

Materiały Elektroniki i Przetwarzania Energii

Ćwiczenie 2

Piezoelektryczne układy odzyskiwania energii

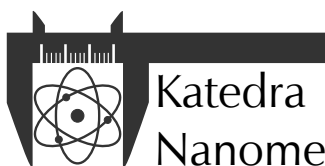
dr inż. Arkadiusz Dąbrowski (arkadiusz.dabrowski@pwr.edu.pl)

Zagadnienia do przygotowania

1. Rodzaje energii oraz metody jej pozyskiwania i przetwarzania na energię elektryczną
2. Schemat blokowy układu do pozyskiwania energii
3. Zjawisko piezoelektryczne
4. Zastosowanie piezoelektryczności
5. Zależności między przemieszczeniem, prędkością i przyspieszeniem
6. Definicje: Wartość chwilowa, wartość skuteczna, amplituda sygnału sinusoidalnego, sprawność przetwarzania energii

Spis treści

1	Wstęp	1
1.1	Metody pozyskiwania i konwersji energii	1
1.2	Piezoelektryczne przetworniki do pozyskiwania energii	2
1.3	Zależności między przemieszczeniem, prędkością i przyspieszeniem	4
2	Stanowisko pomiarowe	4
3	Przebieg ćwiczenia	5
3.1	Przygotowanie stanowiska	5
3.2	Kalibracja czujnika odległości	5
3.3	Wyznaczenie charakterystyki częstotliwościowej przetwornika	6
3.4	Wyznaczenie charakterystyki mocowej przetwornika	6
3.5	Wyznaczenie sprawności przetwarzania energii	7

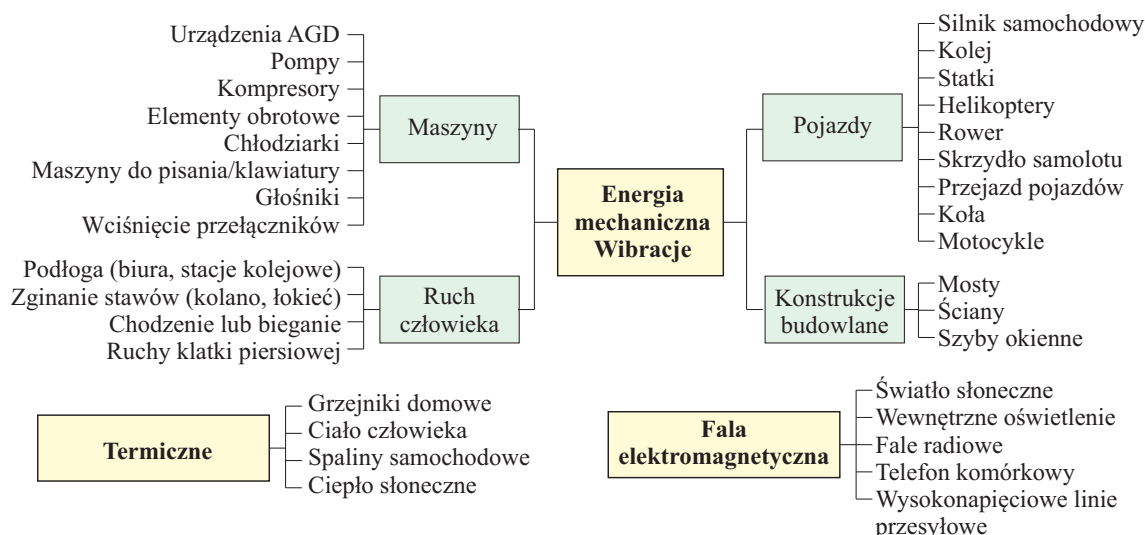


Katedra
Nanometrologii

Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów
Politechnika Wrocławska

1 Wstęp

Koncepcja pozyskiwania energii elektrycznej z energii rozpraszanej i traconej w środowisku określa się mianem energy harvesting, rozumianego jako przechwytywanie energii w różnej postaci i jej konwersja na energię elektryczną celem wykorzystania w zasilaniu różnorodnych urządzeń elektronicznych. Trzema głównymi rodzajami energii traconej w środowisku, możliwej do wykorzystania w przetwarzaniu na energię elektryczną są energia mechaniczna w postaci wibracji, ciepło (różnica temperatury) oraz fale elektromagnetyczne. Przykłady potencjalnych źródeł energii dla pozyskiwania energii dla trzech wymienionych kategorii pokazano na rysunku 1.

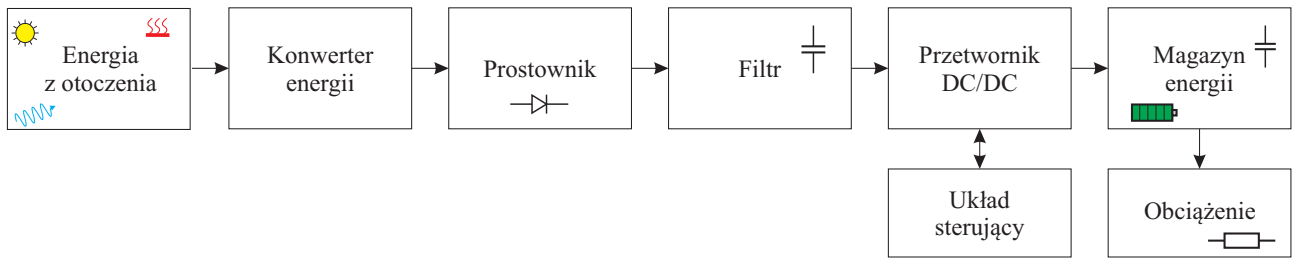


Rysunek 1: Przykłady źródeł energii traconej w środowisku wykorzystywane w pozyskiwaniu energii elektrycznej (na podstawie [3])

1.1 Metody pozyskiwania i konwersji energii

Przetwarzanie energii mechanicznej na elektryczną może być zrealizowane w oparciu o konwersję elektromagnetyczną, piezoelektryczną lub elektrostatyczną. Konwersja elektromagnetyczna najczęściej opiera się ruchu liniowym lub obrotowym zestawu cewek indukcyjnych względem trwałych magnesów. Konwersja piezoelektryczna polega na wprowadzeniu odkształcenia do przetwornika piezoelektrycznego w wyniku wibracji lub przemieszczenia. Konwersja elektrostatyczna polega na pozyskiwaniu ładunku powstającego przy zmianie odległości między ruchomymi spolaryzowanymi okładkami kondensatora. Przekształcanie energii termicznej na prąd elektryczny najczęściej opiera się na zjawisku Seebecka, tj. zjawisku powstawania siły elektromotorycznej (SEM) w parze materiałów różniących się strukturą elektronową przy obecności gradientu temperatury. Jeśli źródłem energii jest fala elektromagnetyczna, to w zależności o częstotliwości fali wykorzystywane są różne metody konwersji. Dla światła wykorzystuje się ogniwa fotowoltaiczne, dla fal radiowych różnorodne anteny wąsko- lub szerokopasmowe. Ogólny schemat blokowy systemu pozyskiwania energii pokazano na rysunku 2.

Przetwarzanie energii wibracji, zarówno sinusoidalnie zmiennych czy w postaci nieokreślonych uderzeń i impulsów przy wykorzystaniu przetwarzania elektromagnetycznego, piezoelektrycznego oraz elektrostatycznego wymaga zastosowania elementu prostującego. Podobnie w wypadku pozyskiwania energii z fal radiowych. W generatorach termicznych i fotowoltaicznych sygnał wyjściowy jest stałoprądowy, co eliminuje konieczność użycia prostownika. W nielicznych przypadkach napięcie z konwertera energii lub po wyprostowaniu ma użyteczne



Rysunek 2: Schemat blokowy systemu pozyskiwania energii.

wartości, najczęściej jednak konieczne jest zastosowanie bloku przetwarzania napięcia (zwykle podwyższania) do poziomu użytecznego dla dołączonego obciążenia, np. systemu mikroprocesorowego. Zwykle ilości energii są na tyle małe, że moc w obciążeniu może być wykorzystywana okresowo tylko przez niewielki czas, a przez pozostały czas odbywa się powolne ładowanie magazynu energii do użytecznego poziomu napięcia.

1.2 Piezoelektryczne przetworniki do pozyskiwania energii

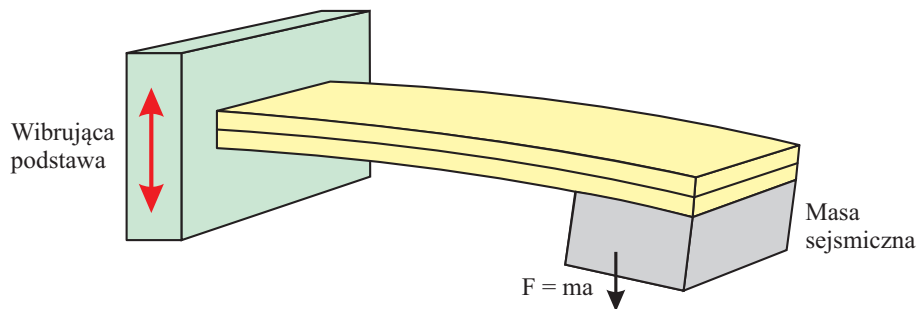
Zjawisko piezoelektryczne jest podstawą działania piezoelektrycznych generatorów energii. Polega ono na powstawaniu indukcji elektrycznej na powierzchni materiału w wyniku odkształcenia. Równaniem opisującym wartość indukcji elektrycznej jest (1)

$$D = \epsilon^T \cdot E + d \cdot T \quad (1)$$

gdzie ϵ^T – tensor przenikalności elektrycznej dla stałego naprężenia [F/m], d – tensor modułu piezoelektrycznego [C/m]), E – natężenie pola elektrycznego [V/m], T – naprężenie [Pa]). W sytuacji braku zewnętrznego pola elektrycznego $E=0$ równanie (1) przyjmuje postać (2)

$$D = d \cdot T \quad (2)$$

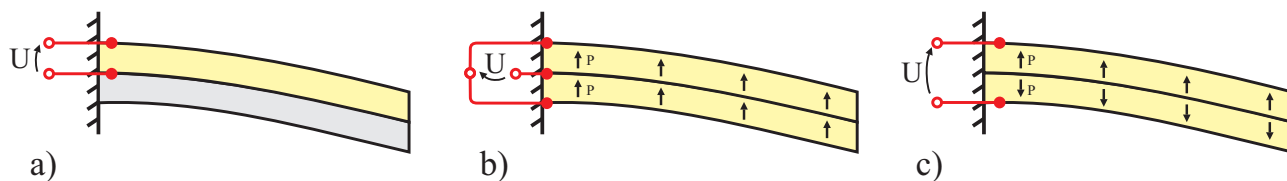
Najczęściej wykorzystywanymi strukturami w roli generatorów piezoelektrycznych są tzw. belki wspornikowe, tj. belki przytwierdzone na jednym końcu i swobodne na drugim końcu. Na swobodnym końcu belki zwykle przymocowana jest tzw. masa sejsmiczna która w łatwy sposób pozwala na dostosowanie częstotliwości rezonansowej generatora do częstotliwości wzbudzenia z otoczenia. Jeśli zakres częstotliwości wibracji obejmuje szersze spektrum, w celu zwiększenia efektywności pozyskiwania energii możliwe jest zastosowanie kilku przetworników różniących się częstotliwością rezonansową. Budowę przetwornika piezoelektrycznego typu belkowego pokazano na rysunku 3. Belki wykorzystywane jako generatory mogą być zbudowane dwojako – mogą



Rysunek 3: Budowa generatora piezoelektrycznego w postaci belki wspornikowej.

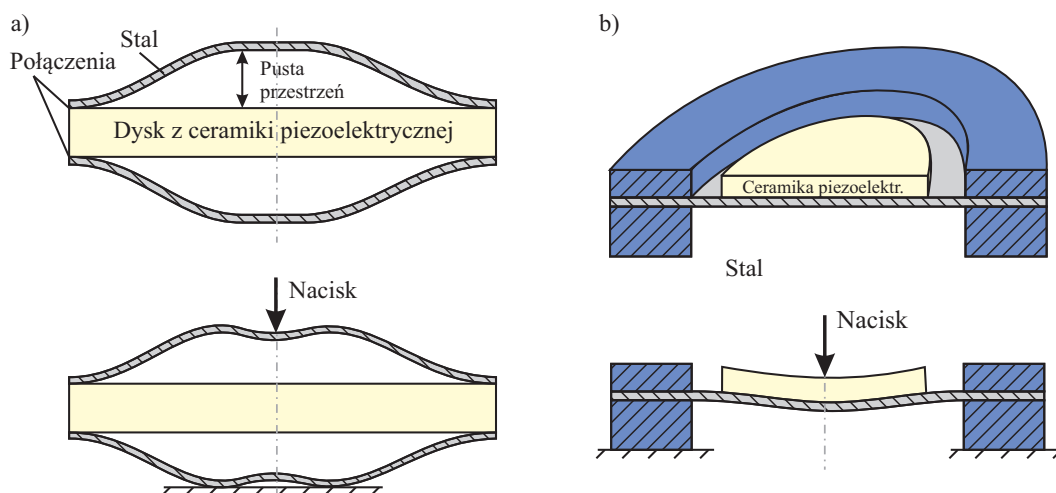
składać się z jednej warstwy materiału o własnościach piezoelektrycznych i jednej warstwy materiału pasywnego (np. stal, krzem) lub dwóch warstw piezoelektrycznych. Pierwszy typ to tzw.

unimorf (ang. unimorph), natomiast drugi typ to bimorf (ang. bimorph). Można rozróżnić 2 rodzaje bimorfów różniące się sposobem polaryzacji warstw materiału piezoelektrycznego – tzw. bimorf szeregowy i równoległy. Konstrukcję tego typów przetworników porównano na rysunku 4. Dla tych samych wymiarów i materiału przetwornika, konfiguracja szeregową cechuje się dwu-



Rysunek 4: Konfiguracja belek stosowanych jako generatory: unimorf (a), bimorf równoległy (b) i bimorf szeregowy (c).

krotnie wyższą wartością napięcia wyjściowego w porównaniu do konfiguracji szeregowej oraz prostszym montażem ze względu na brak konieczności dostępu do wewnętrznej elektrody. Te dwie cechy powodują, że bimorf szeregowy jest częściej wykorzystywany. W pozyskiwaniu energii ze źródeł innych niż wibracje, takich jak na przykład nacisk wywołany krokami człowieka lub nacisk przejeżdżającego pojazdu, stosuje się przetworniki naciskowe, do których można zaliczyć elementy typu talerzowego oraz membranowego. Oba typy w stanie neutralnym i pod naciskiem pokazano na rysunku 5. Materiałami piezoelektrycznymi stosowanymi do wytwarzania



Rysunek 5: Generatory typu naciskowego: talerzowy (a) i membranowy (b).

generatorów są ceramiki piezoelektryczne o wysokich wartościach modułu piezoelektrycznego i wysokiej wartości współczynnika sprzężenia elektromechanicznego, np. PZT $PbZrTiO_3$, tytanian baru $BaTiO_3$, tytanian ołowiu $PbTiO_3$, KNN ($K_{0,5}Na_{0,5}NbO_3$), BNT ($Bi_{0,5}Na_{0,5}TiO_3$) i inne roztwory stałe o podobnej strukturze. Popularne są także materiały organiczne o właściwościach piezoelektrycznych, takie jak polimer PVDF (polifluorek winylidenu), polimer PLLA (kwas polimlekowy). Moc wytwarzana przez generatory piezoelektryczne mieści się w zakresie pojedynczych μW do dziesiątek mW. Zależy ona między innymi od rozmiaru generatora, zastosowanych materiałów i źródła pobudzenia. Praca w zakresie częstotliwości wibracji zbliżonej do częstotliwości rezonansowej generatora pozwala na uzyskanie najwyższych wartości mocy. Przykładowo moc generowana przez generator oparty na PZT wzbudzany wibracjami pochodzącymi od opony samochodowej przy prędkości 100 km/h sięgają 0,6 mW. W przypadku energii pochodzącej z wiatru, wyższe wartości mocy można uzyskać za pomocą przetworników z PVDF niż z PZT z powodu ich niewielkiej sztywności [4].

1.3 Zależności między przemieszczeniem, prędkością i przyspieszeniem

Dla ciała którego przemieszczenie x opisane jest zależnością sinusoidalnie zmienną, wartość chwilowa jego położenia w czasie t opisana jest zależnością (3)

$$x(t) = A \sin(\omega t) \quad (3)$$

gdzie: A – amplituda przemieszczenia, ω – częstość kołowa ($\omega = 2\pi f$) Prędkość v jest pierwszą pochodną przemieszczenia x , a zatem wyrażenie opisujące wartość chwilową wartości prędkości przyjmie postać (4)

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} = A\omega \cos(\omega t) \quad (4)$$

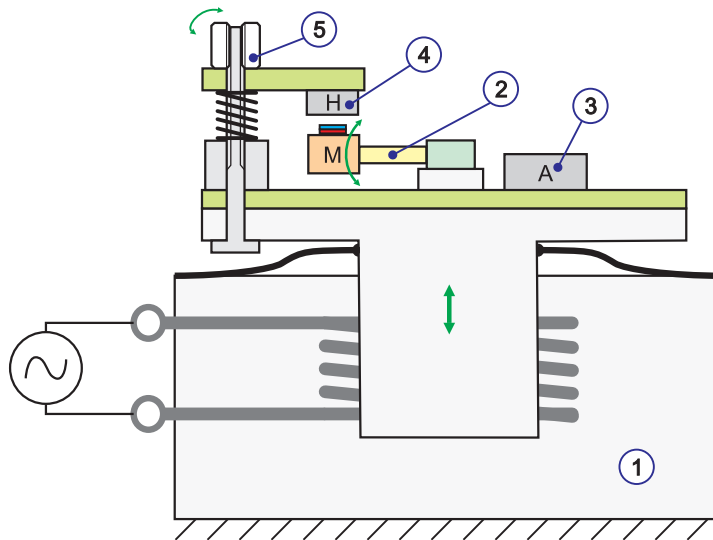
Przyspieszenie a jest drugą pochodną przemieszczenia x , zatem wartość chwilowa przyspieszenia przyjmie postać (5)

$$v(t) = \frac{d^2x(t)}{dt} = -A\omega^2 \sin(\omega t) \quad (5)$$

Znajomość wartości amplitudy przemieszczenia, prędkości lub przyspieszenia oraz częstotliwości oscylacji jest równoznaczne ze znajomością wartości amplitudy przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia.

2 Stanowisko pomiarowe

Schemat stanowiska pomiarowego pokazano na rysunku 6. Bazą stanowiska jest wzbudnik elektrodynamiczny pozwalający na wytwarzanie vibracji o zadanej częstotliwości i amplitudzie. Na wibrującym stoliku wzbudnika jako element pozyskiwania energii zamontowano przetwornik piezoelektryczny w postaci belki z masą sejsmiczną na jej swobodnym końcu. Jednym z badanych elementów jest polimerowy przetwornik wykonany z materiału PVDF (1005939-1, MiniSense 100, TE CONNECTIVITY). Akcelerometr zamontowany na wibrującym stoliku umożliwia określenie przyspieszenia generowanego przez wzbudnik.



Rysunek 6: Schemat stanowiska pomiarowego: 1 – Wzbudnik elektrodynamiczny; 2 – Przetwornik piezoelektryczny; 3 – Akcelerometr do pomiaru przyspieszenia płaszczyzny wzbudzenia vibracji; 4 – Czujnik odległości; 5 – Śruba regulacji pozycji czujnika odległości względem przetwornika.

Zastosowano akcelerometr analogowy ADXL325 o czułości 174 mV/g i zakresie pomiarowym $\pm 5g$ ($1g = 9,81 \text{ m/s}^2$). W celu monitorowania ruchu swobodnego końca belki względem stolika, stanowisko wyposażono w czujnik odległości oparty na zjawisku Halla. By umożliwić wykorzystanie czujnika Halla do masy sejsmicznej dodatkowo zamontowany został magnes. Wskazania zastosowanego czujnika Halla (DRV5053OA, Texas Instruments) są liniową funkcją wartości indukcji magnetycznej. Śruba regulacji położenia czujnika Halla względem magnesu zamontowanego na belce pozwala na wyznaczenie funkcji przetwarzania czujnika, tj. określenie funkcji opisującej zależność napięcia wyjściowego czujnika od zmian odległości magnes – czujnik. Docelowo funkcja odwrotna wyznaczona w trakcie kalibracji pozwoli na określenie w jaki sposób zmienia się odległość między masą sejsmiczną i wibrującą podstawą w trakcie eksperymentów. Znajomość przyspieszenia wibrującej podstawy, przyspieszenia swobodnego końca belki względem podstawy oraz mocy elektrycznej generowanej przez przetwornik piezoelektryczny są konieczne do wyznaczenia efektywności konwersji energii wibracji na energię elektryczną.

3 Przebieg ćwiczenia

3.1 Przygotowanie stanowiska

1. Podłączyć zasilanie symetryczne $\pm 20 \text{ V}$ do makiety. Na obu kanałach zasilacza nastawić ograniczenie prądowe 0,5 A.
2. Wyjście akcelerometru dołączyć odpowiednio do kanału 1 oscyloskopu skonfigurowanego do pracy w trybie sprzężenia AC. Czułość kanału oscyloskopu nastawić wstępnie na 0,5 V/div, a w razie potrzeby dostosować w trakcie pomiarów.
3. Wyjście czujnika odległości dołączyć do woltomierza.
4. Do wejścia generatora dołączyć generator przebiegów (nastawić przebieg sinusoidalny, częstotliwość 40 Hz, amplituda 100 mV p-p)

3.2 Kalibracja czujnika odległości

Uzyskana w wyniku kalibracji funkcja przetwarzania pozwoli w trakcie realizacji ćwiczenia na wykonanie konwersji sygnału napięcia wyjściowego na rzeczywiste przemieszczenie masy sejsmicznej względem wibrującej powierzchni wzbudnika.

1. Włączyć zasilanie makiety. W trakcie kalibracji wyjście generatora pozostaje wyłączone.
2. Obracając śrubę oznaczoną na schemacie jako „5” w prawo, maksymalnie przybliżyć czujnik odległości do magnesu zamocowanego na masie sejsmicznej przetwornika. Zakładamy że ta położenie masy sejsmicznej to pozycja $X=0$. Za pomocą woltomierza odczytać wartość napięcia wyjściowego czujnika odległości.
3. Obracając śrubę „5” w lewo z krokiem co pół obrotu (zastosowano śrubę z gwintem M3, dla której jeden pełen obrót powoduje przesunięcie czujnika o 0,5 mm) należy odczytywać kolejne wartości napięcia wyjściowego czujnika odległości. Należy przyjąć, że pozycja początkowa z punktu a) to pozycja $X = 0$. Pomiar wykonać aż osiągnie się odległość 2,5 mm (5 pełnych obrotów śruby).
4. Nastawić śrubę „5” w pozycji środkowej (tzn. obrócić w prawo się o 2,5 obrotu od ostatniej pozycji lub obrócić do pozycji odpowiadającej połowie zakresu wskazań napięcia czujnika odległości).
5. Wykorzystując oprogramowanie Origin, wyznaczyć funkcję opisującą zależność względnie położenia masy względem wibrującej podstawy od napięcia wyjściowego czujnika odległości $X = f(U_H)$. Należy zastosować dopasowanie wielomianem 2-go rzędu.

3.3 Wyznaczenie charakterystyki częstotliwościowej przetwornika

Pomiary charakterystyki częstotliwościowej pozwala na wyznaczenie częstotliwości wzbudzenia generatora piezoelektrycznego, dla którego uzyskuje się największą moc wyjściową.

1. Dokonać zmian w połączeniach makiety. Wyjście przetwornika piezoelektrycznego dołączyć do woltomierza z pomiarem wartości skutecznej napięcia. Wyjście czujnika odległości dołączyć do kanału 2 oscyloskopu, skonfigurowanego do pracy ze sprzężeniem stałoprądowym DC. Czułość kanału 2 oscyloskopu nastawić zgodnie z uzyskanymi wynikami w punkcie 3.2.
2. Za pomocą opornicy dekadowej ustalić obciążenie przetwornika piezoelektrycznego równe $1\text{ M}\Omega$.
3. Włączyć wyjście generatora. W zakresie częstotliwości 40 Hz do 100 Hz z krokiem 5 Hz zmierzyć wartość skuteczną napięcia wyjściowego $U_{WY_{RMS}}$ przetwornika przy wartości skutecznej przyspieszenia równego $1g_{RMS}$. Pomiar należy przeprowadzić w taki sposób, by po każdej zmianie częstotliwości wzbudzenia należy dokonać regulacji amplitudy sygnału wyjściowego generatora pozwalającej na uzyskanie przyspieszenia $1g_{RMS}$. Zanotować wartość nastawy amplitudy sygnału zadanej na generatorze dla każdej częstotliwości pomiaru.
4. Na podstawie uzyskanych wyników określić wartość częstotliwości rezonansowej przetwornika piezoelektrycznego.
5. Powtórzyć pomiary z punktu 3.3.3 w pobliżu częstotliwości rezonansowej ($\pm 5\text{ Hz}$) z krokiem $0,5\text{ Hz}$ z zachowaniem stałej wartości przyspieszenia $1g_{RMS}$. Po zakończeniu serii pomiarowej wyłączyć wyjście generatora.
6. Na podstawie danych z punktów 3.3.3 i 3.3.5 wykreślić charakterystykę $U_{WY_{RMS}}$ od częstotliwości wzbudzenia
7. Wyznaczyć dokładną wartość częstotliwości rezonansowej f_{REZ} oraz szerokość pasma 3dB oraz obliczyć dobroć układu rezonansowego.

3.4 Wyznaczenie charakterystyki mocowej przetwornika

Charakterystyka mocowa przetwornika pozwala na określenie wartości dołączonego obciążenia, dla którego uzyskuje się najwyższą wartość mocy wyjściowej, innymi słowy pozwala na określenie wartości obciążenia przy dopasowaniu do impedancji generatora piezoelektrycznego.

1. Na generatorze nastawić wartość częstotliwości wzbudzenia równą f_{REZ} . Amplitudę sygnału dobrać tak by uzyskać przyspieszenie równe $1g_{RMS}$ (można nastawić wartość określoną przy realizacji punktu 3.3.5). Włączyć wyjście generatora.
2. Pomiar napięcia wyjściowego przetwornika piezoelektrycznego wykonywa za pomocą woltomierza z pomiarem wartości skutecznej napięcia.
3. Za pomocą opornicy dekadowej zmieniać wartość rezystancji obciążenia R_L przetwornika piezoelektrycznego w zakresie od $100\text{ k}\Omega$ do $10\text{ M}\Omega$. Krok pomiaru dobrać tak, by uzyskać 6 do 10 punktów pomiarowych na każdą dekadę. Dla każdej wartości R_L odczytać wartość $U_{WY_{RMS}}$ przetwornika. Po zakończonej serii pomiaru wyłączyć wyjście generatora. Obliczyć rzeczywistą wartość obciążenia, uwzględniając wartość impedancji wejściowej woltomierza.
4. Dla każdego z uzyskanych punktów pomiarów wyznaczyć wartość mocy wydzielanej w rzeczywistym obciążeniu.
5. Wykreślić wartość mocy wyjściowej od rzeczywistego obciążenia (z uwzględnieniem rezystancji wejściowej woltomierza). Jeśli to możliwe, określić wartość $R_{LP_{MAX}}$ w punkcie maksymalnej mocy.

3.5 Wyznaczenie sprawności przetwarzania energii

Sprawność przetwarzania określa efektywność z jaką zachodzi konwersja energii wejściowej na energię wyjściową wydzielaną w obciążeniu. W pomiarze efektywności przetwarzania konieczne jest pozyskanie informacji o wzbudzeniu oraz reakcji obiektu na to wzbudzenie. W opisanej procedurze pozyskuje się dane o wzbudzeniu na podstawie wskazań akcelerometru, natomiast o reakcji przetwornika piezoelektrycznego na podstawie wskazań czujnika przemieszczenia względem wibrującej podstawy przetwornika.

1. Za pomocą generatora nastawić wartość częstotliwości wzbudzenia równą f_{REZ} . Włączyć wyjście generatora. Amplitudę generatora dobrać tak, by uzyskać przyspieszenie równe około $1g_{RMS}$. Nastawić obciążenie równe $R_{LP_{MAX}}$.
2. Przy wyłączonym wyjściu generatora sygnału, upewnić się, że pozycja śruby 5 jest ustawiona tak, by na czujnik położenia był w odległości 1,25 mm od magnesu na masie sejsmicznej (na podstawie charakterystyki z p. 3.2.5).
3. Załączyć wyjście generatora sygnału. Dostosować czułość kanałów oscyloskopu, a następnie za pomocą oprogramowania do akwizycji danych, zarejestrować przebiegi sygnałów napięcia wyjściowego czujnika odległości oraz przebiegu przyspieszenia. Z oscyloskopu odczytać wartość skuteczną przyspieszenia wzbudzenia oraz z woltomierza wartość skuteczną napięcia wyjściowego przetwornika piezoelektrycznego. Po pomyślnym pobraniu danych wyłączyć generator.
4. W oprogramowaniu Origin, przeliczyć przebieg napięcia wyjściowego czujnika odległości na rzeczywiste wartości przemieszczenia masy sejsmicznej na podstawie zależności matematycznej uzyskanej z dopasowania wykonanego w p. 3.2.5). Następnie wyznaczyć przebieg przyspieszenia masy sejsmicznej (druga pochodna przemieszczenia masy względem wibrującej podstawy – operacja różniczkowania w programie Origin). Z uzyskanego przebiegu wyznaczyć wartość amplitudy przyspieszenia masy sejsmicznej $\ddot{X}$ względem wibrującej podstawy (z definicji wart. skutecznej).
5. Obliczyć wartość amplitudy prędkości wzbudzenia $\dot{Z}$ (na podstawie zmierzonej wartości skutecznej przyspieszenia zarejestrowanego za pomocą oscyloskopu oraz częstotliwości sygnału)
6. Obliczyć sprawność przetwarzania energii przez przetwornik korzystając z zależności (6) [2]

$$\eta = \frac{E_{wy}}{E_{we}} = \frac{U_{RMS}^2/R_L}{\frac{1}{2}m \cdot \ddot{X} \cdot \dot{Z} \cdot \sin(\phi_x)} \quad (6)$$

gdzie: U_{RMS} – wartość skuteczna napięcia wyjściowego przetwornika piezoelektrycznego, R_L – rezystancja obciążenia wyjścia przetwornika piezoelektrycznego; m – ciężar masy sejsmicznej przetwornika (przyjąć $m = 0,35$ g); $\ddot{X}$ – amplituda przyspieszenia masy sejsmicznej względem wibrującej podstawy (należy wyznaczyć na podstawie wskazań czujnika odległości); $\dot{Z}$ – amplituda prędkości wzbudzenia (należy wyznaczyć na podstawie wskazań akcelerometru); $\sin(\phi_x)$ – przesuniecie fazy drgań przetwornika piezoelektrycznego i powierzchni wzbudzenia. W rezonansie $\sin(\phi_x) = 1$.

Literatura

- [1] Wykład.
- [2] Zhengbao Yang i in., On the efficiency of piezoelectric energy harvesters, Extreme Mechanics Letters 15 (2017) 26-37.

- [3] Mahidur R. Sarker i in., Review of piezoelectric energy harvesting system and application of optimization techniques to enhance the performance of the harvesting system, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 300, 2019, 111634.
- [4] Yu Xiao i in, Piezoelectric energy harvesting: a review of energy sources, structures, and working mechanisms in high-frequency excitations and operations, *Smart Mater. Struct.* 34, 2025, 023001.

Zadania rachunkowe

1. Wynik pomiaru amplitudy przyspieszenia za pomocą akcelerometru przy wzbudzeniu sygnałem sinusoidalnym wykazał wartość amplitudy przyspieszenia równą $1,02g$ przy częstotliwości $15,92\text{Hz}$. Jaka jest wartość amplitudy drgań oraz amplitudy prędkości? Jakie są wartości skuteczne tych parametrów?
2. Przetwornik ma dobroć równą 20 przy częstotliwości rezonansowej równej 55 Hz . Obliczyć szerokość pasma 3dB.