

# Obliczanie oporowych tłumików efektywności w układach zwrotnic zestawów głośnikowych

W artykule opisano prostą metodę obliczania oporowych tłumików efektywności występujących w układach zwrotnic zestawów głośnikowych wykorzystującą podstawowe zależności i prawa fizyczne stanowiące podstawy teorii obwodów. Obliczenia są na tyle trywialne, że z ich przeprowadzeniem może sobie poradzić nawet uczeń drugiej klasy technikum elektronicznego. Wyprowadzenia potrzebnych wzorów zawarte w publikacji pozwalają na lepsze zrozumienie algorytmów obliczeniowych, które są wykorzystywane w popularnych programach komputerowych służących do symulacji układów zwrotnic zestawów głośnikowych, takich jak np. Speaker Workshop czy VituixCAD.

Oporowe tłumiki efektywności pozwalają na wyrównanie wypadkowej charakterystyki poziomu ciśnienia akustycznego w funkcji częstotliwości zestawu głośnikowego. W przypadku gdy efektywność danego głośnika lub głośników jest wyższa od efektywności głośnika niskotonowego lub nisko-średnionowego możemy w ten sposób stłumić sygnał doprowadzany do zacisków danego głośnika. Tego typu kompensacji podlegają najczęściej głośniki średnionowe i wysokotonowe.

## Jednoelementowy tłumik efektywności

W najprostszych układach zwrotnic zestawów głośnikowych bardzo często można spotkać jednoelementowy tłumik efektywności. Jego główną zaletę stanowi niski koszt wykonania natomiast wadą jest występowanie efektu podnoszenia się charakterystyki modułu impedancji w funkcji częstotliwości kompensowanego głośnika o wartość rezystancji  $R$  występującej w obwodzie.

Na **rysunku 1** przedstawiono schemat ideowy jednoelementowego tłumika efektywności. Do wyznaczenia wartości rezystancji  $R$  posłużymy się wzorem na tłumienie napięciowe wyrażone w decybelach:

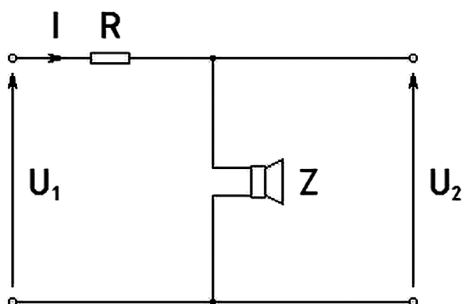
$$K_U[dB] = 20 \log_{10} \left( \frac{U_2}{U_1} \right)$$

Dzieląc obydwie strony tego wzoru przez dwadzieścia otrzymamy:

$$\frac{K_U[dB]}{20} = \log_{10} \left( \frac{U_2}{U_1} \right)$$

W następnej kolejności należy zastosować operację odwrotną do logarytmowania przy podstawie 10, czyli potęgowanie podstawy 10:

$$\frac{U_2}{U_1} = 10^{\frac{K_U[dB]}{20}}$$



Rysunek 1. Schemat ideowy jednoelementowego tłumika efektywności

Mnożąc obustronnie równanie razy  $U_1$  otrzymujemy:

$$U_2 = 10^{\frac{K_U[dB]}{20}} \cdot U_1$$

Załóżmy, że sygnał na wejściu układu ma amplitudę RMS równą 1,00 V i chcemy stłumić efektywność ośmioomowego głośnika średnionowego o -3 dB:

$$U_2 = 10^{\frac{K_U[dB]}{20}} \cdot U_1 = 10^{\frac{-3dB}{20}} \cdot 1,00V \approx 0,71$$

Tłumienie napięciowe wyniesie zatem 0,71 V/V.

Ułożmy zatem układ równań korzystając z drugiego prawa Kirchhoffa i z prawa Ohma:

$$\begin{cases} U_1 = I \cdot R + I \cdot Z \\ U_2 = I \cdot Z \end{cases}$$

Wiedząc, że  $U_2 = 0,71 \cdot U_1$  podstawmy tę wartość do drugiego równania:

$$\begin{cases} U_1 = I \cdot R + I \cdot Z \\ 0,71 \cdot U_1 = I \cdot Z \end{cases}$$

Podstawmy teraz  $U_1$  oraz  $Z$  do drugiego równania i wyznaczmy wzór na prąd  $I$ :

$$I = \frac{0,71 \cdot U_1}{Z} = \frac{0,71 \cdot 1,00V}{8,00\Omega} \approx 0,09A$$

Wykorzystajmy teraz pierwsze równanie do wyznaczenia rezystancji  $R$ :

$$I \cdot R = U_1 - I \cdot Z$$

Dzieląc obustronnie przez prąd  $I$  otrzymamy:

$$R = \frac{U_1}{I} - Z = \frac{1,00V}{0,09A} - 8,00\Omega \approx 3,11\Omega$$

Najbliższą wartością w szeregu E24 jest rezystancja 3,00  $\Omega$ .

Rezystancja dobranej w ten sposób oporniki doda się do impedancji znamionowej głośnika tworząc impedancję wypadkową:

$$R_D + Z = 11,00\Omega$$

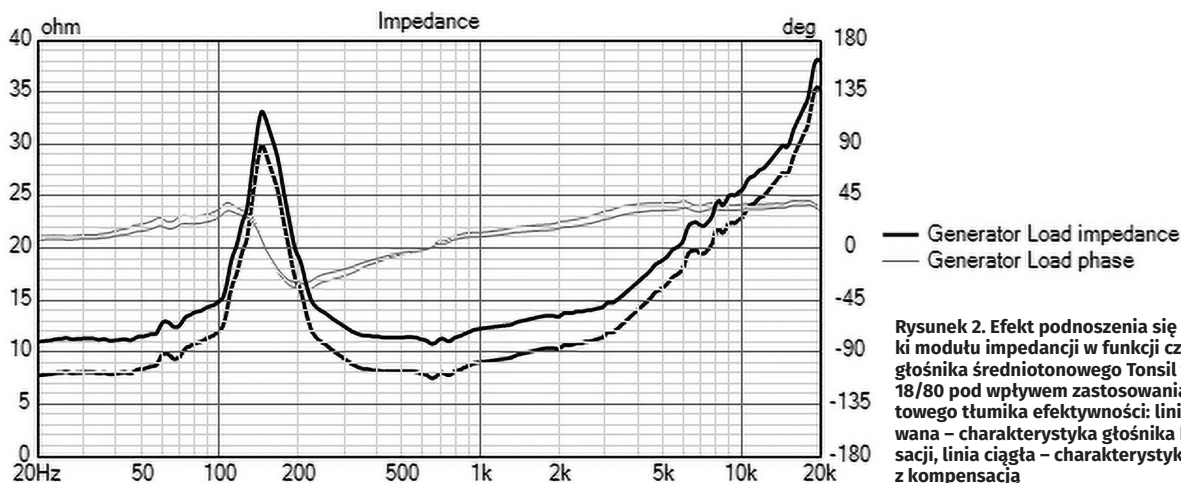
Załóżmy, że maksymalna moc jaką chcemy doprowadzić do głośnika bez tłumika efektywności wynosi 40 W. Do wyznaczenia wartości napięcia RMS jakie należy przyłożyć do zacisków głośnika posłużymy się prawem Joule'a-Lenza:

$$P = U_1 \cdot I$$

Z prawa Ohma wiadomo, że:

$$I = \frac{U_1}{Z}$$

Wstawiając wzór na prawo Ohma do wzoru na prawo Joule'a-Lenza otrzymamy:



Rysunek 2. Efekt podnoszenia się charakterystyki modułu impedancji w funkcji częstotliwości głośnika średnionotonowego Tonsil typu GDM 18/80 pod wpływem zastosowania jednoelementowego tłumika efektywności: linia przerywana – charakterystyka głośnika bez kompensacji, linia ciągła – charakterystyka głośnika z kompensacją

$$P = \frac{U_1^2}{Z}$$

Mnożąc obustronnie razy Z otrzymujemy:

$$U_1^2 = P \cdot Z$$

Pierwiastkujemy obydwie strony równania i podstawiamy znane wartości mocy oraz impedancji znamionowej:

$$U_1 = \sqrt{P \cdot Z} = \sqrt{40,00W \cdot 8,00\Omega} \approx 17,89V$$

Teraz musimy wyznaczyć natężenie prądu elektrycznego płynącego przez obwód złożony z szeregowego połączenia opornika R oraz impedancji znamionowej Z korzystając z prawa Ohma:

$$I = \frac{U_1}{R_D + Z} = \frac{17,89V}{3,00\Omega + 8,00\Omega} \approx 1,63A$$

W następnej kolejności wyznaczamy wartość napięcia RMS jakie w tej sytuacji odłoży się na zaciskach opornika o rezystancji  $R_D$  korzystając z prawa Ohma:

$$U_R = I \cdot R_D = 1,63A \cdot 3,00\Omega = 4,89V$$

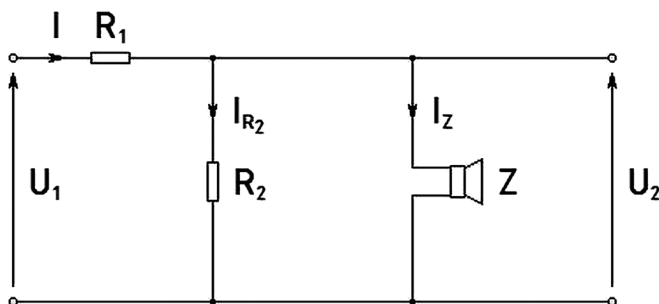
Moc jaką wydzieli się na oporniku o rezystancji  $R_D$  wyznaczamy korzystając z prawa Joule'a-Lenza:

$$P_{R_D} = U_{R_D} \cdot I = 4,89V \cdot 1,63A \approx 7,97W$$

Musimy zatem zastosować opornik o mocy wynoszącej przynajmniej 10,00 W.

## Dwuelementowy tłumik efektywności

W profesjonalnych układach zwrotnic zestawów głośnikowych stosuje się najczęściej dwuelementowy tłumik efektywności. Jego główną zaletą stanowi brak występowania efektu podnoszenia się charakterystyki modułu impedancji w funkcji częstotliwości



Rysunek 3. Schemat ideowy dwuelementowego tłumika efektywności

kompensowanego głośnika, jaki możemy zaobserwować na **rysunku 2** w odniesieniu do jednoelementowego tłumika efektywności. Krótko mówiąc, przy prawidłowym doborze elementów składowych dwuelementowego tłumika efektywności, charakterystyka modułu impedancji w funkcji częstotliwości głośnika poddanego kompensacji wygląda w przybliżeniu tak samo jak charakterystyka modułu impedancji w funkcji częstotliwości głośnika bez kompensacji. Wadę stanowi za to wyższy koszt wykonania.

Parametry tłumienia sygnału przyjmujemy takie same jak w przypadku jednoelementowego tłumika efektywności. Sygnał ma być zatem stłumiony o -3 dB. Tworzymy zatem układ równań korzystając z prawa Ohma, drugiego prawa Kirchhoffa oraz wzoru na rezystancję wypadkową dla połączenia równoległego:

$$\begin{cases} U_1 = I \cdot R_1 + I \cdot \left( \frac{R_2 \cdot Z}{R_2 + Z} \right) \\ U_2 = I \cdot \left( \frac{R_2 \cdot Z}{R_2 + Z} \right) \end{cases}$$

Teraz w pierwszym równaniu wyciągamy natężenie prądu elektrycznego I przed nawias, natomiast w drugim równaniu podstawiamy za  $U_2 = 0,71 \cdot U_1$ :

$$\begin{cases} U_1 = I \cdot \left( R_1 + \left( \frac{R_2 \cdot Z}{R_2 + Z} \right) \right) \\ 0,71 \cdot U_1 = I \cdot \left( \frac{R_2 \cdot Z}{R_2 + Z} \right) \end{cases}$$

Dzielimy obydwie strony drugiego równania przez wartość tłumienia napięciowego wynoszącą 0,71 V/V:

$$U_1 = I \cdot \left( \frac{R_2 \cdot Z}{R_2 + Z} \right) \cdot \frac{1}{0,71}$$

Przyrównujemy obydwa równania układu do siebie:

$$I \cdot \left( R_1 + \left( \frac{R_2 \cdot Z}{R_2 + Z} \right) \right) = I \cdot \left( \frac{R_2 \cdot Z}{R_2 + Z} \right) \cdot \frac{1}{0,71}$$

Natężenie prądu elektrycznego I jest czynnikiem wspólnym, możemy więc podzielić obydwie strony równania przez I otrzymując po skróceniu:

$$R_1 + \left( \frac{R_2 \cdot Z}{R_2 + Z} \right) = \left( \frac{R_2 \cdot Z}{R_2 + Z} \right) \cdot \frac{1}{0,71}$$

Teraz musimy wyznaczyć formułę pozwalającą na obliczenie rezystancji opornika  $R_1$ . W tym celu porządkujemy otrzymane wcześniej równanie:

$$R_1 = \left( \frac{R_2 \cdot Z}{R_2 + Z} \right) \cdot \frac{1}{0,71} - \left( \frac{R_2 \cdot Z}{R_2 + Z} \right)$$

Równanie w dalszym ciągu posiada dwie niewiadome. Aby pozbyć się jednej z nich, musimy sformułować warunek stałej impedancji polegający na tym, że impedancja układu zastępczego składającego się z oporników  $R_1$ ,  $R_2$  oraz impedancji znamionowej  $Z$  głośnika powinna być w przybliżeniu równa impedancji znamionowej  $Z$  głośnika.

$$R_1 + \frac{R_2 \cdot Z}{R_2 + Z} = Z$$

Przenosimy wyraz określający rezystancję zastępczą dla połączenia równoległego na drugą stronę równania:

$$R_1 = Z - \frac{R_2 \cdot Z}{R_2 + Z}$$

Przyrównujemy otrzymane wcześniej równanie do wzoru określającego warunek stałej impedancji:

$$\frac{\left(\frac{R_2 \cdot Z}{R_2 + Z}\right)}{0,71} - \left(\frac{R_2 \cdot Z}{R_2 + Z}\right) = Z - \frac{R_2 \cdot Z}{R_2 + Z}$$

Wymnażamy obydwie strony równania razy wartość tłumienia napięciowego wynoszącą 0,71 V/V:

$$\frac{R_2 \cdot Z}{R_2 + Z} - 0,71 \cdot \left(\frac{R_2 \cdot Z}{R_2 + Z}\right) = 0,71 \cdot Z - 0,71 \cdot \left(\frac{R_2 \cdot Z}{R_2 + Z}\right)$$

Wymnażamy obydwie strony równania razy wyrażenie  $(R_2 + Z)$  z mianowników:

$$R_2 \cdot Z - 0,71 \cdot R_2 \cdot Z = 0,71 \cdot Z \cdot (R_2 + Z) - 0,71 \cdot R_2 \cdot Z$$

Przemnażamy impedancję znamionową  $Z$  razy elementy z nawiasu:

$$\begin{aligned} R_2 \cdot Z - 0,71 \cdot R_2 \cdot Z &= \\ = 0,71 \cdot R_2 \cdot Z + 0,71 \cdot Z^2 - 0,71 \cdot R_2 \cdot Z \end{aligned}$$

Skracamy występujące dwa razy wyrażenia  $(0,71 \cdot R_2 \cdot Z)$ , które się zerują a także wyciągamy czynnik  $R_2$  przed nawias:

$$R_2 \cdot (Z - 0,71 \cdot Z) = 0,71 \cdot Z^2$$

Dzielimy obydwie strony równania przez wyrażenie z nawiasu i podstawiamy znaną wartość impedancji znamionowej głośnika celem obliczenia rezystancji opornika  $R_2$ :

$$R_2 = \frac{0,71 \cdot Z^2}{Z - 0,71 \cdot Z} = \frac{0,71 \cdot (8,00\Omega)^2}{8,00\Omega - 0,71 \cdot 8,00\Omega} \approx 19,59\Omega$$

Najbliższą wartością w szeregu E24 jest rezystancja 20,00  $\Omega$ .

Teraz z warunku stałej impedancji obliczamy rezystancję opornika  $R_1$ :

$$R_1 = Z - \frac{R_2 \cdot Z}{R_2 + Z} = 8,00\Omega - \frac{19,59\Omega \cdot 8,00\Omega}{19,59\Omega + 8,00\Omega} \approx 2,32\Omega$$

Najbliższą wartością w szeregu E24 jest rezystancja 2,40  $\Omega$ .

Wiemy już, że dla sygnału o mocy 40 W napięcie  $U_1$  będzie miało wartość wynoszącą około 17,89 V. Musimy zatem wyznaczyć impedancję zastępczą układu zawierającego elementy dobierane:

$$\begin{aligned} Z_Z &= R_{1D} + \frac{R_{2D} \cdot Z}{R_{2D} + Z} = \\ &= 2,40\Omega + \frac{20,00\Omega \cdot 8,00\Omega}{20,00\Omega + 8,00\Omega} = 8,11\Omega \end{aligned}$$

Sumaryczny prąd elektryczny  $I$  wpływający do układu zastępczego wyznaczamy korzystając z prawa Ohma:

$$I = \frac{U_1}{Z_Z} = \frac{17,89V}{8,11\Omega} = 2,21A$$

Spadek napięcia na oporniku  $R_{1D}$  wyznaczamy także korzystając z prawa Ohma:

$$U_{R_{1D}} = I \cdot R_{1D} = 2,21A \cdot 2,40\Omega \approx 5,30V$$

Moc wydzielaną na oporniku  $R_{1D}$  wyznaczamy korzystając z prawa Joule'a-Lenza:

$$P_{R_{1D}} = U_{R_{1D}} \cdot I = 5,30V \cdot 2,21A = 11,71W$$

Musimy zatem zastosować opornik o mocy wynoszącej przynajmniej 15,00 W.

Wiadomo, że napięcie  $U_2$  stanowi różnicę napięcia  $U_1$  oraz  $U_{R_{1D}}$ :

$$U_2 = U_1 - U_{R_{1D}} = 17,89V - 5,30V = 12,59V$$

Natężenie prądu elektrycznego płynącego przez opornik  $R_2$  wyznaczamy korzystając z prawa Ohma:

$$I_{R_{2D}} = \frac{U_2}{R_{2D}} = \frac{12,59V}{20,00\Omega} = 0,63A$$

Moc wydzielaną na oporniku  $R_{2D}$  wyznaczamy korzystając z prawa Joule'a-Lenza:

$$P_{R_{2D}} = U_{R_{2D}} \cdot I_{R_{2D}} = 12,59V \cdot 0,63A = 7,93W$$

Musimy zatem zastosować opornik o mocy wynoszącej przynajmniej 10,00 W.

## Książka o układach elektronicznych do subwooferów aktywnych

Zapraszam do zapoznania się z moją najnowszą książką pt. „Wprowadzenie do projektowania układów elektronicznych subwooferów aktywnych. Poradnik praktyczny”: <https://youtu.be/KIo1eqxj4AE>, <https://youtu.be/gpQe89R5HEK> ■

mgr inż. Tomasz Łysek



Rysunek 4. Okładka książki pt. „Wprowadzenie do projektowania układów elektronicznych subwooferów aktywnych. Poradnik praktyczny”