

# Tranzystory dla początkujących

część 15

## Układ ze wspólnym emiterem

Przed miesiącem podałem Ci minimum wiedzy na temat wzmacniacza ze wspólnym emiterem (OE), niezbędne każdemu elektronikowi. Doszliśmy do dwóch ważnych wniosków:

1. Zwiększanie wzmocnienia następuje kosztem zmniejszania rezystancji wejściowej
2. Rezystancja wyjściowa jest równa rezystancji RC umieszczonej w obwodzie kolektora.

Obiecałem, że wspólnie zaprojektujemy dwa wzmacniacze OE i że podam kilka dalszych ciekawych informacji. Jeśli jesteś zupełnym nowicjuszem, znaczna część wiadomości podanych w niniejszym odcinku nie jest Ci niezbędna, dlatego nie przerażaj się, jeśli czegoś nie zrozumiesz. Zawsze możesz do tego wrócić za jakiś czas.

### Tylko dla ciekawskich

Być może w poprzednim odcinku zostałeś zaskoczony wnioskiem, że w układzie OE wzmocnienie napięciowe nie jest wyznaczone wartością wzmocnienia prądowego tranzystora, tylko stosunkiem "oporności kolektorowej" do "oporności emiterowej".

Teraz, nie wyprowadzając zawiłych równań, zastanowimy się nad maksymalną wartością wzmocnienia w układach z rysunków 8 i 9 (z poprzedniego numeru EdW). Wygląda na to, że tranzystor "od urodzenia" ma wbudowaną jakąś wewnętrzną rezystancję emiterową  $r_e$  – porównaj **rysunek 15**. O jakiej wartości?

A właśnie tu leży cała trudność. Ta "wbudowana rezystancja" nie jest stała. Ale uważaj - jeśli chodzi o wzmocnienie prądowe ( $\beta$ ), występuje bardzo duży rozrzut wartości wzmocnienia prądowego między poszczególnymi egzemplarzami. W przypadku "wewnętrznej rezystancji emiterowej"  $r_e$  jest inaczej. Możemy

uznać, że nie ma tu żadnego rozrztu między egzemplarzami - wartość tej rezystancji zależy od dwóch czynników: przede wszystkim od prądu kolektora (tym samym w jakiś sposób od prądu bazy), oraz od temperatury struktury. Nie musisz się w to wgłębiać. Podam tylko końcowy wniosek. Ta "wewnętrzna rezystancja emiterowa"  $r_e$  wynosi w temperaturze pokojowej mniej więcej:

$$r_e = 26\text{mV} / I_C$$

Gdy wyrazisz prąd kolektora w miliamperach, oporność wyjdzie w omach.

A skąd te napięcie 26mV? Związane jest z pewnymi stałymi fizycznymi (ładun-

kiem elektronu, stałą Boltzmana) oraz temperaturą - w książkach oznaczane jest  $U_T$ , gdzie T wskazuje zależność od temperatury (bezwzględnej, wyrażonej w kelwinach). Jeśli chcesz, to w podręcznikach poszukaj szczegółów.

Dla układu z rysunku 15 prąd kolektora wynosi 6mA, więc

$$r_e = 26\text{mV} / 6\text{mA} = 4,33\Omega$$

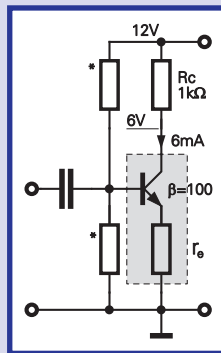
a rezystancja wejściowa tranzystora będzie  $\beta$  razy większa, czyli wyniesie  $100 * 4,33\Omega = 433\Omega$ .

Wzmocnienie napięciowe nie może być większe niż

$$G_{\text{max}} = R_C / r_e$$

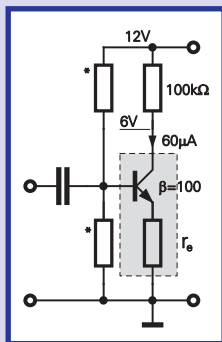
$$G_{\text{max}} = 1000\Omega / 4,33\Omega = 231$$

Przyjrzyjmy się temu bliżej. W poprzednim odcinku dowiedziałeś się, że dobrze jest stosować zewnętrzną oporność obciążenia  $R_L$  (nie pokazaną na rysunku 15) większą od rezystancji  $R_C$  - porównaj rysunki 11 i 13 w poprzednim odcinku. No dobrze, a gdy oporność obciążenia, na przykład oporność wejściowa następnego



Rys. 15

stopnia będzie duża, nawet bardzo duża (np. dzięki zastosowaniu wtórnika emiterowego czy tranzystora polowego), to czy można zwiększać  $R_C$  i tym samym wzmacnienie napięciowe wzmacniacza OE bez ograniczeń? Zwiększając  $R_C$  przy okazji korzystnie zmniejszamy pobór prądu i straty mocy. Nie masz chyba wątpliwości, że w praktyce chcielibyśmy mieć



Rys. 16

wzmacniacz o dużym wzmacnieniu i dużej rezystancji wejściowej. Zwiększamy więc, uzyskując układ z **rysunku 16**. Stop! Zwiększanie rezystancji  $R_C$  nie zwiększy maksymalnego wzmacnienia napięciowego. Zastanów się nad tym – jeśli zwiększasz  $R_C$ , to musisz zmniejszyć stały prąd kolektora  $I_C$ , by tranzystor się nie nasycił. Jeśli zmniejszasz prąd  $I_C$ , wzrośnie rezystancja  $r_e$  ( $r_e = 26mV/60\mu A = 433\Omega$ ). Wygląda na to, że stosunek  $R_C/r_e$  pozostaje stały (w pierwszym przybliżeniu).

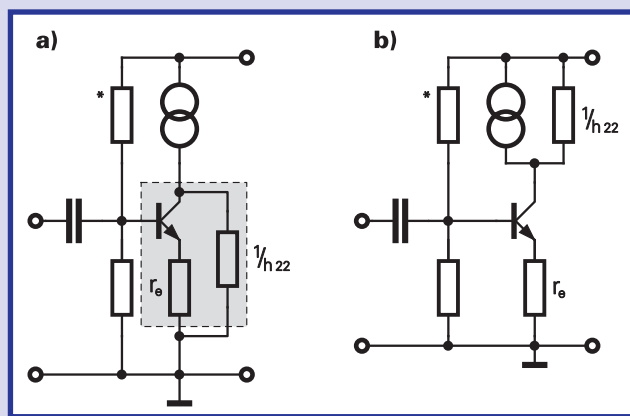
A więc nie tędy droga do większego wzmacnienia.

A może wykorzystać źródło prądowe (mające z definicji nieskończenie wielką rezystancję dynamiczną) umieszczając je w miejsce  $R_C$ ? Zobacz **rysunek 17a**. Tym razem pomysł jest świetny! Wprawdzie rzeczywiste źródło prądowe ma jakąś rezystancję dynamiczną  $r_d$ , ale ta rezystancja dynamiczna dla przebiegów zmiennych będzie wynosić wiele kiloomów lub nawet megaomów. Jednocześnie zachowasz małą wartość  $r_e$ , bo stały prąd tego źródła może być znaczny.

W ten chytry sposób możemy znacznie zwiększyć wzmacnienie - pojedynczy stopień może mieć wzmacnienie napięciowe wynoszące nawet kilka tysięcy. Rysunek 17c pokazuje przykład realizacji.

Sposób ze źródłem prądowym ma jednak specyficzną cechę, która często jest wadą: zwykle chcielibyśmy zachować napięcie spoczynkowe na kolektorze naszego tranzystora zbliżone do połowy napięcia zasilającego. Tymczasem źródło prądowe daje prąd stały o ściśle określonej wartości, więc nawet niewielkie zmiany stałego prądu kolektora spowodują albo nasycenie albo odcięcie naszego tranzystora (to jest oczywiście cecha wszystkich wzmacniaczy o wielkim wzmacnieniu). Dlatego w praktyce obciążenie kolektorowe w postaci źródła prądowego nie jest stosowane w prostych wzmacniaczach jednotranzystorowych (takich jak na rysunku 17c). Stosowane jest tylko w wielotranzystorowych wzmacniaczach z zamkniętą pętlą stałoprądowego sprzężenia zwrotnego. Nie wiesz o co chodzi z tą "zamkniętą pętlą"? Nie przejmuj się, na razie wystarczy ci wiadomość, że taki sposób jest powszechnie wykorzystywany w scalonych wzmacniaczach operacyjnych, a niezmiernie rzadko w układach budowanych z pojedynczych tranzystorów. W każdym razie pomysł ze źródłem prądowym jest godny uwagi. Idźmy dalej.

Jak myślisz, czy mając porządne źródło prądowe o bardzo dużej rezystancji dynamicznej, możemy uzyskać dowolnie duże wzmacnienie napięciowe wzmacniacza? Niestety nie! Kolejny raz dają o sobie znać właściwości tranzystora reprezentowane przez parametr  $h_{22}$ . Tak samo jak rzeczywiste źródło prądowe z rysunku 17a, tak samo obwód kolektorowy nie jest idealnym źródłem prądowym – jego rezystancja dynamiczna jest reprezentowana przez omawiany wcześniej parametr  $h_{22}$ . Ilu-



Rys. 18

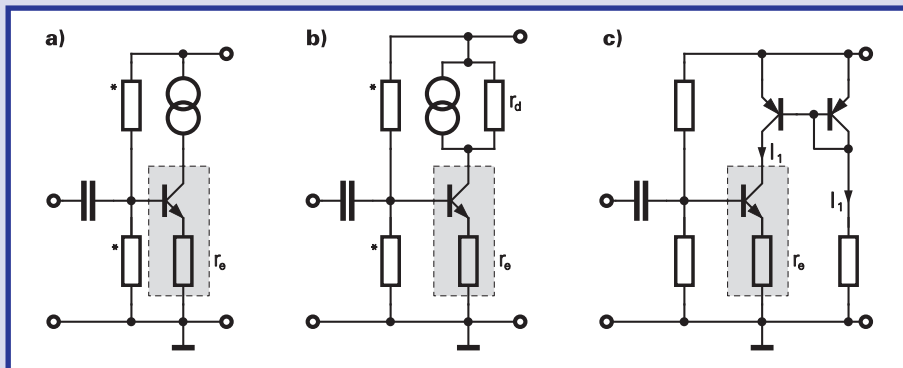
struje to **rysunek 18a**. Lepiej to widać na rysunku 18b - możemy tak narysować, bo dla przebiegów zmiennych masa i plus zasilania to przecież to samo.

Znów niedoskonałość tranzystora, reprezentowana przez  $h_{22}$  ogranicza maksymalne wzmacnienie, które we współczesnych tranzystorach nawet przy zastosowaniu idealnego źródła prądowego i nieskończenie wielkiej rezystancji obciążenia  $R_L$  i tak nie przekroczy kilku tysięcy. W ogromnej większości przypadków stosujemy w kolektorze nie źródła prądowe, tylko zwykłe rezystory o wartości nie większej niż kilka kiloomów. Taka rezystancja kolektorowa jest znacznie mniejsza niż wartość "równoległej oporności wewnętrznej" z rysunku 18, reprezentowanej przez  $h_{22}$ , więc wpływ  $h_{22}$  pomijamy. I wtedy bez znaczącego błędnie możemy powiedzieć, że rezystancja wyjściowa wzmacniacza OE jest równa wartości rezystora obciążenia  $R_C$ .

Jeśli za mną nadążasz, to właśnie znalazłeś odpowiedź na pytanie: jaka może być największa teoretyczna wartość wzmacnienia napięciowego tranzystora. Przy założeniu, że obciążeniem kolektorowym jest źródło prądowe o (pomijalnie) wielkiej oporności dynamicznej, wzmacnienie maksymalne określone jest przez stosunek rezystancji dynamicznej obwodu kolektora ( $1/h_{22}$ ) i rezystancji emiterowej  $r_e$  - zobacz rysunek 18b.

Czy naprawdę do ciebie dociera, co wynika z tych rozważań? A czy potrafiłbyś komuś wytłumaczyć, na ile maksymalne wzmacnienie napięciowe wzmacniacza tranzystorowego wyznaczone jest wartością wzmacnienia prądowego  $\beta$ ?

Prawdopodobnie jesteś mocno zaskoczony! Okazało się, że wzmacnienie prądowe  $\beta$  i wzmacnienie napięciowe niewiele mają ze sobą wspólnego! Wygląda na to, że maksymalne wzmacnienie napięciowe wzmacniacza OE może być znacznie większe niż wzmacnienie prądowe  $\beta$ . Natomiast wartość wzmacnienia prądowego  $\beta$  będzie mieć wpływ



Rys. 17

## Pierwsze kroki

przede wszystkim na oporność wejściową. Czyż nie mówiłem, że ten tranzystor to kapryśny i tajemniczy twór?

Hmm... Czy to jednak oznacza, że tranzystor o wzmacnieniu prądowym równym 10 (stare tranzystory germanowe miały jeszcze mniejsze wzmacnienie) mógłby dać wzmacnienie napięciowe równe na przykład 1000?

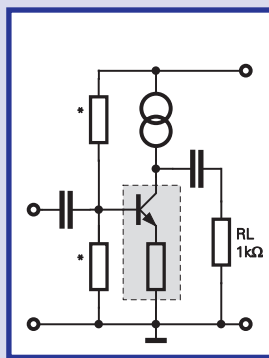
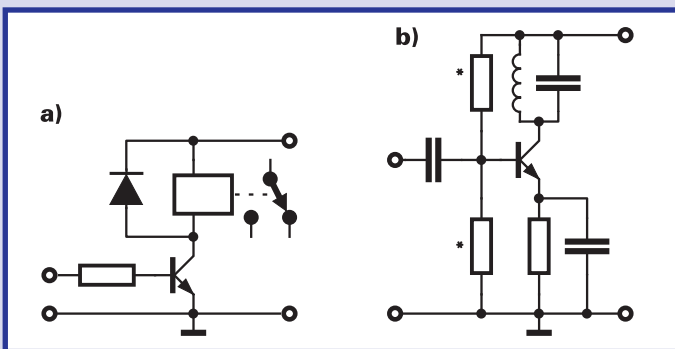
Co o tym sądzisz?

Teoretycznie tak, pod warunkiem, że rezystancja obciążenia (kolektorowa) będzie bardzo duża (zastosujemy źródło prądowe w roli obciążenia), a parametr  $h_{22}$  użytego tranzystora będzie miał przyzwoitą wartość. Małe wzmacnienie prądowe  $\beta$  spowodowałoby jednak, że oporność  $r_e$ , a tym samym rezystancja wejściowa byłyby koszmarnie mała (rzędu pojedynczych omów) co oznaczałoby nie tylko znaczny prąd bazy, ale i wielkie zniekształcenia nieliniowe. Tak to wygląda w teorii - wcześniej należałoby jednak zapytać, czy obwód kolektora tranzystora o małym wzmacnieniu prądowym będzie się zachowywał jak dobre źródło prądowe. Czy jego rezystancja dynamiczna (reprezentowana przez parametr  $h_{22}$ ) będzie odpowiednio duża? Jeśli się okaże, że kiepski tranzystor o małej wartości  $\beta$  ma jednocześnie niekorzystną wartość parametru  $h_{22}$ , to właśnie wartość parametru  $h_{22}$  nie pozwoli uzyskać tak dużego wzmacnienia.

Nie musisz się w to wgłębiać, zresztą w podanych rozważaniach troszkę uproszciliśmy sobie życie i pominęliśmy pewne subtelności. Jak by nie było, ze wszystkich rozważań i tak wynika beznadziejnie prosty wniosek, powtarzający się w kolejnych odcinkach jak refren: korzystnie jest stosować tranzystory o jak największym wzmacnieniu prądowym.

A teraz pytanie testowe dla sprawdzenia, czy wszystko dobrze rozumiesz: co się stanie z wartością wzmacnienia napięciowego po dołączeniu do naszego rewersyjnego wzmacniacza z rysunku 17 zewnętrznej rezystancji obciążenia  $R_L$ . Sytuację pokazuje **rysunek 19**. Jak myślisz?

Rys. 20



Rys. 19

naвіть kilkuset kiloomów. Pamiętaj jednak, że rezystancja wyjściowa wzmacniacza OE jest wyznaczona przez oporności w kolektorze, które z konieczności są bardzo duże. Tak jest - dołączenie małej rezystancji obciążenia radykalnie zmniejszy wzmacnienie napięciowe, z którego się tak cieszyliśmy.

Możesz na to popatrzeć z dwóch stron, a wniosek i tak będzie ten sam.

1. Jeśli rezystancja wyjściowa jest bardzo duża, to dołączenie niewielkiej rezystancji obciążenia znacznie zredukuje sygnał wyjściowy - patrz rysunek 13 oraz rysunek 12b w poprzednim odcinku.

2. Dodanie zewnętrznej rezystancji obciążenia spowoduje zmniejszenie całkowitej rezystancji kolektorowej i wzmacnienia wyznaczonego przez stosunek wypadkowej rezystancji kolektorowej do emiterowej - porównaj rysunek 12a i rysunek 11.

Sam widzisz - nic za darmo! Zapamiętaj więc raz na zawsze, że zewnętrzna oporność obciążenia  $R_L$  powinna być większa, najlepiej wielokrotnie większa od rezystancji  $R_C$ . Tylko wtedy dołączenie  $R_L$  nie zmniejszy wzmacnienia w znaczącym stopniu.

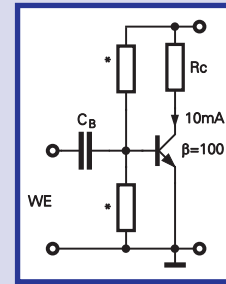
### Dalsze zależności

Jak myślisz, czy napięcie na kolektorze może być wyższe od napięcia zasilającego?

Dziwne pytanie?  
Tylko na pozór.  
Na **rysunku 20** znajdziesz układy, w których chwilowe

Dopiero co, stosując źródło prądowe uzyskaliśmy duże wzmacnienie, radykalnie zwiększając rezystancję dynamiczną w kolektorze do kilkudziesięciu czy

napięci na kolektorze będzie większe od napięcia zasilającego. Tu nie ma żadnych tajemnic - układ z przekaźnikiem już "ćwiczyliśmy", a układu z obwodem rezonansowym w kolektorze nie będziemy szczegółowo analizować. Powinieneś po prostu wiedzieć, że coś takiego się zdarza i że w niektórych układach (stopnie wzmacniaczy w.c.z.) trzeba stosować tranzystory, mające dopuszczalne napięcie  $U_{CE}$  co najmniej dwukrotnie większe niż napięcie zasilające, a w innych (niektóre przetwornice impulsowe) - jeszcze wyższe.



Rys. 21

Jeśli już weszliśmy w temat tak daleko, zastanów się jeszcze nad sprawą pojemności kondensatora wejściowego. **Rysunek 21** pokazuje problem. Jeśli rezystancja wejściowa tranzystora w układzie OE jest mała, to aby układ przesyłał także małe częstotliwości, pojemność kondensatora wejściowego musi być odpowiednio duża. Przykładowo jeśli dla układu z rysunku 21 rezystancja wejściowa jest niewielka i wynosi około  $250\Omega$ , aby wzmacniacz przesyłał częstotliwości już od 20Hz, pojemność  $C_B$  nie może być mniejsza niż

$$32\mu F$$

Oczywiście skorzystałem ze znanego wzoru

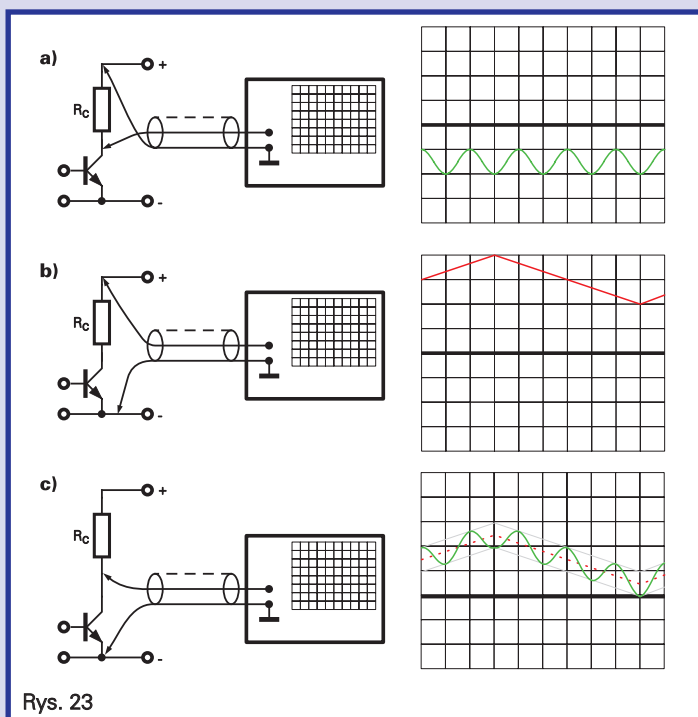
$$C = 1 / (2 \pi f R)$$

który zwykle stosujemy w postaci:

$$C = 0,16 / (f R)$$

Projektując jakiegokolwiek wzmacniacz tranzystorowy zawsze musisz pamiętać o problemie pojemności kondensatorów sprzęgających.

I kolejna sprawa ważna w praktyce. Który układ z **rysunku 22** uznałbyś za lepszy?



Rys. 23

Nie widzisz istotnych różnic?

Rzeczywiście, przy takich samych wartościach elementów  $R$ ,  $C$  i takim samym wzmacnieniu prądowym tranzystorów, podstawowe parametry (wzmacnienie, oporności wejściowa i wyjściowa) będą jednakowe. Więc?

Zdecydowanie różna jest jednak odporność na tętnienia i wszelkie inne "śmiec" przenoszące się z obwodu zasilania. Uważaj - to są zagadnienia naprawdę bardzo ważne w praktyce i powinieneś je dobrze rozumieć. Napięcie zasilające nie jest nigdy idealnie stabilizowane. Nawet w przypadku zastosowania dobrego stabilizatora, w obwodzie zasilania wystąpią szumy (własne tego stabilizatora) oraz spadki napięć na rezystancjach ścieżek i przewodów (w takt sygnałów zmiennych). W rezultacie w rzeczywistym obwodzie zasilania na napięcie stałe zawsze nałożony jest jakiś niewielki przebieg zmienny (szumy i inne śmieci). Taki przebieg niewątpliwie możemy traktować jako jakiś sygnał zmienny. Czy przedostanie się on z obwodu zasilania na wyjście?

Pamiętaj, że obwód kolektora to źródło prądowe. Prąd kolektora praktycznie nie zależy od napięcia na kolektorze. A co z napięciem na kolektorze? Jeszcze nie widzisz problemu?

Pomoże ci **rysunek 23**. W sumie wszystko zależy od punktu odniesienia. Przebieg zmienny na rezystorze  $R_C$  (mierzony w stosunku do dodatniego bieguna zasilania) jest "czysty" - jest to przebieg wyznaczony jedynie przez prąd  $I_C$  oraz rezystancję  $R_C$ . Jeśli dołączyłbyś oscyloskop między plus zasilania a wyjście, zobaczyłbyś przebieg jak na rysunku 23a. Nic nowego

pokazałby przebieg jak na rysunku 23b (dla pokazania zasady narysowałem przebieg trójkątny, w rzeczywistości będzie to mieszanka różnych częstotliwości). Wreszcie rysunek 23c pokazuje przebieg wyjściowy występujący między masą a kolektorem. Składowa zmienna napięcia zasilania dodaje się po prostu do sygnału użytecznego i w całości przechodzi na wyjście. Czy to jest jasne? Przeanalizuj to dokładnie - jeśli masz wątpliwości, przeanalizuj jeszcze raz rysunki 4 i 5 w poprzednim odcinku.

Teraz już wiesz - układ z rysunku 22a jest zdecydowanie lepszy od układu z rysunku 22b. W tym drugim wszelkie śmieci z obwodu zasilania przenoszą się na bazę drugiego tranzystora i co gorsza, są w tym drugim stopniu wzmacniane. Potem na kolektor drugiego stopnia czyli na wyjście, przechodzą jeszcze raz te śmieci z zasilania. W układzie z rysunku 22a tego nie ma, bo obwód wejściowy drugiego tranzystora "widzi" tylko czysty sygnał z rezystora  $R_C$ , a sygnałem wyjściowym jest czysty sygnał z drugiego rezystora kolektorowego.

Właśnie nieuwzględnienie tego zjawiska jest najczęstszą przyczyną kłopotów ze zbudowaniem niskoszumnego wzmacniacza tranzystorowego. Może ty sam, lub kolezdy, natknęliście się już osobiście na ten problem. Jeden z moich przyjaciół opowiadał, że kiedyś zbudował "niskoszumny" przedwzmacniacz z zastosowaniem naprawdę porządnymi tranzystorów. Uzyskane parametry szumowe były beznadziejnie, gorsze niż najprostszego układu z archaiczną kostką 741. Przyczyną były właśnie szumy przedostające się z zasilania.

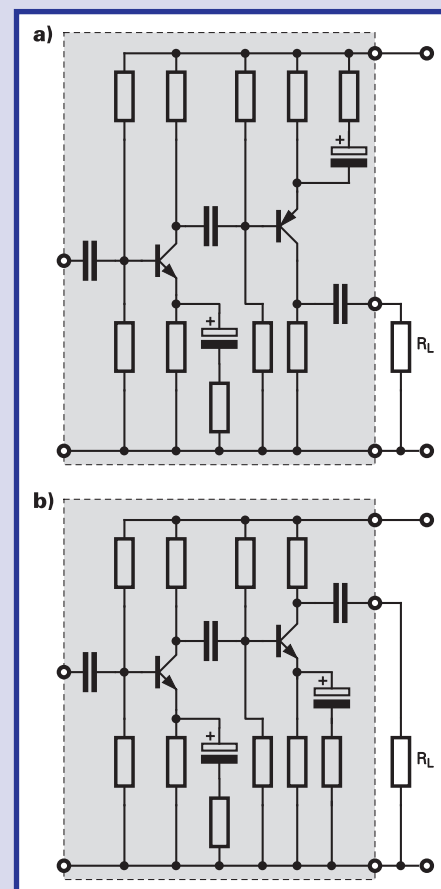
- przecież napięcie na rezystorze obciążenia jest wyznaczone tylko przez prąd kolektora ( $I_C \cdot R_C$ ), a nie przez napięcie zasilające. Zwróć uwagę, że masę oscyloskopu podłączyłem do plusa zasilania, przez co oscyloskop pokazuje napięcie "ujemne" - ale to drobiazg, w tej chwili nie ważny.

Ale napięcie zasilające nie jest "czyste" - zawiera składową zmienną. Oscyloskop dołączony między masę a plus zasilania

pokazuje, że skrótowe informacje o tranzystorach podawane w podręcznikach szkolnych to jeszcze nie wszystko. Aby zostać prawdziwym konstruktorem trzeba zdobyć sporą ilość rzetelnej wiedzy i doświadczenia. Podany przykład nie wyczerpuje oczywiście problemu wzmacniaczy niskoszumnym. Dlatego nie zachęcam, by początkujący zabierali się za takie tematy, tylko na pozór łatwe. Na marginesie wspomnę, że analiza projektów nadsyłanych do Redakcji oraz części prac nadsyłanych Szkole Konstruktorów i innych pokazuje, że pewna część naszych Czytelników ma zdecydowanie zbyt wysokie mniemanie o własnych możliwościach. Nie rozumiejąc problemów takich jak pokazany przed chwilą, bazując tylko na podstawowych informacjach z podręczników szkolnych, popełniają elementarne błędy. W rezultacie układ wprowadzi jako tako działa, ale nie nadaje się do publikacji, stanowiąc wręcz przykład, jak nie należy robić. Właśnie z tego powodu część prac nadsyłanych do Forum Czytelników czy działu E-2000 nie może być opublikowana.

Tyle dygresji, a teraz dwa słowa na temat projektowania wzmacniaczy OE.

Piotr Górecki



Rys. 22