



PRZEKSZTAŁTNIKI ELEKTRONICZNE

Ćwiczenie B18

Sterowanie i wzmacnienie prądowe tranzystorów BJT

Opracowanie ćwiczenia i instrukcji:
Łukasz Starzak

Łódź 2012

Spis treści

B Wprowadzenie do ćwiczenia 5

1. Cel i przebieg ćwiczenia.....5
2. Darlingtony BJT (uzupełnienie).....7
 - 2.1. Praktyczne monolityczne układy scalone7

C Doświadczenie..... 9

3. Pomiary9
 - 3.1. Przygotowanie układu pomiarowego.....9
 - Elementy badane9
 - Działania wstępne 10
 - 3.2. Charakterystyki statyczne11
 - Przygotowanie arkusza kalkulacyjnego..... 11
 - Przygotowanie do pomiarów 11
 - Wzmocnienie prądowe w zakresie niższych prądów 12
 - Statyczna charakterystyka wyjściowa i przejściowa..... 14
 - Wzmocnienie prądowe dla prądu znamionowego 14
 - Pomiary dla pozostałych tranzystorów 15
 - Pomiar złącza bramka-emiter..... 15
 - 3.3. Zakończenie pomiarów.....16

D Wyniki 17

4. Opracowanie i analiza wyników17

E Informacje 19

5. Literatura19

Wprowadzenie do ćwiczenia

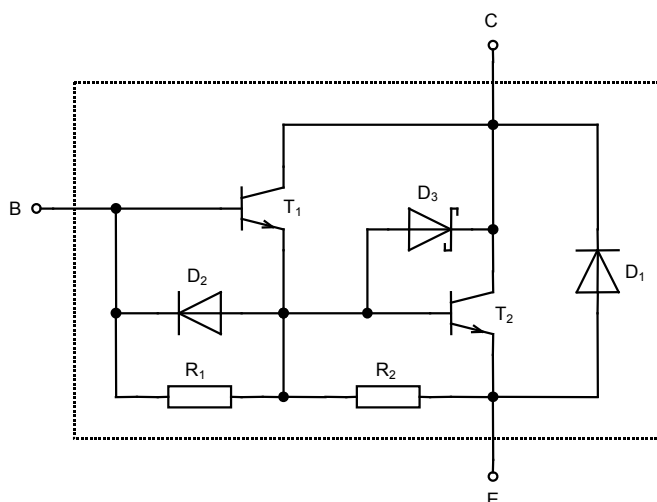
1. Cel i przebieg ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zbadanie właściwości statycznych dwóch tranzystorów BJT mocy – pojedynczego i darlingtona – w odniesieniu do wzmocnienia prądowego.

Budowa, działanie i właściwości analizowanych przyrządów zostały omówione w instrukcji [1]. W tej samej instrukcji opisano również zasadę działania charakterografu wykorzystywanego w niniejszym ćwiczeniu, a także sposób postępowania przy rejestracji wyników za pomocą aparatu fotograficznego.

Rys. 1 przedstawia schemat elektryczny dość skomplikowanego darlingtona BU806 firmy ST Microelectronics (duża część dostępnych na rynku układów ogranicza się do elementów R_1 , R_2 i D_1). Zasadniczą częścią tego układu jest oczywiście para Darlingtona T_1 – T_2 , której działanie zostało już omówione, natomiast teraz w skrócie opiszemy rolę pozostałych elementów.

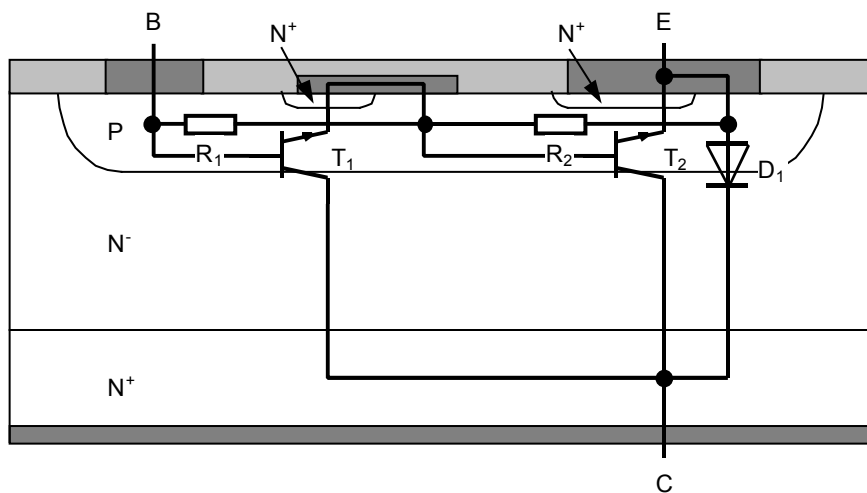
- Rezystory R_1 i R_2 , bocznikujące złącza baza-emiter obu tranzystorów, zmniejszają prąd zerowy struktury (dla układu Darlingtona jest on w przybliżeniu $2 + \beta_{F2}$ razy większy niż dla pojedynczego tranzystora), zwiększają jej wytrzymałość napięciową oraz przyspieszają załączanie i wyłączanie. Odbywa się to jednak kosztem wzmocnienia prądowego.
- Dioda D_1 zabezpiecza układ przed skutkami ujemnej polaryzacji kolektora względem emitera, która może wystąpić np. w układach sterowania silników. Wytrzymałość tranzystora na napięcie wsteczne jest niska z powodu niskiego napięcia przebicia złącza baza-emiter (zwykle 5–15 V).
- Dioda D_2 przyspiesza wyłączanie tranzystora T_2 , umożliwiając ominięcie tranzystora T_1 przez prąd związany z usuwaniem nośników z bazy T_2 .



© 2012 Łukasz Starzak, Katedra Mikroelektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Łódzkiej

- Dioda Schottky'ego D_3 ma za zadanie nie dopuścić do wejścia tranzystora T_2 w nasycenie, przez co skraca się czas załączania i wyłączania układu.

Przykład realizacji monolitycznego scalonego układu Darlingtona przedstawiono na rys. 2. Układ ten zawiera rezystory bocznikujące złącza emiterowe R_1 i R_2 oraz diodę odwrotnie równoległą D_1 .



Rys. 2. Przykładowy przekrój monolitycznego scalonego układu Darlingtona (oznaczenia elementów zgodne z rys. 1)

3. Pomiary

3.1. Przygotowanie układu pomiarowego

Elementy badane

Badaniu poddawane są tranzystory mocy wymienione w tab. 1. Jak można stwierdzić, zostały one tak dobrane, aby ich parametry znamionowe były bardzo zbliżone. Pojedynczy tranzystor dostępny jest również z wlutowanym opornikiem bocznikującym złącze baza-emiter.

Tab. 1. Tranzystory badane w ćwiczeniu i ich podstawowe parametry znamionowe

Symbol	Rodzaj tranzystora	Znamionowy prąd ciągły ($T_c = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$)	Napięcie znamionowe	Maksymalny dopuszczalny prąd bazy
BU1508AX	BJT pojedynczy	8,0 A	700 V (CEO) 1500 V (CES)	4 A
BU808DFI	BJT darlington ze scalonymi elementami RD	8,0 A	700 V (CEO) 1400 V (CES)	3 A

Badane elementy włącza się w obwód pomiarowy poprzez umocowanie w złączu dodatkowej przystawki.

Przy mocowaniu elementów należy bezwzględnie przestrzegać następujących reguł:

1. Przystawka jest na stałe włączona w prawe gniazda mocujące charakterografu i nie należy jej wyjmować.
2. Elementy należy mocować tak, aby układ wyprowadzeń był zgodny z opisem na przystawce. Układ wyprowadzeń każdego tranzystora jest pokazany na rysunku w jego karcie katalogowej.
3. Nie należy wyginać wyprowadzeń elementów.
4. Podczas pomiarów, niezależnie od aktualnego napięcia w obwodzie, pokrywa ochronna nad gniazdami mocującymi powinna być zamknięta.

5. Tranzystory sterowane polowo są wrażliwe na wyładowania elektrostatyczne, które mogą doprowadzić do przebicia bramki, czyli trwałego uszkodzenia elementu. W związku z tym:
 - elementy w danej chwili nie badane powinny być przechowywane w torebce antystatycznej;
 - przed uchwyceniem elementu należy odprowadzić ładunek elektrostatyczny, który może być zgromadzony na ciele, np. poprzez dotknięcie masy oscyloskopu;
 - elementy należy trzymać za radiator (wystająca część obudowy), nie za wyprowadzenia (nóżki).

Działania wstępne

Uwaga! Poniższe punkty należy wykonać przed przystąpieniem do jakichkolwiek pomiarów! W przeciwnym razie grozi zniszczenie badanych elementów i uszkodzenie charakterografu.

1. Przed włączeniem charakterografu:
 - upewnić się, że w prawych gniazdach elektrod zamontowana jest zielona przystawka z gniazdem do montażu elementów w postaci niebieskiej potrójnej listwy zaciskowej;
 - jeżeli spod pokrywy ochronnej wyprowadzone są na lewo przewody do gniazda zewnętrznego, umieścić ich wtyki w dwóch dolnych lewych gniazdach (oznaczonych jako E).
2. Przygotować charakterograf do pracy zgodnie z instrukcjami podanymi w instrukcji obsługi charakterografu (ramka „Przygotowanie charakterografu do pracy”).
3. Ustawić dodatnią polaryzację kolektora: *Polarity [A4]* ustawić na +. Następnie skalibrować położenie plamki na ekranie charakterografu:
 - a) wcisnąć *Zero [C6]*;
 - b) jeżeli plamka nie znajduje się dokładnie w lewym dolnym rogu podziałki (nie licząc linii przerywanych), należy nie puszczając przycisku *Zero* wyregulować jej położenie jasnoszarymi pokrętkami $\updownarrow$ *Position [C2]* i $\leftrightarrow$ *Position [C3]*;
 - c) wcisnąć *Cal [C6]* i sprawdzić, czy plamka przesunęła się o 10 działek w prawo i 10 działek w górę.
4. Włączyć zwykły tryb kreślenia charakterystyk: *Mode [A5] = Norm.*

Uwaga! Na koniec zajęć, niezależnie od liczby punktów, które zostały wykonane, należy wykonać polecenia z par. 3.3.

3.2. Charakterystyki statyczne

Przygotowanie arkusza kalkulacyjnego

W niniejszym ćwiczeniu zadaniem jest wyznaczenie charakterystyki $\beta_F = f(I_C)$. Dokonuje się tego zawsze dla konkretnej wartości napięcia U_{CE} . W niniejszym ćwiczeniu charakterystyka zostanie wyznaczona dla $U_{CE} = 3 \text{ V}$.

Punkty 1–2 powinna wykonywać jedna osoba, natomiast druga w tym czasie powinna wykonać punkty od 3 do 6.c). Aby nie korzystać z jednej kopii instrukcji, na końcu osobnej instrukcji do charakterografu załączony jest dodatkowy wydruk tych punktów.

1. Uruchomić program OpenOffice Calc.

Jeżeli zespół nie używał jeszcze tego programu, należy przeprowadzić krótką instalację (wszystkie opcje domyślne, nie podawać danych, nie rejestrować).

2. W arkuszu kalkulacyjnym przygotować tabelkę jak poniżej, a następnie:

Vertical Current/ Div [A/dz]	I_C [dz]	Step/Offset Amplitude [A]	Offset Mult	Numer gałęzi n	I_C [A]	I_B [A]	β_F

- a) w kolumnie I_C [A] wpisać formułę obliczającą wartość prądu kolektora w amperach na podstawie liczby amperów na działkę *Vertical Current/Div* [A/dz] i liczby działek I_C [dz];
- b) w kolumnie I_B wpisać formułę obliczającą wartość prądu bazy na podstawie odpowiednich kolumn:

$$I_{Bn} = (n + \text{Offset Mult}) \times \text{Step/Offset Amplitude} \quad (3.1)$$

- c) w kolumnie β_F wpisać formułę obliczającą wzmocnienie prądowe na podstawie odpowiednich kolumn.

Wykonując kolejny punkt, należy bezwzględnie zachować wszystkie środki ostrożności opisane w par. 3.1!

Przygotowanie do pomiarów

3. Odnaleźć pojedynczy tranzystor BJT podany w tab. 1. Korzystając z karty katalogowej ustalić lokalizację jego poszczególnych końcówek (C, B, E). Włączyć tranzystor w gniazdo przystawki zgodnie z opisem kolejności gniazd.
4. Upewnić się, że pokrętko *Variable Collector Supply* [A3] jest skręcone do zera. Ustawić na charakterografie:
 - pomiar w układzie wspólnego emitera, zysterowaniem bazy z generatora schodkowego: *przełącznik stanu końcówek* [D1] = *Emitter Grounded* / *Step Gen*,
 - skalę osi prądu I_C (Y) na 10 mA/dz: *Vertical Current/Div* [C1] = *Collector* 10 mA,
 - skalę osi napięcia U_{CE} (X) na 0,5 V/dz: *Horizontal Volts/Div* [C7] = *Collector* .5 V,
 - maksymalną moc na 2,2 W: *Max Peak Power* [A1] = 2.2,
 - liczbę wyświetlanych gałęzi rodziny charakterystyk (nie licząc zerowej) na 1: *Number of Steps* [B1],
 - na pokrętko *Offset Mult* [B3] wartość 0,5 (cyfra nad pionową kreską – na zewnętrznym pierścieniu oznacza całości, cyfra pod pionową kreską – na wewnętrznym pierścieniu oznacza dziesiąte).

Przed wykonaniem kolejnych punktów połączenia i ustawienia musi bezwzględnie skontrolować prowadzący!

5. Doprowadzić odpowiednie napięcie do elementu badanego:

- włączyć generator schodkowy wciskając w grupie *Step Family* [B8] przycisk *On*;
- włączyć zasilanie elementu badanego – *Left-Off-Right* [D2] w pozycję *Right*;
- wyregulować amplitudę zasilania obwodu kolektora tak, aby amplituda napięcia U_{CE} dla gałęzi zerowej wyniosła około (ale nie mniej niż) 3 V: *Variable Collector Supply* [A3];

Podziałka pokrętki *Variable Collector Supply* pozwala jedynie na zgrubne ustalenie amplitudy zasilacza kolektorowego. Dokładną wartość trzeba kontrolować na ekranie.

- jeżeli obserwowane krzywe są podwójne o charakterze pętli (zamiast pojedynczych linii), może to być spowodowane niejednoznacznością położeniem przycisku *Display Invert* [C5] – nieznaczne wciśnięcie i puszczenie tego przycisku powinno ustawić go w pozycji w pełni wyciśniętej i przywrócić właściwy przebieg krzywych.

W dalszym ciągu ćwiczenia może być konieczne powtórzenie powyższego podpunktu.

Jeżeli zamiast pojedynczego, poziomego odcinka na dole ekranu obserwowana jest charakterystyka o innym kształcie lub nawet rozgałęzianie się charakterystyki, należy natychmiast odłączyć zasilanie elementu badanego przez przełączenie *Left-Off-Right* [D2] w pozycję *Off* i poprosić prowadzącego o ponowne sprawdzenie układu pomiarowego.

Wzmocnienie prądowe w zakresie niższych prądów

6. Dokonać pomiarów prądu bazy i prądu kolektora dla dwóch wartości I_C rzędu 100 mA:

- a) ustawić skalę osi prądu na 1/2 rzędu wielkości, czyli 50 mA: *Vertical Current/Div* [C1] = *Collector 50 mA*;
- b) zwiększyć krok prądu bazy ΔI_B do 10 mA: *Step/Offset Amplitude* [B2];

W celu łatwego i dokładnego odczytu wartości prądu I_C dla $U_{CE} = 3$ V, czemu odpowiada obecnie 6. działka od lewej (nie licząc linii przerywanych), w kolejnym podpunkcie przesuniemy krzywe o 1 działkę w lewo. W wyniku tej operacji 3 woltom odpowiadać będzie 5. działka od lewej, czyli środkowa linia ekranu, na której naniesiona jest drobniejsza podziałka umożliwiająca dokładny odczyt na osi Y.

- c) wcisnąć *Zero* [C6] i nie puszczać przycisku *Zero* wyregulować położenie plamki jasnoszarym pokrętkiem $\leftrightarrow$ *Position* [C3] na minus 1 działkę (linia przerywana skrajnie na lewo ekranu);

Podpunkt d) należy najpierw przeczytać w całości, a dopiero później rozpocząć jego wykonywanie.

d) na przemian:

- zwiększać o 1 liczbę wyświetlanych gałęzi (*Number of Steps* [B1]),
- regulować amplitudę zasilania obwodu kolektora (*Variable Collector Supply* [A3]) tak, aby amplituda napięcia U_{CE} dla najwyższej gałęzi wynosiła zawsze około (ale nie mniej niż) 3 V,

aż najwyższa gałąź osiągnie dla $U_{CE} = 3$ V poziom bliski 100 mA (tak bliski jak się da, z dokładnością $-0,5$ dz; $+1,5$ dz) – przy czym jeżeli nie jest możliwe osiągnięcie żądanej wartości z tą dokładnością, można to osiągnąć wykonując jedną z lub obie poniższe czynności (należy stosować również w dalszym ciągu ćwiczenia):

- zmniejszyć krok prądu bazy (*Step/Offset Amplitude [B2]*) – dzięki czemu zmniejszy się odległość między gałęziami, jednocześnie około dwukrotnie zwiększając liczbę wyświetlanych gałęzi (*Number of Steps [B1]*),
 - przesunąć krzywe o pół kroku prądu bazy wciskając *Aid* w grupie *Offset [B4]*, przy czym od razu po zapisaniu wyników dla danego punktu pomiarowego należy wcisnąć na powrót przycisk *Zero* – w przeciwnym razie grozi zniszczenie elementu badanego na skutek jego przegrzania;
- e) zapisać w tabelce dane – kolejno:
- nastawę wzmocnienia dla osi Y (*Vertical Current/Div [C1]*) odczytaną z wyświetlacza – pole *PER VERT DIV*,
 - wartość prądu I_C w działkach (kolumna *IC [dz]*) którą osiąga najwyższa gałąź charakterystyki dla $U_{CE} = 3\text{ V}$, z dokładnością do 0,1 dz,
 - nastawę kroku prądu bazy (*Step/Offset Amplitude [B2]*) odczytaną z wyświetlacza – pole *PER STEP*,
 - wartość *Offset Mult* – należy wpisać 0 jeżeli w grupie *Offset [B4]* wciśnięty jest przycisk *Zero* lub nastawę pokrętła *Offset Mult [B3]* równą 0,5 (patrz pkt 4) jeżeli wciśnięty jest przycisk *Aid*,
 - numer ostatniej gałęzi n – nastawa *Number of Steps [B1]*.

Zwrócić uwagę na wpisywanie wszystkich prądów w tych samych jednostkach. W przykładzie tabeli podanym powyżej użyto amperów, można jednak użyć konsekwentnie innej jednostki, np. miliamperów. W takim przypadku należy odpowiednio zmodyfikować zapisy w nagłówku tabeli.

Podpunkt f) należy najpierw przeczytać w całości, a dopiero później rozpocząć jego wykonywanie.

- f) na przemian:
- zwiększać o 1 liczbę wyświetlanych gałęzi (*Number of Steps [B1]*),
 - regulować amplitudę zasilania obwodu kolektora (*Variable Collector Supply [A3]*) tak, aby amplituda napięcia U_{CE} dla najwyższej gałęzi wynosiła zawsze około (ale nie mniej niż) 3 V,

aż najwyższa gałąź osiągnie dla $U_{CE} = 3\text{ V}$ poziom bliski 300 mA (z dokładnością $-0,5\text{ dz}$; $+1,5\text{ dz}$);

- g) zapisać w tabelce dane jak w podpunkcie e).

7. Dokonać pomiarów prądu bazy i prądu kolektora dla dwóch wartości I_C rzędu 1 A:

- a) ustawić skalę osi prądu na 1/2 rzędu wielkości, czyli 0,5 A: *Vertical Current/Div [C1] = Collector .5 A*;
- b) wyłączyć generator schodkowy, aby nie dopuścić do przegrzania tranzystora w wyniku długotrwałego wyświetlania charakterystyk: wcisnąć *Step Family [B8] / Off*,
- c) zwiększyć ograniczenie mocy do 50 W: *Max Peak Power [A1] = 50*,
- d) kontrolując obraz wciskając (nie za często) *Step Family [B8] / Single* i odpowiednio zmieniając nastawy [patrz pkt 6.d)]:
 - krok prądu bazy ΔI_B (*Step/Offset Amplitude [B2]*),
 - liczbę wyświetlanych gałęzi (*Number of Steps [B1]*),
 - amplitudę zasilania obwodu kolektora (*Variable Collector Supply [A3]*),

uzyskać pomiary dla $U_{CE} \approx 3\text{ V}$ i prądu $I_C \approx 1\text{ A}$ oraz 3 A ($-0,5\text{ dz}$; $+1,5\text{ dz}$) – wypełnić kolejne 2 wiersze tabelki [patrz pkt 6.e)].

Statyczna charakterystyka wyjściowa i przejściowa

8. Zarejestrować obraz charakterystyk wyjściowych zgodnie z poniższą procedurą, która zapewnia, że tranzystor – który nie jest w żaden sposób chłodzony – nie zostanie przegrzany w wyniku zbyt długiego czasu wyświetlania charakterystyk:

- odłączyć zasilanie od elementu badanego – przełącznik *Left-Off-Right* [D2] w pozycję *Off*;
- włączyć generator schodkowy wciskając w grupie *Step Family* [B8] przycisk *On*;
- przygotować się do zdjęcia włączając samowyzwalacz [1];

Zdjęcia należy zawsze wykonywać w taki sposób, aby objąć nie tylko ekran, ale również ustawienia wyświetlane po jego prawej stronie.

Czytelność zdjęć będzie tym wyższa, im bliżej ekranu zostanie ustawiony aparat.

- wcisnąć spust aparatu, nie włączając na razie zasilania elementu badanego, obserwując zaś odliczanie na ekranie aparatu, dopiero ...
 - ... kiedy na ekranie aparatu wyświetlona zostanie cyfra 1, włączyć zasilanie elementu badanego – przełącznik *Left-Off-Right* [D2] w pozycję *Right* ...
 - ... i zaraz po odgłosie migawki przełączyć z powrotem w pozycję *Off*.
 - g) sprawdzić jakość wykonanego zdjęcia:
 - czy krzywe nie są nadmiernie rozmyte – w razie potrzeby powtórzyć zdjęcie dbając o stabilność aparatu i czekając na ustawienie się ostrości;
 - czy widoczne są nastawy na wyświetlaczach z prawej strony ekranu – w razie potrzeby ponownie wykadrować i powtórzyć zdjęcie;
 - czy widoczna jest podziałka ekranu – w razie potrzeby wyregulować oświetlenie skali pokręteł *Graticule Illum* (lewy górny róg grupy A) i powtórzyć zdjęcie.
9. Wyświetlić i zarejestrować charakterystykę przejściową $I_C = f(U_{BE})$:
- przestawić skalę osi X na napięcie U_{BE} ze wzmacnieniem 0,1 V/dz: *Horizontal Volts/Div* [C7] = Base .1;
 - na bardzo krótko przełączyć *Left-Off-Right* [D2] w pozycję *Right*, tak aby stwierdzić, czy na ekranie pojawia się obraz serii pionowych linii rozpoczynających się na dole na osi X, a których górne końce układają się na linii przypominającej charakterystykę diody;
 - zarejestrować obraz – powtórzyć pkt 8.c)–g);
 - przestawić skalę osi X z powrotem na napięcie U_{CE} ze wzmacnieniem 0,5 V/dz: *Horizontal Volts/Div* [C7] = Collector .5.

Wzmacnienie prądowe dla prądu znamionowego

10. Dokonać pomiarów prądu bazy i prądu kolektora dla wartości I_C bliskiej prądowi znamionowemu badanego tranzystora $I_{C(rat)}$ (patrz tab. 1):

- wyłączyć generator schodkowy wciskając w grupie *Step Family* [B8] przycisk *Off*;
- upewnić się, że w grupie *Offset* [B4] wciśnięty jest przycisk *Zero* i dla bieżącego zakresu prądu nie używać przycisku *Aid*;
- załączyć zasilanie elementu badanego – przełącznik *Left-Off-Right* [D2] w pozycję *Right*;
- ustawić skalę osi prądu tak, aby na ekranie zmieścił się poziom prądu znamionowego (patrz tab. 1): *Vertical Current/Div* [C1];
- kontrolując obraz wciskając (nie za często) *Step Family* [B8] / *Single* i odpowiednio zmieniając nastawy [patrz pkt 6.d)]:
 - krok prądu bazy ΔI_B (*Step/Offset Amplitude* [B2]),
 - liczbę wyświetlanych gałęzi (*Number of Steps* [B1]),
 - amplitudę zasilania obwodu kolektora (*Variable Collector Supply* [A3]),

uzyskać pomiar dla $U_{CE} \approx 3 \text{ V}$ i prądu $I_C \approx I_{C(\text{rat})}$ ($-0,5 \text{ dz}$; $+1,5 \text{ dz}$) – wypełnić kolejny wiersz tabelki [patrz pkt 6.e)]; jeżeli nastawy *Step/Offset Amplitude* i *Number of Steps* osiągną maksimum przed prądem $I_{C(\text{rat})}$, pomiaru należy dokonać dla maksymalnej uzyskiwalnej wartości prądu I_C .

11. Przywrócić bezpieczne nastawy:

- odłączyć zasilanie elementu badanego: przełącznik *Left-Off-Right [D2]* przestawić na *Off*,
- skrócić *Variable Collector Supply [A3]* do minimum (skrajnie przeciwnie do wskazówek zegara),
- zmniejszyć ograniczenie mocy do $2,2 \text{ W}$: *Max Peak Power [A1] = 2.2*,
- ustawić wyświetlanie 1 gałęzi charakterystyk: *Number of Steps [B1] = 1*,
- krok prądu ΔI_B ustawić na minimalny: *Step/Offset Amplitude [B2] = .05 \mu A*,
- skalę osi prądu I_C (Y) ustawić na 10 mA/dz : *Vertical Current/Div [C1] = Collector 10 mA*.

12. Zachowując środki ostrożności, badany element umieścić na powrót w torebce antystatycznej.

Pomiary dla pozostałych tranzystorów

13. Powtórzyć punkty 5–12 dla darlingtona, dostosowując jednakże początkową wartość prądu bazy [pkt 6.b)] do tego przyrządu; ponadto w pkt. 9.a) należy zastosować mniejsze wzmocnienie (tj. większy współczynnik V/dz) adekwatnie do obserwowanych wartości napięcia U_{BE} .
14. Powtórzyć punkty 5–7 i 12 dla pojedynczego tranzystora z dodatkowym (zewnętrznym) opornikiem bocznikującym baza-emiter, w razie potrzeby dostosowując początkową wartość prądu bazy [pkt 6.b)] do tego przyrządu.

Pomiar złącza bramka-emiter

15. Za pomocą multimetru pracującego w trybie omomierza, dla każdego ze zbadanych tranzystorów zmierzyć rezystancję baza-emiter R_{BE} .

3.3. Zakończenie pomiarów

1. Sprawdzić, czy:
 - pokrętko *Variable Collector Supply* [A3] jest skrócone maksymalnie w lewo,
 - ograniczenie mocy jest ustawione na 0,1 W (*Max Peak Power* [A1]),
 - krok prądu ΔI_B jest minimalny (*Step/Offset Amplitude* [B2] = .05 μA),
 - generator schodkowy jest wyłączony – w grupie *Step Family* [B8] przycisk *On* jest wyciśnięty,
 - zasilanie elementu badanego jest odłączone – *Left-Off-Right* [D2] w pozycji *Off*.
 - liczbę gałęzi rodziny charakterystyk ustawić na 1: *Number of Steps* [B1] = 1.
2. Wyłączyć charakterograf – przełącznik *Power* [A2] w pozycję *Off*.

4. Opracowanie i analiza wyników

1. Przeanalizować budowę obu tranzystorów:
 - a) stwierdzić (uzasadniając), czy wyniki pomiaru rezystancji R_{BE} wskazują na konstrukcję obwodu wejściowego darlingtona zgodnie z jego schematem podanym w karcie katalogowej;
 - b) porównać zarejestrowane charakterystyki wejściowe $I_C = f(U_{BE})$ obu tranzystorów pod względem charakteru (kształtu) i wartości napięcia wejściowego U_{BE} [charakterystyka przebiega górną obwiednią obserwowanego obrazu; pamiętać o przesunięciu początku układu współrzędnych w lewo do rogu podziałki przerywanej – patrz pkt 3.2/6.c); uzasadnić różnicę konstrukcją obwodu wejściowego darlingtona [1];
 - c) porównać zarejestrowane charakterystyki wyjściowe $I_C = f(U_{CE})$ obu tranzystorów pod względem charakteru (kształtu) i wartości napięcia wyjściowego U_{CE} (pamiętać o przesunięciu początku układu współrzędnych); uzasadnić różnicę konstrukcją obwodu wyjściowego darlingtona [1].
2. Na podstawie uzyskanych wyników wykreślić charakterystykę wzmocnienia prądowego $\beta_F = f(I_C)$ przy $U_{CE} = 3\text{ V}$ dla każdego z 3 tranzystorów. Wykresy wykonać w zakresie i skali umożliwiającej porównanie z charakterystykami zamieszczonymi w kartach katalogowych przyrządów.
3. Przeanalizować przebieg charakterystyk wzmocnienia (pomijając tranzystor pojedynczy z opornikiem):
 - a) porównać charakterystyki każdego z tranzystorów uzyskane doświadczanie z zamieszczonymi w karcie katalogowej;
 - b) zwrócić uwagę na usytuowanie maksimum wzmocnienia względem prądu znamionowego tranzystora; czy nominalna wartość β_F podana w karcie katalogowej odpowiada prądowi znamionowemu?
 - c) czy iloraz nominalnych wartości I_C i β_F wystarczy do poprawnego zaprojektowania obwodu sterowania tranzystora BJT mocy?
4. Przeanalizować wpływ scalonego opornika R_{BE} na charakterystykę wzmocnienia:

- a) porównując charakterystyki wzmacnienia tranzystora pojedynczego bez i z opornikiem R_{BE} stwierdzić, w jaki sposób dodanie tego opornika wpływa na charakterystykę co do jej przebiegu oraz osiąganych wartości;
 - b) wyjaśnić wpływ zaobserwowany w ppkt. a) w oparciu o analizę obwodu wejściowego tranzystora, zwracając uwagę na następujące zagadnienia:
 - jaka jest relacja między prądem wejściowym (zewnętrznej końcówki bazy całego przyrządu) a prądem faktycznie sterującym wewnętrznym tranzystorem BJT? jaki ma to wpływ na prąd wyjściowy i tym samym na wzmacnienie prądowe?
 - co dzieje się (jak rozplywa się prąd wejściowy) przy małych wartościach prądu wejściowego, kiedy spadek na rezystancji R_{BE} jest mniejszy od napięcia progowego złącza baza-emiter?
 - c) porównać ze sobą charakterystyki tranzystora pojedynczego i darlingtona; skomentować ich przebieg oraz wartości odnosząc się do wiadomości teoretycznych [1], schematu jednego i drugiego tranzystora podanego w karcie katalogowej oraz wniosków z pkt. a)–b) [w przypadku braku wyników dla tranzystora z opornikiem, dokonać analizy teoretycznej jak zgodnie z ppkt. b)].
5. Dokonać analizy mocy strat w tranzystorach:
- a) założyć, że tranzystor przewodzi prąd $I_C = 3 \text{ A}$;
 - b) z charakterystyk analizowanych wyżej odczytać dla tranzystora pojedynczego (bez opornika) i dla darlingtona:
 - spadek napięcia na wejściu U_{BE} (charakterystyka przebiega górną obwiednią obserwowanego obrazu; pamiętać o przesunięciu początku układu współrzędnych),
 - spadek napięcia na wyjściu U_{CE} w stanie nasycenia (tj. przy minimalnym napięciu U_{CE} , nie 3 V jak w przypadku wyznaczania wzmacnienia prądowego);
 - wzmacnienie prądowe β_F i na tej podstawie obliczyć prąd bazy I_B

Wynik będzie nieco zaniżony i nie do końca spójny z wartościami U_{CE} i U_{BE} , gdyż charakterystyka wzmacnienia dotyczy zakresu aktywnego, a nie nasycenia. Dokonujemy tego przybliżenia, aby nie komplikować wykonania ćwiczenia, aczkolwiek na podstawie posiadanych wyników byłoby możliwe dokonanie bardziej wiarygodnego oszacowania prądu I_B .
 - c) na podstawie wyników z ppkt. b), obliczyć moc sterowania P_B i moc strat w obwodzie wyjściowym P_C każdego z tranzystorów dla założonego prądu I_C ;
 - d) na podstawie wyników z ppkt. c) stwierdzić, jak zmieni się moc sterowania i moc strat w obwodzie wyjściowym, jeżeli tranzystor pojedynczy zostanie zastąpiony tranzystorem darlingtona; wyjaśnić tę zmianę w oparciu o wyniki z ppkt. b) oraz pkt. 1.b), 1.c) i 4.c).
6. Dokonać podsumowującej analizy zysków i strat ze stosowania darlingtonów (zamiast tranzystorów pojedynczych), biorąc pod uwagę szczególnie (ale nie tylko) wyniki i wnioski z pkt. 5.

5. Literatura

- [1] Starzak Ł.: *Laboratorium przyrządów i układów mocy. Ćwiczenie 5^A. Tranzystory BJT*. Łódź: Politechnika Łódzka, 2009.