

**POLITECHNIKA ŁÓDZKA**  
**INSTYTUT ELEKTRONIKI**  
TECHNICAL UNIVERSITY OF ŁÓDŹ - INSTITUTE OF ELECTRONICS

ul. Stefanowskiego 18/22, 90-537 Łódź, Poland

Tel. (48) (42) 36 00 65, (48) (42) 31 26 26  
Fax. (48) (42) 36 22 38

# **Laboratorium układów wielkiej częstotliwości**

## **Ćwiczenie nr 6 i 7**

### **Projektowanie układów wielkiej częstotliwości z zastosowaniem programu *Serenade***

## Instrukcja do ćwiczenia projektowania układów wielkiej częstotliwości

### Wprowadzenie

Głównym celem niniejszego ćwiczenia jest zapoznanie się z metodami projektowania układów elektronicznych pracujących w zakresie wielkich częstotliwości.

Ćwiczenie polega na prawidłowym zaprojektowaniu układu wzmacniacza szerokopasmowego z jednym tranzystorem oraz wykonaniu liniowej optymalizacji parametrów układu ze względu na charakterystyki wzmocnienia i dopasowania.

Narzędziem projektowym wykorzystywanym w ćwiczeniu jest program *Serenade* firmy *Compact Software*. Program ten pomaga w projektowaniu układów złożonych z elementów aktywnych i pasywnych, liniowych i nieliniowych oraz elementów o parametrach skupionych i rozłożonych. Umożliwia on przeprowadzenie analiz i optymalizacji nieliniowych (punktu pracy elementów aktywnych, parametrów szumowych, analizę zniekształceń harmonicznnych, analizę elementów przestrajanych napięciowo, itp.) oraz analiz i optymalizacji liniowych (charakterystyk częstotliwościowych, dopasowania, itp.).

W ramach ćwiczenia należy wprowadzić do programu podany w instrukcji schemat połączeń obwodu, należy wybrać odpowiedni model tranzystora, zdefiniować zakresy wartości elementów przeznaczone do optymalizacji liniowej, zdefiniować parametry i cele optymalizacji oraz przeprowadzić analizę charakterystyk częstotliwościowych zaprojektowanego układu.

### Parametry wzmacniacza

Zakładamy, że projektowany układ będzie spełniał następujące parametry:

- zasilanie (przez port wyjściowy) 10V
- pasmo częstotliwości 250 – 500MHz
- impedancja wejścia 50Ω
- impedancja wyjścia 50Ω
- wzmocnienie ( $|S_{21}|$ ) 12dB
- dopasowanie wejścia ( $|S_{11}|$ ) < -20dB
- dopasowanie wyjścia ( $|S_{22}|$ ) < -20dB

W projektowanym wzmacniaczu wykorzystany zostanie tranzystor **nnp** wielkiej częstotliwości typu **BFQ 67**. Jest to element o niewielkich wymiarach zewnętrznych przeznaczony do montażu powierzchniowego (*SMD*). Również inne elementy pasywne wykorzystywane w układzie wykonane są w tej technologii. Zapewnia to niewielkie wymiary układu, a co za tym idzie to, że elementy takie nawet przy częstotliwości 500MHz mogą być traktowane jako elementy o stałych skupionych.

Projektowany układ wzmacniacza szerokopasmowego ma za zadanie wzmacniać sygnały o niewielkiej amplitudzie. Zakładamy, że układ wraz z wybranym tranzystorem o punkcie pracy  $U_{CE} = 4V$  i  $I_C = 10mA$  spełnia wymagania dotyczące zniekształceń harmonicznnych (nieliniowych) oraz nie wprowadza nadmiernych szumów. Oznacza to, że w fazie projektowania układu główny nacisk zostanie położony na kształtowanie charakterystyk częstotliwościowych (optymalizacja liniowa), nie zaś na optymalizację ze względu na zniekształcenia nieliniowe i wprowadzany szum.

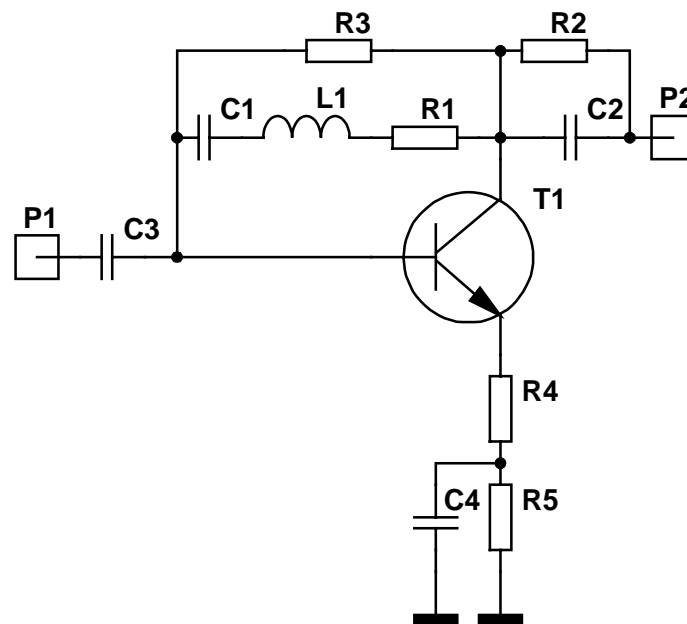
## Projektowanie układu

Układ wzmacniacza szerokopasmowego powinien być tak zaprojektowany aby dla określonego przedziału częstotliwości uzyskać wymagane wzmocnienie i by charakterystyka wzmocnienia była możliwie płaska, przy jednoczesnym zachowaniu dopasowania wejścia i wyjścia wzmacniacza.

Pierwszym etapem projektowania układu jest wybranie odpowiedniego elementu aktywnego - tranzystora. Tranzystor powinien mieć odpowiednio duże wzmocnienie w zakładanym paśmie częstotliwości i przy zakładanym punkcie pracy. Należy pamiętać, że parametry tranzystora takie jak wzmocnienie, nieliniowości (zniekształcenia nieliniowe układu) i parametry szumowe zależą w dużej mierze od jego punktu pracy. W ćwiczeniu został już narzucony typ tranzystora i jego punkt pracy. Wymagane charakterystyki wzmocnienia można uzyskać jeśli tranzystor ten pracuje w układzie ze wspólnym emiterem.

Wzmocnienie tranzystora maleje wraz ze wzrostem częstotliwości. Aby charakterystyka wzmocnienia  $|S_{22}|$  była możliwie płaska konieczne jest zastosowanie elementów korygujących. Korekcję charakterystyki można uzyskać stosując odpowiednie elementy ujemnego sprzężenia zwrotnego (np. rezystancję dołączoną do emitera tranzystora oraz szeregowe połączenie RL między kolektorem a bazą).

Elementy pasywne wchodzące w skład pętli sprzężenia zwrotnego mają wpływ nie tylko na charakterystykę wzmocnienia ale także na impedancje wejściową i wyjściową układu. Zmieniając ich wartości modeluje się również i charakterystyki dopasowania ( $|S_{11}|$ ,  $|S_{22}|$ ). Dodatkowo w celu poprawy dopasowania stosuje się również układy dopasowujące.



Rys.1 Schemat połączeń układu wzmacniacza pasmowego

Na Rys.1 przedstawiono schemat układu wzmacniacza z tranzystorem w układzie wspólnego emitera. Rezystory R2, R3 i R5 ustalają punkt pracy tranzystora (rezystor R4 jest pomijalnie mały w porównaniu z rezystorem R5). Elementy R1, C1, L1 oraz element R4 kształtują częstotliwościową charakterystykę wzmocnienia (są elementami ujemnego sprzężenia zwrotnego). Pojemność C2 ma wpływ na charakterystykę dopasowania wyjścia, natomiast C4 jest odpowiednio dużą pojemnością blokującą (zwierającą sygnały o dużych częstotliwościach do masy).

## Punkt pracy

Układ zasilany jest poprzez port wyjściowy (P2). Wzmocnienie prądowe tranzystora BFQ 67 wynosi  $h_{21E}=100$ . Wymagany punkt pracy tranzystora ( $U_{CE}=4V$ ,  $I_C=10mA$ ) uzyskuje się przez odpowiedni dobór rezystorów R2, R3 i R5 ( $R_4 \ll R_5$ ). Dla uproszczenia przyjąć można, że rezystory R2 i R5 mają identyczne wartości. Zapewni to wystarczająco dużą wartość rezystora R5 i stabilność punktu pracy tranzystora dzięki silnemu ujemnemu sprzężeniu zwrotnemu dla składowych stałych. Rezystor R3 służy do prawidłowego spolaryzowania bazy.

## Utworzenie projektu w programie Serenade

Pracę projektową w środowisku programu *Serenade* rozpoczynamy od utworzenia projektu. Po uruchomieniu programu pojawia się okno *Serenade Desktop*, w którym należy wybrać opcję tworzenia nowego projektu (*Project*). Pojawi się okno o nazwie *New Project*. W polu *Project Name* należy podać nazwę projektu i potwierdzić przez naciśnięcie klawisza *Create*. Jeśli okno *Serenade Desktop* nie pojawi się po uruchomieniu programu to nowy projekt można utworzyć wybierając z menu programu opcję *New→Project*.

Efektem utworzenia projektu jest pojawienie się w głównym oknie programu kilku okien potomnych, w tym okna z drzewem opisującym elementy składowe projektu, okna edycji schematu obwodu elektronicznego oraz okna informacyjnego, w którym pojawiać się będą ostrzeżenia i informacje o błędach. Okno edycyjne schematu ma nazwę nadaną projektowi z rozszerzeniem *.sch*. Nazwa ta jest identyczna z nazwą pliku, do którego zostaną zapisane dane o tworzonym schemacie.

W programie *Serenade* można też otworzyć do edycji plik zawierający schemat (*\*.sch*) bez otwierania projektu, jednak nie pozwoli to na późniejsze przeprowadzenie analiz projektowanego obwodu.

## Edycja schematu

Edycji schematu dokonuje się poprzez wybieranie z menu (*Parts*) poszczególnych elementów składowych obwodu i umieszczaniu ich w oknie edycyjnym. Niektóre elementy elektroniczne dostępne są również poprzez przyciski z tzw. skrzynek narzędziowych. Po umieszczeniu elementów w oknie należy je odpowiednio połączyć „przewodami” (*Parts→Wire*). Dodatkowymi elementami, które należy umieścić na schemacie są bloki sterujące. Bloki te zawierają informacje niezbędne do prawidłowego przeprowadzenia analiz i optymalizacji.

Dla przykładu, element szeregowego połączenia RLC można umieścić wybierając ze skrzynki narzędziowej przycisk *SRX* lub z menu programu opcję *Parts→Lumped→Series/Parallel Combinations→Series RLC*. Używając myszy symbol elementu należy umieścić w wybranym miejscu okna edycyjnego.

Po umieszczeniu elementu pojawi się okno dialogowe z tabelą zawierającą nazwy i wartości parametrów opisujących dany element. Niektóre z pól tabeli opisane są znacznikiem *\*req\** (*required* - niezbędne). W polach tych należy umieścić wartości opisujące dany element. Wypełnienie pozostałych pól nie jest konieczne do uruchomienia analizy obwodu.

W przypadku szeregowego połączenia RLC niezbędnymi parametrami są wartości rezystancji, indukcyjności i pojemności (trzy pola oznaczone przez *\*req\**). Parametr rezystancji należy wpisać jako liczbę bez podawania jednostek (np. 47000 oznacza

rezystancje 4,7 k $\Omega$ ), pojemność należy wpisać jako liczbę oraz jednostkę F z prefiksem P, N, U, lub M (np. 3.3PF oznacza pojemność 3,3 pF), indukcyjność jako liczbę oraz jednostkę H z prefiksem (np. 8NH oznacza indukcyjność 8 nH). **Wartości parametrów oraz jednostek nie należy rozdzielać znakami spacji.**

W analogiczny sposób umieszcza się na schemacie rezystory (*Parts*→*Lumped*→*Resistors*), pojemności (*Parts*→*Lumped*→*Capacitors*→*Ideal(Constant G)*), indukcyjności, symbol masy (*Parts*→*Ground*), itp.

Głównym elementem obwodu z Rys.1 jest tranzystor. Aby umieścić symbol tranzystora na schemacie można postąpić podobnie jak w przypadku powyżej opisywanych elementów. Metoda ta wymaga jednak podania znacznej liczby parametrów modelu tranzystora. Innym sposobem jest wykorzystanie elementów aktywnych których modele są dostępne w bibliotece elementów programu *Serenade*. W przypadku tranzystora BFQ 67 jego model jest dostępny poprzez opcję menu *Parts*→*Device Library*. Po wybraniu tej opcji na ekranie pojawia się okno dialogowe *Device Library Selection*, w którym należy podać producenta, typ elementu oraz rodzaj modelu (producentem BFQ 67 jest firma Philips). W przypadku tranzystora bipolarnego możemy skorzystać z modelu liniowego (przeznaczony do analizy i optymalizacji liniowej) lub nieliniowego (analiza i optymalizacja nieliniowa).

Porty układu definiuje się symbolami portów mikrofalowych oznaczając je odpowiednimi etykietami. Aby umieścić na schemacie symbol portu należy z menu wybrać opcję *Parts*→*Lumped*→*Schematic Connectors*→*Microwave Port*, umieścić port na schemacie i w oknie dialogowym *Instance Name* wpisać etykietę portu (etykiety mają postać *p1*, *p2* itd.). W przypadku układu z Rys.1 port wejściowy powinien mieć etykietę *p1* natomiast port wyjściowy *p2*. Jeżeli nie podano inaczej to porty traktowane są jako 50 $\Omega$ -owe.

**Aby usunąć dowolny element ze schematu należy zaznaczyć go kursorem myszy (przycisnąć lewy klawisz myszy) i wcisnąć klawisz *Delete* klawiatury. Wpisania nowej wartości elementu można dokonać po dwukrotnym naciśnięciu lewego klawisza myszy gdy kursor jest umieszczony na wybranym elemencie. Zmiany położenia elementu można dokonać gdy po jego zaznaczeniu wybierze się opcję menu *Edit*→*Move* lub *Edit*→*Rotate*.**

### Analiza liniowa układu

Analizę liniową należy rozpocząć od zdefiniowania częstotliwości dla których analiza ma zostać przeprowadzona. W tym celu w oknie edycyjnym schematu należy umieścić blok sterujący *Linear Frequency* (opcja menu *Parts*→*Control Blocks*→*Linear Frequency*). W polu określającym zakres częstotliwości (parametr *Freq*) należy wpisać wyrażenie w formie: *ESTP f1 f2 n* co oznacza *n* punktów pomiarowych rozmieszczonych wykładniczo w przedziale częstotliwości od *f1* do *f2* (np. *ESTP 20MHz 2GHz 50*). Opcjonalnie można też wpisać wyrażenie w formie *STEP f1 f2  $\Delta f$*  co oznacza punkty pomiarowe rozmieszczone równomiernie w przedziale częstotliwości od *f1* do *f2* odległe od siebie o częstotliwość  $\Delta f$ .

Po umieszczeniu na schemacie bloku sterującego można przeprowadzić analizę liniową. Należy ustawić opcję analizy liniowej *Settings*→*Linear* a następnie uruchomić proces analizy *Analysis*→*Analysis*. Ustawienie opcji analizy liniowej i uruchomienie analizy można też przeprowadzić wykorzystując przyciski znajdujące się na tzw. paskach narzędzi.

Wyniki analizy można wyświetlić za pomocą edytora wykresów. Z menu programu należy wybrać opcję *Report*→*Report Editor*. Pojawi się okno o nazwie *Linear Analysis Report*, w którym trzeba wybrać odpowiedź układu (*Response*) oraz rodzaj funkcji

prezentowanej odpowiedzi (*Function*). Dla przykładu, by wyświetlić wartość bezwzględną parametru  $S_{21}$  macierzy rozproszenia w decybelach należy wybrać *Response – S21 i Function - dB()*. Następnie należy dodać przebieg do listy przebiegów (klawisz *Add*), utworzyć wykres (*Display*) i zamknąć okno dialogowe edytora wykresów (*Close*). Na jednym wykresie można również wyświetlić kilka różnych przebiegów, dodaje się je kolejno do listy przebiegów i dopiero wtedy tworzy wykres.

Po utworzeniu wykres można modyfikować. Wystarczy kursorem myszy wskazać element przeznaczony do modyfikacji i dwukrotnie szybko wcisnąć lewy klawisz myszy. Pojawi się okno dialogowe, w którym można zmienić parametry wyświetlania wykresu. Dla przykładu, by zmienić skalę częstotliwości z liniowej na logarytmiczną należy wskazać kursorem oś odciętych, dwukrotnie wcisnąć lewy klawisz myszy, w oknie dialogowym *Background Properties* wybrać przekładkę *Rescale* przełączyć wybór skali na logarytmiczną (*Log*), wprowadzić zmiany (*Apply*) i zamknąć okno dialogowe (*Close*).

Jeżeli utworzone okna zawierające wykresy nie zostaną zamknięte to będą one aktualizowane po każdej następnej optymalizacji lub analizie obwodu. Przełączanie pomiędzy oknami wykresów i oknem schematu obwodu możliwe jest dzięki liście okien w opcji *Window* w menu programu.

## **Optymalizacja liniowa układu**

Optymalizacja liniowa układu wymaga określenia, które wartości elementów mają podlegać optymalizacji oraz jakie są cele optymalizacji. Wymaga to wprowadzenia do schematu dwóch bloków sterujących oraz zamiany wpisanych wartości elementów na przypisane im nazwy zmiennych.

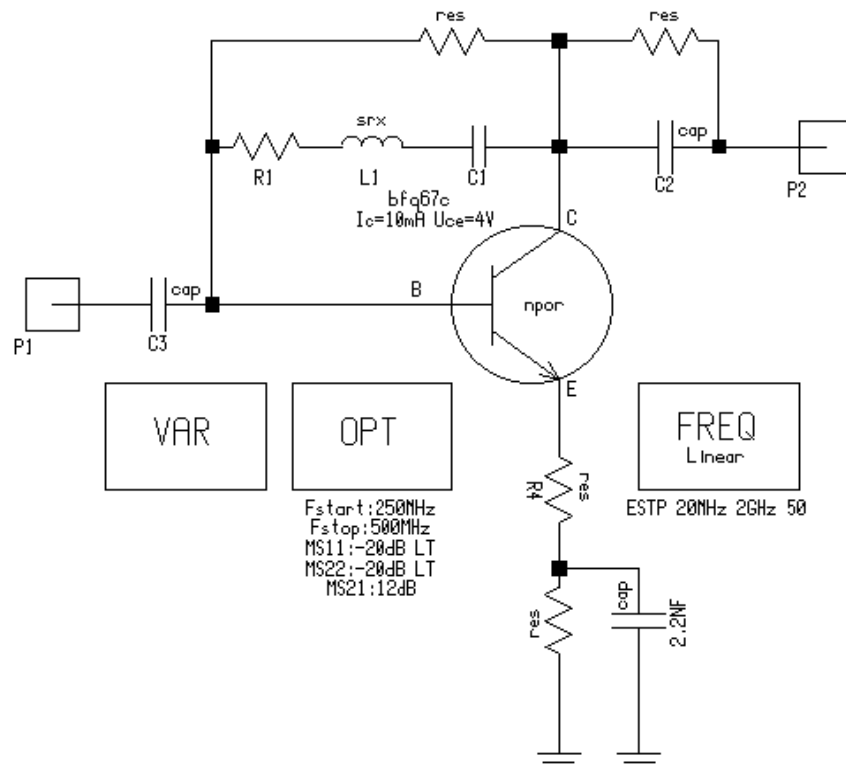
W przypadku układu z Rys.1 optymalizacji można poddać elementy R1, L1, C2 oraz R4. Można przyjąć, że wartości pojemności C1, C3 i C4 są równe i wynoszą 2.2nF. Uprości to proces optymalizacji i ewentualny, późniejszy proces montażu układu. Celem optymalizacji jest uzyskanie dobrego dopasowania wejścia i wyjścia wzmacniacza oraz odpowiedniego i możliwie płaskiego wzmocnienia w przedziale częstotliwości od 250 MHz do 0,5 GHz.

Aby zmienić wartość elementu na odpowiadającą mu zmienną należy wskazać kursorem myszy symbol elementu i dwukrotnie, szybko wcisnąć lewy klawisz myszy. Pojawi się okno dialogowe, w którym wartość elementu należy zastąpić nazwą zmiennej (najwygodniej jest stosować nazwy zmiennych takich jak nazwy elementów np. R1, L1, C2, itp.). Jeśli zależy nam aby kilka różnych elementów miało w układzie takie same wartości, wówczas można im przypisać tę samą nazwę zmiennej.

Wartości i zakresy wartości poszczególnych zmiennych trzeba zdefiniować w bloku sterującym *VAR (variables)*. W tym celu z menu programu należy wybrać opcję *Parts → Control Blocks → Variables* i używając myszy symbol bloku umieścić w wybranym miejscu okna edycyjnego schematu. Pojawi się okno dialogowe z tabelą. W kolumnie *Name* w poszczególnych wierszach należy wpisać nazwy wszystkich używanych nazw zmiennych. W kolumnie *Value* obok odpowiednich nazw zmiennych należy podać początkowe wartości tych elementów oraz zakresy wartości jakie zmienne mogą przyjmować.

Wartości zmiennych wpisuje się w formie *?z1 w1 z2?* gdzie *z1* i *z2* są wartościami minimalną i maksymalną zakresu zmienności a *w1* jest wartością zmiennej. Dla przykładu, jeżeli indukcyjności L1 przypisaliśmy zmienną L1 to w jednym z wierszy możemy wpisać *Name L1, Value ?1NH 15NH 50NH?*. W przypadku gdy zakres zmienności nie musi być ograniczony to wartość zmiennej zapisujemy w formie *?w1?*, gdzie *w1* jest wartością zmiennej. Jeżeli pojemności C2 przypisaliśmy zmienną C2 to w jednym z wierszy możemy

wpisać *Name C2, Value ?15PF?*. Jeżeli przy zapisie wartości zmiennej pominiemy znaki zapytania (?) to wartość zmiennej pozostanie stała w procesie optymalizacji.



Rys.2 Schemat połączeń układu przygotowanego do analizy i optymalizacji liniowej.

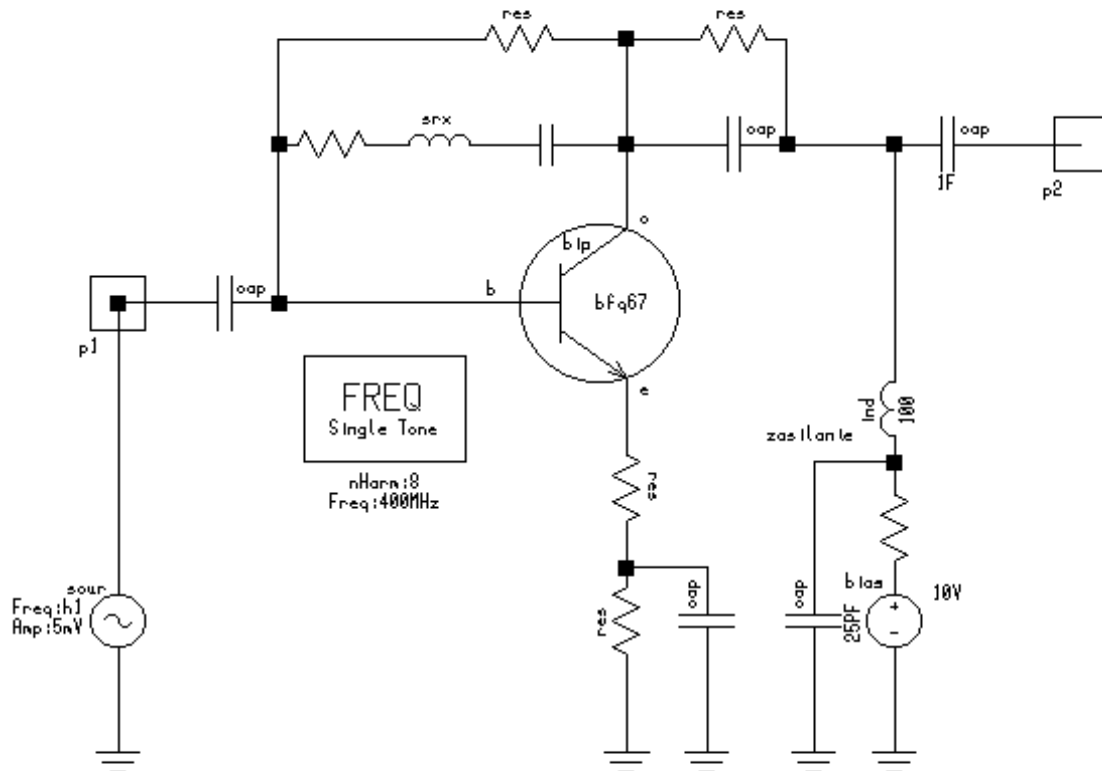
Cele optymalizacji podaje się w bloku *OPT*. (opcja *Parts*→*Control Blocks*→*Linear Optimization Info*). Po umieszczeniu bloku na schemacie pojawia się okno dialogowe *Linear Optimization*, w którym należy podać przedział częstotliwości optymalizacji oraz pożądane wartości parametrów obwodu. W przypadku zakładanych parametrów wzmacniacza należy w kolejnych wierszach podać: *Fstart 250MHz*, *Fstop 500MHz* oraz *MS11 -20dB LT*, *MS21 12dB*, *MS22 -20dB LT*. Znacznik *LT* oznacza, że wielkość powinna być mniejsza lub równa zadanej wartości (odpowiednikiem znaku większy lub równy jest znacznik *GT*).

Po umieszczeniu na schemacie bloków sterujących można przeprowadzić optymalizację liniową. Należy ustawić opcję analizy liniowej *Settings*→*Linear* a następnie uruchomić proces optymalizacji *Analysis*→*Optimization*. Ustawienie opcji analizy liniowej i uruchomienie analizy można też przeprowadzić wykorzystując przyciski „skrzynki narzędziowej”. Po wywołaniu optymalizacji pojawi się okno dialogowe, w którym należy ustawić parametry procesu optymalizacyjnego. Wygodnie jest przeprowadzić proces optymalizacji w dwóch etapach: optymalizacji losowej oraz gradientowej. W tym celu w oknie dialogowym należy wybrać opcję *Optimization Type: Random* oraz ustawić liczbę kroków np. *Iterations: 60*. Następnie należy wywołać pierwszy etap optymalizacji. W drugim etapie ustawiamy opcję optymalizacji gradientowej (*Optimization Type: Gradient*) z kilkunastoma krokami np. *Iterations: 15* i wywołujemy proces optymalizacji klawiszem *Optimize*.

Po przeprowadzeniu optymalizacji wartości zmiennych w bloku *VAR* powinny ulec zmianom. Aby sprawdzić efekt optymalizacji należy przeprowadzić ponowną analizę liniową charakterystyk  $|S_{11}|$ ,  $|S_{21}|$  i  $|S_{22}|$ . W przypadku gdyby otrzymane wyniki były niezadowolające należy wykonać kilka dodatkowych kroków optymalizacji.

## Analiza zniekształceń harmonicznych

Analiza zniekształceń nieliniowych wymaga znacznej modyfikacji układu. Należy usunąć ze schematu symbol modelu **liniowego** tranzystora i umieścić w tym samym miejscu symbol **nieliniowego** modelu tranzystora (*Parts*→*Device Library*) wybierając w oknie dialogowym *Device Library Selection* opcje: *nonlin*, *nnp*, *philips*, *bfq 67*. Schemat należy uzupełnić o elementy wymuszenia sinusoidalnego na wejściu układu oraz elementy zasilania (Rys.3), a także o blok sterujący analizy nieliniowej.



Rys.3 Schemat połączeń układu przygotowanego do analizy nieliniowej.

Do wejścia układu należy dołączyć wymuszenie sinusoidalne (*Parts*→*Sources*→*Sinusoidal RF Source*) o parametrach *Freq h1*, *Amp. 500mV*, *Option E*. Jest to wymuszenie napięciowe (*E*) o częstotliwości pierwszej harmonicznej (*h1*) i amplitudzie 500 mV.

Wyjście układu należy zmodyfikować włączając pomiędzy port i układ kondensator o dużej pojemności (np. *1F*). Odseparuje on port dla składowej stałej sygnału. Tranzystor należy zasilić odpowiednim układem zasilającym, który jednocześnie nie będzie miał wpływu na jego charakterystyki częstotliwościowe. Źródło zasilania (*Parts*→*Sources*→*DC Voltage Bias Source*) o parametrach *V 10V*, *Name Zasilanie* (wartości *R* nie wpisywać) należy dołączyć do układu poprzez indukcyjność (*Parts*→*Lumped*→*Inductors*→*Ideal (Constant R)*) o dużej wartości (np. 100 H) i zbornikować do masy niewielką pojemnością (np. 25 pF).

Częstotliwości dla których zostanie przeprowadzona analiza harmonicznnych definiuje się w bloku *FREQ Single Tone*. Po umieszczeniu tego bloku na schemacie (*Parts*→*Control Blocks*→*Nonlinear Frequency (Single Tone)*) należy w oknie dialogowym tego bloku



podać częstotliwość pierwszej harmonicznej oraz liczbę harmonicznych, dla których ma zostać przeprowadzona analiza (np. *Freq 400MHz, nHarm 8*).

Aby przeprowadzić analizę należy ustawić typ analizy (*Settings*→*Nonlinear*) i uruchomić proces analizy (*Analysis*→*Analysis*). W oknie dialogowym *Nonlinear Circuit Analysis* należy wybrać opcję *Regular* oraz zaznaczyć pole *Shaw Bias Point* a następnie wcisnąć klawisz *Analyze*. Ponieważ zostało zaznaczone pole *Shaw Bias Point* to w pierwszej fazie obliczony zostanie punkt pracy tranzystora. Obliczone wartości prądu kolektora i napięcia kolektor-emiter należy porównać z wartościami zakładanymi. W drugiej fazie analizy obliczone zostaną wielkości związane ze zniekształceniami nieliniowymi.

Wyniki analizy można wyświetlić za pomocą edytora wykresów. Z menu programu należy wybrać opcję *Report*→*Report Editor*. Pojawi się okno o nazwie *Nonlinear Analysis Report*, w którym trzeba wybrać odpowiedź układu (*Response*), rodzaj funkcji prezentowanej odpowiedzi (*Function*) oraz dziedzinę wykresu (*Domain*). Aby wyświetlić przebiegi czasowe napięć na wejściu i wyjściu układu należy wybrać *Response – V1* (napięcie na porcie *p1*), *Domain – Time*, *Function – None*, dodać przebieg do listy przebiegów (klawisz *Add*), następnie wybrać *Response – V2* (napięcie na porcie *p2*), dodać drugi przebieg do listy przebiegów (*Add*), utworzyć wykres (*Display*) i zamknąć okno dialogowe edytora (*Close*).

W analogiczny sposób można utworzyć wykres składowych harmonicznych napięcia na wyjściu układu. Z menu programu należy wybrać opcję *Report*→*Report Editor*. W oknie dialogowym *Nonlinear Analysis Report* trzeba wybrać odpowiedź układu *Response – V2* (napięcie na porcie *p2*), rodzaj funkcji prezentowanej odpowiedzi *Function – None*, dziedzinę wykresu *Domain – Spectral*, dodać przebieg do listy przebiegów (*Add*), utworzyć wykres (*Display*) i zamknąć okno dialogowe edytora (*Close*).

Dla układu wzmacniacza należy przeprowadzić kilka analiz dla różnych amplitud sygnału wymuszającego oraz dla sygnałów o częstotliwościach niższych niż pasmo wzmocnienia projektowanego wzmacniacza. Należy zaobserwować czy i w jakich warunkach sygnały te mogą być przyczyną zakłóceń.

Podobnie jak w przypadku wykresów analizy liniowej utworzone wykresy można modyfikować. Jeżeli utworzone okna zawierające wykresy nie zostaną zamknięte to będą one aktualizowane po wykonaniu każdej następnej analizy obwodu.

## Przebieg ćwiczenia

1. Narysuj obwód zastępczy układu dla składowej stałej prądu i napięcia oraz oblicz wartości rezystancji odpowiedzialnych za ustalenie punktu pracy tranzystora (przygotować przed rozpoczęciem zajęć).
2. Wprowadź schemat połączeń układu wzmacniacza z Rys.1 (z liniowym modelem tranzystora) odpowiednio definiując wartości wszystkich elementów (**wartości elementów dobrać zgrubnie przed rozpoczęciem zajęć**).
3. Przeprowadź analizę charakterystyk  $|S_{11}|$ ,  $|S_{21}|$  i  $|S_{22}|$  dla układu przed optymalizacją (częstotliwości od 20MHz do 2GHz).
4. Przeprowadź optymalizację układu w zakresie częstotliwości 250MHz–500MHz gdzie celem będzie  $|S_{21}| = 12\text{dB}$ ,  $|S_{11}| < -20\text{dB}$  i  $|S_{22}| < -20\text{dB}$ .
5. Zamień zoptymalizowane wartości elementów na najbliższe wartości z szeregu bezodpadowego.
6. Przeprowadź analizę charakterystyk  $|S_{11}|$ ,  $|S_{21}|$  i  $|S_{22}|$  układu po optymalizacji i określ czy są zadowalające.
7. Wprowadź schemat połączeń układu z nieliniowym modelem tranzystora i elementami o zoptymalizowanych wartościach.
8. Przeprowadź analizę zniekształceń harmoniczných zaprojektowanego układu dla różnych częstotliwości i różnych amplitud sygnału wymuszającego. Sygnały o jakich amplitudach mogą być wzmacniane przez układ? Sygnały o jakich częstotliwościach mogą zakłócać wzmacniane sygnały?
- 9\*. Zmierz charakterystyki  $|S_{11}|$ ,  $|S_{21}|$  i  $|S_{22}|$  liniowego modelu tranzystora BFQ 67 w układzie ze wspólnym emiterem (punkt pracy jak podano wcześniej, porty o impedancji  $50\Omega$ , zakres częstotliwości 10MHz-10GHz).