



W dzisiejszym odcinku jeszcze raz przypomnę pojęcie czarnej skrzynki, zajmiemy się bowiem parametrami macierzowymi h , budzącymi grozę wielu początkujących. Ten odcinek pozwoli zrozumieć sens parametrów h i ich praktyczną przydatność. Wspólnie wysnujemy też ważne wnioski dotyczące obliczeń teoretycznych.

Ostatnio tłumaczyłem ci, że tranzystor, choć ma tylko trzy nóżki, jest tworem bardzo kapryśnym i wcale nie jest łatwo precyzyjnie opisać jego właściwości. Na twoje i moje szczęście, w praktyce zazwyczaj nie ma potrzeby wnikać we wszystkie szczegóły. Chyba się ze mną zgodzisz, że gdybyśmy musieli od początku analizować wspomniany w poprzednim odcinku model Ebersa-Molla lub jakiś inny, jeszcze bardziej skomplikowany, to na pewno odeszłaby nam ochota na zajmowanie się elektroniką.

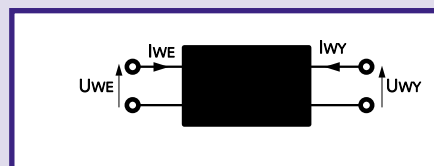
Dlatego jeśli to konieczne, zamiast jakichś koszmarnych obliczeń z wykorzystaniem wyższej matematyki (które zresztą przeprowadza każdy program komputerowej symulacji), przyjmujemy modele prostsze, czasem nawet bardzo uproszczone. Takie uproszczone modele pozwalają przeprowadzić obliczenia ze stosunkowo niewielkim błędem. Chyba nie muszę cię przekonywać, że można narysować wiele różnych modeli, które w lepszym lub gorszym stopniu będą przedstawiać działanie tranzystora. Jednym z takich modeli jest model czwórnokowy. Zajmiemy się nim, i to nie tylko ze względu na program szkolny, ale przede wszystkim po to, żebyś się nie bał parametrów podawanych w katalogach i rozumiał ich sens.

Zaczynamy.

Czarna skrzynka

W mądrych książkach często używa się pojęcia czarnej skrzynki. "Czarna skrzynka" to jakiś układ spełniający określone funkcje. W środku "czarnej skrzynki" może być zamknięty na przykład chrabąszcz, układ elektroniczny albo grupa sprytnych krasnoludków. A może coś jeszcze innego... Czarna skrzynka na pewno ma wejście i wyjście. Podajemy coś na wejście, a coś pojawia się na wyjściu. Oczywiście w naszym "elektronicznym" przypadku to coś, to sygnały elektryczne podawane na wejście oraz uzyskiwane na wyjściu. Mamy więc napięcie wejściowe – oznaczamy je U_{we} , napięcie wyjściowe – U_{wy} , oraz ewentualnie prądy: wejściowy I_{we} i wyjściowy I_{wy} . Ilustrację znajdziesz na rysunku 1.

Niech we wnętrzu czarnej skrzynki cichutko siedzi tranzystor, ale nie "goły", tylko z obwodami polaryzującymi – czyli właściwie wzmacniacz tranzystorowy. Może to wyglądać jak na rysunku 2a, 2b lub 2c. W poprzednim odcinku tłumaczyłem sprawę



Rys. 1 Czarna skrzynka

różnych modeli tranzystora. Teraz podejmiemy do sprawy jeszcze inaczej. Nie będziemy wnikać w szczegóły budowy i właściwości tranzystora, tylko potraktujemy go jako czarną skrzynkę, która pełni funkcję wzmacniacza i (uwaga!) będą nas interesować jedynie napięcia i prądy wejściowe oraz wyjściowe oraz zależności nimi rządzące.

Oto prościutki przykład. Mamy czarną skrzynkę, dla której opis działania jest beznadziejnie prosty:

$$U_{wy} = 10 \times U_{we}$$

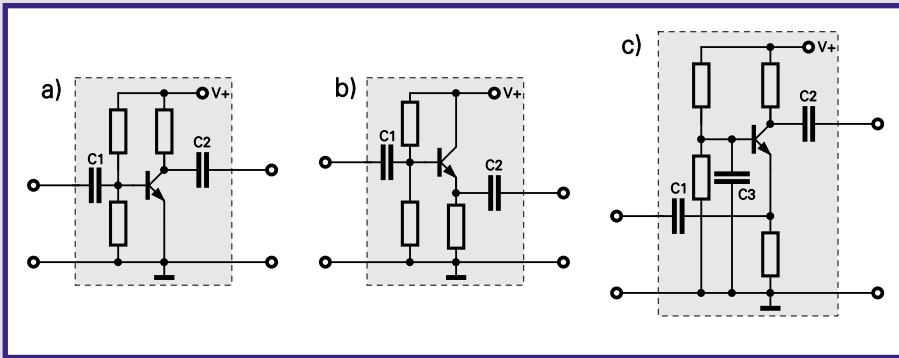
Przecież to nic innego, jak wzmacniacz (napięciowy) o wzmacnieniu równym 10. Proste jak... obręcz!

Właśnie! Wiesz już, że jeśli w czarnej skrzynce cicho siedzi wzmacniacz tranzystorowy, to musimy liczyć się z nieliniowością charakterystyki i jeśli zniekształcenia sygnału mają być małe, to przetwarzane sygnały też muszą być małe – chodzi o to, by pracować na niewielkim odcinku charakterystyki, który w przybliżeniu można uznać za prostoliniowy (porównaj rysunki 6 i 7 w EdW 11/98). Tylko w przypadku małych sygnałów możemy uważać, że (w danym punkcie pracy) tranzystorowy wzmacniacz pracuje liniowo.

Ścisłej biorąc, powinniśmy zapisać:

$$u_{wy} = 10 \times u_{we}$$

Pierwsze kroki



Rys. 2 Przykładowe czarne skrzynki

gdzie małe literki u oraz i wskazują, iż chodzi o sygnały zmienne (domyślnie – o małej amplitudzie).

Dociekliwi czytelnicy zauważą ponadto, że tak podany wzór nie charakteryzuje wszystkich kluczowych parametrów czarnej skrzynki, a w rzeczywistości – wzmacniacza tranzystorowego. Nie wiadomo na przykład, co tam "siedzi na wejściu", czyli jaka tam występuje oporność, a tym samym jakie prądy płyną na wejściu i na wyjściu. Wiemy, że układ wzmacnia napięcie, ale co z prądami?

Trzeba więc dodać dalsze istotne informacje. Po pierwsze podać, jakiej konfiguracji układowej (rys. 2a, 2b czy 2c) oraz jakiego punktu pracy dotyczą parametry - zwykle wystarczy podać wartość (stałego) prądu pracy kolektora, ewentualnie napięcie stałe kolektor - emiter. Napięcia i prądy zmienne będą występować niejako na tle tego prądu i napięcia stałego. Po drugie trzeba jakoś wyrazić występujące oporności.

Czy nasz układ ma oporność wejściową (dla przebiegów zmiennych) nieskończenie wielką? Wtedy prąd wejściowy byłby równy zeru. Ale przecież oporność wejściowa nie musi być, i wcale nie jest, aż tak duża. Już teraz zapamiętaj, że generalnie oporność wejściowa tranzystora bipolarnego jest raczej mała. I to jest poważna wada, z

którą można i trzeba walczyć. Jak? To już inna historia.

A wyjście? Na rysunkach 1 i 2 zaciski wyjściowe nie są podłączone. W rzeczywistości do wyjścia dołączona jest zawsze jakaś oporność obciążenia (np. opór wejściowy następnego stopnia).

Patrząc na rysunek 3 zapomnij na jakiś czas o układach z rysunku 2, o obwodach polaryzacji i o prądach stałych (problem zasilania też pomijamy – możesz sobie wyobrazić, że bateria zasilająca znajduje się wewnątrz czarnej skrzynki). Teraz interesuje nas tylko, jak nasza czarna skrzynka zachowuje się przy podaniu na wejście małych napięć zmiennych. Jaki najprostszy model pokazywałby zachowanie naszego wzmacniacza tranzystorowego?

Czy na przykład czarna skrzynka, a właściwie układ tranzystorowy, ma nieograniczoną wydajność prądową? Raczej nie. Jeśli wyjście ma ograniczoną wydajność prądową, to zapewne można to potraktować jako istnienie wewnętrznej rezystancji wyjściowej. Możemy więc przedstawić naszą skrzynkę w postaci czwornika jak na rysunku 3a lub pamiętając, że obwód kolektorowy zachowuje się jak źródło prądowe raczej jak na rysunku 3b (oporność dołączona równoległe do źródła prądowego). Zauważ, że na rysunku 3a oznaczyłem występujące oporności nie literką R czy r (rezy-

stancja), tylko małą literką z, co pokazuje, że chodzi o oporność zespoloną – impedancję (dla przebiegów zmiennych). Nie jest jakaś przeszkoda w rozważaniach – pomatu zbliżamy się w ten sposób do zapisu, jaki znasz z książki.

A może, jeśli taki spo-

sób opisu czarnej skrzynki miałby być w miarę precyzyjny, trzeba jeszcze uwzględnić dodatkowe czynniki, na przykład coś takiego jak wpływ napięcia wyjściowego na właściwości wejścia (wewnętrzne sprzężenie zwrotne)?

W tranzystorze rzeczywiście występuje takie wewnętrzne sprzężenie zwrotne. Na rysunku 3c reprezentowane jest przez dodatkowe źródło napięcia umieszczone w obwodzie wejściowym. I oto mamy model czwornikowy tranzystora w pełnej krasie.

Zachowanie takiego czwornika można i trzeba jakoś opisać równaniami. I na pewno nie wystarczy jedynie podać wartość wzmocnienia. Wzory powinny uwzględniać pokazane oporności i sprzężenie zwrotne.

Jeśli przyjmiemy, że właściwości naszego tranzystora przedstawia model czwornikowy z rysunku 3c, to moglibyśmy napisać równania go opisujące. Mają one postać:

$$u_1 = z_{11}i_1 + z_{12}i_2$$

$$u_2 = z_{21}i_1 + z_{22}i_2$$

To są tak zwane równania impedancyjne. Nie musisz dobrze rozumieć ich sensu, zwróć tylko uwagę, że wszystko tu zgadza się z intuicją. Mianowicie z_{11} to niewątpliwie oporność (ściślej impedancja) wejściowa, z_{22} to oczywiście oporność (impedancja) wyjściowa. Parametr z_{21} niewątpliwie reprezentuje wzmocnienie, natomiast z_{12} reprezentuje wspomniane wewnętrzne sprzężenie zwrotne. Przemysł to dobrze! Wprowadzone właśnie parametry z świetnie zgadzają się z intuicją!

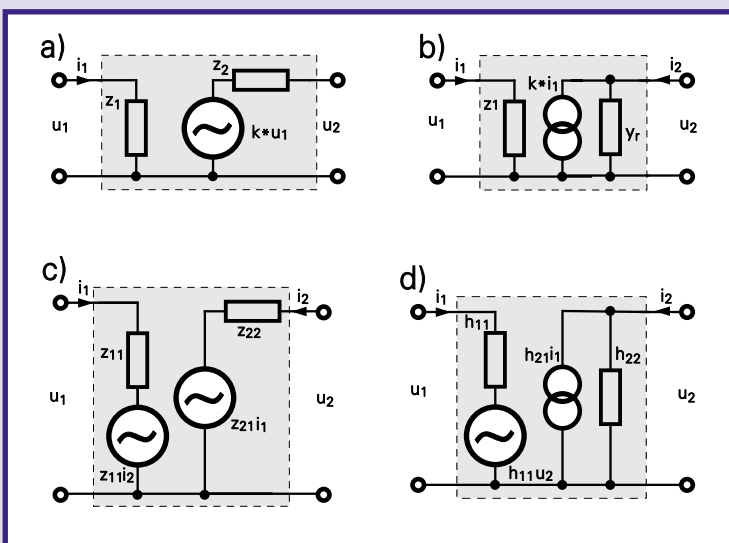
Nieco gorzej jest ze spotykanymi częściej tak zwanymi parametrami hybrydowymi tranzystora oznaczonymi h_{21} , h_{21e} , h_{21E} , h_{11b} , h_{12e} , h_{22} . Nie bój się ich! Nadmienię tylko, że literka h pochodzi od słowa hybryd (mieszany). Za chwilę się okaże, że owe h_{11} , h_{12} , h_{21} i h_{22} niosą dokładnie taką samą treść jak oswojone właśnie parametry z. Parametry h powiązemy z siecią (modelem) pokazaną na rysunku 3d. A oto stosowne równania:

$$u_1 = h_{11}i_1 + h_{12}u_2$$

$$i_2 = h_{21}i_1 + h_{22}u_2$$

Może wyda ci się to dziwne, nieprzyjemne i zbyt skomplikowane. Jeśli uważasz, że to są skomplikowane zależności, to się grubo mylisz. Potrzebne wzory akurat nie są specjalnie skomplikowane i wcale nie trzeba znać rachunku macierzowego, by z nich skorzystać.

Porównaj te dwa równania z poprzednimi. Czy już widzisz, że h_{11} to właściwie z_{11} czyli impedancja wejściowa? Świetnie! Parametr h_{21} , podobnie jak z_{21} , reprezentuje wzmocnienie – tym razem prądowe. Podobnie jak z_{22} , również h_{22} ma ścisły związek z opornością wyjściową, czy też wydajnością prądową. Zauważ, że prąd wyjściowy i_2 to prąd wejściowy i_1 pomnożony przez współczynnik wzmocnienia prądowego h_{21} , ale zmieniony o wartość $h_{22}u_2$ (pod-



Rys. 3 Wzmacniacze z rysunku 2 w postaci czworników

powiem, że prąd ten jest pomniejszony, bo h_{22} może mieć i ma wartość ujemną).

Analogicznie jak z_{12} , także h_{12} reprezentuje wpływ napięcia wyjściowego na wejście. Nic więc dziwnego, że parametry te mają następujące nazwy:

h_{11} – rezystancja (ściślej impedancja) wejściowa przy zwarceniu wyjścia,

h_{12} – współczynnik sprzężenia zwrotnego przy rozwartym wejściu,

h_{21} – współczynnik wzmocnienia prądowego przy zwartym wyjściu,

h_{22} – konduktancja (odwrotność rezystancji, a ściślej admittancja) wyjściowa przy rozwartym wejściu.

W zagranicznych katalogach spotyka się odmienne oznaczenia parametrów h .

h_{11} – hie input impedance (i – input – wejście),

h_{12} – hre reverse voltage ratio (r – reverse – wsteczny),

h_{21} – hfe small signal current gain (f – forward – w przód),

h_{22} – hoe output admittance (o – output – wyjście).

Czy jednak nie jest to dla ciebie strasznie obce i niezrozumiałe sformułowanie “przy zwartym wyjściu, rozwartym wejściu”? Jak na przykład można zmierzyć parametry tranzystora “przy zwarceniu wyjścia”? Przecież zwarcie wyjścia uniemożliwi pracę tranzystora!

Bez sensu?

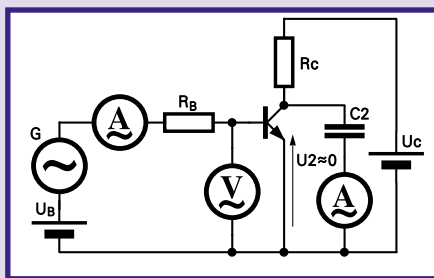
Hop, hop, nie tak prędko!

Pamiętaj, że rozważamy parametry dla prądu zmiennego. A więc jeśli nasz tranzystor będzie pracował w układzie z rysunku 2a, to wspomniane zwarcie zacisków wyjściowych dla przebiegów zmiennych zapewni kondensator C2 o odpowiednio dużej pojemności. Oporność (reaktancja) kondensatora o wielkiej pojemności będzie na tyle mała, że możemy ją potraktować jako zwarcie. Kondensator ten jednocześnie odetnie składową stałą, umożliwiając przepływ prądów stałych, właściwą polaryzację i pracę tranzystora. Przykładowe układy pomiarowe parametrów h znajdziesz na rysunku 4 oraz na rysunku 5 w EdW 11/98 str. 65. Proste?

Okazało się więc, że nie jest to takie straszne do zrozumienia.

Ale jeśli jeszcze mózg ci trochę pracuje zapytasz: a do czego mi są potrzebne te całe parametry h ?

Służę odpowiedzią. Teoretycznie ma to wyglądać tak: przypuśćmy, że musisz zaprojektować wzmacniacz tranzystorowy. Trzeba, żeby ten wzmacniacz miał określone wzmocnienie A , oporność wejściową R_{we} i oporność wyjściową R_{wy} . W katalogu tranzystorów znajdujesz wartości parametrów h , wybierasz układ pracy tranzystora (wg rysunku 2: ze wspólnym emiterem, wspólnym kolektorem, albo wspólną bazą), podstawiasz do nieskomplikowanych wzo-



Rys. 4 Przykładowy układ pomiaru parametru h

rów, przeliczasz, dobierasz napięcie zasilania. Na koniec wyliczasz wszystkie rezystancje ustalające stałoprądowy punkt pracy i oto obliczyłeś wszystkie elementy potrzebnego ci wzmacniacza. Zaprojektowałeś wzmacniacz.

Tak to wygląda w teorii i takimi zadaniami katują w szkole i na studiach. Natomiast w praktyce, owszem, przeprowadzamy pewne obliczenia, ale niewiele ma to związku z omawianymi właśnie parametrami h i modelem tranzystora z rysunku 3d.

Parametry h

Teraz już nie boisz się parametrów h . Z parametrem h_{11} nie masz problemu – jest to po prostu oporność (ściślej – impedancja) wejściowa. Nic nowego – omawialiśmy to już w poprzednim odcinku (porównaj rysunek 8 w EdW 11/98).

Sprawa wpływu wyjścia na wejście reprezentowana jest przez parametr h_{12} . Parametr ten należy uwzględnić w dokładniejszych obliczeniach, ale ponieważ sprzężenie to jest niewielkie, przy obliczeniach większości układów amatorskich można go po prostu pominąć (czyli wrócić do uproszczonego modelu z rysunku 3a i 3b).

Analogicznie, przy obliczaniu większości prostych układów tranzystorowych można pominąć parametr h_{22} . Nie można go pominąć tylko w tych nielicznych układach pracy, gdy w kolektorze umieszczone jest obciążenie o wyjątkowo dużej oporności. O tym za chwilę.

Nie powinien sprawić ci kłopotu parametr h_{21} – “współczynnik wzmocnienia prądowego przy zwartym wyjściu”. Współczynnik wzmocnienia prądowego natychmiast skojarzy ci się z parametrem β , który określiliśmy jako stosunek prądu kolektora do prądu bazy. I rzeczywiście jesteś niedaleko prawdy.

Ale to nie koniec

Zwróć uwagę, że najczęściej na końcu oznaczenia h_{21} umieszczona jest jeszcze literka e, c lub b. Jak się może domyślasz, parametry te dotyczą tranzystorowych wzmacniaczy małych napięć zmiennych, pracujących w konkretnej konfiguracji: wspólnego emitera, kolektora albo bazy. Czyli podstawowych układów z rysunków 2a (wspólny emiter –

OE), 2b (wspólny kolektor – OC) i 2c (wspólna baza – OB).

Ale to nadal nie koniec - w katalogach i książkach spotkasz też obok oznaczenia h_{21e} także oznaczenie h_{21E} . Duża litera E wskazuje nie tylko, że parametr dotyczy układu ze wspólnym emiterem, ale przede wszystkim informuje, że jest to wzmocnienie dla prądu stałego (w literaturze często zamiast h_{21E} spotkasz h_{FE} określane też jako DC current gain, czyli wzmocnienie dla prądu stałego).

Czy $h_{21e} = h_{21c} = h_{21b}$ i czy na przykład $h_{11e} = h_{11c} = h_{11b}$?

Czy β i h_{21e} to to samo? A może β to raczej h_{21E} ? A może zarówno β , h_{21e} i h_{21E} to jedno i to samo? Czy też $\beta = h_{21c}$? Jak myślisz?

Ściśle rzecz biorąc, nie jest to to samo. W katalogach znajdziesz tylko parametry h dla układu wspólnego emitera - OE. Wartości niektórych parametrów h dla układów OC i OB bardzo się różnią, niemniej można je, łatwo obliczyć, korzystając z wzorów, które znajdziesz w podręcznikach. Nie będę ci podawał tych wzorów. I ja i ty jesteśmy leniwi (prawda?), nie lubimy się nadmiernie męczyć i chcemy uproszczyć, co tylko się da.

I upraszamy. Uwaga! Dla układów wspólnego kolektora i emitera rzeczywiście parametr h_{21c} oraz h_{21e} można w pierwszym przybliżeniu utożsamiać z β . Ale dla układu wspólnej bazy, h_{21b} ma wartość zbliżoną do jedności, wynosząc mniej więcej 0,95...0,999 (być może spotkałeś się kiedyś z parametrem zwanym $[\alpha]$ - alfa). Szczegółów nie będę ci tłumaczył. Jeśli do tej pory nadążałeś za mną, doskonale poradzisz sobie ze zrozumieniem właściwości wzmacniaczy w konfiguracji OE, OC i OB, których obszerne (i nudne jak na mój gust) opisy znajdziesz w podręcznikach.

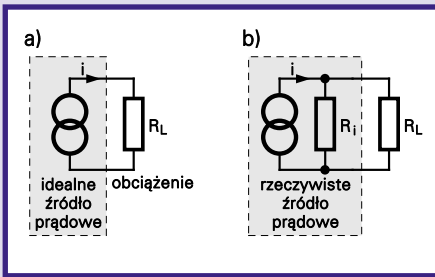
Zapamiętaj tylko, że choć parametry h_{12} , h_{22} (a wbrew pozorom także h_{11}) odgrywają mniejszą rolę i w amatorskiej praktyce często się je pomija, o tyle katalogowego parametru h_{21} lekceważyć nie można, bo głównie on decyduje o właściwościach wzmacniaczy tranzystorowych. Za chwilę zajmiemy się tym bliżej, a teraz parę uwag dla bardziej zaawansowanych.

Znaczenie h_{22} (dla zaawansowanych)

W niektórych zastosowaniach nie wolno pomijać znaczenia parametru h_{22} . Problem ilustruje rysunek 5.

W jednym z wcześniejszych odcinków tłumaczyłem ci, co to jest źródło prądowe. Dowiedziałeś się, że o wielkości sygnału napięciowego na takim źródle (na kolektorze tranzystora) decyduje głównie wartość oporności obciążenia – czym większa oporność obciążenia, tym większy sygnał wyjściowy. Zakładając, że obwód kolektorowy to idealne źródło prądowe (rys. 5a), można

Pierwsze kroki



Rys. 5 Obciążenie źródła prądowego

prosto obliczyć zmiany napięcia wyjściowego, jeśli zmiany prądu kolektora będą wynosić, powiedzmy $\Delta I = 1\text{mA}$

$$\Delta U = \Delta I \cdot R_L$$

Czym większa oporność obciążenia R_L , tym większy sygnał wyjściowy. Czy to jednak znaczy, że zwiększając oporność obciążenia (np. przez zwiększanie wartości rezystora w obwodzie kolektorowym lub zastosowanie obciążenia w postaci zewnętrznego źródła prądowego) można dowolnie zwiększać napięcie wyjściowe, a tym samym dowolnie zwiększać wzmocnienie wzmacniacza tranzystorowego? Niestety nie i to z kilku powodów.

Przede wszystkim obwód kolektora nie jest idealnym źródłem prądowym – sygnalizuje to rysunek 3b i 3d, gdzie niejako wewnątrz tranzystora, równolegle ze źródłem prądowym, włączona jest jakaś oporność. Oporność ta jest stosunkowo duża (bo jej odwrotność – przewodność (przewodność zespolona czyli admitancja h_{22} ma małą wartość). Ale jak by nie było, oporność ta jest jakimś wstępnym obciążeniem dla źródła prądowego. Dołączenie zewnętrznego obciążenia może tylko zmniejszyć całkowitą rezystancję obciążenia – porównaj rysunek 5b. Na pewno wypadkowa rezystancja obciążenia nie będzie nigdy mniejsza niż wewnętrzna rezystancja R_i .

Jeśli tak, to nawet stosując bardzo dużą oporność w kolektorze tranzystora, nie zwiększysz całkowitej oporności powyżej

$$R_{\text{max}} = 1/h_{22}$$

Tym samym nie możesz uzyskać dowolnie dużego napięcia na wyjściu.

Generalny wniosek są następujące:

- nie można traktować obwodu kolektorowego tranzystora jako idealnego źródła prądowego,

- o wartości maksymalnego wzmocnienia napięciowego wzmacniacza tranzystorowego zdecyduje nie wartość wzmocnienia prądowego h_{21} , tylko h_{22} .

Nadążasz? Na rysunku 5b zaznaczyłem oporność (rezystancję) R_i dołączoną równolegle do źródła prądowego. Natomiast na rysunku 3b i 3d zaznaczone są nie tyle oporności, tylko przewodności (zespolone czyli admitancje – stąd literka y na rys 3b). Na tym poziomie rozważań nie ma to znaczenia, możesz traktować je wszystkie jako rezystancje. Zresztą te informacje nie są nie-

zbędne początkującym (którzy być może nadal nie bardzo rozumieją o co chodzi). Ale powinni o tym pamiętać wszyscy bardziej zaawansowani, którzy będą stosować tranzystory w roli źródeł prądowych, albo chcieliby umieścić w obwodzie kolektora nie rezystory, tylko źródła prądowe.

Mam pytanie: czy w twoich wzmacniaczach tranzystorowych oporność wyjściowa całego wzmacniacza rzeczywiście wyznaczona jest przez h_{22} ? Jeśli myślisz, że tak, to się grubo mylisz. Pamiętaj, że analizujemy działanie tranzystorów w teoretycznych układach pracy. Właśnie tak możemy śmiało nazwać "książkowe", podstawowe układy pracy OE, OC, OB z rysunku 2, a układy pomiarowe wyglądają podobnie jak na rysunku 4 oraz rysunku 5 w EdW 11/98. Ty w praktyce będziesz stosował wzmacniacze, gdzie w obwodzie kolektora umieszczony jest rezystor. Jaka będzie wtedy rezystancja wyjściowa (dla przebiegów zmiennych)?

Wrócimy do tej kwestii w jednym z następnych odcinków, a już teraz zapamiętaj, że oporność wyjściowa praktycznie jest równa rezystancji rezystora umieszczonego w obwodzie kolektora (bowiem oporność związana z parametrem h_{22} ma bardzo dużą wartość i niewiele zmienia). A teraz wracamy do parametru h_{21} .

h_{21}

To jak jest z używanym do tej pory, nieprecyzyjnym parametrem oznaczanym β ? Czy do praktycznych obliczeń potrzebne są dokładne wartości h_{21e} i h_{21e} z katalogu?

Tabela 1

h_{FE} - DC Current Gain $I_C = 2\text{mA}$ $V_{CE} = 5\text{V}$			
	min.	Typ.	max.
BC107	110	230	450
BC107 Gr. A	110	180	220
BC107 Gr. B	200	290	450
BC108	110	350	800
BC108 Gr. A	110	180	220
BC108 Gr. B	200	290	450
BC108 Gr. C	420	520	800
BC109	200	350	800
BC109 Gr. B	200	290	450
BC109 Gr. C	420	520	800

h_{fe} Small Signal Current Gain $I_C = 2\text{mA}$
 $f = 1\text{ kHz}$ $V_{CE} = 5\text{V}$

	Typ.
BC107	250
BC107 Gr. A	190
BC107 Gr. B	300
BC108	370
BC108 Gr. A	190
BC108 Gr. B	300
BC108 Gr. C	500
BC109	370
BC109 Gr. B	300
BC109 Gr. C	550

Zajmijmy się tym bliżej. Tabela 1 zawiera katalogowe dane tranzystorów BC107...109.

Z porównania danych z tabeli wynikają dwa główne wnioski. Po pierwsze, dla tranzystorów tego samego typu, nawet z tej samej grupy trzeba liczyć się ze znacznym rozrzutem wartości wzmocnienia prądowego pomiędzy poszczególnymi egzemplarzami. Po drugie, wzmocnienie dla prądu stałego (DC Current Gain czyli h_{21E}) nie jest dokładnie równe wzmocnieniu dla małych przebiegów zmiennych (h_{21e}).

Idźmy jeszcze krok dalej. Rysunek 6 pokazuje zależność wzmocnienia stałoprądowego (czyli h_{21E}) od prądu kolektora dla tranzystorów BC546...BC548. Ze względu na rozrzut między egzemplarzami, oś pionowa wyskalowana jest w procentach, a nie w wartościach wzmocnienia. Wyraźnie widać, że wzmocnienie maleje przy bardzo małych oraz stosunkowo dużych prądach kolektora. Pokrewne dane dotyczące tranzystorów BC546...548 zawarte są w tabeli 2

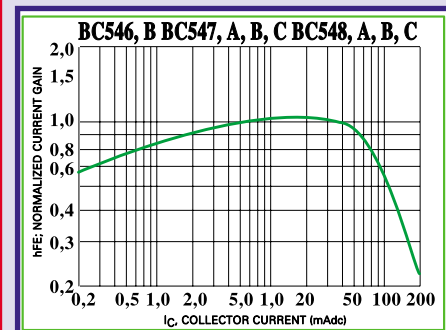
Tabela 2

Wzmocnienie stałoprądowe tranzystorów BC546...548 ($U_{CE} = 5\text{V}$)

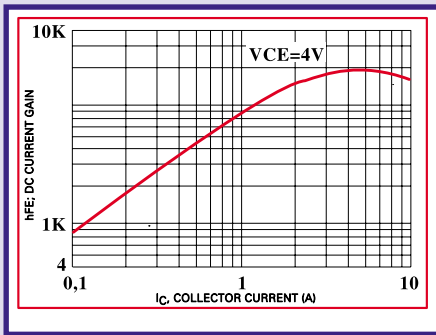
I_C	tranzystor	min.	typ.	max.
10mA	547A/548A		90	
10mA	546B/547B/548B		150	
10mA	548C		270	
2mA	546	100		450
2mA	547/548	110		800
2mA	547A/548A	110	180	220
2mA	546B/547B/548B	200	290	450
2mA	547B/548C	420	520	800
100mA	547A/548A		120	
100mA	546B/547B/548B		180	
100mA	548C		300	

Jeszcze inaczej jest w przypadku tranzystora mocy (w układzie Darlingtona) typu BDV65 – pokazuje to rysunek 7 (Jeśli nie wiesz jeszcze, co to jest ten „Darlington”, nie przejmuj się. Czytaj dalej i wyciągaj wnioski. A do „Darlingtona” jeszcze wrócimy).

Mało tego! Rysunek 8 pokazuje podobną zależność wzmocnienia w funkcji prądu kolektora, ale dla trzech różnych temperatur i dla dwóch napięć ko-



Rys. 6 Zależność wzmocnienia od prądu kolektora



Rys. 7 Zależność wzmacnienia od prądu tranzystora BDV65

lektora. Wykres dotyczy dość popularnego tranzystora 2N5400/5401.

A i to nie koniec! Rysunek 9 przedstawia zależność wzmacnienia od częstotliwości tranzystora mocy (Darlingtona) typu 2N6040...6045. Jak widać, wzmacnienie szybko spada ze wzrostem częstotliwości. Na szczęście tak małe pasmo mają tylko (i to nie wszystkie) tranzystory Darlingtona. Pojedyncze tranzystory małej i dużej mocy mają pasmo znacznie szersze.

Przeanalizuj przedstawione informacje. I co? Czy katalog pozwoli określić wzmacnienie danego tranzystora? Wszystko wskazuje, że nie! Może trzeba je po prostu zmierzyć?

Nie myśl jednak, że rozwiążesz problem mając multimetr cyfrowy z funkcją pomiaru wzmacnienia tranzystorów. Co zmierzysz? Zmierzysz wzmacnienie stałoprądowe przy nieznanym prądzie kolektora. A w twoim układzie tranzystor będzie pracował przy innym prądzie kolektora... I wzmacnienie stałoprądowe (nie mówiąc o zmiennoprądowym) będzie inne. A temperatura, częstotliwość?

Popadasz pomału w rozpacz? Czyżby miało się okazać, że cała wiedza o parametrach hybrydowych zda się psu na budę, bo "często pomijamy h_{11} , h_{12} , h_{22} ", a z kolei wartość h_{21} jest niewiadoma ze względu na koszmarnie duży rozrzut parametrów pomiędzy egzemplarzami oraz ze względu na zależność od prądu kolektora, temperatury i częstotliwości pracy?

Aż tak źle nie jest!

Na pewno możesz zmierzyć parametry konkretnego egzemplarza w warunkach, w jakich będzie pracował. Ale w praktyce coś takiego robimy bardzo rzadko.

No to jaką wartość wzmacnienia prądowego masz wziąć do ewentualnych obliczeń?

Uważaj! Doszliśmy do bardzo ważnych wniosków praktycznych:

Po pierwsze do poważnych obliczeń projektowych trzeba wziąć spodziewane parametry najgorszego egzemplarza. A do obliczeń mniej poważnych? Niestety, tak samo! Nawet gdy zmierzysz wzmacnienie konkretnego egzemplarza dla przewidywanych warunków pracy. Bo co wtedy, gdy tranzystor się zepsuje i ktoś go wymieni na jakikolwiek egzemplarz tego samego typu?

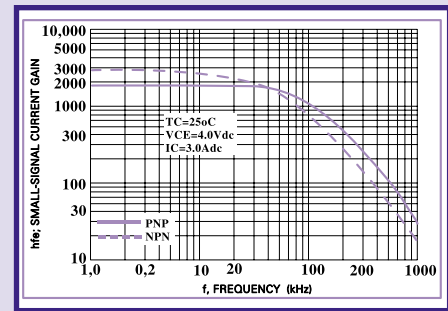
W katalogu szukaj więc tylko wskazówek, jakie może być wzmacnienie minimalne związane z rozrzutem, prądem kolektora czy częstotliwością.

Po drugie, tranzystory trzeba wykorzystywać w taki sposób, żeby nieuniknione rozrzuty ich parametrów nie wpływały na działanie układu. Jak? Stosując układy pracy nieco inne, niż te podstawowe, "książkowe", pokazane na rysunku 2. Sprawę tę omówimy w jednym z następnych odcinków. A już teraz ci powiem, że zawsze warto stosować tranzystory o jak największej wartości wzmacnienia prądowego. I to wszystko!

Podsumowanie

Jeśli tak, to po co ta cała zabawa z czarnymi skrzynkami, modelami, itd.? Komu potrzebne były teoretyczne rozważania?

Nie denerwuj się! Tłumaczę ci tu łopatologicznie bardzo ważną, i w sumie dość prostą sprawę: chcesz przecież zostać konstruktorem i projektować układy, a przynajmniej zrozumieć działanie tranzystora. Okazało się, że ten nasz tranzystor to paskudny twór, i wcale nie tak łatwo opisać precyzyjnie jego parametry, by potem przeprowadzić dokładne obliczenia projektowe. Żeby dokła-



Rys. 9 Wzmacnienie „Darlingtona” w funkcji częstotliwości

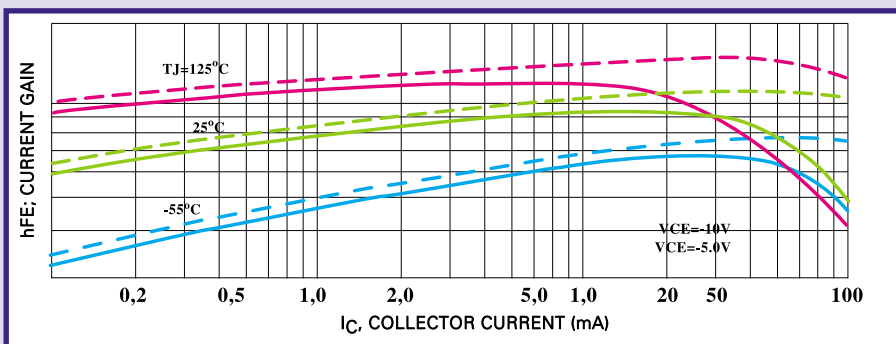
dnie opisać jego działanie należałoby posługiwać się dość złożonym modelem, co najmniej takim jak na rysunku 3 z poprzedniego odcinka lub jeszcze bardziej skomplikowanym.

Uważasz, że dwa odcinki poświęcone modelom tranzystora to dużo? Jeśli tak, to zajrzyj do podręczników ze szkoły średniej, albo lepiej akademickich, a przekonasz się, ile tam poświęcono miejsca temu tematowi, a także jak katuje się uczniów i studentów, każąc im przeprowadzać obliczenia opierające się na arbitralnie przyjętych (żeby nie powiedzieć - wyspanych z palca) wartościach parametrów h.

Nie miej pretensji do mnie, bo to nie z mojej winy okazało się, że przeciętny konstruktor-amator (i nie tylko amator) nie przeprowadza obliczeń z wykorzystaniem parametrów h. Przedstawiony materiał ma ci jedynie rozszerzyć horyzonty i pomóc wyciągnąć pewne wnioski.

Teraz nie będziesz się bał katalogowych parametrów h. Z grubsza wiesz, jaki sens ma każdy z nich. Okazało się to wszystko łatwe do zrozumienia. Jeśli więc będziesz chciał przeprowadzać teoretyczne obliczenia, skorzystasz z katalogowych parametrów h, związanych z rysunkiem 3b i odpowiednich wzorów (których ci tu nie podałem, a które straszą w licznych podręcznikach). Ale mnie w to nie miesza! Ja w następnym odcinku zajmę się praktycznymi sposobami obliczeń prostych wzmacniaczy tranzystorowych, a do tego będzie potrzebna tylko szacunkowa wartość wzmacnienia prądowego.

Piotr Górecki



Rys. 8 Zależność wzmacnienia od prądu i temperatury dla tranzystorów 2N5400/5401