

Politechnika Warszawska

W Y D Z I A Ł E L E K T R Y C Z N Y



Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej

Praca dyplomowa inżynierska

na kierunku Elektrotechnika

w specjalności Elektronika Przemysłowa

Zastosowanie materiałów piezoelektrycznych w procesie przetwarzania
energii mechanicznej na elektryczną

Patryk Kuryj

numer albumu 318930

promotor

dr inż. Paweł Fabijański

WARSZAWA 2025

Zastosowanie materiałów piezoelektrycznych w procesie przetwarzania energii mechanicznej na elektryczną

Streszczenie

Celem tej pracy jest sprawdzenie możliwości generowania energii z ruchu pieszych za pomocą materiałów piezoelektrycznych, przetwarzanie energii kinetycznej generowanej przez pieszych na energię elektryczną oraz magazynowanie wytworzonej w ten sposób energii. Szczegółowo cel pracy przedstawiono we wstępie. Rozdział drugi poświęcono analizie literatury krajowej i zagranicznej dotyczącej zjawiska piezoelektrycznego prostego i odwrotnego. W rozdziale trzecim dokonano przeglądu obecnie stosowanych w technice materiałów piezoelektrycznych. W rozdziale czwartym opisano zastosowania przetworników piezoelektrycznych w technice. W rozdziale piątym wykonano analizę ilościową i jakościową możliwości zastosowania przetworników piezoelektrycznych do generowania energii elektrycznej. Opracowano model przetwornika oraz zbadano model przekształtnika energii. Wynik analizy i symulacji podsumowano we wnioskach końcowych. Na końcu pracy umieszczono bibliografię spis rysunków i spis tabel.

Słowa kluczowe: Efekt piezoelektryczny prosty i odwrotny, przetwornik piezoelektryczny, przekształcanie energii, magazyn energii elektrycznej

Application of piezoelectric materials in the process of converting mechanical energy into electricity

Abstract

The purpose of this work is to test the feasibility of generating energy from pedestrian movement using piezoelectric materials, converting the kinetic energy generated by pedestrians into electrical energy and storing the energy thus generated. The purpose of the work is presented in detail in the introduction. Chapter two analyzes domestic and foreign literature on simple and inverse piezoelectric phenomena. Chapter three reviews the piezoelectric materials currently used in technology. Chapter four describes the applications of piezoelectric transducers in technology. In chapter five, a quantitative and qualitative analysis of the feasibility of using piezoelectric transducers to generate electricity is performed. A transducer model was developed and an energy converter model was investigated. The results of the analysis and simulations are summarised in the conclusions. A bibliography of figures and a list of tables are included at the end of the paper.

Keywords: Simple and inverse piezoelectric effect, piezoelectric transducer, energy conversion, electrical energy storage

Politechnika Warszawska

Politechnika Warszawska

Załącznik nr 1 do zarządzenia nr 109 /2021
Rektora PW z dnia 9 listopada 2021 r.

„załącznik nr 5 do
zarządzenia nr 42 /2020 Rektora PW

Warszawa 2025-01-30...
miejscowość i data

..... Patryk Kuryj
imię i nazwisko studenta

..... 318930
numer albumu

..... Elektrotechnika
kierunek studiów

OŚWIADCZENIE

Świadomy/-a odpowiedzialności karnej za składanie fałszywych zeznań oświadczam, że niniejsza praca dyplomowa została napisana przeze mnie samodzielnie, pod opieką kierującego pracą dyplomową.

Jednocześnie oświadczam, że:

- niniejsza praca dyplomowa nie narusza praw autorskich w rozumieniu ustawy z dnia 4 lutego 1994 roku o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz.U. z 2021 r., poz. 1062) oraz dóbr osobistych chronionych prawem cywilnym,
- niniejsza praca dyplomowa nie zawiera danych i informacji, które uzyskałem/-am w sposób niedozwolony,
- niniejsza praca dyplomowa nie była wcześniej podstawą żadnej innej urzędowej procedury związanej z nadawaniem dyplomów lub tytułów zawodowych,
- wszystkie informacje umieszczone w niniejszej pracy, uzyskane ze źródeł pisanych i elektronicznych, zostały udokumentowane w wykazie literatury odpowiednimi odnośnikami,
- znam regulacje prawne Politechniki Warszawskiej w sprawie zarządzania prawami autorskimi i prawami pokrewnymi, prawami własności przemysłowej oraz zasadami komercjalizacji.


.....
czytelny podpis studenta

Spis treści

1	Wstęp	9
2	Analiza źródeł literatury dotyczących zjawiska piezoelektrycznego prostego i odwrotnego	11
3	Rodzaje materiałów piezoceramicznych i ich właściwości	19
3.1	Materiały polimerowe	19
3.2	Materiały piezoceramiczne	19
3.3	Materiały kompozytowe	20
3.4	Materiały biopolimerowe	20
4	Przegląd zastosowań elementów piezoceramicznych	23
4.1	Zastosowanie zjawiska piezoelektrycznego prostego	23
4.1.1	Czujniki nacisku	23
4.1.2	Odbiorniki fal	23
4.1.3	Generatory isker	24
4.2	Zastosowanie zjawiska piezoelektrycznego odwrotnego	24
4.2.1	Zawory piezoelektryczne, pompy	25
4.2.2	Przyrządy optyczne	25
4.2.3	Generatory fal mechanicznych	25
5	Analiza możliwości zastosowania materiałów piezoceramicznych do przetwarzania energii mechanicznej na energię elektryczną	27
5.1	Rozwiązania na świecie	27
5.2	Model przetwornika piezoelektrycznego dla efektu prostego	28
5.3	Model symulacyjny	29
5.4	Wyniki symulacji	31
6	Wnioski końcowe	41
	Bibliografia	43
	Spis rysunków	45
	Spis tabel	47

Rozdział 1

Wstęp

Szybki postęp technologiczny i cywilizacyjny ludzkości w ostatnich latach przyczynił się do zwiększenia ilości wykorzystywanych urządzeń elektrycznych. Urządzenia są powszechnie stosowane nawet w codziennym życiu. Można powiedzieć, że ludzkość nie potrafi już wyobrazić sobie życia bez elektryczności. Głównym źródłem energii elektrycznej pozostają materiały nieodnawialne, które występują w ograniczonej ilości. Według wyliczeń, przy obecnym poziomie konsumpcji, ich zasoby mogą wystarczyć jedynie na kilka dekad. Znajomość tych ograniczeń powinna być przyczyną zwiększonego rozwoju badań nad sposobami generacji energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych.

Wraz ze wzrostem liczby ludności na świecie w miastach osiedla się coraz więcej mieszkańców. Obserwując ostatnie trendy związane z migracją mieszkańców wsi do miast, można przypuszczać, że w kolejnych latach liczba ludności zamieszkującej miasta będzie znacząco się zwiększać. Czynniki ten znacząco wpływa na zapotrzebowanie energetyczne miast. W większych aglomeracjach zauważalny jest ciągły ruch mieszkańców, którzy przemieszczają się praktycznie przez cały dzień. Ruch ten odbywa się na różne sposoby: pieszo, rowerem, komunikacją miejską lub samochodem.

Sposobami na ciągle zwiększające się zapotrzebowanie energetyczne miast jest stosowanie źródeł energii odnawialnej. Najbardziej rozpowszechnionymi sposobami generacji energii elektrycznej wykorzystującymi źródła odnawialne jest stosowanie paneli fotowoltaicznych do generacji energii elektrycznej z energii słonecznej lub turbin wiatrowych do generacji energii elektrycznej z energii wiatru. Są to obecnie jedyne, wykorzystywane na skalę przemysłową sposoby wytwarzania energii elektrycznej znajdujące zastosowanie w miastach. Istnieją również inne alternatywne sposoby pozyskiwania energii elektrycznej, na przykład elektrownie wodne, elektrownie wykorzystujące ruch fal morskich lub pompy ciepłe. W niniejszej pracy zaproponowano wykorzystanie materiałów piezoelektrycznych do wytwarzania energii elektrycznej. Źródłem tej energii mogą być drgania mechaniczne maszyn, przejeżdżających pojazdów lub ruch pieszych.

Celem tej pracy jest sprawdzenie możliwości generowania energii z ruchu pieszych za pomocą materiałów piezoelektrycznych, przetwarzanie energii kinetycznej generowanej przez pieszych na energię elektryczną oraz magazynowanie wytworzonej w ten sposób energii. W pracy przeanalizowano

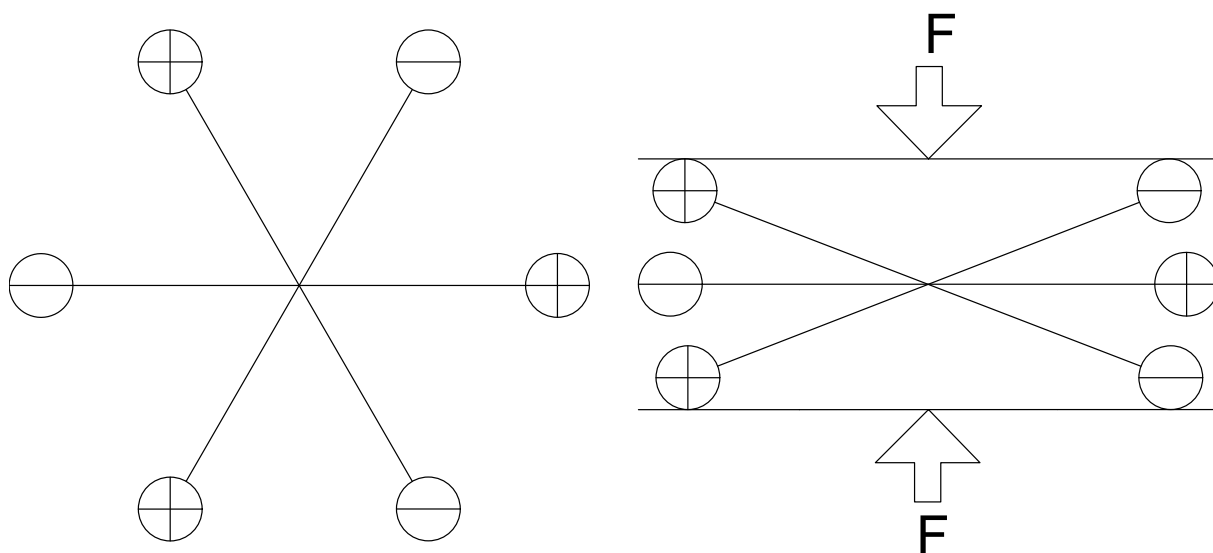
dostępną literaturę krajową i zagraniczną i na tej podstawie opracowano model przetwornika piezoelektrycznego i układu przetwarzania energii mechanicznej na elektryczną. Energia ta może posłużyć do zasilania urządzeń elektrycznych ulokowanych obok tras komunikacyjnych. Miejscami, w których mogą znaleźć zastosowanie moduły generacyjne wykonane z materiałów piezoelektrycznych, są przejścia podziemne, wyjścia z metra, galerie handlowe lub chodniki w centrum miast lub ulice. Wykorzystanie energii wytworzonej przez przechodzących pieszych lub przejeżdżające pojazdy może przyczynić się do zmniejszenia kosztów utrzymania oświetlenia chodników lub urządzeń instalowanych w przejściach podziemnych, na przykład bramki wejściowe do metra i tym podobne.

Rozdział 2

Analiza źródeł literatury dotyczących zjawiska piezoelektrycznego prostego i odwrotnego

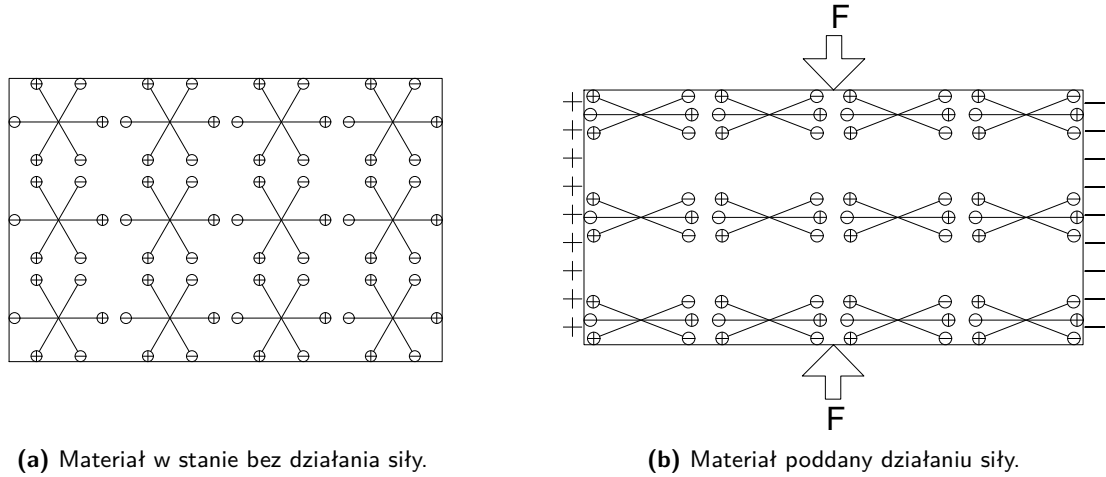
Materiał piezoelektryczny posiada specyficzne właściwości, jeśli zadziała na niego naprężenie mechaniczne (np. siła ściskająca) lub wytworzone będzie w nim pole elektryczne o odpowiednim natężeniu. Jeśli na materiał piezoelektryczny zadziała siła, na przeciwległych powierzchniach materiału gromadzi się ładunki elektryczne różnoimienne (powstaje dipol elektryczny). Zjawisko to nazwane jest efektem piezoelektrycznym prostym. Drugim typem odpowiedzi na wymuszenie, w tym wypadku przez przyłożone pole elektryczne, jest zmiana kształtu materiału – kompresja lub rozciąganie. Ten rodzaj odpowiedzi nazwano zjawiskiem piezoelektrycznym odwrotnym. Zjawiska te, jak wskazują nazwy, są odwrotne względem siebie, więc materiały piezoelektryczne przejawiają obydwa typy zjawisk; nie można ich rozdzielić. Praca ta w głównej mierze skupia się na wykorzystaniu zjawiska piezoelektrycznego prostego. Większy nacisk nastawiony jest właśnie na to zjawisko, jednakże do zrozumienia zasady działania i pełnych możliwości materiałów piezoelektrycznych konieczna jest również znajomość zjawiska odwrotnego, które również zostało opisane w drugiej części rozdziału.

Zjawisko piezoelektryczne proste zostało odkryte przez braci Curie w 1880 roku. Naukowcy przeprowadzili badania, w których udowodnili, że wywieranie nacisku mechanicznego na pewne materiały o strukturze krystalicznej skutkuje generowaniem napięcia na ich powierzchni. Zjawisko piezoelektryczne proste polega na wytwarzaniu pola elektrycznego w materiale piezoelektrycznym, który został poddany zewnętrznemu działaniu ciśnienia [1]. Natężenie pola elektrycznego uzyskanego na materiale piezoelektrycznym jest proporcjonalne do naprężenia mechanicznego. Podczas wywierania nacisku na materiał piezoelektryczny dochodzi do odkształcenia jego struktury krystalicznej i utworzenia dipoli elektrycznych, jak pokazano na rysunku 2.1.



Rysunek 2.1. Zachowanie układu molekularnego w stanie spoczynku i podczas działania siły. (Opracowanie własne na podstawie [1].)

Podczas wywierania nacisku na materiał piezoelektryczny, powstają w nim dipole elektryczne odpowiednio zorientowane względem kierunku działającej siły. W wyniku tego powstaje różnica potencjałów. Po ustąpieniu działania siły materiał wraca do swojego poprzedniego stanu i wytworzone pole elektryczne zanika [1, 15]. Sytuacja ta przedstawiona jest na rysunku. 2.2



Rysunek 2.2. Efekt piezoelektryczny prosty. (Opracowanie własne na podstawie [1].)

Zależność opisująca zjawisko polaryzacji materiału piezoelektrycznego, pod wpływem naprężeń mechanicznych, została podana przez braci Curie [1]

$$\mathbf{P}_p = d\mathbf{T} \quad (2.1)$$

- \mathbf{P}_p jest wektorem polaryzacji piezoelektryka,
- d jest stałą piezoelektryczną,
- \mathbf{T} jest wektorem siły przyłożonej do materiału,

Z wzór 2.1 pokazuje, że wartość natężenia pola elektrycznego jest proporcjonalna do wartości naprężeń mechanicznych [16].

Podstawowe wzory i zależności matematyczne opisujące zjawisko fizyczne zachodzące w materiałach piezoelektrycznych zebrano w normie wydanej przez IEEE. [5]

Efekt piezoelektryczny prosty

$$\mathbf{P}_i = d_{ijk} \mathbf{t}_{jk} \quad , \quad \mathbf{P}_i = e_{ijk} \mathbf{r}_{jk} \quad (2.2)$$

$$\mathbf{E}_i = -q_{ijk} \mathbf{t}_{jk} \quad , \quad \mathbf{E}_i = -h_{ijk} \mathbf{r}_{jk} \quad (2.3)$$

\mathbf{P}_i i \mathbf{E}_i są składowymi wektora polaryzacji elektrycznej i wektora natężenia pola elektrycznego. \mathbf{t}_{ik} , \mathbf{r}_{jk} są składowymi wektora naprężeń i deformacji.

Efekt piezoelektryczny odwrotny, jest również opisany przez cztery równania:

$$\mathbf{r}_{jk} = d_{ijk} \mathbf{E}_i \quad , \quad \mathbf{r}_{jk} = g_{ijk} \mathbf{P}_i \quad (2.4)$$

$$\mathbf{t}_{jk} = -e_{ijk} \mathbf{E}_i \quad , \quad \mathbf{t}_{jk} = -h_{ijk} \mathbf{P}_i \quad (2.5)$$

Stałe współczynniki d_{ijk} , e_{ijk} , g_{ijk} , h_{ijk} , opisujące efekt piezoelektryczny prosty i odwrotny. Współczynniki d_{ijk} nazywane są modułami piezoelektrycznymi. Ogólnie wektor 3 rzędu posiada $3^3 = 27$ składowych. Ponieważ \mathbf{t}_{jk} , \mathbf{r}_{jk} są wektorami symetrycznymi drugiego rzędu, z wzorów 2.2,

2.4 wynika, że tensory posiadają wyłącznie 18 składowych niezależnych. Biorąc pod uwagę symetrię wektorów, wzór 2.2 można rozpisać jako

$$P_i = \frac{d_{ijk} + d_{ikj}}{2} t_{jk} \quad (2.6)$$

Z zależności 2.6 wynika, że współczynniki występują parami w równaniu efektu prostego. Oznacza to, że niemożliwe jest zmierzenie oddzielnie d_{ijk} i d_{ikj} . Mierzona jest zawsze suma tych dwóch składowych. Ten element niejednoznaczności wyboru pojedynczej składowej może zostać usunięty dokonując założenia

$$d_{ijk} = d_{ikj} \quad (2.7)$$

Symetria wektorów względem wskaźników j i k powoduje zmniejszenie liczby niezależnych składowych do 18. Podobne rozumowanie można przeprowadzić dla pozostałych wektorów polaryzacji elektrycznej i wektora natężenia pola elektrycznego. Doprowadzi to do wniosku, że wektory te również posiadają 18 składowych niezależnych. Współczynniki d , e , g , h są zależne od siebie. Wykorzystując uogólnione prawo Hooke'a można otrzymać z wzorów

$$d_{mjk} E_m = r_{jk} = s_{jkl} t_{kl} = -s_{jkl} e_{mnl} E_m \quad (2.8)$$

wynika stąd, że

$$d_{mjk} = -s_{jkl} e_{mnl} \quad (2.9)$$

Podobnie można wyznaczyć

$$e_{mjk} = -c_{jkl} d_{mnl} \quad (2.10)$$

Fakt, iż składowe tensorów są symetryczne względem wskaźników j , k umożliwia wprowadzenie równań zapisu efektu piezoelektrycznego za pomocą zapisu macierzowego. Opisanie składowych wektorów d_{ijk} , e_{ijk} , g_{ijk} , h_{ijk} z wykorzystaniem dwu wskaźnikowego zapisu umożliwia zapisanie współczynników piezoelektrycznych w tabeli. Do takiego zapisu konieczna jest jeszcze zależność

$$d_{ijk} = d_{im} \text{ gdy } m = 1, 2, 3 ; i = 1, 2, 3 \quad (2.11)$$

$$2d_{ijk} = d_{im} \text{ gdy } m = 4, 5, 6 ; i = 1, 2, 3 \quad (2.12)$$

Wykorzystując te zależności moduł piezoelektryczny na przykład d_{ijk} można zapisać jako:

$$\begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Ważnym parametrem materiału piezoelektryka jest współczynnik sprzężenia elektromechanicznego k . Dla efektu prostego jest on określony jako:

$$k = \sqrt{\frac{\text{zmagazynowana energia elektryczna}}{\text{zmagazynowana energia mechaniczna}}} \quad (2.14)$$

Współczynnik ten dla efektu podłużnego można wyznaczyć, wyznaczając wcześniej zmagazynowaną energię elektryczną i mechaniczną pod wpływem wywieranego nacisku. Energię sprężystości płytki o grubości a można wyznaczyć z wzoru:

$$W_{sp} = \frac{1}{2} at_m r_m = \frac{1}{2} at^2 s_{33} - \frac{1}{2} at^2 \frac{d_{33}^2}{\varepsilon_0 \varepsilon_{33}} \quad (2.15)$$

Natomiast energię elektryczną wytworzoną pod wpływem nacisku mechanicznego na płytkę oszacować można z zależności:

$$W_{el} = \frac{1}{2} CU^2 = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{33}}{a} \left(a \frac{d_{33}}{\varepsilon_0 \varepsilon_{33}} t \right)^2 = \frac{1}{2} at^2 \frac{d_{33}^2}{\varepsilon_0 \varepsilon_{33}} \quad (2.16)$$

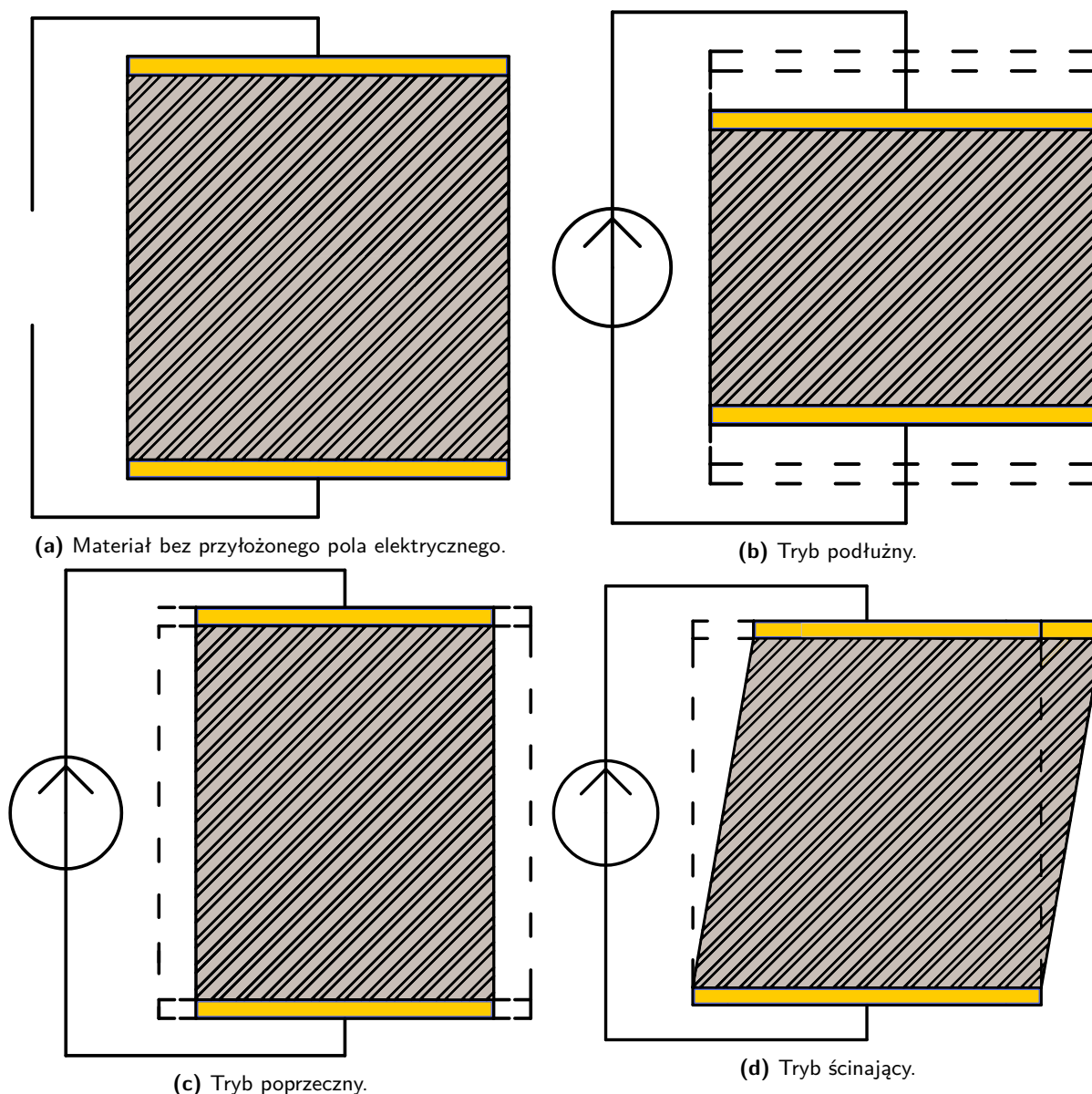
Z porównania równań 2.15 i 2.16 wynika, że energia sprężysta płytki maleje o tyle, o ile zwiększa się wartość energii związanej z polaryzacją płytki. Stosunek $\frac{W_{el}}{W_{el} + W_{sp}}$ określa część energii mechanicznej $W_{mech} = W_{el} + W_{sp}$, która spowodowała polaryzację płytki. Współczynnik sprzężenia dla takiego układu wynosi:

$$k = \sqrt{\frac{W_{el}}{W_{mech}}} = \frac{d_{33}}{\sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon_{33} s_{33}}} \quad (2.17)$$

Zjawisko piezoelektryczne odwrotne zostało potwierdzone rok po odkryciu zjawiska prostego. Polega ono na zmianie objętości kryształu pod wpływem przyłożonego pola elektrycznego. Wzbudzenie kryształu polem elektrycznym powoduje deformację zależną od kierunku pola elektrycznego i sposobu cięcia kryształu [4, 14]. Deformacja może odbywać się na 3 sposoby:

- Tryb podłużny
- Tryb poprzeczny
- Tryb ścinający

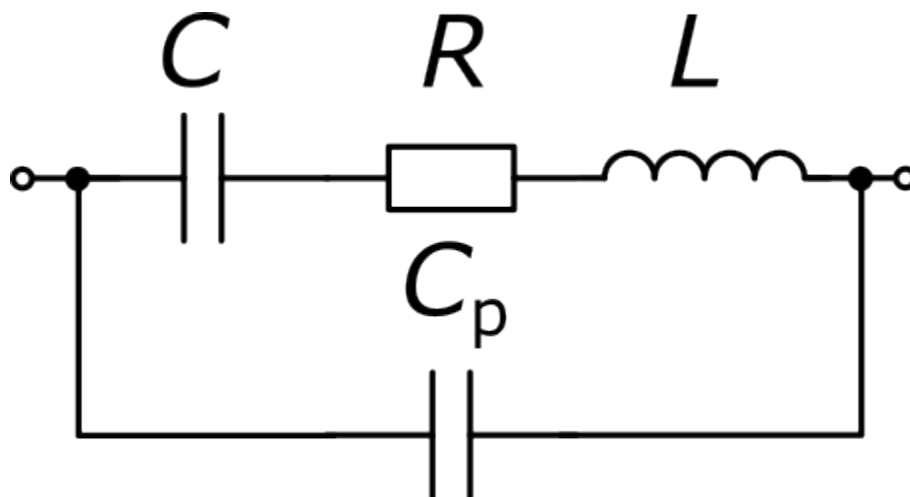
W trybie podłużnym materiał ulega deformacji zgodnie z kierunkiem działania wektora pola elektrycznego. W trybie poprzecznym materiał ulega deformacji w jednej osi prostopadłej do kierunku działania sił pola elektrycznego. W trybie ścinającym siła pola elektrycznego powoduje deformację ścinającą materiał w kierunku równoległym do kierunku sił pola elektrycznego. Wymienione wyżej deformacje przedstawiono na rysunku 2.3.



Rysunek 2.3. Reakcja materiału piezoelektrycznego na pole elektryczne (Opracowanie własne).

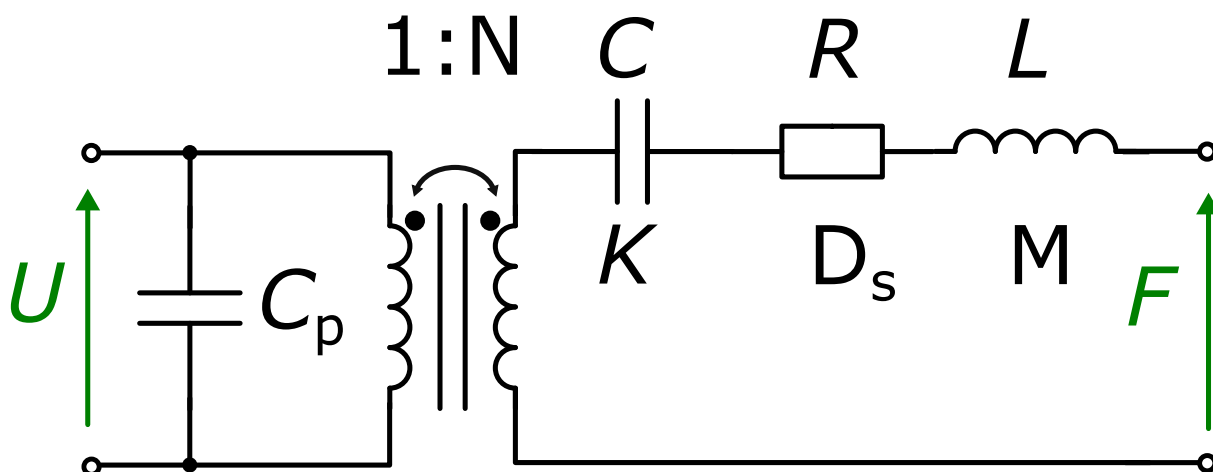
Zależnie od sposobu cięcia materiału i trybu, w jakim pracuje, materiał ma różne wartości stałych piezoelektrycznych, dlatego dobierając tryb pracy, trzeba zwrócić uwagę. W efekcie odwrotnym występuje zamiana energii elektrycznej na energię mechaniczną. W tym wypadku drgającą płytkę piezoelektryczną można traktować jak elektryczny obwód rezonansowy, kiedy drga z częstotliwością drgań własnych. Schemat zastępczy zaproponowany przez Butterworth w 1914 roku. W 1925 roku Van Dyke potwierdził, że interpretacja ta może zostać wykorzystana do opisu materiału piezoelektrycznego drgającego z częstotliwością zbliżoną do częstotliwości rezonansu mechanicznego płytki. Schemat zastępczy Butterworth-Van Dyke przedstawia Rysunek 2.4. Opis elementów widocznych na schemacie:

- L indukcyjność dynamiczna płytki, reprezentuje masę układu
- R rezystancja reprezentująca straty mechaniczne i elektryczne
- C pojemność dynamiczna, reprezentuje sprężystość materiału
- C_0 pojemność statyczna reprezentuje pojemność elektryczną pomiędzy okładkami materiału



Rysunek 2.4. Schemat zastępczy materiały piezoelektrycznego Butterworth-Van Dyke (Opracowanie własne).

W 1930 roku Mason zaprezentował schemat zastępczy przetwornika piezoelektrycznego w stanie rezonansu mechanicznego. Reprezentujący połączenie właściwości elektrycznych i mechanicznych. Ten model przetwornika jest powszechnie wykorzystywany do opisu właściwości materiału piezoelektrycznego drgającego z częstotliwością zbliżoną do częstotliwości rezonansu mechanicznego.



Rysunek 2.5. Model Masona przetwornika piezoelektrycznego w stanie rezonansu (Opracowanie własne na podstawie [13]).

Część obwodu znajdująca się po prawej stronie modeluje właściwości mechaniczne przetwornika piezoelektrycznego. W tym wypadku wymuszeniem jest siła F wywierana na element. Rezystor R reprezentuje straty mechaniczne i elektryczne. Indukcyjność dynamiczna L reprezentuje masę

przetwornika. Pojemność dynamiczna C reprezentuje sprężystość materiału piezoceramicznego. Część schematu po lewej stronie reprezentuje odpowiedź napięciową układu na działanie siły F . Po stronie elektrycznej jest kondensator C_p , który reprezentuje pojemność elektryczną przetwornika mierzoną przy częstotliwości znacznie niższej niż częstotliwość rezonansu mechanicznego. Obydwie strony połączone są idealnym transformatorem [13]. Przekładnia transformatora reprezentowana jest przez stałą sprzężenia mechanicznego materiału N . Model ten funkcjonuje przy wymuszeniu elektrycznym i wymuszeniu mechanicznym, co potwierdza, że zjawiska piezoelektryczne proste i odwrotne są ze sobą sprzężone.

Model Masona reprezentuje materiał drgający z częstotliwością bliską częstotliwości rezonansu mechanicznego. Dla układu pracującego poza rezonansem materiał ten można traktować jak kondensator o pojemności C_p . Gałąź dynamiczna modelu jest opisana:

$$K = \frac{N^2}{C} \quad (2.18)$$

$$M = N^2 L \quad (2.19)$$

$$D_s = N^2 R \quad (2.20)$$

$$N = \left(\frac{1}{R}\right)\left(\frac{q}{V}\right)^{-1} \quad (2.21)$$

gdzie:

- K to sztywność układu,
- M to masa,
- D_s to dyssypacja,
- q to prędkość wibracji układu,
- V to napięcie zasilania.

Największą moc przetwornik generuje jeśli drga przy częstotliwości rezonansowej. Częstotliwość ta jest zależna od parametrów materiału piezoelektrycznego.

Rozdział 3

Rodzaje materiałów piezoceramicznych i ich właściwości

Odkrycie zjawiska piezoelektrycznego było początkiem poznawania i wytwarzania nowych materiałów, w których zjawisko to występuje. Materiały te mają różne właściwości mechaniczne i piezoelektryczne. Znajomość ich właściwości umożliwia zastosowanie ich zależnie od występujących w technice potrzeb. Materiały piezoelektryczne można podzielić na materiały pochodzenia organicznego (biopolimery), materiały elastyczne (polimerowe) i materiały twarde (piezoceramiki i kompozyty). Różnice pomiędzy poszczególnymi materiałami i ich właściwości zostały opisane w dalszej części rozdziału.

3.1 Materiały polimerowe

Materiały z tej grupy charakteryzują się dużą elastycznością, dzięki czemu znajdują szeroką gamę zastosowań, od membran głośnikowych do czujników o dużych powierzchniach rzędu cm^2 lub m^2 . Najczęściej wykorzystywanym materiałem z tej grupy jest poli(fluorek winylidenu) inaczej określany PVDF, ma dużą wartość współczynnika piezoelektrycznego d_{33} (kierunek siły jest prostopadły do powierzchni materiału). Jednak materiał ten ze względów technologicznych jest drogi w produkcji. Wadami materiałów z tej grupy oprócz ceny, są ich parametry mechaniczne. Posiadają one niską temperaturę topnienia.

Materiały tego typu znajdują zastosowania jako membrany głośnikowe, czujniki nacisku o dużych powierzchniach. W przyszłości mogą znaleźć zastosowanie w medycynie oraz jako przetworniki energii.

3.2 Materiały piezoceramiczne

Materiały piezoceramiczne są najczęściej wykorzystywanymi materiałami o właściwościach piezoelektrycznych na rynku. Materiały te mają wysoką wartość temperatury Curie, co umożliwia ich zastosowanie w warunkach wysokotemperaturowych, jednocześnie posiadają one dobrą wytrzymałość mechaniczną. Do grupy tych materiałów zalicza się takie materiały jak:

- tytanian baru (BaTiO_3) - spiek tlenków metali z grupy tytanowców wraz z tlenkami baru, litu, ołowiu wraz ze specjalnymi dodatkami.

- PZT - spiek tytanianu baru i cyrkonianu ołowiu.

materiały te są najczęściej wykorzystywanymi materiałami tej grupy. Porównanie właściwości materiałów wymienionych i reszty podstawowych materiałów zostały zamieszczone w tabeli 3.1. Materiały piezoceramiczne stosowane są w przetwornikach elektromechanicznych, rezonatorach, oscylatorach, filtrach pasmowych i generatorach ultradźwięków [20].

Tabela 3.1. Właściwości podstawowych materiałów piezoceramicznych (na podstawie [18]).

Parametr	BaTiO ₃	PZT twarda	PZT miękka	LiNbO ₃	PbTiO ₃
Współczynnik sprzężenia elektro-mechanicznego k_p	0,38	0,57	0,61	0,035	-
d_{31} , [$\frac{m}{V}$]	$-79 * 10^{-12}$	$-120 * 10^{-12}$	$-175 * 10^{-12}$	$-0,9 * 10^{-12}$	$-7,4 * 10^{-12}$
d_{33} , [$\frac{m}{V}$]	$190 * 10^{-12}$	$-120 * 10^{-12}$	$375 * 10^{-12}$	$6 * 10^{-12}$	$-47 * 10^{-12}$
g_{31} , [$\frac{Vm}{N}$]	$-5 * 10^{-3}$	$-10 * 10^{-3}$	$-11 * 10^{-3}$	$-4 * 10^{-3}$	$-4 * 10^{-3}$
g_{33} , [$\frac{Vm}{N}$]	$11 * 10^{-3}$	$25 * 10^{-3}$	$25 * 10^{-3}$	$33 * 10^{-3}$	$26 * 10^{-3}$
Stała dielektryczna K_3^t	1900	1300	1760	29	203
Temperatura Curie [$^{\circ}C$]	130	390	390	1210	494

3.3 Materiały kompozytowe

Materiały te znalazły zastosowanie tam, gdzie materiały polimerowe ze względu na swoje wady nie mogły zostać wykorzystane. Materiały te są wykonane z połączenia materiałów twardych z polimerami. Wytworzony w ten sposób materiał ma lepsze właściwości mechaniczne. Zwiększenie jego właściwości mechanicznych prowadzi do utraty dużej elastyczności. Materiały tego typu są wykonywane jako blaszki, cylindry, okrągłe płytki [4]

Materiały te znalazły zastosowanie w generatorach ultradźwiękowych i ich odbiornikach ultradźwiękowych. Tego typu urządzenia są stosowane w medycynie, wojsku i w segmencie konsumenckim.

3.4 Materiały biopolimerowe

Biopolimery są to substancje pochodzenia organicznego wykazujące własności piezoelektryczne. Materiały zaliczające się do tej grupy muszą być aktywne optycznie, wykazują właściwości skręcania płaszczyzny polaryzacji światła, za własność tą jest odpowiedzialna możliwość reorientacji momentów dipolowych związanymi z asymetrycznymi atomami węgla. Właściwości takie przejawia celuloza materiał budulcowy ścian komórkowych roślin wyższych [3]. Rośliny zaliczane do tej grupy wykształciły tkanki naczyniowe służące do dystrybucji substancji organicznych w roślinie. Właściwości piezoelektryczne takiego materiału zależne są od poziomu nawodnienia rośliny i ilości substancji

chemicznych pobranych przed pozyskaniem materiału [4]. Kolejnymi materiałami wykazującymi podobne właściwości są: kości i ścięgna, w których czynnikiem powodującym właściwości piezoelektryczne są zorientowane układy kolagenu. W DNA za właściwości tego materiału odpowiada najprawdopodobniej reorientacja dipoli grup NH i CO w purynie i piramidynie. Materiały tej grupy mają niską wartość współczynnika piezoelektrycznego d od $4^{-2} \frac{\text{pC}}{\text{N}}$ do $10^{-2} \frac{\text{pC}}{\text{N}}$ [4]. Materiały te mogą znaleźć zastosowanie w biomedycynie do zasilania układów o bardzo małej mocy. Mogą zostać wykorzystane do wytwarzania bioczuowników monitorujących stan zdrowia i reakcji fizjologiczne takie jak ruch kończyn, przełykanie, kaszel. Wykorzystane są do wytwarzania sztucznej skóry zdolnej do symulacji dotyku. Implanty piezoelektryczne stosowane są do stymulacji elektrycznej w regeneracji nerwów. Materiały biopolimerowe są biodegradowalne co eliminuje konieczność ich wyciągania po zakończeniu leczenia. [19].

Rozdział 4

Przegląd zastosowań elementów piezoceramicznych

4.1 Zastosowanie zjawiska piezoelektrycznego prostego

Zjawisko piezoelektryczne proste znalazło zastosowanie w aplikacjach, w których sygnałem wymuszającym jest siła, naprężenie mechaniczne lub odkształcenie. Odbierają one fale mechaniczne rozchodzące się w różnych środowiskach. Jak zostało wspomniane w rozdziale 2, materiały takie pod wpływem nacisku wytwarzają napięcie na okładkach elementu. Zjawisko to znalazło zastosowanie w:

- czujnikach nacisku,
- mikrofonach,
- odbiornikach fal ultradźwiękowych,
- czujnikach przyspieszenia,
- czujnikach ciśnienia,
- urządzenia do pomiaru drgań i wibracji,
- zapalniczkach.

Wymienione aplikacje wykorzystuje się w wielu dziedzinach inżynierii. Stosowane są w motoryzacji, przemyśle, urządzeniach codziennego użytku i przemyśle militarnym.

4.1.1 Czujniki nacisku

Czujnik nacisku z materiałem piezoelektrycznym jest jednym z najprostszych zastosowań prostego efektu piezoelektrycznego. Naciśnięcie elementu wywołuje generację ładunku elektrycznego. Przyciski takie charakteryzują się tym, że reakcją na pojedyncze naciśnięcie lub przytrzymanie jest pojedynczy impuls napięciowy.

4.1.2 Odbiorniki fal

Wykorzystanie materiałów piezoelektrycznych do odbioru fal infradźwiękowych i z dolnego zakresu słyszalności. Spopularyzowało to zjawisko i było jednym z pierwszych praktycznych zastosowań materiałów piezoelektrycznych. Zjawisko to zostało zastosowane w hydrofonach służących do

odbierania fal dźwiękowych rozchodzących się w wodzie. Wykorzystanie zbieranych w ten sposób sygnałów przyczyniło się do wykonania pierwszych sonarów, które umożliwiały wykrycie obiektów znajdujących się pod wodą. Wykorzystują one do działania zależność rozchodzenia się fal dźwiękowych w wodzie i odbijania się od elementów w niej zanurzonych. Materiały piezoelektryczne wykorzystywane są również do wytwarzania fal ultradźwiękowych i infradźwiękowych. Zdolność ta została opisana w części 4.2.3. Mierzony jest czas pomiędzy wysłaniem wiązki sygnałów, a powrotem tej wiązki do odbiornika. Pierwsze zastosowanie materiału piezoelektrycznego do konstrukcji sonarów i hydrofonów zostało wykonane przez Paula Langevina podczas pierwszej wojny światowej. Materiałem wykorzystanym do odbierania sygnałów był kryształ kwarcu. Zależność zmiany napięcia na okładkach materiału znalazła również zastosowanie w odbiornikach fal o mniejszych częstotliwościach niż fale ultradźwiękowe. Materiały o właściwościach piezoelektrycznych znalazły również zastosowanie w układach wykrywających drgania. Szeroką gamę zastosowań praktycznych w przemyśle można znaleźć na przykład w portfolio firmy PCB Piezotronics wykonujących elementy pomiarowe z materiałów o właściwościach piezoelektrycznych. Firma ta wykorzystuje materiały piezoelektryczne do wytwarzania akcelerometrów, mikrofonów, czujników drgań, czujników ciśnienia.

4.1.3 Generatory iskier

Jednym z najbardziej znanych i wykorzystywanych zastosowań materiałów piezoelektrycznych są zapalniczki piezoelektryczne. Zapalniczki te posiadają iskiernik, który do wytworzenia iskry wykorzystuje efekt piezoelektryczny. Materiały piezoelektryczne w kształcie cylindrów poddane działaniu siły za pomocą systemu młotka i sprężyny są w stanie wygenerować na tyle wysokie napięcie, żeby umożliwić przeskok iskry w przerwie pomiędzy elektrodami. Zdolność ta wykorzystywana jest do zapalania gazów. Projektowanie układów zapłonowych do zapalniczek jest zadaniem dość prostym. Konieczna jest znajomość maksymalnego potrzebnego napięcia, jakie jest potrzebne do uzyskania przeskoku iskry. Kolejnym krokiem jest dobranie materiału i siły, jaką musi wytworzyć młotek uderzając w materiał piezoelektryczny.

4.2 Zastosowanie zjawiska piezoelektrycznego odwrotnego

Zastosowania tego typu zjawisko wykorzystywane jest w aplikacjach, w których konieczne jest generowanie przesunięć materiałów lub wzbudzanie fal dźwiękowych. Elementy piezoelektryczne w tych aplikacjach znajdują zastosowanie jako elementy czynne powodujące wzbudzenie fali mechanicznej. Urządzenia konstruowane za ich pomocą charakteryzują się niską wagą i umożliwiają usunięcie skomplikowanych części mechanicznych. Aplikacje, w których zjawisko piezoelektryczne odwrotne znalazło zastosowanie:

- zawory do regulacji ciśnienia lub przepływu, pompy,
- generatory fal ultradźwiękowych,
- wentylatory,

- układu do redukcji drgań,
- narzędzia elektryczne,
- przyrządy optyczne.

Aplikacje te są stosowane w wielu gałęziach przemysłu takich jak przemysł medyczny, motoryzacyjny, przemysł wojskowy i przemysł komercyjny.

4.2.1 Zawory piezoelektryczne, pompy

Ruch elementu piezoelektrycznego można zastosować do sterowania zaworami wlotowo-wyjściowymi, w celu kontrolowania przepływu małych objętości cieczy lub gazów. Dynamiczne właściwości cieczy są często wystarczające do wygenerowania przepływu. Zasada ta znalazła zastosowanie w rurowej drukarce atramentowej. Za pomocą dysków wykonanych na przykład z materiału PZT można osiągnąć wysokie ciśnienie pompowania i niskie objętości przepływu. Stosując elementy giętkie na przykład materiały bimorficzne, można zwiększyć objętość przepływu do kilku milimetrów sześciennych, skutkuje to jednak znacznym spadkiem wytwarzanego ciśnienia. Zawory wykonane za pomocą materiałów piezoelektrycznych posiadają szereg własności, które sprawiają, że ich zastosowanie jest lepsze niż zaworów klasycznych. Zawory takie charakteryzują się cichszą pracą, niskim poborem mocy i wysoką częstotliwością działania, zmiana stanu z całkowitego zamknięcia do pełnego otwarcia możliwa jest w czasie rzędu milisekund. Układy takie są szybsze niż zawory mechaniczne. Zawory takie znalazły zastosowanie w sprzęcie medycznym, na przykład zawory produkowane przez firmę FESTO [21]. Aplikacje takie znajdują również zastosowanie w nowoczesnej motoryzacji na przykład wtryski paliwowe produkowane przez firmę BOSCH. Szybki czas reakcji takich układów pozwala na precyzyjne sterowanie przepływem czynnika, co przyczynia się w przypadku motoryzacji do mniejszego zużycia paliwa i lepszych osiągnięć pojazdów, w medycynie pozwala to na precyzyjniejsze dawkowanie gazów i płynów dostarczanych pacjentowi.

4.2.2 Przyrządy optyczne

Znalazły zastosowanie w przyrządach optycznych. Wykorzystanie zdolności zmiany krysztalu i wielkości materiału na poziomie wielkości rzędu nanometrów, mikrometrów zostało wykorzystane w precyzyjnych pomiarach laserowych do precyzyjnego ustawiania odległości i nachylenia luster.

4.2.3 Generatory fal mechanicznych

Zdolność zmiany wymiarów mechanicznych materiałów piezoelektrycznych pod wpływem zmiennego pola elektrycznego znalazła szereg zastosowań w generacji fal mechanicznych. Urządzenia generujące fale w zakresie fal słyszalnych stosowane są do wytwarzania syren alarmowych, prostych buzerów lub sonarów niskoczęstotliwościowych. Sonary tego typu charakteryzują się dalekim zasięgiem wykrywania. Wadą ich jest niska rozdzielczość (mniej szczegółowy obraz). Urządzenia mogące generować fale w zakresie ultradźwięków wykorzystywane są w szerokim zakresie. Stosowane są jako elementy czynne zgrzewarek do plastiku, czynność ta jest ciężka do uzyskania za pomocą

innych technik bez uszkodzenia materiału. Wytwarzane są też za ich pomocą myjki ultradźwiękowe. Jednak najczęściej stosowane są w aplikacjach takich jak ultradźwiękowe mierniki odległości, sonary, układy do tłumienia drgań mechanicznych. Układy te najczęściej stosują obydwa zjawiska proste i odwrotne w celu naprzemiennego wysyłania i odbierania sygnałów. Układy do aktywnej redukcji drgań znajdują zastosowanie w maszynach przemysłowych, gdzie umożliwiają zmniejszenie hałasu generowanego przez maszyny, strat generowanych przez drgania, poprawienie parametrów pracy układu. Stosowane są do redukcji drgań i hałasu w dyskach twardych. Układy aktywnej redukcji drgań znalazły zastosowanie również w inteligentnych konstrukcjach karatowych. Konstrukcje takie charakteryzują się niską masą i wysokim tłumieniem drgań [2]. Wykorzystanie pracy materiałów piezoelektrycznych takich jak PZT w urządzeniach mechanicznych przyczyniło się do możliwości wyeliminowania elementów wirujących w narzędziach elektrycznych wykorzystywanych do cięcia lub obróbki materiałów. Materiały o właściwościach piezoelektrycznych są generatorami fal ultradźwiękowych wykorzystywanych do wprowadzenia w drgania elementów czynnych narzędzi. Generator w takich zastosowaniach powinien pracować z częstotliwością rezonansową drgań mechanicznych, częstotliwość ta zależy od parametrów mechanicznych generatora. Wprowadzony zostaje w drgania przez podanie napięcia o częstotliwości zbliżonej do częstotliwości rezonansowej drgań materiału.

Rozdział 5

Analiza możliwości zastosowania materiałów piezoceramicznych do przetwarzania energii mechanicznej na energię elektryczną

5.1 Rozwiązania na świecie

Przetwarzanie energii kinetycznej na energię elektryczną było niejednokrotnie rozważane przez kilka firm. Już w 2010 roku prowadzono testy mające na celu wdrożenie takich rozwiązań w zastosowaniach komercyjnych. Pierwsze próby przeprowadziła izraelska firma Innowattech we współpracy z izraelskim instytutem technologicznym Technion I.I.T (Israel Institute of Technology). Testy rozpoczęto od 10-metrowego odcinka drogi, w którym elementy piezoelektryczne były umieszczone 5 cm pod asfaltem. Próba ta wykazała możliwość generowania energii elektrycznej o mocy 2 kWh.

Następnie firma przeprowadziła eksperyment na dłuższym odcinku drogi o długości 1 km. Testy przeprowadzono dla dróg o 1 pasie ruchu i 4 pasach ruchu. Droga jednopasmowa uzyskała moc o wartości 200 kWh, natomiast droga czteropasmowa osiągnęła moc na poziomie 1 MWh. Planowane było wdrożenie tej technologii na włoskiej autostradzie z Wenecji do Triest, jednak instalacja nie została zrealizowana. Na dzień dzisiejszy brak jest informacji o dalszym istnieniu firmy Innowattech [10].

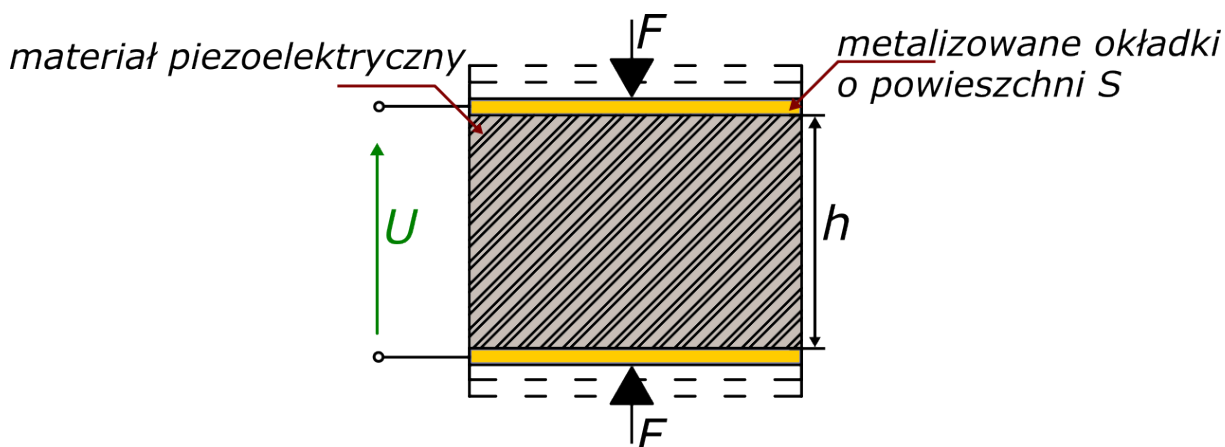
W podobnym okresie badania nad przekształcaniem energii kinetycznej w energię elektryczną prowadziła amerykańska firma POWERleap Inc. Uzyskali oni wyniki podobne do rezultatów osiągniętych przez firmę Innowattech. Testowy odcinek drogi o długości 1 kilometra, wykonany z 6000 elementów piezoelektrycznych, był w stanie wygenerować energię elektryczną o mocy 720 kWh przy natężeniu ruchu wynoszącym 600 pojazdów na godzinę. Pomimo obiecujących wyników, drogi generujące energię nie zostały spopularyzowane ze względu na wysokie koszty. Wykonanie 1 kilometra takiej drogi w 2010 roku wynosiło od 650 tysięcy do 1 miliona dolarów [10].

Firma POWERleap nadal rozwija swoją technologię. Obecnie produkuje również płyty chodnikowe, które przetwarzają energię kinetyczną generowaną przez pieszych na energię elektryczną. Moduły generacyjne oferowane przez POWERleap są w stanie wygenerować energię o mocy 5 W i maksymalnym napięciu 45 V [6].

W ostatnich latach rozwinęła się również firma PAVEGEN wykonująca chodniki wytwarzające energię elektryczną. Firma PAVEGEN do wytwarzania energii nie wykorzystuje modułów piezoelektrycznych tylko generatory elektromagnetyczne. Podstawowy model generatora proponowany przez tą firmę jest w stanie wygenerować ładunek 3 J podczas jednego kroku. Przekłada się to na moc rzędu 5 W, uzyskany wynik jest identyczny jak dla urządzeń proponowanych przez firmę POWERleap. Firma PAVEGEN wykonała już ponad 250 instalacji chodników elektrycznych. Ostatnio jako dodatkowe źródło energii wprowadzili do chodników panel fotowoltaiczny, który jest w stanie generować moc do 11 W. Sprawia to, że generatory mogą pracować nawet w momencie gdy chodniki nie są uczęszczane [11].

5.2 Model przetwornika piezoelektrycznego dla efektu prostego

Do budowy modelu przetwornika piezoelektrycznego można wykorzystać równania opisujące efekt piezoelektryczny prosty. Element piezoelektryczny przedstawiono na Rysunku 5.1.



Rysunek 5.1. Element piezoelektryczny (opracowanie własne).

Wyprowadzenie modelu symulacyjnego należy zacząć od podstawowego równania materiału piezoelektrycznego

$$D = dT + \epsilon E \quad (5.1)$$

Z równania 5.1 wynika, że wartość indukcji elektrycznej D zależy liniowo od nacisku T jest to siła działająca na powierzchnię okładek $\frac{F}{S}$ i natężenia pola elektrycznego E wytworzonego pod wpływem tego nacisku. Ładunek zgromadzony na okładkach materiału piezoelektrycznego można obliczyć jako

$$Q = DS \quad (5.2)$$

Gdzie S jest powierzchnią okładek.

Prąd przesunięcia w obwodzie

$$I = -\frac{dQ}{dt} \quad (5.3)$$

podstawiając równania 5.1 i 5.2 do równania 5.3

$$I = Sd_{33}\frac{d}{dt}T - \frac{S\varepsilon_{33}}{h}\frac{dU}{dt} \quad (5.4)$$

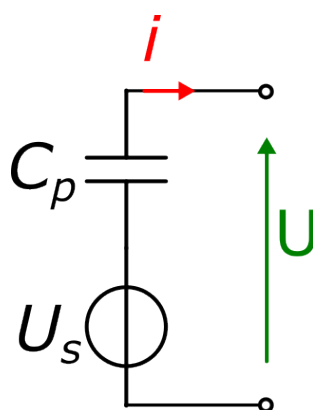
gdzie h jest wysokością materiału, T jest średnim ciśnieniem wywieranym na materiał. Podstawiając do równania 5.4 sygnał sinusoidalny

$$i = d_{33}Sj\omega T - \frac{\varepsilon_{33}S}{h}j\omega U \quad (5.5)$$

równanie 5.5 może zostać zastąpione z wykorzystaniem źródła napięciowego i kondensatora

$$U = U_s - \frac{i}{j\omega C_p} \quad (5.6)$$

Gdzie U jest napięciem na elemencie piezoelektrycznym. $U_s = (\frac{d_{33}S}{C_p}T)$ jest wartością napięcia źródła, C_p jest pojemnością między okładkami piezoelektryka.



Rysunek 5.2. Rozważany schemat zastępczy materiału piezoelektrycznego (Opracowanie własne na podstawie [9]).

5.3 Model symulacyjny

Do analizy możliwości wykorzystania materiałów piezoelektrycznych do generacji energii elektrycznej przyjęto założenia 5.1, które pozwoliły oszacować ilość generowanej energii oraz sprawność przetwor- nika.

Tabela 5.1. Założenia.

Parametr	Wielkość
Napięcie	<100 V
Częstotliwość nacisku	0,5-2 Hz
Średnia waga człowieka	62,6 kg
Wielkość elementu	60 cm x 60 cm

Symulacja została wykonana w dwóch etapach. W pierwszym etapie sprawdzono zależność rozkładu siły zależnie od ilości podpór. W drugim wykonano obliczenia dla dwóch wybranych wariantów ilości podpór. W pierwszym wariantcie płyta chodnikowa 60 na 60 cm podparta jest na sześciu podporach. W drugim płyta chodnikowa 60 na 60 cm podparta jest na jedenastu podporach. Płyta chodnikowa o wymiarach 60 na 60 cm jest standardową płytą chodnikową.

Siła wywierana przez człowieka o średniej masie 62,6 kg, masa przyjęta na podstawie [12], na płytę chodnikową o przyjętych wymiarach jest równa:

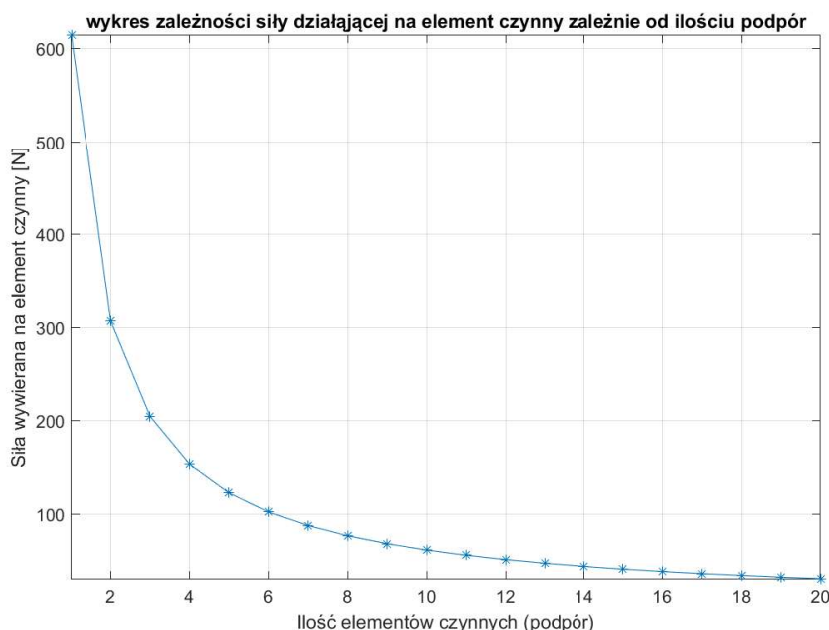
$$F_{\text{maksymalna}} = mg = 62,6 * 9,81 = 614,1 \text{ N} \quad (5.7)$$

Siła wywierana na zestaw elementów została obliczona dla przypadku równomiernego rozchodzenia się obciążeń dla płytki sztywnej umieszczonej na podporach.

Siła wywierana na jedną z podpór

$$F_{\text{podpory}} = \frac{F_{\text{maksymalna}}}{n} = \frac{614,1 \text{ N}}{n} \quad (5.8)$$

Wykres zależności siły wywieranej na jedną podporę zależnie od ilości podpór płyty chodnikowej przedstawiono na Rysunku 5.3



Rysunek 5.3. Wykres zmiany siły działającej na podporę w zależności od ilości podpór (opracowanie własne).

Znając siłę wywieraną przez przechodzących pieszych, konieczne było założenie sposobu chodu pieszych. Modelując ruch pieszych przyjmuje się, że średnia długość kroku wykonywanego przez

doroślą osobę mieści się w przedziale 60-80 centymetrów [8]. Średnia ilość kroków wykonywanych przez ludzi wynosi około 100 kroków na minutę [7]. Do analizy przyjęto model przedstawiony w publikacji [17]. W której ruch pieszych jest ruchem harmonicznym o częstotliwości $f = 1.67$ Hz. Materiał piezoelektryczny generuje napięcie pod wpływem działającej siły. Zależność przedstawiająca napięcie na okładkach materiału przedstawiona jest za pomocą następującego wzoru.

$$U = \frac{g_{33} F h}{S} \quad (5.9)$$

lub

$$U = \frac{d_{33} F}{C} \quad (5.10)$$

Wzory te przedstawiają zależność generowanego napięcia U zależnie od współczynników piezoelektrycznych d i g . Siły działającej na materiał F . Wysokości materiału h . Powierzchni materiału S . Pojemności między okładkami C .

5.4 Wyniki symulacji

Zależność zamiany napięcia generowanego przez materiał przedstawia Rysunek 5.4. Rysunki 5.5 i 5.6 przedstawiają zmianę napięcia zależnie od wielkości materiału. Rysunek 5.4 przedstawia wykres zmiany napięcia w zależności od ilości podpór dla materiału w kształcie dysku i wymiarach $r = 10$ mm i $h = 10$ mm. Wymiary te zostały użyte w dalszych obliczeniach. Obliczenia zostały wykonane dla materiału z grupy materiałów ceramicznych miękkich o nazwie PSnN-5 i materiału PIN-PMN-PT. Podstawowe parametry materiałów przedstawiono w tabeli 5.2

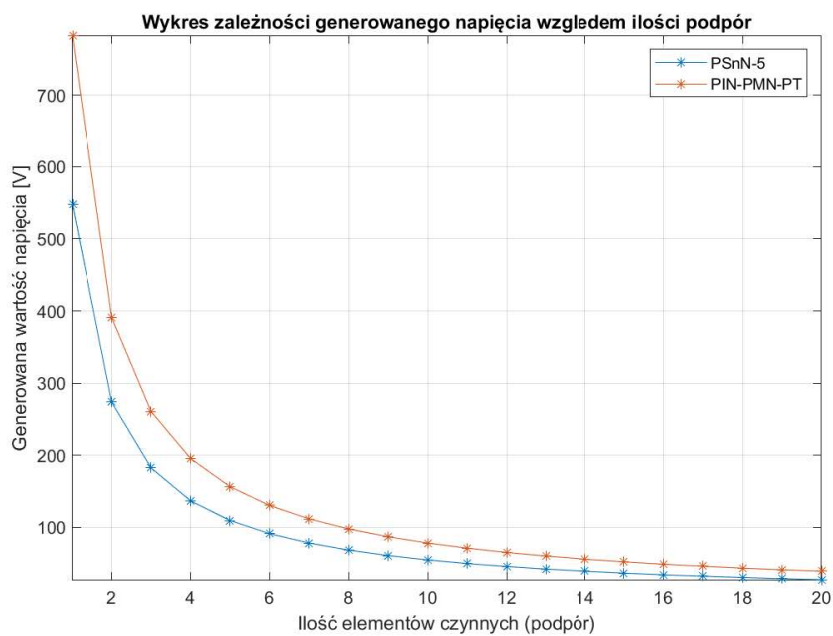
Model układu przetwarzającego energię mechaniczną na energię elektryczną wykonano w programie MATLAB.

Tabela 5.2. Parametry materiałów (opracowanie własne).

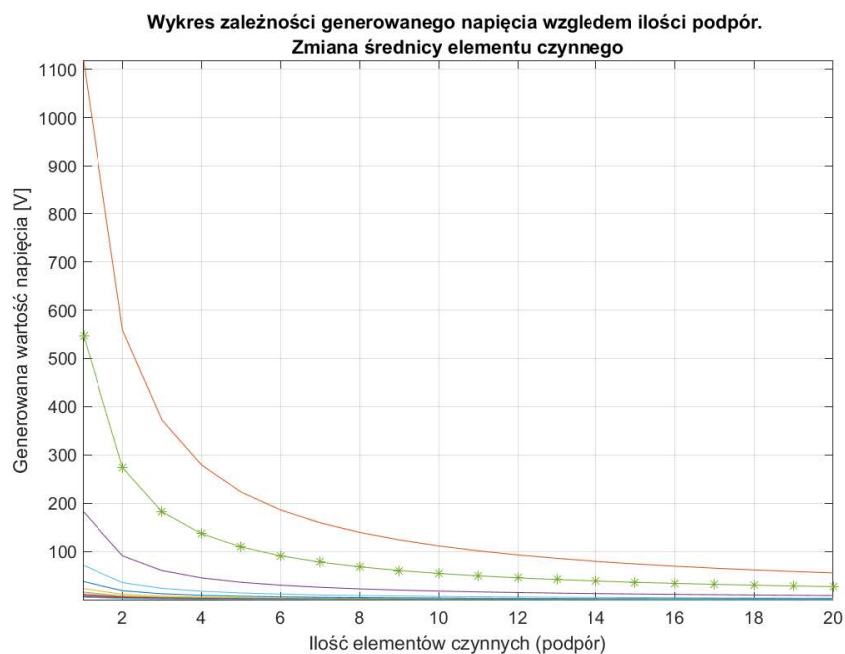
Materiał		PSnN-5	PIN-PMN-PT
Parametr	Oznaczenie	Wartość	Wartość
Stała dielektryczna	ε_r	1600	5100
Współczynnik piezoelektryczny	$d_{33} [10^{-12} \frac{m}{V}]$	400	1820
Współczynnik piezoelektryczny	$g_{33} [10^{-3} \frac{Vm}{N}]$	28	40
stratność dielektryczna	$\tan \phi [\%]$	2	0,7

Napięcie generowane na elementach jest wprost proporcjonalne do wielkości współczynnika g_{33} , siły F działającej na materiał i wysokości h . Generowane napięcie jest odwrotnie proporcjonalne do powierzchni okładek S . Wartości generowanego napięcia dla materiału PIN-PMN-PT są większe względem wartości napięcia uzyskanego przez materiał PSnN-5. Zwiększenie generowanego napięcia jest efektem większej wartości współczynnika piezoelektrycznego g_{33} . Wartość generowanego napięcia zwiększyła się o $378 \frac{mV}{N}$. Rysunek 5.5 przedstawia zmianę generowanego napięcia

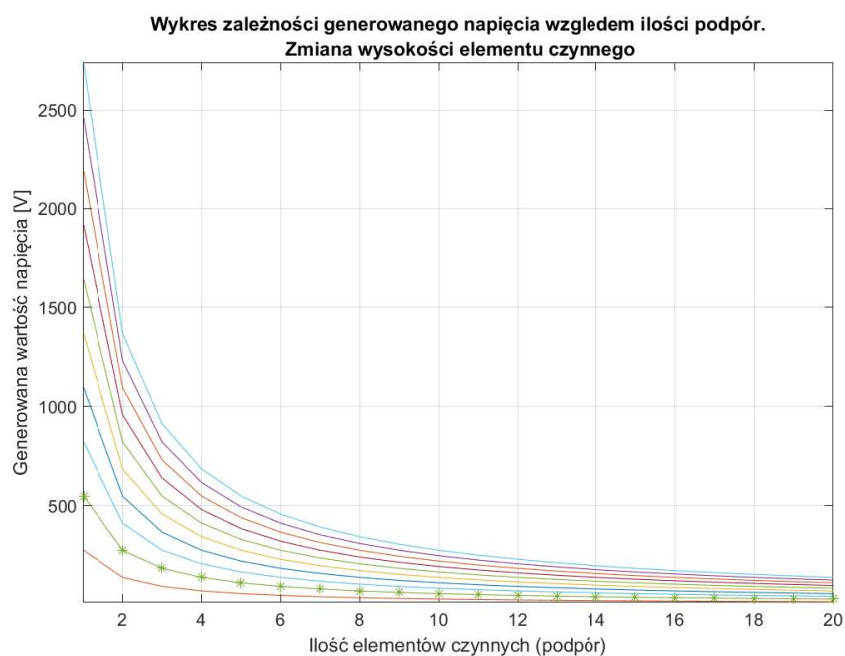
zależnie od powierzchni okładek. Promień dysku ulega zmianie od 7 mm do 100 mm. Zależność zmiany wygenerowanego napięcia w zależności od wysokości h przedstawia Rysunek 5.6. Zależność przedstawiona dla zmiany wysokości materiału od 5 mm do 50 mm.



Rysunek 5.4. Wykres zmiany napięcia w zależności od ilości podpór (opracowanie własne).

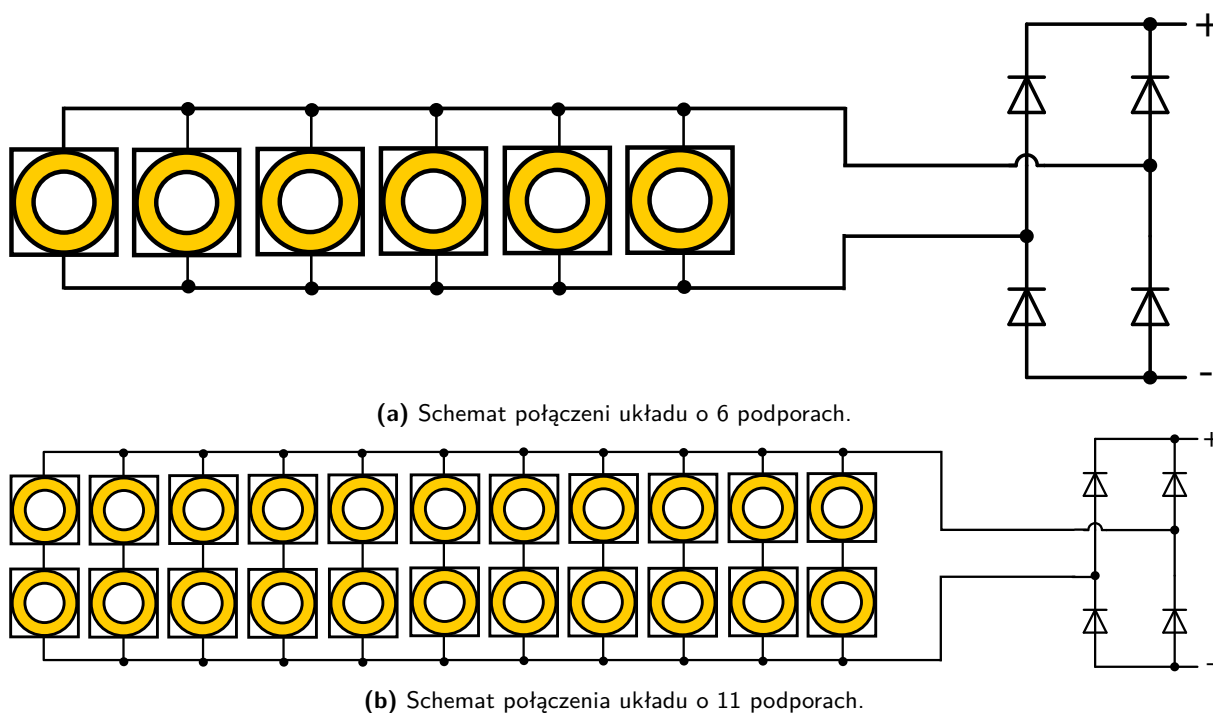


Rysunek 5.5. Wykres zmiany napięcia w zależności od ilości podpór. Zmiana średnicy materiału (opracowanie własne).

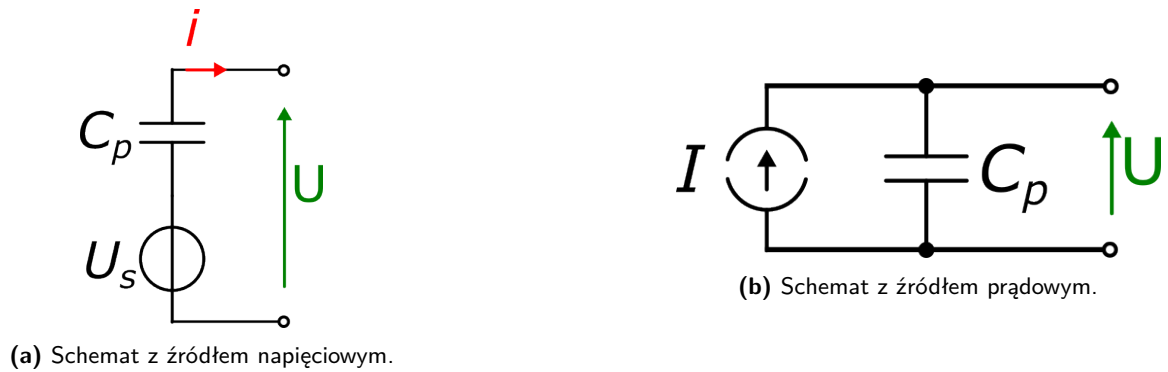


Rysunek 5.6. Wykres zmiany napięcia w zależności od ilości podpór. Zmiana wysokości materiału (opracowanie własne).

Zebrane dane pozwoliły na dokonanie wyboru konfiguracji połączeń do przetestowania. Kryterium wyboru było nieprzekroczenie wartości 100 V na elemencie czynnym. Warunek ten został spełniony dla konfiguracji posiadających 6 lub więcej podpor dla materiału PSnN-5. Materiał PIN-PMN-PT spełnił ten warunek dla układów posiadających 8 lub więcej podpor. Do dalszych obliczeń zostały przyjęte 2 konfiguracje w celu sprawdzenia wpływu ilości elementów czynnych i sposobu ich połączenia na generowaną moc. Przyjęto konfiguracje o 6 podporach przedstawioną na Rysunku 5.7a i 11 podporach przedstawioną na Rysunku 5.7b. Konfiguracja o 11 podporach posiada 2 elementy czynne połączone szeregowo na podporę. Konfiguracje zostały zastosowane dla materiału PSnN-5 i PIN-PMN-PT w celu porównania wyników. Dalsza symulacja została wykonana za pomocą programu Plecs. Symulacja została wykonana za pomocą schematu zastępczego materiału piezoelektrycznego przedstawionego na Rysunku 5.8a. Materiał piezoelektryczny można zasymulować za pomocą dwóch równoważnych schematów zastępczych. Możliwe schematy zastępcze przedstawia Rysunek 5.8.



Rysunek 5.7. Rozważane sposoby połączeń (opracowanie własne).

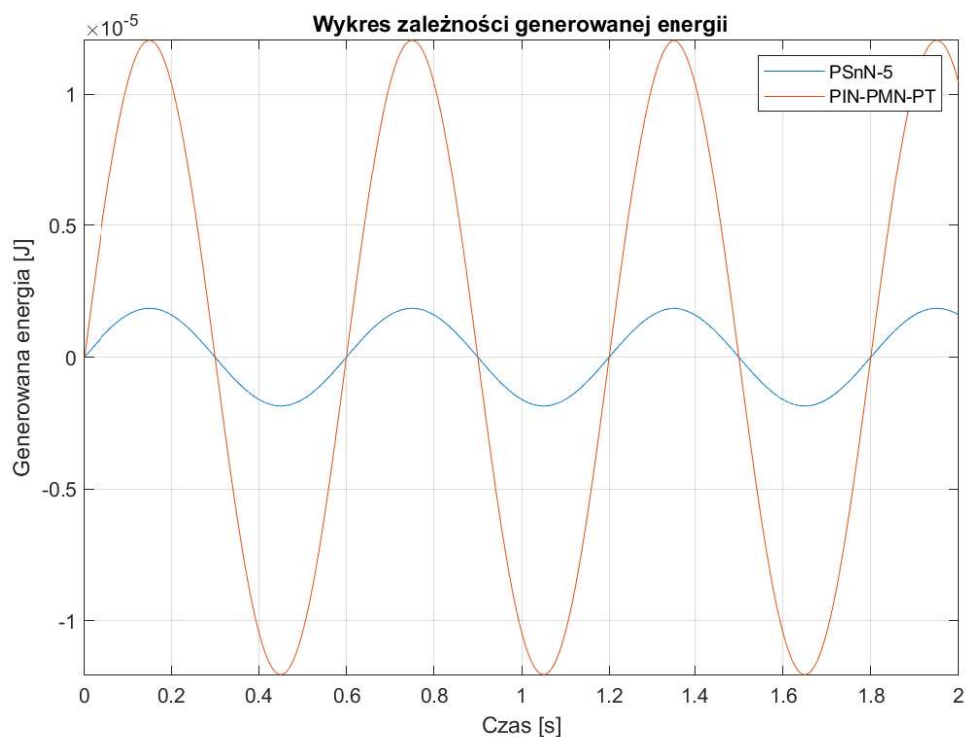


Rysunek 5.8. Schematy zastępcze materiałów piezoelektrycznych (opracowanie własne).

Pojemność kondensatora C_p jest obliczona ze wzoru

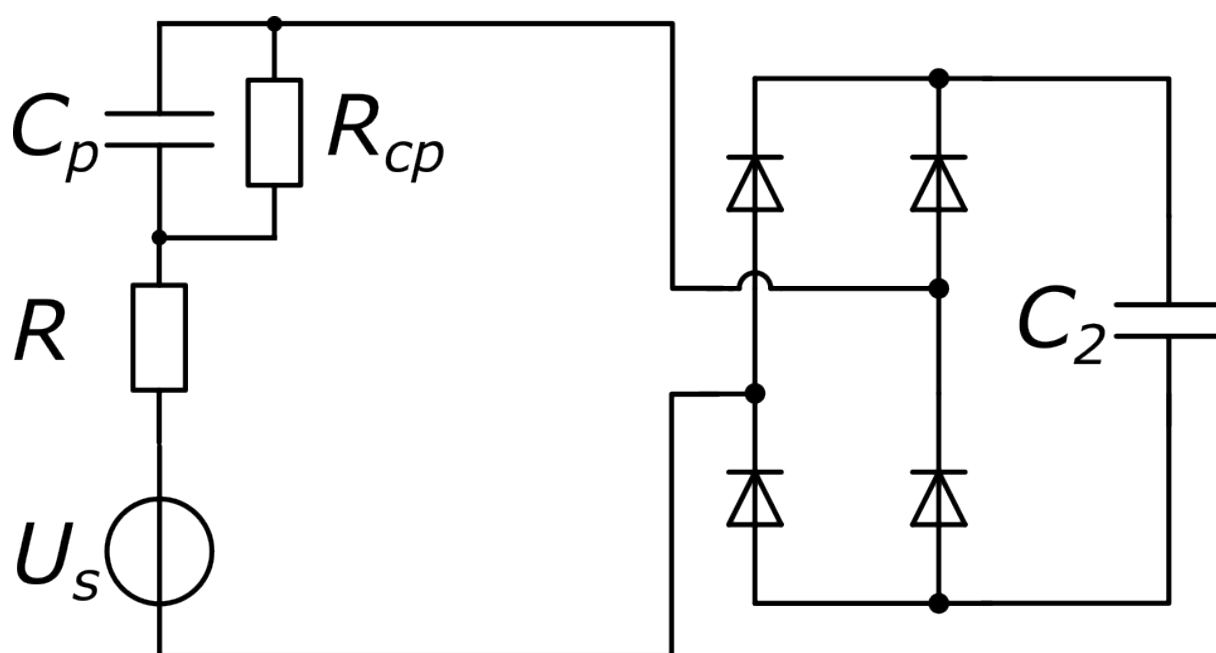
$$C_p = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{h} \quad (5.11)$$

Obliczona maksymalna energia generowana przez pojedynczy przetwornik piezoelektryczny, możliwa do uzyskania przez przechodzącego pieszego jest równa $5,4 \mu\text{J}$ dla materiału PSnN-5, a dla materiału PIN-PMN-PT $120 \mu\text{J}$. Rysunek 5.9 przedstawia energię generowaną przez pojedynczy element piezoelektryczny.



Rysunek 5.9. Przebieg generowanej energii (opracowanie własne).

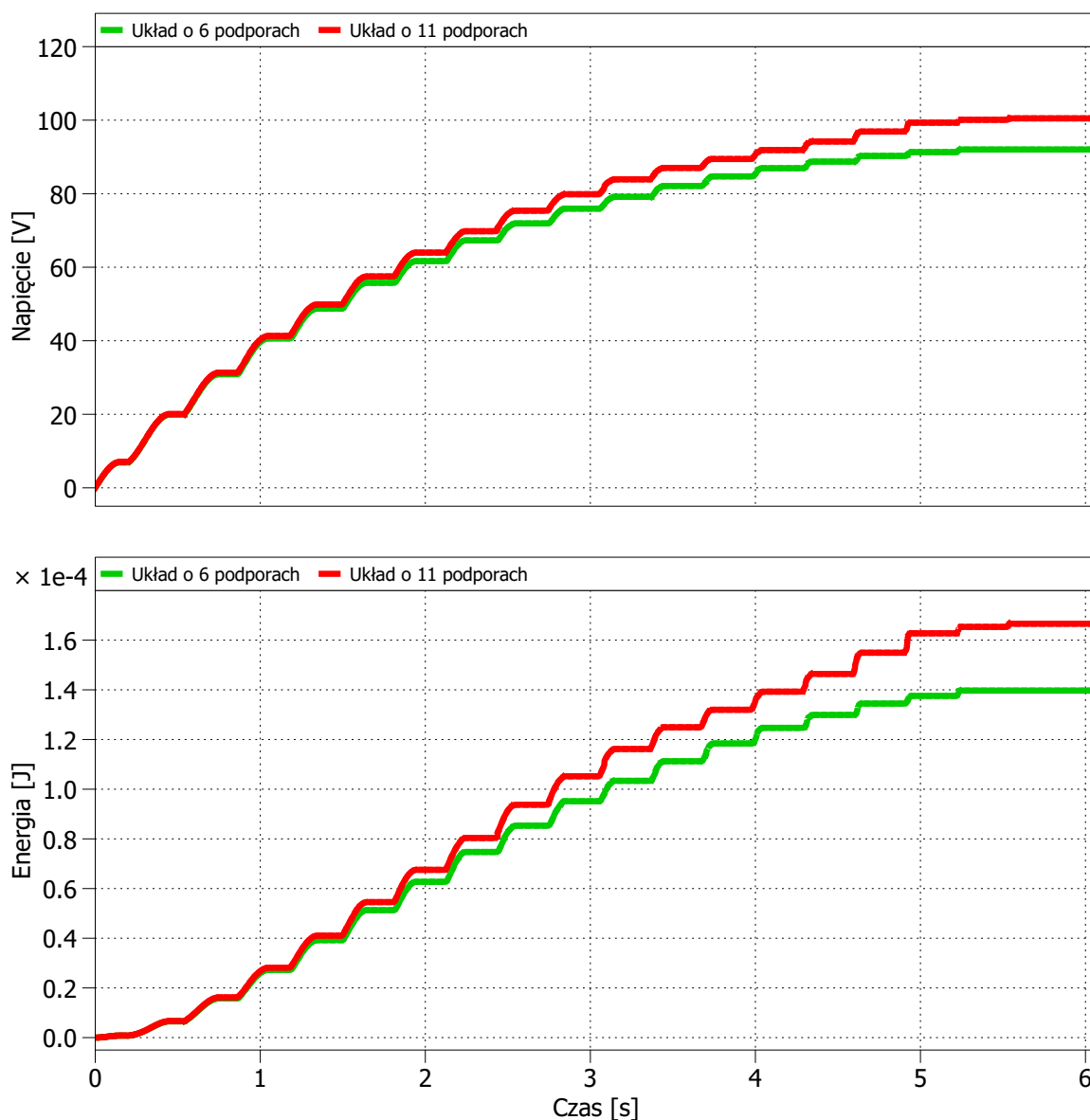
Sprawdzenie możliwości generacji energii przez płytę chodnikową zostało przeprowadzone za pomocą układu z Rysunku 5.10. Przetworniki zostały, poprzez prostownik dwupulsowy, dołączone do kondensatora C_2 magazynującego energię.



Rysunek 5.10. Schemat układu (opracowanie własne).

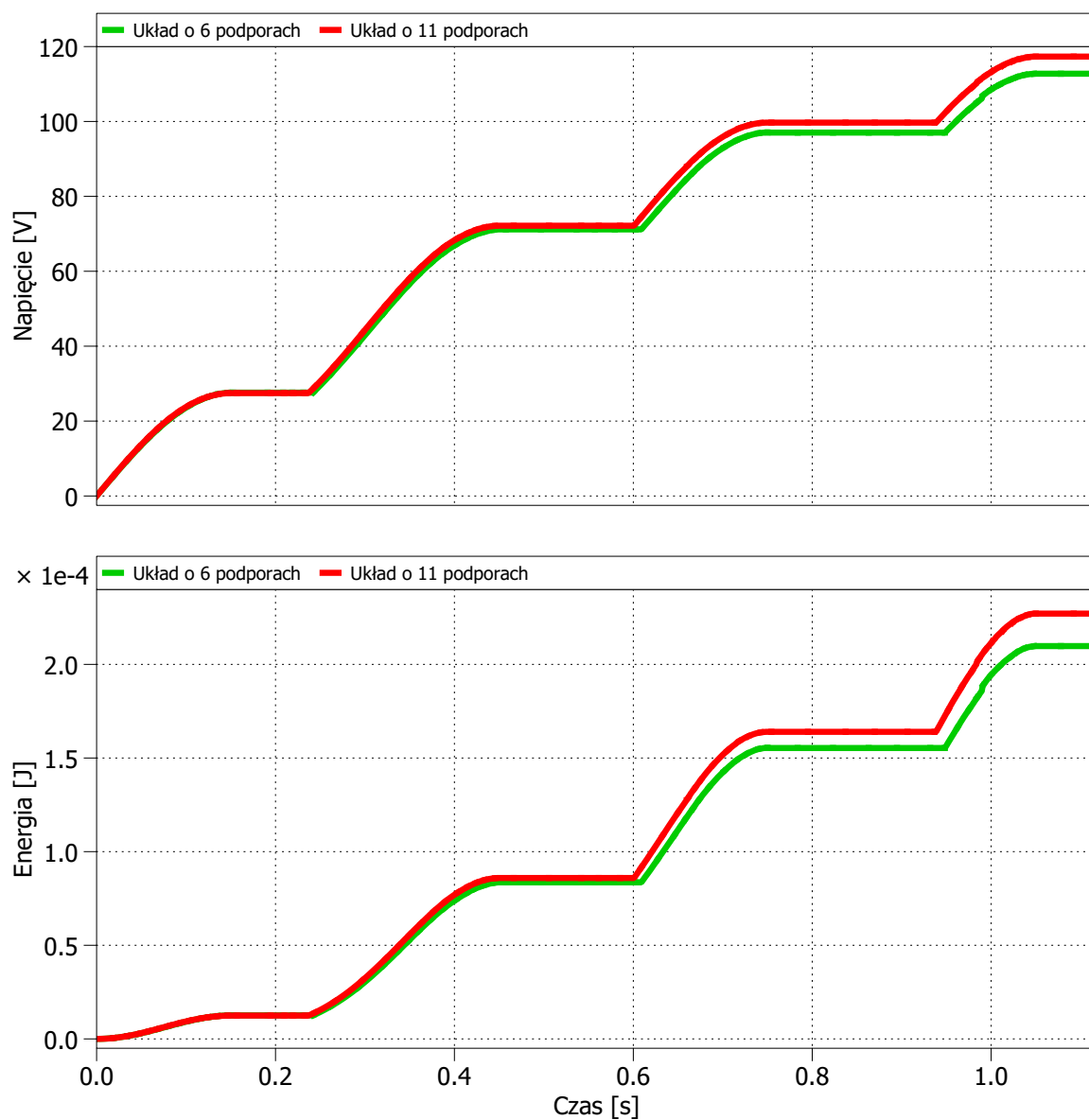
Rezystancja R o wartości $0,01 \Omega$ została dodana do układu w celu zasymulowania rzeczywistego źródła napięcia. Rezystancja R_{cp} reprezentuje upływność kondensatora.

Energia generowana z elementów czynnych jest zmagazynowana w kondensatorze C_2 o pojemności 33nF . Napięcie uzyskane po 5 sekundach działania wymuszenia na przetwornik wykonany z materiału piezoelektrycznego PSnN-5 wyniosło $91,3 \text{ V}$ dla przypadku z 6 podporami i $99,3 \text{ V}$ dla przypadku z 11 podporami. Energia zmagazynowana w tym czasie w kondensatorze C_2 jest równa odpowiednio $137\mu\text{J}$ i $162\mu\text{J}$. Moc generowana przez przetworniki wyniosła $27,4\mu\text{W}$ i $32,4\mu\text{W}$. Wyniki symulacji zostały przedstawione na Rysunku 5.11.



Rysunek 5.11. Przebieg generowanego napięcia i skumulowanej energii w kondensatorze C_2 . Materiał PSnN-5.

Przetwornik piezoelektryczny wykonany z materiału PIN-PMN-PT osiągnął wartość maksymalnego zakładanego napięcia po czasie około 0,75 s dla układu o 11 podporach i 0,95 s dla układu o 6 podporach. Energia zgmagazynowana w tym czasie jest równa dla układu z 6 podporami $163\mu\text{J}$ i 11 podporami $166\mu\text{J}$. Moc generowana w tym wypadku jest równa odpowiednio $174,7\mu\text{W}$ i $217,3\mu\text{W}$. Symulacja przedstawiona jest na Rysunku 5.12.



Rysunek 5.12. Przebieg generowanego napięcia i skumulowanej energii w kondensatorze C_2 . Materiał PIN-PMN-PT.

Rozdział 6

Wnioski końcowe

W temacie przekształcania energii mechanicznej na elektryczną za pomocą przetworników piezoelektrycznych jest bardzo mało materiałów w literaturze technicznej. Niewiele ośrodków naukowych zajmuje się tą tematyką, a opis prowadzonych badań jest bardzo skąpy, chociaż nie jest to temat, który zupełnie nie interesuje naukowców.

Przeprowadzone obliczenia zdolności przetwarzania energii kinetycznej na energię elektryczną za pomocą materiałów piezoelektrycznych wykazały, że ruch osoby pieszej może generować energię elektryczną. Obliczenia wykonano dla standardowej płyty chodnikowej o wymiarach 60 na 60 cm. Z symulacji wynika, że czas magazynowania energii w kondensatorze C_2 (magazynu energii) o pojemności 33 nF, przy ładowaniu go do napięcia około 100 V, dla materiału PSnN-5, jest równy około 5 sekund. Materiał ten w zależności od przyjętej liczby podpór płyty chodnikowej generuje moc na poziomie od $27,4\mu\text{W}$ do $32,4\mu\text{W}$. Materiał PIN-PMN-PT wykazuje lepszą zdolność do przetwarzania energii kinetycznej na energię elektryczną. Symulacje materiału PIN-PMN-PT dla takich samych warunków jak dla materiału PSnN-5 wykazały, że czas ładowania kondensatora C_2 był poniżej 1 s. Moc wytwarzana przez generator wykonany z materiału PIN-PMN-PT w zależności od liczby podpór jest równa od $174,7\mu\text{W}$ do $217,3\mu\text{W}$.

Rozwój generatorów przetwarzających energię kinetyczną na energię elektryczną jest zależny od wytwarzania nowych materiałów piezoelektrycznych, dedykowanych do tych przekształtników. Nowe materiały o lepszych właściwościach piezoelektrycznych powinny przyczynić się do rozwoju tej technologii. W obecnym stanie technologii zwiększenie efektywności przekształcania energii mechanicznej na elektryczną, przez przetworniki piezoelektryczne, jest możliwe przez oddziaływanie na nie większymi siłami. Na przykład wykorzystując energię kinetyczną jadących pojazdów. W tym momencie mała ilość prowadzonych badań i duży koszt materiałów piezoelektrycznych hamują rozwój tej technologii.

Bibliografia

- [1] Arnau, V. A., *Piezoelectric Transducers and Applications*. Springer, 2013.
- [2] Grzybek, D., „Aktuatory piezoelektryczne w inteligentnych kratownicach”, *Pomiary Automatyka Robotyka*, t. 11, nr. 11, s. 63–67, list. 2011.
- [3] Hassa, R., Mrzigod, J. i Nowakowski, J., *Podręczny słownik chemiczny*. Katowice: Videograf II, 2004, s. 67, ISBN: 83-7183-240-0.
- [4] Hilczer, B. i Małecki, J., *Elektrety i piezopolimery*. Wydawnictwo Naukowe PWN, 1992.
- [5] „IEEE Standard on Piezoelectricity”, *ANSI/IEEE Std 176-1978*, s. 1–58, 1978. DOI: 10.1109/IEEESTD.1978.8941331.
- [6] Inc., P., *PowerFloor - Capture energy from footsteps to generate usable, local electricity!*, Accessed: 2025-01-23. adr.: https://www.powerleap.net/page_id_32/.
- [7] Jelonek, J., *Czy warto liczyć kroki?*, <https://bieganie.pl/zdrowie/czy-warto-liczyc-kroki/>.
- [8] Justyna Bolek-Adamek, mgr, *10 000 kroków dziennie*, <https://awf.gda.pl/2022/06/10-000-krokow-dziennie-chodzenie-jest-proste-i-nic-nie-kosztuje/>.
- [9] Laio, W.-S., Wang, S.-H., Yao, W.-S. i Tsai, M.-C., „Analysis and design of electric power generation with PZT ceramics on low-frequency”, w *2008 IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2008, s. 1–5. DOI: 10.1109/ICIT.2008.4608561.
- [10] Maliński, J., *Droga pod napięciem*, Accessed: 2025-01-23, 2017. adr.: <https://bzg.pl/poradnik/artukul/droga-pod-napieciem/id/15867>.
- [11] Pavegen, *Step Into The Future Of Smart Cities*, Accessed: 2025-01-23, 2025. adr.: https://pavegen.lpages.co/smart-cities/?_hstc=87082119.8c3d39084a2abcc0e9b331004d0476be.1737569861132.1737569861132.1737628052421.2&__hssc=87082119.2.1737628052421&__hsfp=2725214178.
- [12] Polska Agencja Prasowa. „Raport: Otyłość powoduje takie same skutki jak wzrost liczby ludności”. Dostęp: 29 stycznia 2025. (2012), adr.: <https://scienceinpoland.pap.pl/aktualnosci/news,390457,raport-otylosc-powoduje-takie-same-skutki-jak-wzrost-liczby-ludnosci.html>.
- [13] Romero, E. i Rincon, A., „Piezoelectric load measurement model in knee implants”, w *2012 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2012, s. 511–514. DOI: 10.1109/EMBC.2012.6345980.
- [14] Sienkiewicz, Ł., „Koncepcja, realizacja i analiza sensora/aktuatora piezoelektrycznego do pomiaru procesu starzenia się ludzkiej skóry”, prac. dokt., Politechnika Gdańska, 2016.

- [15] Songsukthawan, P. i Jettanasen, C., „Generation and storage of electrical energy from piezoelectric materials”, w *2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017 - ECCE Asia)*, 2017, s. 2256–2259. DOI: 10.1109/IFEEC.2017.7992403.
- [16] Śliwiński, A., *Ultradźwięki i ich zastosowania*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2001.
- [17] Triono, A. D. i in., „Utilization of Pedestrian Movement on the Sidewalk as a Source of Electric Power for Lighting Using Piezoelectric Censors”, w *2018 3rd IEEE International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE)*, 2018, s. 241–246. DOI: 10.1109/ICITE.2018.8492624.
- [18] Wiciak, J., *Redukcja drgań i dźwięków strukturalnych z wykorzystaniem elementów piezoelektrycznych o zmiennym kształcie i skokowej zmianie własności*, pol. Kraków: Wydawnictwa AGH, 2013, ISBN: 9788374646161.
- [19] Xu, M., Wen, Y., Shi, Z., Xiong, C., Zhu, F. i Yang, Q., „Piezoelectric Biopolymers: Advancements in Energy Harvesting and Biomedical Applications”, *Polymers*, t. 16, nr. 23, s. 3314, 2024, Submission received: 25 September 2024, Revised: 15 November 2024, Accepted: 25 November 2024, Published: 27 November 2024. DOI: 10.3390/polym16233314.
- [20] Zarycka, A., Zachariasz, R., Czerwiec, M. i Ilczuk, J., „Struktura i właściwości elektryczne ceramiki PZT otrzymywanej metodą żolowo-żelową”, *Ceramika/Ceramics*, t. XX, 2005, Papers of the Commission on Ceramic Science, Polish Ceramic Bulletin, ISSN: 0860-3340.
- [21] *Zawór proporcjonalny ciśnienia VEAA-B-3-D2-F-A4-1R1*, FESTO.

Spis rysunków

2.1	Zachowanie układu molekularnego w stanie spoczynku i podczas działania siły. (Opracowanie własne na podstawie [1].)	12
2.2	Efekt piezoelektryczny prosty.(Opracowanie własne na podstawie [1].)	13
2.3	Reakcja materiału piezoelektrycznego na pole elektryczne (Opracowanie własne).	16
2.4	Schemat zastępczy materiały piezoelektrycznego Butterworth-Van Dyke (Opracowanie własne).	17
2.5	Model Masona przetwornika piezoelektrycznego w stanie rezonansu (Opracowanie własne na podstawie [13]).	17
5.1	Element piezoelektryczny (opracowanie własne).	28
5.2	Rozważany schemat zastępczy materiału piezoelektrycznego (Opracowanie własne na podstawie [9]).	29
5.3	Wykres zmiany siły działającej na podporę w zależności od ilości podpór (opracowanie własne).	30
5.4	Wykres zmiany napięcia w zależności od ilości podpór (opracowanie własne).	32
5.5	Wykres zmiany napięcia w zależności od ilości podpór. Zmiana średnicy materiału (opracowanie własne).	33
5.6	Wykres zmiany napięcia w zależności od ilości podpór. Zmiana wysokości materiału (opracowanie własne).	33
5.7	Rozważane sposoby połączeń (opracowanie własne).	34
5.8	Schematy zastępcze materiałów piezoelektrycznych (opracowanie własne).	35
5.9	Przebieg generowanej energii (opracowanie własne).	36
5.10	Schemat układu (opracowanie własne).	37
5.11	Przebieg generowanego napięcia i skumulowanej energii w kondensatorze C_2 . Materiał PSnN-5.	38
5.12	Przebieg generowanego napięcia i skumulowanej energii w kondensatorze C_2 . Materiał PIN-PMN-PT.	39

Spis tabel

3.1	Właściwości podstawowych materiałów piezoceramicznych (na podstawie [18]). . . .	20
5.1	Założenia.	29
5.2	Parametry materiałów (opracowanie własne).	31