RZECZPOSPOLITA POLSKA

Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY** (19) **PL** (11) **221896** (13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **394316**

(22) Data zgłoszenia: **23.03.2011**

(51) Int.Cl.
H01F 27/42 (2006.01)
H02M 1/00 (2006.01)
G05F 1/24 (2006.01)

(54) **Zintegrowany element indukcyjny**

(43) Zgłoszenie ogłoszono:
24.09.2012 BUP 20/12

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:
30.06.2016 WUP 06/16

(73) Uprawniony z patentu:
AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE, Kraków, PL

(72) Twórca(y) wynalazku:
CEZARY WOREK, Kraków, PL
SŁAWOMIR LIGENZA, Sulisławice, PL

(74) Pełnomocnik:
rzecz. pat. Elżbieta Postołek

PL 221896 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest zintegrowany element indukcyjny przeznaczony dla rezonansowych układów przetwarzania energii zapewniający minimalizację strat w rdzeniu ferromagnetycznym.

Rezonansowe układy przetwarzania energii mimo swoich zalet jak np., sinusoidalne przebiegi prądów w obwodzie, możliwość „miękkiego" przełączania kluczy prądowych, praca w szerokim zakresie częstotliwości itp., stosunkowo wolno wypierają klasyczne rozwiązania oparte o tzw. „twarde" przełączanie. Jest to spowodowane między innymi tym, że szczytowe wartości prądu w obwodzie rezonansowym znacznie przekraczają maksymalne wartości prądu pobieranego przez obciążenie i dlatego elementy reaktancyjne obwodu rezonansowego, zarówno kondensatory jak i elementy indukcyjne, muszą być przystosowane do gromadzenia energii na odpowiednio zwiększonym poziomie. Rozwiązaniem tego problemu może być zwiększenie wymiarów i ciężaru elementów reaktancyjnych. Jest to jednak kierunek sprzeczny z ekonomią gdyż pociąga za sobą zwiększenie ich ceny. Następnym niekorzystnym zjawiskiem jest zmniejszenie sprawności energetycznej, gdyż w układach rezonansowego przetwarzania energii przy zwiększaniu wymiarów elementów indukcyjnych, szczególnie na częstotliwościach pracy powyżej 100 kHz, istotne stają się straty w przewodach uzwojeń. Również zwiększanie wymiarów rdzenia ferromagnetycznego, przy zachowaniu wartości skutecznej indukcji magnetycznej, powoduje liniowy wzrost strat w funkcji objętości rdzenia. W ostatnim okresie ze względu na rosnące ceny energii elektrycznej i podejmowane legislacyjne kroki mające na celu ograniczenie zużycia energii oraz racjonalizację jej wykorzystania, sprawność energetyczna staje się niezmiernie istotnym parametrem wpływającym na ewentualny sukces zaproponowanego rozwiązania.

Z tego powodu celowa wydaje się propozycja rozwiązania oparta o dławik wielouzwojeniowy, który pełni rolę transformatora wyjściowego i w którego obwodzie magnetycznym, umieszczono szczelinę powietrzną, a ponadto pewne fragmenty jego obwodu magnetycznego są jednocześnie wykorzystywane przez co najmniej dwa elementy indukcyjne.

Z amerykańskiego opisu patentowego nr US 5,886,516 znany jest zintegrowany wielouzwojeniowy element magnetyczny dedykowany do pracy w konwerterze z rezonansem szeregowym, w którym na pojedynczej kształtce z materiału magnetycznego w kształcie „UU" ze szczeliną powietrzną, umieszczono uzwojenia transformatora separującego oraz dwa dodatkowe uzwojenia tworzące dwa elementy indukcyjne obwodu rezonansowego. Tak powstały układ utworzył złożony obwód rezonansowy na który składały się trzy indukcyjności, dwie pojemności i transformator separujący.

Znane jest z amerykańskiego opisu patentowego nr US 5,726,615 zintegrowane urządzenie magnetyczne w którym zastosowano trzy kubkowe kształtki magnetyczne, z których dwie wyposażone są w centralne kolumny wokół których umieszczono dwa płaskie uzwojenia. Tak złożone oba elementy indukcyjne stanowią transformator. Trzecia kubkowa kształtka magnetyczna wyposażona jest w krótszą centralną kolumnę wokół której umieszczono również płaskie uzwojenie. Dołączenie trzeciej kształtki do zewnętrznej płaskiej powierzchni transformatora umożliwia realizację trzeciego elementu indukcyjnego. Trzeci element indukcyjny jest częściowo magnetycznie sprzężony przez szczelinę magnetyczną z pozostałymi uzwojeniami, a jego faza jest tak dobrana, że indukcja magnetyczna trzeciego elementu indukcyjnego zorientowana jest w tym samym kierunku co indukcja magnetyczna obwodu bez szczeliny.

Znana jest z amerykańskiego opisu patentowego nr US 7,525,406 konstrukcja zawierająca wiele sprzężonych i nie sprzężonych elementów indukcyjnych i co najmniej jeden zamknięty obwód magnetyczny składający się z wzajemnie przystających elementów magnetycznych, które posiadają wykonane wyżłobienia dla przewodników prąciu w kierunku osi X i ortogonalnej do niej osi Y, Wzajemną indukcyjność wykazują przewodniki prądu umiejscowione wzdłuż jednej osi, natomiast nie ma sprzężenia pomiędzy przewodnikami prądu umiejscowionymi względem siebie ortogonalnie.

Znany jest z polskiego opisu patentowego PL 219054 B1 zintegrowany element indukcyjny **znamienny tym**, że dokonuje się wzajemnego ortogonalnego usytuowania uzwojeń zintegrowanego elementu indukcyjnego i doboru wartości elementów indukcyjnych, że co najmniej przez fragment głównego obwodu magnetycznego przenoszącego główny strumień magnetyczny przenosi się także strumień magnetyczny pomocniczego obwodu magnetycznego, przy czym wektory obu indukcji magnetycznych są względem siebie zorientowane ortogonalnie, ponadto zmienne w czasie wektory obu indukcji magnetycznych są względem siebie przesunięte w dziedzinie czasu.

Wymienione wyżej przykłady przedstawiają sposoby realizacji zintegrowanych elementów reaktancyjnych przystosowanych do pracy w rezonansowych konwerterach DC/DC. jednakże wymienione

zintegrowane elementy reaktancyjne nie wykorzystują w pełni możliwości wykorzystania dławika wielouzwojeniowego jako transformatora wyjściowego w rezonansowych układach przetwarzania energii i tym samym możliwość zmniejszenia strat cieplnych w indukcyjnych elementach obwodu rezonansowego.

Istota zintegrowanego elementu indukcyjnego polega na tym, że wybrane fragmenty obwodu magnetycznego dławika wielouzwojeniowego wchodzą w skład obwodów magnetycznych co najmniej dwóch części dławika rezonansowego i tym samym stanowią wspólne fragmenty obwodu magnetycznego dla dławika wielouzwojeniowego i co najmniej dwuczęściowego dławika rezonansowego,

Korzystne skutki zastosowania przedmiotowego wynalazku polegają na tym, że budowa zintegrowanego elementu indukcyjnego pozwala na wykorzystanie zjawiska superpozycji strumieni indukcji magnetycznej w tych fragmentach obwodu magnetycznego, gdzie występuje największe natężenie pola magnetycznego. Ponadto można tak dobrać kierunki przepływu prądów w elementach indukcyjnych oraz wymiary szczelin powietrznych w obwodach magnetycznych, aby nakładające się wektory indukcji magnetycznej, pochodzące od elementów indukcyjnych, zmniejszały wartość wypadkowego wektora indukcji magnetycznej przy zachowaniu minimalnych sprzężeń magnetycznych pomiędzy dławikiem rezonansowym a pozostałymi elementami indukcyjnymi.

Przedmiot wynalazku jest uwidoczniony w przykładzie wykonania na rysunku, na którym: fig. 1 przedstawia półmostkową strukturę wielorezonansowego zasilacza z ogranicznikiem dobroci opartym o zintegrowany element indukcyjny ZER1; fig. 2 – zintegrowany element indukcyjny, w którym w wybranych obszarach nakładające się zmienne indukcje magnetyczne, pochodzące od dławika wielouzwojeniowego pełniącego również rolę transformatora wyjściowego oraz dławika rezonansowego, skierowane są względem siebie równolegle i tak aby w czasie wypadkowy wektor obu indukcji magnetycznych osiągał minimalną wartość; fig. 3 – symulację rozkładu indukcji magnetycznej w zintegrowanym elemencie indukcyjnym w którym prąd płynący przez dławik rezonansowy L2=L2A+L2B równy jest 0 jednostek umownych (j.u.) zaś przez cewkę L1 płynie prąd 0,67 jednostki umownej, przy czym środkowej kolumnie rdzenia magnetycznego umieszczono szczelinę powietrzną; fig. 4 – symulację rozkładu indukcji magnetycznej w zintegrowanym elemencie indukcyjnym, w którym prąd płynący przez dławik rezonansowy L2=L2A+L2B równy jest 1.0 jednostki umownej (j.u.), zaś przez cewkę L1 płynie prąd 0,67 jednostki umownej (j.u), przy czym w środkowej kolumnie rdzenia magnetycznego umieszczono szczelinę powietrzną, a kierunki przepływu prądu są tak dobrane, że pracują w przeciw fazie (przesunięcie o 180°).

Fig. 1 przedstawia przykład aplikacji zintegrowanego elementu indukcyjnego według wynalazku w obwodzie rezonansowego zasilacza mocy. Zintegrowany element indukcyjny ZER1 zawiera dławik rezonansowy L2, który stanowią dwa szeregowo połączone elementy indukcyjne L2A i L2B oraz dławik wielouzwojeniowy, który pełni również rolę transformatora wyjściowego, stanowią go trzy elementy indukcyjne L1, L3, L4 zawierające wspólny obwód magnetyczny. Element indukcyjny L1 połączony jest szeregowo poprzez dławik L2=L2A+L2B z kluczami tranzystorowymi K1, K2; uzwojenie wyjściowe L4 oraz uzwojenie ogranicznika dobroci L3 i L5 dołączone są do diodowego ogranicznika napięcia PD1. Uzwojenie pierwotne połączone jest także z zespołem pojemnościowym C2=C2A+C2B. Z uwagi na fakt, że istnieje szeregowe połączenie zespołu pojemnościowego C2=C2A+C2B z dławikiem L2=L2A+L2B wypadkowa impedancja tak połączonych elementów jest silnie zależna od częstotliwości, co umożliwia kontrolę napięcia dostarczanego do uzwojenia wtórnego L4 dławika wielouzwojeniowego. Ponieważ w warunkach rezonansu wartość napięcia na uzwojeniu dławika wielouzwojeniowego może osiągać duże wartości zastosowano układ ograniczający, który stanowi uzwojenie kontrolne L3 połączone z diodowym ogranicznikiem napięcia PD1.

Fig. 2 przedstawiona zintegrowany element indukcyjny według wynalazku. Zintegrowany element indukcyjny zawiera dwie kształtki magnetyczne w kształcie litery „E” oraz dwie kształtki magnetyczne w kształcie litery „U”. Taka konstrukcja zapewnia minimalny strumień rozproszenia dla uzwojeń dławika wieleouzwojeniowego, którego główny strumień pola magnetycznego zamyka się w kształtkach „E”. Ponadto obwód magnetyczny dławika wielouzwojeniowego zawiera co najmniej jedną szczelinę powietrzną umożliwiającą kontrolę maksymalnej wartości indukcji w rdzeniu magnetycznym, a tym samym kontrolę mocy strat w nim występujących. Uzwojenia dławika rezonansowego zrealizowano w oparciu o dwa elementy magnetyczne „U” na których wykonano uzwojenia L2A i L2B, W przedstawionym na fig. 2 przykładzie preferowane kierunki indukcji magnetycznej pochodzące od uzwojeń zintegrowanego elementu magnetycznego przedstawiono w postaci krzywych narysowanych linią przerywaną ze strzałkami oznaczającymi kierunek. Korzystną cechą elementu zintegrowanego

przedstawionego na fig. 2 jest możliwość łatwej adaptacji do różnych wartości przenoszonych mocy, którą uzyskuje się przez zastosowanie typowych elementów magnetycznych o odpowiednich wymiarach. Wzajemne równoległe usytuowanie uzwojenia L1 dławika wielouzwojeniowego względem uzwojeń dławików rezonansowych L2A i L2B sprawia, że indukcje magnetyczne pochodzące od tych uzwojeń są względem siebie również zorientowane równolegle. Ponadto, w zależności od przesunięcia fazowego wektorów obu indukcji magnetycznych, które uzyskuje się poprzez dobór względnych wartości elementów reaktancyjnych wchodzących w skład zasilacza rezonansowego lub wybór odpowiedniej topologii możliwa jest redukcja w pewnym obszarze amplitudy indukcji magnetycznej a przez to redukcja strat w rdzeniu magnetycznym. W tym celu tak dobiera się wartości przesunięć fazowych pomiędzy nakładającymi się, na wybranym odcinku obwodu magnetycznego, indukcjami magnetycznymi aby uzyskać możliwie najmniejsze straty.

W literaturze przedmiotu straty w rdzeniu ferromagnetycznym opisuje się najczęściej zależnością:

$$P_V = P_{V,\ histerezy} + Pv_{,\ prąrą–wirowe} + P_{V,\ resztkowe}$$

Należy również zaznaczyć że według danych producentów straty w rdzeniu ferromagnetycznym Pv(*B,f,T*) zależą głównie od wartości indukcji magnetycznej **B**, częstotliwości **f** pola magnetycznego oraz temperatury rdzenia ***T*** przy czym:

$P_V(B) \approx B^{2+y}$ *gdzie* $y \in [0,1]$
$P_V(f) \approx B^{1+x}$ *gdzie* $x \in [0,1]$
$P_V(T)$ ma minimum w okolicy 90°C

W rezonansowym zasilaczu według fig. 1 możliwe jest uzyskanie, pomiędzy prądami płynącymi przez dławik L2A i L2B i uzwojenie L1 dławika wielouzwojeniowego stałego przesunięcia fazowego ok. +/- 90°. Przyjmując, że wektory indukcji magnetycznej mają jednakowe amplitudy, wypadkowy wzrost amplitudy indukcji magnetycznej na odcinku obwodu magnetycznego, gdzie następuje nakładanie się obu strumieni magnetycznych wynosi:

$B_{12}(t) = B_A \cdot (\sin \omega t + \cos \omega t) = B_A \cdot \sqrt{2} \sin(45° + \omega t) = B_{A12} \cdot \sin(45° + \omega t)$
$B_{A12} = B_A \cdot \sqrt{2}$

Z kolei przyjmując pracę wektorów indukcji w tej samej płaszczyźnie, ale pracujących w przeciw fazie (przesunięcie o 180°) oraz zakładając taką samą amplitudę indukcji związaną z cewką (L1) i (L2=L2A+L2B) – $B_{A1}=B_{A2}=B_A$ dla przebiegów sinusoidalnych oraz zakładając, że tak ukształtowano pola aby się znosiły, to w rezultacie otrzymuje się wypadkową indukcję Bn(t) w pewnych obszarach wynoszącą:

$B_{12}(t) = B_A \cdot (\sin \omega t - \sin(\omega t)) = B_{A12} \cdot 0 = 0$

Jest to niezmiernie pożądana cecha gdyż w oparciu o fragmenty obwodu magnetycznego 1 i 2 dławika wielouzwojeniowego zrealizowane zostały dwa elementy indukcyjne, a ponadto istnieje możliwość znacznego zredukowania strat we wspólnych gałęziach obwodów magnetycznych gdyż istnieje możliwość znacznej redukcji wartości amplitudy wektora indukcji magnetycznej.

Fig. 3 i Fig. 4 przedstawiają wyniki symulacji rozkładu wektora indukcji magnetycznej w zintegrowanym elemencie indukcyjnym według wynalazku. Fig. 3 przedstawia sytuację w zintegrowanym elemencie indukcyjnym gdy prąd płynący przez dławik rezonansowy L2=L2A+L2B równy jest 0 jednostek umownych zaś przez cewkę L1 płynie prąd 0,67 jednostek umownych. W środkowej kolumnie rdzenia magnetycznego umieszczono szczelinę powietrzną. Jest to sytuacja wyjściowa będąca bazą do porównania, gdyż brak jest w niej strumieni indukcji kompensujących pochodzących od dławika rezonansowego.

Fig. 4 przedstawia wynik symulacji rozkładu indukcji magnetycznej w zintegrowanym elemencie indukcyjnym w którym prąd płynący przez dławik rezonansowy L2=L2A+L2B równy jest 1.0 jednostek umownych (j.u.) zaś przez cewkę L1 płynie prąd 0.67 jednostek umownych. W środkowej kolumnie rdzenia magnetycznego umieszczono szczelinę powietrzną, a kierunki przepływu prądów są tak dobrane że są przesunięte w fazie o 180°. W zewnętrznych gałęziach kształtki ferromagnetycznej stru-

mień indukcji magnetycznej został zmniejszony z wartości 0,8 j.u. do wartości 0,45 j.u. W takiej sytuacji możliwe jest oszacowanie względnej zmiany mocy strat przyjmując następujące założenie, że istnieje kwadratowa zależność pomiędzy wartością mocy strat w rdzeniu, a wartością indukcji magnetycznej.

$$P_V(B) \approx B^2$$

Przykładowo: jeżeli zmniejszenie amplitudy indukcji magnetycznej nastąpiło w 33% objętości rdzenia, a wartość amplitudy indukcji magnetycznej spadła od 0,8 j.u, do wartości 0,45 j.u, to na skutek zmniejszenia wartości indukcji magnetycznej w 33% objętości rdzenia zmniejszają się straty cieplne, w wybranych odcinkach obwodu magnetycznego, o 87%, zaś w całym rdzeniu o ponad 20%.

Zastrzeżenie patentowe

Zintegrowany element indukcyjny zawierający dławik wielouzwojeniowy oraz dławik rezonansowy, **znamienny tym**, że wybrane fragmenty (1), (2) obwodu magnetycznego dławika wielouzwojeniowego (L1) wchodzą w skład obwodów magnetycznych co najmniej dwóch części dławika rezonansowego (L2A, L2B) i tym samym stanowią wspólne fragmenty obwodu magnetycznego dla dławika wielouzwojeniowego (L1) i co najmniej dwuczęściowego dławika rezonansowego (L2A, L2B).

Rysunki

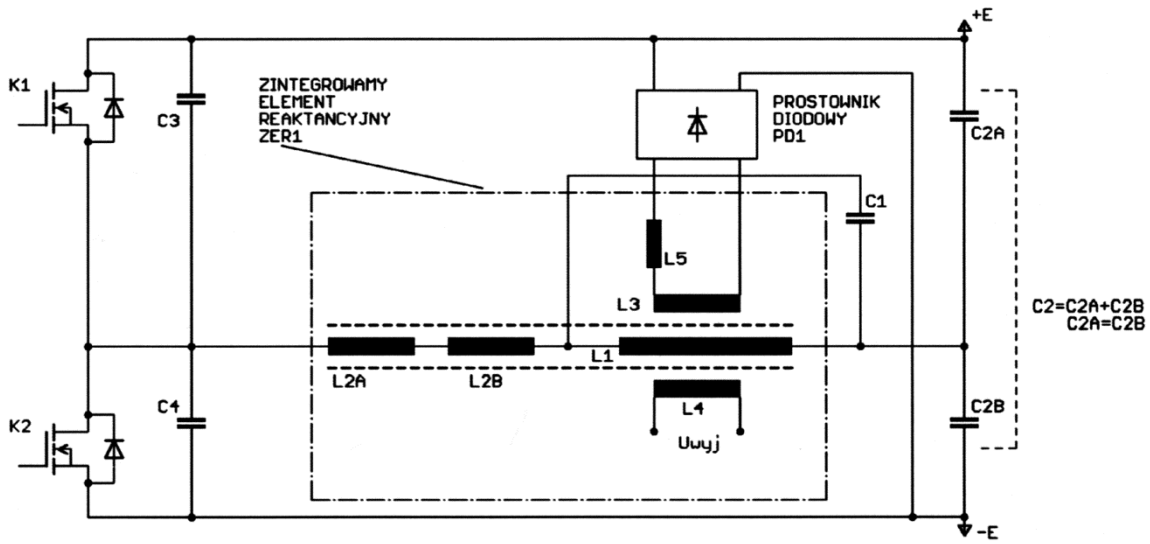

Fig. 1

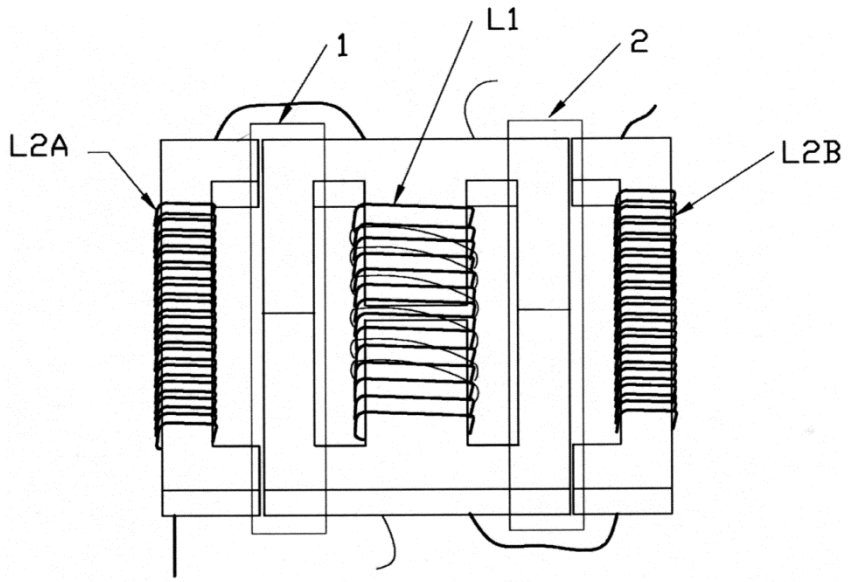
1
L1
2
L2A
L2B

Fig. 2

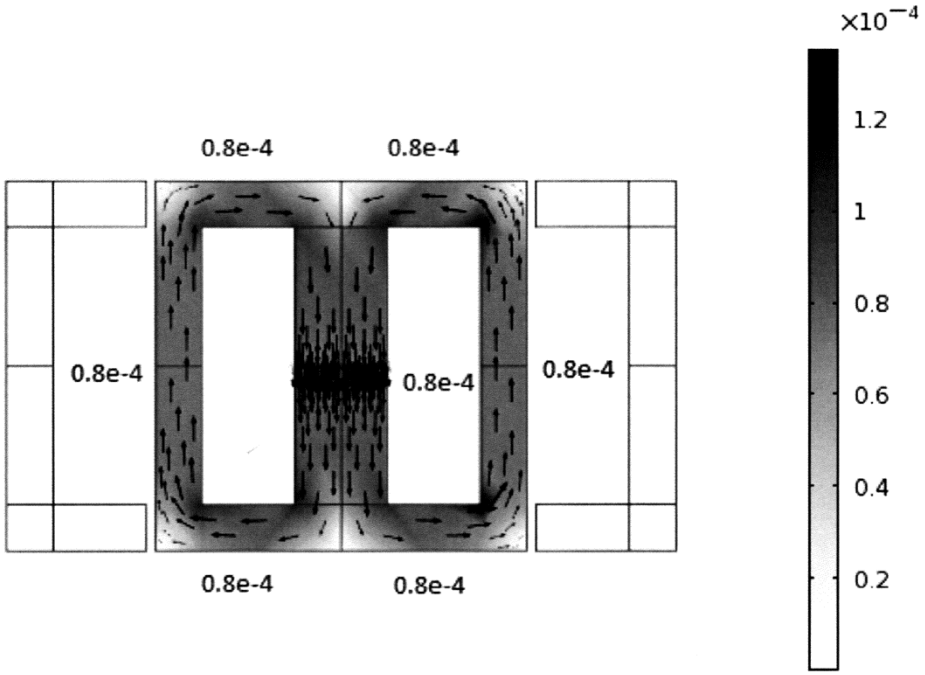
0.8e-4
0.8e-4
0.8e-4
0.8e-4
0.8e-4
0.8e-4
0.8e-4
×10⁻⁴
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2

Fig. 3

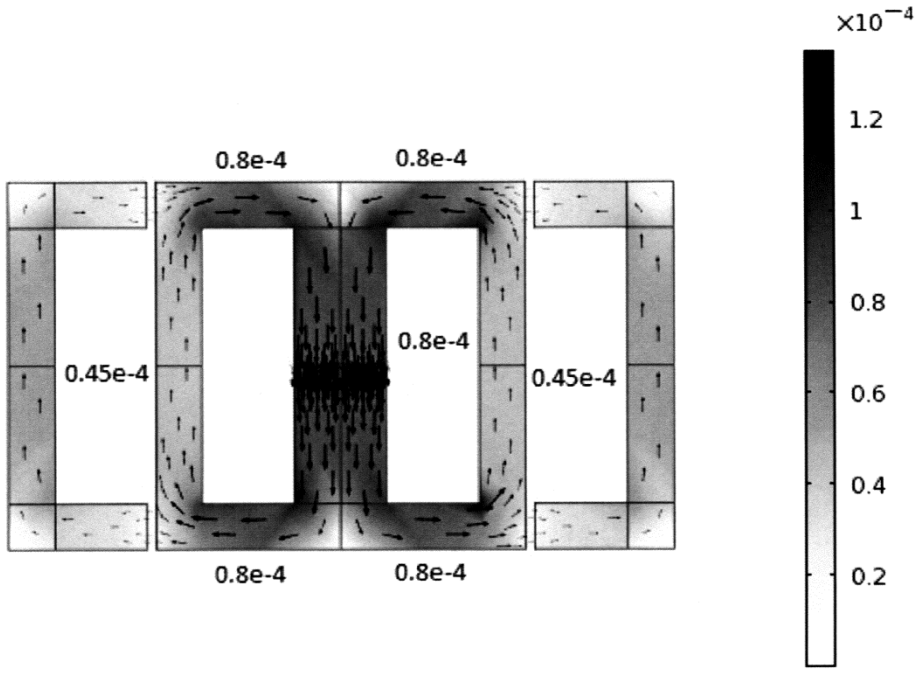

Fig. 4

Departament Wydawnictw UPRP
Cena 2,46 zł (w tym 23% VAT)