

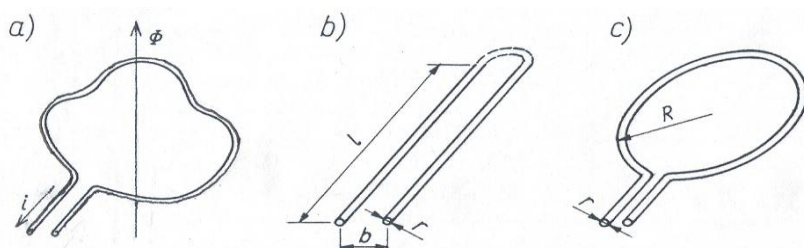
W6. Zespoły magnetyczne średniej częstotliwości

Zespoły magnetyczne - dławiki i transformatory nie są z zasady produkowane do celów handlowych i nie mogą być dobierane z typoszeregów. Zazwyczaj należy je samemu zaprojektować biorąc pod uwagę moc napięcia częstotliwość i inne specyficzne warunki pracy. Energoelektronikowi konieczna jest wiedza co do metod projektowania tych zespołów przy czym nawet nieznaczne zmiany parametrów konstrukcyjnych mogą być przyczyną znacznych różnic w parametrach użytkowych takich jak sprawność, wymiary koszt. W przypadku dławików głównymi parametrami są indukcyjność i dopuszczalna wartość prądu przy którym wymagana wartość indukcyjności jest zachowywana (tzn nie występuje nasycenie powodujące zmniejszenie przenikalności magnetycznej) Głównym wyznacznikiem jakości transformatora są straty elektryczne powodujące jego nagrzewanie w relacji do wagi i wymiarów .

6.1.Podstawowe zależności w zespołach elektromagnetycznych

Dla dowolnego obwodu magnetycznego utworzonego przez pojedynczą pętlę przewodu obowiązuje zależność:

$$\Phi = Li \quad (6.1)$$

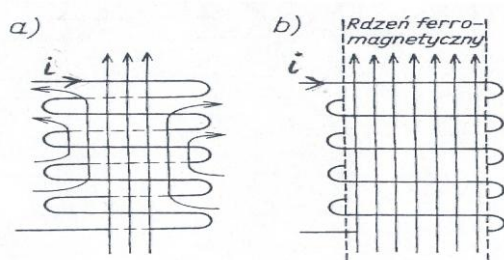


Rys. 6.1 Elementarne obwody magnetyczne

Dla konkretnych przykładów obowiązują praktyczne wzory na współczynnik-parametr indukcyjności - L wiążący wartość prądu ze strumieniem

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{b}{r} + 0,25 \right) \quad (6.2a) \quad L = \mu_0 R \left(\ln \frac{8R}{r} - 1,75 \right) \quad (6.2.b)$$

W przypadku gdy zespół zawiera kilka zwoi i każdy z nich obejmuje inny strumień stosujemy pojęcie strumienia skojarzonego. Jeżeli wszystkie zwoje są objęte przez wspólny strumień



Rysunek 6.2. Uzwojenia o wzajemnym sprzężeniu zwojów

$$\Psi = \sum_{n=1}^N \Phi_n = Li \quad (6.3)$$

Przy pełnym (100%) sprzężeniu magnetycznym zwojów $\Psi = N^2 \frac{\mu S_R}{l} i = Li$

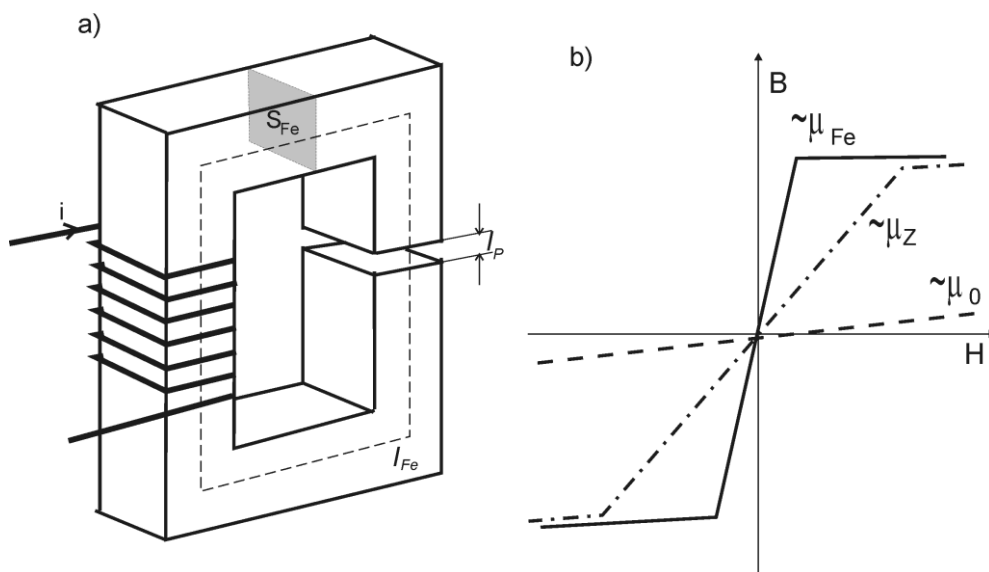
a zatem

$$L = N^2 \frac{\mu S_R}{l} \quad (6.4)$$

Uzyskanie sprzężenia pomiędzy zwojami bliskiego 100% jest możliwe jedynie w przypadku zastosowania rdzenia z materiału ferromagnetycznego. Ogromna większość zespołów magnetycznych zawiera taki rdzeń i jedno (dławik) lub więcej (dławik sprzężony, transformator) uzwojeń.

Dławik z rdzeniem ferromagnetycznym

W dławikach często obwód magnetyczny nie jest jednorodnie ciągły i zawiera szczelinę w rdzeniu. Należy rozpatrzeć właściwości takiego niejednorodnego obwodu.



Rys.6.3 Obwód magnetyczny z rdzeniem i szczeliną

Zgodnie z rysunkiem przedstawiającym rdzeń ferromagnetyczny o powierzchni przekroju S_{Fe} i długości drogi w rdzeniu l_{Fe} oraz szczelinie powietrznej o długości l_p można wyprowadzić zależność na indukcyjność takiego obiektu przy N zwojach

$$L = \frac{BS_{Fe}N}{i} = \frac{N^2}{\left(\frac{l_{Fe}}{\mu_0 \mu_{Fe} S_{Fe}} + \frac{l_p}{\mu_0 S_{Fe}} \right)} = \frac{N^2}{\left(\frac{1}{G_{Fe}} + \frac{1}{G_p} \right)} = \frac{N^2}{R_{Fe} + R_p} \quad (6.5)$$

Jeżeli przy dużej wartości μ_{Fe} (co zachodzi nawet dla dużej wartości l_{Fe} w porównaniu z długością szczeliny l_p) wartość rezystancji magnetycznej R_{Fe} jest znacznie mniejsza od R_p wzór na indukcyjność dławika ze szczeliną przyjmuje postać:

$$L = \frac{N^2 \mu_0 S}{l_p} \quad (6.6)$$

Jeżeli długość l_p szczeliny jest niewielka wtedy uproszczenie nie jest dopuszczalne i należy wprowadzić pojęcie przenikalności magnetycznej zastępczej zdefiniowanej jako

$$\mu_z = \frac{\mu_{Fe}}{1 + \frac{l_p}{l_{Fe}} \mu_{Fe}} \quad (6.7)$$

Wtedy indukcyjność jest określona wzorem

$$L = \frac{N^2 \mu_z \mu_0 S_{Fe}}{l_{Fe}} \quad (6.8)$$

Przenikalność zastępcza μ_z jest tu parametrem, przy interpretacji którego może być użyteczny wykres $B = f(H)$ wyznaczony dla rdzenia bez szczeliny, gdy przenikalność jest maksymalna (μ_{Fe}) dla samej szczeliny w której przenikalność jest równa μ_0 oraz dla rdzenia ze szczeliną. W tym ostatnim przypadku zastępcza charakterystyka jest znacznie bardziej nachylona niż charakterystyka rdzenia bez szczeliny a zatem dla uzyskania określonej indukcyjności w obwodzie konieczne jest zastosowanie znacznie większej liczby zwojów niż w przypadku rdzenia bez szczeliny. daje to lepsze możliwości dokładnego zaprojektowania dławika i dostrojenia wartości indukcyjności za pomocą długości szczeliny

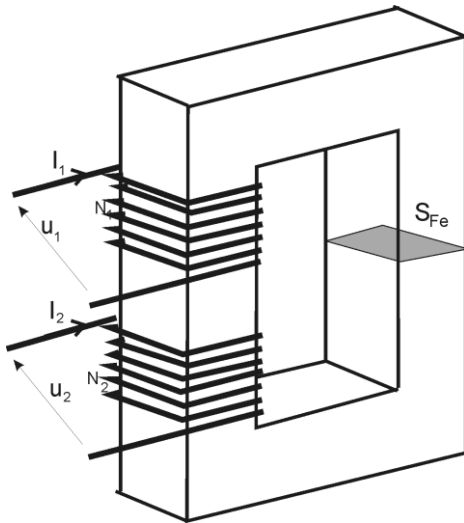
Transformator

Umieszczenie dwóch lub większej liczby uzwojeń na jednym rdzeniu tworzy transformator – zespół do przekazywania energii elektrycznej pomiędzy galwanicznie izolowanymi obwodami za pośrednictwem zmiennego pola magnetycznego. Uzwojenie doprowadzające energię to uzwojenie pierwotne, odbierające energię – wtórne przy czym rola uzwojeń może podlegać zamianie. Najważniejszą cechą użytkową transformatora jest zmiana – transformacja wartości napięć i prądów w sprzężonych uzwojeniach charakteryzowaną przez współczynnik przekładni napięciowej (przekładni zwojowej N_2/N_1)

Opisujące transformator równania i zależności matematyczne wiążące wielkości elektryczne – napięcia i prądy oraz parametry obwodów o sprzężeniu magnetycznym przedstawiono poniżej:

$$u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} + R_1 i_1 \quad (6.9.a) \quad u_2 = -L_2 \frac{di_2}{dt} - \frac{di_1}{dt} - R_2 i_2 \quad (6.9.b)$$

gdzie L_1 i L_2 - indukcyjności własne uzwojeń , M – indukcyjność wzajemna ($M = k\sqrt{L_1L_2}$ przy czym k – współczynnik sprzężenia magnetycznego $k = 0..1$)



Rysunek 6.4. Szkic transformatora dwuuzwojeniowego

Wprowadzając pojęcie prądu magnesującego $i_\mu = i_1 - i_2(N_2/N_1)$ równania można przedstawić w postaci:

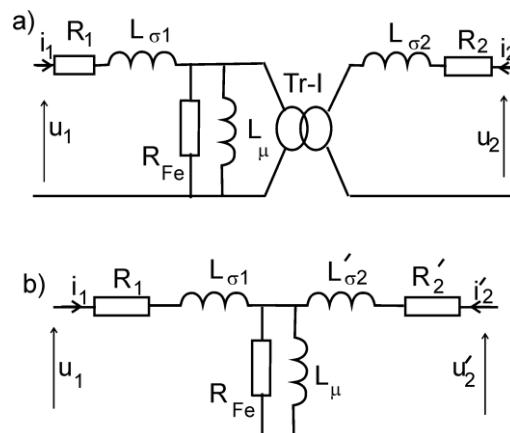
$$u_1 = L_\mu \frac{di_\mu}{dt} + L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 \quad (6.10a); \quad u_2 = -M \frac{di_\mu}{dt} - L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt} - R_2 i_2 \quad (6.10b)$$

przy czym $L_{\sigma 1}$ i $L_{\sigma 2}$ to indukcyjności rozproszenia uzwojenia pierwotnego i wtórnego:

$$L_{\sigma 1} = L_1 - M \frac{1}{n} = L_1(1 - k) \quad (6.11a) \quad L_{\sigma 2} = L_2 - Mn = L_2(1 - k) \quad (6.11b)$$

a L_μ – tzw indukcyjność magnesująca $L_\mu = M/\eta_u$

Równania w przekształconej postaci mają interpretację w postaci tzw schematu zastępczego transformatora jak na rys.6.5



Rys.6.5. Schematy zastępcze transformatora

W przypadku schematu z rys. 6.5a parametry RL dla strony pierwotnej (indeks 1) i wtórnej (indeks 2) odpowiadają rzeczywistym parametrom z uwzględnieniem przekładni zwojowej transformatora reprezentowanej przez transformator idealny (Tr-I). W schemacie z rys. 6.5b dokonano tzw. sprowadzenia parametrów strony wtórnej do strony pierwotnej. Obowiązuje przy tym

$$\dots i_2' = i_2 \eta_u; \dots u_{\mu 2}' = u_{\mu 2} \frac{1}{\eta_u} = u_{\mu 1}; \dots u_2' = u_2 \frac{1}{\eta_u}; \dots R_2' = R_2 \frac{1}{\eta_u^2}; \dots L_{\sigma 2}' = L_{\sigma 2} \frac{1}{\eta_u^2}$$

W schemacie zastępczym po stronie pierwotnej równoległe do indukcyjności magnesującej L_μ dołączono rezystancję R_{Fe} reprezentującą straty energii w materiale ferromagnetycznym rdzenia wywołane zmiennym polem magnetycznym. Przedstawiony opis i model – schemat zastępczy ma charakter bardzo ogólny i jest użyteczny dla potrzeb analizy i syntezy obwodowej również w badaniach symulacyjnych, które mogą doprowadzić do wyznaczenia koniecznych wartości napięć, prądów, przekładni zwojowej oraz wartości indukcyjności L_μ i L_σ . Odrębnym zagadnieniem jest przyjęcie założeń konstrukcyjnych i materiałowych oraz wyznaczenie odpowiednich parametrów technicznych. W tym zadaniu podstawową zależnością stanowiącą o wyznaczeniu tych parametrów jest równanie opisujące mechanizm wytwarzania strumienia magnetycznego w rdzeniu pod wpływem doprowadzonego do uzwojenia pierwotnego napięcia

$$U_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.13)$$

Uwzględniając że $\Phi = BS_{Fe}$ uzyskuje się

$$B = \frac{1}{N_1 S_{Fe}} \int_0^t u(\tau) d\tau \quad (6.14)$$

Rozpatrując charakterystyczne przypadki kształtów fali napięciowej występującej na zaciskach uzwojenia pierwotnego można wyprowadzić wzory łączące podstawowe wielkości i parametry transformatora:

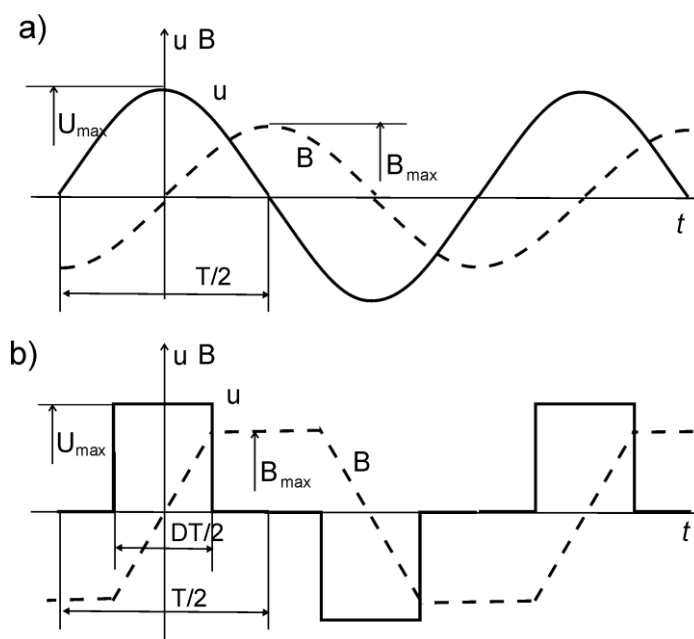
Dla wyznaczenia maksymalnej indukcji B_{max} w rdzeniu przy sinusoidalnym napięciu (Rys.6.6a) należy w równaniu wprowadzić $u(t) = U_{max} \cos(\omega t)$ Rozwiązując uzyskuje się:

$$B_{max} = \frac{U_{max}}{N_1 S_{Fe} \omega} \quad (6.15)$$

W przypadku fali prostokątnej o wypełnieniu półfali D (Rys.6.6b)

$$B_{max} = D \frac{\pi}{2} \frac{U_{max}}{N_1 S_{Fe} \omega} \quad (6.16)$$

Na podstawie powyższych wzorów wyprowadza się podstawowe wzory na dopuszczalną wartość skuteczną napięcia $U_{I(RMS)}$ uzwojenia o N_I zwojach przy pulsacji napięcia $\omega = 2\pi f$ i przy przekroju czynnym rdzenia S_{Fe}



Rysunek 6.6 Kształt fali indukcji przy typowych kształtach fali napięcia

Przy fali sinusoidalnej:

$$U_{1(RMS)} = 4,44 B_{\max} N_1 S_{Fe} f \quad (6.17)$$

Przy fali prostokątnej o wypełnieniu D

$$U_{1(RMS)} = 4\sqrt{D} B_{\max} N_1 S_{Fe} f \quad (6.18)$$

Powyższe wzory stanowią bazę wyjściową do wykonania projektu technicznego transformatora na określone napięcie przy założonym typie materiału ferromagnetycznego o określonej indukcji maksymalnej (B_{\max}) i zadanej częstotliwości f . Wielkościami które ponadto wymagają dopasowania to liczba zwojów i powierzchnia przekroju rdzenia .

Dla dokonania pełnego projektu należy uwzględnić oczywiście szereg innych parametrów jak napięcia wtórne, moc obliczeniowa wyznaczona z mocy wszystkich uzwojeń , oraz szereg założeń wynikających z aplikacji (temperatura, waga, wymiary, sprawność itd). Całkowity projekt transformatora to zadanie złożone - szczególnie w przypadku nowoczesnych transformatorów średniej częstotliwości - i wymaga przeprowadzenia obliczeń projektowych dla rdzenia i uzwojeń a następnie przeprowadzenia kompleksowej optymalizacji względem wybranych kryteriów. Każdy z dwóch podstawowych składowych elementów: rdzeń i uzwojenia mają skomplikowaną strukturę fizyczną i podlegają specyficznej procedurze projektowej. Konieczne jest oddzielne omówienie każdego z nich.

6.2. Rdzenie

6.2.1. Materiały magnetyczne

Materiały stosowane na rdzenie o cechach ferromagnetycznych są niezwykle różnorodne, zarówno co do składu chemicznego jak i struktury. Jako podstawowe pierwiastki wchodzące w skład rdzeni o właściwościach ferromagnetycznych należy wymienić żelazo, nikiel i kobalt.

Przy wyborze materiału i formy jego przygotowania na rdzeń decyduje w pierwszym rzędzie częstotliwość pola magnetycznego i zależna od tej częstotliwości stratność właściwa materiału a także wartość maksymalnej indukcji . Ogólnie obowiązuje zasada, że przy określonej częstotliwości przemagnesowywania stratność w materiałach ferromagnetycznych na bazie krystalicznej postaci żelaza jest odwrotnie proporcjonalna do wielkości ziarna kryształów, które powstają w procesie wytwarzania blachy. Oznacza to, że im wyższa częstotliwość pracy transformatora, tym mniejsze powinno być ziarno krystalizacji blach które są podstawowym półfabrykatem klasycznych rdzeni. Blachy żelazne lub stopowe są produkowane w postaci kształtek do składania lub też jako cienka taśma zwijana w rdzenie toroidalne lub rdzenie zwijane i cięte w kształtki U.

W zespołach magnetycznych przeznaczonych do pracy przy częstotliwościach do 2 kHz można stosować tradycyjne blachy ze stali stopowej z domieszkami krzemu oraz stopy żelaza, kobaltu niklu. Maksymalna indukcja (indukcja nasycenia) mieści się w granicach 1-2 Tesli. Przy częstotliwościach wyższych wskazane jest posłużyć się specjalnymi blachami z materiałów o szczególnie drobnym ziarnie krystalizacji - o średnicy mierzonej w mikro a nawet w nanometrach. Szczególnie wartościowym materiałem do zastosowania w zakresie częstotliwości od kilku nawet do kilkuset Hz i przy mocach od kilku do kilkuset kilowatów jest pozbawione struktury krystalicznej tzw szkło metaliczne - (firma nazwa METGLAS) . Z uwagi na niewielką stratność właściwą, dużą indukcję dopuszczalną (nawet powyżej 1,5 T) oraz specyficznie małą grubość blachy - taśmy wynikającą z wymagań procesu wytwarzania należy do grupy najnowocześniejszych materiałów na rdzenie transformatorów

Przy częstotliwościach od kilkunastu kHz do pojedynczych MHz podstawowym, powszechnie stosowanym materiałem jest ferryt – spiek ceramiczny proszków tlenków żelaza i materiałów dodatkowych (Mn, Zn, Mg, Ni). Rdzenie z ferrytów cechuje bardzo mała stratność jednostkowa jednak ich główna wada jest niewielka wartość indukcji nasycenia ($< 0,3T$) co utrudnia ich zastosowanie przy dużych mocach. Właściwości oraz technika wytwarzania ferrytu narzuca formę wykonania rdzeni w postaci standaryzowanych kształtek umożliwiających proste złożenie rdzenia bez lub ze szczeliną.

6.2.2. Straty energii – moc strat w rdzeniu:

Straty histerezy

Są to straty energii odwzorowywane przez kształt i parametry pętli histerezy wyznaczonej w układzie $B=f(H)$. Wynikają one z zmianą położenia i rozmiarów tzw. domen w materiale ferromagnetycznym podczas przemagnesowywania pod wpływem wymuszenia elektromagnetycznego (przepływu - I_z lub napięcia U) są nazywane stratami histerezy. Najprostszym sposobem wyznaczenia właściwej mocy strat odniesionej do jednostki objętości materiału (m^3 lub cm^3) z którego wykonany jest rdzeń jest posłużenie się wzorem

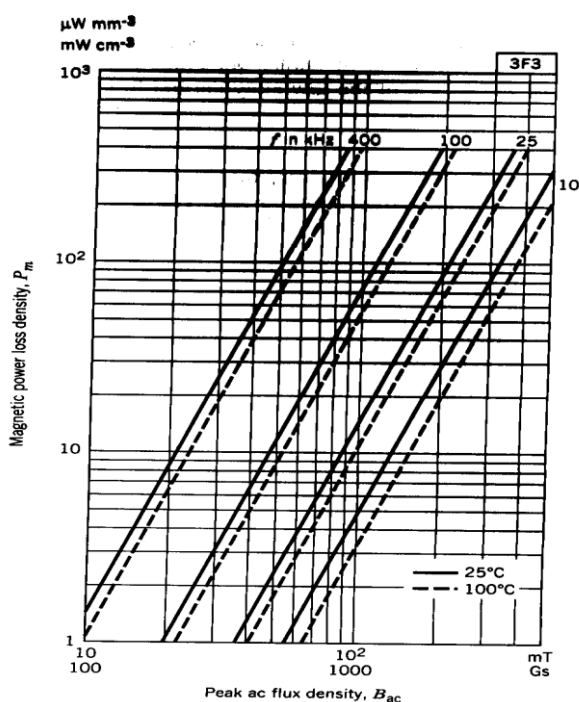
$$P_{h-wl} = kf^a B_{AC}^d \quad (6.19)$$

gdzie: k , a , d – współczynnik dla materiału (często w danych firmowych), f – częstotliwość [Hz], amplituda indukcji [T],

Przykładowo dla dwóch charakterystycznych materiałów stosowanych w zespołach magnetycznych o wyższej częstotliwości pracy:

materiał	k	a	d	P_{h-wl} ($f=100 \text{ kHz}$, $B=0,1T$)
Ferryt 3F3	1,5	1,3	2,5	$60 \cdot 10^3 [\text{W}/\text{m}^3]$
METAGLAS 2705M	3,2	1,8	2,0	$127 \cdot 10^3 [\text{W}/\text{m}^3]$

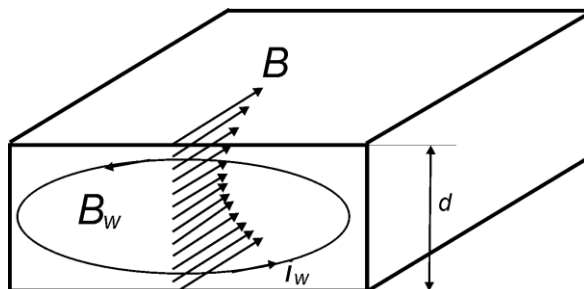
W praktyce posługujemy się wykresami dla konkretnych typów materiałów dostarczonymi przez producenta :



Rysunek 6.7. Przykładowy diagram jednostkowych strat w ferrycie - w funkcji amplitudy indukcji i częstotliwości

Straty na prądy wirowe

Na skutek występowania indukowanych zmiennym polem prądów pojawia się zjawisko wypierania pola – centralna część „nie pracuje” o ile grubość blachy jest większa od głębokości wnikania. Zjawisko dotyczące blach ilustruje rysunek



Rysunek 6.8. Ilustracja osłabienia pola we wnętrzu blach wywołany prądami wirowymi

W przypadku blachy o określonej grubości można stwierdzić pojawianie się pod wpływem zmiennego pola o indukcji B prądu, który tworzy pętlę usytuowaną w płaszczyźnie przekroju blachy – prostopadle do osi pola. Prąd wirowy wytwarza własne przeciwne pole, którego oddziaływanie jest najmocniejsze w środku przekroju blachy. Tym samym w części centralnej indukcja ulega znacznej redukcji w stosunku do wartości uzyskiwanych na obrzeżu. Ilustruje to rozkład wektora B na rysunku. Ponieważ maksymalna indukcja nie może przekroczyć wartości wynikającej z charakterystyki magnesowania efektywna wartość strumienia może ulec redukcji. O skali oddziaływania prądów wirowych decyduje parametr, określony jako głębokość wnikania, przy której indukcja maleje e -razy i wyrażający się wzorem

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (6.20)$$

gdzie $\omega = 2\pi f$ pulsacja przy częstotliwości f , μ – przenikalność magnetyczna, σ – przewodność elektryczna. Dla zmniejszenia negatywnego efektu prądów wirowych blacha stosowana w rdzeniu musi mieć grubość znacznie mniejszą od parametru δ . Ponieważ przy wzroście częstotliwości głębokość wnikania maleje konieczne jest zmniejszanie grubości blach.

Prądy wirowe wzbudzone w blachach rdzenia transformatora są przyczyną strat energii mierzonych parametrem mocy strat obliczanych za pomocą wzoru:

$$P_{pw-wl} = \frac{d^2 \omega^2 B^2}{24\sigma} \quad (6.21)$$

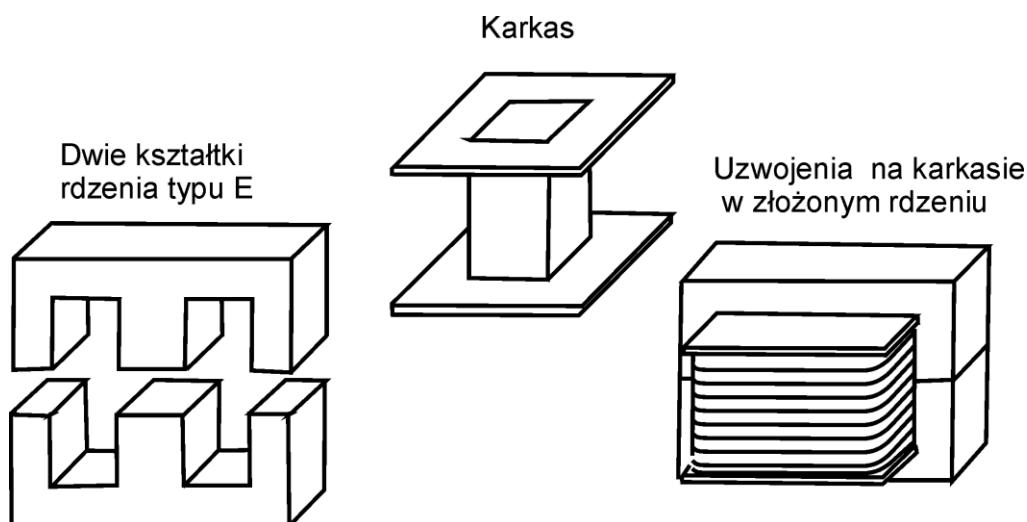
przy czym: d – grubość blachy, $\omega = 2\pi f$ – pulsacja indukcji, B – wartość indukcji maksymalnej, σ – przewodność elektryczna materiału

W rdzeniach z ferrytu zjawisko prądów wirowych praktycznie nie występuje.

6.3. Uzwojenia

Uzwojenia to drugi nieodzowny składnik każdego zespołu magnetycznego. Wykonuje się je z miedzi, przy czym w zależności od sposobu wykonania przewodu nawojowego i sposobu jego ułożenia w tzw oknie rdzenia zależą w istotny sposób właściwości transformatora lub dławika. Problem jakości uzwojeń z uwagi na sposób ich wykonania jest szczególnie istotny w przypadku zespołów przewidzianych do pracy z podwyższoną częstotliwością.

Typowy sposób ułożenia uzwojeń w transformatorach średniej częstotliwości zobrazowano na rysunku. Kształt i wymiary rdzenia i wynikające stąd wymiary okna, w którym mieszczą się uzwojenia są rezultatem obliczeń i procedur optymalizacyjnych pozwalających na uzyskanie jak najkorzystniejszych parametrów energetycznych z danej objętości - w pierwszym rzędzie by uzyskać właściwe wypełnienie okna przy zachowaniu wymaganej wytrzymałości izolacji zapewniającej niezbędną wytrzymałość napięciową .



Rys. 6. 9 Rdzeń z kształtek typu E, karkas i kompletny transformator

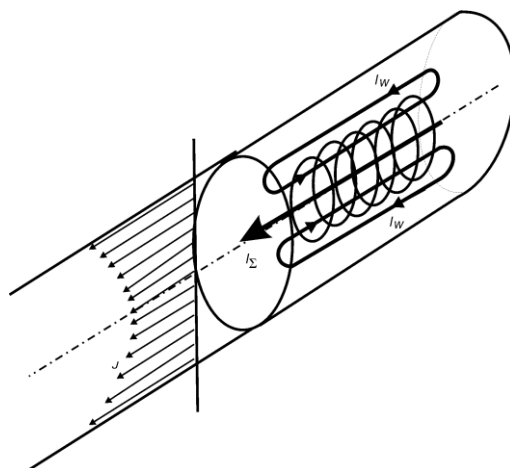
Podstawowymi parametrami każdego z uzwojeń umieszczanych na wspólnym rdzeniu są natężenie prądu oraz liczba zwojów wynikająca z napięcia. Prąd płynący w uzwojeniach jest przyczyną strat (moc strat przewodzenia) , przy czym straty w uzwojeniu o N zwojach przy ich średniej długości l_{av} i przy przekroju miedzi przewodnika S_{Cu} są określone wzorem:

$$P_{Cu} = \frac{N l_{av}}{S_{Cu}} K_F \rho [1 + \alpha_{Cu} (T - 20)] I_{RMS}^2 \quad (6.22)$$

przy czym K_F - współczynnik określający wzrost rezystancji przy częstotliwości przebiegu prądu (fali sinusoidalnej) - f , α_{Cu} - współczynnik wzrostu rezystancji

pod wpływem przyrostu temperatury uzwojenia T powyżej 20°C ($\cong 0.004/^{\circ}\text{C}$), ρ – rezystancja właściwa miedzi przy temperaturze 20°C

Naskórkowość – to zjawisko zwiększania rezystancji przewodu wynikające z różnej od zera częstotliwości prądu w przewodzie, które wymaga uwzględnienia przy określaniu strat w uzwojeniu. Ilustrację naskórkowości na przykładzie przewodnika o przekroju okrągłym przedstawia rysunek 6.10.



Rys. 6.10 Ilustracja zjawiska wypierania prądu w przewodzie o przekroju kołowym - naskórkowość

Zmienny prąd w przewodzie indukuje wokół linii prądu kołowe pole, które z kolei powoduje indukcję prądów, które oddziałują na rozkład prądu w przekroju. Jest to zjawisko podobne do efektu prądów wirowych w blachach rdzenia. Również i w tym przypadku można posłużyć się parametrem głębokości wnikania zmiennego pola w głąb przewodu

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0}} \quad (6.23)$$

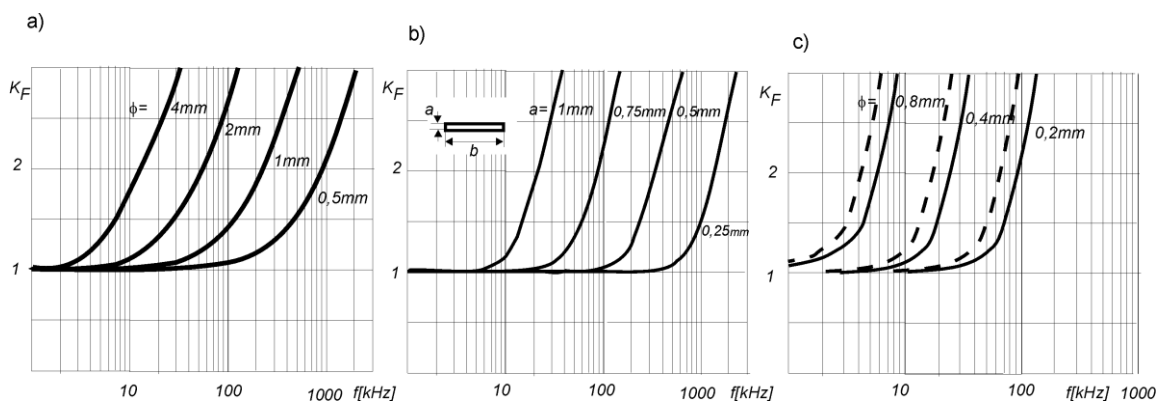
Można wykazać, że współczynnik wzrostu rezystancji przewodu K_F uwzględniony we wzorze 6.22 jest zależny od częstotliwości prądu oraz od kształtu i wymiarów poprzecznego przekroju przewodu. Np. dla najpopularniejszego drutu nawojowego o przekroju kołowym, w przypadku, gdy jego średnica d jest znacznie większa od głębokości wnikania przy danej częstotliwości obowiązuje przybliżona zależność:

$$K_F = d/4\delta \quad (6.24)$$

Oznacza to, że zwiększanie średnicy drutów nie powoduje zmniejszanie rezystancji odwrotnie proporcjonalnie do d^2 a jedynie do d . Na wykresie z rys.6.11 a przedstawiono zależność współczynnika K_F od częstotliwości przy różnych wartościach średnicy ϕ . Znaczna redukcję wartości współczynnika K_F danej często-

tliwości można uzyskać stosując nie kołowy, lecz prostokątny przekrój przewodu o dużej wartości stosunki b/a tak jak na rysunku 6.11b. W praktyce oznacza to stosowanie w uzwojeniach do pracy przy podwyższonej częstotliwości cienkiej taśmy miedzianej zwykle o szerokości odpowiadającej wymiarom okna. Dobre właściwości w zakresie częstotliwości kilku do kilkudziesięciu kHz prezentuje tzw. lica – splot wielkiej liczby (100-1000) cienkich izolowanych drucików.

Zależność wartości współczynnika K_F od częstotliwości przy różnych wymiarach licy prezentuje rys.6.11c



Rys. 6.11. Wykresy zależności współczynnika K_F od częstotliwości dla różnych typów przewodu nawojowego: a) drut o profilu okrągłym, b) taśma o grubości a przy założeniu że $a/b \ll 0,1$, c) lica (linia ciągła - 400 drutów, linia przerywana 200 drutów w licy)

Przy wyznaczaniu całkowitych strat występujących w uzwojeniach zespołu magnetycznego wygodnie jest zamiast posługiwać się zależnością 6.22 dla pojedynczego uzwojenia wprowadzić ogólny wzór na straty właściwe P_{Cu-wl} w uzwojeniu odniesione do jednostki objętości (m^3 , cm^3). Należy przy tym uwzględnić współczynnik wypełnienia okna miedzią

$$k_{Cu} = \frac{NS_{Cu}}{S_{okna}} \quad (6.25)$$

W zależności od rodzaju przewodu nawojowego dla drutu okrągłego k_{Cu} przyjmuje wartości 0,5 - 0,6 a dla licy $k_{Cu} = 0,3$.

Wyznaczając straty w miedzi w jednostce objętości jako podstawową wielkość wywołującą te straty należy uznać powszechnie stosowany parametr stosowany przy projektowaniu – gęstość prądu w przewodzie miedzianym – $J[A/mm^2]$. Wzór na straty właściwe w uzwojeniach obliczone w watach dla metra sześciennego objętości uzwojenia ma postać

$$P_{Cu-wl} = k_{Cu} K_F \rho_{Cu} (1 + \alpha_T \Delta T) (J_{RMS})^2 10^{12} \quad (6.26)$$

gdzie : dla miedzi $\rho = 1,78 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$, k_{Cu} – współczynnik wypełnienia, K_F – współczynnik uzależniająca rezystancję przewodu od częstotliwości i kształtu przekroju przewodnika, α_T – współczynniki uzależniające rezystywność miedzi od temperatury.

Często wzór ten jest podawany w postaci uwzględniającej przeliczenie na miliwaty wydzielane w cm^3

$$P_{Cu-wl} = k_{Cu} K_F \rho_{Cu} (1 + \alpha_T \Delta T) (J_{RMS})^2 10^9 \quad (6.27)$$

Wzrost rezystancji uzwojeń pod wpływem zjawiska przylegania

Obok zjawiska naskórkowości, wywołującego nierównomierny rozptyw prądu w przewodzie w uzwojeniach ułożonych warstwami występuje dodatkowo efekt zmiany rozptywu prądu w przekroju przewodu wywołany polem rozproszenia zamykającym się poza rdzeniem. Pole to pochodzi od przewodów ułożonych koło siebie w polu okna. Ocena oddziaływania ułożonych obok siebie przewodów w cewkach uzwojeń jest trudna i wymaga złożonego aparatu. Można posłużyć się odpowiednimi nomogramami w których takie parametry jak grubość i liczba warstw pozwalają zoptymalizować układ uzwojeń tak by współczynnik określający wzrost rezystancji miał możliwie najmniejszą wartość.

6.4. Obliczenia termiczne elementów magnetycznych

Wzrost temperatury rdzenia i uzwojeń powoduje pogorszenie właściwości a w pewnych warunkach utratę podstawowych funkcji. Powodem nagrzewania są straty wydzielane w materiale ferromagnetycznym rdzenia i w uzwojeniach. Zwykle przyjmuje się, że nagrzewanie rdzenia i uzwojeń w całej objętości jest równomierne gdyż straty są rozłożone równomiernie (50% - 50%) pomiędzy uzwojenia i rdzeń. Kolejną specyfiką modelu termicznego zespołu magnetycznego jest założenie, że energia wydzielana jest równomiernie w całej objętości rdzenia i uzwojeń. warunkiem. Energia ta charakteryzowana przez moc strat jest odprowadzana na zewnątrz bloku rdzenia z uzwojeniami – głównie za pośrednictwem mechanizmu konwekcji i radiacji. Efektywność tych dwóch procesów jest tym większa im wyższą temperaturę uzyska powierzchnia. Temperatura, która ustali się jest wypadkową obydwu procesów i może być przyjęta jako podstawowy parametr projektowy wynikający z aplikacji i właściwości termicznych zastosowanych do budowy materiałów. W standardowych procedurach projektowych zakłada się, że temperatura powietrza chłodzącego jest równa 40°C natomiast temperatura rdzenia i uzwojeń nie powinna przekraczać $100 - 120^\circ\text{C}$. Oznacza to, że dopuszczalny przyrost temperatury dla typowych zastosowań $\Delta T = 60 - 80^\circ\text{C}$

Schematycznie nakreślony proces projektowania transformatora lub dławika uwzględniający może być opisany przez następującą sekwencję kroków obliczeniowych:

- 1 – Wyznaczenie dla wstępnie wybranego na podstawie orientacyjnej wartości mocy rdzenia z materiału ferromagnetycznego aktywnej powierzchni oddającej ciepło A_{Σ} [m²]
- 2 – Oszacowanie rezystancji termicznej wynikającej z powierzchni A_{Σ} i wypadkowego współczynnika oddawania ciepła – α_w [W/°C m²] – jako orientacyjna wartość przy braku dokładniejszych danych można przyjąć $\alpha_w=10$

$$R_{th} = 1/A_{\Sigma} \alpha_w \quad (6.28)$$

- 3 – Wyznaczenie dopuszczalnej wartości sumarycznych strat w rdzeniu i w uzwojeniach przy założeniu, że jednostkowe – właściwe straty są w obu składnikach takie same

$$P_{\Sigma} = P_{Fe} + P_{Cu} = \Delta T / R_{th} \quad (6.29)$$

oraz wyznaczenie mocy właściwej strat dopuszczalnych P_{wl} [W] na podstawie określonej objętości V [m³] zespołu magnetycznego

$$P_{wl} = P_{\Sigma} / V \quad (6.30)$$

- 4 – Na podstawie wartości P_{wl} i korzystając z wzoru 6.19 określenie dla danego materiału wartość składowej zmiennej indukcji B_{AC}

$$B_{AC} = 1 / \sqrt[d]{f^a k P_{wl}} \quad (6.31)$$

gdzie a , d , k współczynniki charakteryzujące materiał ferromagnetyczny (jak we wzorze 6.19.)

- 5 – Na podstawie wzorów 6.26 lub 6.27 wyznaczenie gęstości prądu J_{RMS} [A/mm²] w uzwojeniach

$$J_{RMS} = \sqrt{\frac{P_{Cu-wl}}{k_{Cu} K_F \rho_{Cu} (1 + \alpha_T (T_{max} - 20))} 10^{12}} \quad (6.32)$$

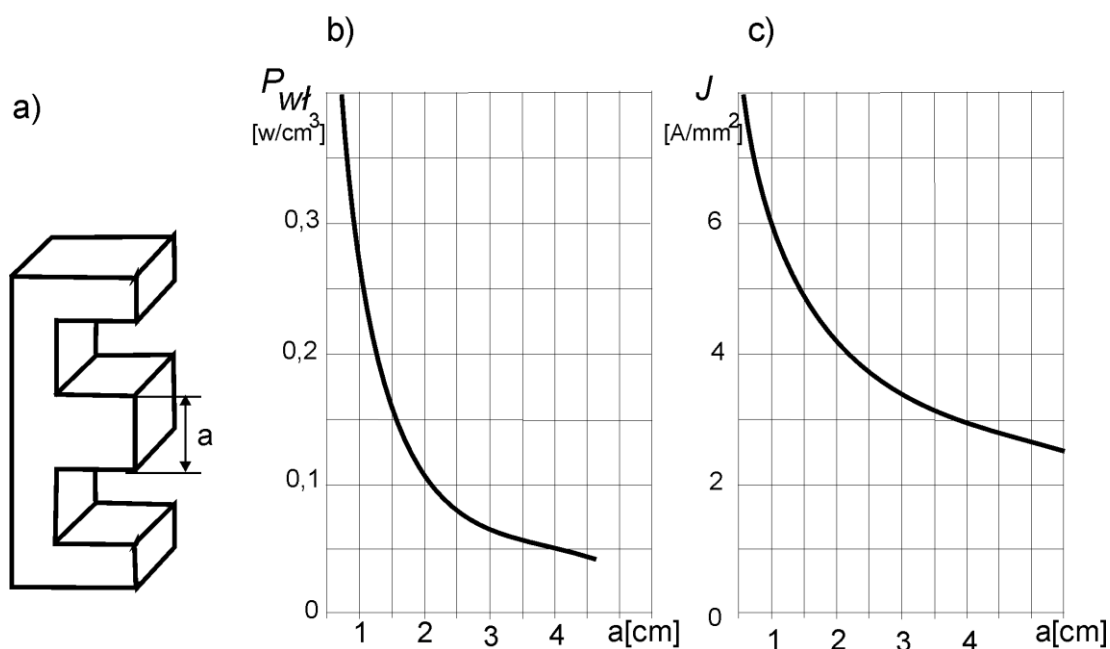
gdzie parametry i współczynniki odpowiadają tym podanym we wzorze 6.26

Powyższa procedura termicznych obliczeń może zostać dopasowana do konkretnego typu rdzeni, co szczególnie jest częste w przypadku rdzeni ferrytowych dla których wymiary geometryczne są normowane wg pewnego szeregu

Dla ilustracji tego procesu może posłużyć przykład odniesiony do rdzeni typu E. W tej kształtce wszystkie wymiary są uzależnione od wartości szerokości kolumny a [cm] (rys.6.12 a.)

Dla obliczeń wg, podanych powyżej wzorów 6.28 – 6.32 należy przy tego rodzaju kształtce przyjąć, że powierzchnia kompletnego rdzenia jest równa $59,6a^2$ a jego całkowita objętość $25,8a^3$

Na rysunku 6.12 b i c przedstawiono przykładowe wykresy właściwej mocy strat oraz gęstości prądu J w przypadku gdy ze względu na zastosowany przewód - licę uwzględniono $K_{Cu} = 0,3$. Temperaturę rdzenia i uzwojeń założono jako równą 100°C przy maksymalnej temperaturze otoczenia 40°C .



Rysunek 6.12. Przykładowe wykresy parametrów obliczeniowych dla transformatorów z rdzeniami z kształtek E.

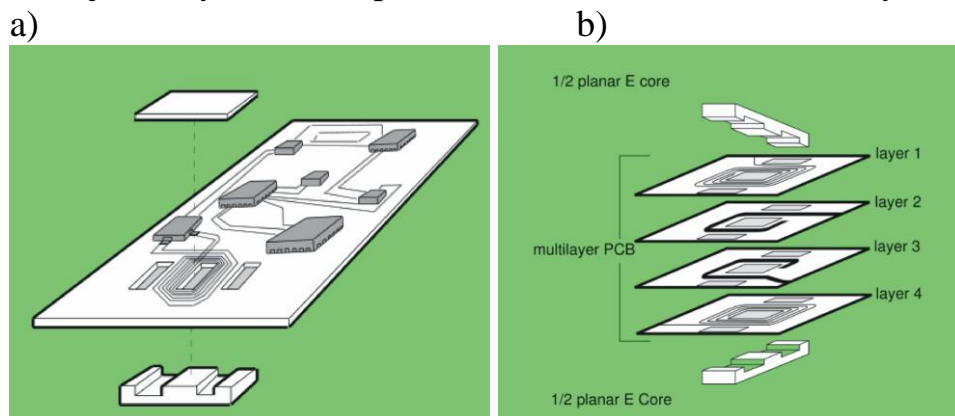
Projekt transformatorów i dławików przeznaczonych do pracy przy podwyższonej częstotliwości jest zadaniem kompleksowym i wymagającym dużego doświadczenia. Dokonywany jest zwykle w procesie iteracyjnym i prowadzi w kolejnych krokach do sprawdzenia czy wybrany rdzeń wraz z uzwojeniami zapewnia uzyskanie założonych parametrów przy minimalnych możliwych nakładach materiałowych (objętość, waga, koszt) oraz przy możliwie małych stratach energii w zdefiniowanych warunkach pracy.

Rozwój nowych technologii i wielkie zróżnicowanie materiałów, z których wykonywane są zespoły magnetyczne doprowadził w ostatnim dziesięcioleciu do powstania znacznej liczby specjalistycznych firm, które oferują bądź gotowe uszeregowane w typoszeregach parametrów (moc, napięcia, prądy) zespoły ma-

gnetyczne przeznaczone do pracy przy wysokich częstotliwościach (20-200kHz). Tym samym podważona została przedstawiona na wstępie wykładu opinia o konieczności samodzielnego wykonywania projektów zespołów magnetycznych przy projektowaniu całego przekształtnika. Zespoły magnetyczne mogą być dobierane do wymagań projektu w sposób analogiczny jak przyrządy półprzewodnikowe.

6.5. Transformatory planarne

Szczególnym rodzajem nowych rozwiązań w dziedzinie zespołów magnetycznych jest zastosowanie tzw. techniki planarnej. Jej istotą jest wykonanie uzwojeń w postaci obwodów drukowanych. Głównie technika ta znalazła zastosowanie w budowie transformatorów. Możliwe są w tym przypadku dwa rozwiązania wynikające z charakteru zastosowania. Jedno to zintegrowanie uzwojeń w ramach płytki obwodu drukowanego a rdzeń jest niejako „dopięty” do tej płytki (Rys. 6.13 a). Drugie rozwiązanie to transformator niezależny w którym uzwojenia wykonano w postaci kilku obwodów drukowanych (Rys.6.13 b)



Rys. 6.13. Sposób montażu transformatora bezpośrednio na płytce obwodu drukowanego z wykorzystaniem ścieżek miedzianych jako uzwojeń (a) oraz planarny transformator niezależny z uzwojeniami w postaci obwodów drukowanych (b)

Podstawowymi zaletami techniki magnetycznych zespołów planarnych są :

- płaski profil nadający się do obwodów drukowanych
- doskonałe właściwości termiczne
- mała indukcja rozproszenia
- dobra powtarzalność parametrów.

Technika planarna zyskuje na znaczeniu. Projektowanie takich zespołów bezpośrednio na płytce wymaga odpowiedniej wiedzy projektanta, przy czym jako najbardziej użyteczne informacje należy uznać noty aplikacyjne wytwórców rdzeni typu planarnego.