

Działanie transformatora

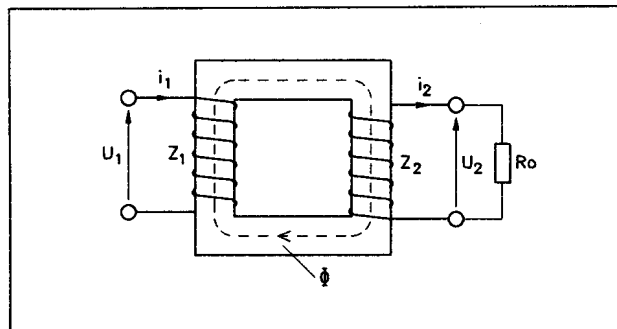
Transformator jest elementem wykorzystującym zjawisko indukcji wzajemnej. Przepływający w uzwojeniu z_1 (nazywanym pierwotnym) prąd wytwarza pole magnetyczne, którego większa część o strumieniu Φ obejmuje także uzwojenie z_2 (nazywane wtórnym). Reszta pola magnetycznego transformatora to tzw. pole rozproszone mogące stanowić źródło zakłóceń innych obwodów. Zmiany prądu w uzwojeniu pierwotnym powodują zmiany strumienia i w konsekwencji indukowanie się siły elektromotorycznej samoindukcji w uzwojeniu pierwotnym, o wartości równej napięciu zasilającemu to uzwojenie u_1 . W uzwojeniu wtórnym indukowana jest siła elektromotoryczna indukcji wzajemnej o wartości u_2 . Poglądowo działanie transformatora przedstawiono na rys. 1.

Wielkości indukowanych sił elektromotorycznych (napięć na uzwojeniach) są proporcjonalne do ilości zwojów uzwojeń i szybkości zmian strumienia. Wynika stąd podstawowy warunek pracy transformatora – przepływ prądu zmiennego wywołujący zmienny strumień magnetyczny. Prąd stały płynący w uzwojeniu pier-

wotnym wytworzy stały strumień magnetyczny, który nie wytworzy ani siły elektromotorycznej samoindukcji (zwarcie w obwodzie uzwojenia pierwotnego), ani tym bardziej siły elektromotorycznej indukcji wzajemnej (brak napięcia na uzwojeniu wtórnym).

$$u_1 = -z_1 \cdot (d\Phi/dt)$$

$$u_2 = -z_2 \cdot (d\Phi/dt)$$



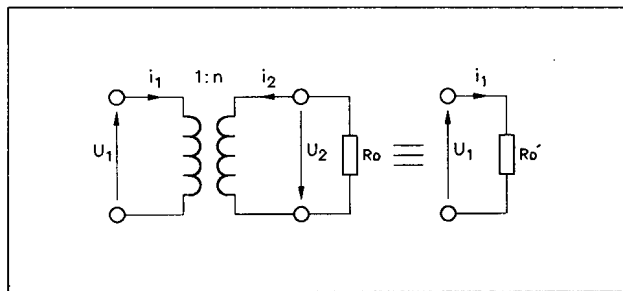
Rys. 1 Zasada działania transformatora

Typowe zastosowanie transformatorów to zmiana wartości napięcia przemiennego (zmiennego, dwukierunkowego np. sieciowego). Za pomocą transformatora można napięcie przemiennie podwyższać lub obniżać. Stosunek napięcia wtórnego do pierwotnego równy jest stosunkowi ilości zwojów uzwojeń i nazywany jest *przekładnią transformatora* n .

$$n = u_2/u_1 = z_2/z_1$$

Istotną właściwością transformatora jest brak połączenia dla prądu stałego między uzwojeniami pierwotnym i wtórnym. Przekazuje on energię elektryczną za pośrednictwem pola magnetycznego. Dla skupienia pola magnetycznego stosuje się rdzenie z materiałów magnetycznych zwane również magnetowodami. Straty związane z przekazywaniem energii są niewielkie.

Odmianą transformatora wykorzystującego jedno z uzwojeń jako wspólne dla obwodów pierwotnego i wtórnego jest autotransformator. Działanie autotransformatora prezentuje rys. 2.



Rys. 2 Zasada działania autotransformatora

W pokazanym na tym rysunku autotransformatorze wspólnym jest uzwojenie z_2 , stanowiące część uzwojenia z_1 . Zasilane uzwojenie pierwotne (z_1) wytwarza strumień magnetyczny Φ indukujący w nim samym oraz jego części z_2 siłę elektromotoryczną samoindukcji proporcjonalną do ilości zwojów uzwojeń. Stosunek napięcia wtórnego do pierwotnego równy jest stosunkowi ilości zwojów i nazywany także przekładnią n . Wykonywane są autotransformatory obniżające napięcie jak i podwyższające.

Autotransformator nie zapewnia oddzielenia obwodów dla prądu stałego (tzw. oddzielenia galwanicznego). Jego najistotniejszą zaletą jest oszczędność drutu miedzianego jakim najczęściej są nawijane uzwojenia.

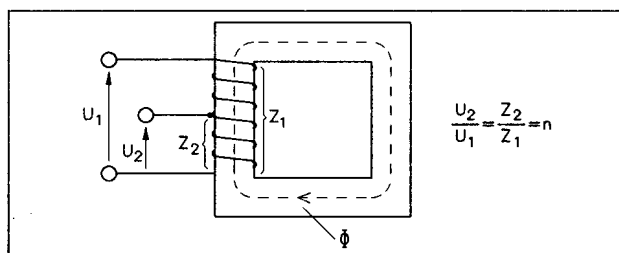
Przy przekazywaniu energii przez transformator straty energii są niewielkie, co oznacza, że moce prądu zmiennego w obwodzie pierwotnym i wtórnym są prawie równe.

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$$

gdzie: U_1, U_2 – wartości skuteczne napięć,
 I_1, I_2 – wartości skuteczne prądów.

Z zależności tej wynika, że w transformatorze podwyższającym napięcie jednocześnie wystąpi obniżenie prądu i odwrotnie w obniżającym napięcie – podwyższenie prądu.

Rozpatrując stosunki napięcia i prądu w uzwojeniach pierwotnym i wtórnym dochodzi się do wniosku, że transformator realizuje także transformację rezystancji pokazaną na rys. 3.



Rys. 3 Transformacja rezystancji

Uzwojenie wtórne obciążone jest rezystancją R_0 , która jest widziana na zaciskach uzwojenia pierwotnego jako rezystancja R_0' . Wielkość tej rezystancji związana jest z przekładnią transformatora i wynosi:

$$R_0' = R_0/n^2$$

Tak więc transformator obniżający napięcie podwyższa rezystancję widzianą na jego zaciskach od strony zasilania (sterowania) w stosunku do rezystancji podłączonej do uzwojenia wtórnego (rezystancji obciążenia). Transformator podwyższający odpowiednio obniża ją. Transformacja rezystancji jest istotna przy dopasowaniu na maksimum mocy przekazywanej między obwodami. Umożliwia także dopasowanie rezystancji obciążenia np. głośnika do najkorzystniejszych warunków pracy lampy, czy tranzystora w stopniu mocy wzmacniacza.

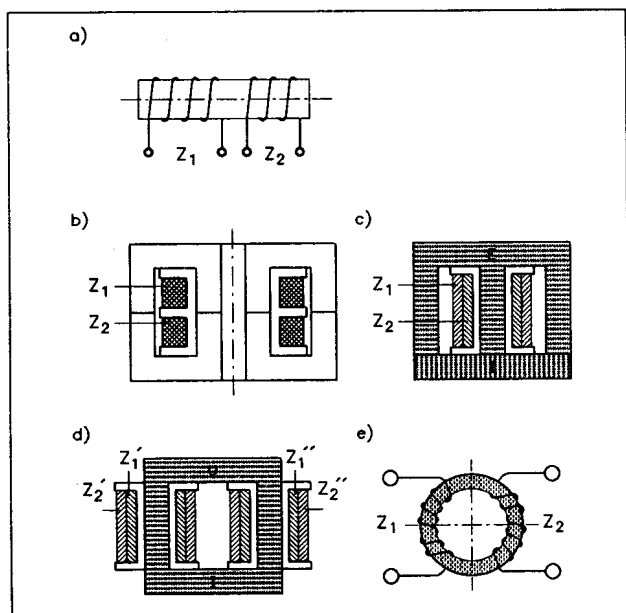
Transformatory, jak wszystkie elementy indukcyjne są duże i ciężkie, kłopotliwe do wykonania i stosowania ale pomimo tego są stosowane powszechnie. Zasadniczym ich zastosowaniem jest dziedzina transformatorów sieciowych niezbędnych w urządzeniach zasilających. Ważnym ich atutem jest oddzielenie galwaniczne obwodu wtórnego od sieci energetycznej, zapewniające bezpieczeństwo użytkownikowi sprzętu. Drugą w kolejności jest dziedzina transformatorów w.cz. stosowanych przy wzmacnianiu i generacji sygnałów wielkiej częstotliwości.

Budowa transformatorów

Budowę typowych transformatorów w sposób uproszczony przedstawiono na rys. 4.

Pierwszy z nich to transformator wielkiej częstotliwości, który może być wykonany jako powietrzny lub z rdzeniem ferrytowym – rys. 4a. Oba uzwojenia o niewielkiej liczbie zwojów nawinięte są obok siebie lub jedno na drugim. Dużą rolę w transformatorach wielkiej częstotliwości odgrywa dodatkowe sprzężenie pojemnościowe między uzwojeniami. Przykładem takiego transformatora jest antena ferrytowa odbiornika radiowego. Uzwojenie pierwotne włączone jest do przestrajanego obwodu rezonansowego, a uzwojenie wtórne obniżające napięcie zapewnia dopasowanie do małej rezystancji wejściowej tranzystora. Przy bardzo dużych

częstotliwościach transformatory w.c.z. realizuje się w formie zbliżonych do siebie prostych odcinków drutu srebrzonego lub ścieżek na płytce drukowanej (tzw. linii paskowych).



Rys. 4 Budowa transformatorów

Rozwiązanie pokazane na rys. 4b to transformator z rdzeniem kubkowym. Transformator ten posiada uzwojenia nawinięte na specjalnym dzielonym karkasie. Dzielenie karkasu umożliwia uzyskanie dobrej izolacji między uzwojeniami i zmniejszenie pojemności między nimi. Rdzenie kubkowe są wykonywane jako rdzenie ferrytowe z materiałów o różnych przenikalnościach magnetycznych. Stosowane są przy średnich częstotliwościach (10 kHz – 1 MHz). Zaletą ich jest małe pole magnetyczne rozproszone.

Transformatory stosowane przy niskich częstotliwościach (do 100 kHz) wykorzystują rdzenie z blach żelaznych lub permalloyowych. Wadą rdzeni żelaznych są straty na prądy wirowe i dlatego ze wzrostem częstotliwości stosuje się coraz cieńsze blachy. Rdzenie składa się z tzw. kształtek, czyli elementów wyciętych z blachy lub nawija korzystając z taśmy żelaznej. Pokazany na rys. 4c tzw. transformator płaszczy posiada uzwojenia nawinięte jedno na drugim na karkasie z materiału izolacyjnego. Oczywiście uzwojenia mogą być nawinięte obok siebie jeśli dysponuje się karkasem dzielonym. Kształtki rdzenia przypominają litery E i I, dlatego tego rodzaju rdzeń nazywany jest rdzeniem EI.

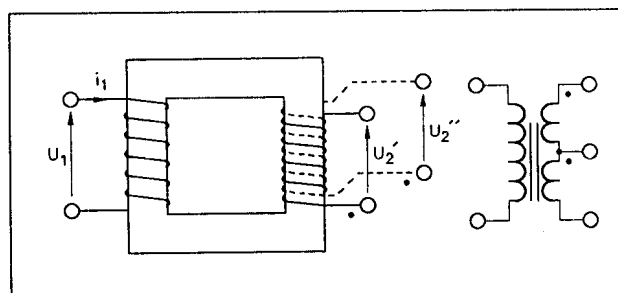
Drugi sposób wykonania transformatora z rdzeniem żelaznym jest pokazany na rys. 4d. Jest to tzw. transformator dwucewkowy, którego uzwojenia nawinięte są jedno na drugim w formie dwóch jednakowych cewek. Cewki sprzężone są magnetycznie za pomocą rdzenia (magnetowodu) przypominającego literę O. Rdzeń ten składa się z kształtek nazywanych U i I. Często składa się taki rdzeń z jednakowych kształtek typu L i nazywa rdzeniem LL. Dla uzyskania poprawnego działania tak wykonanego transformatora niezbędne jest praw-

dłowe połączenie uzwojeń pierwotnych i wtórnych. Zaletą tego rozwiązania jest oszczędność blachy żelaznej. Wadą natomiast zwiększone pole magnetyczne rozproszone.

Zaletą obu tych rozwiązań jest uproszczone nawijanie cewek bez rdzenia, który składa się dopiero po ich nawinięciu. Transformatory tego rodzaju mogą wykorzystywać rdzenie zwijane, ale niezbędne jest przecinanie zwinionych rdzeni dla uzyskania możliwości złożenia transformatora. Rdzenie mocuje się obejmami dla uniknięcia niepożądanych efektów akustycznych (buczenia). Cewki po nawinięciu, a często całe transformatory są impregnowane lakierem elektroizolacyjnym lub specjalnym woskiem dla poprawienia odporności na działanie wilgoci i zmniejszenia możliwości wystąpienia zwarcia między zwojami.

Coraz większą popularność uzyskują transformatory z rdzeniem toroidalnym. Przykład takiego transformatora pokazany jest na rys. 4e. Rdzenie toroidalne wykonywane są jako monolityczne rdzenie ferrytowe lub zwijane z taśmy stalowej. Toroidalne rdzenie ferrytowe są stosowane do wykonywania szerokopasmowych transformatorów wielkiej częstotliwości – nawet do około 1000 MHz. Rdzenie żelazne o takim kształcie stosuje się najczęściej do produkcji transformatorów sieciowych. Zaletą ich jest mniejsze zużycie żelaza przy dużo mniejszych polach rozproszonych niż w przypadku rdzeni UI. Uzyskuje się duże moce transformatora przy małych wymiarach zewnętrznych.

Często występuje konieczność uzyskania napięć symetrycznych tzn. o jednakowych wartościach bezwzględnych i przeciwnych kierunkach. Napięcia takie wykorzystywane są w prostowniku dwupołkowym lub w transformatorach symetryzujących stosowanych dla zmniejszenia wpływu zakłóceń. Napięcia symetryczne uzyskuje się przez tzw. nawijanie bifilarne. Polega ono na jednoczesnym nawijaniu dwóch uzwojeń – dwoma drutami. Sposób nawinięcia uzwojenia wtórnego transformatora, jako bifilarne pokazano na rys. 5.



Rys. 5 Transformator z uzwojeniem bifilarnym

Jeden z drutów uzwojenia bifilarnego oznaczony jest linią przerywaną. Kropkami oznaczono początki uzwojeń dla ustalenia jednakowych kierunków napięć na uzwojeniach. Dla uzyskania symetrii napięć niezbędne jest połączenie początku jednego uzwojenia z końcem drugiego pokazane na schemacie zamieszczonym obok.

Specyficzną budowę posiadają transformatory impulsowe stosowane w układach odchyłania odbiorniki-

ków telewizyjnych. Ze względu na częstotliwość pracy (15.625 Hz) nawijane są na rdzeniach ferrytowych. Jedno z uzwojeń to uzwojenie wysokonapięciowe (8 – 15 kV) przewidziane do zasilania prostownika wysokiego napięcia. Uzwojenie pierwotne zasilane jest z przełącznika tranzystorowego lub tyrystorowego. W chwili wyłączenia prądu powstają w nim przepięcia dochodzące do 1 kV. Dlatego te transformatory muszą być szczególnie zabezpieczone przed możliwością wystąpienia przebiegów wysokich napięć. Podobne warunki pracy od strony zasilania mają transformatory zasilaczy impulsowych. Regułą dla obydwu rodzajów transformatorów jest hermetyczne zalewanie uzwojeń specjalnymi masami.

Parametry transformatorów

Charakterystyczne parametry transformatora zależne są od jego przeznaczenia. Ze względu na przeznaczenie wyróżnia się transformatory sieciowe, wyjściowe m.cz. (tzw. głośnikowe), sprzęgające m.cz. i w.cz., impulsowe, wyjściowe odchyłania poziomego. Ponieważ największą grupę transformatorów stanowią aktualnie transformatory sieciowe, ich parametry opiszemy dokładniej.

Zasadniczym parametrem transformatora sieciowego jest *moc znamionowa* P_N . Podawana jest ona w [W]. Jest to maksymalna moc skuteczna do przeniesienia jakiej w sposób ciągły jest przygotowany transformator. Wynika ona w zasadzie z wymiarów rdzenia transformatora, a konkretnie przekroju kolumny środkowej transformatora płaszczykowego. Praktycznie często transformatory pracują przy mocy mniejszej niż znamionowa. Oznacza to, że wymiary transformatora i masa są większe od wynikających z rzeczywistego zapotrzebowania mocy. Do mocy znamionowej, a konkretnie do maksymalnych prądów uzwojeń muszą być dopasowane średnice drutów jakimi nawinięte są uzwojenia. Średnice drutów nawojowych dobiera się tak aby maksymalna gęstość prądu (stosunek prądu do przekroju przewodnika) nie przekraczała 3 – 5 A/mm². Moce znamionowe transformatorów sieciowych produkcji krajowej zawierają się w przedziale od 1 – 400 W.

Napięcie pierwotne to napięcie uzwojenia pierwotnego, a właściwie napięcie zasilające do jakiego jest przewidziany transformator. Typowa wartość to 220 V. Często spotyka się transformatory posiadające możliwość przelączania wartości napięcia zasilającego np. 220/110 V. Przelączanie takie jest łatwym do zrealizowania w przypadku transformatorów dwucewkowych – na napięcie 220 V uzwojenia pierwotne obu cewek łączone są szeregowo, a na napięcie 110 V równolegle.

Prąd jałowy uzwojenia pierwotnego to prąd płynący przez uzwojenie pierwotne transformatora bez obciążenia uzwojeń wtórnych (przy rozwartych uzwojeniach wtórnych). Wielkość tego prądu zależy od indukcyjności uzwojenia pierwotnego i strat w rdzeniu transformatora. Istnienie prądu jałowego oznacza, że transformator pobiera moc nawet bez obciążenia. Prąd ja-

łowy transformatorów o mocy znamionowej 4 W jest rzędu 10 mA. W transformatorach o mocach znamionowych 50 – 100 W wynosi 50 – 200 mA.

Sprawność transformatora określana jest jako stosunek sumy mocy oddawanych do obciążeń poszczególnych uzwojeń wtórnych, do mocy pobieranej przez transformator z sieci zasilającej. Wyrażana jest w [%]. Rośnie ona wraz z wielkością mocy znamionowej transformatora. Dla transformatorów o małych mocach znamionowych jest rzędu 80%. Transformatory o mocach powyżej 100 W mają sprawność większą od 95%.

Napięcie wtórne, a często napięcia wtórne to napięcia znamionowe uzwojeń wtórnych podawane zwykle przy określonym prądzie pobieranym z uzwojenia lub określonej rezystancji obciążenia. Zazwyczaj jest to napięcie przy maksymalnym prądzie obciążenia. Podawana jest także tolerancja napięcia wtórnego, czyli wyrażone w % maksymalne odchylenie wartości napięcia wtórnego. Tolerancja ta zazwyczaj nie przekracza 5%. Pomiar napięć wtórnych dokonuje się przy znamionowym napięciu pierwotnym.

Szczególnie transformatory sieciowe muszą spełniać ostre wymagania dotyczące wytrzymałości izolacji uzwojenia pierwotnego (sieciowego). Izolacja ta musi być zapewniona między uzwojeniem pierwotnym a uzwojeniami wtórnymi i ekranem oraz względem rdzenia (zazwyczaj połączonego z masą urządzenia). Wytrzymałość izolacji określa się przez podanie tzw. *napięcia próby* i czasu jej trwania. Dla transformatorów produkcji krajowej przewidzianych do stosowania w sprzęcie powszechnego użytku stosuje się napięcie próby 2,5 kV i czas jej przeprowadzania wynosi 60 s, lub 3,6 kV z czasem próby 4 s. Wytrzymałość izolacji między niskonapięciowymi uzwojeniami wtórnymi sprawdzana jest napięciem 500 V w czasie 60 s.

Do charakterystycznych cech transformatora zaliczany jest rodzaj rdzenia, wymiary zewnętrzne i rodzaj oraz rozmieszczenie punktów mocowania. Niektóre transformatory wyposażane są w osłony ekranujące, których jednak najważniejszym zadaniem w transformatorach sieciowych jest ochrona przed rozprzestrzenianiem się ognia w przypadku zapalenia transformatora. Osłony takie wymagane są w USA i Kanadzie.

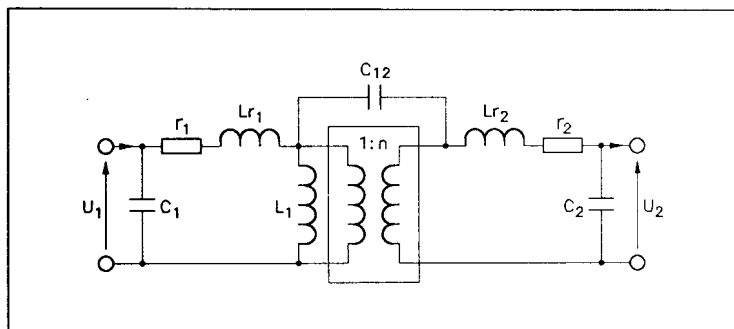
W przypadku transformatorów sprzęgających najważniejszym parametrem jest *przekładnia transformatora*. Drugim w kolejności parametrem jest *indukcyjność główna* uzwojenia pierwotnego, wpływająca bezpośrednio na najniższą częstotliwość przenoszoną. Górna częstotliwość graniczna będzie zdeterminowana *indukcyjnością rozproszenia* i *pojemnością własną* uzwojenia pierwotnego. Te same parametry są istotne dla transformatora głośnikowego, a dodatkowo jego moc znamionowa. Dla transformatorów symetryzujących istotnym będzie *współczynnik niesymetrii*, określający w % dopuszczalną niesymetrię napięć wtórnych (pierwotnych). Dla transformatorów szerokopasmowych ważne będą: *przekładnia* i *szerokość pasma* określana przez podanie dolnej i górnej częstotliwości granicznych.

Oprócz podanych parametrów użytkowych transformator posiada parametry szcztkowe umożliwiające określenie jego wpływu na parametry układu, w którym jest stosowany. Parametry te opiszemy na podstawie schematu zastępczego transformatora pokazanego na rys. 6.

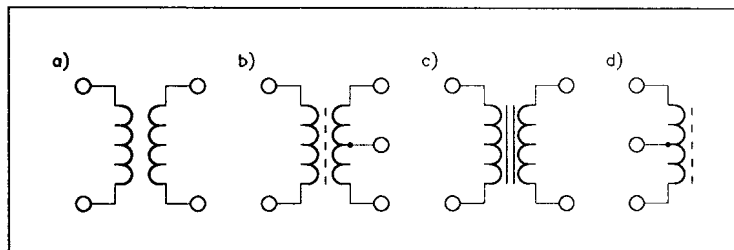
W środku schematu znajduje się transformator idealny reprezentujący przekładnię transformatora n . Indukcyjność L_1 to *indukcyjność magnetyczna* uzwojenia pierwotnego zwana także *indukcyjnością główną*. Wielkość tej indukcyjności wynika ze strumienia obejmującego oba uzwojenia. L_{r1} to *indukcyjność rozproszenia* uzwojenia pierwotnego reprezentująca strumień magnetyczny rozproszony tego uzwojenia. Rezystancja r_1 przedstawia sumaryczne straty mocy w uzwojeniu pierwotnym. Straty te wynikają z rzeczywistej rezystancji drutu nawojowego oraz strat w rdzeniu.

Straty w rdzeniu składają się ze strat na przemagnesowywanie rdzenia (tzw. straty na histerezę) i strat wskutek występowania prądów wirowych. Prądy wirowe to prądy indukowane i zamykające się w rdzeniu w wyniku oddziaływania własnego pola magnetycznego. Przepływ ich powoduje dodatkowe obciążenie uzwojenia pierwotnego. Zmniejszenie strat na prądy wirowe uzyskuje się przez wykonywanie rdzenia z blach o dużej rezystywności (blachy krzemowe) oraz przez zmniejszenie grubości blach. Kolejnym krokiem jest zastosowanie rdzenia ferrytowego o jeszcze większej rezystywności.

Pojemność C_1 to *pojemność własna* uzwojenia pierwotnego. Pojemność między uzwojeniami reprezentuje C_{12} . Indukcyjność L_{r2} to *indukcyjność rozproszenia* uzwojenia wtórnego wynikająca z istnienia strumienia magnetycznego rozproszonego wytworzonego podczas przepływu prądu w uzwojeniu wtórnym. Rezystancja r_2 to w zasadzie rezystancja drutu uzwojenia wtórnego powodująca spadek napięcia wyjściowego ze wzrostem pobieranego prądu oraz straty energii wydzielane w postaci ciepła. Pojemność C_2 jest *pojemnością własną* uzwojenia wtórnego.



Rys. 6 Schemat zastępczy transformatora



Rys. 7 Oznaczenia schematowe transformatorów

Większe znaczenie dla działania układu z transformatorem mają parametry uzwojenia pierwotnego. Działanie indukcyjności głównej i rozproszonej już podaliśmy. Istnienie pojemności własnej uzwojenia powoduje powstanie szkodliwego rezonansu zniekształcającego charakterystykę przenoszenia transformatora. Dla zmniejszenia jej wpływu równoległe do uzwojenia pierwotnego podłącza się szeregowe dwójniki RC w transformatorach sprzęgających i głośnikowych.

Działanie pojemności między uzwojeniami objawia się dopiero przy wysokich częstotliwościach dając dodatkowe przenikanie sygnału. Często sygnałami przenikającymi mogą być sygnały zakłócające. Zmniejszenie pojemności między uzwojeniami można uzyskać przez wykonanie między uzwojeniami ekranu elektrostatycznego w formie zwoju z folii miedzianej. Zwój ten nie może być zamknięty (zwarty) i musi być uziemiony.

Stosowanie transformatorów

Zacniemy od oznaczeń schematowych transformatorów pokazanych na rys. 7. Pierwsze przedstawione na rys. 7a, jest oznaczeniem transformatora powietrznego. Na rys. 7b pokazany jest transformator z rdzeniem ferrytowym. Rdzeń ferrytowy zaznaczony jest w formie linii przerywanej. Jedno z uzwojeń tego transformatora jest uzwojeniem symetryzującym lub z tzw. odczepem (działające na zasadzie autotransformatora). Można je oczywiście traktować jako dwa niezależne uzwojenia, których wyprowadzenia zostały połączone. Rys. 7c prezentuje transformator z rdzeniem żelaznym. Rdzeń żelazny zaznacza się jako dwie lub jedna kreska ciągła między uzwojeniami. Ostatni rysunek 7d pokazuje oznaczenie autotransformatora z rdzeniem ferrytowym.

Spotyka się oznaczenia elementów indukcyjnych w tym transformatorów jako zaczernione prostokąty. Ekran między uzwojeniami rysuje się linią przerywaną, a koniec tej linii jest łączony do masy układu lub uziemiony.

Określenie mocy znamionowej transformatora realizuje się przez zsumowanie wszystkich mocy wydzielanych w uzwoje-

niach wtórnych i podzielenie przez przewidywaną sprawność transformatora. Często stosowany jest dobór mocy transformatora na tzw. najgorszy przypadek. Najgorszy przypadek dotyczy transformatora, którego uzwojenia wtórne są obciążone maksymalnym prądem. W transformatorze pracującym przy stałych obciążeniach moc pobierana jest stała i można tę sytuację zaliczyć do najgorszego przypadku. Dotyczy to np. uzwojeń wykorzystanych do oświetlenia. W przypadku transformatora zasilającego, pracującego w zasilaczu wzmacniacza mocy klasy B wykonanie transformatora na najgorszy przypadek stanowić będzie rozrzutność. Maksymalne obciążenie transformatora realizowane jest chwilowo w szczytach mocy wyjściowej. Transformator zasilający do takiego wzmacniacza może być z powodzeniem projektowany na 50% maksymalnej mocy pobieranej. Wskazane jest wówczas wyposażać transformator w zabezpieczenie termiczne, aby zabezpieczyć się przed wielobiciami hard – rocka, hołdującymi zasadzie wykorzystywania pełnych możliwości wzmacniacza a przy okazji i zasilacza.

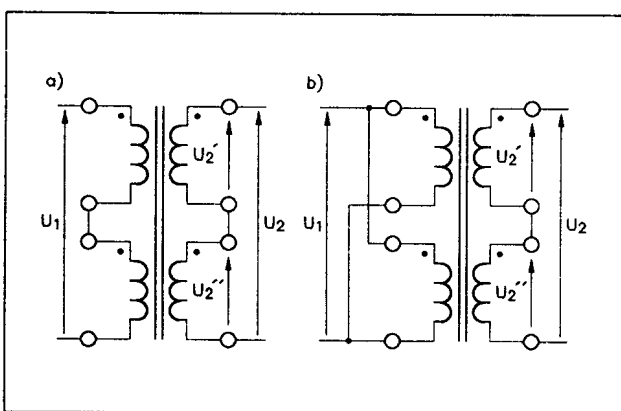
Już wcześniej zwrócono uwagę czytelników na konieczność prawidłowych połączeń uzwojeń transformatora dwucewkowego. Problem ten może pojawić się przy okazji przeróbki transformatora w celu dopasowania np. napięć wyjściowych do wielkości wymaganych przez projektanta układu. Odwrotne połączenie cewek uzwojenia pierwotnego spowoduje wzajemne skompensowanie strumieni magnetycznych cewek, które objawi się w postaci zwarcia napięcia zasilającego.

Możliwe są dwa przypadki połączeń uzwojeń pierwotnych pokazane na rys. 8. Rys. 8a przedstawia szeregowe połączenie uzwojeń, a rys. 8b równoległe.

Nie należy sugerować się oznaczeniami początków i końców uzwojeń wynikającymi z jednakowego kierunku nawinięcia. Należy znaleźć wyprowadzenia transformatora dla których wpływający (lub wyptywający) prąd wytworzy strumień o tym samym kierunku, dodające się w zamkniętym rdzeniu "O", na którego kolumnach są umieszczone cewki. Pomocna w tym może być reguła prawej ręki znana z lekcji fizyki. Palce należy położyć na cewce w kierunku przepływu prądu (nawinięcia zwojów), a odchylony kciuk wskaże kierunek pola magnetycznego. Zaznaczone na rys. 8 kropki oznaczają właśnie wyprowadzenia zapewniające ten sam kierunek strumienia wytworzonego przez obie cewki.

Używając tradycyjnych oznaczeń końców i początków wyprowadzeń, należy przy szeregowymłączeniu uzwojeń pierwotnych połączyć koniec pierwszego uzwojenia z końcem drugiego. Przy równoległym należy połączyć naprzemian razem końce i początki obu uzwojeń. Dotyczy to uzwojeń nawiniętych w tym samym kierunku.

Uzwojenia wtórne takich transformatorów najczęściej łączone są szeregowo i wtedy po prostu praktycznie można sprawdzić woltomierzem napięcie każdego z uzwojeń i napięcie na ich skrajnych zaciskach. Napięcie na zaciskach skrajnych powinno być równe sumie napięć składowych. Brak napięcia lub bardzo mała jego wartość świadczą o połączeniu w kierunku odwrotnym. Eksperymenty z nieobciążonymi uzwojeniami wtórnymi są mniej groźne niż z uzwojeniami pierwotnymi.



Rys. 8 Połączenia transformatora dwucewkowego

Pamiętać trzeba także o zachowaniu bezpieczeństwa przy kontakcie z napięciem sieciowym. Przed wykonywaniem połączeń upewnić się czy zostało wyłączone zasilanie transformatora. Z uwagi na wyżej wymienione problemy przy przeróbkach transformatorów sieciowych nie należy ingerować w uzwojenia pierwotne, a przed rozebraniem transformatora zapamiętać dokładnie ich połączenie.

"Przeróbka" transformatora dotyczy zmiany napięcia wyjściowego transformatora lub uzyskania dodatkowego napięcia w sytuacji braku możliwości zdobycia transformatora o wymaganych parametrach. Inna sytuacja dotyczy zmiany drutu uzwojenia na drut o większej średnicy wymagany przy większym prądzie pobieranym. Należy dobrać dostępny transformator spełniający warunki mocy (moc znamionowa większa od sumy mocy pobieranych) i o napięciach zbliżonych do wartości wymaganych. Jeśli napięcia te będą większe od wymaganych to należy odwinąć odpowiednią ilość zwojów. Jeśli będą mniejsze niezbędne będzie dowieńcie zwojów. Najpierw należy sprawdzić czy w oknie transformatora będzie miejsce na dodatkowe zwoje i zaopatrzyć się w odpowiedni drut nawojowy. Przekrój drutu powinien za-

pewniać gęstość prądu 3 – 5 A/mm².

$$J = I/s$$

gdzie: J – gęstość prądu [A/mm²],

I – prąd [A],

s – przekrój drutu [mm²].

$$s = \pi d^2/4$$

gdzie: d – średnica drutu [mm].

Przed rozebraniem transformatora należy określić istotny dla przeróbek parametr jakim jest *ilość zwojów na wolt* N_V [z/V]. Współczynnik ten bowiem pozwoli na określenie liczby zwojów jakie należy odwinąć czy dowieńcie. Można ten współczynnik znaleźć na podstawie ilości zwojów uzwojenia i napięcia na nim.

$$N_V = z/U$$

gdzie: z – ilość zwojów uzwojenia,

U – napięcie zmierzone na uzwojeniu [V].

Jeśli będziemy usuwali jakieś uzwojenie, to należy zmierzyć napięcie na nim przed przeróbką transformatora i policzyć zwoje przy jego odwijaniu. Można do tego celu specjalnie nawinąć uzwojenie np. 10 zwojów przewodem w izolacji i zmierzyć napięcie na nim, a następnie obliczyć współczynnik N_V . Obliczenie ilości zwojów do dowieńcia lub odwieńcia należy wykonać po określeniu różnicy napięć przed i po przeróbce.

$$U = U_1 - U_2$$

$$z = U N_V$$

Przy dowijaniu starannie połączyć drut dowijanego uzwojenia z końcem dotychczasowego i zaizolować punkt połączenia aby nie powstało zwarcie. Bardzo ważne jest zachowanie tego samego kierunku nawijania. Nie trzeba odwijać innych uzwojeń jeśli dowijane leży pod nimi. Dodatkowe uzwojenie może być nawinięte na nich. Pamiętać trzeba wtedy o zapewnieniu izolacji między uzwojeniami. Nie nawijać uzwojeń do skrajów karkasu lecz z odstępem 2 – 3 mm.

Dużą uwagę należy zwrócić na staranny montaż transformatora po przeróbce. Starać się trzeba aby złożyć ponownie wszystkie blachy rdzenia. Obejmy muszą być dokładnie zaciśnięte, aby uniknąć niepożądanych efektów akustycznych. Po złożeniu rdzenia należy sprawdzić czy uzyskane napięcia są zgodne z oczekiwanymi. Jeszcze raz podkreślamy konieczność zachowania wymogów bezpieczeństwa – napięcie sieci energetycznej.

◇ Ciąg dalszy w następnym numerze.