

# Tranzystory dla początkujących

## część 16

### Realizacje praktyczne

Po zapoznaniu się z właściwościami wzmacniacza ze wspólnym emiterem masz wszystkie informacje potrzebne do samodzielnego zaprojektowania takiego wzmacniacza.

Dzisiaj wspólnie wykonamy dwa przykłady. Co trzeba wiedzieć na wstępie i jakie przyjąć założenia.

## Projektowanie wzmacniacza OE

W podręcznikach spotkasz różne schematy i różne sposoby obliczeń. Nie ma jednego, najlepszego schematu i sposobu. Możesz na przykład wykorzystać "przejrzysty" układ z rysunku 10 (EdW 4/99). Nie znaczy, że powinien się on stać podstawą konstruowanych przez Ciebie wzmacniaczy. Czasem wykorzystasz któryś układ z rysunku 9. Ale w praktyce i tak najczęściej będziesz wykorzystywał wzmacniacze operacyjne (zajmiemy się tym już niedługo). Tranzystory będziesz stosował raczej tylko w układzie wtórnika (ze wspólnym kolektorem) oraz w układach przełączających. Ale nie wypada, byś nie potrafił w razie potrzeby zaprojektować wzmacniacza tranzystorowego. Spróbujmy więc zaprojektować wspólnie dwa wzmacniacze w układzie OE.

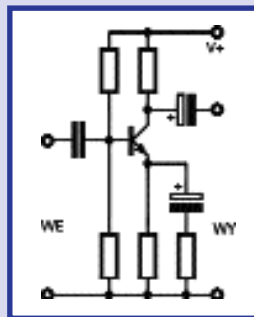
1. Pierwszy - wzmacniacz mikrofonu dynamicznego - powinien mieć wzmocnienie dla przebiegów zmiennych (akustycznych) równe 20, a zniekształcenia powinny być możliwie małe. Napięcie zasilające wynosi 12V.

2. Drugi, przeznaczony do jakiegoś urządzenia sygnalizacyjnego ma wzmacniać przebiegi zmienne (akustyczne) z mikrofonu elektretowego jak najwięcej, a poziom zniekształceń nie ma znaczenia.

W każdym przypadku musisz nie tylko skupić się na wzmacniaczu, ale też uwzględnić "co siedzi" na wyjściu i wejściu.

### Przykład 1

Niech w pierwszym przypadku mikrofon dynamiczny ma rezystancję wewnętrzną  $200\Omega$ , a wyjście projektowanego wzmacniacza będzie obciążone rezystancją następnego stopnia równą  $10k\Omega$ . Zastosujemy układ z rysunku 10. Aby sygnał



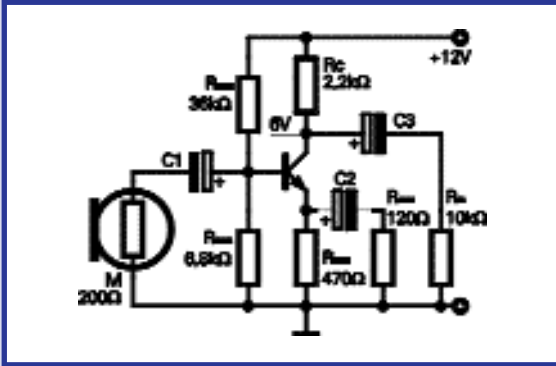
Rys. 10

nie był niepotrzebnie tłumiony, rezystancja wejściowa naszego wzmacniacza powinna być 5...10 razy większa od rezystancji wewnętrznej mikrofonu, a re-

zystancja wyjściowa naszego wzmacniacza 5...10 razy mniejsza od rezystancji obciążenia. Rezystancja wyjściowa wzmacniacza OE jest równa rezystancji rezystora w kolektorze - a więc rezystor  $R_C$  powinien mieć wartość 1...2,2k $\Omega$ . Przyjmijmy wartość 2,2k $\Omega$ , by zmniejszyć prąd pobierany przez nasz wzmacniacz. Jeśli wzmocnienie ma być równe 20, wypadkowa "rezystancja emiterowa" musi wynieść 110 $\Omega$ . Aby zwiększyć stabilność stałoprądowego punktu pracy, niech rezystancja emiterowa dla prądu stałego  $R_{E1}$  wynosi na przykład  $R_C/5$ , czyli około 470 $\Omega$ . Teraz należy jeszcze dobrać rezystory dzielnika w obwodzie bazy.

Przy dobieraniu rezystorów w obwodzie bazy należy wziąć pod uwagę kilka czynników. Dzielnik należy dobrać tak, by napięcie stałe na kolektorze było ustawione "w połowie zakresu roboczego". Ponieważ w tym przypadku wzmacniamy niewielkie sygnały mikrofonowe, bez zastanowienia możemy ustawić napięcie kolektora równe połowie napięcia zasilającego. Dzielnik  $R_{B1}$ ,  $R_{B2}$  w układzie z **rysunku 24** ma dać na bazie takie napięcie stałe, by na kolektorze napięcie stałe wynosiło około 6V. Wynika stąd,

## Pierwsze kroki



Rys. 24

że prąd kolektora wyniesie około  $6V/2,2k\Omega=2,7mA$ , a napięcie na rezystorze  $R_{E1}$   $1,27V$ . Stąd napięcie stałe na bazie (i rezystorze  $R_{B2}$  powinno wynosić mniej więcej  $1,27V+0,6V=1,87V$ , a na  $R_{B1}$  około  $(12-1,87)/10,13V$ . Przy założeniu, że nie zastосуujemy jakiegos archaicznego tranzystora z odzysku, śmiało możemy założyć, że współczynnik wzmacnienia prądowego  $\beta$  nie będzie mniejszy niż 100. Tym samym prąd bazy nie będzie większy niż  $2,7mA/100=27\mu A$ . Prąd dzielnika w obwodzie bazy powinien być kilkakrotnie większy od maksymalnego spodziewanego prądu bazy. Niech będzie 10-krotnie większy:  $10 \cdot 27\mu A=0,27mA$ . Suma rezystancji dzielnika (dla ułatwienia pomijamy prąd bazy) wyniesie więc około  $(12V/0,27mA) 44k\Omega$ . W pierwszym przybliżeniu (znów pomijając prąd bazy) możemy przyjąć, że stosunek rezystancji  $R_{B1}/R_{B2}$  musi być równy stosunkowi napięć na nich występujących czyli, około  $(10,13V/1,87V) 5,42$  do 1. Nietrudno obliczyć, że rezystancja  $R_{B2}$  wyniesie mniej więcej  $44k\Omega/(5,42+1)$  czyli  $6,8k\Omega$ , a  $R_{B1}$   $(5,42 \cdot 6,8k\Omega) 36k\Omega$ . W tych uproszczonych obliczeniach pominąłem prąd bazy (nie większy niż  $27\mu A$ ). Nie zmienia to w istotnym stopniu warunków pracy, ale w praktycznym układzie można zmierzyć rzeczywiste napięcie stałe na kolektorze i ewentualnie skorygować wartość którejkolwiek z rezystorów  $R_{B1}$  lub  $R_{B2}$ .

Aby wzmacnienie napięciowe wyniosło 20, wypadkowa rezystancja emiterowa dla przebiegów zmiennych powinna być równa  $110\Omega$ . Na tę rezystancję złożą się wewnętrzna rezystancja emiterowa  $r_e$ , wynosząca około  $10\Omega$  ( $26mV/2,7mA$ ) i równoległe połączenie  $R_{E1}$  i  $R_{E2}$  ( $100\Omega$ ). Ponieważ  $R_{E1}$  ma wartość  $470\Omega$ ,  $R_{E2}$  musi mieć wartość

$$R_{E2} = R_e \cdot R_{E1} / (R_{E1} - R_e)$$

$$R_{E2} = 100\Omega \cdot 470\Omega / (470\Omega - 100\Omega) = 47000/370 = 127\Omega.$$

W praktyce stosujemy najbliższą wartość z szeregu, czyli  $120\Omega$  lub  $130\Omega$ .

Wypadałoby jeszcze sprawdzić, jaką rezystancję wejściową będzie mieć nasz wzmacniacz. Sam tranzystor (o wzmo-

czeniu co najmniej 100) będzie miał rezystancję wejściową nie mniejszą niż  $100 \cdot 100\Omega$  czyli  $10k\Omega$ . Rezystancja wejściowa całego wzmacniacza dla przebiegów zmiennych będzie równa równoległemu połączeniu tej rezystancji wejściowej tranzystora (min.  $10k\Omega$ ) i rezystancji  $R_{B1}$ ,  $R_{B2}$  ( $6,8k\Omega$ ,  $36k\Omega$ ). Nietrudno obliczyć, że wyniesie ona co najmniej  $(10k\Omega || 6,8k\Omega || 36k\Omega) 3,6k\Omega$ .

To bardzo dobrze, bo rezystancja wejściowa jest ponad 10 razy większa od rezystancji wewnętrznej mikrofonu (mikrofon  $200\Omega$  nie powinien być obciążony rezystancją mniejszą niż  $1k\Omega$ ).

Ostatecznie układ będzie wyglądał jak na rysunku 24.

Do pełni szczęścia brakuje jeszcze wartości pojemności. Dla najniższych częstotliwości roboczych (przyjmujemy  $20Hz$ ) reaktancja pojemnościowa powinna być mniejsza niż współpracująca z nią rezystancja. Dla  $C1$  będzie to rezystancja wejściowa ( $3,6k\Omega$ ), dla  $C2$  - rezystancja  $R_{E2}$  ( $120\Omega$ ), dla  $C3$  -  $R_L$  ( $10k\Omega$ ).

Skorzystamy ze wzoru  $C = 0,16 / (f \cdot R)$

pamiętając, że gdy podajemy częstotliwość w hercach, a rezystancję w omach to, wynik wychodzi w faradach.

Stąd minimalne pojemności  
 $C1 - 2,2\mu F$   
 $C2 - 67\mu F$   
 $C3 - 800\mu F$

Zastosujemy wartości większe, na przykład:

$C1 - 4,7\mu F$   
 $C2 - 100\mu F$   
 $C3 - 4,7\mu F$

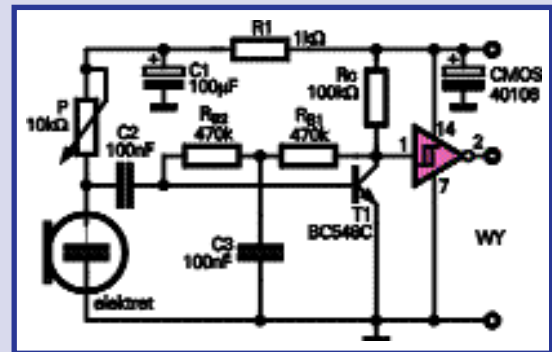
W obliczeniach tych nie zajmowaliśmy się poziomem zniekształceń i szumów. Wiedza, którą już posiadasz zapewne podpowiada, że należałoby zastosować stabilizację lub filtrację napięcia zasilającego. Nie będę tego omawiał, ponieważ to jest już wyższy stopień wtajemniczenia i wymaga wielu dodatkowych informacji. Nie będziemy się w to wgłębiać, ponieważ dziś wzmacniacze o wysokich parametrach budujemy z wykorzystaniem układów scalonych. Podany przykład ma tylko pokazać, jak można w prosty (wystarczający w praktyce) sposób obliczyć elementy wzmacniacza. Pamiętaj, że takie obliczenia nie uwzględniają wszystkich szczegółów i że po zbudowaniu wzmacniacza warto sprawdzić napięcie stałe na kolektorze i wartość wzmo-

czenia i w razie potrzeby skorygować wartość tego czy innego rezystora.

W każdym razie zawsze musisz uwzględnić zarówno rezystancję źródła sygnału - wzmacniacz musi mieć rezystancję wejściową (kilkakrotnie) większą niż rezystancja wewnętrzna źródła oraz rezystancję obciążenia - rezystancja wyjściowa (praktycznie wartość  $R_C$ ) powinna być mniejsza niż zewnętrzna rezystancja obciążenia. W przypadku, gdy zewnętrzna rezystancja obciążenia jest mała, należy dodać na wyjściu wtórnik emiterowy.

### Przykład 2

Drugi wzmacniacz ma wzmacniać przebiegi z dwukońcówkowego mikrofonu elektretowego (który możemy śmiało traktować jako źródło prądowe), a obciążeniem jest wejście bramki CMOS (Schmitta). Tym samym rezystancja obciążenia tym razem jest bardzo duża i wynosi setki megaomów. Zastosujemy zmodyfikowany schemat z rysunku 9b - ostatecznie układ będzie wyglądał jak na rysunku 25.



Rys. 25

Analizę zaczniemy tym razem od wejścia. Mikrofon elektretowy, będący w istocie źródłem prądowym (dzięki obecności wbudowanego weń tranzystora polowego) daje sygnał proporcjonalny do wartości rezystora obciążenia. W roli obciążenia mikrofonu zastosujemy potencjometr o wartości  $10k\Omega$ , by móc regulować czułość układu. Rezystancja wejściowa naszego wzmacniacza powinna być większa od rezystancji potencjometru i powinna wynosić co najmniej kilkadziesiąt kiloohmów. Na razie pomiarzymy rezystancję  $R_{B2}$ . Rezystancja wejściowa samego tranzystora w takim układzie pracy będzie równa wewnętrznej rezystancji pomnożonej przez wzmacnienie prądowe tranzystora. Ponieważ rezystancja wejściowa tranzystora ma być duża, co najmniej  $50k\Omega$ , zastosujemy tranzystor prądowym nie mniejszym niż 200. Przy danych wartościach wewnętrzna rezystancja tranzystora  $r_e$  nie może być mniej-

sza niż  $250\Omega$  ( $50k\Omega/200$ ). Rezystancja re zależy od prądu kolektora ( $r_e=26mV/I_C$ ). Stąd prąd kolektora nie może być większy niż  $0,1mA$  ( $26mV/250\Omega$ ). Może być mniejszy - wtedy rezystancja wejściowa będzie jeszcze większa.

Przy wzmacnieniu prądowym powyżej 200 prąd bazy (płynący z kolektora przez  $R_{B1}$ ,  $R_{B2}$ ) będzie mniejszy niż  $0,5\mu A$ . Oczywiście wartości  $R_{B1}$ ,  $R_{B2}$  powinny być możliwie duże. Jeśli założymy maksymalny spadek napięcia na tych opornikach równy  $0,5V$ , to ich sumaryczna rezystancja powinna wynosić około  $1M\Omega$  ( $0,5V/0,5\mu A$ ). Mogą to więc być dwa rezystory o wartości  $470...510k\Omega$ . Przy tak dużych rezystancjach pojemność  $C3$  nie musi być duża - dla najmniejszych częstotliwości użytecznych (powiedzmy  $50Hz$ ) reaktancja tego kondensatora powinna być kilkakrotnie mniejsza od wartości tych rezystorów (powiedzmy  $X_C=100k\Omega$ ). Stąd minimalna pojemność

$$C_{2min} = 1 / (2 * \pi * f * X_C) = 0,16 / (f * X_C)$$

$$C_{2min} = 0,16 / (50Hz * 0,1M\Omega) = 0,033\mu F = 33nF$$

My zwiększymy tę pojemność do  $100nF$ . Taką też pojemność może mieć kondensator  $C1$ .

Spadek napięcia na rezystorach  $R_{B1}$ ,  $R_{B2}$  jest mniejszy niż  $0,5V$ , stąd napięcie

na kolektorze tranzystora nie będzie większe niż  $1...1,1V$  (napięcie  $U_{BE}$  tranzystora plus spadek napięcia na rezystorach  $R_{B1}$ ,  $R_{B2}$ ). Tym samym napięcie na rezystorze  $R_C$  (rysunek 25) wyniesie około  $8V$ . Prąd kolektora powinien być mniejszy niż  $0,1mA$ , stąd wartość  $R_C$  nie powinna być mniejsza niż  $80k\Omega$  ( $8V/0,1mA$ ). Przyjmujemy "okrągłą" wartość  $100k\Omega$ . Tak duża wartość  $R_C$  tym razem jest dopuszczalna, ponieważ zewnętrznym obciążeniem jest wejście bramki CMOS, mające ogromną (pomijalnie wielką) rezystancję. W rezultacie wzmacnienie wzmacniacza nie powinno być mniejsze niż  $400$  ( $100k\Omega/250\Omega$ ), co z powodzeniem powinno wystarczyć. W praktyce może być zauważalnie mniejsze ze względu na wpływ  $h_{22}$ , ale i tak zapewne wystarczy.

I to w zasadzie koniec obliczeń.

Tym razem konieczne jest zastosowanie obwodu  $R1C1$  filtrującego napięcie zasilające mikrofonu. Bez tego obwodu, ze względu na duże wzmacnienie, układ w pewnych warunkach mógłby się wzbudzać.

Ktoś mógłby jeszcze zaproponować zwiększenie rezystancji  $R_C$  do na przykład  $4,7M\Omega$  ( $R_{B1}$ ,  $R_{B2}$  do  $22M\Omega$ ) by jeszcze zwiększyć rezystancję wejściową. Taka operacja jest jednak ryzykowna z kilku powodów. Po pierwsze przy bardzo ma-

łych prądach tranzystor może mieć zdecydowanie mniejsze wzmacnienia. Po drugie wzmacnienie napięciowe może zostać ograniczone przez nieuwzględnione w obliczeniach właściwości tranzystora reprezentowane przez parametr  $h_{22}$ . Po trzecie należy pamiętać nie tylko o rezystancji, ale też o pojemności obciążenia. Pojemność wejściowa bramki CMOS wynosi  $5...10pF$ . Przy częstotliwości  $10kHz$  będzie to oporność (reaktancja) rzędu

$$X_C = 0,16 / (10kHz * 10pF) = 1,6M\Omega$$

czyli mniejsza niż rezystancja  $R_C$ . Jak z tego widać, nadmierne zwiększanie  $R_C$  spowoduje obcięcie pasma od strony wysokich częstotliwości. Lepszym, choć bardziej kłopotliwym sposobem byłoby zastosowanie obciążenia w postaci źródła prądowego, ale to wymaga użycia dodatkowych elementów.

I to wszystko, co powinieneś wiedzieć o układzie OE. Upewnij się, czy wszystko zrozumiałeś, jeśli nie - albo popytaj znajomych, albo napisz do mnie.

W następnym odcinku zajmiemy się króciutko wzmacniaczem ze wspólną bazą i kilkoma innymi ciekawymi zagadnieniami.

Piotr Górecki