

## Autotransformator dopasowujący

Technika Hi-Fi, a następnie rozwój stereofonii, spowodowały wprowadzenie wielu zmian w konstrukcji urządzeń elektroakustycznych. Duża moc wyjściowa wzmacniaczy oraz szerokie pasmo przenoszonych częstotliwości wymagają stosowania w miejsce pojedynczych głośników odpowiednich ich zespołów. Głośniki są zabudowywane w oddzielnych skrzynkach. Zachodzi często konieczność dopasowania zespołów głośnikowych do posiadanych wzmacniaczy, odbiorników itd. Chodzi tu oczywiście o dopasowanie impedancji.

Większość Czytelników wie, że sprawę dopasowania impedancji można rozwiązać za pomocą transformatora o odpowiedniej przekładni. Proponuje się w tym szczególnym przypadku stosowanie autotransformatorów ze względu na wiele zalet takiego rozwiązania. Szczególnie cenne zalety ma to urządzenie w przypadku, gdy radioamator samodzielnie buduje zestaw głośnikowy wykorzystując głośniki zakupione po obniżonej cenie. Głośniki takie mogą mieć różne wartości impedancji oraz różną moc. Należy wówczas wykonać taki autotransformator, który umożliwi odpowiedni rozdział mocy pomiędzy poszczególne głośniki. Wystarczy przeważnie wykonać jeden autotransformator z odpowiednią liczbą odczepów.

Do obliczenia autotransformatora potrzebne są następujące dane:

- moc w wolt-amperech ( $P$ ),
- impedancja obciążenia w omach ( $Z$ ),
- najmniejsza częstotliwość przenoszonego pasma ( $f$ ) w hercach.

Na podstawie dwóch pierwszych wielkości określamy napięcie i natężenie prądu:

$$U = \sqrt{P \cdot Z} \quad [1]$$

$$I = \sqrt{\frac{P}{Z}} \quad [2]$$

### PODSTAWOWE DANE I ZALEŻNOŚCI POMIĘDZY NIMI

Schemat autotransformatora przedstawiono na rys. 1. Na wstępie przyjmujemy założenie upraszczające, że moc wejściowa równa jest mocy wyjściowej:

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 = P_2 = P \quad [3]$$

Wielkość autotransformatora zależy od mocy zwanej mocą własną. Obliczamy tę moc jako iloczyn wartości niższego z dwóch napięć przez natężenie prądu w gałęzi równoległej. Dla schematu z rys. 1a będzie słuszna zależność:

$$P_1 = U_2 \cdot I_1 \quad [4]$$

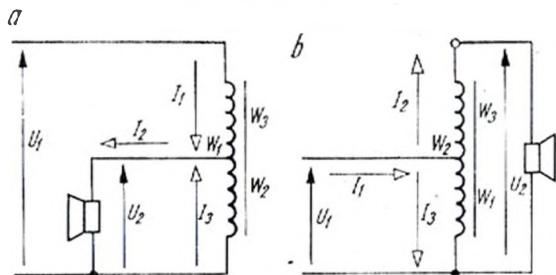
Natomiast dla schematu z rys. 1b moc własną obliczamy na podstawie wzoru:

$$P_3 = U_1 \cdot I_3 \quad [5]$$

w którym:

- $U_1$  — napięcie na wejściu autotransformatora (V),
- $U_2$  — napięcie na wyjściu autotransformatora (V),
- $I_1$  — natężenie prądu w przewodzie od wzmacniacza (A),
- $I_2$  — natężenie prądu w przewodzie do głośników (A),
- $I_3$  — natężenie prądu w gałęzi równoległej obliczone jako różnica natężeń prądów wejściowego i wyjściowego:

$$I_3 = |I_1| - |I_2|.$$



Rys. 1

Przyjmujemy obecnie następujące założenie. Do wykonania autotransformatora zastosujemy typowy rdzeń transformatora głośnikowego o wykroju blach EI lub M. Jego wymiary i wykroj przedstawiono na rys. 2.

Minimalny efektywny przekrój rdzenia wyznaczymy korzystając ze wzoru empirycznego:

$$S_{ef} \geq 150 \cdot \sqrt{P_3} \quad [7]$$

w którym:

$S_{ef}$  — przekrój rdzenia w  $mm^2$ .

Przekrojem efektywnym nazwano tu przekrój czynny rdzenia. Rdzeń wykonany jest z blach izolowanych wzajemnie. Izolacja blach oraz nierówności występujące na ich powierzchni zajmują około 10% przekroju rdzenia wliczonego jako iloczyn szerokości środkowego słupa rdzenia przez grubość pakietu. Dobieramy rdzeń o przekroju co najmniej równym lub lepiej większym niż wartość obliczona. Następnie obliczamy liczbę zwojów na jeden wolt napięcia, korzystając ze wzoru:

$$w = \frac{10^6}{4,44 \cdot f_1 \cdot B \cdot S_{ef}} \quad [8]$$

w którym:

- $w$  — liczba zwojów na 1 wolt napięcia,
- $f$  — najmniejsza (dolna) częstotliwość przenoszona pasma akustycznego w Hz,
- $B$  — indukcja magnetyczna w rdzeniu w  $Wb/m^2$ ,
- $S_{ef}$  — przekrój rdzenia w  $mm^2$ .

Indukcja magnetyczna  $B$  może mieścić się w przedziale od  $0,6 Wb/m^2$  do  $0,8 Wb/m^2$ . Wartość mniejszą przyjmujemy w przypadku projektowania autotransformatorów do urządzeń wysokiej jakości. Wartość  $0,8 Wb/m^2$  można założyć dla urządzeń dużej mocy oraz urządzeń średniej klasy.

Liczbę zwojów uzwojenia  $W_1$  obliczymy według wzoru:

$$W_1 = w \cdot U_1 \quad [9]$$

Odpowiednio liczba zwojów uzwojenia  $W_2$  będzie równa:

$$W_2 = w \cdot U_2 \quad [10]$$

Przekrój drutu nawojowego obliczymy przy założeniu odpowiedniej gęstości prądu. Gęstość tę w naszym przypadku możemy ustalić równą  $2,5 A/mm^2$ . Gęstość mogłaby być znacznie większa, chodzi nam jednak o wysoką sprawność autotransformatora, a więc małą wartość rezystancji uzwojenia.

Przekrój drutu wyznaczymy na podstawie wzoru:

$$s = \frac{I}{j} = \frac{I}{2,5} \quad [11]$$

w którym:

- $s$  — przekrój w  $mm^2$ ,
- $I$  — natężenie prądu w amperach;
- $j$  — gęstość prądu  $2,5 A/mm^2$ .

Średnicę drutu nawojowego możemy obliczyć na podstawie uproszczonego wzoru:

$$d = 1,13 \cdot \sqrt{s} \quad [12]$$

Sposób nawinięcia uzwojeń ma wpływ na wielkość strumienia rozproszenia, a ten z kolei — na ograniczenie od góry pasma przenoszonych częstotliwości akustycznych. Najlepsze rezultaty osiągniemy nawijając uzwojenie bifilarne. Zasadę nawinięcia przedstawiono na rys. 4.

Jeżeli chcemy, aby autotransformator przenosił częstotliwości wyższe od  $12-15 kHz$ , nawinięcie bifilarne uzwojeń jest konieczne. Musimy jednak w tym przypadku zastosować drut nawojowy w izolacji lepszej niż zwykła emalia. Może to być już drut nawojowy typu DNEs, a jeszcze lepiej DNEJ lub DNEB.

Na zakończenie obliczeń sprawdzamy jeszcze, czy uzwojenie zmieści się na korpusie. Obliczamy najpierw ile zwojów nawinąć w jednej warstwie. Dzielimy szerokość nawinięcia przez średnicę drutu w mm (oczywiście średnicę drutu w izolacji). Należy pamiętać, że praktycznie nie uda się nawinąć obliczonej tym sposobem liczby zwojów, lecz o  $5-10\%$  mniej. Pomiędzy warstwami należy zastosować przekładkę izolacyjną. Najlepsza jest przekładka z folii poliesterowej. W warunkach amatorskich możemy stosować również papier nasycony parafiną lub inny, cienki i mocny papier. Wysokość uzwojenia obliczymy mnożąc liczbę warstw przez grubość warstwy, tj. średnicę drutu w izolacji plus przekładka. Tu również należy wziąć pod uwagę spęcznienie uzwojenia na odcinku prostym korpusu. Spęcznienie szacunkowo oceniamy na  $10-15\%$  wysokości uzwojenia. W przypadku niestarannego nawijania uzwojenie może zająć dwa razy więcej miejsca niż wynika to z obliczeń.

#### Przykład obliczeniowy

Obliczyć autotransformator w celu dopasowania magnetofonu i zespołu głośnikowego.

Dane magnetofonu:

- moc wyjściowa  $P = 4 \text{ VA}$ ,
- impedancja  $Z = 5 \Omega$ ,
- najmniejsza częstotliwość  $f = 60 \text{ Hz}$ .

Dane zespołu głośnikowego:

- moc znamionowa  $P = 10 \text{ VA}$ ,
- impedancja  $Z = 15 \Omega$
- najmniejsza częstotliwość  $f = 40 \text{ Hz}$ .

Jako wyjściowe przyjmujemy dane kolumny głośnikowej, gdyż wówczas kolumna ta może być przyłączona w razie potrzeby do innego urządzenia o większej mocy wyjściowej i impedancji równej  $5 \Omega$ .

Obliczamy więc jak dla wzmacniacza o mocy wyjściowej  $10 \text{ VA}$ .

W pierwszej kolejności obliczamy napięcia i prądy:

$$U_1 = \sqrt{P \cdot Z_1} = \sqrt{10 \cdot 5} = \sqrt{50} = 7,07 \text{ V}$$

$$U_2 = \sqrt{P \cdot Z_2} = \sqrt{10 \cdot 15} = \sqrt{150} = 12,24 \text{ V}$$

$$I_1 = \sqrt{\frac{P}{Z}} = \sqrt{\frac{10}{5}} = \sqrt{2} = 1,415 \text{ A}$$

$$I_2 = \sqrt{\frac{P}{Z_2}} = \sqrt{\frac{10}{15}} = 0,815 \text{ A}$$

$$I_3 = |I_1 - I_2| = 1,415 - 0,815 = 0,6 \text{ A}$$

Obliczamy obecnie moc własną autotransformatora, korzystając ze wzoru [5]:

$$P_3 = U_1 \cdot I_3 = 7,07 \cdot 0,6 = 4,25 \text{ VA}$$

Przekrój potrzebnego rdzenia wyznaczmy na podstawie wzoru [7]:

$$S_{ef} \geq 150 \cdot \sqrt{P_3} = 150 \cdot \sqrt{4,25} = 150 \cdot 2,06 = 320 \text{ mm}^2$$

Zastosujemy w tym przypadku rdzeń typu EI 60.

Przekrój efektywny rdzenia jest równy  $370 \text{ mm}^2$ .

Liczba zwojów na 1 V napięcia według wzoru [8]:

$$w = \frac{10^8}{4,44 \cdot f_1 \cdot S_{ef} \cdot B} = \frac{10^8}{4,44 \cdot 40 \cdot 370 \cdot 0,7} = 21,7$$

Obliczymy następnie liczbę zwojów dla poszczególnych uzwojeń:

$$W_1 = U_1 \cdot w = 7,07 \cdot 21,7 = 153 \text{ zwoje}$$

$$W_2 = U_2 \cdot w = 12,24 \cdot 21,7 = 255 \text{ zwojów}$$

$$W_3 = W_2 - W_1 = 255 - 153 = 102 \text{ zwoje.}$$

Biorąc pod uwagę konieczność jak najlepszego przenoszenia większych częstotliwości akustycznych, postanawiamy nawinąć uzwojenie bifilarnie drutem nawojowym typu DNEs. Obliczamy więc średnice drutu nawojowego dla poszczególnych uzwojeń:

$$s_1 = \frac{I_1}{j} = \frac{0,8}{2,5} = 0,24 \text{ mm}^2$$

$$s_2 = \frac{I_2}{j} = \frac{0,815}{2,5} = 0,325 \text{ mm}^2$$

$$d_1 = 1,13 \cdot \sqrt{s_1} = 1,13 \cdot \sqrt{0,24} = 1,13 \cdot 0,49 = 0,55 \text{ mm}$$

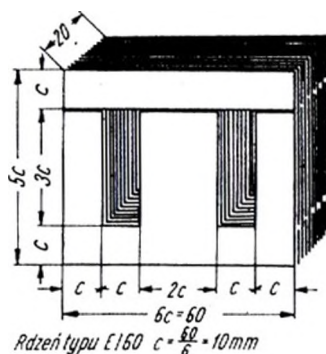
$$d_2 = 1,13 \cdot \sqrt{s_2} = 1,13 \cdot \sqrt{0,325} = 1,13 \cdot 0,526 = 0,65 \text{ mm}$$

Ze względu na nawijanie bifilarne wygodniej będzie całe uzwojenie nawinąć drutem o jednakowej średnicy. Decydujemy się nawinąć je drutem o średnicy  $0,65 \text{ mm}$ . Średnica tego drutu w izolacji jest równa około  $0,7 \text{ mm}$ .

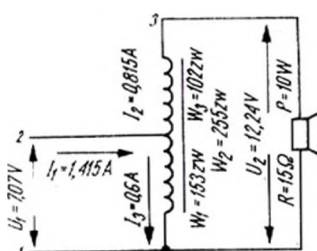
Zaczynamy nawijanie uzwojenia  $W_1$  i  $W_3$  prowadząc jednocześnie dwa druty obok siebie. Nawijanie takie będzie możliwe tylko do 120 zwojów, gdyż wówczas skończy się już uzwojenie  $W_3$ . Dalszą część uzwojenia nawiniemy jednym drutem. Będą to pozostałe zwoje należące do uzwojenia  $W_1$ . Liczba tych zwojów jest równa:

$$W = W_1 - W_3 = 153 - 102 = 51 \text{ zwojów.}$$

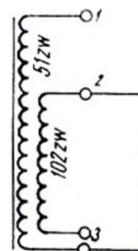
W przypadku zastosowania zwykłego drutu nawojowego w emalii, uzwojenie nawijamy warstwami wyprowadzając odczep 2.



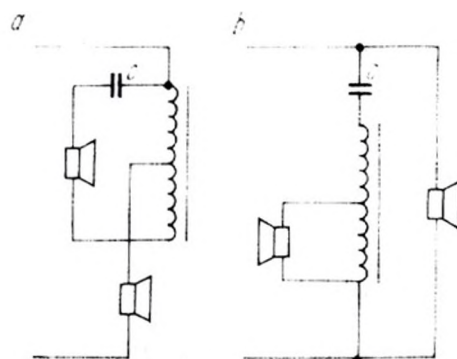
Rys. 2



Rys. 3



Rys. 4



Rys. 5

Rdzeń należy złożyć bez szczeliny. Sposób złożenia blaszek przedstawiono na rys. 2. Schemat autotransformatora opisanego jako przykład przedstawiono na rys. 3. Sposób nawinięcia uzwojenia i połączenia końcówek jest przedstawiony schematycznie na rys. 4.



Podane wzory do obliczenia autotransformatora dopasowującego są proste. Zostały one sprawdzone w praktyce. Obliczono i wykonano kilka autotransformatorów i wszystkie pracują dobrze. Starano się podać wszystkie potrzebne uwagi, które mogłyby pomóc w wykonaniu samodzielnym autotransformatora nawet początkującym radioamatorom. Natomiast pominięto celowo rozważania teoretyczne oraz oblicze-

nia mniej ważnych parametrów. Bardziej zaawansowani radioamatorzy powinni zadać sobie trud obliczenia indukcyjności autotransformatora przy najmniejszej założonej częstotliwości.

Na rysunku 5 przedstawiono przykładowo sposób wykorzystania autotransformatora do przyłączenia głośnika wysokotonowego do zestawu głośników niskotonowych. Głośnik wysokotonowy może być włączony szeregowo lub też równolegle. Przy włączeniu szeregowym impedancja wypadkowa zwiększa się; przy włączeniu równoległym natomiast maleje.

Zastosowanie autotransformatora do przyłączenia głośnika wysokotonowego jest potrzebne w dwóch przypadkach:

- konieczności dopasowania impedancji,
- konieczności podwyższenia napięcia zasilającego ten głośnik.