

УДК 629.341

ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ НА ОСНОВІ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ЕФЕКТУ ДЛЯ АВТОМОБІЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Щ.В. Аргун, к.т.н., доцент, ХНАДУ

Анотація. Проведено аналіз розробок та досліджень щодо використання п'єзоелектричних матеріалів в сучасній автотранспортній техніці. Показано, що п'єзоелектричні матеріали поділяються на п'єзоелектричні монокристали та п'єзоелектричну кераміку. Проведено аналіз п'єзоелектричної кераміки та основних груп виробів, що з неї виробляються. Досліджено використання п'єзоелектричної кераміки для автомобільної техніки.

Ключові слова: енергозберігаючі технології, п'єзоелектричний ефект, п'єзоелектрична кераміка, п'єзогенератори, п'єзоелементи, актюатори, п'єзотрансформатор.

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ НА ОСНОВЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ДЛЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Щ.В. Аргун, к.т.н., доцент, ХНАДУ

Аннотация. Проведен анализ разработок и исследований по использованию пьезоэлектрических материалов в современной автотранспортной технике. Показано, что пьезоэлектрические материалы делятся на пьезоэлектрические монокристаллы и пьезоэлектрическую керамику. Проведен анализ пьезоэлектрической керамики и изготавливаемых из нее основных групп изделий. Исследовано использование пьезоэлектрической керамики для автомобильной техники.

Ключевые слова: энергосберегающие технологии, пьезоэлектрический эффект, пьезоэлектрическая керамика, пьезогенераторы, пьезоэлементы, актюаторы, пьезотрансформатор.

ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES BASED ON THE PIEZOELECTRIC EFFECT FOR THE AUTOMOTIVE EQUIPMENT

Sch. Argun, Ph.D., Associate Professor KhNAHU

Annotation. The analysis of the developments and researches on the use of piezoelectric materials in the modern motor transport equipment is carried out. It is shown that the piezoelectric materials are divided into the piezoelectric single crystals and the piezoelectric ceramics. The analysis of the piezoelectric ceramics and the main groups of the products made from it is carried out. The use of the piezoelectric ceramics for the automotive engineering is investigated.

Keywords: energy-saving technologies, piezoelectric effect, piezoelectric ceramics, piezo-generators, piezo-elements, actuators, piezo-transformer.

Вступ

Останнім часом все актуальнішою стає питання енергонезалежності, а отже виникає неабияка потреба в альтернативних джерелах живлення. В цьому напрямку проводиться досить велика кількість різного роду дослі-

джень та випробувань. Доволі цікаві результати дали дослідження, щодо використання п'єзоелектричного ефекту для отримання електричної енергії [1]. Основна ідея використання п'єзоелементів (ПЕ) та п'єзогенераторів (ПГ) полягає в перетворенні кінетичної енергії від натискання в ім-

пульс електричної енергії [1-5].

Поки що зробити повноцінне альтернативне та децентралізоване джерело живлення, використовуючи ПЕ та ПГ, досить складно, але додаткове малопотужне джерело живлення на їх основі створити цілком можливо. Про це свідчать результати останніх сучасних досліджень, як в Україні, так і за її кордонами. Особливо приваблива ця ідея для тих місць, де є значна щільність або людського потоку, або транспортного.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є аналіз розробок та досліджень технічних рішень щодо використання п'єзоелектричних матеріалів в сучасній автотранспортній техніці.



Рис.1. – Демонстрація п'єзоелектричного ефекту

Пізніше Кюрі відкрив інверсійний п'єзоелектричний ефект – деформування матеріалів, вміщених в електричне поле. Ці явища ще називають прямим і зворотним п'єзоелектричним ефектом [6-9].

П'єзоелектричний ефект властивий деяким природним кристалам, таким як кварц і турмалін, які протягом багатьох років використовувалися як електромеханічні перетворювачі. Кристалічна решітка кристалів, що володіють п'єзоелектричним ефектом, не має центру симетрії. Вплив (стискання чи розтягання), прикладений до такого кристала, призводить до поляризації після поділу позитивних і негативних зарядів, які є в кожній окремій елементарній частці. Ефект практично лінійний, тобто ступінь поляризації прямо пропорційна величині прикладеного зусилля, але напрямок поляризації залежний, тому що зусилля стискання або розтягування генерують електричні поля, а отже, і напругу протилежної полярності. Відповідно, при розміщенні кристалу в електричному полі пружна деформація викликає збільшення чи зменшення його довжини відповідно до ве-

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- розкрити явище п'єзоелектричного ефекту;
- провести стислий опис п'єзоелектричних матеріалів;
- провести аналіз п'єзоелектричної кераміки та основних груп виробів, що з неї виробляються;
- дослідити використання п'єзоелектричної кераміки для автомобільної техніки.

Явище п'єзоелектричного ефекту

П'єзоелектричний ефект був відкритий в 1880 р. Джексом і П'єром Кюрі. Вони помітили, що в деяких кристалах при механічному впливі на них з'являється електрична поляризація, причому ступінь її пропорційна величині тиску, рис. 1.

личини і напрямку полярності поля [9].

П'єзоелектричні матеріали

П'єзоелектричні матеріали умовно можна розбити на дві групи [6, 10].

Перша група – п'єзоелектричні монокристали. Природні п'єзоелектричні матеріали мають досить високу вартість. У зв'язку з цим потреби електроніки, що розвивається на даний час, задовольняються синтетичними п'єзоелектричними монокристалами, які вирощуються в спеціальних установках. П'єзоелектричні властивості таких кристалів з досить високою повторюваністю можна задавати шляхом композиції компонентів, що входять до їх складу. Вирощені кристали, певним чином ріжуться на пластини. Деякі (сегнетоелектрики) поляризуються і з них, шляхом шліфування і нанесення електродів, виготовляються п'єзоелектричні елементи, рис. 2.

Друга група – п'єзоелектрична кераміка (п'єзокераміка). За фізичними властивостями це

полікристалічний сегнетоелектрик, який представляє собою хімічну сполуку або твердий розчин (порошок) зерен (кристалітів), рис. 2.



Рис. 2 – Монокристал (зліва) та полікристал (праворуч)

За хімічним складом це складний оксид, що включає іони двовалентного свинцю або барію, а також іони чотирьох валентного титану або цирконію. Шляхом зміни основного співвідношення вихідних матеріалів і введення добавок синтезують різні склади п'єзо-кераміки, які володіють певними електрофізичними і п'єзоелектричними характеристиками. Найбільшого поширення набула група п'єзокерамічних матеріалів типу ЦТС (цирконата-титанату свинцю). Разом з тим використовується кераміка на основі титанату барію (ТБ) і титанату свинцю (ТС).

В останні роки розробляються нові п'єзокерамічні матеріали з властивостями, що дозволяють в деяких випадках використовувати їх замість більш дорогих п'єзоелектричних кристалів. Зокрема, розроблена і виробляється група матеріалів на основі ніобата свинцю, яка вже знайшла практичне застосування завдяки можливості її використання в діапазоні частот до 30 МГц і більше.

Значні дослідження проводяться по створенню п'єзокерамічних композитних матеріалів, а також багатошарової кераміки. Зарубіжні виробники в залежності від п'єзоелектричних властивостей ділять її на сегнетожорстку і сегнетом'яку. У вітчизняній практиці існує додатковий розподіл на кераміку середньої сегнетожорсткості, а також виділяються високостабільні, високотемпературні матеріали.

Якість п'єзокераміки характеризується основними параметрами:

- K_{33}^T ($\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$) – відносна діелектрична проникність;
- $\text{tg } \delta$ – тангенс кута діелектричних втрат при частоті 1 кГц в слабких полях;
- T_c (T_k) – температура точки Кюрі;

- $K_p, K_{33}, K_{31}, K_{15}$ – коефіцієнти електро механічного зв'язку;
- d_{33}, d_{31}, d_{15} – п'єзоелектричні модулі;
- g_{33}, g_{31}, g_{15} – електричні коефіцієнти по напрузі;
- Y_{11}^E, Y_{33}^E – модулі Юнга;
- N_L, N_T, N_R – частотні постійні;
- S_{11}^E, S_{33}^E – параметр еластичності;
- ρ – густина;
- Q_m – механічна добротність.

П'єзоелектрична кераміка

На відміну від п'єзоелектричних кристалів, п'єзокерамічні елементи виготовляються методом напівсухого пресування, шлікерного лиття, гарячого лиття під тиском, екструзії або ізостатичного пресування з подальшим випалюванням на повітрі при температурі 1000...1400 °C. З метою зменшення пористості випал може проводитися в середовищі кисню, або елемент виготовляється за допомогою методу гарячого лиття. За спеціальною технологією на поверхню заготовок наносяться електроди [6]. Після цього кераміку роблять п'єзоелектричною з будь-яким обраним напрямом поляризації шляхом приміщення її в сильному електричному полі при температурі нижче так званої точки Кюрі. Поляризація зазвичай є остаточним процесом при виготовленні п'єзокерамічних елементів, хоча за ним йде термостабілізація і контроль параметрів.

П'єзоелектрична кераміка являє собою твердий, хімічно інертний матеріал, абсолютно нечутливий до вологості і інших атмосферних впливів. За механічними якостями вона подібна керамічним ізоляторам.

Залежно від призначення ПЕ можуть мати найрізноманітнішу конфігурацію – від плоскої до об'ємної (сфери, півсфери і т. п.), рис.3.



Рис. 3 – П'єзоелементи

Для подальшого розуміння доцільно ввести наступне загальноприйняте в зарубіжній

практиці умовний розподіл типових ПЕ залежно від їх конфігурації: пластина (plate), диск (disc), кільце (ring), брусок (bar), стрижень (rod), циліндр (cylinder). Існують також гнучкі п'єзокерамічні елементи: пластинчасті (plate bender) і дискові (disc bender), які, в свою чергу, поділяються на юніморфи (unimorph), тобто одношарові, і біморфи (bimorph) – двошарові.

Такий умовний поділ є загальноприйнятим і дозволяє спростити в процесі замовлення опис необхідного елемента.

П'єзоелектричні елементи ідеальні при використанні у якості електромеханічних перетворювачів. Вони досить широко використовуються для виготовлення п'єзокерамічних компонентів, вузлів і пристроїв. Деякі п'єзокерамічні елементи вже спочатку можуть виконувати функції компонента або вузла (наприклад, пластинчасті біморфи) і не потребують додаткового доопрацювання. Всі вироби, виготовлені на базі п'єзокераміки, підрозділяють на наступні основні групи:

- генератори;
- датчики (сенсори);
- актюатори (п'єзоприводи);
- перетворювачі;
- комбіновані системи.

П'єзокерамічні генератори. Вони перетворюють механічний вплив в електричний потенціал, використовуючи прямий п'єзоефект, рис. 4. Прикладами можуть служити іскрові запальовачі натискного і ударного типів, що застосовуються в різного роду запальниках і підпалюють системах, а також твердотільні батареї на основі багатошарової п'єзокераміки, що застосовуються в сучасних електронних схемах.



Рис. 4 – Приклад п'єзокерамічного генератора

П'єзокерамічні датчики. Вони перетворюють механічну силу чи рух в пропорційний електричний сигнал, тобто також засновані на прямому п'єзоефекті, рис. 5.

В умовах активного впровадження комп'ютерної техніки датчики є незамінними при-

строями, що дозволяють погоджувати механічні системи з електронними системами контролю і управління.



Рис. 5 – П'єзокерамічні датчики

Виділяються два основних типи п'єзокерамічних датчиків:

- осьові (механічна сила діє уздовж осі поляризації, мода 33);
- гнучкі (сила діє перпендикулярно осі поляризації (мода 31)).

В осьових датчиках, таких як ПЕ використовують диски, кільця, циліндри і пластини. Для прикладу можна привести датчики прискорення (акселерометри), датчики тиску, датчики детонації, датчики руйнування тощо.

Гнучкі датчики будуються на основі послідовних (шари кераміки мають протилежну спрямованість поляризації) і паралельних (спрямованість поляризації шарів збігається) п'єзокерамічних біморф. Найбільш поширені датчики сили і прискорення.

П'єзокерамічні актюатори. Актюатори будуються на принципі зворотного п'єзоефекту і тому призначені для перетворення електричних величин (напруги або заряду) в механічне переміщення (зрушення) робочого тіла, рис. 6.



Рис. 6 – Актюатори

Актюатори поділяються на три основні групи: осьові (мода d_{33}), поперечні (мода d_{31}) і гнучкі (мода d_{31}). Осьові і поперечні актюатори мають ще загальну назву – багатошарові пакетні, так як набираються з декількох ПЕ (дисків, стрижнів, пластин або брусків) в пакет. Вони можуть розвивати значне зусилля до 10 кН при керуючій напрузі 1 кВ, але при дуже малих відхиленнях робочої частини. Такі актюатори також називають потужними.

Гнучкі актюатори (біморфи) розвивають незначну силу при малих відхиленнях робочої частини, рис. 7. Однак американській компанії APC International Inc вдалося створити і вийти на ринок з новим типом пластинчастого біморфа – «стрічковим актюатором». Стрічковий актюатор може забезпечувати силу 0,95 Н і величину відхилення 1,2 мм або відхилення до 3 мм і силу 0,6 Н.

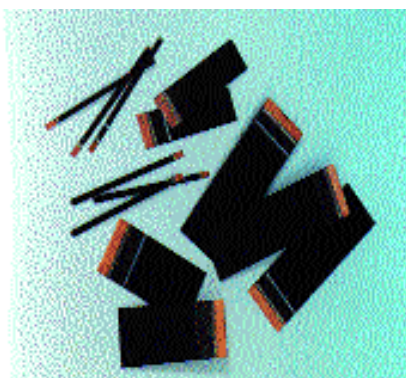


Рис. 7 – Гнучкі актюатори

Гнучкі актюатори відносяться до групи малопотужних. До цієї ж групи будуть відноситися і перспективні осьові актюатори, що представляють собою моноблок, виготовлений за технологією багатошарової п'єзокераміки.

Пакетні актюатори можуть вироблятися підприємствами, не пов'язаними з виробництвом п'єзокераміки. Гнучкі ж і осьові актюатори з багатошарової кераміки самі по собі є п'єзокерамічними елементами. Їх можуть робити тільки підприємства, які володіють технологіями і обладнанням для виробництва п'єзокерамічних елементів.

П'єзокерамічні перетворювачі. Вони призначені для перетворення електричної енергії в механічну, рис. 8. Так само як і актюатори,

ґрунтуються на принципі зворотного п'єзоефекту.

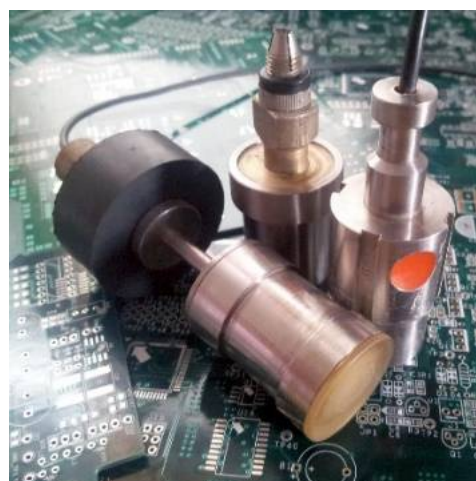


Рис. 8 – П'єзокерамічні перетворювачі

Перетворювачі в залежності від діапазону частот підрозділяються на 3 види:

- звукові (нижче 20 кГц) – зумери, телефонні мікрофони, високочастотні гучномовці, сирени тощо;
- ультразвукові – високоінтенсивні випромінювачі для зварювання та різання, мийки і очищення матеріалів, датчики рівня рідини, дисперсійні розпилювачі, генератори туману, інгалятори, зволожувачі повітря. Значною групою виділяються так звані ультразвукові вимірники відстані в повітряному середовищі (Air Transducers), що є п'єзокерамічними компонентами. Вони використовуються в якості вимірників відстані для автотракторної техніки, сенсорів наявності і руху в охоронних системах, в рівнемірах, для дистанційного контролю та управління, в пристроях відлякування птахів, звірів і сільськогосподарських шкідників тощо. Виробляються пристрої трьох типів: передавальні, прийомні та приймально-передавальні;
- високочастотні ультразвукові – устаткування для випробування матеріалів і неруйнівного контролю, діагностика в медицині і промисловості, лінії затримки тощо.

Комбіновані п'єзокерамічні системи. Такі системи перетворюють електричні величини в електричні, при послідовному використанні зворотного і прямого п'єзоефектів. Як приклади таких систем можна привести ехолоти, вимірники потоків, п'єзотрансформатор (рис. 9), «шукач ключа» [11].

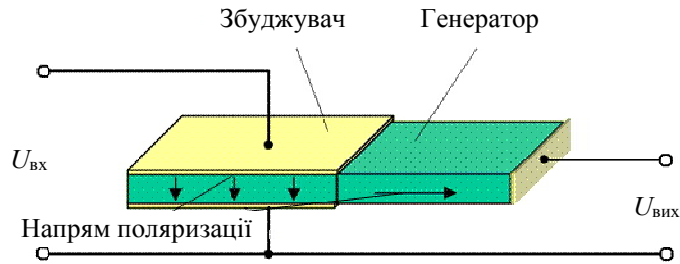


Рис. 9 – Схематичне зображення конструкції п'єзотрансформатора

П'єзоелектрична кераміка для автомобільної техніки

Яскравим прикладом комплексного використання п'єзокерамічних елементів, вузлів і деталей на їх основі можуть послужити спільні розробки американської компанії APC International Ltd з виробниками комплектуючих для автомобільної промисловості.

Сучасні, технічно складні автомобілі постійно вимагають впровадження додаткової електроніки для підвищення надійності, безпеки і комфорту. Наприклад, на основі ПЕ легко зробити прилад для перевірки свічок запалювання, рис.10 [12].



Рис.10 – Прилад для перевірки свічок запалювання

На даний час американські виробники активно використовують пристрої і вузли на базі п'єзоелектричної кераміки [13]. Прикладами таких пристроїв можуть служити:

- актюатори-клапани впрыскування палива;
- актюатори-клапани для газорозподільної системи двигуна;
- датчики повороту – для визначення кута положення дросельної заслінки;
- датчики детонації;
- датчики рівня заправних рідин;
- датчики тиску – для вимірювання тиску в паливному баку з метою визначення витoku палива;
- п'єзоприводи дзеркал;
- п'єзоприводи регулювання сидінь;

- передні ультразвукові дистанційні датчики (датчики запобігання зіткнень);
- бічні дистанційні датчики;
- задні (паркувальні) ультразвукові дистанційні датчики;
- датчики системи сигналізації та зумери оповіщення;
- швидкісні сенсори в передній панелі для подушок безпеки;
- бічні ударні сенсори подушок безпеки;
- аварійні датчики-сенсори подушок безпеки;
- актюатори системи антиблокування гальм;
- п'єзоприводи системи підвіски;
- датчики кутової швидкості і лінійні акселерометри малих перевантажень, орієнтовані по трьох осях автомобіля, призначені для автоматизованого надання інформації про маршрут;
- п'єзоприводи регулювання фар;
- датчики і актюатори положення фар – для забезпечення динамічного регулювання потоку світла передніх фар в залежності від профілю дороги і зміни величини корисного навантаження автомобіля;
- п'єзоакустичні системи адаптивного регулювання швидкості автомобіля.

Інноваційна розробка актюаторів і датчиків забезпечує вирішення багатьох проблем автомобілебудування і покращує експлуатаційні якості автомобіля, що відповідають жорстким експлуатаційним вимогам.

Ефективність дії систем сигналізації, зумерів, що оповіщають, біморфних і уніморфних актюаторів, п'єзоприводів дзеркал і систем регулювання положення сидінь, підйомників скла, управління клапанами двигуна і ударних датчиків подушок безпеки покращилися завдяки розробці і використанню у виробництві нових п'єзокерамічних матеріалів зі свєрхмалыми частинками.

Розроблено також високотемпературну і високостабільну п'єзоелектричну кераміку, призначену для застосування в паливних системах двигунів сучасних автомобілів. Дуже важливим є те, що дана кераміка має значну стійкість до високих температур і протиударна. Однакова частотна реакція робить датчики з даної кераміки придатними для будь-якого типу автомобільного двигуна.

Таким чином, п'єзокераміка завдяки своїм унікальним властивостям знаходить все більше застосування в різних областях техніки і технології. Іноземні виробники п'єзокераміки, елементів і компонентів на її базі, намагаючись більш повно задовольнити сучасні вимоги ринку, проводять дослідження і конструкторські роботи з метою поліпшення параметрів кераміки, розробляють її нові типи, на що виділяються значні фінансові кошти. З метою здешевлення продукції розробляються нові технології, більш енергозберігаючи що дозволяють автоматизувати процеси виробництва.

Висновки

Проведено аналіз розробок та досліджень технічних рішень щодо використання п'єзоелектричних матеріалів в сучасній автотранспортній техніці.

Розкрити явище п'єзоелектричного ефекту.

Проведено стислий опис п'єзоелектричних матеріалів з зазначенням їх основних груп – п'єзоелектричні монокристали та п'єзоелектрична кераміка. Представлені основні параметри, що характеризують якість п'єзокераміки.

Проведено аналіз п'єзоелектричної кераміки та основних груп виробів, що з неї виробляються.

Досліджено використання п'єзоелектричної кераміки для автомобільної техніки.

Література

1. П'єзогенераторы - новое перспективное направление малой энергетики // Матеріали сайту – 2017. – Режим доступу: http://metrology-spb.ru/Biblioteka/Pezogeneratorovy_novoe_perspektivnoe_napravlenie_maloy_jenergetiki.
2. Батлук В.А. Основы экологии и охраны окружающей среды. Учебное пособие /

В.А. Батлук. – Львів: Афіша, 2001. – 333 с.

3. Бедрій Я.І. Основы екології та охорона навколишнього середовища: Навчальний посібник / Я.І.Бедрій.– К.: ЦУЛ, 2002. – 248 с.
4. Володин В.В. Энергия, век двадцать первый. Научно-художественная литература / В.В. Володин, П.М. Хазановский – М.: Дет. лит., 1989. – 142 с.
5. Альтернативные источники электроэнергии [Электронный ресурс] – 2013. – Режим доступу: <http://elektrivdome.ru/alternativnye-istochniki-elektroenergii>
7. Жуков С. Н. П'єзоелектрическая керамика: принципы и применение. Минск: «ФУ-Аинформ». 2003.
8. О п'єзокерамике и перспективах ее применения // Матеріали сайту – 2017. – Режим доступу: <http://kazus.ru/articles/368.html>.
9. Кучерук І.М. Загальний курс фізики: У трьох томах. Т.2. Електрика і магнетизм / І.М. Кучерук, І.Т. Горбачук, П.П. Луцук. – 2-ге вид., випр. – К. : Техніка, 2006. – 452 с.
10. Basics of Piezo-ceramic Technology // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: <http://www.ceramtec.ru/ceramic-materials/piezo-ceramics/basics/>.
11. Piezoelectric ceramics 1971: B. Jaffe, W. R. Cook Jr and H. Jaffe. London and New York: Academic Press. 317 pp.
12. П'єзотрансформаторы // Матеріали сайту – 2017. – Режим доступу: <http://allrefs.net/c1/48x12/p29/>.
13. Как проверить свечу зажигания используя зажигалку // Матеріали сайту – 2017. – Режим доступу: <https://sanekua.ru/kak-proverit-svechu-zazhiganiya-ispolzuya-zazhigalku/>.
14. Leading the Piezo industry // Матеріали сайту – 2017. – Режим доступу: <https://www.americanpiezo.com>.

Рецензент: О.Б. Богаєвський, професор, д.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 7 червня 2017 р.