

PROJEKTOWANIE TRANSFORMATORÓW WYJŚCIOWYCH

Jeszcze dość licznie budowane są przez radioamatorów lampowe wzmacniacze m.cz., zwłaszcza o większej mocy. Najtrudniejszym do zaprojektowania i wykonania elementem tych wzmacniaczy jest transformator wyjściowy. Świadczą o tym napływające do redakcji zapytania i prośby o pomoc w obliczeniach. Podane tu w zwięzłym ujęciu podstawowe zasady projektowania transformatorów przewidzianych do wykonania w warunkach amatorskich, powinny zadośćuczynić życzeniom zainteresowanych czytelników.

Zasady projektowania transformatorów m.cz. w warunkach amatorskich różnią się nieco od stosowanych w przemyśle. W pierwszej kolejności określa się w przybliżeniu, jaki rdzeń jest potrzebny do projektowanego wzmacniacza. Następnie poszukuje się mniej więcej odpowiedniego rdzenia, a po jego zdobyciu przeprowadza się dalsze obliczenia dotyczące uzwojeń. Po ustaleniu przybliżonych danych co do potrzebnych drutów nawojowych, nabywa się druty o średnicach zbliżonych do wytypowanych i

wówczas dotrzeć ostatecznie określa się liczby zwojów poszczególnych uzwojeń.

Podstawowe zależności wiążące zjawiska w transformatorze wynikają z następującego wzoru:

$$E_{tr} = 6,28 \cdot f \cdot n \cdot Q \cdot B \cdot 10^{-4} \quad (1)$$

w którym:

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

f — częstotliwość [Hz],

Q — przekrój czynny rdzenia [cm²],

n — liczba zwojów uzwojenia,

B — największa wartość indukcji w rdzeniu [T].

Wartość siły przeciwelektromotorycznej jest związana z napięciem zmiennym stopnia końcowego wzmacniacza i wynika z mocy i oporu roboczego. Naj-

wieksza i najmniejsza częstotliwość pasma przepustowego wynika z założeń. Największa dopuszczalna wartość indukcji w rdzeniu nie powinna przekraczać 0,6 T. Dla transformatorów wzmacniaczy HI-FI zaleca się przyjęcie 0,4 T. W podanym wzorze pozostały dwie niewiadome: przekrój rdzenia (Q) i liczba zwojów (n). Przekrój rdzenia ustalamy w przybliżeniu ze wzoru:

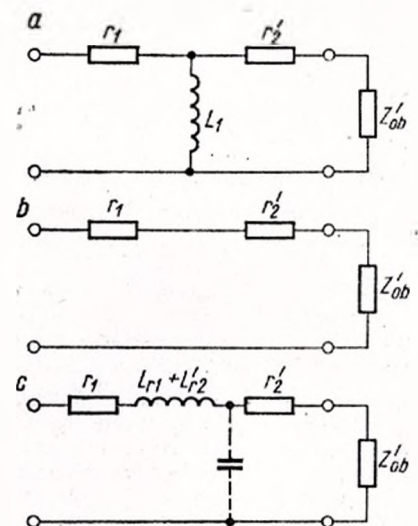
$$Q = (3+5) \sqrt{P_{wy}} \quad (2)$$

w którym:

P_{wy} — moc wyjściowa wzmacniacza.

O ile to możliwe, dążymy do budowy transformatora o dużym przekroju rdzenia, co umożliwi zmniejszenie liczby zwojów w uzwojeniach. Jest to ważne zarówno ze względu na niepożądaną indukcyjność rozproszenia transformatora jak i stopień trudności jego wykonania. W transformatorach złożonych z blach z otworami na śruby mocujące należy zbadać, czy przekrój rdzenia w pobliżu śrub nie jest mniejszy od przekroju kolumny głównej.

Uproszczone układy zastępcze transformatora przedstawiono na rys. 1. Przy częstotliwości najmniejszej należy brać pod uwagę wpływ indukcyjności pierwotnego uzwojenia transformatora, która jest dołączona równolegle do właściwego obciążenia wzmacniacza. W większości przypadków właśnie konieczność uzyskania wystarczająco dużej wartości tej indukcyjności określa liczbę zwojów uzwojenia pierwotnego. Przy częstotliwościach średnich (przyjmuje się 1000 Hz) istotną rolę odgrywają tylko rezystancje uzwojeń. Przy częstotliwościach wielkich zaznacza się wpływ indukcyjności rozproszenia, której wartość zależy od liczby zwojów, schematu uzwojenia transformatora i jakości jego wykonania. Indukcyjność ta, w połączeniu



Rys. 1. Uproszczone układy zastępcze transformatora

a — układ zastępczy dla częstotliwości najmniejszych, b — układ zastępczy dla częstotliwości średnich, c — układ zastępczy dla częstotliwości wielkich (tony wysokie i ultradźwięki) r_1 — rezystancja uzwojenia pierwotnego, r_2' — rezystancja uzwojenia wtórnego przeniesiona na stronę pierwotną, Z'_{ob} — impedancja obciążenia Z_{ob} przeniesiona na stronę pierwotną, L_1 — indukcyjność uzwojenia pierwotnego, L_{r1} , L'_{r2} — indukcyjności rozproszenia uzwojeń

z pojemnościami międzyuzwojeniowymi, tworzy filtr dolnoprzepustowy ograniczający pasmo przepustowe transformatora. W dobrze wykonanych transformatorach częstotliwość graniczna wynosi około 100 kHz. W każdym przypadku powinna ona mieć wartość kilkakrotnie większą od przyjętej górnej częstotliwości pasma przepustowego wzmacniacza.

Posługując się wzorem (1) i podstawiając w nim odpowiednie wartości aż do przekroju rdzenia włącznie — określamy liczbę zwojów n .

Następnie korzystając ze wzoru (3) i zakładając minimalną wymaganą indukcyjność uzwojenia pierwotnego L_1 obliczamy liczbę zwojów n_1 . Porównujemy wartość n i n_1 . Do dalszych obliczeń przyjmujemy wartość większą.

Wzór umożliwiający obliczenie przybliżonej liczby zwojów przy założonej indukcyjności jest następujący:

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

przy czym:

- 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 przyjmuje się $\mu_r = 500$,
- Q — przekrój czynny rdzenia [cm²].

Indukcyjność uzwojenia pierwotnego powinna być taka, aby reaktancja uzwojenia przy najmniejszej częstotliwości pasma przepustowego była większa od oporu roboczego stopnia końcowego wzmacniacza, co można wyrazić wzorem:

$$L_1 > \frac{R_{or}}{6,28 \cdot f_d} \quad (4)$$

w którym:

- f_d — najmniejsza częstotliwość pasma przepustowego [Hz],
- R_{or} — opór roboczy stopnia końcowego (w przypadku układów przeciwnych od anody do anody, bądź od kolektora do kolektora).

Sprawność energetyczna η transformatora wyjściowego powinna być wysoka i wynosić $\eta = 0,80 \div 0,90$. Zależy ona w pierwszym rzędzie od rezystancji uzwojeń r_1 i r_2 .

Odpowiednie wzory praktyczne.

Dla wzmacniacza klasy A:

$$r_1 = (0,05 \div 0,1) Z_{ob} \cdot p^2 \quad (5)$$

$$r_2 = (0,035 \div 0,11) Z_{ob} \quad (6)$$

Dla wzmacniacza klasy B:

$$r_1 = (0,03 \div 0,06) Z_{ob} \cdot p^2 \quad (7)$$

$$r_2 = (0,045 \div 0,09) Z_{ob} \quad (8)$$

przy czym:

Z_{ob} — impedancja zespołu głośnikowego [Ω].

Srednicę drutów nawojowych (bez izolacji) oblicza się ze wzoru:

$$d = 0,16 \sqrt{\frac{l_m}{r}} \quad (9)$$

w którym:

- d — średnica drutu [mm],
- l_m — długość drutu w uzwojeniu [m],
- r — rezystancja uzwojenia [Ω].

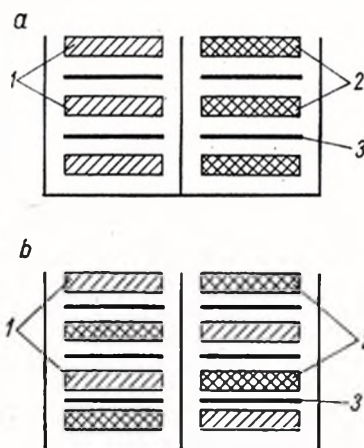
Przekładnia zwojowa transformatora zależy od impedancji obciążenia i sprawności transformatora. Odpowiedni wzór ma postać:

$$k = \sqrt{\frac{\eta R_{or}}{Z_{ob}}} \quad (10)$$

Obliczoną liczbę zwojów, rezystancje uzwojeń i średnice drutów traktujemy jako dane wstępne, podlegające korekcie po nabyciu drutów i zaprojektowaniu korpusu, na którym nawiliśmy uzwojenia. Uzwojenia z reguły dzielimy na sekcje. Uzwojenie pierwotne może mieć 4, 6 lub 8 sekcji. Uzwojenie wtórne może mieć 2, 4 lub 8 sekcji. Sekcje uzwojenia pierwotnego powinny mieć parzystą liczbę warstw — tylko wówczas końce sekcji znajdują się po zewnętrznej stronie korpusu i możliwe będzie ich wyprowadzenie na zewnątrz. Dotyczy to najczęściej i sekcji uzwojenia wtórnego, chociaż w tym przypadku łatwiej jest wykonać w razie potrzeby połączenia wewnętrzne.

W przypadku wzmacniaczy klasy A i AB₁ dążymy do uzyskania małej wartości indukcyjności rozproszenia pomiędzy uzwojeniem pierwotnym a wtórnym. Dopuszcza się tu nawinięcie uzwojenia pierwotnego w sposób podany przykładowo na rys. 2a. W przypadku wzmacniaczy klasy B i AB₂ należy dbać o dobre sprzężenie pomiędzy każdą połówką uzwojenia pierwotnego i całym uzwojeniem wtórnym, ponieważ połówki uzwojenia pierwotnego pracują niesymetrycznie. Przykładowe rozmieszczenie sekcji przedstawiono na rys. 2b.

Po wykonaniu korpusu przeprowadza się próbę w celu określenia liczby zwojów w jednej warstwie. Na tej podstawie można ustalić liczbę zwojów sekcji



Rys. 2. Schematy rozmieszczenia sekcji uzwojenia transformatora

1 — sekcje jednej połowy uzwojenia przeciwnego, 2 — sekcje drugiej połowy uzwojenia przeciwnego, 3 — sekcje uzwojenia wtórnego

i schemat uzwojenia całego transformatora, korygując odpowiednio całkowitą liczbę zwojów uzwojenia pierwotnego i wtórnego.

Przykład.*) Należy zaprojektować transformator do wzmacniacza lampowego o mocy 35 W. Opór roboczy stopnia PP (od anody do anody) wynosi wg katalogu 4000 Ω. Pasma przepustowe wzmacniacza 40+15 000 Hz. Impedancja obciążenia 4 Ω. Dopuszczalną indukcyjną przyjmujemy $B = 0,8$ T.

1) Pożądany przekrój rdzenia:

$$Q = (3+3) \sqrt{35} = 18+36 \text{ cm}^2.$$

2) Nabyliśmy rdzeń o wymiarach kolumny 50×50 i okna 25×75. Przyjmujemy przekrój czynny rdzenia 23 cm².

3) Obliczamy wstępnie:

— z warunku na indukcyjność w rdzeniu (wzór 1)

$$n = \frac{E_{tr} \cdot 10^4}{6,28 \cdot f \cdot Q \cdot B} = \frac{530 \cdot 10^4}{6,28 \cdot 40 \cdot 23 \cdot 0,8} \approx 1550 \text{ zwojów **}$$

— z warunku na indukcyjność przyjmując $L_1 = 20$ H

$$n_1 = 9000 \sqrt{\frac{L_1 \cdot l_r}{\mu_r \cdot Q}} = 9000 \sqrt{\frac{20 \cdot 30}{500 \cdot 23}} \approx 2000 \text{ zwojów}$$

— przekładnia zwojowa

$$p = \sqrt{\frac{0,9 \cdot 4000}{4}} = 30$$

— rezystancja uzwojenia pierwotnego

$$r_1 = 0,03 \cdot 4 \cdot 900 \approx 110 \Omega$$

— rezystancja uzwojenia wtórnego

$$r_2 = 0,045 \cdot 4 \approx 0,18 \Omega$$

— średnica drutu nawojowego — przyjmując średnią długość zwoju 0,26 m i 2000 zwojów

$$d_1 = 0,16 \sqrt{\frac{l_m}{r}} = 0,16 \sqrt{\frac{0,26 \cdot 2000}{110}} = 0,35$$

$$d_2 = 0,16 \sqrt{\frac{0,26 \cdot 67}{0,18}} = 1,6$$

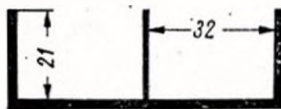
4) Udało się nam nabyć drut $\varnothing 0,40$ i $\varnothing 0,8$ w emalii.

(dc. na str. 296)

*) Przykład ten zawiera obliczenie transformatora do wzmacniacza lampowego opisanego w nrze 9/1974 naszego miesięcznika. W książce, z której zaczerpnięto schemat wzmacniacza, zamieszczono tylko dane elektryczne zalecanego transformatora bez danych konstrukcyjnych. Zasady obliczania transformatorów są obszerniej opisane w książkach: G. Cykin — Wzmacniacze sygnałów elektrycznych, WKŁ Warszawa oraz A. Wiltort — Amatorskie wzmacniacze elektroakustyczne, WKŁ Warszawa.

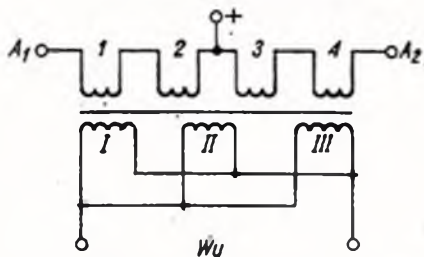
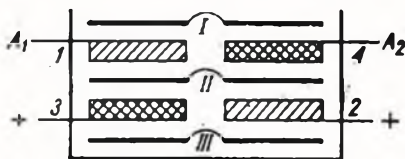
**) Znając moc wzmacniacza i opór roboczy wartość E_{tr} obliczamy następująco: $E_{tr} \approx 1,41 \sqrt{P_{wy} R_{or}} = 1,41 \sqrt{35 \cdot 4000} = 530$ V.

Sklejony z preszpanu korpus ma wymiary uwidocznione na rys. 3. Nie dysponując nawijarką do uzwajania transformatorów, lecz tylko prowizorycznym urządzeniem własnej konstrukcji — decydujemy się na dość prosty schemat uzwojeń: uzwojenie pierwotne — 4 sekcje, a uzwojenie wtórne trzy sekcje połączone równolegle (rys. 4).



Rys. 3. Wymiary korpusu (przykład obliczeniowy)

Próba uzwajania wykazała, że w jednej warstwie sekcji uzwojenia pierwotnego mieści się przeciętnie 60 zwojów. Przyjmujemy 8 warstw w sekcji, co da łącznie 480 zwojów. Cztery sekcje uzwojenia pierwotnego będą miały ogółem 1920 zwojów. Uzwojenie wtórne będzie się składało z 3 sekcji nawiniętych na całą szerokość korpusu (jednowarstwowo) każda po 64 zwoje. Sekcje te zostaną połączone równolegle.



Rys. 4. Schemat uzwojenia transformatora wyjściowego (przykład obliczeniowy)

Sprawdzamy jeszcze raz, czy obliczenia są prawidłowe i czy uzwojenie pomieści się w korpusie. Uzwojenie pierwotne (16 warstw) zajmie około 8 mm, uzwojenie wtórne (3 warstwy) zajmie mniej niż 4 mm. Ponieważ wolne miejsce w korpusie wynosi 21 mm, na przekładki izolacyjne pozostaje co najmniej 9 mm, co

wystarczy w zupełności pod warunkiem dość ścisłego uzwajania i stosowania przekładek z papieru kondensatorowego lub specjalnego papieru transformatorowego. Pomiędzy uzwojeniem pierwotnym a wtórnym należy zastosować lepszą izolację z ceratki olejowej lub cienkiego preszpanu nasyconego lakierem bakelitowym, szelakiem lub innym dobrym środkiem izolacyjnym.

W celu uzyskania zupełnej symetrii, uzwojenia 1 i 2 są nawijane w jednym kierunku, a 3 i 4 w kierunku przeciwnym. Tylko w takim przypadku anody (kolektory) wypadną na końcu najwyższej położonych sekcji.

Kilka uwag dodatkowych. W przypadku nabycia drutu $\varnothing 0,35$ mm korpus — przy uzwojeniu 2000 zwojów i tym samym schemacie uzwajania — nie byłby należyście wypełniony. Można zastosować wówczas układ 4 sekcji pierwotnych (po 450 zwojów w 8 warstwach) przy łącznej liczbie zwojów 1800, pozostawiając poprzedni układ uzwojenia wtórnego. Można również rozważyć alternatywę zwiększenia uzwojenia pierwotnego do 2400 zwojów zmieniając układ (oraz drut) uzwojenia wtórnego. Zwiększenie liczby zwojów jest korzystne, ponieważ wzrośnie wówczas indukcyjność uzwojenia pierwotnego (L_1) przy nieznacznym pogorszeniu innych parametrów.

A. W.