

Bogusław GRZESIK

Grzegorz OMBACH

TRANSFORMATORY DO PRZEKSZTAŁCANIA ENERGEOELEKTRONICZNEGO WYSOKIEJ CZĘSTOTLIWOŚCI - PRZEGLĄD WYBRANYCH KONSTRUKCJI

Streszczenie. Artykuł poświęcony jest transformatorom energoelektronicznym wysokiej częstotliwości przeznaczonym do przekształcania energoelektronicznego. Obejmuje on zagadnienia związane z podziałem, budową i zastosowaniem transformatorów wysokiej częstotliwości wykorzystywanych do przekształcania energoelektronicznego.

W pracy omówiono dwie zasadnicze grupy transformatorów. Pierwszą stanowią transformatory bezrdzeniowe (bez magnetowodu ferromagnetycznego, powietrzne), drugą tworzą transformatory rdzeniowe (z obwodem ferromagnetycznym, ferrytowe). Każda z nich obejmuje kilka odmian wyróżnionych ze względu na konstrukcję uzwojeń.

TRANSFORMERS FOR POWER ELECTRONICS OF HIGH FREQUENCY – OVERVIEW OF THE DESIGNS

Summary. The work is devoted to high frequency transformers for appliances in power electronics. The paper is an overview of the subject characterising contemporary constructions. There are classification, design and applications of the transformers given in the paper. Basing on the existence of magnetic core two classes of transformers are described in the paper. The coreless transformers forms the first class while the ones with magnetic core are of the second one. Each class is divided into subclasses according to the type of winding design.

1. WSTĘP

Współczesne badanie i prace inżynierskie dotyczące transformatorów wysokiej częstotliwości przeznaczonych do wykorzystania w energoelektronice obejmują zagadnienia ukierunkowane na zwiększenie częstotliwości pracy, podwyższenie sprawności, powiększenie gęstości mocy (masowej i objętościowej) oraz na zredukowanie ceny. Powyższe cele można osiągnąć na kilka różnych sposobów, czego wyrazem jest wiele nowych konstrukcji opracowanych w okresie ostatniej dekady.

Potrzeba konstruowania tego typu transformatorów wynika z zapotrzebowania, jakie istnieje w dwóch obszarach energoelektroniki, tzn. w przekształcaniu DC / DC oraz w przekształtnikach

DC / AC, np. do nagrzewania indukcyjnego, do nagrzewania pojemnościowego oraz do sterowania tranzystorów.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie wybranych konstrukcji transformatorów wysokiej częstotliwości (100kHz – kilkunastu MHz) stosowanych w przekształcaniu energoelektronicznym ze szczególnym rozróżnieniem dwóch grup transformatorów. Pierwszą grupę stanowią konstrukcje bezrdzeniowe (bez magnetowodu ferromagnetycznego - powietrzne). Drugą grupą to transformatory rdzeniowe (z obwodem ferromagnetycznym - ferrytowe).

Praca niniejsza jest próbą ustalenia stanu aktualnego w dziedzinie konstrukcji transformatorów do przekształcania energoelektronicznego wysokiej częstotliwości.

Systematyczne podejście do analizy stanu aktualnego powinno mieć postać pełnej analizy porównawczej, w której należy uwzględnić takie czynniki, jak maksimum sprawności, minimum masy (W/g), minimum objętości (W/cm³), minimum generowanych pól elektromagnetycznych, minimum czułości na zewnętrzne pola elektromagnetyczne, minimum czułości na temperaturę, minimum nierównomierności rozkładu temperatury w objętości transformatora oraz minimum trudności technologicznych przy produkcji, minimum kosztu. Wymaga to przeprowadzenia obliczeń numerycznych i wykonania odpowiednich pomiarów wybranych, reprezentatywnych wariantów konstrukcyjnych. Systematyczna analiza potrzebuje również ustalenia modelu obwodowego transformatora i jego parametrów. Jest to niezbędne dla celów np. symulacji. Jednym z zadań takiej analizy powinno być ustalenie obszarów zastosowań transformatorów bezrdzeniowych i rdzeniowych ze względu na częstotliwość i moc. Niniejsza praca jest pierwszym etapem analizy porównawczej transformatorów energoelektronicznych wysokiej częstotliwości.

2. PODZIAŁ TRANSFORMATORÓW WYSOKIEJ CZĘSTOTLIWOŚCI ZE WZGLĘDU NA KONSTRUKCJĘ

W pracy dokonano podziału transformatorów wysokiej częstotliwości ze względu na konstrukcję obwodu magnetycznego oraz konstrukcję uzwojeń. Określenie „konstrukcja” oznacza sposób wykonania obwodu magnetycznego oraz uzwojeń transformatora.

Ze względu na obwód magnetyczny rozróżnia się transformatory bezrdzeniowe oraz transformatory rdzeniowe.

Ze względu na konstrukcję uzwojeń wyróżnia się:

- wśród transformatorów bezrdzeniowych konstrukcje: podstawową (KPB), drukowaną (PCBB) oraz skrętkową (KS(B)),
- wśród transformatorów rdzeniowych: konstrukcję podstawową (KPR), współosiową (koaksjalną) (KKR), płaską (KPIR), planarną (KPIR) oraz konstrukcję drukowaną (PCBR),

(do konstrukcji podstawowej należy zaliczyć uzwojenia wykonane z drutu o standardowym profilu oraz z przewodu typu lica i z taśmy, przy czym mogą to być uzwojenia np. jednowarstwowe, lub wielowarstwowe).

Wymienione rodzaje transformatorów są szeroko stosowane w energoelektronice. Z analizy literatury wynika, że najczęściej stosowane są transformatory rdzeniowe, chociaż ostatnio wiele uwagi poświęca się transformatorom bezrdzeniowym [F1], [G5], [H1]. Badania w obszarach transformatorów zarówno bezrdzeniowych, jak i rdzeniowych prowadzone są w celu uzyskania ich wyższej sprawności, obniżenia masy i gabarytów, podwyższenia technologiczności oraz obniżenia kosztów.

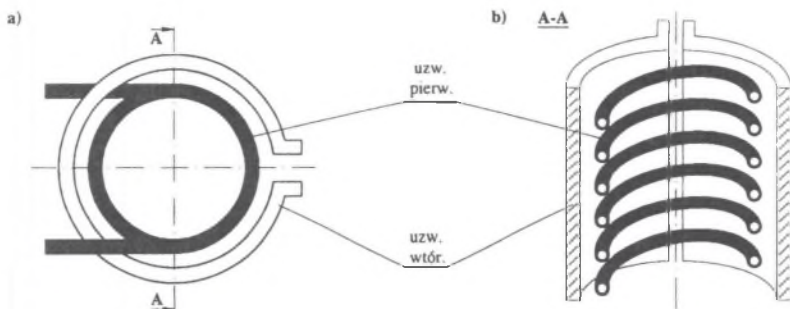
3. TRANSFORMATORY BEZRZDENIOWE (POWIETRZNE)

3.1. Transformator o konstrukcji podstawowej bezrdzeniowy KPB [R2], [Z1], [L1], [G5], [G6], [G7], [G8], [G9]

Transformatory powietrzne o konstrukcji podstawowej były stosowane powszechnie w generatorach lampowych pracujących przy częstotliwościach rzędu 400kHz, przeznaczonych do nagrzewania indukcyjnego.

Konstrukcję podstawową omawia się na przykładzie rozwiązania z rys. 1. Było ono przedmiotem badań prowadzonych przez autorów [G5] - [G9].

Jest to transformator o przekładni zwojowej $\vartheta=12/1$. Uzwojenia wykonane są z miedzi. Uzwojenie pierwotne wykonane jest z przewodu miedzianego typu lica lub rurka miedziana o przekroju okrągłym, lub prostokątnym. W drugim przypadku jest ono chłodzone wodą. Uzwojenie wtórne z chłodzeniem powietrznym naturalnym wykonane jest z taśmy. Może ono być również chłodzone wodą, np. przepływającą w przylutowanych do niego rurkach. W innym wariantcie chłodzenia wodnego uzwojenie to ma postać walca wewnątrz pustego przy odległości powierzchni walcowych 1-3 mm; równomierność chłodzenia uzyskuje się za pomocą systemu odpowiednich kierownic. Uzwojenia są oddzielone odpowiednią warstwą izolacji. Korzystniejsze jest umieszczenie uzwojenia pierwotnego wewnątrz uzwojenia wtórnego ze względu na nieco wyższą sprawność, technologiczność oraz bezpieczeństwo przed porażeniem. Sprawność jest wyższa o ok. 0.3%. Uzwojenie wtórne takie jak na rys. 1 upraszcza konstrukcyjnie wyprowadzenia wiodące prąd do obciążenia oraz upraszcza chłodzenie wodne. Uzwojenie wtórne transformatora obniżającego umieszczone na zewnątrz podwyższa stopień bezpieczeństwa.



Rys. 1. Transformator o konstrukcji podstawowej bezrdzeniowy (KPB); a) widok z góry, b) przekrój poprzeczny A-A

Fig. 1. Coreless transformer of basic design (KPB); a) top view, b) A-A cross section

Transformatory tego typu przeznaczone są do pracy przy wysokich częstotliwościach (powyżej 100 kHz). Transformatory o konstrukcji podstawowej wykonuje się na moce od 500 W do 200 kW. Sprawność transformatora jest w zakresie od 80% do 96% odpowiednio przy częstotliwościach 100 kHz oraz 1 MHz, [G8]. W pracy tej wykazano, że ze wzrostem częstotliwości pracy rośnie sprawność, przy czym jej maksimum występuje w wąskim obszarze zmian rezystancji obciążenia. Wymiary transformatorów o konstrukcji podstawowej mieszczą się w zakresach [L1]:

- wysokość od 40 mm do 330 mm,
- średnica zewnętrzna od 30 mm do 500 mm.

Transformatory o konstrukcji podstawowej charakteryzują się prostą budową, co umożliwia zastosowanie automatyzacji w trakcie produkcji i obniżenie kosztów.

Transformatory tego typu służą do dopasowania impedancji obciążenia do źródła zasilającego, np. w urządzeniach nagrzewania indukcyjnego. Niekiedy transformatory te wykorzystuje się do regulacji mocy przekazywanej do nagrzewanego przedmiotu w systemach nagrzewania indukcyjnego. Uzwojenie pierwotne w takim przypadku wykonuje się jako ruchome, przy czym przyłącza się go do wyjścia przekształtnika za pomocą przewodów giętkich.

3.2. Transformator (drukowany) bezrdzeniowy PCBB [H3], [H3], [A1], [M1]

Transformator PCBB jest to transformator bezrdzeniowy. Jego uzwojenia wykonane są w postaci obwodów drukowanych (rozwiązanie z rdzeniem oznacza się skrótem PCBR). Omawia się dwa warianty tego rozwiązania. Różnią się one współczynnikiem sprzężenia uzwojeń.

Ważną zaletą jest możliwość zintegrowania transformatora z układami elektronicznymi na jednej płycie drukowanej dwustronnej – uzwojenia rozłożone są po dwóch jej stronach. Upraszcza to technologię. Uzwojenia mogą mieć różny kształt i być względem siebie usytuowane na różne sposoby. Typowa przekładnia zwojowa to $\vartheta = 1/1$. Realizacja innych przekładni możliwa jest przez zwiększenie liczby warstw, podobnie jak w transformatorze planarnym – podrozdz. 4.4. Możliwe jest łatwe dostosowanie grubości uzwojeń stosownie do potrzeb. Najczęściej wykonuje się uzwojenia, których grubości są porównywalne z dwiema głębokościami wnikania, co zapewnia minimalne straty w uzwojeniach (np. dla częstotliwości pracy $f=1\text{MHz}$ przyjmuje się grubość uzwojenia 0.2 mm).

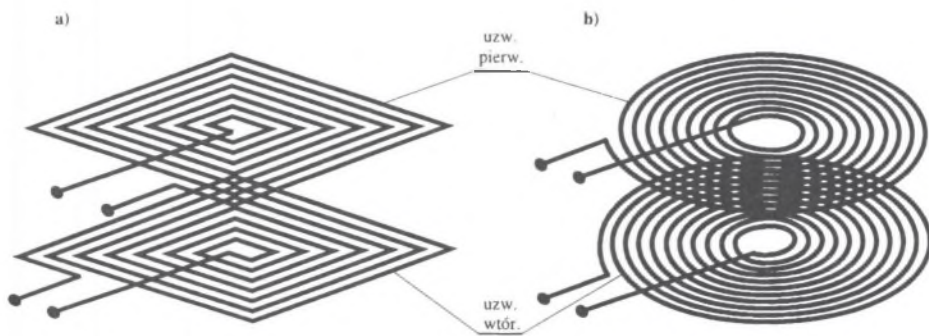
Brak rdzenia magnetycznego wymusza pracę przy dość znacznych częstotliwościach, sięgających powyżej 500 kHz. W literaturze na ogół prezentowane są transformatory o niewielkich mocach, rzędu kilkunastu watów. Wysokie częstotliwości pracy i właściwe wykonanie uzwojeń zapewniają wysoką sprawność transformatorów w zakresie od 80% do 99%. Wykorzystanie obwodów drukowanych przy produkcji uzwojeń zapewnia transformatorom PCB niewielkie wymiary rzędu kilku mm, co umożliwia miniaturyzację obwodów w urządzeniach energoelektronicznych. Prosta budowa i technologia nie wymagająca ręcznego wykonywania uzwojeń pozwala na pełną automatyzację procesu produkcyjnego, co prowadzi do obniżenia ceny. Uzwojenia o tej konstrukcji dają możliwość szybkiej kontroli ich jakości.

Transformatory PCBB są szeroko wykorzystywane w obwodach sterowania bramką tranzystorów MOSFET lub IGBT w przekształtnikach energoelektronicznych, które wymagają izolacji elektrycznej. Możliwe jest osiągnięcie izolacji na poziomie 15–40kV, która jest znacznie wyższa od typowej izolacji elektrycznej układów optoizolatorów na poziomie ok. 2.5kV.

Transformatory PCBB znajdują zastosowanie w przekształtnikach DC/DC. Mogą w wielu przypadkach zastąpić one transformatory rdzeniowe.

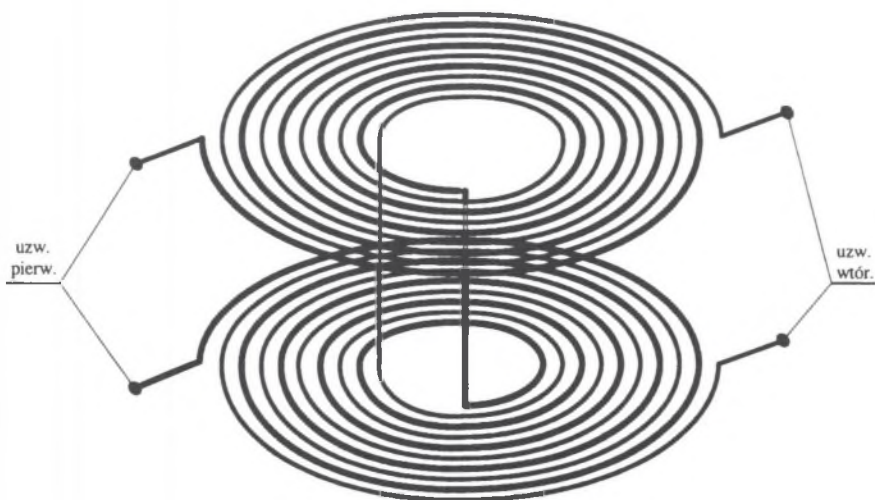
Wariant pierwszy transformatora PCBB, [H3], [H4], [A1] zilustrowano na rys. 2. Uzwojenia (pierwotne i wtórne) rozmieszczone są na oddzielnych stronach obwodu drukowanego.

Drugi wariant transformatora PCBB (ang.: film transformer) [M1] ilustruje rys. 3. Jest to rozwiązanie o przekładni $\vartheta=10/10$. Uzwojenia pierwotne i wtórne umieszczone są pomiędzy sobą. Każde z uzwojeń złożone z dwóch części, z których każda znajduje się po przeciwnej stronie płyty obwodu drukowanego. Zapewnia to korzystniejszy współczynnik sprzężenia. Po przeciwnych stronach obwodu drukowanego znajduje się jedna połówka uzwojenia pierwotnego i jedna uzwojenia wtórnego.



Rys. 2. Transformatory drukowany bezrdzeniowy (PCBB) – wariant 1; a) uzwojenia kwadratowe, b) uzwojenia okrągłe

Fig. 2. First variant of coreless PCB transformer (PCBB); a) square windings, b) circular windings

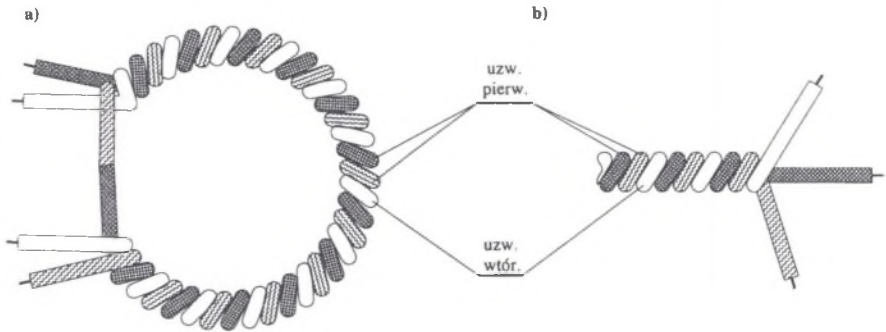


Rys. 3. Transformatory drukowany bezrdzeniowy (PCBB) – wariant 2. (z dzielonymi uzwojeniami)

Fig. 3. Second variant of coreless PCB transformer (PCBB) (with splitted windings)

3.3. Transformator skrętkowy KS(B) [H1], [F1]

Jest to transformator bezrdzeniowy o szczególnej konstrukcji uzwojeń – rys. 4. Uzwojenia wykonane są z przewodów o przekroju kołowym, które są w odpowiedni sposób skręcone. Istotę konstrukcji wyjaśnia rys. 4, który sporządzony został dla transformatora o przekładni zwojowej $\vartheta=2/1$. Możliwe jest uzyskanie innych wartości przekładni przez odpowiednie zwiększenie liczby skręconych przewodów oraz właściwe połączenie ich końców.



Rys. 4. Transformator skrętkowy (KS(B)); a) widok transformatora, b) sposób rozłożenia przewodów uzwojenia

Fig. 4. Coreless stranded transformer (KS(B)); a) overall view, b) layout of windings' wires

Analiza i pomiary [H1], [F1] wykazały, że ten rodzaj transformatora ma dobre właściwości przy częstotliwościach powyżej 100 kHz do 10 MHz. Podobnie jak w pozostałych rozwiązaniach transformatora bezrdzeniowego jego sprawność rośnie wraz ze wzrostem częstotliwości pracy (ocenia się, że w tym przypadku mieści się ona w zakresie 60% do 95%).

Prosta budowa transformatora oznacza niski koszt takiego transformatora.

Prace [H1], [F1] ujmują wyniki badań transformatora o średnicy 50 mm wraz ze wskazaniem zastosowania do sterowania tranzystorów MOSFET.

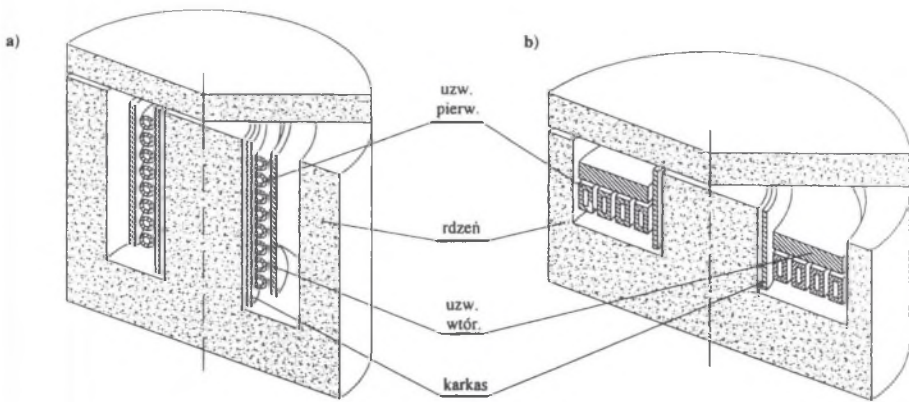
4. TRANSFORMATORY RDZENIOWE

Transformatory rdzeniowe stanowią drugą grupę transformatorów wysokiej częstotliwości stosowaną w energoelektronice. Magnetowody tych transformatorów przy częstotliwościach do kilku MHz zbudowane są z materiałów ferrytowych. Zaprezentowane poniżej transformatory rdzeniowe są reprezentatywne dla tej klasy, do której zalicza się: konstrukcję podstawową (KPR), współosiową (koaksjalną) (KWR), płaską (KPłR), planarną (KPlR) oraz PCBR. (Ostatnia konstrukcja jest podobna do bezrdzeniowej [T1]).

4.1. Transformator o konstrukcji podstawowej z rdzeniem KPR [G3], [G4], [P1]

Transformatory o konstrukcji podstawowej posiadają obwód magnetyczny wykonany z ferrytu. W transformatorach tych możliwe jest wykorzystanie obwodów magnetycznych o

zróżnicowanych kształtach, np. E, EC, EFD, EP, ER, P, ETD. [K1], [K2], [K3], [K4], [K5], [K6], [K7], [K8], [K9], [K10]. Uzwojenia transformatora mogą być wykonane z przewodu typu lica lub z rurki miedzianej. Uzwojenia nawinięte są współosiowo na karkasie - rys. 5. Mogą one być ułożone na wiele różnych sposobów. Niektóre sposoby zostały przedstawione w pracach [G3], [G4] i [P1]. Najczęściej można spotkać się z uzwojeniem nawiniętym spiralnie - rys. 5.a lub z uzwojeniem planarnym rys. 5.b. W drugim rozwiązaniu transformator posiada zredukowaną wysokość. Transformatory o konstrukcji podstawowej mogą mieć różne przekładnie zwojowe ϑ . Transformator na rys. 5.a ma przekładnię zwojową $\vartheta=8/1$, natomiast transformator z rys. 5.b ma przekładnię $\vartheta=4/1$. Wykonanie transformatorów o większej niż 1 liczbie zwojów uzwojenia wtórnego jest utrudnione ze względu na połączenia poszczególnych zwojów. Możliwe jest wykonanie uzwojenia wtórnego jako warstwowego i połączenie poszczególnych zwojów uzwojenia wtórnego na ich czołach.



Rys. 5. Transformator rdzeniowy o konstrukcji podstawowej (KPR), z rdzeniem P, a) z uzwojeniem pierwotnym spiralnym, b) z uzwojeniem planarnym

Fig. 5. Core transformer – basic design (KPR), with P-type of ferrite core; a) spiral primary winding, b) planar windigs

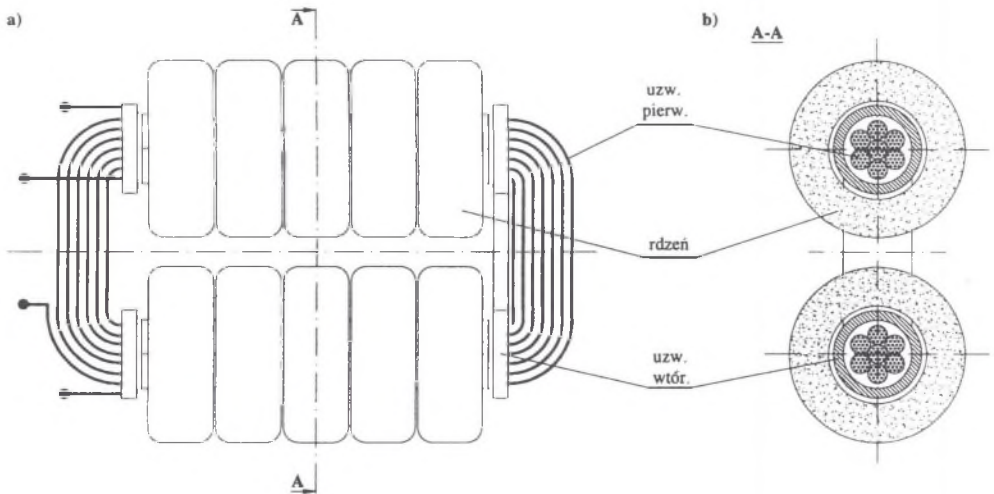
Transformatory podstawowe z rdzeniem są wykorzystywane w szerokim zakresie częstotliwości pracy od kHz do MHz. Przy częstotliwościach wyższych stosuje się rdzenie wykonane z materiałów o korzystniejszych właściwościach (ograniczenia strat histerezowych i prądów wirowych). Uzyskuje się przy tym sprawności z zakresu od 80 do 99.5%. Moc transformatorów jest uzależniona od wielkości zastosowanego rdzenia i dla pojedynczego transformatora są to moce z zakresu ok. kilku watów do dziesiątek kilowatów. Konstrukcja podstawowa może być zrealizowana na dwa zasadnicze sposoby. Pierwszy to stosowanie rdzenia o odpowiednich wymiarach. Drugim sposobem jest konstrukcja rozłożona, która polega na połączeniu równoległym/szeregowym transformatorów o mniejszej mocy.

Wymiary transformatora i jego cała konstrukcja wyznaczone są poprzez wymiary rdzeni. Gabaryty rdzeni ferrytowych mieszczą się w granicach kilku mm do 100 mm. Wykonanie transformatorów może być zautomatyzowane.

Transformatory o konstrukcji podstawowej są powszechnie wykorzystywane w energoelektronice. Pełnią role elementu dopasowującego i izolującego.

4.2. Transformator współosiowy (koaksjalny) rdzeniowy KWB [R1], [L2], [G1], [G2]

Transformator współosiowy – koaksjalny posiada obwód magnetyczny wykonany z kształtek rdzeni U lub z rdzeni o kształcie toroidalnym [K1], [K2], [K3], [K4], [K5], [K6], [K7], [K8], [K9], [K10]. Rysunek 6 przedstawia przykład transformatora współosiowego z rdzeniem wykonanym z kształtek toroidalnych, o przekładni zwojowej $\vartheta=7/1$.



Rys. 6. Transformator współosiowy rdzeniowy (KWR), z kształtkami toroidalnymi
a) widok z góry, b) przekrój poprzeczny

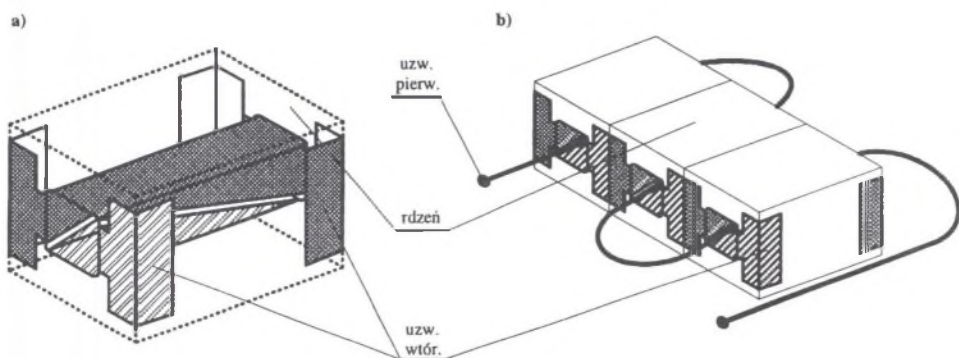
Fig. 6. Core coaxial transformer (KWR), based on toroidal cores; a) top view, b) transverse crosssection

Transformator współosiowy z rdzeniem może pracować w zakresie częstotliwości od 50 kHz do kilku MHz. Transformatory tego typu są budowane na względnie wysokie moce, od dziesiątków do setek kilowatów. Ponadto sprawności tak wykonanych transformatorów są wysokie (od 96 do 99.6%). Transformatory przeznaczone do pracy przy mocach rzędu setek kilowatów pracują przy intensywnym chłodzeniu, na ogół cieczowym, gdzie np. cała konstrukcja zanurzona jest w oleju. Przykładowe wymiary transformatora współosiowego, o mocy 240kW i częstotliwości 200kHz, to: długość 300 mm i szerokość 130 mm [G1]. Uzwojenia transformatora muszą być wykonywane ręcznie ze względu na sposób ich nawinięcia (uzwojenie pierwotne wplatanie do wnętrza uzwojenia wtórnego), co znacznie podwyższa koszty transformatora.

Transformatory współosiowe są stosowane w systemach nagrzewania indukcyjnego dużych mocy [G1]. Transformator ten charakteryzował się przekładnią zwojową $\vartheta=4/1$ i wysoką sprawnością 96%.

4.3. Transformator płaski rdzeniowy KPIR, (ang. flat), [S1], [T2], [In1]

Transformatory płaskie są stosunkowo nowym typem transformatorów rdzeniowych. Prace nad nimi zostały rozpoczęte w 1987 roku przez J.Ley i K. Sum. Nowa technologia stanowiła wówczas przełom. Pozwoliła na poważne zredukowanie kosztu transformatora, niemal o 50%. Obecnie istnieje korporacja zajmująca się badaniami i produkcją transformatorów płaskich - Flat Transformers Technology [In1]. Transformatory płaskie wykonuje się jako pojedyncze bloki składające się z rdzenia w kształcie kostki sześciiennej o wymiarach 10/10/14 mm oraz z uzwojenia wtórnego umieszczonego wewnątrz rdzenia - rys. 7.a. Zastosowanie unikalnej geometrii rdzenia spowodowało znaczne obniżenie strat w rdzeniu oraz umożliwiło intensywniejsze odprowadzenie ciepła do otoczenia przy chłodzeniu naturalnym. Uzwojenie wtórne jest wykonane z posrebrzanych kształtek miedzianych o grubości 0.15 mm (odpowiada to dwóm głębokościom wnikania pola przy ok. 1MHz). Tak uformowane kształtki umożliwiają łatwe łączenie pojedynczych modułów transformatorów. Sposób połączenia wynika z wymaganej przekładni zwojowej i mocy wyjściowej transformatora. Po połączeniu modułów wciągane jest następnie uzwojenie pierwotne wykonane z pojedynczego drutu miedzianego lub licy, rys. 7.b. Rysunek przedstawia transformator płaski złożony z trzech modułów o przekładni zwojowej $\vartheta = 1/1$.



Rys. 7. Transformator płaski rdzeniowy (KPIR); a) widok jednego modułu, b) widok trzech modułów wraz z uzwojeniem pierwotnym

Fig. 7. Core flat transformer (KPIR); a) single module, b) example transformer with three modules together with primary winding

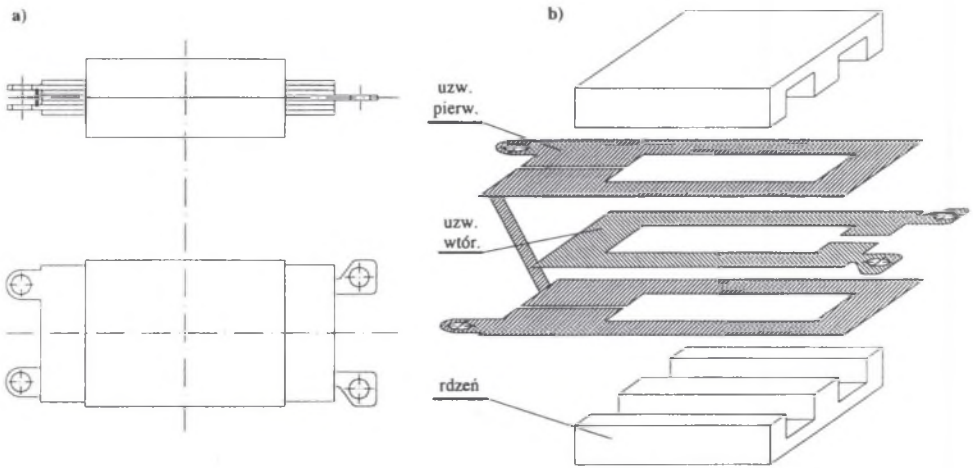
Transformatory te pracują przy wysokich częstotliwościach rzędu MHz, osiągając sprawność od 90 do 96% przy mocach od 100 do 1000 W. Konstrukcja uzwojenia wtórnego jest skomplikowana, co utrudnia wprowadzenie automatyzacji w procesie produkcyjnym.

Transformatory te zostały zaprojektowane do przekształtników energoelektronicznych push-pull DC-DC - ponieważ posiadają one dzielone uzwojenie wtórne.

4.4. Transformator planarny KPIR (ang. planar) [A2], [T1], [H2], [L2]

Transformatory o konstrukcji planarnej bazują na nowoczesnych technologiach i materiałach, co umożliwia redukcję ich masy i wymiarów. Mają one wiele zalet, takich jak niskie profile, mała waga, wysoka sprawność w szerokim zakresie częstotliwości oraz wysoka

gęstość objętościowa mocy. Obwód magnetyczny transformatora planarnego wykonany jest najczęściej z niskich profili E. Szczególny kształt uzwojeń, wykonanych z cienkiej blachy, zapewnia dobre sprzężenie pomiędzy uzwojeniami kosztem znacznych pojemności międzyuzwojeniowej i uzwojenia pierwotnego. Uzwojenia transformatora wykonuje się jako drukowane na płytach laminatowych (PCB) lub z cienkich posrebrzanych blaszek miedzianych w celu obniżenia strat przy wyższych częstotliwościach. Obecnie na rynku istnieje kilka firm zajmujących się badaniami i seryjną produkcją transformatorów planarnych, np. Multisource Technology [L2], Payton Group [K14], [In2]. Rysunek 8.a przedstawia widok ogólny transformatora planarnego o przekładni zwojowej $\varnothing=2/1$, natomiast rys. 8.b widok poszczególnych jego części.



Rys. 8. Transformator planarny rdzeniowy (KPIR); a) widok ogólny transformatora planarnego, b) widok poszczególnych części transformatora

Fig. 8. Core planar transformer (KPIR); a) general view, b) details of the transformer (uzw. Pierw – primary, uzw. wtórne – secondary)

Transformatory planarne są wykonywane na wiele mocy od 5W do 20 kW i mogą pracować w szerokim zakresie częstotliwości od 50 kHz do 1 MHz, uzyskując wysokie sprawności z zakresu 98 do 99.8%. Duże sprawności są wynikiem małych strat zarówno w uzwojeniach, jak i w rdzeniu transformatora. Umożliwia to zaniechanie chłodzenia wodnego i zastosowanie tylko w dużych transformatorach, tj. powyżej 5kW radiatorów powietrznych zamontowanych na rdzeniu transformatora. W ten sposób chłodzone transformatory mają ustaloną temperaturę pracy na poziomie 90°C. W miarę prosta konstrukcja transformatora zapewnia możliwość automatyzacji procesu produkcyjnego, co znacznie obniża koszt pojedynczych egzemplarzy. Zautomatyzowana linia produkcyjna została przedstawiona w materiałach firmowych firmy Payton Group [K14].

Transformatory planarne są wykorzystywane w energoelektronice coraz chętniej i powszechniej z następujących względów. Są one zestandaryzowane i mogą być traktowane jako element konstrukcyjny. Posiadają małe gabaryty, porównywalne z gabarytami elementów elektronicznych. Ponadto istnieje możliwość wykorzystania ich pojemności pasywnych w przekształtnikach rezonansowych pracujących przy wysokiej częstotliwości.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

1. Niniejsza praca jest pierwszym etapem analizy porównawczej. transformatorów energo-elektronicznych wysokiej częstotliwości pracujących w zakresie 100 kHz do kilkunastu MHz.

2. Opisane konstrukcje transformatorów są reprezentatywne dla współczesnych tendencji. Omówiono dwa zasadnicze rodzaje transformatorów: bezrdzeniowe (powietrzne) oraz rdzeniowe (z obwodem magnetycznym ferrytowym).

3. Wzrost częstotliwości pracy, powyżej około 500kHz, umożliwia stosowanie transformatorów bezrdzeniowych, których sprawność sięga powyżej 90% i jest porównywalna ze sprawnością transformatorów rdzeniowych ferrytowych.. Częstotliwość 1MHz można uznać za granicę pomiędzy transformatorami bezrdzeniowymi i rdzeniowymi.

4. Systematyczna analiza stanu aktualnego konstrukcji transformatorów wysokiej częstotliwości wymaga uwzględnienia takich czynników, jak sprawność, masowa gęstość mocy (W/g), objętościowa gęstość mocy (W/m³), nierównomierność rozkładu temperatury, technologiczność itp.

5. Dążenie konstruktorów do uzyskania wysokiego sprzężenia pomiędzy uzwojeniami daje w wyniku wyższe pojemności pasozytne, które można wykorzystać w przekształtnikach jako element obwodu rezonansowego.

6. Pewnym mankamentem transformatorów bezrdzeniowych jest ich pole rozproszenia, które należy uwzględnić przy analizie warunków bezpieczeństwa obsługi.

7. Systematyczna analiza wymaga zastosowania obliczeń bazujących na metodach polowych z wykorzystaniem obliczeń sprzężonych.

8. Nie wszystkie problemy w zakresie transformatorów wysokiej częstotliwości nie zostały rozwiązane, szczególnie te związane z wykorzystywanymi materiałami oraz z konstrukcjami rozłożonymi, przykładem których może być transformator płaski.

Praca została wykonana w ramach projektu badawczego KBN 8 T10A 058 14,

LITERATURA

- A1. Albertz D., Henneberger G.: *Calculation of 3D Eddy Current Fields using both Electric and Magnetic Vector Potential in Conducting Regions*, IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 34. No. 5. September 1998. pp. 2644-2647.
- A2. Arshak K.I., Mukhtar B. A1.: *Development of the film planar transformer based on a novel composite of Bi₂O₃-Fe₂O₃-SiO_x*, INT. J. Electronics 1997, Vol.83 No.6, pp.793-804.
- F1. Faiz J., Abed-Ashtiani B., Byat M. R.: *Lumped Complete Equivalent Circuit of a Coreless High-Frequency Transformer*, IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 33. No. 1. January 1997. pp. 703-707.
- G1. Gillot M., Nuns J.: *Impedance Adapter Transformer – 300KHz/2MVA For Induction Heating Generators*, EPE'97 Trondheim, September 1997. pp. 1.061-1.065.
- G2. Gillot M., Nuns J., Bausiere R., Pirou F., Boige R.: *High Frequency and High Power adapter transformer for Induction Heating Converters*, EDF Electrical De France 1998.
- G3. Goldberg A. F., Kassakian J. G., Schlecht M. F.: *Issues Related To 1-10-Mhz Transformer Design*, IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 4. No. 1. January 1989. pp.113-123.

- G4. Goldberg A. F., Kassakian J. G., Schlecht M. F.: *Finite Element Analysis of Copper Loss in 1-10-MHz Transformers*, IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 4. No. 2. January 1989. pp. 157-167.
- G5. Grzesik B., Ombach G.: *Transformator powietrzny - wyniki badań za pomocą programu ANSYS*, II Konferencja Nowoczesne Urządzenia Elektrotermiczne w Metalurgii, Międzybrodzie Żywieckie 19-21 listopad 1998.ss. 43-51.
- G6. Grzesik B., Ombach G.: *Wybrane charakterystyki i parametry transformatora powietrznego obliczone metodą elementów skończonych*. Podstawowe Problemy Energoelektroniki i Elektrotechniki PPEE'99- Wisła Marzec 1999, materiały konferencyjne,ss.73-79.
- G7. Grzesik B., Ombach G. *Features of the coreless transformer- calculated by ANSYS® software*. EDPE 99. 5-7 October, pp. 353-357.
- G8. Grzesik B., G. Ombach G.: *Wpływ częstotliwości na moc transformatora powietrznego wysokiej częstotliwości*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria ELEKTRYKA z. 160, 1998, ss.91-103.
- G9. Grzesik B., Ombach G.: *Experience gathered from the use of Ansys® for analysis of HF coreless transformer*. Ansys Users Meeting'99, Sonthofen-Niemcy, 6-8 October, pp. II.1.5
- H1. Hayano S., Nakajima Y., Saotome H., Saito Y.: *A New Type Of High Frequency Transformer*, IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 27. No. 6. November 1991. pp.5205-5207.
- H2. Hess J: *Planar inductive components of multiplayer design*, Aplications Ferrites No. 1 . 1996, pp. 28-30.
- H3. Huy S. Y., Tang S. C., Chung H.: *Coreless printed circuit board(PCB) transformers for power MOSFET/IGBT gate driver Circuit*, IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 14. No. 3. May 1999, pp.422-430.
- H4. Huy S. Y., Tang S. C., Chung H.: *Coreless printed-circuit board transformers for signal and energy transfer*, Electronics Letters, Vol. 34. No. 11. May 1998, pp.1052-1054.
- L1. Lee R., Wilson L., Carter C.E.: *Electronics Transformers And Circuits*, John Wiley & Sons, England, ISBN 0 471 81976-X, 1988.
- L2. Lenny Ch. M.: *The best 14 kW transformer construction*: PCIM '97, International Conference and Exhibition, Power Electronics Drives Motion Control, 10-12 June '97. pp. 377-384.
- M1. Midorikawa Y., S. Hayano, Y. Saito: *Improvement of film transformer characteristics*, IEEE Transaction On Magnetics, Vol. 31. No. 6. November 1995.
- P1. Prieto R., Cobos J.A., Garcia O.: *Optimizing the winding strategy of the transformer in a flyback converter*, IEEE Journal July 1996. pp. 1456-1462.
- R1. Rauls M., Novotny D., Divan D.: *Design Consideration for High-Frequency Coaxial Winding Power Transformers*. IEEE Trans. on Industry Application, Vol.29, No.2, March/April 1993, pp.375-381.
- R2. Ryżko S., Ebert J.: *Wzmacniacze rezonansowe i generatory mocy wielkiej częstotliwości*. Wydawnictwo Naukowo – Techniczne NT, Warszawa 1971.
- S1. Sum K. K., Lau J. L.: *Techniques for Overcoming Leakage Inductance and Heat Dissipation In High Frequency Transformer Design In Today's Power Converters*, Internet: www.flattransformer.com , June 1999.
- T1. Tabaga S., Pierrat L.: *Parameter computation of a planar transformer by 3D finite element method*, EPE' Sevilla 1995, pp. 1.273-1.276.

- T2. Ttevor Holmes D. and K. Kit Sum: *Flat Transformer for Low Voltage, High Current, High Frequency power Converters*, Power systems World '96, Las Vegas, Nevada, September 1996.
- Z1. Zagajewski T., Malzacher S., Kweciński A.: *Elektronika przemysłowa*, Wydawnictwo Naukowo – Techniczne NT, Warszawa 1972.

- [K1]. Magnetic Products, Data Handbook MA01. Philips 1998.
- [K2]. Product Selection Guide, Philips 1997.
- [K3]. Ferrites and Accessories - Siemens Matsushita Components 1998.
- [K4]. Ferrites and Accessories, Siemens Matsushita Components - katalog 1994.
- [K5]. Soft Ferrites. Thomson-CSF, June 1993.
- [K6]. Ferrite Cores, Magnetics, USA, 1994.
- [K7]. Amidon, INC. Magnetics & Ferromagnetics Materials, 1995.
- [K8]. American Cores & Electronics, 1998.
- [K9]. American Cores & Electronics, Iron Powder Cores For Power Conversion, 1998.
- [K10]. Ceramic Magnetics, INC. 1998.
- [K14]. Materiały firmy PAYTON GROUP 1999.

[In1]. Flat transformer: www.flattransformer.com.

[In2]. Payton Group: www.interage.co.il:80/payton/index.htm.

Recenzent : Prof. dr hab. inż. Tadeusz Glinka

Wpłynęło do Redakcji dnia 3 lipca 2000 r.

Abstract

Presentation of selected designs of high frequency transformers for appliances in power electronics, operating in the range of frequency 100kHz to several MHz is the aim of the paper.

There are classification, description of design and applications of the transformers given in the paper. Two basic classes of transformers are taken into consideration. The coreless ones form the first class. The transformers with ferromagnetic cores (ferrite) forms the second class – coreless one. The deeper classification is based on the way the windings are constructed.

The discussed transformers are the ones that are representative for the classes they belong to.

The following transformer have been described in the paper:

- 1) coreless transformer of basic design (KPB) – fig. 1,
- 2) and 3) two variants of coreless PCB transformer (PCBB), fig. 2 and 3., respectively,
- 4) depicted in fig. 4 coreless transformer with stranded windings (KS(B)),
- 5) basic design of core transformer (KPR) based on P-type ferrite core – fig. 5,

- 6) core coaxial transformer (KWR), based on toroidal cores – fig. 6,
- 7) core flat transformer (KPIR) – fig. 7,
- 8) core planar transformer (KPIR) – fig. 8.

The conclusions of the paper are as follows:

- Coreless transformer can be used at frequencies above 500kHz, where the efficiency is usually higher than 90%. 1MHz can be taken as a boundary for core transformers assuming it is constructed basing on contemporary available materials.
- The simplified analysis that has been done allows one to select two design as a best one from the point of view of efficiency and coupling coefficient. They are, first is coaxial design and flat is the second one. Although only core solutions are known up to the present it seems that coreless solutions of that type will exhibit near the same features, particularly at frequencies above 1MHz.
- A comprehensive comparative analysis of different types of transformer design needs the quantities such as efficiency, W/g ratio, W/m^3 – ratio, distribution of hot spots, magnetic field distribution outside transformer (particularly for coreless one), technology of fabrication etc., should be taken into consideration. The presented overview only simplified one being the first step towards Systematic and thorough comparative analysis.
- Such analysis of the transformer should be based on coupled field analysis.