

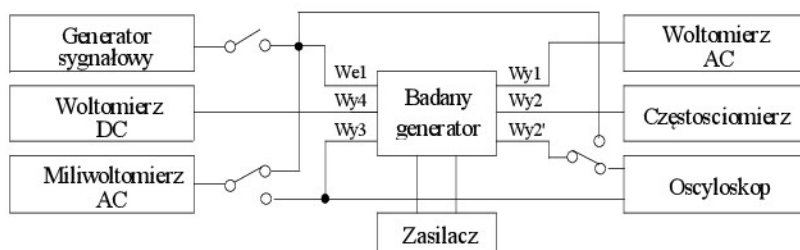
3. GENERATOR SINUSOIDALNY

3.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z podstawowymi zjawiskami towarzyszącymi procesowi generacji drgań harmonicznym oraz własnościami samowzbudnego generatora tranzystorowego LC.

3.2. Schemat blokowy układu pomiarowego

Schemat blokowy układu pomiarowego przedstawiono na rys. 3.1. Zewnętrzny generator sygnałowy wykorzystywany jest do wyznaczania charakterystyk wzmacniacza i pętli sprzężenia zwrotnego. Miliwoltomierz napięcia zmiennego (AC) umożliwia pomiar napięć na wejściu 1 i wyjściu 3 układu. Woltomierz napięcia stałego (DC), podłączony do wyjścia 4, służy do pomiaru napięcia polaryzacji U_{BE} . Oscyloskop, częstotściomierz i woltomierz AC zastosowano do jakościowej i ilościowej oceny przebiegów wyjściowych.

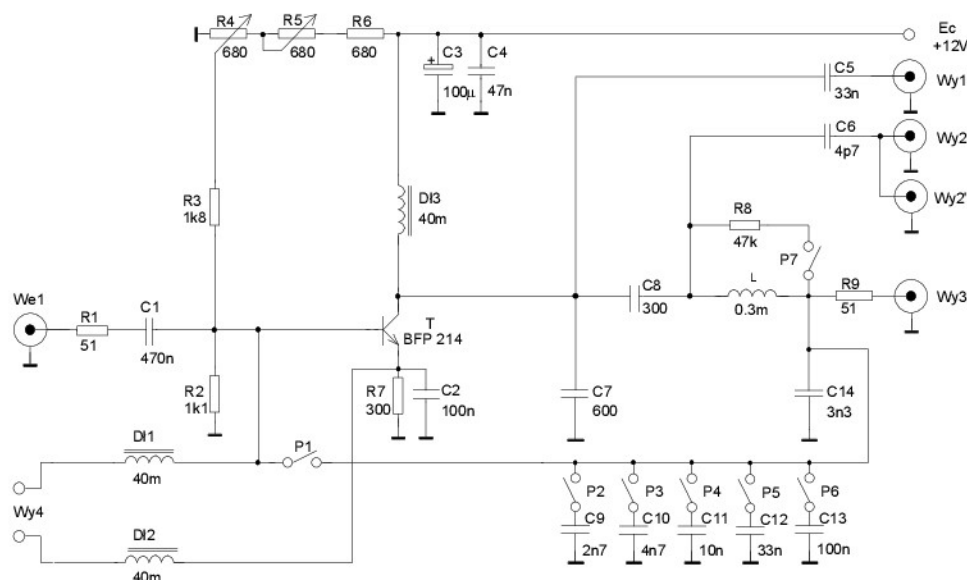


Rys. 3.1. Schemat blokowy układu pomiarowego

3.3. Schemat ideowy badanego układu oraz jego zasada działania

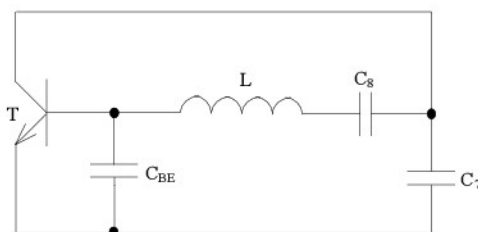
Badany generator, pracujący w układzie Clappa, przedstawiony jest na rys. 3.2 a jego schemat zastępczy dla składowych zmiennych na rys. 3.3. Składa się on ze wzmacniacza wykonanego w oparciu o tranzystor BFP 214 włączanego w konfiguracji WE oraz pętli sprzężenia zwrotnego, złożonej z kondensatora C_8 , cewki L i pojemności C_{BE} (kondensator C_{14} oraz wybrana kombinacja kondensatorów $C_9 \div C_{13}$).

Obciążeniem tranzystora jest obwód rezonansowy, złożony z cewki L , kondensatorów C_7 i C_8 oraz pojemności C_{BE} . Wartości elementów układu generatora zapewniają pracę na częstotliwości zbliżonej do 600kHz. Kolektor połączony jest z obwodem rezonansowym przez przekładnię pojemnościową (około 1/3), zapewniającą odpowiednie obciążenie tranzystora.



Rys. 3.2. Schemat ideowy badanego generatora [2]

We wzmacniaczu zastosowano zmodyfikowany potencjometryczny układ zasilania bazy (rezystory R_2 , R_3 oraz regulowany dzielnik R_4 , R_5 i R_6). Kolektor zasilany jest przez dławik DL_3 . Jest to tzw. zasilanie równoległe polegające na rozdzieleniu obwodów dla składowej stałej i dla składowej zmiennej. Dławik DL_3 tworzy z pojemnością C_7 równoległy obwód rezonansowy, którego częstotliwość rezonansowa powinna być znacznie mniejsza od częstotliwości generowanych drgań tak, aby charakter obwodu był dla generowanego sygnału pojemnościowy.



Rys. 3.3. Schemat zastępczy badanego generatora dla składowych zmiennych

Kondensatory C_3 i C_4 blokują napięcia zmienne w obwodzie zasilania, przy czym ceramiczny kondensator C_4 kompensuje indukcyjność własną kondensatora elektrolitycznego C_3 w zakresie wysokich częstotliwości.

W układzie generatora występuje dynamiczna polaryzacja tranzystora wskutek ujemnego sprzężenia zwrotnego prądowo - szeregowego (R_7 , C_2). Początkowy punkt pracy ustala się poprzez regulację napięcia zasilającego dzielnik R_2 , R_3 potencjometrami R_4 (regulacja zgrubna) i R_5 (regulacja dokładna).

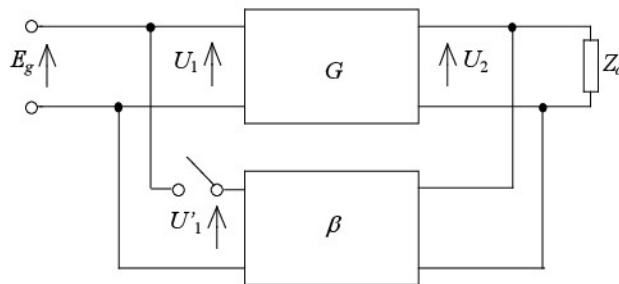
Przełącznik P_7 włączający rezystor R_8 pozwala na zmianę dobroci obwodu rezonansowego, umożliwia więc badanie wpływu dobroci na stałość częstotliwości. Przełącznik P_1 rozłącza pętlę, a wartość jej transmitancji napięciowej β zmienia się za pomocą przełączników $P_2 \div P_6$.

Dławiki DL_1 i DL_2 zastosowano w celu separacji woltomierza DC od układu generatora. Rezystory R_1 i R_9 zapobiegają powstawaniu pasożytniczych oscylacji, które mogą pojawić się przy podłączeniu urządzeń zewnętrznych. Kondensatory C_1 , C_5 i C_6 pełnią rolę elementów sprzęgających, przy czym kondensator C_6 , o małej wartości pojemności, separuje częstotłomierz i oscyloskop od obwodu generatora.

3.4. Wybrane właściwości badanego układu

3.4.1. Proces narastania drgań

Schemat blokowy generatora sprzężeniowego przedstawiony jest na rys. 3.4. Badany układ jest zaliczany do grupy generatorów LC i składa się z czwórnika aktywnego o wzmacnieniu napięciowym G oraz toru sprzężenia zwrotnego o transmitancji napięciowej β .



Rys. 3.4. Schemat blokowy generatora sprzężeniowego

Z teorii generacji wynika równanie określające granicę stabilności układu o postaci

$$G\beta = 1 \quad /3.1/$$

Aby zależność ta była prawdziwa, muszą być jednocześnie spełnione dwa równania, zwane warunkami amplitudy i fazy:

$$\begin{aligned} |G\beta| &= 1 \\ \varphi_G + \varphi_\beta &= 2k\pi, \quad k = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad /3.2/$$

Sens fizyczny amplitudowego warunku generacji sprowadza się do tego, że β -ta część sygnału wyjściowego musi być wystarczająca do takiegoysterowania wzmacniacza, żeby nastąpił przepływ mocy z zasilacza, potrzebny do wytworzenia sygnału wyjściowego. Wzmocnienie sygnału po przejściu przez wzmacniacz i układ sprzężenia zwrotnego powinno w stanie ustalonym wynosić jeden. Warunek fazy oznacza, że całkowite przesunięcie fazy wzmacniacza i pętli sprzężenia musi być wielokrotnością kąta pełnego. Częstotliwość, przy której warunek fazy jest spełniony to częstotliwość generacji.

Spełnienie warunków /3.2/ nie jest wystarczające dla wystąpienia generacji. Zgodnie z liniową teorią generacji należy jeszcze zapewnić warunki dla narastania drgań. W układach praktycznych dąży się, by warunek amplitudy w okresie początkowym spełniony był zawsze z nadmiarem (2÷5 razy). Powoduje to w momencie włączenia zasilania powstanie drgań o narastającej amplitudzie.

W układzie liniowym ustalenie amplitudy generowanego sygnału nie jest możliwe. Małe fluktuacje sygnału występujące w układzie będą powodować drgania tłumione (dla $G\beta < 1$) lub narastające (dla $G\beta > 1$) do chwili, gdy amplituda drgań nie przekroczy zakresu liniowości. Dlatego w przypadku, gdy $G\beta > 1$, konieczne jest istnienie nieliniowości ograniczającej wzrost amplitudy. W badanym układzie wykorzystuje się nieliniowe własności elementu wzmacniającego. Z punktu widzenia stałości amplitudy ograniczenie w obszarze nasycenia tranzystora daje dobre wyniki, jednak kosztem małej sprawności energetycznej, możliwości przegrzania i uszkodzenia elementu aktywnego oraz dużej zawartości składowych harmonicznych w generowanym sygnale.

Stopień żądanej nieliniowości zależy od wymagań stawianych generatorowi. W przypadku generatorów mocy ze względu na sprawność konieczne jest zastosowanie dużej nieliniowości (klasa C). W innych zastosowaniach, gdy wymagana jest wysoka stabilność częstotliwości, generator powinien pracować z minimalną nieliniowością.

W związku z nieliniowością elementu aktywnego prąd wyjściowy tranzystora ma postać odkształconą. Dzięki zastosowaniu obwodu rezonansowego o odpowiednio dużej dobroci, napięcie wyjściowe zależy głównie od pierwszej harmonicznej prądu wyjściowego. Postać tego napięcia ma więc przebieg zbliżony do harmonicznego.

3.4.2. Charakterystyki generacyjne

W quasi liniowej teorii generacji, analizującej etap drgań ustalonych (praca z dużymi poziomami sygnału), wprowadza się pojęcie średniej transkonduktancji $g_{m\bar{s}r}$, wyrażonej stosunkiem amplitud pierwszej harmonicznej prądu wyjściowego I_{C1} do składowej podstawowej napięcia wejściowego U_1

$$g_{m\bar{s}r}(\theta) = \frac{I_{C1}(\theta)}{U_1} \quad /3.3/$$

przy czym związek między średnią transkonduktancją a transkonduktancją tranzystora g_m można wyrazić jako funkcję kąta odcięcia θ .

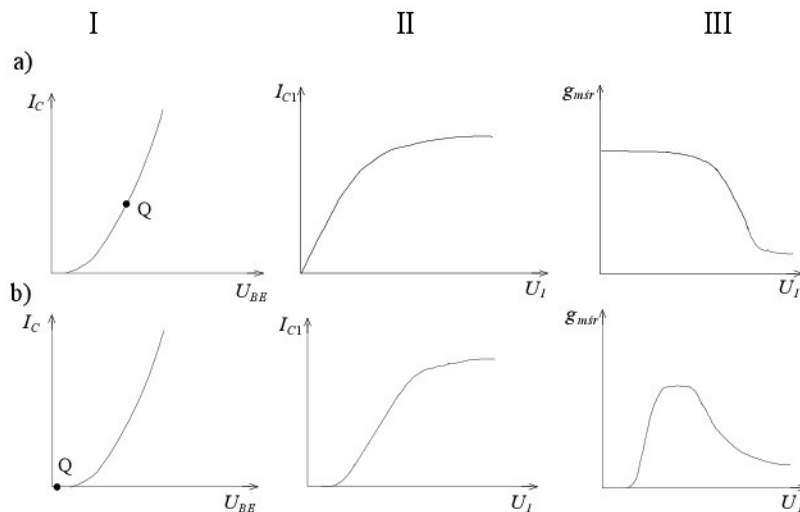
Stosując powyższą definicję i korzystając z rys. 3.4, amplitudowy warunek generacji można zapisać w postaci

$$g_{m\bar{s}r} |Z_d \beta| = 1 \quad /3.4/$$

Fizyczną interpretację tak przedstawionego amplitudowego warunku generacji można sformułować następująco: o ile w generatorze są spełnione warunki powstawania drgań, wówczas narastanie amplitudy sygnału trwa tak długo, aż malejąca wartość średniej transkonduktancji spełni warunek /3.4/.

Przebieg średniej transkonduktancji w funkcji sygnału U_1 (rys. 3.5 - III), uzależniony od położenia początkowego punktu pracy Q (rys. 3.5 - I) i w efekcie od kształtu przejściowej charakterystyki dynamicznej toru wzmacniającego (rys. 3.5 - II), określa zachowanie się generatora w warunkach wzbudzenia drgań. Na rys. 3.5 pokazano dwa przypadki: gdy początkowy punkt pracy elementu aktywnego znajduje się w zakresie normalnym (rys. 3.5.a) oraz w zakresie odcięcia (rys. 3.5.b).

W celu graficznego określenia amplitudy drgań w stanie ustalonym posługujemy się charakterystykami generacyjnymi, które wyznaczamy na bazie dynamicznych charakterystyk przejściowych wzmacniacza $U_2 = f(U_1)$ i układu sprzężenia zwrotnego $U_1' = f(U_2)$ - patrz rys. 3.4 - rysowując je w jednym układzie współrzędnych.

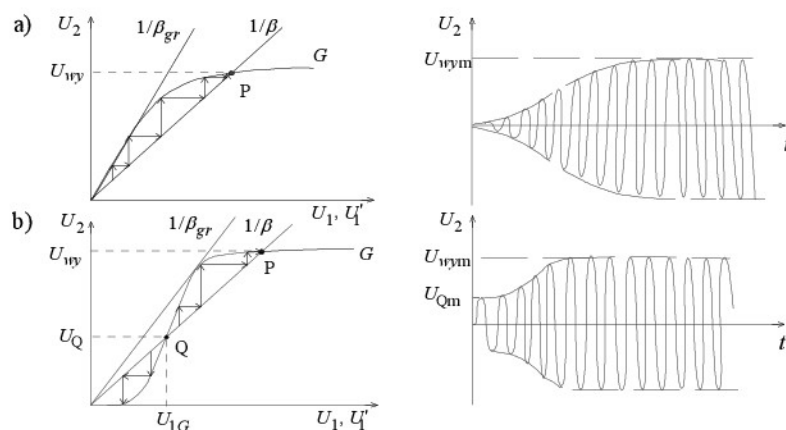


Rys. 3.5. Przejściowe charakterystyki statyczne i dynamiczne oraz przebiegi średniej transkonduktancji torów wzmacniających pracujących w klasach A (a) i C (b)

Przykłady charakterystyk generacyjnych dla różnych klas pracy elementu aktywnego oraz odpowiadające im procesy narastania drgań przedstawiono na rys. 3.6.

W przypadku pokazanym na rys. 3.6.a mówimy o wzbudzeniu miękkim. Warunkiem narastania drgań od zera do stanu ustalonego jest przebieg przejściowej charakterystyki dynamicznej toru wzmacniającego ponad przejściową charakterystyką dynamiczną toru sprzężenia zwrotnego, rysowaną w tym samym układzie współrzędnych, już od najmniejszych amplitud sygnału. Oznacza to, że wzmocnienie toru wzmacniającego G musi być większe od tłumienia toru sprzężenia zwrotnego $1/\beta$ (co zachodzi dla $\beta > \beta_{gr}$). Jest to możliwe do spełnienia jedynie wtedy, gdy w stanie początkowym element aktywny pracuje w

klasach A, AB lub B. W tych warunkach mała fluktuacja amplitudy wywołuje proces narastania drgań aż do stanu ustalonego, w którym napięcia wejściowe i wyjściowe są określone przez punkt równowagi trwałej P.



Rys. 3.6. Charakterystyki generacyjne oraz przebiegi czasowe napięć wyjściowych dla układu wzmacniającego z rys. 3.4 pracującego w klasach A (a) i C (b)

O wzbudzeniu twardym (rys. 3.6.b) mówimy w przypadku, gdy uzyskanie różnego od zera, stabilnego stanu ustalonego wymaga doprowadzenia z zewnątrz sygnału wzбудzającego. Amplituda napięcia wzбудzającego w sumie z napięciem wstępnej polaryzacji musi mieć wartość równą co najmniej U_{1G} . Jest to graniczna wartość napięcia odpowiadająca punktowi równowagi niestabilnej Q, którego przekroczenie powoduje samoczynne narastanie drgań, aż do osiągnięcia punktu równowagi trwałej P.

3.4.3. Dynamiczna polaryzacja elementu aktywnego

Podane sposoby wzbudzenia drgań stanowią jedno z kryteriów klasyfikacji generatorów. Generatory, w których proces narastania drgań rozpoczyna się w momencie włączenia zasilania nazywają się generatorami samowzbudnymi, te zaś, które wymagają doprowadzenia sygnału inicjującego proces narastania drgań - obcowzbudnymi. W stanie drgań ustalonych element aktywny może pracować w dowolnej klasie pracy. Wybór klasy pracy w stanie ustalonym musi uwzględniać wymagania stawiane generatorowi. Jeżeli podstawowymi wymaganiami są stabilność drgań i czystość widmowa sygnału wyjściowego, wówczas element aktywny powinien pracować w klasie A z nieliniowością potrzebną dla ustalenia amplitudy drgań. Jeśli zaś najistotniejsze są wymagania energetyczne to element aktywny powinien pracować w klasie C. W praktyce konstruuje się generatory samowzbudne, w których zmiana klasy pracy elementu aktywnego występuje w trakcie narastania i ustalania się drgań.

W badanym układzie można tak dobrać napięcie polaryzacji, że początkowo element aktywny pracuje w klasie A, co zapewnia miękkie wzbudzenie generatora. W miarę narastania amplitudy drgań zjawiska nieliniowe powodują odkształcenia prądów bazy i emitera i w efekcie ich wartość średnia jest różna od zera. Powoduje to przyrost napięcia na rezystorze R_7 przesuwający punkt pracy w kierunku odcięcia prądu kolektora. Wejście w odciecie powoduje dalszy przyrost wartości średniej prądu I_E i w efekcie szybki wzrost napięcia na rezystorze R_7 . Zmiana punktu pracy powoduje zmianę wartości średniego nachylenia charakterystyki przejściowej $g_{m\beta r}$ wzmacniacza. Proces ten trwa do momentu spełnienia amplitudowego warunku generacji danego zależnością /3.4/. W stanie drgań ustalonych element aktywny pracuje w klasie C. Rozwiązanie takie zapewnia szybkie narastanie drgań oraz dużą sprawność energetyczną generatora.

Dynamiczna polaryzacja elementu aktywnego może być przyczyną zakłóceń polegających na pojawieniu się drgań relaksacyjnych wynikających ze źle dobranej wartości stałej czasu R_7C_2 . W praktyce wartość tę dobiera się w zakresie 5÷10 okresów drgań generowanego sygnału.

3.4.4. Dokładność i stałość częstotliwości

Ważnym zagadnieniem związanym z generacją jest dokładność i stałość częstotliwości sygnału wyjściowego generatora. Dokładność generatora jest to względny uchyb jego częstotliwości w odniesieniu do ustalonego wzorca, zaś bezwzględna niestalość częstotliwości jest funkcją czasu obserwacji definiowaną jako

$$\Delta f(t) = f(t) - f_0 \quad /3.5/$$

gdzie: f_0 - wartość częstotliwości w początkowym momencie obserwacji,
 $f(t)$ - wartość częstotliwości w pewnej chwili t .

Jak wspomniano wcześniej, częstotliwość generowanych drgań określona jest przez warunek fazy. W pierwszym przybliżeniu można założyć, że częstotliwość sygnału generowanego jest równa częstotliwości rezonansowej obwodu LC. W praktyce na dokładność generatora ma wpływ szereg dodatkowych czynników powodujących konieczność uwzględniania liniowej i nieliniowej poprawki częstotliwości.

Poprawka liniowa związana jest z istnieniem w układzie generatora stałych pojemności i indukcyjności pasożytniczych elementu wzmacniającego oraz pojemności i indukcyjności montażowych. Poprawka ta wynika również ze strat obwodu rezonansowego i innych konduktancji występujących w układzie. Nieliniowa poprawka częstotliwości związana jest z nieliniowością charakterystyk elementu aktywnego oraz nieliniowością reaktancji występujących w układzie (pojemności dynamiczne elementu aktywnego), czego konsekwencją jest występowanie składowych harmonicznym napięcia generowanego, które naruszają bilans mocy pozornych w obwodzie rezonansowym i w efekcie powodują przestrojenie generatora.

Z analizy warunków pracy generatora sprzężeniowego LC wynika, że podstawowym środkiem pozwalającym zminimalizować niestalość częstotliwości jest stosowanie obwodów rezonansowych charakteryzujących się dużym nachyleniem częstotliwościowej charakterystyki fazowej. Powinny być to więc obwody o dużych dobrociach.

3.5. Opis techniczny pomiarów

3.5.1. Zakres i metodyka pomiarów

W pierwszej części ćwiczenia badane będą własności wzmacniacza rezonansowego oraz pętli sprzężenia zwrotnego przy wykorzystaniu zewnętrznego generatora sygnałowego. W związku z tym pomiary muszą być przeprowadzane przy rozwartej pętli sprzężenia.

Mierzone będą dynamiczne charakterystyki przejściowe wzmacniacza rezonansowego pracującego na częstotliwości rezonansowej w zakresie aktywnym (klasa AB) i w zakresie zatkania (klasa C) oraz dynamiczne charakterystyki przejściowe toru sprzężenia zwrotnego. Otrzymane wyniki umożliwią wykreślenie charakterystyk generacyjnych oraz wyznaczenie granicznej wartości współczynnika sprzężenia zwrotnego i amplitudy generowanych drgań.

Dru ga część ćwiczenia obejmuje obserwację i interpretację zjawisk fizycznych towarzyszących powstawaniu drgań oraz pomiary dynamiczne generatora umożliwiające weryfikację wyników otrzymanych na podstawie charakterystyk generacyjnych. Zakres badań obejmuje:

- oscyloskopową obserwację spełnienia warunku amplitudy i fazy,
- określenie granicznej wartości sprzężenia zwrotnego oraz napięcia wzbudzenia,
- pomiar wrażliwości częstotliwości generowanego sygnału na zmiany zasilania.

3.5.2. Uruchomienie układu

Przystępując do pomiarów określić rolę przyrządów i sprawdzić prawidłowość połączeń układu pomiarowego (rys. 3.1). Uruchomienie układu przeprowadzić dla przypadku dużej dobroci obwodu rezonansowego (P_7 wyłączony), rozłączonej pętli sprzężenia zwrotnego (P_1 wyłączony) i minimalnej pojemności C_{BE} ($P_2 \div P_6$ wyłączone).

W celu uruchomienia układu należy:

- podłączyć generator sygnałowy do wejścia 1 i ustawić wartość napięcia wejściowego, mierzoną miliwoltomierzem AC, $U_{we1} \approx 10\text{mV}$ i częstotliwość około 600kHz,
- włączyć zasilanie układu i potencjometrami R_4 i R_5 dobrać taką wartość napięcia dzielnika, aby napięcie między bazą i emiterem U_{BE} , mierzone woltomierzem DC dołączonym do wyjścia 4, mieściło się w granicach $0.6\text{V} \div 0.65\text{V}$,
- obserwując wskazania woltomierza AC na wyjściu 1, dostroić generator zewnętrzny do częstotliwości rezonansowej wzmacniacza.

Uwaga: Nie przekraczać wartości $U_{BE} = 0.65\text{V}$.

3.5.3. Pomiar charakterystyk przejściowych wzmacniacza

Dynamiczna charakterystyka przejściowa wzmacniacza określona jest zależnością:

$$U_{wy1} = f(U_{we1}) \left| \begin{array}{l} f = f_0 = \text{const} \\ U_{BE} = \text{const} \end{array} \right. \quad /3.6/$$

Pomiary wykonuje się przy rozłączonej pętli sprzężenia zwrotnego, dużej dobroci obwodu rezonansowego i minimalnej pojemności C_{BE} , dla dwóch przypadków: gdy element aktywny pracuje w zakresie aktywnym ($U_{BE} = 0.6\text{V} \div 0.65\text{V}$) oraz gdy element aktywny pracuje w zakresie zatkania ($U_{BE} \leq 0.5\text{V}$).

W celu wykonania pomiarów należy:

- zgodnie z wytycznymi prowadzącego ćwiczenie ustawić odpowiednią wartość napięcia U_{BE1} i U_{BE2} ,
- po dołączeniu generatora zewnętrznego zmieniać napięcie wejściowe U_{we1} w zakresie od odcięcia do nasycenia (patrz rys. 3.5), korygując za każdym razem wartość U_{BE} i odczytywać napięcie wyjściowe U_{wy1} ,
- wyniki pomiarów umieścić w tabelach 3.1 i 3.2.

Tab. 3.1

Zakres aktywny ($U_{BE1} = \dots \text{V}$)

U_{we1}	mV				
U_{wy1}	V				

Tab. 3.2

Zakres zatkania ($U_{BE2} = \dots \text{V}$)

U_{we1}	mV				
U_{wy1}	V				

3.5.3. Pomiar charakterystyk przejściowych wzmacniacza

Dynamiczna charakterystyka przejściowa wzmacniacza określona jest zależnością:

$$U_{wy1} = f(U_{we1}) \left| \begin{array}{l} f = f_0 = \text{const} \\ U_{BE} = \text{const} \end{array} \right. \quad /3.6/$$

Pomiary wykonuje się przy rozłączonej pętli sprzężenia zwrotnego, dużej dobroci obwodu rezonansowego i minimalnej pojemności C_{BE} , dla dwóch przypadków: gdy element aktywny pracuje w zakresie aktywnym ($U_{BE} = 0.6\text{V} \div 0.65\text{V}$) oraz gdy element aktywny pracuje w zakresie zatkania ($U_{BE} \leq 0.5\text{V}$).

W celu wykonania pomiarów, gdy element aktywny pracuje w zakresie aktywnym należy:

- zgodnie z wytycznymi prowadzącego ćwiczenie ustawić odpowiednią wartość napięcia U_{BE1} ,
- podłączyć sygnał z generatora zewnętrznego o napięciu 5 mV,
- zmierzyć i zanotować napięcie na emiterze tranzystora względem masy U_E ,
- zwiększać napięcie wejściowe U_{we1} do wartości, przy której poziom sygnału wyjściowego U_{wy1} nie będzie już liniowo narastał (patrz rys. 3.5), korygując za każdym razem wartość U_E i odczytywać napięcie wyjściowe U_{wy1} ,

W celu wykonania pomiarów, gdy element aktywny pracuje w zakresie zatkania należy:

- zgodnie z wytycznymi prowadzącego ćwiczenie ustawić odpowiednią wartość napięcia U_{BE2} ,
- po dołączeniu generatora zewnętrznego zmieniać napięcie wejściowe U_{we1} w zakresie od odcięcia do nasycenia (patrz rys. 3.5), korygując za każdym razem wartość U_{BE2} (nie U_E !) i odczytywać napięcie wyjściowe U_{wy1} ,
- wyniki pomiarów umieścić w tabelach 3.1 i 3.2.

Zakres aktywny ($U_{BE1} = \dots$ V, $U_E = \dots$ V)

Tabela 3.1

U_{we1}	mV							
U_{wy1}	V							

Zakres zatkania ($U_{BE2} = \dots$ V)

Tabela 3.2

U_{we1}	mV							
U_{wy1}	V							

3.5.4. Pomiar dynamicznych charakterystyk przejściowych toru sprzężenia zwrotnego

W celu wykonania pomiarów należy:

- za pomocą przełączników $P_2 \div P_6$ ustawić $C_{BE} = 3.3$ nF (patrz tabela 3.3) oraz $U_{we1} \approx 50$ mV i $U_{BE} \approx 0.6$ V,
- miliwoltomierz AC przełączyć na wyjście 3,

Tab. 3.3

C_{BE} [nF]	3.3	6	8	10.7	13.3	18	20.7	36.3	49	53.7	103.3	136.3	153.7
P_2	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1
P_3	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1
P_4	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	1
P_5	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1
P_6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1

- dostroić generator zewnętrzny do częstotliwości rezonansowej wzmacniacza a następnie dobrać taką wartość napięcia wejściowego U_{we1} , aby napięcie wyjściowe $U_{wy1} = 1.5$ V,
- zmierzyć napięcie U_{wy3} na wyjściu pętli sprzężenia zwrotnego oraz częstotliwość rezonansowa i umieścić wyniki w tabeli 3.4,
- przeprowadzić takie same pomiary dla coraz większych wartości pojemności C_{BE} (według tabeli 3.4) za każdym razem dostrajając układ do rezonansu,

Tab. 3.4

C_{BE}	nF	3.3	8	13.3	20.7	49	103	153.7
U_{wy1}	mV							
U_{wy3}	V							
f_r	kHz							
β	V/V							
β'	V/V							

- przeprowadzić obliczenia modułu współczynnika sprzężenia zwrotnego na podstawie wyników pomiarów (β) oraz na podstawie wartości elementów (β') korzystając z zależności:

$$\beta = \frac{U_{wy3}}{U_{wy1}} \quad /3.7/$$

$$\beta' = \frac{C_7}{C_{BE}}$$

- wyniki obliczeń umieścić w tabeli 3.4.

3.5.5. Obserwacja pracy i pomiary dynamiczne generatora

3.5.5.1. Wzbudzenie miękkie

W celu dokonania pomiarów i obserwacji należy:

- miliwoltomierz AC przełączyć na wejście 1, a oscyloskop dwukanałowy podłączyć na wejście 1 i wyjście 3,
- ustawić minimalną wartość współczynnika sprzężenia zwrotnego β (maksymalną wartość C_{BE}),
- dostroić generator zewnętrzny do częstotliwości rezonansowej wzmacniacza, przy $U_{we1} \approx 20\text{mV}$, oraz wartości napięcia polaryzacji U_{BE1} ,
- korzystając z oscyloskopu dwukanałowego porównać wartości amplitud i przesunięcie fazowe napięć U_{we1} i U_{wy3} przy zmianach częstotliwości wokół częstotliwości rezonansowej,
- po stwierdzeniu spełnienia warunku fazy odłączyć generator zewnętrzny, zamknąć pętlę sprzężenia zwrotnego i zaobserwować reakcję układu,
- zwiększając wartość współczynnika sprzężenia zwrotnego (patrz tabela 3.3) i powtarzając czynności opisane w podpunktach d) i e), do momentu stwierdzenia spełnienia warunku amplitudy i fazy, znaleźć wartość graniczną modułu współczynnika sprzężenia zwrotnego β_{gr} i zanotować ją w tabeli 3.5,
- odczytać wartość napięcia U_{BE} i porównać ją z wartością początkową
- przełączając jeden z kanałów oscyloskopu porównać kształty napięć na wejściu 1 i wyjściu 3 z kształtem napięcia na wyjściu 2',
- zanotować spostrzeżenia, zinterpretować zjawiska zachodzące w układzie i wyciągnąć wnioski.

3.5.5.2. Wzbudzenie twarde

W celu dokonania pomiarów i obserwacji należy:

- oscyloskop dwukanałowy podłączyć na wejście 1 i wyjście 3,
- rozłączyć pętlę sprzężenia zwrotnego,
- ustawić $C_{BE} = 3.3\text{nF}$,
- dostroić generator zewnętrzny do częstotliwości rezonansowej wzmacniacza, przy $U_{we1} \approx 60\text{mV}$, oraz wartości napięcia polaryzacji U_{BE2} ,
- korzystając z oscyloskopu dwukanałowego porównać wartości amplitud i przesunięcie fazowe napięć U_{we1} i U_{wy3} przy zmianach częstotliwości wokół częstotliwości rezonansowej,

- f) po stwierdzeniu spełnienia fazowego warunku generacji odłączyć sygnał z generatora zewnętrznego, zamknąć pętlę sprzężenia zwrotnego i zaobserwować reakcję układu,
g) wykorzystując zewnętrzny generator sygnałowy, określić minimalną wartość napięcia wzbudzenia (U_{1G}) niezbędną dla spełnienia warunku amplitudy.

W tym celu należy:

- rozłączyć pętlę sprzężenia zwrotnego i podać sygnał z generatora zewnętrznego,
 - dostroić generator sygnałowy do częstotliwości rezonansowej wzmacniacza,
 - ustawić wartość napięcia $U_{we1} \approx 60\text{mV}$,
 - zamknąć pętlę sprzężenia zwrotnego i sprawdzić czy układ zacznie samodzielnie generować. Jeśli nie, należy rozłączyć pętlę, zwiększyć wartość U_{we1} i powtarzać czynności aż do momentu wystąpienia generacji,
 - zanotować wartość napięcia wzbudzenia U_{1G} w tabeli 3.5.
- h) zanotować spostrzeżenia, zinterpretować zjawiska zachodzące w układzie i wyciągnąć wnioski.

Tab. 3.5

U_{BE}	—	$U_{BE1} = \dots \text{ V}$	$U_{BE2} = \dots \text{ V}$
$C_{BE,gr}$	nF		
β_{gr}	V/V		
U_{1G}	V		

3.5.6. Pomiar wrażliwości częstotliwości sygnału generowanego na zmiany napięcia zasilającego dla różnych dobroci obwodu rezonansowego

W celu wykonania pomiarów należy:

- ustalić warunki pracy: $E_{C0} = 12\text{V}$, U_{BE1} , $C_{BE} = 3.3\text{nF}$,
- zmieniając wartość napięcia zasilania E_C zgodnie z tabelą 3.6, mierzyć wartość częstotliwości drgań dla dwóch położenia przełącznika P_7 .
- wyniki pomiarów umieścić w tabeli 3.6.

Do obliczeń wrażliwości jako wartość częstotliwości odniesienia f_0 przyjąć częstotliwość odpowiadającą nominalnej wartości napięcia zasilania $E_{C0} = 12\text{V}$.

Tab. 3.6

E_C	V	P ₇ wyłączony			P ₇ włączony		
		10	12	14	10	12	14
f	kHz						
S_E	Hz/V		—			—	
S_E^f	%		—			—	

Korzystać z zależności:

$$S_E = \frac{\Delta f}{\Delta E_C} = \frac{f - f_0}{E_C - E_{C0}}$$

$$S_E^f = \frac{\frac{\Delta f}{f_0}}{\frac{\Delta E_C}{E_{C0}}} = S_E \frac{E_{C0}}{f_0} \quad /3.8/$$

- wyniki obliczeń zanotować w tabeli 3.6.

Ustalić początkowe warunki pracy według punktu 3.5.2.

Tab. 3.6

		P ₇ wyłączony			P ₇ włączony		
		10	12	14	10	12	14
E_C	V						
f	kHz						
S_E	Hz/V		—			—	
S_E^f	%		—			—	

Korzystać z zależności:

$$S_E = \frac{\Delta f}{\Delta E_C} = \frac{f - f_0}{E_C - E_{C0}}$$

$$S_E^f = \frac{\frac{\Delta f}{f_0}}{\frac{\Delta E_C}{E_{C0}}} = S_E \frac{E_{C0}}{f_0}$$

/3.8/

– wyniki obliczeń zanotować w tabeli 3.6.

Ustalić początkowe warunki pracy według punktu 3.5.2.

3.6. Przedstawienie wykonanych pomiarów oraz opracowanie wyników i wniosków

1. Wykonać wykresy charakterystyk generacyjnych.
2. Na podstawie charakterystyk generacyjnych określić graniczne wartości współczynników sprzężenia zwrotnego, dla których drgania powstają oraz ulegają zerwaniu; porównać uzyskane wartości z wynikami pomiarów.
3. Uzasadnić różnice między wartościami β i β' .
4. Uzasadnić zachowanie się generatora przy zmianie wartości współczynnika sprzężenia zwrotnego.
5. Uzasadnić zmianę częstotliwości generatora przy zmianach napięcia zasilającego i dobroci obwodu rezonansowego; porównać i uzasadnić uzyskane wartości wrażliwości.

3.7. Zagadnienia do przygotowania

1. Sposób polaryzacji elementu aktywnego generatora.
2. Cel stosowania rezystora tłumiącego R_g .
3. Rola toru sprzężenia zwrotnego w generatorze.
4. Cel stosowania kondensatora C_g .
5. Analiza warunku fazy w badanym generatorze.
6. Interpretacja i sens fizyczny warunków generacji na przykładzie badanego generatora.
7. Dynamiczne charakterystyki przejściowe wzmacniacza rezonansowego dla różnych klas pracy.
8. Dynamiczne charakterystyki przejściowe toru sprzężenia zwrotnego.
9. Charakterystyki generacyjne i ich interpretacja.
10. Procesy narastania i ustalania się drgań w generatorze.
11. Własności generatorów samowzbudnych i obcowzbudnych.
12. Istota i realizacja praktyczna dynamicznej polaryzacji elementu aktywnego na przykładzie badanego generatora.
13. Czynniki wpływające na dokładność częstotliwości generatora sprzężeniowego LC.

3.8. Literatura

Podstawowa

- [1] Pawłowski J.: *Podstawowe układy elektroniczne – wzmacniacze i generatory*.
WKiŁ Warszawa 1975.

Uzupełniająca

- [2] Bogacz Z., Żurawski M.: *Ćwiczenia laboratoryjne z nieliniowych układów elektronicznych*.
WAT Warszawa 1987.
- [3] Filipkowski A.: *Układy elektroniczne analogowe i cyfrowe*.
WNT Warszawa 1993.
- [4] Niedźwiecki M., Rasiukiewicz M.: *Nieliniowe elektroniczne układy analogowe*.
WNT Warszawa 1991.