



## 5. Elementy LTC (2)

L- indukcyjności

T- transformatory

C - kondensatory

*Mieczysław Nowak*



Instytut Sterowania i  
Elektroniki Przemysłowej

**Czerwiec/lipiec 2009**

**Transformatory i dławiki małej częstotliwości**

Transformatory małej częstotliwości w urządzeniach energoelektronicznych są stosowane głównie jako tzw. sieciowe transformatory przekształtnikowe, których strona pierwotna połączona jest z linią elektroenergetyczną a strona wtórna z obwodem głównym przekształtnika. Oddzielną grupę stanowią jednofazowe transformatory sieciowe małej mocy, stosowane w zasilaczach układów sterujących, występujących we wszystkich urządzeniach energoelektronicznych zawierających przekształtniki sterowane. Rzadziej spotyka się transformatory w obwodach wyjściowych przekształtników o napięciach przemiennych niskiej częstotliwości (50Hz do 800Hz) z reguły o przebiegach niesinusoidalnych (prostokątnych). Transformatory takie pełnią rolę obwodów pośredniczących między przekształtnikiem a odbiornikiem prądu przemiennego jak ma to miejsce na przykład w urządzeniach rezerwowego zasilania – UPS (ang. *uninterruptable power supplies*). W dalszej części rozdziału omówiono właściwości i podstawowe zasady projektowania transformatorów sieciowych jedno – i wielofazowych, pracujących ze standardowymi napięciami (230V, 3x400V) i częstotliwości 50Hz. Przedstawiono także dławiki małej częstotliwości, wykorzystywane w filtrach napięcia i prądu stałego (wyprostowanego) oraz filtrach dolnoprzepustowych i selektywnych, stosowanych w obwodach wejściowych (po stronie sieci) i wyjściowych (po stronie odbiornika), pracujących przy częstotliwości 50Hz lub jej wielokrotnościach (tzn. przy częstotliwościach wyższych harmonicznym niskich rzędów). Dławiki takie mają zwykle indukcyjności wynoszące od kilku do kilkudziesięciu milihenrów, przy czym prąd tych dławików może być przemienny lub też zawierać składową stałą. Rdzenie tych elementów są wykonywane najczęściej z blach ferromagnetycznych składanych ze szczeliną powietrzną lub też jako cięte rdzenie zwijane z taśm stalowych lub amorficznych. Podano także podstawowe informacje dotyczące zasad projektowania transformatorów i dławików pracujących przy zwiększonych częstotliwościach.

**Transformatory i dławiki małej częstotliwości - Transformatory małej mocy**

Obliczenia projektowe transformatora powinny umożliwić wybór rodzaju blach, typu kształtek, pole przekroju rdzenia oraz rodzaju przewodów, ich przekroju poprzecznego (średnicy), liczby zwojów uzwojeń pierwotnych  $N_1$  i wtórnych  $N_2$ . Należy mieć też na uwadze wymagania dotyczące minimalizacji kosztów, wymiarów i masy transformatora, strat energii, sposobu chłodzenia, spadków napięć, hałaśliwości itp.

Obecnie producenci elementów magnetycznych, dysponując specjalistycznym oprogramowaniem, dokonuje obliczeń w oparciu o dostępne na rynku typowe rdzenie o określonych kształtach i wymiarach oraz o wynikające z doświadczenia typowe parametry uzwojeń. Moce pozorne uzwojenia pierwotnego  $S_1$  i  $S_2$  wtórnego transformatora można wyrazić wzorami

$$S_1 = U_1 I_1 = 4k_u f B_m S_{Fe} N_1 S_{Cu1} j$$

$$S_2 = U_2 I_2 = 4k_u f B_m S_{Fe} N_2 S_{Cu2} j$$

Gdzie: współczynnik kształtu napięcia  $k_u = 1,11$  dla napięć sinusoidalnych oraz  $k = 1$  dla napięć prostokątnych;  $S_{Cu1}$ ,  $S_{Cu2}$  – powierzchnia przekroju poprzecznego uzwojenia pierwotnego i wtórnego w  $m^2$ ;  $j$  – gęstość prądu w  $A/m^2$  (zwykle przyjmuje się jednakową gęstość w obu uzwojeniach);  $S_{Fe}$  – pole powierzchni przekroju poprzecznego materiału magnetycznego rdzenia;  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $I_1$ ,  $I_2$  – wartości skuteczne napięć i prądów uzwojenia pierwotnego i wtórnego transformatora.

Podane wzory wykorzystuje się do określenia wymiarów geometrycznych rdzenia, tzn. powierzchni przekroju poprzecznego rdzenia i pola powierzchni jego okna, wypełnionego uzwojeniami. Przyjmując jednakowe dla uzwojeń pierwotnych i wtórnych wartości współczynników wypełnienia miedzią ( $k_{Cu1} = k_{Cu2} = k_{Cu}$ ) oraz uwzględniając współczynnik wypełnienia rdzenia materiałem ferromagnetycznym  $k_{Fe}$  otrzymuje się

$$S_1 = 4k_u f B_m S_r k_{Fe} S_{N1} k_{Cu} j$$

$$S_2 = 4k_u f B_m S_r k_{Fe} S_{N2} k_{Cu} j$$

gdzie  $S_r$  – przekrój poprzeczny rdzenia w  $m^2$ ;  $S_{N1}$ ,  $S_{N2}$  – przekrój poprzeczny uzwojenia pierwotnego i wtórnego (powierzchnia okna zajmowana przez uzwojenia pierwotne i uzwojenia wtórne).

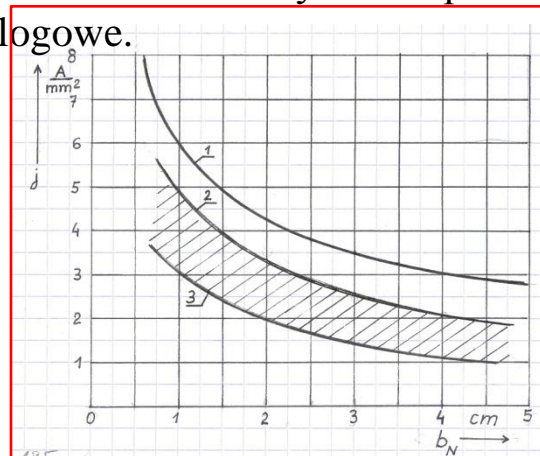
**Transformatory i dławiki małej częstotliwości - Transformatory małej mocy**

W prawidłowo wykonanym transformatorze powierzchnia okna rdzenia  $S_o$  powinna być w całości wypełniona uzwojeniami. Oznacza to, że powierzchnia ta powinna być równa sumie powierzchni  $S_{N1}$  i  $S_{N2}$ . Na podstawie podanych zależności otrzymuje się wzór

$$S_2 = \frac{4k_u \eta}{1 + \eta} f B_m k_{Fe} k_{Cu} j S_r S_o$$

przy czym  $\eta$  - sprawność energetyczna transformatora. W obliczeniach projektowych jej wartość przyjmuje się wstępnie z zakresu 0,7 do 0,9 dla transformatorów o mocach od 10VA do 250VA oraz od 0,92 do 0,95 przy mocach od 500VA do kilku kVA.

Wzór stanowi podstawę obliczeń projektowych transformatorów. Po wstępnym założeniu gęstości prądu (patrz diagram poniżej), wartości maksymalnej indukcji magnetycznej i pozostałych współczynników wyznacza się wartość iloczynu  $S_r S_o$ . W praktyce, mając na uwadze kilkakrotnie większe koszty jednostkowe uzwojeń miedzianych w stosunku do kosztów jednostkowych materiału magnetycznego, należy stosować kształtki, w których stosunek szerokości okna do szerokości rdzenia mieści się w granicach od 0,5 do 1. Przy spełnieniu tego warunku stosunek powierzchni przekroju rdzenia  $S_r$  do powierzchni okna  $S_o$  jest w przybliżeniu równy jedności. Kierując się tymi wskazówkami można wybrać odpowiedni rdzeń i kontynuować obliczenia projektowe w oparciu o jego dane katalogowe.



Orientacyjne dopuszczalne gęstości prądu w przewodach uzwojeń miedzianych w zależności od grubości tych uzwojeń (szerokości okna rdzenia wypełnionego uzwojeniami) przy przyroście temperatury  $\Delta T = 60$  C; 1-lica o wypełnieniu miedzią  $k_{Cu} = 0,3$ ; 2,3-przewody okrągłe o małym (2) i dużym (3) współczynniku  $k_{Cu}$

**Transformatory i dławiki małej częstotliwości - Transformatory małej mocy**

Jednym z ważniejszych etapów projektowania, w którym zapadają ostateczne decyzje odnośnie wymiarów geometrycznych rdzenia i uzwojeń oraz sposobu ich wykonania jest określenie zdolności elementu magnetycznego do oddawania wydzielanego w nim ciepła do otoczenia. Dokładne obliczenia termiczne są skomplikowane i niejednokrotnie niemożliwe do opisu za pomocą zwartych i czytelnych zależności analitycznych. Stąd też zwykle do obliczeń cieplnych wykorzystuje się zależności empiryczne, dające wyniki o zadowalającym stopniu dokładności. W przypadku dławików i transformatorów o wymiarach liniowych typowych dla elementów magnetycznych najczęściej stosowanych w energoelektronice (nieprzekraczających 25cm) przy wyznaczaniu szacunkowej dopuszczalnej wartości strat mocy w projektowanym elemencie magnetycznym wygodnie jest posłużyć się następującym wzorem

$$P_{Cu} + P_{Fe} \leq pah$$

gdzie:  $P_{Cu}$ ,  $P_{Fe}$  – straty mocy wydzielane w uzwojeniach i rdzeniu, określone np. w oparciu o wzory ;  $p$  – współczynnik rozpraszanie mocy w  $W/m^2$ ;  $a$  – największy wymiar rdzenia w kierunku poziomym;  $h$  – wysokość elementu magnetycznego. Wzór jest słuszny w przypadku, gdy element magnetyczny jest usytuowany w pozycji pionowej (pionowy kierunek osi uzwojeń). Wartości współczynnika  $p$  dla transformatorów z blachy krzemowej wynoszą od 1500 do 2500W/m<sup>2</sup> (dla temperatury otoczenia  $T_a = 40$  C i temperatury powierzchni nagrzanego elementu  $T_l = 115$  C) oraz od 1500 do 2000W/m<sup>2</sup> dla rdzeni ferrytowych (dla  $T_a = 60$  C i  $T_l = 115$  C). Należy dodać, że największą sprawność energetyczną elementu magnetycznego uzyskuje się przy równości strat mocy w uzwojeniu i rdzeniu a najkorzystniejsze właściwości cieplne przy równomiernym rozkładzie gęstości strat mocy (W/m<sup>3</sup>) w całej objętości transformatora lub dławika.

Jednofazowe transformatory sieciowe małej mocy, nieprzekraczającej 10kVA budowane są z reguły przy użyciu rdzeni z transformatorowych blach krzemowych ( $d = 0,35mm$ ;  $p_{Fe} = 1,3W/kg$ ;  $B_m = 1,2T$ ). Wykonuje się je jako transformatory suche, chłodzone powietrzem, zwykle o konstrukcji płaszczej.

**Transformatory i dławiki małej częstotliwości - Transformatory sieciowe przekształtników**

W wielu przypadkach przekształtniki muszą być zasilane z sieci za pośrednictwem transformatorów, które spełniają następujące zadania:

- dopasowanie wartości napięcia i prądu wejściowego oraz wyjściowego do wymagań odbiornika;
- zwiększenie liczby faz uzwojeń wtórnych w celu poprawy właściwości konstrukcyjnych i użytkowych przekształtnika;
- zapewnić odpowiednich przesunięć fazowych, niezbędnych do realizacji układów wielopulsowych, złożonych z szeregowo lub równoległe połączonych przekształtników składowych (jednostek komutacyjnych);
- odizolowanie galwaniczne układu przekształtnika i odbiornika od sieci zasilającej, m.in. umożliwiające zasilanie jednego odbiornika z kilku przekształtników.
- Tym podstawowym funkcjom transformatorów sieciowych towarzyszy pozytywne oddziaływanie uboczne, polegające m.in. na:
  - ograniczeniu wpływu zakłóceń w sieci na przekształtnik i odwrotnie – zakłóceń wytwarzanych przez przekształtnik na sieć zasilającą;
  - ograniczeniu stromości narastania prądów w zaworach półprzewodnikowych podczas komutacji;
  - ograniczeniu stromości narastania i wielkości spodziewanego prądu zwarcia w stanach awaryjnych, co ułatwia dobór i koordynację zabezpieczeń zwarciovych.

**Transformatory i dławiki małej częstotliwości - Transformatory sieciowe przekształtników**

Warunki pracy transformatorów przekształtnikowych jedno- i trójfazowych różnią się od warunków pracy zwykłych energetycznych transformatorów sieciowych. Prądy w uzwojeniach pierwotnych i wtórnych transformatorów przekształtnikowych mają zwykle przebiegi odkształcone. W układach prostowników jednokierunkowych prądy uzwojeń wtórnych zawierają składową stałą, powodującą niepożądane podmagnesowanie rdzenia transformatora. Jest to jedna z przyczyn unikania stosowania tego rodzaju przekształtników przy współpracy z transformatorem. W układach trójfazowych istnieje możliwość połączenia uzwojeń wtórnych transformatora w zygzak lub widełki i w ten sposób uniknięcia podmagnesowania rdzenia i tzw. elektromagnetycznych przepływów nieskompensowanych.

Transformatory zasilające przekształtniki sieciowe wielopulsowe, o liczbie impulsów napięcia wyprostowanego równej bądź większej od trzech, mają budowę trójkolumnową, trójfazowe uzwojenie pierwotne i jedno lub dwa systemy różnie skojarzonych trójfazowych uzwojeń wtórnych. Z reguły przyjmuje się, że dla danej topologii przekształtnika sieciowego znane są przebiegi wartości chwilowych jego prądów wejściowych a tym samym prądów uzwojeń wtórnych.

Moce pozorne przenoszone przez te uzwojenia określa się korzystając z wzorów

$$S_L = m_1 U_1 I_1$$

$$S_V = m_2 U_2 I_2$$

w których:  $m_1, m_2$  – liczba faz uzwojeń pierwotnych i wtórnych;  $U_1, U_2$  – wartość skuteczna napięć uzwojeń pierwotnych i wtórnych;  $I_1, I_2$  – wartość skuteczna prądów uzwojeń pierwotnych i wtórnych. Przy obliczaniu mocy pozornej uzwojenia pierwotnego należy zwiększyć wartość skuteczną prądu tego uzwojenia o prąd pracy jałowej transformatora o dominującej składowej magnesującej. W przypadku transformatorów małej mocy (do ok. 50kVA) wartość tego prądu zawiera się w granicach 5 – 10% prądu znamionowego natomiast dla transformatorów powyżej kilkudziesięciu kilowoltoamperów wynosi on od 4 do 8% prądu znamionowego.

**Transformatory i dławiki małej częstotliwości - Transformatory sieciowe przekształtników**

Procedura projektowania transformatorów zasilających przekształtniki sieciowe jest podobna do stosowanej dla transformatorów małej mocy. Rdzeń transformatora przekształtnikowego dobierana jest na podstawie *mocy typowej*, zwana też *mocą obliczeniową*, określana jako średnia arytmetyczna mocy pozornych uzwojeń pierwotnych  $S_{LN}$  i wtórnych  $S_{VN}$  transformatora przy znamionowym obciążeniu przekształtnika

$$S_{TN} = (S_{LN} + S_{VN}) / 2$$

Wartości względne mocy pozornych uzwojeń oraz mocy typowej transformatorów przekształtnikowych, odniesione do umownej mocy obwodu prądu wyprostowanego, określonej jako iloczyn wartości średniej napięcia wyprostowanego przy pracy jałowej przekształtnika oraz prądu wyprostowanego przy obciążeniu znamionowym układu ( $P_{di} = U_{di} I_{dN}$ ) podaje się często w postaci tablic uwzględniających układ połączeń uzwojeń. Należy zauważyć, że przy stałej (bez tętnień) wartości prądu wyprostowanego tak określona moc jest bardzo bliska mocy czynnej oddawanej przez przekształtnik. Z uwagi na wyższe harmoniczne w prądach uzwojeń moc obliczeniowa transformatora przekształtnikowego jest zawsze większa od mocy po stronie prądu wyprostowanego. Przy wzroście liczby impulsów napięcia wyprostowanego wartości chwilowe prądów wejściowych przekształtnika przybierają kształt krzywej, o zmniejszającej się zawartości wyższych harmonicznych. Dzięki temu wartość mocy obliczeniowej transformatora zbliża się do umownej mocy czynnej obwodu prądu stałego  $P_{di}$ . Przekrój (w  $\text{cm}^2$ ) kolumny rdzenia transformatora określa empiryczny wzór

$$S_{Fe} = c \sqrt{\frac{S_{T1}}{f}}$$

przy czym:  $S_{T1}$  – moc obliczeniowa, przypadająca na jedną kolumnę rdzenia transformatora w VA (w przypadku rdzeni trójkolumnowych  $S_{T1} = S_{TN}/3$ );  $f$  – częstotliwość napięcia w Hz;  $c$  – stała o wartości z zakresu 4 – 6 w zależności od użytych blach (większe wartości odnoszą się do blach o indukcji nasycenia ok. 1,5 T).



**Transformatory i dławiki małej częstotliwości - Transformatory sieciowe przekształtników**

Przekrój uzwojeń miedzianych jest obliczany na podstawie wartości skutecznej prądu i dopuszczalnej jego gęstości, którą dla transformatorów o mocy do 50kVA przyjmuje się z zakresu 2 – 3 A/mm<sup>2</sup>, a dla transformatorów dużej mocy (1 MVA) o chłodzeniu olejowym – 3,5 – 4 A/mm<sup>2</sup>. Liczbę zwojów uzwojeń oblicza się na podstawie wartości skutecznych napięć, dopuszczalnej maksymalnej indukcji magnetycznej, częstotliwości (50 Hz) oraz przekroju kolumny (wzór - slajd 8/7). Wymaganą wartość napięcia uzwojeń strony wtórnej transformatora w stanie pracy jałowej  $U_{V0}$  oblicza się na podstawie wartości średniej idealnego napięcia wyprostowanego  $U_{di}$  zależnej od układu przekształtnika. Przy wyznaczaniu wartości napięcia  $U_{di}$  należy uwzględnić możliwe graniczne stany wysterowania układu przekształtnika podczas pracy prostownikowej ( $U_{di(P)}$ ), a także podczas pracy falownikowej ( $U_{di(F)}$ ), o ile taki stan pracy jest dla przekształtnika przewidziany. Odpowiednie wartości idealnego napięcia wyprostowanego, z których należy uwzględnić tę większą, opisują zależności:

1. - dla pracy prostownikowej

2. dla pracy falownikowej

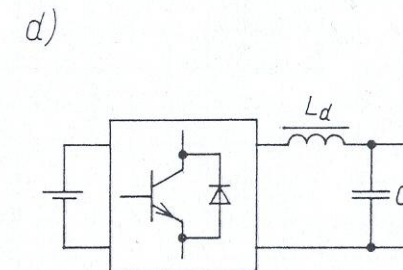
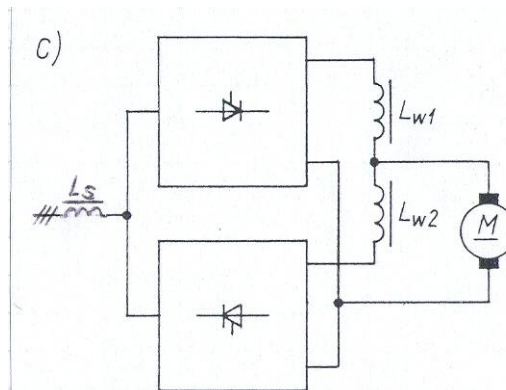
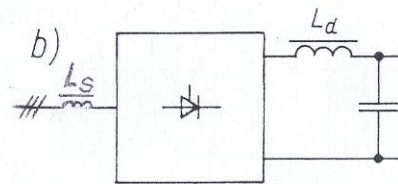
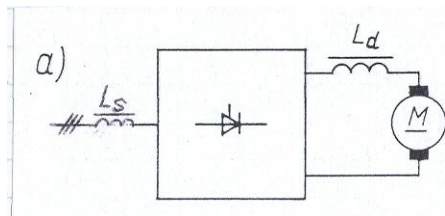
$$U_{di(P)} = \frac{U_{dN} + k_p U_{dRN} + nU_T + L_d (di_d / dt)}{(1 - \delta_{UL}) \cos \alpha_{min} - k_p d_{xN}}$$

$$U_{di(F)} = \frac{-U_{dN} + k_p U_{dRN} - nU_T + L_d (di_d / dt)}{-(1 - \delta_{UL}) \cos \alpha_{max} - k_p d_{xN}}$$

w których:  $U_{dN}$  – znamionowe napięcie odbiornika;  $U_{dRN}$  – spadek napięcia na rezystancjach w obwodzie prądu zmiennego i stałego przy znamionowym prądzie odbiornika;  $k_p = I_{dM} / I_{dN}$  – współczynnik przeciążenia przekształtnika określający stosunek maksymalnego prądu odbiornika do prądu znamionowego (gdzie  $I_{dM}$  – maksymalny średni prąd wyprostowany, przy którym powinna być jeszcze zachowana wartość znamionowa napięcia odbiornika);  $U_T$  – napięcie przewodzenia zaworów przekształtnika;  $n$  – liczba zaworów, przez które przepływa prąd odbiornika;  $\delta_{UL}$  – względny spadek napięcia w sieci zasilającej (określony na podstawie normy [179] lub przyjmowany w przybliżeniu: 0,1 – w sieciach niskonapięciowych i 0,05 – w sieciach wysokonapięciowych);  $d_{xN}$  – znamionowy względny spadek napięcia wywołany reaktancjami obwodu zasilającego (głównie indukcyjnością rozproszenia transformatora);  $\alpha_{min}$  – minimalny kąt opóźnienia załączania zaworów wynikający z koniecznego zapasu dla niezawodnego załączania tyrystorów (istotny w przypadku załączania tyrystorów wąskimi impulsami, zwykle  $\alpha_{min} = 5$  el.);  $\alpha_{max}$  – maksymalny kąt opóźnienia załączania tyrystorów przy pracy falownikowej bez niebezpieczeństwa przewrotu falownikowego, zwykle  $\alpha_{max} = 150 - 160$  el.;  $L_d(di_d/dt)$  – zapas napięcia konieczny do uzyskania dostatecznej dynamiki zmian prądu w obwodzie odbiornika;  $L_d$  – łączna indukcyjność odbiornika i dławika filtrującego (wygładzającego), włączonego w szereg z odbiornikiem.

**Transformatory i dławiki małej częstotliwości - Dławiki małej częstotliwości**

W przedziale od zera do kilkuset herców częstotliwości podstawowej harmonicznej prądu lub napięcia są stosowane dławiki z rdzeniami z krzemowych blach transformatorowych ze szczeliną powietrzną i z uzwojeniem wykonanym z miedzianego przewodu okrągłego lub profilowanego. Wartości ich indukcyjności wynoszą od kilkuset mikrohenrów do kilkudziesięciu milihenrów i prądów – od kilku do kilkuset amperów. Tego rodzaju dławiki są najbardziej rozpowszechnione i stosowane w obwodach prądu stałego do jego filtracji, a także zapewnienia w szerokim zakresie pracy przekształtnika ciągłego prądu wyprostowanego. W obwodach wyjściowych prostowników są też stosowane tzw. dławiki wyrównawcze, które spełniają funkcję ograniczania prądów wyrównawczych w układach przekształtników złożonych, składających się z jednostek komutacyjnych łączonych równolegle i odwrotnie – równolegle (układy nawrotne). W przypadku przekształtników zasilanych z sieci bez pośrednictwa transformatorów, konieczne jest zastosowanie dławików sieciowych ( $L_s$ ) ograniczających niekorzystny wpływ układu energoelektronicznego (sterowanego lub niesterowanego) na sieć i inne odbiorniki (redukcja komutacyjnych załamów napięcia sieci) a także zwiększające reaktancję obwodu zasilania w celu zmniejszenia stromości narastania prądów w komutujących zaworach jak również prądów zwarcia. W obwodach prądu i napięcia przemiennego dławiki z rdzeniami z blach krzemowych są stosowane w dolnoprzepustowych filtrach napięć wyjściowych lub w gałęziach filtrów selektywnych  $LC$  zapewniających zwieranie wybranych harmonicznym prądu. Na rysunkach a-d przedstawiono przykłady typowych zastosowań dławików pracujących przy małych częstotliwościach napięć i prądów.



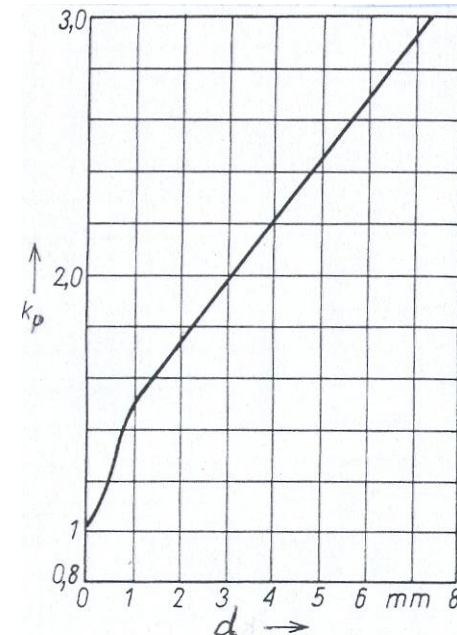
**Transformatory i dławiki małej częstotliwości - Dławiki małej częstotliwości**

Podstawowym parametrem charakteryzującym właściwości dławików rdzeniowych, oprócz wartości indukcyjności  $L$ , jest wartość maksymalna prądu, przy której jest jeszcze zachowana wymagana indukcyjność. Przekroczenie tej wartości prądu, z uwagi na nasycenie występujące w rdzeniu (zmiana nachylenia charakterystyki magnesowania), powoduje znaczne zmniejszenie indukcyjności i oznacza utratę właściwości użytkowych dławika. Przydatnym parametrem określającym właściwości dławika, jest też jego nominalna moc bierna, opisana zależnością

$$Q = I_n^2 \omega_N L$$

przy czym:  $I_N$  – znamionowa wartość skuteczna prądu przemiennego o kształcie sinusoidalnym;  $\omega_N$  – znamionowa pulsacja prądu.

Obecność szczeliny powietrznej powoduje pochylenie charakterystyki magnesowania obwodu magnetycznego dławika, co oznacza, że jego zastępcza przenikalność magnetyczna – o której decyduje długość szczeliny – ulega zmniejszeniu. Ułatwia to zaprojektowanie dławika o zadanych wartościach indukcyjności i maksymalnego prądu, przy którym nie wystąpi nasycenie rdzenia. Jednocześnie uzyskuje się linearyzację obwodu magnetycznego i tym samym stałość wartości indukcyjności w funkcji prądu.



**Transformatory i dławiki małej częstotliwości - Dławiki małej częstotliwości**

W uproszczonych obliczeniach projektowych dławika można skorzystać z zależności na indukcyjność  $L$  i maksymalną wartość indukcji magnetycznej  $B_M$ , które przy pominięciu reluktancji samego rdzenia przyjmują postać

$$L = \frac{N^2 k_p \mu_0 S_{Fe}}{l_p}$$

$$B_M = \frac{NI_M k_p \mu_0}{l_p}$$

gdzie:  $N$  – liczba zwojów uzwojenia dławika;  $I_M$  – wartość maksymalna (szczytowa) prądu w dławiku;  $l_p = nd_p$  – łączna długość szczeliny;  $n$  – liczba pojedynczych szczelin na drodze strumienia magnetycznego przy czym każda z nich ma długość  $d_p$ ;  $k_p$  – empiryczny współczynnik korekcyjny, uwzględniający wpływ powiększenia przekroju poprzecznego szczeliny przy zmianie jej długości, ( wykres ze slajdu 8/10). Na podstawie podanych zależności, zakładając długość szczeliny  $d_p$ , można określić wymagany czynny przekrój rdzenia, a także liczbę zwojów zgodnie z wzorami

$$S_{Fe} = \frac{Lk_p I_M^2 \mu_0}{nd_p B_M^2}$$

$$N = \frac{nd_p B_M}{k_p \mu_0 I_M}$$

Przy wyborze wartości  $d_p$  należy dążyć do tego, by była ona niewielka (ok. 0,1) w porównaniu z wymiarami obrysowymi rdzenia, gdyż unika się wtedy znacznej deformacji pola magnetycznego w otoczeniu szczeliny. Tym samym zmniejsza się niekorzystne oddziaływania zewnętrzne dławika i dodatkowe straty mocy związane z prądami wirowymi, indukowanymi przez pole w uzwojeniach i innych metalowych częściach konstrukcyjnych dławika w przestrzeni w pobliżu szczeliny. O ile to możliwe, lepiej zamiast mniejszej liczby dłuższych szczelin zastosować więcej krótszych.

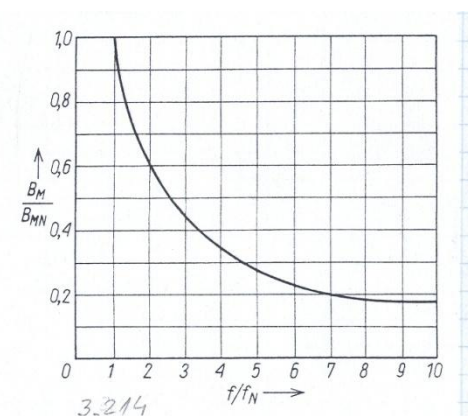
**Transformatory i dławiki małej częstotliwości - Dławiki małej częstotliwości**

Wartość indukcji maksymalnej w rdzeniu przyjmuje się taką, by unikać nieliniowości nasycenia, przy czym – w przypadku, gdy częstotliwość prądu przemiennego w dławiku, powodującego cykliczne przemagnesowanie w zakresie od  $-B_M$  do  $+B_M$  jest większa niż 50 Hz – dla utrzymania niezminionej wartości strat mocy w blachach rdzenia i ograniczenia efektu naskórkowości w uzwojeniach w pobliżu szczeliny – należy zmniejszyć wartość indukcji maksymalnej zgodnie z zależnością przedstawioną na załączonym diagramie. Na podstawie wartości maksymalnej indukcji  $B_M$  i częstotliwości jej zmian z danych katalogowych blach wyznacza się stratność i całkowite straty mocy wydzielane w rdzeniu  $P_{Fe}$ .

W dławikach stosowanych w obwodach prądu wyprostowanego prąd dławika jest jednokierunkowy. Zawiera on składową stałą  $I_d$  i składową przemienną o wartości szczytowej (amplitudzie)  $\Delta I$  (np.  $\Delta I = (0,05 \dots 0,2)I_d$ ) i częstotliwości  $f_d$  równej iloczynowi częstotliwości sieci i liczby pulsów  $p$  przekształtnika ( $f_d = p \cdot 50$  Hz). Prąd maksymalny  $I_M$  dławika jest wówczas równy sumie składowej stałej  $I_d$  i wartości szczytowej składowej przemienną  $\Delta I_d$ . Ze względu na podmagnesowanie rdzenia składową stałą prądu, indukcja w rdzeniu zawiera również składową  $B_d$ , na którą nakłada się składowa przemienna o wartości szczytowej  $\Delta B$ . Przy założeniu proporcjonalności między prądem dławika a indukcją w rdzeniu, wartość szczytową składowej przemienną indukcji można oszacować na podstawie prostej relacji

$$\Delta B = \frac{\Delta I}{I_M} B_M$$

Tak wyznaczona amplituda  $\Delta B$  tętnień indukcji nie powinna przekraczać wartości odczytanej z wykresu podanego na rys. dla częstotliwości  $f = f_d$  tętnień składowej przemienną prądu. W tym przypadku wielkości na osi rzędnych wykresu należy interpretować jako  $\Delta B/B_M$  a na odciętych jako  $f_d/f_N$ .



**Transformatory i dławiki średniej częstotliwości**

W nowoczesnych układach energoelektronicznych, dzięki przyrządom półprzewodnikowym o bardzo dobrych właściwościach dynamicznych, w coraz większym zakresie przekształcanie energii następuje z zastosowaniem częstotliwości znacznie większych od 50 Hz. Jednym z głównych powodów jest fakt, że dzięki większym częstotliwościom napięć i prądów możliwe jest stosowanie elementów biernych o mniejszych wartościach indukcyjności i pojemności, jak też zmniejszenie ich wymiarów geometrycznych, masy a także związanych z tym kosztów. Znaczne zmniejszenie wymiarów i masy dotyczy także transformatorów pracujących przy zwiększonych częstotliwościach. Wpływa to także na obniżenie jednego z ważniejszych wskaźników użytkowych urządzeń energoelektronicznych jakim jest gęstość mocy ( stosunek mocy urządzenia do jego masy lub objętości). W praktyce, najbardziej interesujący jest zakres tzw. średnich częstotliwości 1 – 100 kHz, przy czym szczególne znaczenie mają częstotliwości z pasma nadakustycznego ( $> 20\text{kHz}$ ), gdyż nie powodują nieprzyjemnych efektów dźwiękowych.

Istotnym problemem, w przypadku projektowania elementów magnetycznych przewidzianych do pracy w podanym przedziale średnich częstotliwości, jest ograniczenie wartości strat mocy, wydzielanych w uzwojeniach i materiale magnetycznym rdzenia. Zagadnienie to ma szczególne znaczenie, gdyż wywołane podwyższoną częstotliwością jednostkowe straty mocy – odniesione do mocy całkowitej, objętości lub masy tych elementów – są większe niż w przypadku elementów magnetycznych pracujących przy częstotliwości 50 Hz. W celu minimalizacji tych strat należy przy projektowaniu brać pod uwagę kształt, wymiary i rodzaj materiału magnetycznego rdzenia oraz typ, wymiary i sposób ułożenia uzwojeń.

**Transformatory i dławiki średniej częstotliwości**

Najbardziej uniwersalnym i dotąd najczęściej stosowanym materiałem do budowy rdzeni magnetycznych rozpatrywanej klasy transformatorów i dławików są ferryty o bardzo małej stratności właściwej, co pozwala na ich stosowanie w układach energoelektronicznych nawet przy częstotliwościach do 1 MHz. Rdzenie te, ze względów technologicznych produkuje się w formie rozmaitych kształtek, (kształtki E, U, toroidy, rdzenie kubkowe), które w przypadku transformatorów są składane bez szczeliny, natomiast dla dławików przewiduje się szczeliny o odpowiedniej długości.

Poszczególne kształtki są dostępne w szeregach wymiarowych, umożliwiających dopasowanie do mocy pozornej transformatora lub projektowanego dławika. Materiały magnetyczne ferrytowe mają jednak małą wartość indukcji nasycenia (typowe wartości to 300–400 mT). Występują też trudności w utrzymaniu odpowiedniej tolerancji wymiarów kształtek tak, że moc transformatorów nie przekracza 10 kVA. Stąd też coraz szersze zastosowanie znajdują rdzenie amorficzne (z tzw. *szkła metalicznego*) a także rdzenie z materiałów *mikro-* i *nano-kryształicznych*. Mają one postać pierścieni toroidalnych, nawijanych z cienkiej taśmy o grubościach poniżej 0.05 mm lub tzw. kształtek U, uzyskiwanych z nawojów owalnych, przeciętych i o precyzyjnie zeszlifowanych płaszczyznach przekroju tak, by można je było złożyć z pomijalnie małą lub precyzyjnie nastawianą szczeliną.

Uzwojenia nawijane są na specjalnie dostosowanych do kształtu i wymiarów rdzenia *karkasy*, (szpule wytłoczone z tworzywa) wyposażone w osprzęt pomocniczy, jak np. końcówki lutownicze czy specjalne uchwyty, znacznie upraszczające montaż i mocowanie końców uzwojeń. Przewód nawojowy stanowi zwykle taśma miedziana jedno- lub dwustronnie izolowana lub lica wysokoczęstotliwościowa będąca przeplotem cienkich wzajemnie izolowanych drucików.

**Transformatory i dławiki średniej częstotliwości ( Transformatory)**

Projektowanie transformatorów o podwyższonej częstotliwości napięć i prądów jest podobny do omówionego wcześniej projektowania transformatorów małej częstotliwości. Obliczenia muszą jednak uwzględniać zarówno właściwości rdzenia (stratność) i uzwojeń (prądy wirowe) jak również warunki pracy tych elementów, które zależą w dużym stopniu od rodzaju przekształtnika, w którym będą zastosowane.. Przy obliczeniach i próbach laboratoryjnych, mających na celu sprawdzenia możliwości ograniczenia strat mocy w uzwojeniach i rdzeniu do wartości, przy których nie będzie następowało nadmierne nagrzewanie, wielkościami podlegającymi optymalizacji są liczba, powierzchnia i kształt przekroju zwojów, liczba sekcji i warstw uzwojeń, wartość maksymalnej indukcji magnetycznej oraz powierzchnia przekroju rdzenia. Wielkości te są powiązane z wartością występującego na uzwojeniach transformatora napięcia przemiennego o sinusoidalnym lub prostokątnym kształcie przebiegu wartości chwilowej zależnościami ( slajd 7/10). Danymi wyjściowymi do obliczeń projektowych są zwykle: częstotliwość  $f$  i wartości skuteczne napięć i prądów uzwojeń strony pierwotnej ( $U_1, I_1$ ) i wtórnej ( $U_2, I_2$ ) transformatora, moc pozorna transformatora (np.  $S_1$ ), temperatura otoczenia  $T_a$  i dopuszczalna temperatura powierzchni  $T_p$  transformatora. Najczęściej uzwojenie pierwotne transformatora średniej częstotliwości jest podłączane do zacisków wyjściowych układu energoelektronicznego, który przekształca ściśle określone napięcie stałe o wartości decydującej bezpośrednio o napięciu wyjściowym przekształtnika i jednocześnie napięciu uzwojenia pierwotnego transformatora. Wartość skuteczną tego napięcia można wyrazić wzorem

$$U_1 = 4k_u \Delta B S_{Fe} f N_1$$

przy czym:  $k_u$  – współczynnik kształtu ( $k_u = 1,11$  dla napięć sinusoidalnych;  $k_u = 1$  dla napięć prostokątnych o wypełnieniu 50%);  $\Delta B$  – wartość szczytowa składowej przemiennnej indukcji magnetycznej rdzenia,  $N_1$  – liczba (całkowita) zwojów uzwojenia pierwotnego transformatora.



**Transformatory i dławiki średniej częstotliwości ( Transformatory)**

W zależności od rodzaju przekształtnika wymuszającego napięcie na uzwojeniu pierwotnym transformatora wartość szczytowa składowej przemiennej indukcji magnetycznej rdzenia powinna spełniać następujące warunki:

- a)  $\Delta B = B_m$  – dla indukcji magnetycznej o przebiegu przemiennym (dwukierunkowym bez składowej stałej)
- b)  $\Delta B \leq B_m/2$  – dla indukcji magnetycznej o przebiegu jednokierunkowym

Indukcja maksymalna  $B_m$ , która występuje w rdzeniu w obu przypadkach musi być mniejsza od indukcji nasycenia  $B_{max}$ . Przy doborze wartości indukcji  $\Delta B$  należy kierować się przede wszystkim ograniczeniem strat mocy w rdzeniu tak, aby ich wartość była w odpowiedniej relacji do strat mocy w uzwojeniach, co jest konieczne dla zapewnienia maksymalnej sprawności transformatora. W przypadku rdzeni ferrytowych, optymalna wartość stosunku strat mocy w rdzeniu do strat mocy w uzwojeniach  $P_{Fe}/P_{Cu} \approx 0,8$ , co odpowiada w przybliżeniu równości jednostkowych strat mocy ( $W/m^3$ ) w obu tych składnikach transformatora i wynikającym stąd najlepszym warunkom odprowadzania ciepła.

Moc pozorna transformatora wyraża wzór

$$S = U_1 I_1 = 4k_u \Delta B f S_{Fe} N_1 S_{Cu} j$$

Projektant, znając rodzaj przekształtnika oraz kształty przebiegów napięcia i indukcji dla wybranego materiału magnetycznego przyjmuje wartość indukcji  $\Delta B$ , gęstość prądu  $j$  (z zakresu 3–5 A/mm<sup>2</sup> na podstawie przewidywanych wymiarów rdzenia), współczynnik wypełnienia rdzenia (dla ferrytu  $k_{Fe} = 1$ ) oraz współczynnik wypełnienia okna miedzią ( $k_{Cu} = 0,3$  dla licy i 0,7 dla taśmy) może wyznaczyć wartość iloczynu  $S_r S_o$ . Wiedząc, że w typowych rdzeniach przekroje rdzenia i okna są do siebie zbliżone, przyjmuje kolejno jedną z tych wielkości oblicza drugą tak długo, aż oba przekroje będą najbliższe danych katalogowych konkretnego rdzenia.

**Transformatory i dławiki średniej częstotliwości ( Transformatory)**

Specyficzna budowa transformatorów i dławików toroidalnych pociąga za sobą odmienność procesu oddawania ciepła przez te elementy. Ciepło wydzielane w rdzeniu przenika na zasadzie przewodnictwa cieplnego przez uzwojenia i wspólnie z ciepłem wynikającym ze strat energii w uzwojeniach jest oddawane do otoczenia poprzez zewnętrzną powierzchnię uzwojeń w oparciu o mechanizm unoszenia i promieniowania. Przyrost temperatury powierzchni zewnętrznej uzwojeń w odniesieniu do temperatury otoczenia może być wyrażony zależnością ogólną

$$\Delta T = P_{Cu} + P_{Fe} R_{th} = P_{Cu} + P_{Fe} \frac{1}{\alpha A_N}$$

przy czym:  $A_N$  – powierzchnia zewnętrzną uzwojeń nawiniętych na rdzeniu toroidalnym,  $R_{th}$  – rezystancja termiczna transformatora. W obliczeniach uproszczonych przyjmuje się zazwyczaj, że współczynnik oddawania ciepła  $\alpha = 14 \text{ W/m}^2$ .

W wielu przypadkach wielkością, która może wpływać na zdolność przekazywania energii przez transformator średniej częstotliwości jest jego indukcyjność rozproszenia, która musi być oszacowana już na etapie projektowania transformatora. Zależy ona przede wszystkim od sposobu nawinięcia i ułożenia uzwojeń strony pierwotnej i wtórnej tak, że projektant powinien rozpatrzyć kilka wersji ich konstrukcji.

Transformatory stosowane w układach przekształtników (przetwornic) dwutaktowych działają jak dławiki z dwoma uzwojeniami. Zasadnicza różnica między takimi transformatorami a transformatorami zwykłymi polega na tym, że w transformatorach gromadzących energię prądy nie płyną jednocześnie w obu uzwojeniach ale na przemian. W obliczeniach projektowych należy zwrócić uwagę na dobór odpowiedniej indukcyjności uzwojenia pierwotnego transformatora, którego rdzeń powinien charakteryzować się zlinearyzowaną charakterystyką magnesowania, uzyskaną bądź poprzez zastosowanie rdzeni ferrytowych ze szczeliną skupioną lub też rdzeni z materiałów proszkowych o szczelinie rozproszonej.

**Transformatory i dławiki średniej częstotliwości ( Dławiki)**

Podobnie jak w przypadku transformatorów, projektowanie dławików o podwyższonej częstotliwości wymaga określenia warunków pracy tych elementów, wynikających z roli jaką pełnią w konkretnym układzie energoelektronicznym. Wśród dławików stosowanych w układach o podwyższonej częstotliwości przełączeń (powyżej 1 kHz) rozróżnia się dwa zasadnicze rozwiązania:

- dla małych wartości indukcyjności, rzędu stu mikrohenrów, szczególnie przy dużych wartościach szczytowych prądu, zalecane są dławiki bezrdzeniowe (powietrzne),
- dla większych indukcyjności (dziesiątki mikrohenrów do kilkudziesięciu milihenrów) stosuje się dławiki z typowymi rdzeniami ferrytowymi (zwykle z fabrycznie wykonaną szczeliną), z taśm amorficznych, nanokrystalicznych lub materiałów proszkowych z żywicznym komponentem wiążącym o szczelinie rozproszonej.

W zależności od przewidzianego zadania tok obliczeń projektowych dławików pracujących przy podwyższonych częstotliwościach składowych przemiennych prądów przebiega w podobny sposób jak w przypadku dławików niskich częstotliwości lub transformatorów z rdzeniami podmagnesowywanymi składową stałą natężenia pola magnetycznego, wynikająca z istnienia składowej stałej prądu. Przy projektowaniu dławików pracujących z podwyższoną częstotliwością szczególna uwaga musi być zwrócona na precyzyjne określenie długości szczeliny powietrznej w rdzeniach o szczelinie skupionej. Z uwagi na to, że przy większych długościach szczeliny szybkozmienne pole magnetyczne w jej otoczeniu wywołuje znaczne straty energii, związane z prądami wirowymi w uzwojeniach przyległych do szczeliny, konieczne jest stosowanie nie pojedynczej szczeliny, lecz – większej liczby, krótkich szczelin. Należy pamiętać, że przy zbyt długiej szczelinie tzw. szczelinowe straty mocy w uzwojeniach mogą przewyższać straty wydzielane w całym rdzeniu. Wynika to z faktu, że zdecydowana większość energii całego magnetowodu jest skupiona właśnie w szczelinie powietrznej. Pod tym względem korzystne właściwości wykazują rdzenia proszkowe o szczelinie rozproszonej.

**Transformatory i dławiki średniej częstotliwości ( Dławiki)**

W przypadku dławików spełniających rolę tzw. filtrów prądu stałego, straty mocy w rdzeniu wywołane składową zmienną pola magnetycznego są z reguły bardzo małe i dlatego główne zadanie polega na takim doborze długości szczeliny, przekroju przewodów uzwojenia i liczby zwojów mieszczących się w oknie rdzenia, aby straty mocy wywołane prądem stałym były jak najmniejsze. Jednak nawet jeśli składowa stała  $I_d$  prądu jest w takich dławikach dominującą ( $\Delta I$  odpowiada ok.  $0,1I_d$ ), to mimo to udział strat mocy od prądów wirowych przekracza z reguły 10% całkowitych strat mocy w uzwojeniu. W przypadku dławików o prądach zawierających dużą składową przemienną o podwyższonej częstotliwości – poza długością szczeliny (lub szczelin) i liczbą zwojów – istotne znaczenie ma wartość międzyszczytowa składowej przemiennnej indukcji magnetycznej, decydującej o stratach energii w rdzeniu. W każdym przypadkach nadrzędnym warunkiem jest niedopuszczenie do nasycenia rdzenia, tak aby w szerokich granicach zmian prądu dławik miał charakter liniowy, tzn. utrzymywał stałą wartość indukcyjności. Wymienione warunki pracy są ujęte zarówno w wielkości, którą można określić jako moc pozorną dławika (iloczyn wartości skutecznej napięcia i prądu) lub też - co w praktyce wykorzystuje się najczęściej - w wielkości nazywanej „energią gromadzoną w dławiku”, definiowaną jako iloczyn indukcyjności  $L$ , wartości szczytowej  $I_{max}$  oraz wartości skutecznej  $I$  prądu dławika przy znamionowych warunkach pracy lub też przewidywanych stanach przeciążeniowych. Korzystając z wzorów, określających relację między indukcyjnością, prądem i strumieniem skojarzonym dławika oraz z innych podanych wcześniej zależności, odnoszących się do magnetowodów i uzwojeń, otrzymuje się

$$LI_{max} I = jB_m k_{Cu} k_{Fe} S_o S_r$$

W praktyce, często stosuje się uproszczoną procedurę projektowania dławików, w której wykorzystuje się wielkość  $A_L$ , stanowiącą wartość indukcyjności jednego zwoju, nawiniętego na danym rdzeniu o określonej szczelinie powietrznej  $l_p$ . Wielkość tę należy odczytać z katalogu na podstawie wyliczonej energii magazynowanej w rdzeniu ( $LI_{max}I$ ) a następnie znaleźć liczbę zwojów  $N^2=L/A_L$ . Wstępnego wyboru rdzenia dokonuje się na podstawie wartości iloczynu  $S_oS_r$ .

**Transformatory i dławiki średniej częstotliwości ( Dławiki)**
**Dławiki bezrdzeniowe (powietrzne)**

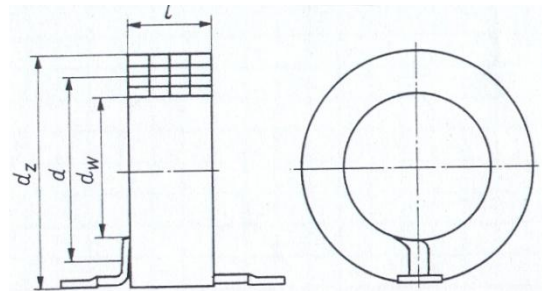
Wartości indukcyjności dławików powietrznych zwykle nie przekraczają kilkudziesięciu mikrohenrów. Ich cenna zaletą jest bardzo dobra liniowość związana z brakiem rdzenia ferromagnetycznego. Mogą być przydatne jako elementy indukcyjne ograniczające stromość narastania prądu w dużych przekształtnikach sieciowych (dławiki sieciowe), w obwodach wyrównywania rozptyłu prądów w równoległe łączonych diodach lub tyrystorach, w obwodach przekształtników rezonansowych itp. Typową formą wykonania dławików jest cewka jedno – lub wielowarstwowa, nawinięta na karkasie lub zalana żywicą w postaci krążka lub walca ( rys. a, b) . Przy zastosowaniu w układach o małej częstotliwości prądu przewodem nawojowym jest zwykły kształtownik miedziany w oplocie z bawełny lub włókna szklanego, natomiast przy średnich i wysokich częstotliwościach stosuje się licę lub taśmę miedzianą.

Do określenia wymiarów dławika o kształcie krążka (rys.a) służy zależność wiążąca liczbę zwojów  $N$  oraz wymiary geometryczne uzwojenia z wartością indukcyjności o postaci

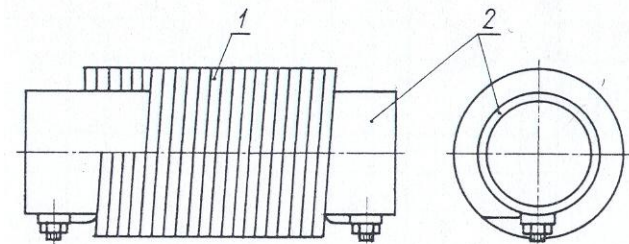
$$L = \frac{0,1\pi^2 dN^2}{0,45 + \alpha + \beta + 0,66\alpha\beta \left( \frac{\alpha + 1}{\alpha + 2} \right)}$$

gdzie:  $L$  – indukcyjność,  $\mu\text{H}$ ;  $d$  – średnica , m;  
 $\alpha = 1/d$ ,  $\beta = b/d$  – współczynniki odzwierciedlające kształt cewki zgodnie z oznaczeniami na rys.a), przy czym  $d = (d_z + d_w)/2$  – średnia średnica dławika,  $b = (d_z - d_w)/2$  – grubość nawoju.

a)



b)



## Transformatory i dławiki średniej częstotliwości ( *Dławiki* )

### Dławiki bezrdzeniowe (powietrzne) c.d.

Pomocny przy obliczeniach może okazać się nomogram, podający zależność między wartością indukcyjności normowanej na iloczyn średnicy i kwadratu liczby zwojów ( $L/(dN^2)$ ) a parametrami  $\alpha$  i  $\beta$ , pokazany na rysunku .

Jako wielkości optymalne, ze względu na minimalizację ciężaru miedzi zastosowanej do budowy dławika, należy przyjąć  $\alpha = \beta = 0,34$  (co odpowiada relacji  $d_z = 2d_w = 4l$ ). Dla tak dobranych zależności między wymiarami obowiązuje wzór

$$L = 0,84dN^2$$

Kształt przekroju przewodu, z którego wykonuje się dławik nie ma istotnego znaczenia dla dokładności obliczeń indukcyjności, a jego powierzchnia przekroju  $S_{Cu}$  zależy głównie od maksymalnej wartości skutecznej prądu przepływającego przez niego z uwzględnieniem typowych wartości (2-3 A/mm<sup>2</sup>). Przy wysokich częstotliwościach prądów należy liczyć się z wpływem prądów wirowych na nierównomierność gęstości prądu w przekroju przewodu. Przy konstrukcji uzwojeń należy wówczas wziąć pod uwagę ogólne wskazówki podane w rozdziale traktującym o zjawiskach naskórkowych i zbliżenia.

