схему підключення датчика вібрації для п'єзоелектричного побутового. Розроблено структурну схему та схему роботи генератора напруги на основі п'єзоефекту.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата
-----	------	---------	--------	------

Розроблено програмне забезпечення для роботи побутових генераторів напруги на основі п'єзоефекту.

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		60

ВИСНОВКИ

В даній бакалаврській роботі було здійснено огляд літературних джерел згідно завдання роботи.

У результаті вивчення та аналізу технології виробництва електроенергії та обладнання для виробництва електроенергії з використанням п'єзоефекту ми дійшли висновку, що цей ефект можна використовувати при проектуванні та розробці джерел електроенергії з низьким енергоспоживанням, які можна використовувати в повсякденному житті.

Для подальшого розвитку п'єзогенераторів на основі функціональності п'єзоелементів і явища прямого п'єзоефекту були розраховані важливі геометричні та енергетичні параметри п'єзоелементів.

Розроблено конструкцію малопотужного п'єзогенератора та систему датчиків вібрації. Складено структурну схему та схему роботи генератора напруги на основі п'єзоефекту.

Розроблено програмне забезпечення для роботи генератора напруги на основі п'єзоефекту

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						61
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Waanders J. W. Piezoelectric Ceramics, Properties and Applications // Philips Components Marketing Communications. Eindhoven. April, 1991.
2. Жуків С. Н. П'єзоелектрична кераміка: принципи й застосування. Київ: «Інформ». 2003.
3. Сафронов А. Я., Климашин В. М., Никифоров В. Г., Парфенов Б. Г., Ярошевич В. А. Пьезо-Керамічні пакети й многоблочные актюаторы // Компоненти й технології. 2002. № 6.
4. Никифоров В., Климашин В., Сафронов А. Биморфные п'єзоелектричні елементи: актюаторы й датчики // Компонента й технології. 2003. № 4.
5. Невлюдов, І. Ш.; Energy Harvesting: Огляд п'єзоелектричних перетворювачів / І.Ш. Невлюдов, В. А. Палагін,; Є. А. Разумов-Фризюк // НТЖ «Технологія приладобудування», № 2 , 2015, – С: 43-46.
6. Козаків В., Климашин В., Никифоров В., Сафронов А., Чернов В. Багатшарові п'єзоелектричні пьезоактюаторы та особливості їх застосування // Компонента і технології. 2007. № 6.
7. Козаків В. К., Никифоров В. Г., Сафронов А. Я, Чернов В. А. Актюаторы для оптичних затворів і методи виміру їх характеристик // Нано- і мікросистемна техніка. 2007. № 10.
8. Никифоров В. Г., Чернов В. А. Граничні параметри твердотельных багатшарових п'єзоелектричних батарей // Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції «Інноваційні процеси п'єзоелектричного приладобудування й нанотехнологій». Анапа. 22-6 вересня 2008.
10. Taylor C. W., Burns J. R., Kammann S. M., Powers W. B., Welsh T. R. The Energy Harvesting Eel: a small subsurface ocean/river power generator // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2001. V. 26. № 4.
11. Акопян В., Ларинов І., Істомін І. П'єзогенераторы — новий перспек-

тивний напрямок малої енергетики // Наука й техніка. 2011. № 12.

12. Ottemann G. K., Hofmann H. F., Lesieutre G. A. Optimized piezoelectric energy harvesting circuit using step-down converter in discontinuous conduction mode IEEE Trans // Power Electron. 2003. № 18.

13. Roundy S., Wright P. K., Rabaey J. A Study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes // Computer Communications. 2003. № 26.

14. Roundy S., Wright P. K. A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics // Smart materials and structures. 2004. № 15.

15. Vibration Energy Scavenging. Project. <http://www.vibes.ecs.soton.ac.uk>

16. German J. Vibration-powered sensor harvests structural shakes, stores data for later readout. http://www.sandia.gov/Labnews/LN04-19-02/key04-19-02_stores.html

18. Kymissis J., Kendall C., Paradiso J. J., Gershenfeld N. Parasitic power harvesting in shoes // Proc. 2nd IEEE Int. Conf. Wearable Computing. Los Alamitos. August, 1998.

19. Shenck N. S., Paradiso J. A. Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectric // IEEE Micro. May-June. 2001. V. 21. № 3.

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						63
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						64
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

