

11. Transformatory wyjściowe

Zakres zastosowania transformatorów we wzmacniaczach akustycznych bardzo się zwęził. Były kiedyś czasy, gdy stopnie wzmacniacza sprzęgano wyłącznie za pomocą transformatorów. Obecnie stosuje się jeszcze transformatory wejściowe, podwyższające napięcie (mikrofonowe, do adapterów elektromagnetycznych), separujące i symetryzujące (np. przy przesyłaniu audycji linią telefoniczną), wyjściowe oraz niekiedy — we wzmacniaczach tranzystorowych — międzystopniowe pomiędzy stopniem wzbudzającym i końcowym.

Transformatorów pozostało mało — poza sieciowymi — ale wymagania techniczne co do ich jakości zwiększyły się.

Rozpatrzmy bliżej w zasadzie tylko zagadnienia związane z wykonaniem transformatorów wyjściowych. Główne zasady będą prawidłowe i dla międzystopniowych transformatorów większej mocy, stosowanych we wzmacniaczach tranzystorowych.

W warunkach amatorskich kolejność i zasady projektowania transformatorów m.cz. są inne niż w warunkach przemysłowych. W pierwszej kolejności określa się w przybliżeniu, jaki rdzeń jest potrzebny do projektowanego urządzenia. Następnie poszukuje się mniej więcej odpowiedniego rdzenia. Mając już konkretny rdzeń do dyspozycji wykonuje się dokładne obliczenia, mające na celu zbudowanie najlepszego w miarę możliwości transformatora, przy użyciu drutów nawojowych o dostępnych nam średnicach.

Zakładamy także, że w warunkach amatorskich opłaca się wykonywać tylko transformatory nietypowe do wzmacniaczy wysokiej klasy i wzmacniaczy specjalnych, przy czym oszczędność materiałów nie wchodzi w grę. Rdzeń powinien być złożony z cienkich, dobrej jakości wykrojów z krzemowej blachy transformatorowej, izolowanych z jednej strony lakierem dla zmniej-

szenia strat powodowanych prądami wirowymi. Rdzeń powinien mieć kształty proporcjonalne; lepszy jest rdzeń nieco wydłużony o oknie raczej wąskim. Okno nie powinno być zbyt duże w stosunku do wymiarów wykroju, aby długość średniej drogi strumienia magnetycznego w rdzeniu nie była zbędnie wielka. Przekrój środkowej kolumny może być kwadratowy lub prostokątny o stosunku boków nie większym niż 1 : 2 (szerokość do głębokości kolumny). Jeżeli mamy do wyboru dwa podobne co do wymiarów rdzenie, to wybieramy rdzeń z lepszej blachy (o większej początkowej przenikalności magnetycznej).

Podstawowe zależności wiążące zjawiska w transformatorze wynikają z następującego wzoru:

$$E_{tr} = 6,28 \cdot f \cdot n \cdot Q \cdot B \cdot 10^{-8} \quad (11-1)$$

gdzie:

E_{tr} — amplituda siły przeciwelektromotorycznej indukowanej w uzwojeniu pierwotnym, w przybliżeniu równa amplitudzie doprowadzonego napięcia [V],

f — częstotliwość [Hz],

Q — przekrój czynny rdzenia [cm²],

n — liczba zwojów,

B — największa wartość indukcji w rdzeniu [Gs].

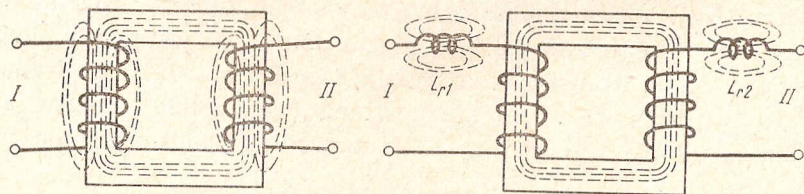
Wartość siły przeciwelektromotorycznej jest związana z napięciem zmiennym stopnia końcowego wzmacniacza i wynika z mocy i oporności roboczej. Najmniejsza i największa częstotliwość pasma przepustowego wynikają z założeń co do wskaźników wzmacniacza. Największą dopuszczalną wartość indukcji w rdzeniu powinniśmy również określić w przybliżeniu we wstępnym etapie projektowania transformatora. Dla transformatorów do wzmacniaczy Hi-Fi wartość jej nie powinna być wielka, wiadomo bowiem, że duże wartości indukcji powodują zniekształcenia nien liniowe.

Jeżeli do cewki z rdzeniem żelaznym przyłączymy źródło sinusoidalnego napięcia przemiennego i będziemy badać zniekształcenia przebiegu przepływającego prądu, to okaże się, że dla przeciętnego rdzenia przy indukcji 10 000 Gs amplituda sinusoidy o częstotliwości podstawowej stanowi około 80%, a trzeciej harmonicznej — 15%. Przy zwiększeniu indukcji do 20 000 Gs am-

plituda pierwszej harmonicznej maleje do 50%, a trzeciej harmonicznej wzrasta do 40%. Liczby te wskazują, jak silnie wpływa nasycenie rdzenia na przebieg prądu magnesującego, co w przypadku wzmacniacza może, biorąc pod uwagę wpływ oporności wewnętrznej wzmacniacza, powodować znaczne zniekształcenia przebiegu napięcia indukowanego w uzwojeniu wtórnym transformatora.

Największą dopuszczalną wartość indukcji w rdzeniu przyjmuje się równą 4000 Gs. Wyjątkowo przy projektowaniu przeciwnych wzmacniaczy większej mocy o bardzo małej częstotliwości granicznej, np. 30 Hz, można dopuścić 6000 Gs. Dla transformatora międzystopniowego przyjmuje się znacznie mniejsze wartości.

W podanym wzorze (11-1) pozostały do ustalenia dwie wartości: liczba zwojów (n) i przekrój rdzenia (Q). Wydawałoby się, że mając rdzeń o niezbyt dużym przekroju można — zgodnie ze wzorem — zastosować uzwojenie o większej liczbie zwojów. Tak jednak nie jest, ponieważ pomijaliśmy dotychczas kilka istotnych parametrów transformatora, a wśród nich indukcyjność rozproszenia. Rzecz w tym, że część linii sił strumienia magnetycznego wytwarzanego przez uzwojenia transformatora zamyka się obejmując tylko jedno uzwojenie bądź jego część. Skutek jest taki, jak gdyby część zwojów znajdowała się poza obwodem magnetycznym, co przedstawiono na rys. 70. Oczywiście, takie niby „wyniesione” uzwojenia mają pewną indukcyjność własną, którą na-



Rys. 70. Indukcyjność rozproszenia w transformatorze

zywamy indukcyjnością rozproszenia (L_r). Jest to zjawisko bardzo niekorzystne w transformatorach przeznaczonych do przepuszczania szerokiego pasma częstotliwości, a szczególnie przeznaczonych do wzmacniaczy klasy B i AB.

Indukcyjność rozproszenia zależy od liczby zwojów i rozmieszczenia uzwojeń na rdzeniu, do czego jeszcze powrócimy. Jest wskazane, aby liczby zwojów były względnie niewielkie, co ułatwi także uzyskanie małej oporności uzwojeń transformatora, dzięki zastosowaniu odpowiednio grubego drutu.

Z przedstawionych rozważań wynika, że transformator wyjściowy do wzmacniaczy Hi-Fi powinien zawierać dużo żelaza, a stosunkowo mało miedzi. Należy stosować rdzenie o odpowiednio dużym przekroju czynnym. W warunkach amatorskich jest bardziej prawdopodobne, że nie będzie możliwości nabycia dostatecznie dużego rdzenia, niż że trafi się na rdzeń zbyt wielki.

Dla wstępnej oceny przekroju czynnego rdzenia możemy korzystać ze wzoru:

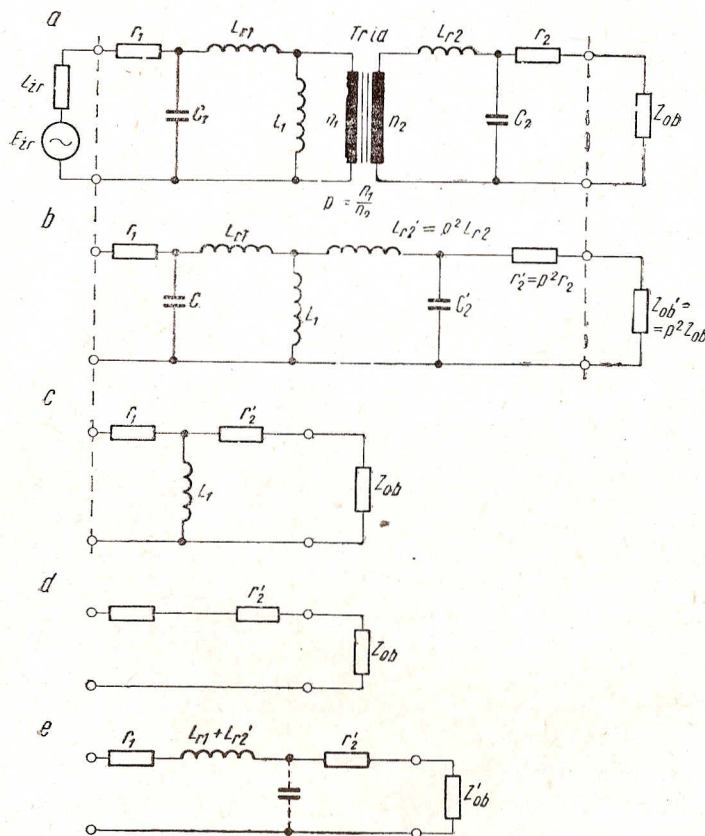
$$Q = (3 \div 5) \sqrt{P_{wy}} \quad (11-2)$$

gdzie P_{wy} — moc wyjściowa wzmacniacza [W].

Jeszcze jedna uwaga praktyczna. Wiele rdzeni ma otwory dla sworzni ściskających blaszki rdzenia. Zmniejszają one przekrój rdzenia. Jeżeli przekrój rdzenia pomiędzy otworem i oknem (licząc obie gałęzie rdzenia płaszczyznowego i nie licząc przekroju pomiędzy otworem a zewnętrzną powierzchnią rdzenia) jest mniejszy niż przekrój kolumny głównej, to w miejscu zmniejszonego przekroju indukcja będzie miała wartość większą niż obliczona, co jest niepożądane. Należy więc dokładnie zmierzyć rdzeń i sprawdzić, jaką wartość będzie miała indukcja w miejscu najmniejszego przekroju.

Zanim przystąpimy do najważniejszego etapu projektowania transformatora wyjściowego, zapoznajmy się uważnie z jego układami zastępczymi, przedstawionymi na rys. 71. Na rysunku tym jest przedstawiony transformator idealny o przekładni p oraz jego główne parametry elektryczne w postaci skupionej indukcyjności, oporności czynnej (rezystancji) i pojemności. Do rozważań i obliczeń wygodniej będzie posługiwać się układem z rys. 71b, w którym wszystkie wielkości, aż do obciążenia włącznie, przeniesiono na stronę pierwotną. Przy częstotliwościach najmniejszych można pominąć wpływ pojemności i indukcyjności rozproszenia, wobec czego układ zastępczy znacznie się upraszcza (rys. 71c). Przy czę-

stotliwościach średnich (przyjmuje się 1000 Hz) można pominąć jeszcze i wpływ indukcyjności uzwojenia pierwotnego (rys. 71d). Przy częstotliwościach odpowiadających tonom wysokim należy uwzględnić indukcyjność rozproszenia (rys. 71e).



Rys. 71. Układy zastępcze transformatora

a — pełny układ zastępczy (z pominięciem strat w rdzeniu), b — układ zastępczy po przeniesieniu obciążenia i parametrów uzwojenia wtórnego na stronę pierwotną transformatora, c — uproszczony układ zastępczy dla częstotliwości najmniejszych, d — uproszczony układ zastępczy dla częstotliwości średnich (1000 Hz), e — uproszczony układ zastępczy dla częstotliwości wielkich (tony wysokie)

Z układów zastępczych wynika, że indukcyjność uzwojenia pierwotnego (L_1 na rys. 71c) jest dołączona równolegle do obciążenia i może spowodować osłabienie tonów niskich. Wynika stąd, że liczba zwojów uzwojenia pierwotnego powinna być taka, aby

było spełnione dla danego rdzenia zarówno wymaganie co do indukcji w rdzeniu (B), jak i wymaganie co do wystarczającej indukcyjności uzwojenia pierwotnego (L_1). Które z wymagań okaże się decydujące, przewidzieć nie można — wyniknie to z obliczenia. We wzmacniaczach Hi-Fi decydujące jest przeważnie wymaganie dotyczące dużej indukcyjności uzwojenia.

Posługujemy się przybliżonym wzorem określającym liczbę zwojów:

$$n_1 = 9000 \sqrt{\frac{L_1 l_r}{\mu_r Q}} \quad (11-3)$$

gdzie:

- n_1 — liczba zwojów uzwojenia pierwotnego,
- L_1 — indukcyjność uzwojenia pierwotnego [H],
- l_r — średnia długość drogi strumienia magnetycznego w rdzeniu [cm],
- μ_r — przenikalność magnetyczna rdzenia; dla stali transformatorowej i transformatorów wyjściowych wzmacniaczy akustycznych przyjmuje się $\mu_r = 500$,
- Q — przekrój czynny rdzenia (kolumny głównej).

Indukcyjność uzwojenia pierwotnego (L_1) powinna być tak duża, aby oporność bierna (reaktancja) uzwojenia przy najmniejszej częstotliwości pasma przepustowego była co najmniej równa lub lepiej większa od oporności roboczej stopnia końcowego, co można wyrazić wzorem:

$$L_1 \geq \frac{R_{or}}{6,28 \cdot f_p} \quad (11-4)$$

gdzie:

- f_p — najmniejsza częstotliwość pasma przepustowego [Hz],
- R_{or} — oporność robocza stopnia końcowego (dla układów przeciwsobnych od anody do anody bądź od kolektora do kolektora) [Ω].

Jak wiadomo, w transformatorach powstają straty w uzwojeniach i straty w rdzeniu. Te ostatnie w transformatorach m.cz. są małe i można je pominąć (pominięto je także w układach zastępczych na rys. 71). Sprawność transformatora jest określona dla częstotliwości średnich (umownie przyjmuje się 1000 Hz)

1 może być obliczona przy wykorzystaniu układu zastępczego z rys. 71d, jeżeli znane są oporności czynne (rezystancje) uzwojeń r_1 i r_2 . Ten sam układ służyć może do rozwiązania innego zadania: określenia dopuszczalnej oporności uzwojeń przy pewnej założonej sprawności (dla transformatorów wyjściowych przyjmuje się $\eta = 0,8 \div 0,9$).

Odpowiednie wzory są następujące:

Dla wzmacniaczy klasy A.

$$\begin{aligned} r_1 &= Z_{ob} p^2 \left(\frac{1-\eta}{2} \right); & r_1 &= (0,05 \div 0,1) Z_{ob} p^2 \\ r_2 &= Z_{ob} \left(\frac{1-\eta}{2\eta} \right); & r_2 &= (0,055 \div 0,11) Z_{ob} \end{aligned} \quad (11-5)$$

Dla wzmacniaczy klasy B uwzględniając, że składowa zmienna przepływa to przez jedną, to przez drugą połówkę uzwojenia pierwotnego:

$$\begin{aligned} r_1 &= 0,3 Z_{ob} p^2 (1-\eta); & r_1 &= (0,03 \div 0,06) Z_{ob} p^2 \\ r_2 &= 0,4 Z_{ob} \left(\frac{1-\eta}{\eta} \right); & r_2 &= (0,045 \div 0,09) Z_{ob} \end{aligned} \quad (11-6)$$

Średnicę drutów nawojowych (bez izolacji) obliczamy posługując się wzorem

$$d = 0,16 \sqrt{\frac{l_m}{r}} \quad (11-7)$$

gdzie:

d — średnica drutu [mm],

l_m — długość drutu uzwojenia [m],

r — oporność czynna uzwojenia [Ω].

Przekładnia zwojowa transformatora jest zależna także i od sprawności transformatora, co można wywnioskować z układów zastępczych przedstawionych na rys. 71.

Wzór określający przekładnię transformatora (p) jest następujący:

$$p = \sqrt{\frac{\eta R_{or}}{Z_{ob}}} \quad (11-8)$$

Zarówno obliczoną liczbę zwojów uzwojenia pierwotnego, jak i dane dotyczące oporności uzwojeń i średnicy drutów należy traktować, po ich pierwszym obliczeniu, jako wstępne i podlegające korekcje w etapie konstrukcyjnego projektowania transformatora.

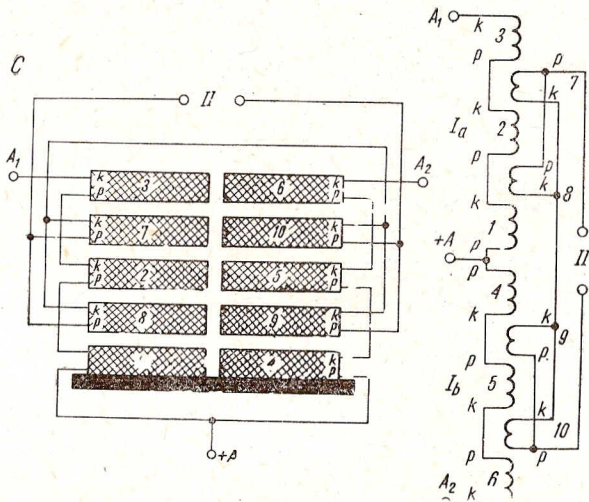
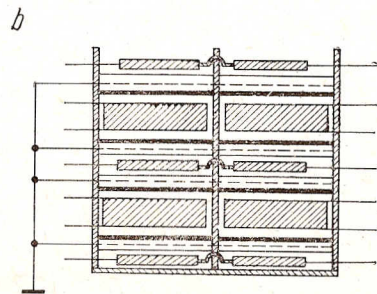
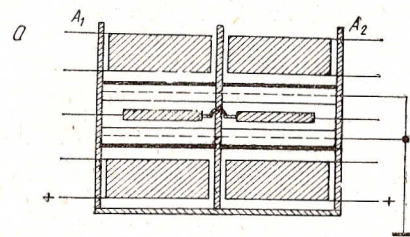
Ze względu na działanie silnego ujemnego sprzężenia zwrotnego transformator wyjściowy wzmacniacza Hi-Fi powinien przepuszczać częstotliwości do 100 kHz. Warunek ten może być spełniony, jeżeli indukcyjności rozproszenia będą dostatecznie małe. Z układu zastępczego wynika (rys. 71e), że indukcyjność rozproszenia stanowi wraz z pojemnością uzwojeń transformatora (a także pojemnością montażową) obwód rezonansowy. Częstotliwość własna tego obwodu powinna być dostatecznie duża, ponieważ układ taki działa jak filtr dolnoprzepustowy.

Indukcyjność rozproszenia jest wprost proporcjonalna do kwadratu liczby zwojów, rośnie wraz ze zwiększeniem wysokości uzwojenia i zależy od wzajemnego rozmieszczenia uzwojeń. Najmniejszą indukcyjność rozproszenia będą miały dwa uzwojenia nawinięte jednowarstwowo dwoma drutami (bifilarnie), nieco większą — dwa uzwojenia nawinięte jedno na drugim jednowarstwowo z możliwie cienką przekładką izolacyjną. Ponieważ tylko w przypadku tranzystorowych stopni końcowych jest możliwe nawijanie niektórych uzwojeń bifilarnie, przeważnie stosuje się uzwojenia sekcjonowane rozmieszczone symetrycznie.

Zasadę uzwojowania transformatorów wyjściowych dla układów przeciwsobnych wyjaśniają przykłady przedstawione na rys. 72. Uzwojenie pierwotne dzieli się na 4, 6, 8 bądź 10 części i nawija się je jako oddzielne sekcje odpowiednio później połączone pomiędzy sobą.

Pomiędzy sekcjami uzwojenia pierwotnego nawija się uzwojenie wtórne w postaci 2, 4, 6 bądź 8 sekcji, łączonych równolegle bądź szeregowo-równolegle.

W przypadku wzmacniaczy klasy A dążymy przede wszystkim do uzyskania małej indukcyjności rozproszenia pomiędzy uzwojeniem pierwotnym a wtórnym. W transformatorach do wzmacniaczy klasy B i AB należy zapewnić dobre sprzężenie pomiędzy każdą połówką uzwojenia pierwotnego i całym uzwojeniem wtórnym, ponieważ pracują one na przemian lub niesymetrycznie.



Rys. 72. Zasady uzwojania transformatorów wyjściowych
a — uzwojenie pierwotne podzielone na cztery sekcje, uzwojenie wtórne — na dwie sekcje, b — uzwojenie pierwotne — cztery sekcje, uzwojenie wtórne — sześć sekcji, c — transformator wzmacniacza Hi-Fi klasy A, uzwojenie pierwotne — sześć sekcji, uzwojenie wtórne — cztery sekcje

W związku z tym w przeciwsobnych wzmacniaczach klasy A transformator może mieć wszystkie sekcje jednej połówki uzwojenia pierwotnego po jednej stronie dzielonego korpusu (rys. 72c). Natomiast w transformatorach wzmacniaczy klasy B i AB sekcje obu połówek uzwojenia pierwotnego rozmieszcza się symetrycznie po jednej i drugiej stronie korpusu.

Wzajemne rozmieszczenie sekcji, ich początków i końców, powinno być symetryczne, a liczby zwojów analogicznych sekcji, szczególnie uzwojenia wtórnego, ściśle jednakowe. Dla spełnienia tego warunku transformator powinien być wykonany niezwykle starannie, a nawijanie wykonuje się z odwracaniem korpusu, ponieważ jak wynika ze schematów przedstawionych na rys. 72, część sekcji jest nawijana w kierunku przeciwnym niż pozostałe.

Mając rdzeń i obliczone wstępnie liczby zwojów należy ustalić ostateczny projekt uzwojenia transformatora. W tym celu rozpatruje się kilka możliwych wariantów. Nie jest celowe przyjęcie z góry któregoś ze schematów uzwojenia dla określonej wstępnie liczby zwojów, gdyż może się okazać, że sekcja ma np. $2 \frac{1}{2}$ lub $4 \frac{1}{4}$ warstw drutu. Niepełne warstwy, puste miejsca, słabe wypełnienie korpusu mogą częściowo zniweczyć wysiłek włożony w zdobycie materiału i wykonanie pracochłonnego transformatora. Poza tym trzeba zwrócić uwagę na łatwość wyprowadzania końcówek uzwojeń. Najlepiej jest tak zaprojektować uzwojenia, aby sekcje miały parzystą liczbę warstw, wówczas wyprowadzenia znajdują się przy zewnętrznej ścianie korpusu. Jeżeli w żaden sposób nie można uzyskać pełnych warstw w niektórych sekcjach, to ostatnią niepełną warstwę rozciąga się na całą długość uzwojenia.

Mamy możliwość wyboru schematu uzwojenia, zmiany liczby zwojów, doboru średnicy drutu i zastosowania innego rdzenia. Operując tymi zmiennymi należy opracować takie rozwiązanie, przy którym uzyska się sekcje z pełnych warstw drutu, korzystny układ uzwojenia wtórnego, możliwość dogodnego wyprowadzenia końcówek i dobre parametry transformatora.

Należy wykonać próbę uzwojania i ustalić dokładnie, ile zwojów danego drutu mieści się w warstwie. Po wykonaniu prób nawijania, mając gotowy już korpus transformatora, można wykonywać ostateczny schemat uzwojenia transformatora nanosząc

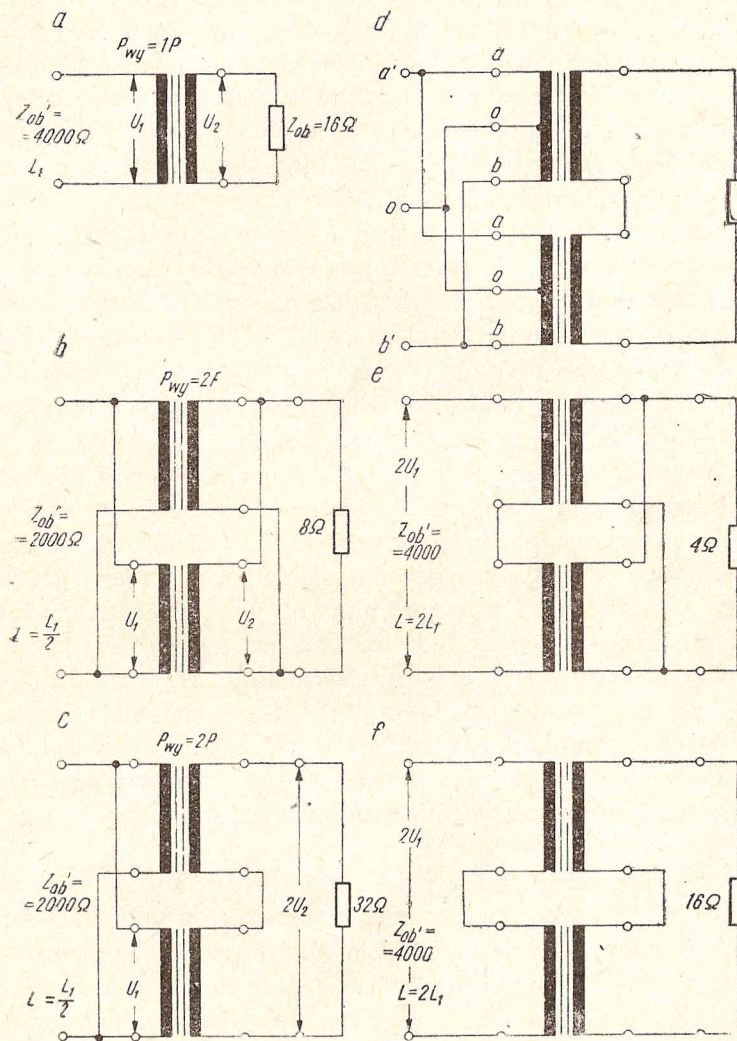
dokładne liczby zwojów i oznaczając sekcje, które powinny być nawinięte w przeciwnym kierunku. Należy oznaczyć odpowiednio sekcje i wszystkie ich początki i końce, aby móc prawidłowo połączyć je po wykonaniu transformatora.

Ta część pracy jest bodajże najważniejsza, jeżeli nie liczyć samego uzwajania, które powinno być wykonane niezwykle starannie.

Budowa transformatorów wyjściowych dla układów tranzystorowych opiera się na tych samych zasadach. Zadanie jest w tym przypadku nieco łatwiejsze ze względu na mniejsze przekładnie oraz grubsze druty w uzwojeniu pierwotnym. Tam gdzie jest to możliwe zaleca się stosowanie autotransformatorów. Mają one tę zaletę, że duża część uzwojenia jest wspólna dla obwodu pierwotnego i wtórnego. Ze względu na niskie napięcia możliwe jest także wykonywanie w niektórych przypadkach uzwojeń nawijanych bifilarnie.

Na zakończenie kilka uwag o korzystaniu z transformatorów fabrycznych. Jest oczywiste, że ze względu na trudność wykonania transformatora we własnym zakresie należy stosować w miarę możliwości gotowe, dostępne na rynku transformatory bądź transformatory wymontowane ze starych wzmacniaczy i odborników. Możliwości dobrania odpowiednich transformatorów są dość szerokie. Zwróćmy uwagę na niektóre z nich.

Transformatory mogą być łączone równolegle i szeregowo. Przykładowe połączenia są przedstawione na rys. 73. Na przykład we wzmacniaczach o mocy wyjściowej 8 W można zastosować dwa transformatory przeznaczone do wzmacniacza o mocy 4 W. Na rys. 73b przedstawiono schemat równoległego połączenia dwóch jednakowych transformatorów. Jest oczywiste, że przekładnia pozostanie bez zmiany, indukcyjność wypadkowa obu uzwojeń pierwotnych będzie dwa razy mniejsza niż jednego transformatora. Napięcie zmienne na uzwojeniu pierwotnym nie powinno być wyższe od przewidzianego dla danego transformatora (ze względu na dopuszczalną wartość indukcji w rdzeniu — B). Natomiast natężenie przepływającego prądu (składowa zmienna jak również składowa stała) może być dwa razy większe niż dla jednego transformatora. Jeżeli transformatory nie są dokładnie jednakowe, to jest możliwe przepływanie pewnego niewielkiego prądu wyrów-



Rys. 73. Łączenie dwóch transformatorów wyjściowych w celu zastosowania we wzmacniaczu o większej mocy (przykład)

a — pojedynczy transformator wyjściowy, b — dwa transformatory połączone równolegle, c — dwa transformatory połączone równolegle-szeregowo, d — dwa transformatory PP połączone równolegle-szeregowo, e — dwa transformatory połączone szeregowo-równolegle, f — dwa transformatory połączone szeregowo-szeregowo

nawczego pomiędzy uzwojeniami wtórnymi transformatorów. Ewentualność taka jest wykluczona w układzie przedstawionym na rys. 73c, przy szeregowym połączeniu uzwojeń wtórnych, lecz w tym przypadku uległa zmianie przekładnia zespołu transformatorów w porównaniu z pojedynczym transformatorem. Identycznie można łączyć jednakowe transformatory w układach przeciwsobnych (rys. 73d), przeliczając odpowiednio parametry zespołu dwóch transformatorów.

Można połączyć szeregowo uzwojenia pierwotne dwóch transformatorów, wówczas dopuszczalna wartość napięcia zmiennego będzie dwa razy większa, a dopuszczalna wartość natężenia prądu pozostanie bez zmiany. Przekładnia zależy od sposobu połączenia uzwojeń wtórnych (rys. 73e, f). Można utworzyć zespół z czterech bądź większej liczby transformatorów, łącząc ich uzwojenia szeregowo-równolegle.

Najłatwiej dostępne na rynku transformatory głośnikowe odbiorników radiofonicznych są projektowane oszczędnie i przy stosowaniu ich we wzmacniaczach jest celowe zastosowanie zespołu transformatorów o lepszych parametrach wypadkowych (rys. 73e, f). Połączenie szeregowo uzwojeń pierwotnych zwiększa dwa razy indukcyjność, co wpływa korzystnie na pracę stopnia wzmacniającego przy najmniejszych częstotliwościach. Jeżeli wartość napięcia zmiennego po stronie pierwotnej nie ulega zmianie, to zmaleje także wartość indukcji magnetycznej w rdzeniu. Wzrośnie oporność czynna (rezystancja) uzwojeń, co jest niekorzystne, ale ma mniejsze znaczenie, szczególnie w przypadku wzmacniacza klasy A.

Podamy jeszcze przydatny niekiedy prosty sposób wykonania transformatora wyjściowego do wzmacniacza przeciwsobnego. Transformatory głośnikowe odbiorników radiofonicznych mają rdzenie złożone z blaszek w kształcie liter E i I. Można więc rozobrać rdzenie dwóch jednakowych transformatorów, oddzielić blaszki proste, a z dwu części o kształcie E i dwóch szpul z uzwojeniami zestawić jeden nowy transformator, nadający się do układu przeciwsobnego. Obie części rdzenia powinny być dobrze do siebie do siebie.

Należy zwrócić także uwagę na prawidłowe połączenie ze sobą uzwojeń. Korzystając równocześnie z zasady równoległego łącze-

nia transformatorów można z czterech jednakowych transformatorów o mocy 4 W zbudować transformator wyjściowy do wzmacniacza przeciwsobnego o mocy $20 \div 25$ W.

Przykład 10. Należy zaprojektować transformator do lampowego wzmacniacza Hi-Fi o mocy $10 \div 12$ W (PP). Oporność robocza jednej lampy 4000 Ω ; oporność robocza całego uzwojenia pierwotnego (anoda — anoda) — 8000 Ω ; oporność obciążenia $8 \div 10$ Ω .

1. Pożądany przekrój rdzenia jest równy:

$$Q = (4 \div 5) \sqrt{12} = 13 \div 18 \text{ cm}^2$$

Nabyliśmy rdzeń płaszczykowy o wymiarach kolumny 40×45 i okna 75×20 . Przyjmijmy przekrój czynny $Q = 16 \text{ cm}^2$.

2. Obliczamy orientacyjnie liczbę zwojów i inne dane uzwojenia:
— z warunku na indukcję w rdzeniu

$$n_1 = \frac{E_{tr} \cdot 10^8}{6,28 \cdot f \cdot Q \cdot B} = \frac{450 \cdot 10^8}{6,28 \cdot 40 \cdot 16 \cdot 4000} = 2800 \text{ zwojów}$$

— z warunku na indukcyjność, przyjmując $L_1 = 32$ H,

$$n_1 = 9000 \sqrt{\frac{L_1 \mu_r}{\mu_r Q}} = 9000 \sqrt{\frac{32 \cdot 27}{500 \cdot 16}} = 3000 \text{ zwojów}$$

— przekładnia zwojowa

$$p = \sqrt{\frac{0,9 \cdot 8000}{8}} = 30$$

— oporność czynna (rezystancja) uzwojenia pierwotnego dla $\eta = 0,9$

$$r_1 = 0,05 \cdot 8 \cdot 900 = 360 \text{ } \Omega$$

— oporność czynna (rezystancja) uzwojenia wtórnego

$$r_2 = 0,055 \cdot 8 = 0,44 \text{ } \Omega$$

— najmniejsze średnice drutów nawojowych, przyjmując średnią długość zwoju 24 cm i 3000 zwojów dla uzwojenia pierwotnego:

$$d_1 = 0,16 \sqrt{\frac{I_m}{r}} = 0,16 \sqrt{\frac{0,24 \cdot 3000}{360}} = 0,23 \text{ mm}$$

$$d_2 = 0,16 \sqrt{\frac{0,24 \cdot 100}{0,44}} = 1,2 \text{ mm}$$

— przyjęty podział na sekcje: uzwojenie pierwotne 3 sekcji, po 4 w każdej połowie korpusu; uzwojenie wtórne — 6 sekcji po 3 z każdej strony (pomiędzy sekcjami uzwojenia pierwotnego);
długość uzwojenia w gotowym korpusie — $32 \div 33$ mm.

3. Zakupiliśmy drut 0,25 i drut 1,0 w izolacji emaliowej. Próby uzwojenia wykazały, że w jednej warstwie mieści się 105 zwojów i 30 zwojów. Na tej podstawie przyjmujemy ostatecznie następujące dane uzwojeń:

- uzwojenie pierwotne: 8 sekcji po 4 warstwy, w sekcji łącznie 3360;
- uzwojenie wtórne: 6 sekcji po 2 warstwy, łącznie w sekcji 60 zwojów; łączymy sekcje po 3 równolegle i dwie grupy w szereg;

— przekładnia zwojowa: $p = \sqrt{\frac{n_1}{n_2}} = \sqrt{\frac{3360}{120}} = 28;$

- sprawność $\eta = 0,92$.

Dzięki parzystej liczbie warstw w sekcji, początki i końce wszystkich sekcji wypadają po stronie zewnętrznej korpusu.