

UŚ 237

Transformator piezoelektryczny

Przedmiotem wynalazku jest transformator piezoelektryczny przeznaczony zwłaszcza do zasilaczy urządzeń elektronicznych.

Stąły i dynamiczny rozwój technologii elektronicznej jest niezmiennie związany z coraz większym stopniem integracji obwodów elektronicznych. Prowadzi to do postępującej miniaturyzacji urządzeń elektronicznych.

Jest jednak urządzenie elektroniczne, która opiera się tej dynamicznej tendencji rozwojowej, a mianowicie zasilacz. Obwody zasilające urządzeń elektronicznych, których głównym elementem jest transformator są poza tym dodatkowo w większości przypadków najdroższe i największe gabarytowo.

Obecny kierunek rozwojowy opiera się na zastępowaniu zasilaczy sieciowych pracujących na częstotliwości sieci elektroenergetycznej zasilaczami impulsowymi pracującymi na wyższych częstotliwościach. Stosowany w nich transformator elektromagnetyczny, jest obecnie najkosztowniejszym elementem zasilaczy, a jednocześnie jego rozmiary znacznie ograniczają proces miniaturyzacji i integracji współczesnych układów elektronicznych i elektroenergetycznych. Miniaturyzacja transformatorów elektromagnetycznych napotyka wiele problemów technicznych:

- przy zmniejszaniu średnicy uzwojeń następuje wzrost strat spowodowany przez zjawisko naskórkowości czyli tendencji do płynięcia prądu elektrycznego na powierzchni przewodu elektrycznego w cienkich uzwojeniach,

- bardzo duży wzrost histerezy i strat magnetycznych przy większych częstotliwościach pracy w miniaturyzowanych rdzeniach magnetycznych, co prowadzi do nadmiernego nagrzewania się.

Wszystkie te mankamenty wymusiły konieczność poszukiwania nowych rozwiązań w zakresie przekształcania energii. Jednym z takich rozwiązań jest transformator piezoelektryczny, który pozbawiony jest uzwojeń, co zdecydowanie ułatwia jego miniaturyzację. Znane transformatory piezoelektryczne zapewniają proces przekształcania energii elektrycznej wykorzystując sprzężenie elektromechaniczne pomiędzy przetwornikami piezoelektrycznymi: wejściowym i wyjściowym. Zaletami tego typu transformatorów są:

- dużo wyższa gęstość mocy z jednostki objętości w stosunku do transformatorów tradycyjnych, co jest znaczącym krokiem w kierunku miniaturyzacji układów zasilających,
- brak zakłóceń elektromagnetycznych, ponieważ transformator nie posiada uzwojeń, a energia jest transformowana na drodze mechanicznej,
- bardzo dobra izolacja obwodów strony wejściowej i wyjściowej będąca integralną własnością materiału, ponieważ piezoelektryki są dielektrykami.

Umieszczenie piezoelektryka w polu elektrycznym prowadzi do zmiany jego wymiarów (efekt piezoelektryczny odwrotny), natomiast odkształcenie sprężyste wywołuje w nim powstanie wewnętrznego pola elektrycznego (efekt piezoelektryczny prosty). Zasada działania transformatorów piezoelektrycznych wykorzystuje pierwotny i odwrotny efekt piezoelektryczny do przetwarzania energii elektrycznej w mechaniczną i odwrotnie. O wielkości wzmocnienia napięciowego decyduje kierunek i wielkość wektora polaryzacji elektrycznej związany z biegunowością przyłożonego napięcia w stosunku do kierunku rozchodzenia się fali naprężeń mechanicznych. Stopień wzmocnienia napięciowego nieobciążonego transformatora w kształcie płytki prostopadłościowej jest określony relacją:

$$K_u \sim k_{31} * k_{33} * Q_m * (1/d)$$

gdzie:

k_{31} , k_{33} – kierunkowe współczynniki tensora stałych elektromechanicznych,

Q_m - dobroć mechaniczna,

l i d - odpowiednio długość i grubość wyjściowej sekcji generującej napięcie.

Z opisu patentowego US 2830274 znany jest transformator piezoelektryczny typu Rosena wykorzystujący rezonansowe drgania mechaniczne, wykonany z materiału piezoelektrycznego, w postaci prostokątnej płytki, na której naniesione są dwie elektrody: elektroda strony wejściowej i elektroda strony wyjściowej. Napięcie zmienne doprowadzone do sekcji wejściowej generuje w niej drgania mechaniczne związane z odwrotnym efektem piezoelektrycznym. Drgania te rozchodząc się w materiale płytki w postaci fali akustycznej docierają do elektrody wyjściowej, w której generują napięcie na zasadzie prostego efektu piezoelektrycznego. Tego typu transformatory wykorzystywane są jako transformatory wysokonapięciowe dla małych obciążeń. Wadą tej konstrukcji jest mała sprawność przetwarzania, związana z dużą ilością drgań pasożytniczych oraz konieczność użycia bardzo wysokich napięć w procesie polaryzacji.

Znane są też transformatory piezoelektryczne dyskowe, wykorzystujące drgania radialne.

Przykładowo z opisu patentowego US 3764848 znany jest dyskowy, unipolarny transformator piezoelektryczny, wykonany w postaci dysku z materiału piezoelektrycznego, na którego górnej powierzchni naniesione są elektrody sekcji wejściowej oraz sekcji wyjściowej, a na dolnej powierzchni naniesiona jest elektroda wspólna dla obu sekcji i połączona zazwyczaj z masą obwodu. Napięcie zmienne doprowadzone do sekcji wejściowej generuje drgania mechaniczne rozchodzące się radialnie. Propagująca fala tych drgań dociera do sekcji wyjściowej i generuje w niej napięcie zmienne związane z efektem piezoelektrycznym prostym. Dopasowanie mocy jest regulowane przez zmianę pojemności sekcji wyjściowej realizowane przez zmianę powierzchni elektrody wyjściowej. Umożliwia to pracę w szerokim zakresie obciążeń. Zmianę napięcia

wyjściowego osiąga się zmieniając stosunek powierzchni elektrody wejściowej do wyjściowej. Proces polaryzacji jest jednokierunkowy i przeprowadzany w kierunku poprzecznym do powierzchni dysku, dlatego też nie wymaga tak dużych napięć, jakie są konieczne do polaryzacji sekcji wzdłużnej transformatora typu Rosena. Wyższa sprawność transformatorów dyskowych jest również wynikiem dobrych własności filtracyjnych rezonatorów dyskowych i propagacji tylko jednej częstotliwości drgań związanej częstotliwością drgań radialnych dysku.

Z opisu patentowego PL 194149 znany jest transformator piezoelektryczny zawierający stos płytek piezoelektrycznych zaopatrzonych w co najmniej dwie pary elektrod, charakteryzujący się tym, że zawiera stos cienkich płytek piezoelektrycznych i stos grubych płytek piezoelektrycznych, w ilości co najmniej dwóch. Stosy te usytuowane są względem siebie szeregowo i ściśnięte w sztywnej ramie, a pomiędzy nimi jest umieszczony mechaniczny układ rezonansowy drgań giętych wymuszający częstotliwość pracy tego układu, niezależną od częstotliwości drgań własnych użytych płytek piezoelektrycznych.

Z polskiego zgłoszenia patentowego nr P 390585 znany jest transformator piezoelektryczny wykonany na bazie płytki, na której naniesione są co najmniej dwie odseparowane od siebie elektrody, z których jedna to elektroda sekcji wejścia, druga to elektroda sekcji wyjścia oraz ewentualnie trzecia elektroda wspólna dla obu sekcji, korzystnie połączona z masą obwodu, charakteryzujący się tym, że płytka wykonana jest z monolitycznego, transparentnego, ceramicznego materiału piezoelektrycznego o właściwościach fotowoltaicznych. Transformator takiej konstrukcji dodatkowo wykorzystuje sprzężenie optyczne, polegające na tym, że wartość przekładni napięciowej jest sprzężona z wielkością natężenia oświetlenia. Związane jest to z nałożeniem się efektu fotowoltaicznego i piezoelektrycznego.

Znane jest też zjawisko magnetostrykcyjne (MM) w grupie materiałów inteligentnych, które przekształca energię magnetyczną w energię odkształcenia sprężystego. Ze względu na odwracalność zjawiska elementy MM mogą służyć jako aktuatory i czujniki. Przykładem zastosowania MM jako sensora jest czujnik

drgań. Wykorzystuje on MM w postaci prętów otoczonych cewkami pomiarowymi. Wykorzystuje się tu zjawisko generowania zmiennego napięcia elektrycznego w cewkach pomiarowych pod wpływem pola magnetycznego, wywołanego przez naprężenia drgania MM. Ponieważ magnetostrykcja jest samoistną właściwością materiału magnetycznego, generującego odkształcenia i siły, konkuruje z materiałami piezoelektrycznymi. Natura zjawiska magnetostrykcji leży w zmianie wymiarów liniowych materiału pod wpływem zmian natężenia pola magnetycznego. Jej źródłem jest magnetyczne sprzężenie momentu spinowego i orbitalnego elektronów. W niektórych materiałach moment orbitalny jest dodatkowo sprzężony z siecią krystaliczną. Pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego moment spinowy podąża za jego kierunkiem, pociągając za sobą wektor momentu orbitalnego. Ten z kolei jest sprzężony z siecią krystaliczną co prowadzi do odkształcenia sieci, czyli magnetostrykcji.

Znane są rozwiązania praktyczne wykorzystujące sprzężenie efektu foto-, elektro- i magnetostrykcyjnego do zmian parametrów fali świetlnej w światłowodach (CA 2164993).

Jednakże żadne z dotychczasowych rozwiązań nie przewidywało zastosowania materiałów o właściwościach piezoelektrycznych i magnetostrykcyjnych do budowy transformatorów, co umożliwiłoby dodatkowo zmianę parametrów przetwarzania energii w zależności od natężenia otaczającego pola magnetycznego – sprzężenie magnetyczne.

Celem twórcy wynalazku było opracowanie inteligentnych transformatorów przez zwiększenie ich funkcjonalności w aplikacjach związanych z oddziaływaniem z polem magnetycznym.

Transformator piezoelektryczny według wynalazku wykonany z co najmniej jednej zespolonej dwuwarstwowej płytki, na której naniesione są co najmniej dwie pary odseparowanych od siebie elektrod, z których jedna para to elektrody sekcji wejścia połączone z zaciskami wejściowymi U_{we} , a druga to elektrody sekcji wyjścia połączone z zaciskami wyjściowymi U_{wy} , charakteryzuje

się tym, że jedna warstwa każdej płytki wykonana jest z ceramicznego materiału piezoelektrycznego, natomiast druga warstwa wykonana jest z materiału wykazującego magnetostrykcję. Napięcie wejściowe doprowadzane jest poprzez elektrody sekcji wejścia do jednej z warstw płytki a odprowadzane poprzez elektrody sekcji wyjścia z drugiej warstwy płytki.

Korzystnie, ze względu na wielkość parametrów przetwarzania energii jako ceramiczny materiał piezoelektryczny stosuje się ceramikę PZT, a zwłaszcza ceramikę o składach zbliżonych do granicy morfotropowej, a jako materiał magnetostrykcyjny stosuje się Terfenol B.

Korzystnie elektrody wykonane są z materiału przewodzącego z metali szlachetnych.

Korzystnie każda płytka transformatora piezoelektrycznego według wynalazku wykonana jest ze spiekane go materiału monolitycznego o strukturze warstwowej z warstw materiału piezoelektrycznego i magnetostrykcyjnego.

W transformatorze wykonanym z warstw z ceramicznego materiału piezoelektrycznego i materiału magnetostrykcyjnego wartość przekładni napięciowej, definiowanej jako stosunek napięcia wyjściowego do wejściowego, jest sprzężona z wielkością natężenia pola magnetycznego (sprężenie magnetyczne). Oznacza to, że transformator odznacza się wewnętrzną trwałą polaryzacją elektryczną i magnetyczną polaryzacją dodatkową, której wartość i kierunek może być zmieniona poprzez zmianę zewnętrznego pola magnetycznego.

Zastosowanie w zasilaczach transformatorów wykorzystujących przetworniki nowej generacji pozwoli na polepszenie ich parametrów elektrycznych m.in. wyższą sprawność i mniejsze rozmiary. Rozwiązanie według wynalazku umożliwia dodatkowo realizację funkcji układu inteligentnego generującego zmiany napięcia wyjściowego transformatora w zależności od wielkości i kierunku pola magnetycznego. Możliwe jest zastosowanie rozwiązania

według wynalazku w aplikacjach związanych z fazoczułą detekcją i determinacją kierunku pola magnetycznego.

Przedmiot wynalazku zostanie bliżej objaśniony na przykładzie wykonania uwidocznionym na rysunku, na którym fig. 1 przedstawia transformator piezoelektryczny ze sprzężeniem magnetycznym, a fig. 2 przedstawia wykres zmian przekładni napięciowej takiego transformatora z zaznaczonym wpływem zmian kierunku zewnętrznego pola magnetycznego na przesunięcie fazowe między napięciami strony pierwotnej i wtórnej.

Transformator piezoelektryczny wykonany jest na bazie płytki o kształcie prostopadłościennym z dwuwarstwowego materiału, przy czym jedna warstwa 1 wykonana jest z materiału piezoelektrycznego w postaci ceramiki PZT, a druga warstwa 2 z materiału magnetostrykcyjnego w postaci Terfelonu B. Na górnej powierzchni warstwy magnetostrykcyjnej 2 naniesione są elektrody sekcji wejścia 3 połączone z doprowadzającymi napięcie zaciskami wejściowymi U_{we} . Na powierzchniach czołowych warstwy piezoelektrycznej 1 naniesione są elektrody sekcji wyjścia 4 połączone z odprowadzającymi napięcie zaciskami wyjściowymi U_{wy} . Litery P i T na fig 1 oznaczają odpowiednio kierunek polaryzacji i propagacji fali naprężeń mechanicznych w materiale piezoelektryka.

Do prezentowanego przykładu została wybrana ceramika PZT jako materiał piezoelektryczny, ze względu na jej najlepsze właściwości piezoelektryczne oraz szybkość odpowiedzi. Skład tej ceramiki jest umiejscowiony w diagramie fazowym blisko morfotropowej granicy fazowej (MPB) i posiada tetragonalną strukturę krystaliczną. Do prezentowanego przykładu został wybrany Terfelon B, ze względu na jego najwyższe wartości współczynników magnetostrykcyjnych.

Transformator piezoelektryczny ze sprzężeniem magnetycznym wzbudzany jest zmiennym sygnałem elektrycznym doprowadzonym poprzez elektrody sekcji wejścia do materiału magnetostrykcyjnego w postaci warstwy Terfelonu B. Drgania generowane na podstawie odwrotnego efektu

magnetostrykcyjnego w tej warstwie propagują do sekcji wyjściowej. W sekcji tej na podstawie prostego efektu piezoelektrycznego generowane jest napięcie wyjściowe transformatora. W obecności zewnętrznego pola magnetycznego, w materiale magnetostrykcyjnym generowany jest przestrzenny gradient pola magnetycznego. Pole to wymusza dodatkowe zmiany składowej polaryzacji magnetycznej. Zmiany te są rejestrowane przez sekcję wyjściową transformatora w postaci dodatkowej składowej napięcia wyjściowego. Amplituda sygnału jest proporcjonalna w szerokim zakresie napięć do natężenia zewnętrznego pola magnetycznego kątem fazowy do jego kierunku .

Wyniki pomiarów własnych a także przeprowadzonych w niezależnym ośrodku badań piezoelektryków w Libercu (International Center for Piezoelectric Research) dotyczących pomiaru wzmocnienia napięciowego transformatora w warunkach oddziaływania zewnętrznego pola magnetycznego są przedstawione na fig. 2. W przypadku oddziaływania pola magnetycznego wartość napięcia wyjściowego transformatora zwiększa się o 20 %, przy rezystancji obciążenia o wartości 100 k Ω .

Transformatory według wynalazku mogą znaleźć zastosowanie w zasilaczach zdalnie sterowanych polem magnetycznym do zmiany sumarycznej wartości napięcia zasilania przez oddziaływanie pola.

Uniwersytet Śląski

w Katowicach

PROREKTOR
ds. Nauki i Współpracy z Gospodarką


prof. Urszula Anna Andrzej Kowalczyk