



Politechnika Łódzka
Katedra Mikroelektroniki i Technik Informatycznych
90-924 Łódź, ul. Wólczańska 221/223
tel. (42) 631 26 28 faks (42) 636 03 27
<http://www.dmcs.p.lodz.pl>

Laboratorium

KOMPUTEROWE PROJEKTOWANIE UKŁADÓW ELEKTRONICZNYCH

Wersja 4.01 (luty 2011)

Regulamin laboratorium (Tydzień 1)

1. Zaliczenia laboratorium odbywa się na podstawie pełnego sprawozdania zawierającego wszystkie ćwiczenia z własnymi uwagami i obliczeniami studenta oraz na podstawie ocen częściowych z subkolokwiiów przeprowadzanych przez prowadzącego zajęcia.
2. Laboratorium jest obowiązkowe w związku z czym jedna nieusprawiedliwiona nieobecność powoduje niezaliczenie przedmiotu.
3. Sprawdzenie przygotowania do zajęć może być przeprowadzone za pomocą kolokwium. W przypadku stwierdzenia nieprzygotowania do zajęć student usuwany jest z laboratorium. Przewidziany jest jeden termin poprawkowy na odrobienie ćwiczeń.
4. W czasie laboratorium mogą przebywać wyłącznie osoby prowadzące zajęcia lub bezpośrednio związane z obsługą laboratorium.
5. Praca w katalogu innym niż własny jest zabroniona.
6. Otwieranie zbiorów innych niż własne powoduje natychmiastowe usunięcie z zajęć.
7. Praca w laboratorium odbywa się za pomocą komputerów połączonych w sieć. Usiłowanie samodzielnej zmiany przydzielonych zasobów, łamanie lub korzystanie z cudzych haseł powoduje skreślenie z laboratorium.

SYMULACJA UKŁADÓW ELEKTRONICZNYCH Z ZASTOSOWANIEM PROGRAMU PSPICE

Spis treści

Regulamin laboratorium (Tydzień 1).....	1
Spis treści	2
Ćwiczenie 1 (Tydzień 2, 3, 4, 5, 6) Podstawy opisu i analizy obwodów w programie SPICE	4
Zadanie 1.1 (Tydzień 2) Obwód RC	4
Zadanie 1.2a (Tydzień 3) Obwód RCEF	5
Zadanie 1.2b (Tydzień 4) Obwód RCEF	6
Zadanie 1.3 (Tydzień 5) Obwód RD	7
Zadanie 1.4 (Tydzień 6) Obwody RLC.....	8
Ćwiczenie 2 (Tydzień 7) Tranzystory	10
Zadanie 2.1 (Tydzień 7, opcja 1) Obwody z tranzystorami	10
Zadanie 2.2 (Tydzień 7, opcja 2) Tranzystor JFET	12
Zadanie 2.3 (Tydzień 7, opcja 3) Tranzystor MOS-FET	13
Zadanie 2.4 (Tydzień 7, opcja 4) Tranzystor bipolarny	14
Projekt 1 (Tydzień 8) Tranzystorowy wzmacniacz o zadanych parametrach	17
Ćwiczenie 3 (Tydzień 9, 10) Wzmacniacze operacyjne	18
Zadanie 3.1 (Tydzień 9) Obwody ze wzmacniaczami operacyjnymi.....	18
Zadanie 3.2 (Tydzień 10) Obwody ze wzmacniaczami operacyjnymi.....	19
Projekt 2 (Tydzień 11, 12) Filtr analogowy	20
Projekt 3 (Tydzień 13) Układy analogowe	21
Projekt 3.1 (Tydzień 13, opcja 1) Zasilacz (obwód magnetyczny).	21
Projekt 3.2 (Tydzień 13, opcja 2) Dławikowa przetwornica DC-DC (analiza TR).....	22
Projekt 3.3 (Tydzień 13, opcja 3) Układ napięcia odniesienia pracujący na zasadzie wykorzystania pasma zabronionego.....	24
Projekt 3.4 (Tydzień 13, opcja 4) Przerzutnik Schmitta.	25
Ćwiczenie 4 (Tydzień 14, opcja 1) Układy CMOS.....	26
Zadanie 4.1 (Tydzień 14, opcja 1.1) Symulacja inwertera wykonanego w technologii CMOS.....	26
Zadanie 4.2 (Tydzień 14, opcja 1.2) Układ z zastosowaniem inwerterów.	27
Zadanie 4.3 (Tydzień 14, opcja 1.3) Bramka NAND.....	28
Zadanie 4.4 (Tydzień 14, opcja 1.4) Przerzutnik RS.	28
Ćwiczenie 5 (Tydzień 14, opcja 2) Dynamiczne układy MOS	29
Ćwiczenie 6 (Tydzień 14, opcja 3) Analogowe zastosowania tranzystorów MOS.....	31
Zadanie 6.1 (Tydzień 14, opcja 3) Wzmacniacz operacyjny z tranzystorami MOS	31
Ćwiczenie 7 (Tydzień 14, opcja 4) Układy cyfrowe	33
Zadanie 7.1 (Tydzień 14, opcja 4) Cyfrowy generator przebiegu schodkowego	33
Dodatek 1. Modele elementów (wzmacniacze operacyjne)	35
Dodatek 2. Filtry analogowe	39
Dodatek 3. Współczynniki dla różnych typów filtrów.....	44
Dodatek 4. Zwięzły opis programu PSpice	48
1. Opis obwodu	48
Wpisywanie dodatkowych parametrów elementów	50
2. Opisywanie źródeł niezależnych	51
• Dziedzina DC	52
• Dziedzina AC	52
• Dziedzina TR	52
3. Instrukcje sterujące.....	54
a) Instrukcja .MODEL	54
b) Instrukcja .SUBCKT	55
4. Analizy w programie PSpice.....	56
a) Wyznaczenie punktu pracy	56
b) Analiza statyczna	56

c)	Analiza małosygnałowa	56
d)	Analiza stanów przejściowych.....	57
5.	Wyniki obliczeń	57
	Funkcje sygnałów dostępne przy użyciu .PROBE.....	57
6.	Wybrane analizy dodatkowe	58
a)	Zmiana temperatury	58
b)	Obliczanie wrażliwości.....	58
c)	Analiza Fouriera.....	59
d)	Definiowanie punktów startowych i warunków początkowych.....	59
e)	Analiza szumowa	59
f)	Analiza Monte Carlo	60
g)	Analiza najgorszego przypadku (Worst Case).....	60
	Literatura.....	61

Ćwiczenie 1 (Tydzień 2, 3, 4, 5, 6) Podstawy opisu i analizy obwodów w programie SPICE

Cel: Zapoznanie ze składnią języka SPICE, wykorzystanie elementów RCLEFD oraz instrukcji analiz: .DC, .AC, .TRAN, .TF, korzystanie z bibliotek - model diody

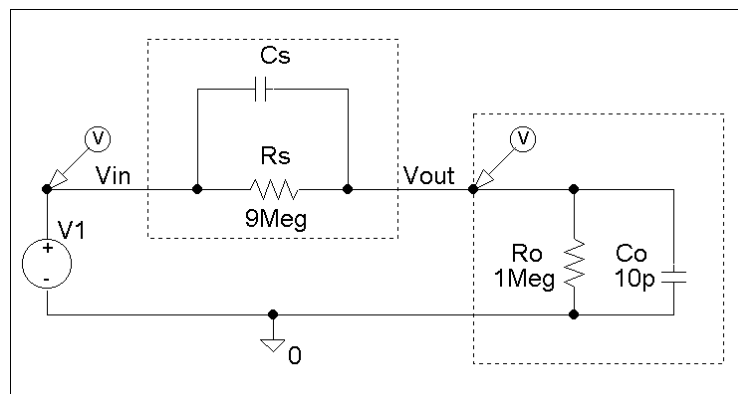
Wymagania: Wiedza na temat podstaw opisu obwodów w języku Spice (zgodnie z podaną literaturą podstawową). Wiedza z zakresu podstaw elektrotechniki - rozwiązywanie obwodów liniowych oraz nieliniowych (dioda półprzewodnikowa).

Literatura uzupełniająca:

Zadanie 1.1 (Tydzień 2) Obwód RC

Opisać za pomocą instrukcji programu Spice obwód pokazany na rysunku 1.1.1. Jest to uproszczony model obwodu wejściowego oscyloskopu (R_o , C_o) wraz z dzielnikiem 1:10 (R_s , C_s). Na wstępie przyjąć $C_s=0\text{pF}$.

- ANALIZA DC:** Wykreślić napięcie V_{out} w funkcji napięcia V_1 zmieniającego się w zakresie -10V do 10V z krokiem 0,1V. **Sprawozdanie:** 1) zamieścić odpowiedni wykres, 2) wyznaczyć graficznie wzmocnienie napięciowe układu $k_v=V_{out}/V_1$
- ANALIZA AC:** Wykonać analizę amplitudową i fazową w zakresie 10Hz do 1000MegHz (101 punktów na dekadę) przyjmując $C_s=1\text{pF}$ i 10pF . Na podstawie wykresów zinterpretować, jaką rolę pełni pojemność C_s . **Sprawozdanie:** 1) zamieścić odpowiedni wykres (dwa przebiegi na jednym rysunku), 2) podać częstotliwość graniczną obwodu (zaznaczyć na wykresie) i metodę jej wyznaczania, 3) skorzystać z funkcji wbudowanych programu „Probe” w celu obliczenia częstotliwości granicznej i porównać z wartością wyznaczoną graficznie
- PROJEKT I:** Wyjaśnić za pomocą odpowiednich przebiegów (analiza AC) znaczenie elementu C_s i na podstawie obliczeń zaproponować jego wartość tak, aby charakterystyka amplitudowa w węzle V_{out} była płaska w jak największym zakresie. **Sprawozdanie:** 1) zamieścić obliczenia optymalnej wartości kondensatora C_s .
- ANALIZA TRAN:** Podać na wejście obwodu przebieg prostokątny dla $C_s=1\text{pF}$, 10pF i na podstawie obliczeń Projektu I. **Sprawozdanie:** 1) zamieścić odpowiedni wykres analizy AC oraz TRAN jako dowód poprawności obliczeń
- PROJEKT II:** Zmodyfikować wartości elementów R_s i C_s tak, aby współczynnik podziału wynosił 1:50. **Sprawozdanie:** 1) zamieścić odpowiedni wykres analizy AC i analizy TRAN, 2) zamieścić obliczenia optymalnej wartości kondensatora C_s .

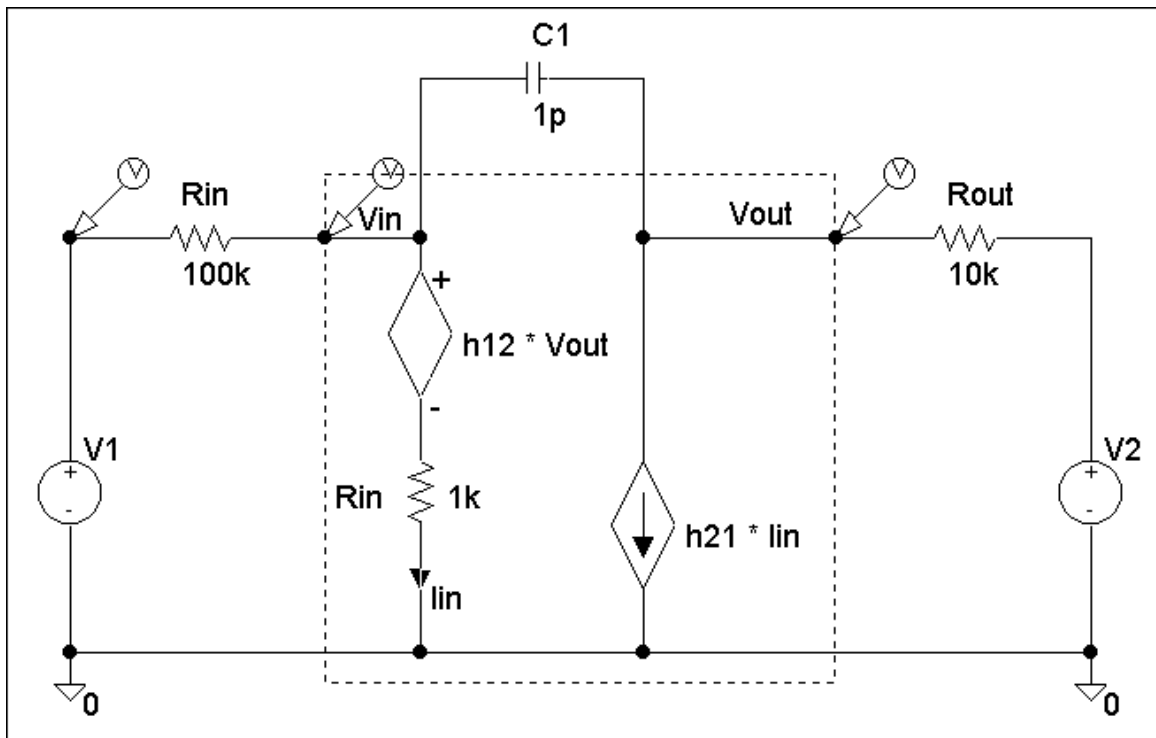


Rysunek 1.1.1

Zadanie 1.2a (Tydzień 3) Obwód RCEF

Opisać za pomocą instrukcji programu Spice obwód pokazany na rysunku 1.2.1. Zgodnie z rysunkiem użyć źródła napięciowego sterowanego napięciem i prądowego sterowanego prądem. Na wstępie przyjąć $V2=10V$, $h21=100$, $h12=0,01$, $C1=0$.

- ANALIZA DC:** Wykreślić napięcie V_{out} w funkcji napięcia $V1$ zmieniającego się w zakresie $-5V$ do $10V$ z krokiem $0,1V$. **Sprawozdanie:** 1) zamieścić odpowiedni wykres, 2) wyznaczyć graficznie wzmocnienie napięciowe układu $k_v=V_{out}/V1$
- ANALIZA AC:** Wykonać analizę amplitudową i fazową w zakresie $100Hz$ do $100MHz$ (101 punktów na dekadę) przyjmując $C1=1pF$ i $10pF$. Na podstawie wykresów zinterpretować, jaką rolę pełni pojemność $C1$ - powiązać jej działanie z funkcją pełnioną przez napięciowe źródło sterowane i współczynnik $h12$. **Sprawozdanie:** 1) zamieścić odpowiedni wykres, 2) podać częstotliwość graniczną obwodu (zaznaczyć na wykresie) i metodę jej wyznaczania, 3) skorzystać z funkcji wbudowanych Probe w celu obliczenia częstotliwości granicznej i porównać z wyznaczoną graficznie częstotliwością graniczną
- PROJEKT I DC:** Wykonać obliczenia obwodu - zaproponować zmianę wartości jednego z parametrów (np.: R_{out} , $h21$) tak, aby $k_v=80$. Obliczenia własne zweryfikować obliczeniami funkcji przenoszenia w symulatorze. **Sprawozdanie:** 1) zamieścić odpowiedni wykres, 2) zamieścić obliczenia
- PROJEKT II AC:** Do węzłów V_{in} oraz zerowego dołączyć kondensator $C2$. Kondensator $C1=0pF$. Dobrać pojemność kondensatora $C2$ tak, aby częstotliwość graniczna obwodu była taka sama jak dla $C1=10pF$. Jaki jest związek stosunku tak otrzymanej wartości pojemności $C2$ do $C1$ ($C2/C1$) z parametrami obwodu (np. wzmocnieniem napięciowym, prądowym itp.). **Sprawozdanie:** 1) zamieścić odpowiedni wykres, 2) zamieścić obliczenia.



Rysunek 1.2.1

Zadanie 1.2b (Tydzień 4) Obwód RCEF

Opisać za pomocą instrukcji programu Spice obwód pokazany na rysunku 1.2.1. Zgodnie z rysunkiem użyć źródła napięciowego sterowanego napięciem i prądowego sterowanego prądem. Na wstępie przyjąć $V_2=10V$, $h_{21}=100$, $h_{12}=0,01$, $C_1=0pF$.

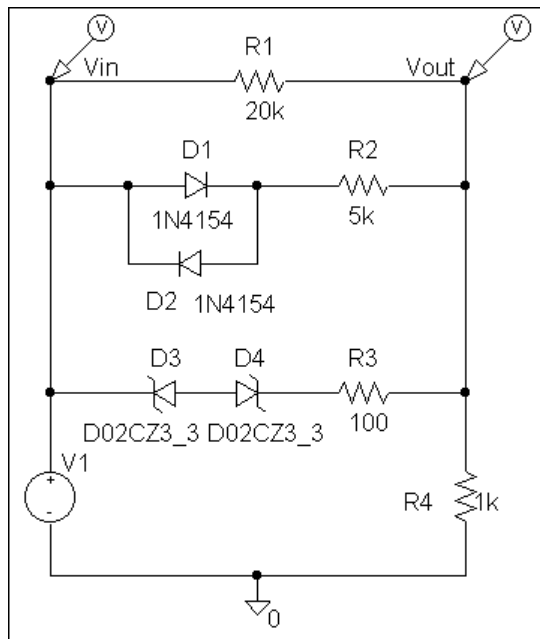
- a) Wrażliwość: Z pomocą instrukcji analizy wrażliwości - SENS oszacować, które elementy i w jakim stopniu mają największy wpływ na zmianę napięcia V_{out} . **Wskazówka:** wyniki należy odczytać z pliku *.out
Sprawozdanie: 1) zamieścić odpowiedni wydruk, 2) wyjaśnić przydatność analizy wrażliwości.
- b) Funkcja przenoszenia: Z pomocą instrukcji TF zbadać: wzmocnienie napięciowe obwodu $k_v=V_{out}/V_{in}$, wzmocnienie prądowe $k_i=I_{out}/I_{in}$, transrezystancję $tr=U_{out}/I_{in}$ i transkonduktancję $tg=I_{out}/U_{in}$. Jaki wpływ na rezystancję wejściową obwodu widzianą w węzle V_{in} i na rezystancję wyjściową widzianą w węzle V_{out} ma zmiana parametru h_{21} i h_{12} ? Wyjaśnić zachowanie układu dla h_{12} dążącego do 0 oraz $\pm$ nieskończoności. **Wskazówka:** 1) obwód należy zmodyfikować, 2) wyniki należy odczytać z pliku *.out. **Sprawozdanie:** 1) zamieścić odpowiedni wydruk, 2) obliczenia wykonane z pomocą funkcji przenoszenia zweryfikować obliczeniami własnymi (wyprowadzić odpowiednie wzory, wykonać obliczenia).
- c) PROJEKT: Korzystając z wyników uzyskanych z analizy wrażliwości zaproponować zmianę wartości jednego z parametrów (np.: R_{out} , h_{21}) tak, aby $k_v=50$. Obliczenia własne zweryfikować obliczeniami funkcji przenoszenia w symulatorze. **Sprawozdanie:** 1) zamieścić odpowiedni wykres, 2) należy zamieścić dokładny sposób obliczeń.

Zadanie 1.3 (Tydzień 5) Obwód RD

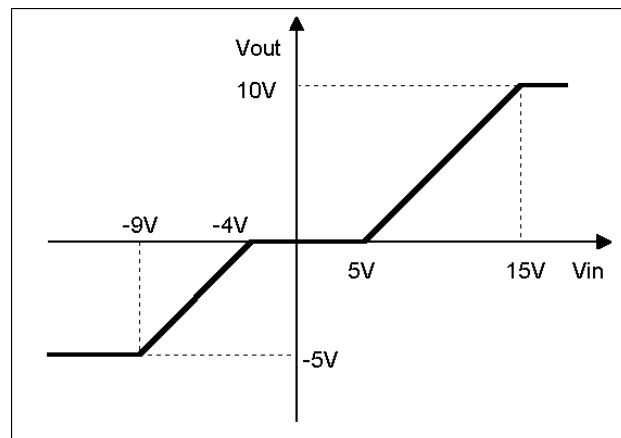
Opisać za pomocą instrukcji programu Spice obwód pokazany na rysunku 1.3.1.

- ANALIZA DC:** Wykreślić napięcie V_{out} w funkcji napięcia V_{in} zmieniającego się w zakresie $-5V$ do $5V$ z krokiem $0,05V$. Wyjaśnić sposób działania obwodu i znaczenie poszczególnych elementów w kształtowaniu charakterystyki $V_{out}(V_{in})$. **Sprawozdanie:** 1) zamieścić odpowiedni wykres, 2) wymienić zalety i ograniczenia w stosowaniu obwodu.
- PROJEKT I:** Wykonać obwód kształtujący napięcie wyjściowe zgodnie z rysunkiem 1.3.2 z dokładnością $\pm 5\%$. **Uwaga:** Użyć elementów zgodnych z typoszeregiem **E6** (elementy o modelach dostępnych w bibliotekach lub modyfikowane za pomocą odpowiednich parametrów), czyli: 1,0, 1,5, 2,2, 3,3, 4,7, 6,8. **Sprawozdanie:** 1) zamieścić odpowiedni wykres, 2) wymienić zalety i ograniczenia w stosowaniu obwodu.
- PROJEKT II:** wykonać "przetwornik": przebieg trójkątny - aproksymowany sinus (należy użyć analizy wielkosygnałowej .TRAN oraz wymuszenia w postaci przebiegu trójkątnego np. PULSE). **Sprawozdanie:** 1) zamieścić odpowiedni wykres, 2) wymienić zalety i ograniczenia w stosowaniu obwodu.

UWAGA: W celu wykonania zadania należy samodzielnie zmodyfikować model diody D1N4148 (lub zbudować własny model w oparciu o domyślne parametry diody półprzewodnikowej), aby pełnił on funkcję stabilizatora o wymaganych parametrach napięcia przebicia.



Rysunek 1.3.1

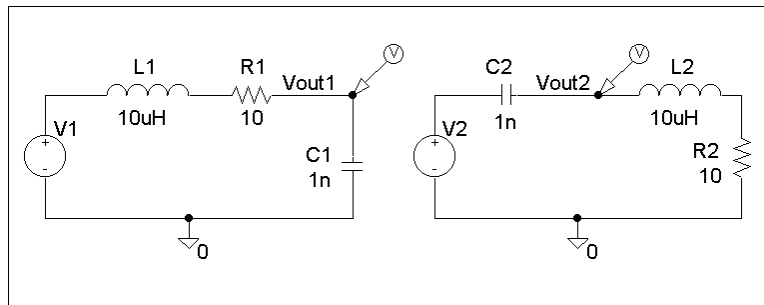


Rysunek 1.3.2

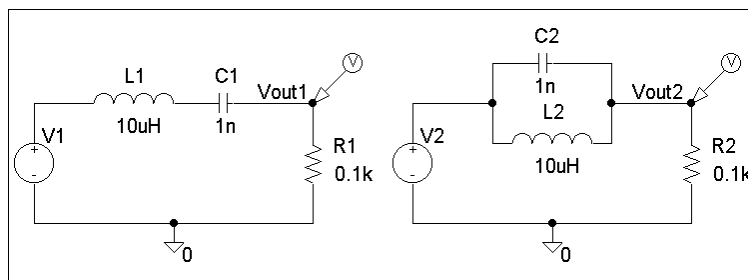
Zadanie 1.4 (Tydzień 6) Obwody RLC

Opisać za pomocą instrukcji programu Spice obwody pokazane na rysunku 1.4.1a i 1.4.1b.

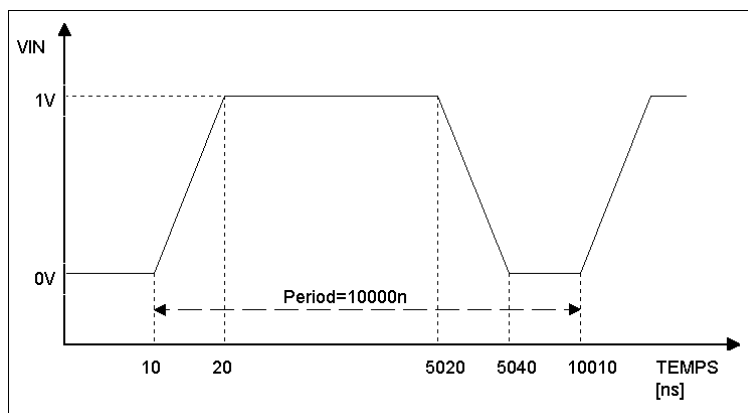
- ANALIZA AC:** Wykreślić charakterystyki amplitudowe i fazowe obwodów w zakresie 100Hz do 1000MHz (101 punktów na dekadę). **Sprawozdanie:** zamieścić odpowiedni wykres
- ANALIZA TRAN:** Wykonać analizę wielkosygnałową o wymuszeniu zgodnym z rysunkiem 1.4.2. Posługując się uzyskanymi wykresami wykazać związek między odpowiedzią w funkcji czasu i częstotliwości. **Sprawozdanie:** zamieścić odpowiedni wykres
- PROJEKT I:** Posługując się odpowiednimi wykresami (po zmianie wartości odpowiednich elementów w poszczególnych obwodach) wyjaśnić pojęcie dobroci obwodu rezonansowego i pojęcia pasma przenoszenia (tłumienia) oraz częstotliwości granicznej filtru. Wykazać różnice w zachowaniu obwodów (wartości napięć i prądów na poszczególnych elementach) z rezonansem szeregowym i równoległym. **Sprawozdanie:** 1) zamieścić odpowiedni wykres, 2) wymienić zalety i ograniczenia w stosowaniu obwodu.
- PROJEKT II:** Przebadać obwód z rysunku 1.4.3a. Należy wyjaśnić jego działanie traktując go jako złożenie filtrów z rysunku 1.4.1a. Na czym polega różnica w jego działaniu w porównaniu z filtrem z rysunku 1.4.1b? **Sprawozdanie:** 1) zamieścić odpowiedni wykres, 2) wymienić zalety i ograniczenia w stosowaniu obwodu.
- PROJEKT III:** Przebadać filtry typu T i Π z rysunku 1.4.3b. Wyjaśnić konieczność wstawienia dodatkowego rezystora R_d w filtrze Π . Wykreślić charakterystyki fazowe obu filtrów. Jaka jest najważniejsza różnica między nimi? **Sprawozdanie:** 1) zamieścić odpowiedni wykres, 2) wymienić zalety i ograniczenia w stosowaniu obwodu.



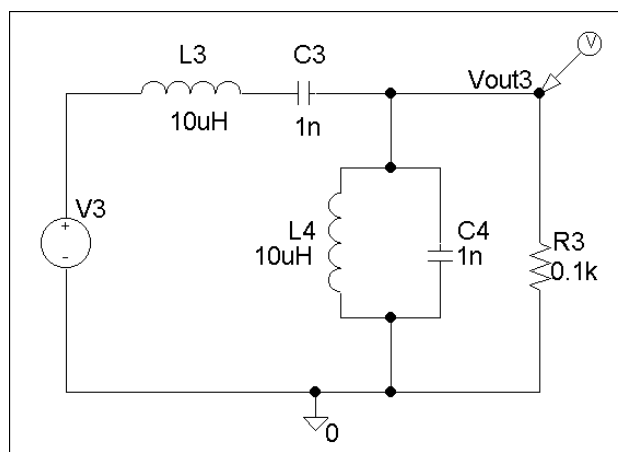
Rysunek 1.4.1a



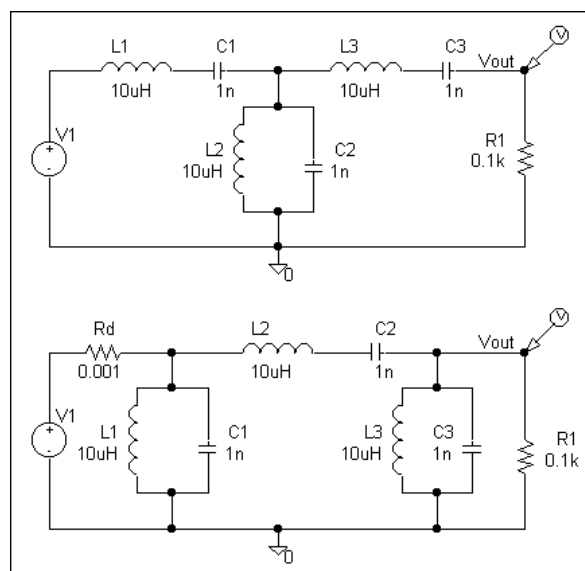
Rysunek 1.4.1b



Rysunek 1.4.2



Rysunek 1.4.3a



Rysunek 1.4.3b

Ćwiczenie 2 (Tydzień 7) Tranzystory

Zadanie 2.1 (Tydzień 7, opcja 1) Obwody z tranzystorami

Opisać za pomocą instrukcji programu Spice obwody pokazane na rysunku 2.1.1, 2.1.2, 2.1.3

- a) Charakterystyki wyjściowe tranzystora JFET. Narysować na wspólnym wykresie i porównać charakterystyki wyjściowe tranzystora JFET, którego model ma następujące parametry:

Model 1

```
.MODEL XJFET NJF      VTO=-3V      BETA=1E-4      LAMBDA=2E-2
+                      CGS=2PF      CGD=2PF      PB=1V      IS=1E-14
```

i charakterystyki tranzystora JFET dla modelu wbudowanego w program PSPICE:

Model 2

```
.MODEL XJDEF NJF
```

Napięcie VDS zmienia się od 0 do 25 V z krokiem 0,5V.

Napięcie VGS zmienia się od -2 do 1V z krokiem 1,0V.

Rysunek 2.1.1 przedstawia układ potrzebny do wykonania symulacji.

Sprawozdanie: zamieścić odpowiedni wykres

- b) Tranzystor MOS-FET. Charakterystyki wyjściowe tranzystora MOS-FET dla trzech różnych wartości parametrów modelu.

Model MOD1:

```
.MODEL MOD1 NMOS      VTO=-1V      NSUB=1E15      UO=550
```

Model MOD2:

```
.MODEL MOD2 NMOS      LEVEL=2
+  VTO=-1.3           KP=4.64E-5      GAMMA=0.284      PHI=0.6
+  CJ=1.38E-4         TOX=6.5E-8      NSUB=6.84E14     XJ=0.5E-6
+  LD=0.35E-6         UO=875          UCRIT=6.0E4      UEXP=0.15
+  UTRA=0.5           CGSO=1.85E-10   CGDO=1.85E-10
+  JS=1E-7            VMAX=2.5E4      DELTA=1
```

Model MOD3:

```
.MODEL MOD3 NMOS
```

Napięcie VDS zmienia się od 0 do 20V z krokiem 0,2V.

Napięcie VGS zmienia się od 0 do 5V z krokiem 1,0V

Rysunek 2.1.2 przedstawia układ potrzebny do wykonania symulacji.

Sprawozdanie: zamieścić odpowiedni wykres

- c) Tranzystor bipolarny. Narysować i porównać charakterystyki wyjściowe tranzystora bipolarnego w układzie połączeń pokazanym na rysunku 2.1.3 dla trzech różnych wartości parametrów modelu:

Model BUX48

```
.MODEL BUX48 NPN
+ IS=1.7E-10      BF=40      VAF=800      IKF=2.5      ISE=10U      NE=4 BR=2
+ ISC=10U         NC=4      RB=0.7      RE=0.02      RC=0.12
+ CJE=715P       VJE=1.89   MJE=0.586   TF=0.17NS
+ CJC=189P       VJC=0.986   MJC=0.428   TR=1100NS
+ CJS=125P       EG=1.11    XTI=3.0     KF=0          AF=1          FC=0.5
```

Model Q2N5109

.MODEL Q2N5109 NPN

+ IS=5E-15	ISE=10NA	NE=4	ISC=10NA	NC=4
+ BF=90	IKF=0.2A	VAF=240	CJC=5PF	CJE=10PF
+ RB=0.25	RE=0.25	RC=1.5	TF=0.1NS	TR=20NS
				KF=1E-15

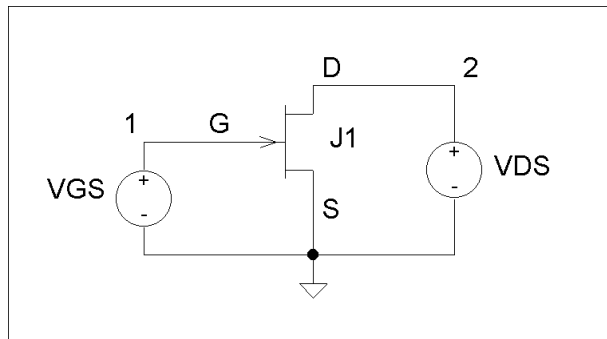
Model MOD3

.MODEL MOD3 NPN

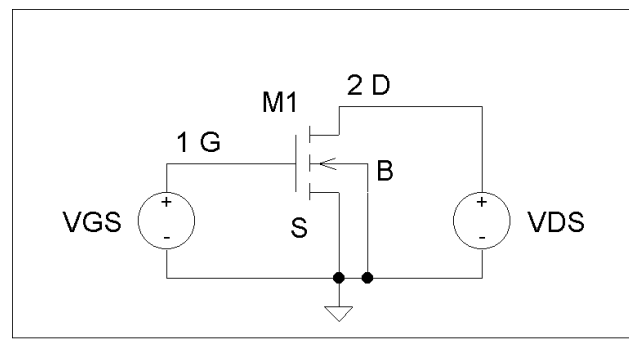
Rysunek 2.1.3 przedstawia układ potrzebny do wykonania symulacji.

PROJEKT: Samodzielnie dobrać wymagane wartości prądów i napięć do symulacji.

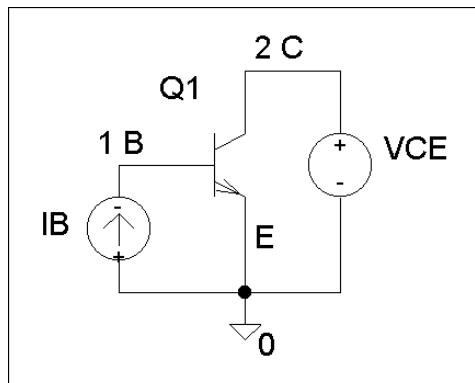
Sprawozdanie: zamieścić odpowiedni wykres



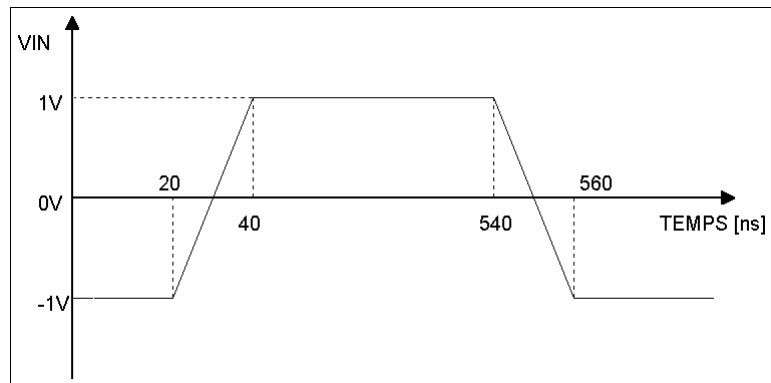
Rysunek 2.1.1



Rysunek 2.1.1



Rysunek 2.1.3



Rysunek 2.1.4

Zadanie 2.2 (Tydzień 7, opcja 2) Tranzystor JFET

2.2.1 Charakterystyki wyjściowe tranzystora JFET

Narysować na wspólnym wykresie i porównać charakterystyki wyjściowe tranzystora JFET, którego model ma następujące parametry:

```
.MODEL XJFET NJF      VTO= -3V      BETA=1E-4      LAMBDA=2E-2
+                      CGS=2PF      CGD=2PF      PB=1V      IS=1E-14
```

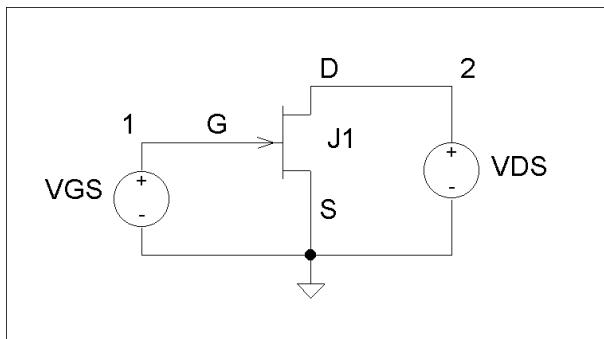
i charakterystyki tranzystora JFET dla modelu wbudowanego w program PSPICE

```
.MODEL XJDEF NJF
```

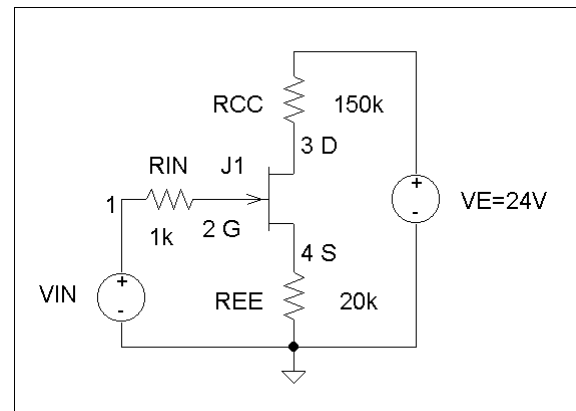
Napięcie VDS zmienia się od 0 do 25 V z krokiem 0,5V.

Napięcie VGS zmienia się od -2 do 1V z krokiem 1,0V.

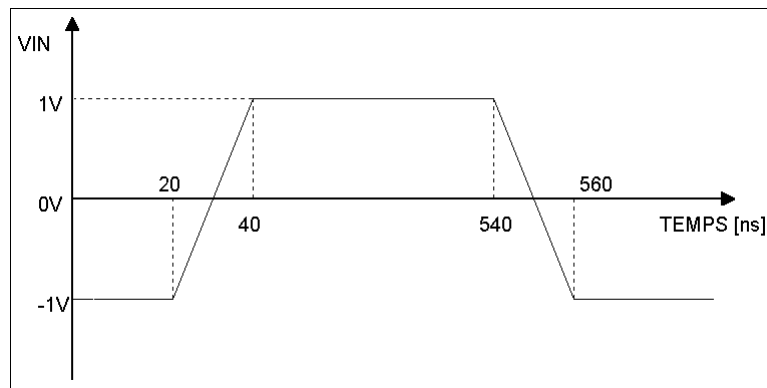
Rysunek 2.1.1 przedstawia układ potrzebny do wykonania symulacji.



Rysunek 2.1.1



Rysunek 2.2.1



Rysunek 2.2.2

2.2.2. Analiza układu zawierającego tranzystor JFET

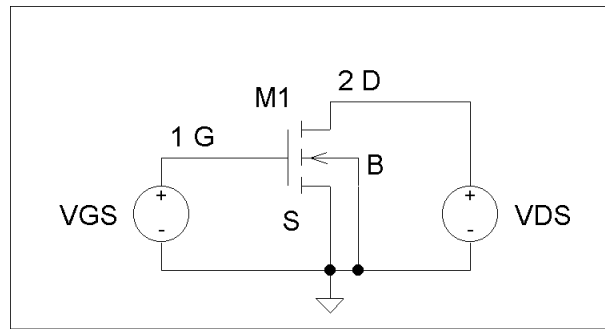
Na rysunku 2.2.1 przedstawiono układ elektroniczny zawierający tranzystor JFET.

- ANALIZA DC: Wykreślić na wspólnym rysunku charakterystyki przejściowe obu tranzystorów JFET (napięcie $V(3)$ w funkcji napięcia V_{IN}). Napięcie V_{IN} zmienia się od $-0,5V$ do $10,0V$ z krokiem $0,2V$.
- ANALIZA AC: Wykonać analizę AC od $100Hz$ do $1000MHz$ w skali logarytmicznej z 101 punktami na dekadę. W oparciu o analizę AC wyjaśnić jaki wpływ na pracę układu ma rezystor R_{IN} .
- ANALIZA TR: Wykonać analizę TR od 0 do $1,0E-6s$ z krokiem $0,02E-6s$ przy sygnale wejściowym pokazanym na rysunku 2.2.2
- PROJEKT: W oparciu o układ połączeń z rysunku 2.2.1 obliczyć, a następnie zweryfikować poprawność obliczeń odpowiednimi symulacjami w programie Spice, wzmacniacz o punkcie pracy i wzmocnieniu napięciowym ustalonym z prowadzącym zajęcia.

Uwaga: Analiza a), b) i c) powinna być wykonana przy pomocy jednego programu, a krzywe powinny być porównane i skomentowane na jednym rysunku.

Zadanie 2.3 (Tydzień 7, opcja 3) Tranzystor MOS-FET

- 2.3.1. Charakterystyki wyjściowe tranzystora MOS-FET dla trzech różnych wartości parametrów modelu. Rysunek 2.3.1.1 przedstawia układ potrzebny do wykonania symulacji.



Rysunek 2.3.1.1

- MODEL MOD1:

```
.MODEL MOD1 NMOS      VTO=-1V      NSUB=1E15      UO=550
```
- MODEL MOD2:

```
.MODEL MOD2 NMOS      LEVEL=2
+      VTO=-1.3        KP=4.64E-5      GAMMA=0.284      PHI=0.6
+      CJ=1.38E-4      TOX=6.5E-8      NSUB=6.84E14     XJ=0.5E-6
+      LD=0.35E-6      UO=875         UCRIT=6.0E4      UEXP=0.15
+      UTRA=0.5         CGSO=1.85E-10   CGDO=1.85E-10
+      JS=1E-7          VMAX=2.5E4      DELTA=1
```
- MODEL MOD3:

```
.MODEL MOD3 NMOS
```

Napięcie V_{DS} zmienia się od 0 do 20V z krokiem $0,2V$.

Napięcie V_{GS} zmienia się od 0 do 5V z krokiem $1,0V$.

2.3.2. Analiza układu zawierającego tranzystor MOS-FET.

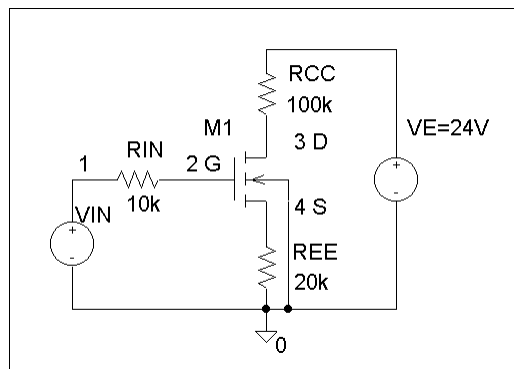
Na rysunku 2.3.2.1 przedstawiono układ elektroniczny zawierający tranzystor MOSFET. Wykonaj następujące symulacje.

- ANALIZA DC: Wykreślić na wspólnym rysunku charakterystyki przejściowe trzech tranzystorów MOS (napiecie $V(3)$ w funkcji napięcia VIN). Napięcie VIN zmienia się od 5,0V do 5,0V z krokiem 0,2V.
- ANALIZA TR: Wykonać analizę TR od 0 do 1,0E-6s z krokiem 0,02E-6s przy sygnale wejściowym z rysunku 2.2.3. Wykreślić krzywe na wspólnym rysunku.
- ANALIZA AC: Wykonać analizę AC od 100Hz do 1000MegHz w skali logarytmicznej z 101 punktami na dekadę.
- PROJEKT: W oparciu o układ połączeń z rysunku 2.3.2.1 obliczyć, a następnie zweryfikować poprawność obliczeń odpowiednimi symulacjami w programie Spice, wzmacniacz o punkcie pracy i wzmocnieniu napięciowym ustalonym z prowadzącym zajęcia.

Uwaga:

Analiza a) i b) powinna być wykonana przy pomocy jednego programu, a krzywe powinny być porównane i skomentowane na wspólnym rysunku.

Analiza c) powinna być wykonana przy pomocy jednego programu dla wszystkich modeli tranzystorów, a krzywe powinny być porównane i skomentowane na jednym rysunku.



Rysunek 2.3.2.1

Zadanie 2.4 (Tydzień 7, opcja 4) Tranzystor bipolarny

- 2.4.1. Narysować i porównać charakterystyki wyjściowe tranzystora bipolarnego w układzie połączeń pokazanym na rysunku 2.4.1.1 dla trzech różnych wartości parametrów modelu:

- a) model BUX48

.MODEL BUX48 NPN

+ IS=1.7E-10 BF=40 VAF=800 IKF=2.5 ISE=10U NE=4 BR=2

+ ISC=10U NC=4 RB=0.7 RE=0.02 RC=0.12

+ CJE=715P VJE=1.89 MJE=0.586 TF=0.17NS

+ CJC=189P VJC=0.986 MJC=0.428 TR=1100NS

+ CJS=125P EG=1.11 XTI=3.0 KF=0

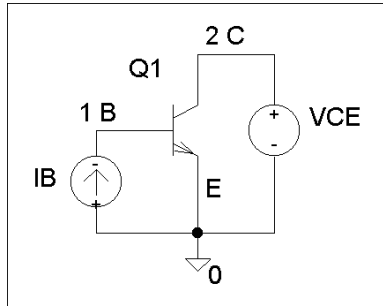
+ AF=1 FC=0.5

b) model Q2N5109

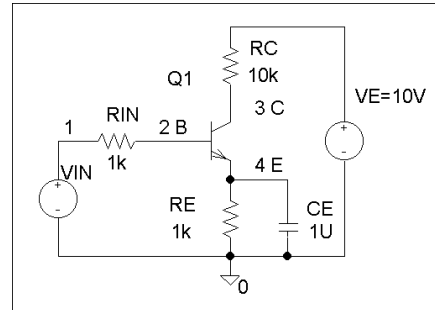
```
.MODEL Q2N5109 NPN
+ IS=5E-15 ISE=10NA NE=4 ISC=10NA NC=4
+ BF=90 IKF=0.2A VAF=240 CJC=5PF CJE=10PF
+ RB=0.25 RE=0.25 RC=1.5 TF=0.1NS TR=20NS
+ KF=1E-15
```

c) model MOD3

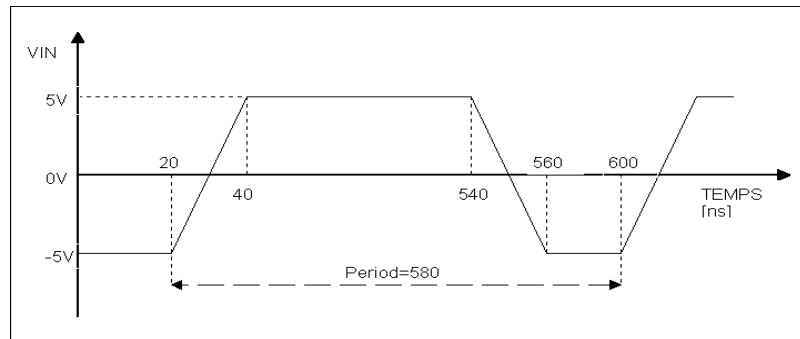
```
.MODEL MOD3 NPN
```



Rysunek 2.4.1.1



Rysunek 2.4.2.1



Rysunek 2.4.2.2

2.4.2. Analiza układu zawierającego tranzystor bipolarny

Na rysunku 2.4.2.1 przedstawiono układ elektroniczny zawierający tranzystor bipolarny.

- ANALIZA DC:** Wykreślić na wspólnym rysunku charakterystyki przejściowe (napięcie $V(3)$ w funkcji napięcia VIN). Napięcie VIN zmienia się od 0V do 10,0V z krokiem 0,1V. Wyjaśnić kształt uzyskanych przebiegów ze szczególnym uwzględnieniem przyczyn występowania załamań charakterystyki.
- ANALIZA AC:** Wykonać analizę AC od 10Hz do 10000MegHz w skali logarytmicznej z 101 punktami na dekadę. Zmien wartości elementów i / lub dodaj odpowiednie elementy tak, by pasmo przenoszenia wynosiło 10kHz – 20kHz, natomiast wzmocnienie napięciowe 10 (lub zgodnie z poleceniem prowadzącego).
- ANALIZA TR:** Wykonać analizę TR wykorzystując parametry impulsu wejściowego VIN zgodnie z rysunkiem 2.4.2.2. Wykreślić następujące przebiegi:
 - moc chwilowa, średnia, skuteczna tracona w tranzystorze
 - moc chwilowa, średnia, skuteczna tracona w rezystorze RC

- d) PROJEKT: W oparciu o układ połączeń z rysunku 2.4.2.1 obliczyć, a następnie zweryfikować poprawność obliczeń odpowiednimi symulacjami w programie Spice, wzmacniacz o punkcie pracy i wzmacnieniu napięciowym ustalonym z prowadzącym zajęcia.

Uwaga: analizy a), b) i c) powinny być wykonana przy pomocy jednego programu, a krzywe powinny być porównane i skomentowane na jednym rysunku. W przypadku analizy b) należy dobrać wartość napięcia VIN DC tak, żeby tranzystor znajdował się w stanie aktywnym tj. $V(4) < 5V < V(5)$.

```
.model BC546A NPN(Is=7.049f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=127.9 Bf=253 Ise=96.26f
+ Ne=1.556 Ikf=77.05m Nk=.5305 Xtb=1.5 Br=1 Isc=130.8f Nc=1.602
+ Ikr=3.321 Rc=.8766 Cjc=5.25p Mjc=.3147 Vjc=.5697 Fc=.5
+ Cje=11.5p Mje=.6715 Vje=.5 Tr=10n Tf=409.5p Itf=1.994 Xtf=40.12
+ Vtf=10)
*          PHILIPS          pid=bc546a   case=TO92  91-07-31 dsq
*$
```

```
.model BC556A PNP(Is=1.02f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=73.79 Bf=174.7 Ise=10.73f
+ Ne=1.644 Ikf=.1023 Nk=.5033 Xtb=1.5 Br=4.432 Isc=14.74f
+Nc=1.296 Ikr=2.237 Rc=1.039 Cjc=9.81p Mjc=.332 Vjc=.4865 Fc=.5
+Cje=30p Mje=.3333 Vje=.5 Tr=10n Tf=830.3p Itf=.8981 Xtf=10.32
+Vtf=10
*          PHILIPS          pid=bc556a   case=TO92  91-08-09 dsq
*$
```

```
.MODEL QBD135/PLP NPN
+ IS = 4.815E-14 NF = 0.9897 ISE = 1.389E-14 NE = 1.6 BF = 124.2
+ IKF = 1.6 VAF = 222 NR = 0.9895 ISC = 1.295E-13 NC = 1.183
+ BR = 13.26 IKR = 0.29 VAR = 81.4 RB = 0.5 IRB = 1E-06 RBM = 0.5
+ RE = 0.165 RC = 0.096 XTB = 0 EG = 1.11 XTI = 3 CJE = 1.243E-10
+ VJE = 0.7313 MJE = 0.3476 TF = 6.478E-10 XTF = 29 VTF = 2.648
+ ITF = 3.35 PTF = 0 CJC = 3.04E-11 VJC = 0.5642 MJC = 0.4371
+ XCJC = 0.15 TR = 1E-32 CJS = 0 VJS = 0.75 MJS = 0.333
+ FC = 0.9359
*$
```

```
.MODEL QBD136/PLP PNP
+ IS = 7.401E-14 NF = 0.9938 ISE = 4.104E-16 NE = 1.054 BF = 336.5
+ IKF = 0.1689 VAF = 22.47 NR = 0.9913 ISC = 1.290E-14 NC = 1.100
+ BR = 13.91 IKR = 9.888E-2 VAR = 30.00 RB = 0.500 IRB = 1E-06
+ RBM = 0.500 RE = 0.208 RC = 5.526E-02 XTB = 0 EG = 1.11
+ XTI = 3 CJE = 1.066E-10 VJE = 0.6900 MJE = 0.3676 TF = 2.578E-10
+ XTF = 13.56 VTF = 2.366 ITF = 1.3040 PTF = 0 CJC = 5.234E-11
+ VJC = 0.6431 MJC = 0.4436 XCJC = 0.440 TR = 1E-25 CJS = 0
+ VJS = 0.75 MJS = 0.333 FC = 0.990
*$
```


Projekt 1 (Tydzień 8) Tranzystorowy wzmacniacz o zadanych parametrach

W oparciu o typ tranzystora i schemat (wskazany przez prowadzącego – np. rysunek 2.3.2.1 lub 2.4.2.1) obliczyć, a następnie zweryfikować poprawność obliczeń odpowiednimi symulacjami w programie Spice, wzmacniacz o punkcie pracy i wzmacnieniu napięciowym ustalonymi z prowadzącym zajęcia.

Sprawozdanie: Dokonać opisu doborów elementów oraz metodę projektowanego wzmacniacza. Wykonać symulację małosygnałową oraz czasową w celu wykazania poprawności działania zaproponowanego wzmacniacza.

Ćwiczenie 3 (Tydzień 9, 10) Wzmacniacze operacyjne

Zadanie 3.1 (Tydzień 9) Obwody ze wzmacniaczami operacyjnymi

Opisać za pomocą instrukcji programu Spice obwody pokazane na rysunku 3.1.1. Dodatkowo należy także wykonać opis układu ze wzmacniaczem operacyjnym w układzie wtórnika napięciowego.

Na wstępie przyjąć wartości rezystancji R_{Ax} 1kohm, R_{Bx} 10kohm. Napięcia zasilające +15V i -15V. Zastosuj jako wzmacniacze makromodele wzmacniaczy operacyjnych podane w załączniku (lub można wykorzystać gotowe biblioteki): TL082, LF357 oraz model wzmacniacza operacyjnego z rysunku 3.1.2.

- a) ANALIZA DC: Wykonać analizę DC podając taki zakres napięć wejściowych, aby przebadać cały użyteczny zakres pracy wzmacniacza. Dodatkowo wykonaj symulację dla układu, w którym usunięto R_{Bx} .

Sprawozdanie: zamieścić odpowiedni wykres

- b) ANALIZA AC: Wykonać analizę AC od 10Hz do 1000MegHz w skali logarytmicznej z 101 punktami na dekadę.

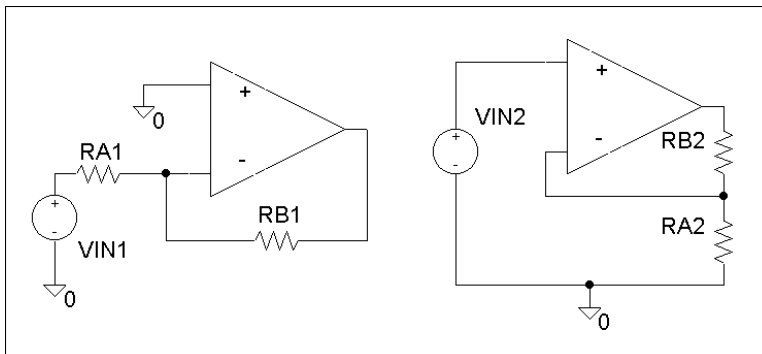
Sprawozdanie: zamieścić odpowiedni wykres (charakterystyka amplitudowa i fazowa)

- c) ANALIZA TR: Wykonać analizę TR przy wymuszeniu sygnałem jednostkowym (lub przebiegiem prostokątnym) o amplitudzie 1V. Zmieniając wartość jednego z wybranych elementów określić jego wpływ na otrzymane charakterystyki

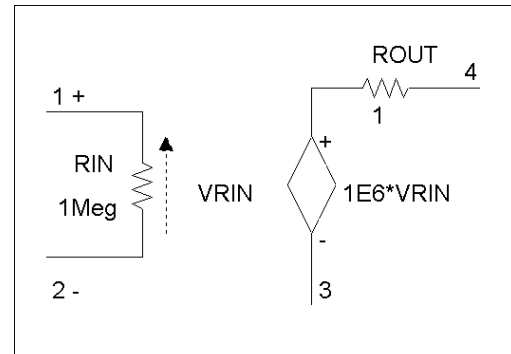
Sprawozdanie: zamieścić odpowiedni wykres

- d) PROJEKT I: zbadać czy można wykonać układ wzmacniacza odwracającego / nieodwracającego o wzmocnieniu 10000 i pasmie przenoszenia 10kHz

Sprawozdanie: zamieścić odpowiednie uzasadnienie



Rysunek 3.1.1



Rysunek 3.1.2

Zadanie 3.2 (Tydzień 10) Obwody ze wzmacniaczami operacyjnymi

Opisać za pomocą instrukcji programu Spice obwody pokazane na rysunku 3.2.1. Należy także wykonać opis układu ze wzmacniaczem operacyjnym w układzie wtórnika napięciowego.

Na wstępie przyjąć wartości rezystancji R_A i R_B 1kohm, C_A i C_B 1uF. Napięcia zasilające +15V i -15V. Zastosuj jako wzmacniacze makromodele wzmacniaczy operacyjnych podane w załączniku (lub można wykorzystać gotowe biblioteki): TL082, LF357 oraz model wzmacniacza operacyjnego z rysunku 3.1.2.

- a) ANALIZA AC: Wykonać analizę AC od 10Hz do 1000MegHz w skali logarytmicznej z 101 punktami na dekadę.

Sprawozdanie: zamieścić odpowiedni wykres

- b) ANALIZA TR: Wykonać analizę TR przy wymuszeniu sygnałem jednostkowym o amplitudzie 1V. Zmieniając wartość jednego z wybranych elementów określić jego wpływ na charakterystyki amplitudowe i fazowe oraz na odpowiedź jednostkową.

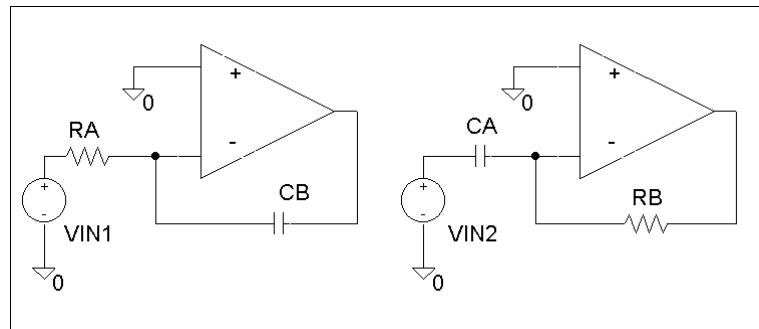
Sprawozdanie: zamieścić odpowiedni wykres

- c) PROJEKT I: Zgodnie z rysunkiem 3.2.1 zaprojektować filtr górno- lub dolnoprzepustowy o częstotliwości granicznej podanej przez prowadzącego. Należy użyć modeli wzmacniaczy operacyjnych TL082 i LF357. Zastosować analizę AC w zakresie 0,1Hz do 100MegHz oraz analizę wielkosygnałową.

Sprawozdanie: zamieścić odpowiedni wykres i obliczenia

Wyjaśnić w jaki sposób poszczególne elementy układu wpływają na przebieg charakterystyki amplitudowej i fazowej.

Wskazówka: należy zwrócić uwagę na wejściowe napięcie niezrównoważenia wzmacniaczy (w przypadku koniecznym należy je skompensować), które może mieć znaczący wpływ na uzyskiwane wyniki symulacji.



Rysunek 3.2.1

Projekt 2 (Tydzień 11, 12) Filtr analogowy

Zaprojektować i zbadać filtr zadanego rzędu o charakterystyce podanej przez prowadzącego.

Filtr należy wykonać w jednej z trzech wersji: Bessela, Butterwortha lub Czebyszewa.

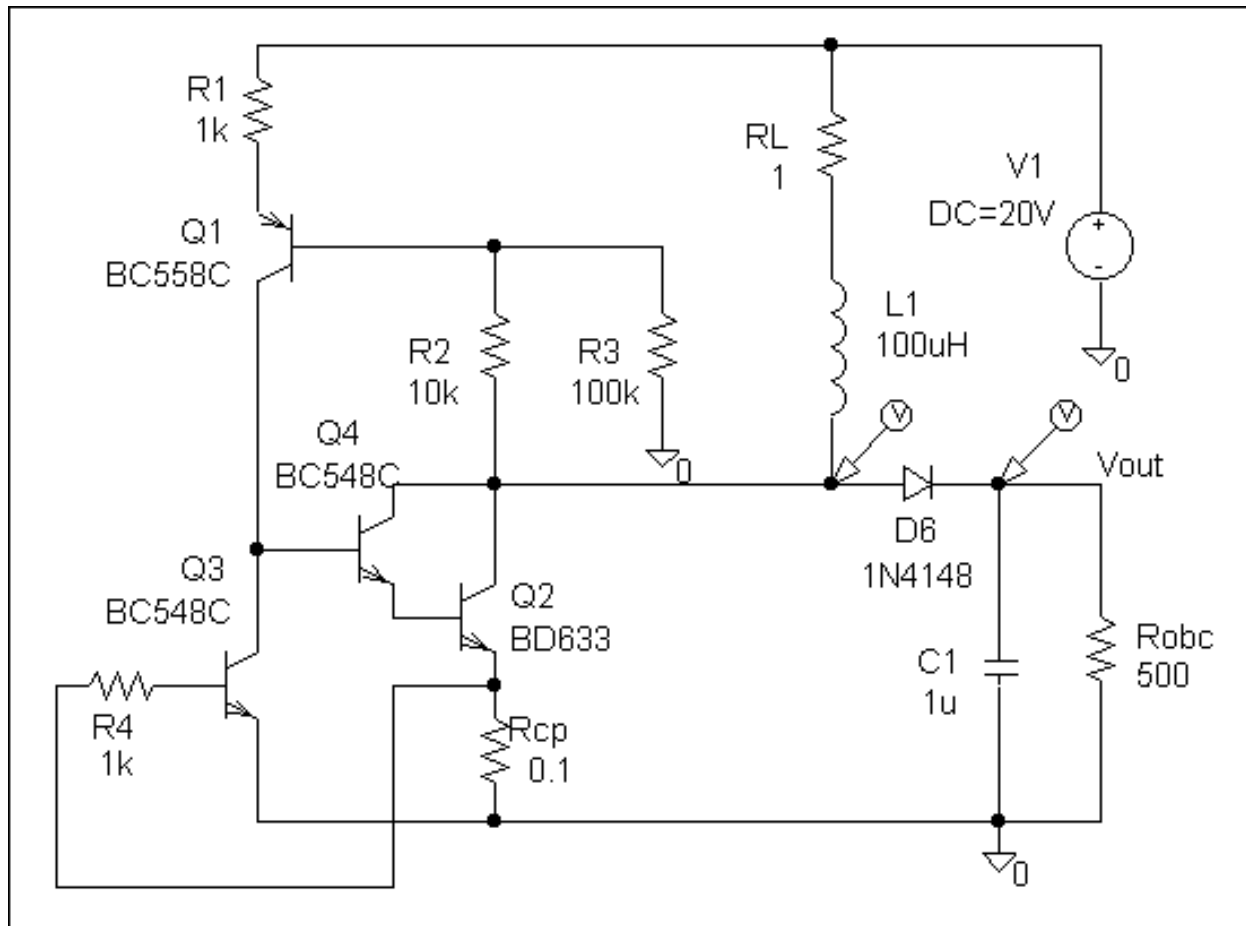
Na podstawie charakterystyki amplitudowo - fazowej oraz odpowiedzi jednostkowej należy określić wartości podstawowych parametrów opisujących właściwości otrzymanych filtrów.

Opis teoretyczny pomocny w projektowaniu filtru znajduje się w dodatku nr 2 i 3.

Projekt 3.2 (Tydzień 13, opcja 2) Dławikowa przetwornica DC-DC (analiza TR)

Zbadać układ dławikowej przetwornicy DC-DC.

- określić funkcje pełnione przez poszczególne elementy przetwornicy:
 - zespół tranzystorów Q1, Q2 i Q4 wraz z rezystorami R1 i R2
 - rezystor R3
 - rezystor Rcp z tranzystorem Q3
- określić od czego zależy częstotliwość pracy przetwornicy
- zastosować analizę TR w zakresie min. 100us; udowodnić, czy parametry czasowe tranzystora Q4 i Q2 oraz diody D1 są w zadanych warunkach pracy przetwornicy wystarczające
- zmienić napięcie zasilania na 5V i 40V; określić na podstawie analizy DC minimalne napięcie startu układu
- zmienić obciążenie na 500Ω i 500kΩ
- zmienić rezystancję dławika na 0,2 i 200Ω
- usunięcie tranzystora Q4 (zwarcie kolektora Q1 i bazy Q2) oraz Q3 razem z rezystorami R4 i Rcp nie przerywa poprawnej pracy przetwornicy. Wyjaśnić dlaczego układ się tak zachowuje i biorąc pod uwagę możliwe warunki pracy przetwornicy (np. rozrzut parametrów elementów, wartość V1, wpływ temperatury) określić wady i zalety każdego z rozwiązań.
- tranzystory Q2 i Q4 w układzie jak na rysunku p3.2.1 tworzą układ Darlingtona (łatwo zastępowalny nowoczesnym elementem scalonym). Podłączenie kolektora Q4 do zasilania V1 jest z pewnych względów korzystniejsze - udowodnić to i wyjaśnić powody.



Rysunek P3.2.1

```

*.model BD633 ako:NSC_4F NPN() ; case TO-220
.MODEL BD633 NPN(Is=2.447p Xti=3 Eg=1.11 Vaf=100 Bf=208.2 Ise=70.69p
+ Ne=1.565 Ikf=.9743 Nk=.6134 Xtb=1.5 Br=12.59 Isc=11.68n
+ Nc=1.835 Ikr=3.86 Rc=.4685 Cjc=142p Mjc=.4353 Vjc=.75 Fc=.5
+ Cje=188.5p Mje=.4878 Vje=.75 Tr=194.2n Tf=19.85n Itf=164.1
+ Xtf=5.945 Vtf=10 Rb=.1)
*$
.model BC548C NPN(Is=7.049f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=24.76 Bf=543.1 Ise=78.17f
+ Ne=1.679 Ikf=94.96m Nk=.5381 Xtb=1.5 Br=1 Isc=27.51f Nc=1.775
+ Ikr=3.321 Rc=.9706 Cjc=5.25p Mjc=.3147 Vjc=.5697 Fc=.5
+ Cje=11.5p Mje=.6715 Vje=.5 Tr=10n Tf=410.7p Itf=1.12 Xtf=26.19
+ Vtf=10)
* PHILIPS pid=bc547c case=TO92
* 91-07-31 dsq
*$
.model BC558C PNP(Is=1.02f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=30.52 Bf=416.3 Ise=14.67f
+ Ne=1.854 Ikf=.2088 Nk=.8219 Xtb=1.5 Br=9.102 Isc=4.1f Nc=3.982
+ Ikr=19.25m Rc=.9373 Cjc=9.81p Mjc=.332 Vjc=.4865 Fc=.5 Cje=30p
+ Mje=.3333 Vje=.5 Tr=10n Tf=516.2p Itf=1.701 Xtf=35.24 Vtf=10)
* PHILIPS pid=bc557c case=TO92
* 91-08-02 dsq
*$
.model D1N4148 D(Is=2.682n N=1.836 Rs=.5664 Ikf=44.17m Xti=3 Eg=1.11 Cjo=4p
+ M=.3333 Vj=.5 Fc=.5 Isr=1.565n Nr=2 Bv=100 Ibv=100u Tt=11.54n)
* TELEFUNKEN pid=d1n4148 case=DO35
* 91-08-20 dsq
*$

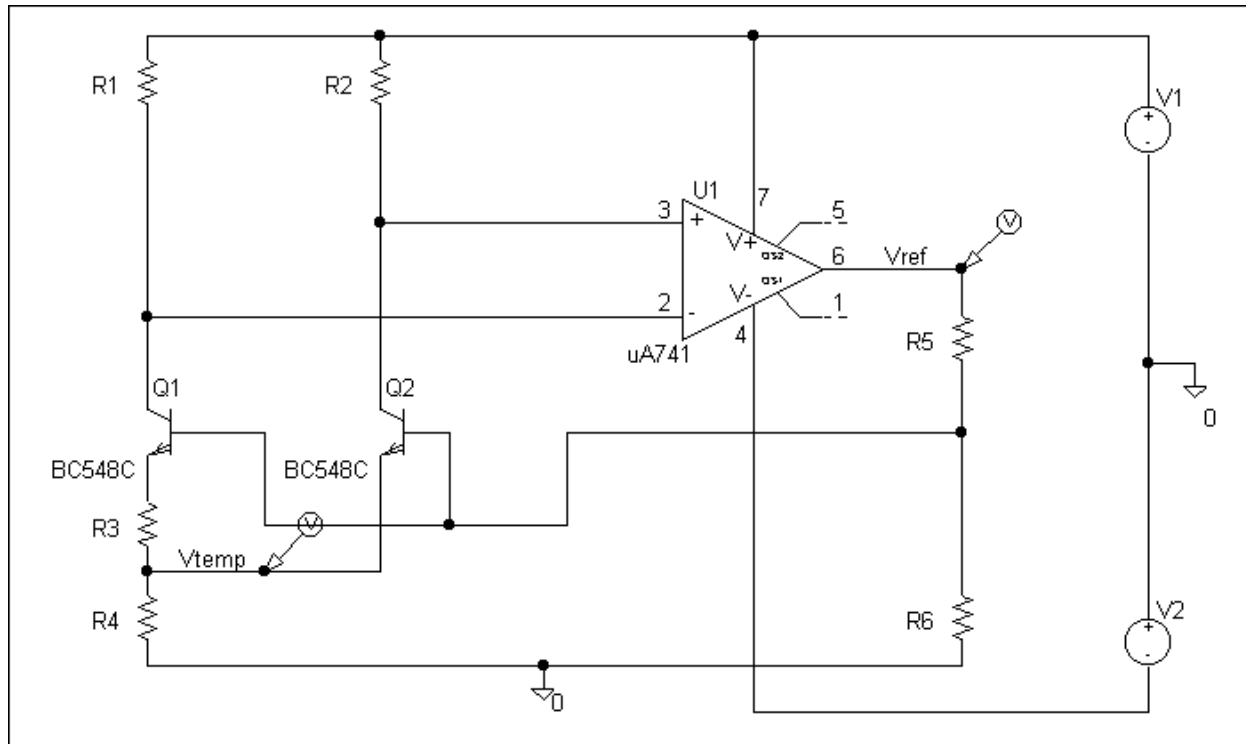
```

Projekt 3.3 (Tydzień 13, opcja 3) Układ napięcia odniesienia pracujący na zasadzie wykorzystania pasma zabronionego.

Przebadac układ napięcia odniesienia z rysunku p3.3.1 pracujący na zasadzie wykorzystania pasma zabronionego.

Przyjac wstepnie następujace wartosci elementow:

R1=20000	R3=100	R5=1e-6	V1=15V
R2=7356	R4=531	R6=1e6	V2=15V



Rysunek P3.3.1

Określić współczynnik stabilizacji napięcia odniesienia U_{ref} w funkcji temperatury w zakresie od -70°C do 150°C oraz w zakresie 20°C do 40°C .

Określić współczynnik temperaturowy i zbadać liniowość napięcia U_{temp} w funkcji temperatury (zakres temperatur jak wyżej).

Zmienić współczynnik temperaturowy napięcia U_{temp} na $+2\text{mV/K}$. Wykorzystać następujące zależności:

$$\frac{dU_{TEMP}}{dT} = k_u \frac{dU_T}{dT} = k_u \frac{U_T}{T}$$

gdzie

$$k_u = \frac{R_4}{R_3} (1+n) \log(n)$$

natomiast n jest stosunkiem prądów tranzystorów Q1 i Q2 (dla $R_5=0$):

$$I_{C2} = n \cdot I_{C1}$$

a zarazem stosunkiem rezystancji R1 i R2 :

Wyprowadzić wzory:

$$U_{REF} = \frac{1}{n} R_{u1} * U_T$$

oraz

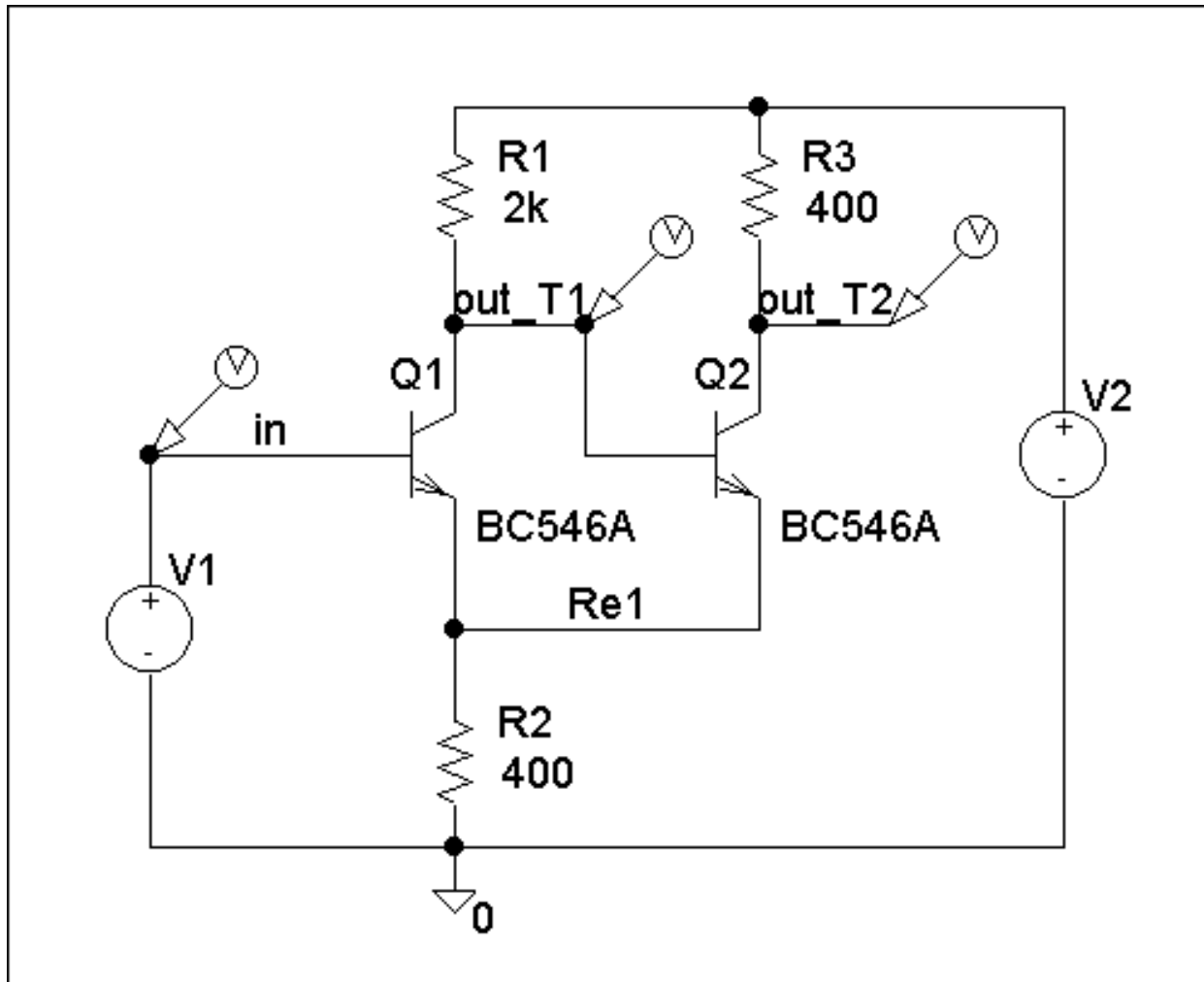
$$U_{REF} = U_G = k_u * U_T + U_{BE} = 1,205V$$

gdzie U_G jest napięciem przerwy energetycznej.

Jaki ważny warunek powinny spełniać tranzystory pracujące w układzie?

Projekt 3.4 (Tydzień 13, opcja 4) Przerzutnik Schmitta.

Przebadać układ przerzutnika Schmitta z rysunku p3.4.1. Należy porównać informacje uzyskane za pomocą analizy DC, TR i MC.



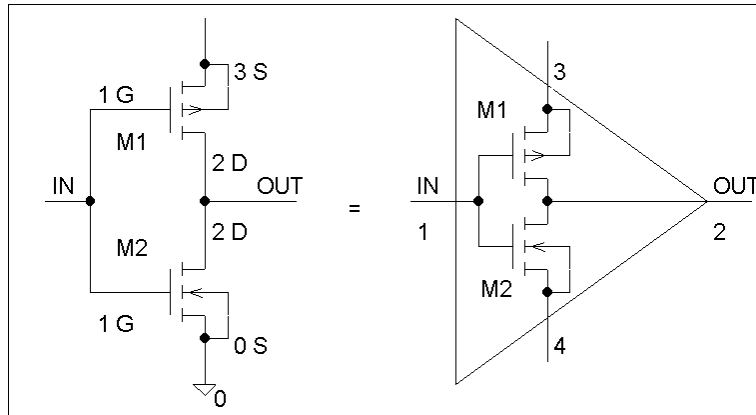
Rysunek P3.4.1

Ćwiczenie 4 (Tydzień 14, opcja 1) Układy CMOS

Zadanie 4.1 (Tydzień 14, opcja 1.1) Symulacja inwertera wykonanego w technologii CMOS

Na rysunku 4.1.1 przedstawiono układ inwertera CMOS oraz jego makromodel. Napięcie VDD wynosi 5V. Wykonać jego symulację:

- ANALIZA DC: dla VIN zmieniającego się od 0 do 5V z krokiem 0,1V. Należy wykreślić napięcie wyjściowe i prąd zasilania inwertera.
- ANALIZA TR: dla VIN jak na rysunku 4.1.2. Należy wykreślić napięcie wyjściowe i prąd zasilania inwertera.



Rysunek 4.1.1

Parametry zastosowanych tranzystorów MOS są następujące:

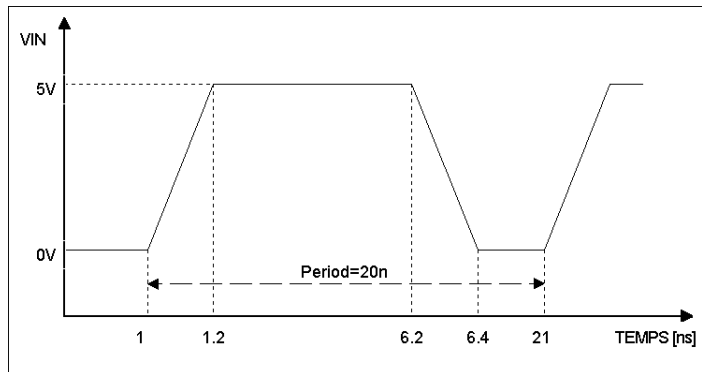
```
.MODEL N NMOS LEVEL=2
+VTO=0.75      KP=60E-6      GAMMA=0.75
+PB=0.91        VMAX=6E4
+CGSO=2.94E-10  CGDO=2.94E-10  CGBO=1.92E-10
+CJ=2.6E-4      MJ=0.5        CJSW=1.17E-10  MJSW=0.33
+JS=1E-16       TOX=3.5E-8    NSUB=1.65E16
+XJ=0.3E-6      LD=0.22E-6
+UO=780         UCRIT=0.9E5   UEXP=0.16
```

```
.MODEL P PMOS LEVEL=2
+VTO=-0.75     KP=3E-5       GAMMA=0.75
+PB=0.88       VMAX=1E6
+CGSO=5.88E-10 CGDO=5.88E-10 CGBO=1.92E-10
+CJ=3.1E-4     MJ=0.5        CJSW=2.52E-10  MJSW=0.33
+JS=1E-16     TOX=3.5E-8    NSUB=6.9E15
+XJ=0.6E-6    LD=0.47E-6
+UO=255       UCRIT=5.8E4   UEXP=0.42
```

Uwaga: do symulacji układów CMOS należy zastosować następujące opcje:

```
.OPTIONS DEFL=20U DEFW=16.5U DEFAD=60P DEFAS=60P
.OPTIONS VNTOL=20M ABSTOL=20P RELTOL=0.01 NOMOD NOPAGE
```

Wykonać symulację dla różnych wartości stosunku W/L przyjmując za wyjściowe $W=4U$ i $L=4U$ dla NMOS i PMOS.

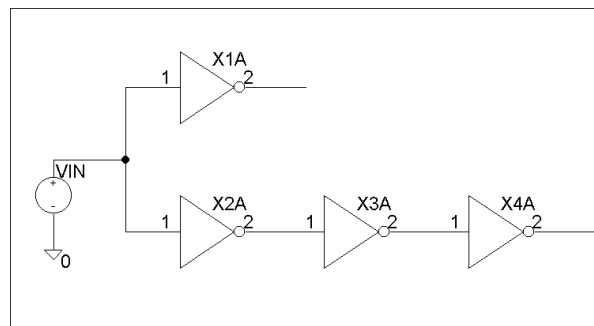


Rysunek 4.1.2

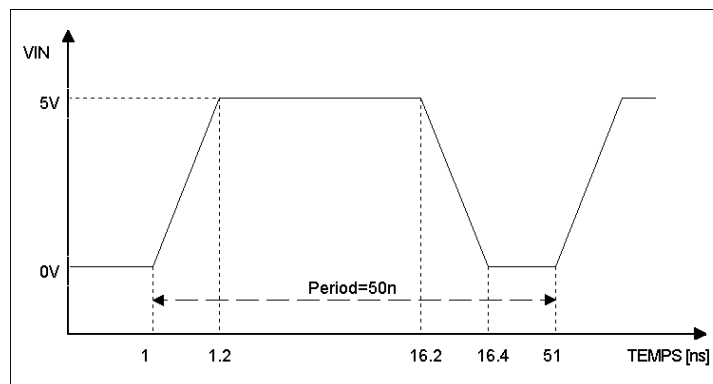
Zadanie 4.2 (Tydzień 14, opcja 1.2) Układ z zastosowaniem inwerterów.

Wykonać symulację układu z rysunku 4.2.1. Wymiary tranzystorów są jednakowe dla wszystkich makromodeli: NMOS: $W=4U$, $L=4U$, PMOS: $W=4U$, $L=4U$. Wykonać analizę TR stosując sygnał z rysunku 4.2.2. Napięcie VDD wynosi 5V.

- Wykreślić napięcia wyjściowe X1 i X2
- Wykreślić napięcia wyjściowe X1 i X4
- Wykreślić napięcia wyjściowe X2, X3 i X4
- Wykreślić prądy zasilania X1 i X2



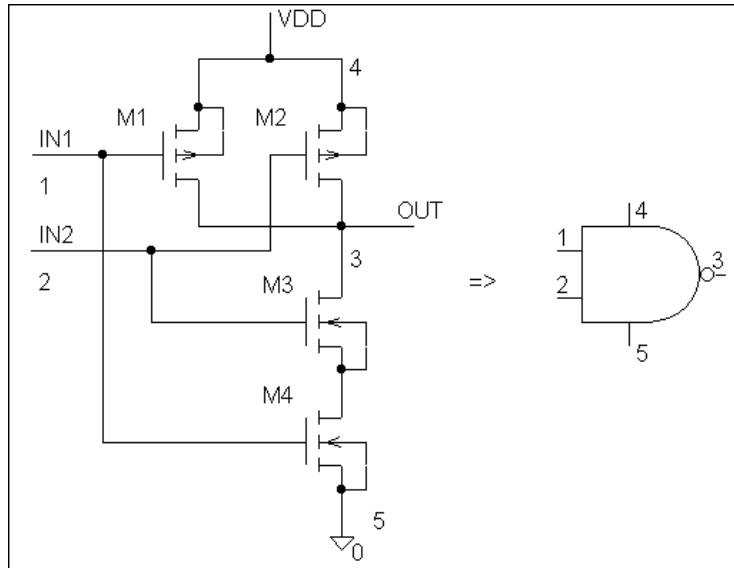
Rysunek 4.2.1



Rysunek 4.2.2

Zadanie 4.3 (Tydzień 14, opcja 1.3) Bramka NAND.

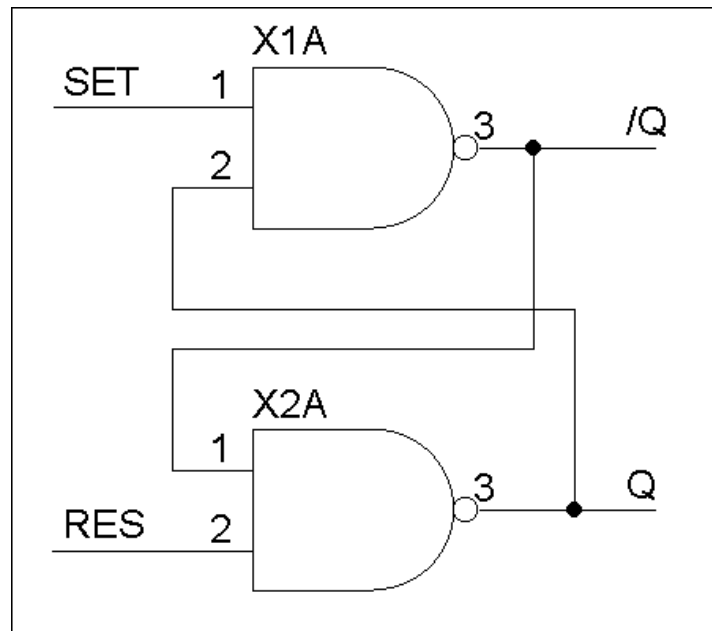
Wykonać makromodel bramki NAND z rysunku 4.3.1 (NMOS i PMOS: $W=4U$, $L=4U$). Wykonać testy bramki i określić maksymalną częstotliwość jej pracy ($V_{DD}=5V$).



Rysunek 4.3.1

Zadanie 4.4 (Tydzień 14, opcja 1.4) Przerzutnik RS.

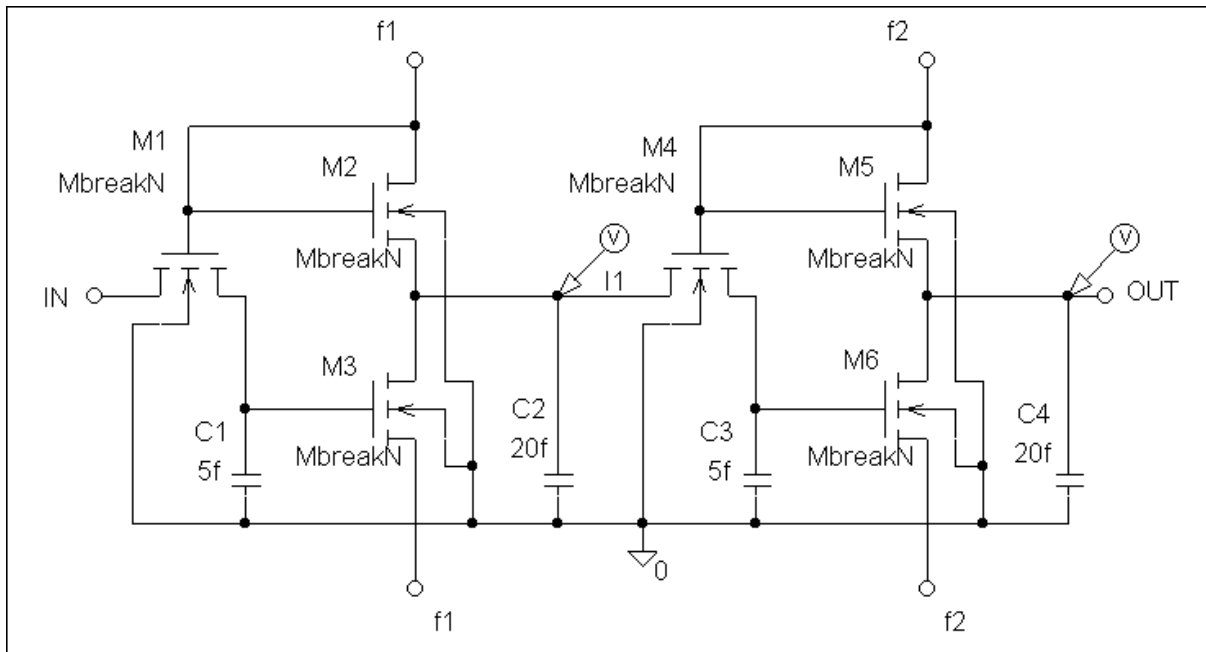
Wykonać makromodel przerzutnika RS stosując makromodel bramki NAND2. Wykonać testy bramki i określić maksymalną częstotliwość jej pracy ($V_{DD}=5V$).



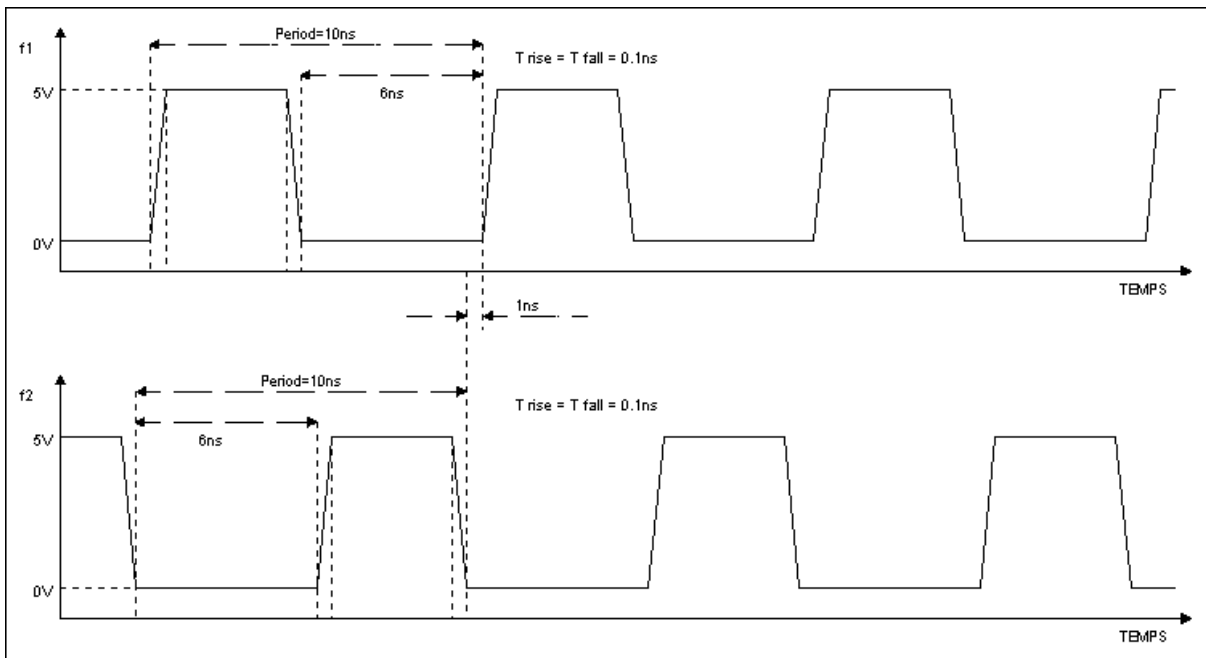
Rysunek 4.4.1

Ćwiczenie 5 (Tydzień 14, opcja 2) Dynamiczne układy MOS

Zbadać uproszczony układ dwóch szeregowo połączonych dynamicznych inwerterów MOS z rysunku 5.1.1. W układzie użyć wbudowanych modeli tranzystorów NMOS o wymiarach kanału $L=0,30\mu$ i $W=0,90\mu$. Sygnały zegarowe podano na rysunku 5.1.2, jako wejściowe wymuszenie należy użyć przebieg prostokątny o częstotliwości 10MHz i wypełnieniu 50%.



Rysunek 5.1.1

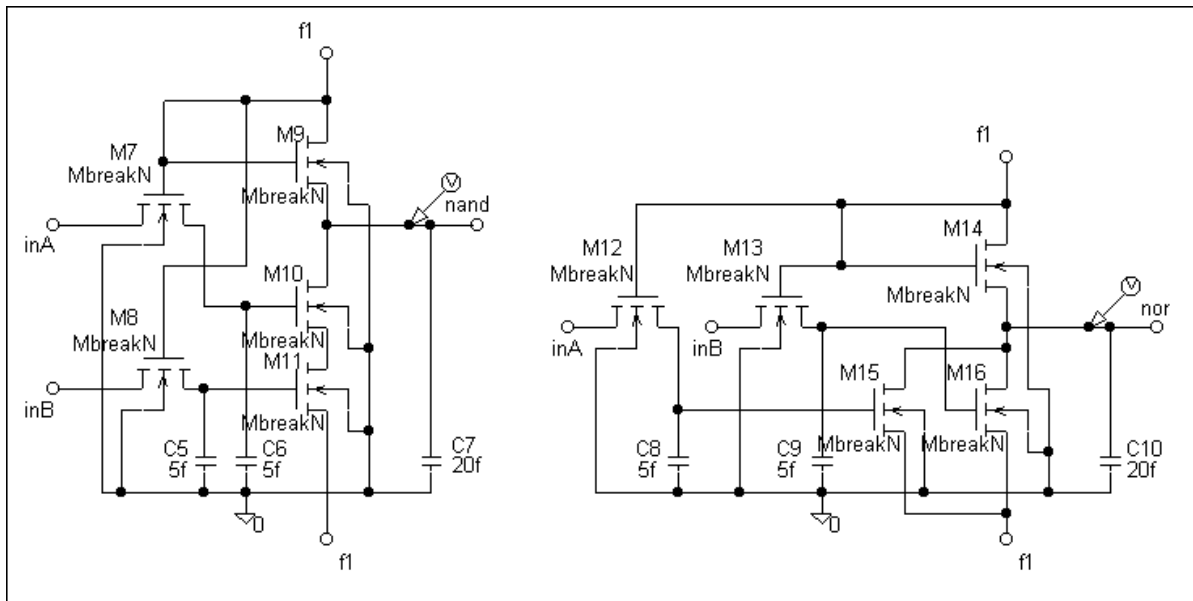


Rysunek 5.1.2

Wyjaśnić działanie pojedynczego inwertera:

- jak należy interpretować stany na wyjściu układu dynamicznego
- w jaki sposób na pracę układu wpływa stosunek pojemności $C1$ i $C2$
- uzasadnić wymogi stawiane sygnałom zegarowym (dlaczego nie stosuje się dwóch wzajemnie zanegowanych przebiegów prostokątnych o wypełnieniu 50% ?)
- określić pobór mocy inwertera (porównać go z poborem mocy analogicznego inwertera CMOS)

Przetestować bramki logiczne z rysunku 5.1.3.



Rysunek 5.1.3

Odpowiedzieć na następujące problemy:

- określić zasady łączenia bramek dynamicznych (z czego wynika maksymalne dopuszczalne obciążenie wyjścia bramki dynamicznej?)
- podać zalety stosowania układów dynamicznych (uwzględnić w szczególności wpływ zastosowania układu dynamicznego na layout krzemowej struktury oraz hazardy dynamiczne i statyczne)
- podać jakie nie uwzględnione na podanym schemacie pojemności i rezystancje (pożądane lub pasożytnicze) występują w rzeczywistym układzie i jaki wpływ będą miały na jego działanie (w analizie uwzględnić także podstawowe parametry modeli tranzystorów)
- jakie skutki w rzeczywistym obwodzie przyniesie zatrzymanie sygnału zegarowego? Jakie reguły muszą towarzyszyć przy rozprowadzaniu sygnałów zegarowych w układzie scalonym?

Ćwiczenie 6 (Tydzień 14, opcja 3) Analogowe zastosowania tranzystorów MOS

Zadanie 6.1 (Tydzień 14, opcja 3) Wzmacniacz operacyjny z tranzystorami MOS

Opisać za pomocą instrukcji programu Spice obwód pokazany na rysunku 6.1.

Schemat przedstawia klasyczny wzmacniacz operacyjny: dwustopniowy z wejściem ze wzmacniaczem różnicowym i drugim stopniem - wzmacniaczem w klasie A. Wyprowadzenia układu oznaczono: „Wejście+”, „Wejście-”, „Wyjście”, zasilanie stanowią niezależne źródła napięcia V1 i V2 (węzły +15V i -15V), rezystor RO dołączony do wyjścia jest rezystorem obciążenia. Źródło napięcia V3 jest źródłem sygnału wejściowego (na wejściu nieodwracającym).

Pierwszy stopień - wejściowy wzmacniacz różnicowy (bez zabezpieczeń wejść) z tranzystorami NMOS M1 i M2. Polaryzacja pierwszego zrealizowana jest z wykorzystaniem źródła prądowego I1, a w obwodach drenów - lustrem prądowym PMOS (M3 i M4) z rezystorami sprzężenia (R1, R2) i kompensacji punktów pracy oraz kompensacji napięcia niezrównoważenia.

Drugi stopień wykonany jest z tranzystorem PMOS M5 polaryzowanym źródłem prądowym I2 oraz kondensatorem kompensacji charakterystyki częstotliwościowej Ckomp.

UWAGA: na schemacie pokazano elementy obwodu sprzężenia zwrotnego: RA, RB, CB w połączeniu jak dla wzmacniacza nieodwracającego i pełnym sprzężeniem (wtórnik napięciowy) dla składowej stałej oraz na wejściu nieodwracającym wejściowe źródło napięcia V3. Układ połączeń i wartości tych elementów należy dobrać w zależności od wykonywanych symulacji.

Na wstępie przyjąć wartości zastosowanych elementów:

I1 - 10mA

I2 - 100mA

PMOS - do wyboru: BSP204/PLP lub IRF9540

NMOS - IRF540

Ckomp - 0.1nF

RS - 50Ω

R1, R2 - 80Ω dla BSP204/PLP, 500Ω dla IRF9540

RA, RB, CB - dobrać samodzielnie jako elementy sprzężenia zwrotnego

V1, V2 - 15V

V3 - źródło napięcia, parametry dobrać samodzielnie

Dla tranzystorów zastosować makromodele pobrane z bibliotek elementów.

- a) ANALIZA DC: Wykreślić charakterystykę przejściową wzmacniacza operacyjnego. Określić na jej podstawie wzmocnienie z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego.

Sprawozdanie: Zamieścić odpowiedni wykres i obliczenia.

- b) ANALIZA AC: Wykreślić charakterystyki amplitudowe i fazowe obwodów w zakresie 10Hz do 100MHz (101 punktów na dekadę) dla wzmocnienia napięciowego równego 1 i 10.

Sprawozdanie: Zamieścić odpowiedni wykres (charakterystyka amplitudowa i fazowa).

- c) ANALIZA TRAN: Wykonać analizę wielkosygnałową o wymuszeniu zgodnym z rysunkiem 1.4.2 (przy wzmocnieniu napięciowym równym 1) oraz sygnałem sinusoidalnym o częstotliwości 10KHz i amplitudzie 1mV (przy wzmocnieniu napięciowym równym 1000).

Sprawozdanie: Zamieścić odpowiedni wykres.

- d) PROJEKT I: Posługując się odpowiednimi wzorami obliczyć wzmocnienie napięciowe poszczególnych stopni oraz całości wzmacniacza (z otwartą pętlą sprzężenia). Obliczenia zweryfikować symulacjami i wykresami (po zmianie wartości odpowiednich elementów w poszczególnych obwodach).

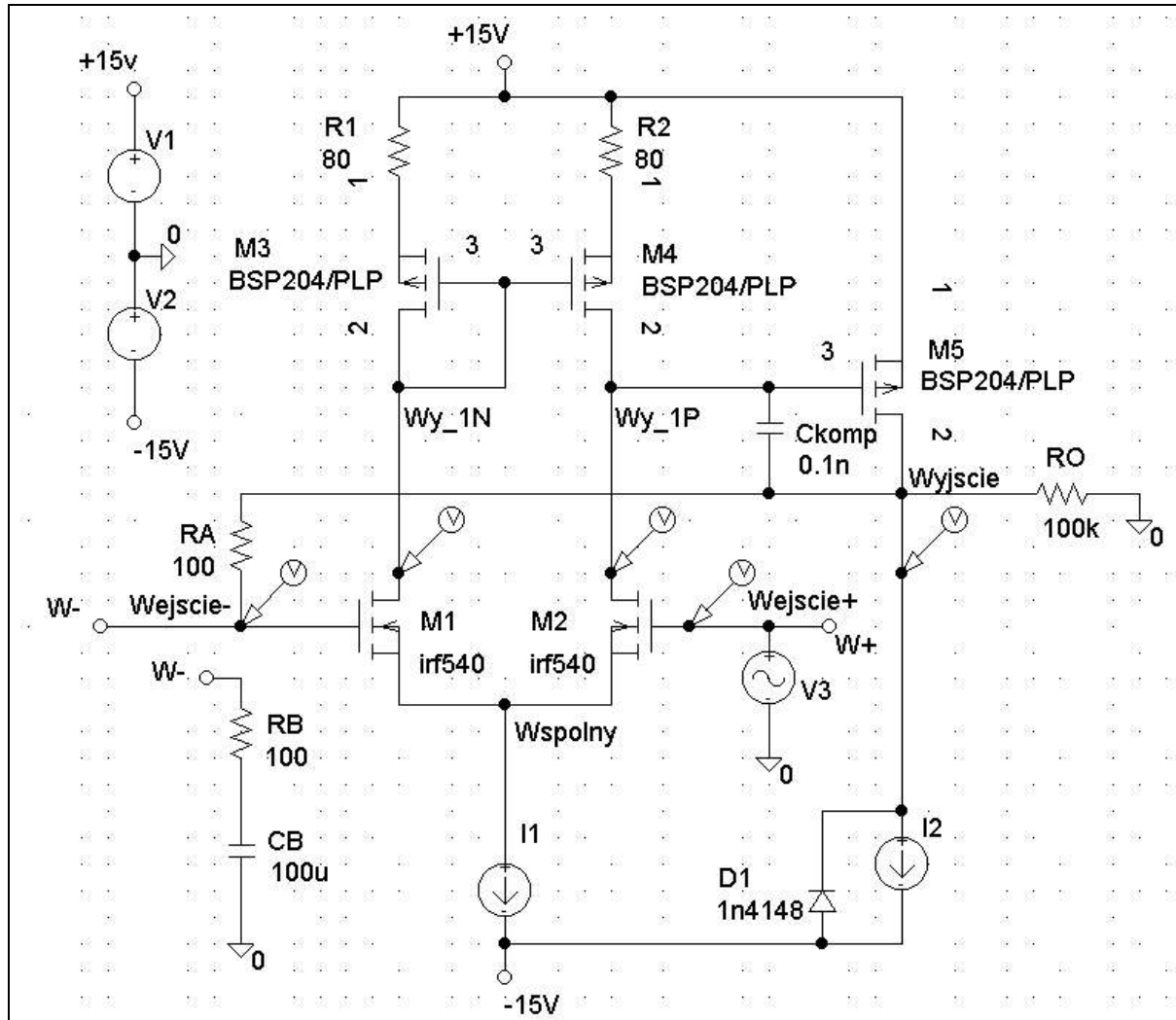
Sprawozdanie: Zamieścić odpowiednie obliczenia.

- e) PROJEKT II: Zastąpić źródła prądowe I1 oraz I2 - źródłami wykonanymi z wykorzystaniem modeli elementów o rzeczywistych parametrach wykonanych w technologii MOS. Wyjaśnić na podstawie przeprowadzonych symulacji znaczenie stosowania modeli elementów o rzeczywistych parametrach.

Sprawozdanie: Zamieścić odpowiednie obliczenia i wykresy.

- f) PROJEKT III: Wyjaśnić na podstawie symulacji znaczenie rezystorów R1 i R2. Wyjaśnić na podstawie przeprowadzonych symulacji znaczenie stosowania modeli elementów o rzeczywistych parametrach.

Sprawozdanie: Zamieścić odpowiednie uzasadnienie.



Rysunek 6.1

Ćwiczenie 7 (Tydzień 14, opcja 4) Układy cyfrowe

Zadanie 7.1 (Tydzień 14, opcja 4) Cyfrowy generator przebiegu schodkowego

Opisać za pomocą instrukcji programu Spice obwód pokazany na rysunku 7.1A i 7.1B.

Część A zawiera przetwornik cyfrowo-analogowy oparty na konwerterze prąd-napięcie ze wzmacniaczem operacyjnym U5A oraz drabinie rezystorowej R-2R z kluczami sterowanymi napięciem. Klucze są sterowane z inwerterów wykonanych na elementach cyfrowych U3/U4 (inwertery 74x04). Przełączają one drabinę rezystorową, a wzmacniacz operacyjny pracuje jako konwerter prąd-napięcie i jednocześnie bufor wyjściowy napięcia analogowego. Źródło V1 pełni funkcję źródła napięcia odniesienia (referencyjnego) dla przetwornika. Źródła V2 i V3 – to symetryczne zasilanie elementów analogowych (wzmacniacze), źródło V4 – to dodatkowe zasilanie układów cyfrowych. Właściwe zasilanie układów cyfrowych jest z węzłów DPWR i DGND (G_DPWR i G_DGND niejawne na schemacie).

Część B zawiera 4 bitowy licznik binarny wykonany z użyciem układu U1, obwód resetu i dodatkowego wejścia bramkującego ze wzmacniaczem operacyjnym w układzie komparatora napięcia U6 oraz bramkami Schmitta U2. Cyfrowy licznik zbudowany jest z wykorzystaniem standardowego licznika synchronicznego 74x163, układ resetu zawiera przerzutniki Schmitta 74x14 sterowane obwodem RC (CR i RR). Rezystor R10, diody D1 i D2, to konwerter poziomów napięć i zabezpieczenie wejścia układu U2C.

Parametry zastosowanych elementów są następujące:

U1 - 74S163

U2 - 74LS14

U3, U4 - 74S04

U5 - TL082

U6 - LF357/NS

D1, D2 - 1N4148

RR, CR - 1kΩ, 2.2nF

drabinka rezystorowa R-2R - jak na załączonym schemacie: R2, R4, R6, R9 - 500Ω; R1, R3, R5, R7, R8 - 1kΩ

V1 - 10V

V2, V3 - 15V

V4 - 5V

S1-S8 - klucze Sbreak (przyjąć: RON=1Ω, ROFF=1E6Ω, VON=1V, VOFF=0V)

DSTIM, LO, HI - elementy cyfrowe

V5, V6 - źródła napięciowe - parametry dobrać samodzielnie

Zastosuj jako wzmacniacze operacyjne i elementy cyfrowe makromodele pobrane z bibliotek elementów.

- a) ANALIZA TRAN: Wykonać analizę wielkosygnałową. DSTIM na wstępie należy obrać ONTIME i OFFTIME po 5us (później zmieniać w szerokim, samodzielnie dobranym zakresie). Wyprowadzenie „Bramka” powinno być ustawione w stanie zezwalającym na pracę licznika 74S163.

Sprawozdanie: zamieścić odpowiedni wykres napięć zaznaczonych na schemacie znacznikami (markerami).

- b) PROJEKT I: Zastosować wyszukane w bibliotekach układy cyfrowe wykonane w różnych odmianach - np. zamiast 74S163 - 74LS163 itd. Sprawdzić i skomentować - jakie znaczenie ma zamiana tych elementów dla działania całego układu.

Sprawozdanie: zamieścić odpowiednie wykresy i skomentować cechy wybranych odmian układów cyfrowych.

- c) PROJEKT II: Zastąpić klucze Sbreak modelami elementów o parametrach rzeczywistych (na przykład tranzystorami bipolarnymi lub unipolarnymi). Należy zaprojektować układ podłączenia wybranych elementów.

Sprawozdanie: zamieścić odpowiednie wykresy, wyjaśnić znaczenie dla działania całego układu zastosowania modeli elementów o parametrach rzeczywistych.

- d) PROJEKT III: Zamienić miejscami wzmacniacze operacyjne U5 i U6.

Sprawozdanie: zamieścić odpowiednie wykresy, wyjaśnić znaczenie doboru wzmacniaczy operacyjnych dla działania całego układu.

- e) PROJEKT IV: Zaproponować aplikację wykorzystującą wejście bramkujące.

Sprawozdanie: zamieścić odpowiednie wykresy, wyjaśnić zastosowane połączenia i przeznaczenie zaproponowanego układu.

Strona 34 z 61

Dodatek 1. Modele elementów (wzmacniacze operacyjne)

uA741

```
* connections: non-inverting input
*           | inverting input
*           || positive power supply
*           ||| negative power supply
*           |||| output
*           |||||
.subckt uA741 1 2 3 4 5
*
c1 11 12 8.661E-12
c2 6 7 30.00E-12
dc 5 53 dy
de 54 5 dy
dlp 90 91 dx
dln 92 90 dx
dp 4 3 dx
egnd 99 0 poly(2),(3,0),(4,0) 0 .5 .5
fb 7 99 poly(5) vb vc ve vlp vln 0 10.61E6 -1E3 1E3 10E6 -10E6
ga 6 0 11 12 188.5E-6
gcm 0 6 10 99 5.961E-9
iee 10 4 dc 15.16E-6
hlim 90 0 vlim 1K
q1 11 2 13 qx
q2 12 1 14 qx
r2 6 9 100.0E3
rc1 3 11 5.305E3
rc2 3 12 5.305E3
re1 13 10 1.836E3
re2 14 10 1.836E3
ree 10 99 13.19E6
ro1 8 5 50
ro2 7 99 100
rp 3 4 18.16E3
vb 9 0 dc 0
vc 3 53 dc 1
ve 54 4 dc 1
vlim 7 8 dc 0
vlp 91 0 dc 40
vln 0 92 dc 40
.model dx D(Is=800.0E-18 Rs=1)
.model dy D(Is=800.00E-18 Rs=1m Cjo=10p)
.model qx NPN(Is=800.0E-18 Bf=93.75)
.ends
*$
```

TL082

```
* connections: non-inverting input
*           | inverting input
```

```

*          || positive power supply
*          ||| negative power supply
*          |||| output
*          ||||
.subckt TL082 1 2 3 4 5
*
c1 11 12 2.412E-12
c2 6 7 18.00E-12
css 10 99 5.400E-12
dc 5 53 dy
de 54 5 dy
dlp 90 91 dx
dln 92 90 dx
dp 4 3 dx
egnd 99 0 poly(2),(3,0),(4,0) 0 .5 .5
fb 7 99 poly(5) vb vc ve vlp vln 0 3.467E6 -1E3 1E3 3E6 -3E6
ga 6 0 11 12 339.3E-6
gcm 0 6 10 99 17.01E-9
iss 10 4 dc 234.0E-6
hlim 90 0 vlim 1K
j1 11 2 10 jx
j2 12 1 10 jx
r2 6 9 100.0E3
rd1 3 11 2.947E3
rd2 3 12 2.947E3
ro1 8 5 50
ro2 7 99 170
rp 3 4 20.00E3
rss 10 99 854.7E3
vb 9 0 dc 0
vc 3 53 dc 1.500
ve 54 4 dc 1.500
vlim 7 8 dc 0
vlp 91 0 dc 50
vln 0 92 dc 50
.model dx D(Is=800.0E-18 Rs=1)
.model dy D(Is=800.00E-18 Rs=1m Cjo=10p)
.model jx NJF(Is=2.500E-12 Beta=984.2E-6 Vto=-1)
.ends
*$

```

LF357

```

*////////////////////////////////////
*LF357 Monolithic JFET-Input OP-AMP MACRO-MODEL National Semi
*////////////////////////////////////
*
* connections:  non-inverting input
*              |  inverting input
*              | |  positive power supply
*              | | | negative power supply
*              | | | | output
*              | | | | |
*              | | | | |
.SUBCKT LF357/NS 1 2 99 50 28

```

```
*
*Features:
*Low input bias current =      30pA
*Low input offset current =    3pA
*High input impedance =      1Tohm
*Low input offset voltage =    1mV
*
*****INPUT STAGE*****
*
IOS 2 1 3P
*^Input offset current
R1 1 3 1E12
R2 3 2 1E12
I1 99 4 100U
J1 5 2 4 JX
J2 6 7 4 JX
R3 5 50 20K
R4 6 50 20K
*Fp2=12 MHz
C4 5 6 3.31573E-13
*
*****COMMON MODE EFFECT*****
*
I2 99 50 4.65MA
*^Quiescent supply current
EOS 7 1 POLY(1) 16 49 3E-3 1
*Input offset voltage.^
R8 99 49 50K
R9 49 50 50K
*
*****OUTPUT VOLTAGE LIMITING*****
V2 99 8 2.63
D1 9 8 DX
D2 10 9 DX
V3 10 50 2.63
*
*****SECOND STAGE*****
*
EH 99 98 99 49 1
F1 9 98 POLY(1) VA3 0 0 0 8.1291E7
G1 98 9 5 6 2E-3
R5 98 9 100MEG
VA3 9 11 0
*Fp1=224 HZ
C3 98 11 7.10513P
*
*****POLE STAGE*****
*
*Fp3=42 MHz
G3 98 15 9 49 1E-6
R12 98 15 1MEG
C5 98 15 8.3766E-15
*
*****COMMON-MODE ZERO STAGE*****
*
G4 98 16 3 49 1E-8
```

```
L2 98 17 530.52M
R13 17 16 1K
*
*****OUTPUT STAGE*****
*
F6 99 50 VA7 1
F5 99 23 VA8 1
D5 21 23 DX
VA7 99 21 0
D6 23 99 DX
E1 99 26 99 15 1
VA8 26 27 0
R16 27 28 25
V5 28 25 0.1V
D4 25 15 DX
V4 24 28 0.1V
D3 15 24 DX
*
*****MODELS USED*****
*
.MODEL DX D(IS=1E-15)
.MODEL JX PJF(BETA=1.25E-5 VTO=-2.00 IS=30E-12)
*
.ENDS
*$
* //////////////////////////////////////
* User Notes:
*
* 1. Input resistance (Rin) for these JFET op amps is 1TOhm. Rin is
* modeled by assuming the option GMIN=1TOhm. If a different (non-
* default) GMIN value is needed, users may recalculate as follows:
*  $R_{in} = (R1 || GMIN + R2 || GMIN)$ , where  $R1=R2$ ,
* to maintain a consistent Rin model.
```

Dodatek 2. Filtry analogowe

Opracowanie Zbigniew Kulesza

literatura: U. Tietze, Ch. Schenk „Układy Półprzewodnikowe”, rozdział 14

1. Parametry opisujące filtry:

- a) charakterystyka amplitudowo – częstotliwościowa:
 - przebieg w zakresie przepustowym (występowanie falistości)
 - ostrość załamania przy częstotliwości granicznej f_g
 - stromość opadania w zakresie zaporowym
- b) odpowiedź jednostkowa
 - przerost (oscylacyjność odpowiedzi)
 - czas narastania (narastanie sygnału wyjściowego od 10% do 90% wartości ustalonej)
 - czas opóźnienia (narastanie sygnału wyjściowego od 0% do 50% wartości ustalonej)

2. Podstawowe typy filtrów

- a) o tłumieniu krytycznym
- b) Butterwortha
 - charakterystyka częstotliwościowa płaska o ostrym załamaniu przy f_g
 - odpowiedź jednostkowa o znacznych oscylacjach wzrastających z rzędem filtru
- c) Czebyszewa
 - charakterystyka amplitudowa odznaczająca się falistością o stałej amplitudzie z bardzo ostrym załamaniem przy f_g (załamanie tym bardziej ostre, im większa falistość – rząd filtru)
 - odpowiedź jednostkowa o oscylacjach większych niż w filtrach Butterwortha
- d) Bessela
 - charakterystyka częstotliwościowa płaska, ostrość załamania większa niż dla filtru z tłumieniem krytycznym, a mniejsza niż Butterwortha i Czebyszewa
 - odpowiedź jednostkowa o niewielkim przeroście (mniej niż 1%), minimalne oscylacje
 - optymalny do przenoszenia impulsów prostokątnych dzięki spełnianiu warunku stałości opóźnienia grupowego w dużym zakresie częstotliwości (przesunięcie fazowe proporcjonalne do częstotliwości)

Stromość opadania w zakresie zaporowym jest proporcjonalna do rzędu filtru.

Czasy narastania nie zależą silnie od typu i rzędu filtru i wynoszą w przybliżeniu $1/(3f_g)$.

Czasy opóźnienia i przerost rosną z wzrostem rzędu filtru, z wyjątkiem filtru Bessela, w którym przerost maleje powyżej rzędu czwartego.

3. Podstawy teoretyczne konstrukcji filtrów

- a) funkcja przenoszenia – postać ogólna dla filtru dolnoprzepustowego

$$K_u(S) = \frac{k_{u0}}{\prod_i (1 + a_i S + b_i S^2)}$$

gdzie

$S = s/\omega_g$ – znormalizowana częstotliwość zespolona

a_i, b_i – rzeczywiste dodatnie współczynniki

k_{u0} – wzmocnienie filtru dla pasma przepustowego

Rząd filtru jest równy najwyższej potęgze S .

Nieparzyste rzędy realizujemy przez podstawienie $b_1=0$.

Korzystając z zależności $s = j\omega + \sigma$ dla $\sigma=0$ otrzymujemy:

$$S = \frac{j\omega}{\omega_g} = j \frac{f}{f_g} = j\Omega$$

Postać ogólna wzoru na funkcję przenoszenia umożliwia otrzymanie nie tylko biegunów rzeczywistych, ale i zespolonych. Oznacza to konieczność stosowania biernych obwodów RLC albo aktywnych obwodów RC (szczególnie w zakresie małych częstotliwości).

Ponadto wielomian jest od razu rozłożony na czynniki – fizyczna realizacja filtrów polega zatem na szeregowym połączeniu ogniów o rzędzie co najwyżej drugim. Istnieje wiele znanych standardowych ogniów o rzędzie drugim - tzw. sekcji bikwadratowych (najprostsza realizacja to układ Sallen-Keya).

- b) dobroć biegunów Q_i definiujemy jako

$$Q_i = \frac{\sqrt{b_i}}{a_i}$$

- c) charakterystyka częstotliwościowa modułu

$$|K_u|^2 = \frac{k_{u0}^2}{\prod_i [1 + (a_i^2 - 2b_i)\Omega^2 + b_i^2\Omega^4]}$$

- d) przesunięcie fazowe

$$\varphi = -\sum_i arctg \frac{a_i\Omega}{1 - b_i\Omega^2}$$

- e) opóźnienie grupowe (czas, o który zostaje opóźniony sygnał)

$$T_{gr} = \frac{1}{2\pi} \sum_i \frac{a_i(1 + b_i\Omega^2)}{1 + (a_i^2 + 2b_i)\Omega^2 + b_i^2\Omega^4}$$

- f) transformacja filtru dolnoprzepustowego na górnoprzepustowy

Wykonujemy następujące operacje w dziedzinie częstotliwości

- częstotliwość graniczna pozostaje bez zmian
- zastępujemy S przez $1/S$
- zastępujemy Ω przez $1/\Omega$
- k_{u0} przechodzi w $k_{u\infty}$

Zatem

$$K_u(S) = \frac{k_{u\infty}}{\prod_i \left(1 + \frac{a_i}{S} + \frac{b_i}{S^2}\right)}$$

W dziedzinie czasu podobnej transformacji nie można dokonać.

- g) transformacja filtru dolnoprzepustowego na pasmowoprzepustowy

Wykonujemy następujące podstawienie

$$S = \frac{1}{\Delta\Omega} \left(S + \frac{1}{S} \right)$$

Transformacja powoduje podwojenie rzędu filtru.

Otrzymana w skali logarytmicznej charakterystyka jest symetryczna względem częstotliwości środkowej $\Omega=1$ i ma dolną częstotliwość graniczną $\Omega_{\min}=1/\Omega_{\max}$. Znormalizowaną szerokość pasma (trzydecybelową) $\Delta\Omega=\Omega_{\max}-\Omega_{\min}$ wybieramy dowolnie, przy czym $\Omega_{\max}\Omega_{\min}=1$. Funkcja przenoszenia dla drugiego rzędu ma postać

$$K_u(S) = \frac{(k_r/Q)S}{1 + \frac{1}{Q}S + S^2}$$

Dobroć filtru wynosi

$$Q = \frac{f_r}{B} = \frac{f_r}{f_{\max} - f_{\min}} = \frac{1}{\Omega_{\max} - \Omega_{\min}} = \frac{1}{\Delta\Omega}$$

Po uwzględnieniu powyższych zależności otrzymujemy znormalizowane częstotliwości graniczne:

$$\Omega_{\max/\min} = \frac{1}{2} \sqrt{(\Delta\Omega)^2 + 4} \pm \frac{1}{2} \Delta\Omega$$

- h) transformacja filtru dolnoprzepustowego na pasmowozaporowy
Stosujemy następujące podstawienie

$$S = \frac{\Delta\Omega}{S + \frac{1}{S}}$$

Charakterystyka jest symetryczna względem $\Omega=1$, przy czym oczywiście moduł w tym punkcie dąży do 0. Funkcja przenoszenia dla filtru drugiego rzędu ma postać

$$K_u(S) = \frac{k_{u0}(1 + S^2)}{1 + \Delta\Omega S + S^2}$$

- i) filtry wszechprzepustowe
Charakteryzują się stałą amplitudą w funkcji przenoszenia, ale powodują przesunięcie fazowe zależne od częstotliwości. Stosowane są do opóźniania sygnałów.
Funkcja przenoszenia przyjmuje postać

$$K_u(S) = \frac{\prod_i (1 - a_i S + b_i S^2)}{\prod_i (1 + a_i S + b_i S^2)}$$

Współczynniki a i b należy tu jednak przeliczyć, by dla $\Omega=1$ opóźnienie grupowe zmniejszyło się do $1/\sqrt{2}$ wartości dla małych częstotliwości (pojęcie 3dB częstotliwości granicznej nie ma tu zastosowania).

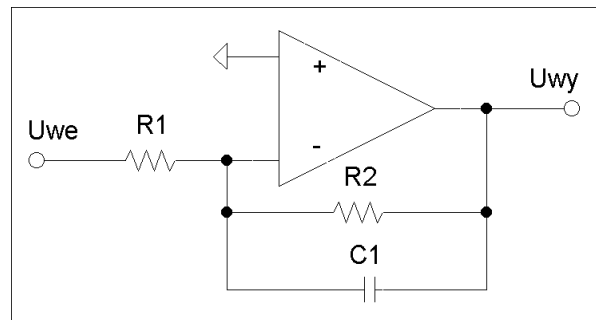
4. Realizacja filtrów

- a) filtr dolnoprzepustowy pierwszego rzędu
Funkcja przenoszenia

$$K_u(S) = -\frac{R_2/R_1}{1 + \omega_g R_2 C_1 S}$$

Określamy k_{u0} , pojemność C_1 i stąd

$$R_2 = \frac{a_1}{2\pi f_g C_1} \quad R_1 = -\frac{R_2}{k_{u0}}$$

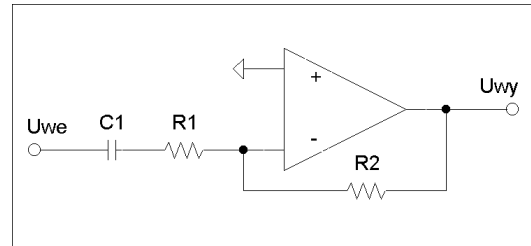


- b) filtr górnoprzepustowy pierwszego rzędu
Funkcja przenoszenia

$$K_u(S) = - \frac{R_2 / R_1}{1 + \frac{1}{\omega_g R_1 C_1} * \frac{1}{S}}$$

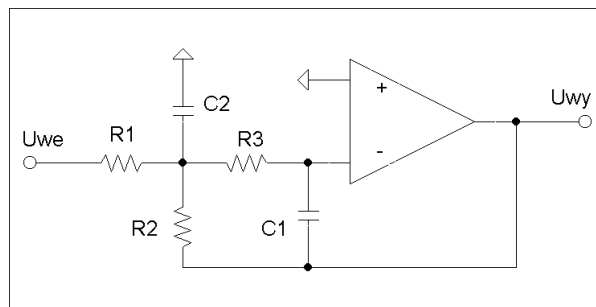
Określamy $k_{u\infty}$ oraz C_1 i stąd

$$R_1 = \frac{1}{2\pi f_g a_1 C_1} \quad R_2 = -R_1 k_{u\infty}$$



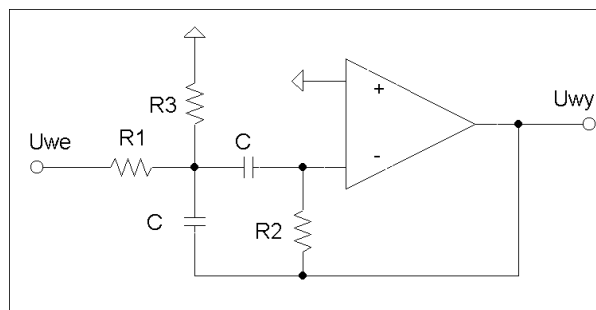
- c) filtr dolnoprzepustowy z wielokrotnym ujemnym sprzężeniem zwrotnym
Dla postaci ogólnej funkcji przenoszenia filtra dolnoprzepustowego otrzymujemy następujące wartości współczynników

$$k_{u0} = -R_2 / R_1 \quad a_1 = \omega_g C_1 \left(R_2 + R_3 + \frac{R_2 R_3}{R_1} \right) \quad b_1 = \omega_g^2 C_1 C_2 R_2 R_3$$



- d) filtr pasmowoprzepustowy z wielokrotnym ujemnym sprzężeniem zwrotnym
Korzystając ze wzoru na funkcję przenoszenia dla filtra pasmowoprzepustowego drugiego rzędu z punktu 3.g) otrzymujemy :

licznik	mianownik	mianownik
współczynnik przy S	współczynnik przy S	współczynnik przy S ²
$-\frac{R_2 R_3}{R_1 + R_3} C \omega_r$	$\frac{2R_1 R_3}{R_1 + R_3} C \omega_r$	$\frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 + R_3} C^2 \omega_r^2$

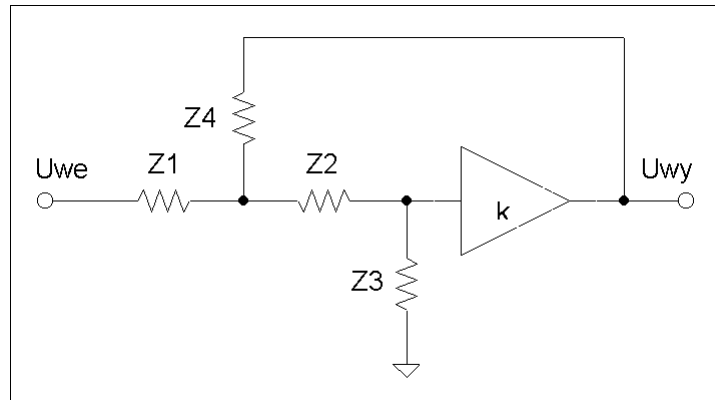


e) układ Sallen-Key'a

Zaletą układu Sallen-Key'a jest bardzo mała liczba elementów zewnętrznych, wadą – zależność parametrów od wzmacnienia. Przykładowe konfiguracje elementów dla różnych typów filtrów:

- filtr dolnoprzepustowy: $Z_1=R$, $Z_2=R$, $Z_3=C$, $Z_4=C$
- filtr górnoprzepustowy: $Z_1=C$, $Z_2=C$, $Z_3=R$, $Z_4=R$
- filtr pasmowoprzepustowy: $Z_1=C$, $Z_2=R$, $Z_3=C$, $Z_4=R$

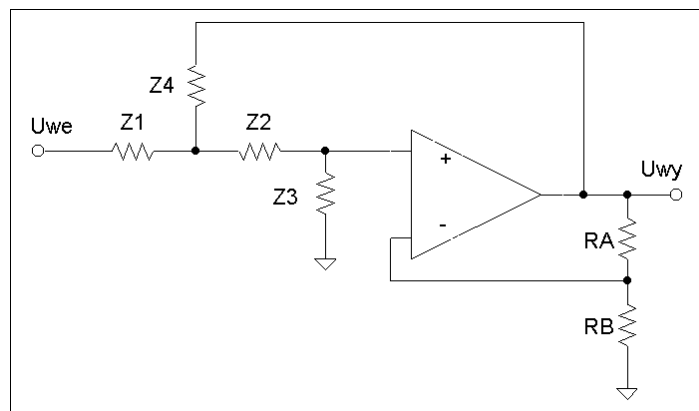
Schemat ogólny sekcji Sallen-Key'a:



Funkcja przenoszenia dla schematu ogólnego sekcji Sallen-Key'a:

$$K_u(S) = \frac{k_{u0}}{1 + \frac{Z_1 + Z_2}{Z_3} + \frac{Z_1}{Z_4} \left(\frac{Z_2}{Z_3} + 1 - k_{u0} \right)}$$

Realizacja praktyczna z użyciem wzmacniacza operacyjnego:



W układzie jak na rysunku powyżej $k_{u0} = R_A/R_B + 1$.

Dla wzmacniacza pracującego jako wtórnik napięciowy funkcja przenoszenia upraszcza się do postaci pozwalającej na szybki dobór rodzaju elementów w zależności od typu filtru:

$$K_u(S) = \frac{Z_3 Z_4}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_4 + Z_2 Z_4 + Z_3 Z_4}$$

Dodatek 3. Współczynniki dla różnych typów filtrów

n	i	a_i	b_i	f_{ci}/f_c	Q_i
<i>Filtry z tłumieniem krytycznym</i>					
1	1	1,0000	0,0000	1,000	—
2	1	1,2872	0,4142	1,000	0,50
3	1	0,5098	0,0000	1,961	—
	2	1,0197	0,2599	1,262	0,50
4	1	0,8700	0,1892	1,480	0,50
	2	0,8700	0,1892	1,480	0,50
5	1	0,3856	0,0000	2,593	—
	2	0,7712	0,1487	1,669	0,50
	3	0,7712	0,1487	1,669	0,50
6	1	0,6999	0,1225	1,839	0,50
	2	0,6999	0,1225	1,839	0,50
	3	0,6999	0,1225	1,839	0,50
7	1	0,3226	0,0000	3,100	—
	2	0,6453	0,1041	1,995	0,50
	3	0,6453	0,1041	1,995	0,50
	4	0,6453	0,1041	1,995	0,50
8	1	0,6017	0,0905	2,139	0,50
	2	0,6017	0,0905	2,139	0,50
	3	0,6017	0,0905	2,139	0,50
	4	0,6017	0,0905	2,139	0,50
9	1	0,2829	0,0000	3,534	—
	2	0,5659	0,0801	2,275	0,50
	3	0,5659	0,0801	2,275	0,50
	4	0,5659	0,0801	2,275	0,50
	5	0,5659	0,0801	2,275	0,50
10	1	0,5358	0,0718	2,402	0,50
	2	0,5358	0,0718	2,402	0,50
	3	0,5358	0,0718	2,402	0,50
	4	0,5358	0,0718	2,402	0,50
	5	0,5358	0,0718	2,402	0,50
<i>Filtry Bessela</i>					
1	1	1,0000	0,0000	1,000	—
2	1	1,3617	0,6180	1,000	0,58
3	1	0,7560	0,0000	1,323	—
	2	0,9996	0,4772	1,414	0,69
4	1	1,3397	0,4889	0,978	0,52
	2	0,7743	0,3890	1,797	0,81
5	1	0,6656	0,0000	1,502	—
	2	1,1402	0,4128	1,184	0,56
	3	0,6216	0,3245	2,138	0,92
6	1	1,2217	0,3887	1,063	0,51
	2	0,9686	0,3505	1,431	0,61
	3	0,5131	0,2756	2,447	1,02
7	1	0,5937	0,0000	1,684	—
	2	1,0944	0,3395	1,207	0,53
	3	0,8304	0,3011	1,695	0,66
	4	0,4332	0,2381	2,731	1,13
8	1	1,1112	0,3162	1,164	0,51
	2	0,9754	0,2979	1,381	0,56
	3	0,7202	0,2621	1,963	0,71
	4	0,3728	0,2087	2,992	1,23
9	1	0,5386	0,0000	1,857	—
	2	1,0244	0,2834	1,277	0,52
	3	0,8710	0,2636	1,574	0,59
	4	0,6320	0,2311	2,226	0,76
	5	0,3257	0,1854	3,237	1,32

n	i	a_i	b_i	f_{si}/f_0	Q_i
10	1	1,0215	0,2650	1,264	0,50
	2	0,9393	0,2549	1,412	0,54
	3	0,7815	0,2351	1,780	0,62
	4	0,5604	0,2059	2,479	0,81
	5	0,2883	0,1665	3,466	1,42
<i>Filtry Butterwortha</i>					
1	1	1,0000	0,0000	1,000	—
2	1	1,4142	1,0000	1,000	0,71
3	1	1,0000	0,0000	1,000	—
	2	1,0000	1,0000	1,272	1,00
4	1	1,8478	1,0000	0,719	0,54
	2	0,7654	1,0000	1,390	1,31
5	1	1,0000	0,0000	1,000	—
	2	1,6180	1,0000	0,859	0,62
	3	0,6180	1,0000	1,448	1,62
6	1	1,9319	1,0000	0,676	0,52
	2	1,4142	1,0000	1,000	0,71
	3	0,5176	1,0000	1,479	1,93
7	1	1,0000	0,0000	1,000	—
	2	1,8019	1,0000	0,745	0,55
	3	1,2470	1,0000	1,117	0,80
	4	0,4450	1,0000	1,499	2,25
8	1	1,9616	1,0000	0,661	0,51
	2	1,6629	1,0000	0,829	0,60
	3	1,1111	1,0000	1,206	0,90
	4	0,3902	1,0000	1,512	2,56
9	1	1,0000	0,0000	1,000	—
	2	1,8794	1,0000	0,703	0,53
	3	1,5321	1,0000	0,917	0,65
	4	1,0000	1,0000	1,272	1,00
	5	0,3473	1,0000	1,521	2,88
10	1	1,9754	1,0000	0,655	0,51
	2	1,7820	1,0000	0,756	0,56
	3	1,4142	1,0000	1,000	0,71
	4	0,9080	1,0000	1,322	1,10
	5	0,3129	1,0000	1,527	3,20
<i>Filtry Czebyszewa o falistości 0,5 dB</i>					
1	1	1,0000	0,0000	1,000	—
2	1	1,3614	1,3827	1,000	0,86
3	1	1,8636	0,0000	0,537	—
	2	0,6402	1,1931	1,335	1,71
4	1	2,6282	3,4341	0,538	0,71
	2	0,3648	1,1509	1,419	2,94
5	1	2,9235	0,0000	0,342	—
	2	1,3025	2,3534	0,881	1,18
	3	0,2290	1,0833	1,480	4,54
6	1	3,8645	6,9797	0,368	0,68
	2	0,7528	1,8573	1,078	1,81
	3	0,1589	1,0711	1,495	6,51
7	1	4,0211	0,0000	0,249	—
	2	1,8729	4,1795	0,645	1,09
	3	0,4861	1,5676	1,208	2,58
	4	0,1156	1,0443	1,517	8,84
8	1	5,1117	11,9607	0,276	0,68
	2	1,0639	2,9365	0,844	1,61
	3	0,3439	1,4206	1,284	3,47
	4	0,0885	1,0407	1,521	11,53

n	i	a_i	b_i	f_{oi}/f_o	Q_i
9	1	5,1318	0,0000	0,195	—
	2	2,4283	6,6307	0,506	1,06
	3	0,6839	2,2908	0,989	2,21
	4	0,2559	1,3133	1,344	4,48
	5	0,0695	1,0272	1,532	14,58
10	1	6,3648	18,3695	0,222	0,67
	2	1,3582	4,3453	0,689	1,53
	3	0,4822	1,9440	1,091	2,89
	4	0,1994	1,2520	1,381	5,61
	5	0,0563	1,0263	1,533	17,99
Filtry Czebyszewa o falistości 1 dB					
1	1	1,0000	0,0000	1,000	—
2	1	1,3022	1,5515	1,000	0,96
3	1	2,2156	0,0000	0,451	—
	2	0,5442	1,2057	1,353	2,02
4	1	2,5904	4,1301	0,540	0,78
	2	0,3039	1,1697	1,417	3,56
5	1	3,5711	0,0000	0,280	—
	2	1,1280	2,4896	0,894	1,40
	3	0,1872	1,0814	1,486	5,56
6	1	3,8437	8,5529	0,366	0,76
	2	0,6292	1,9124	1,082	2,20
	3	0,1296	1,0766	1,493	8,00
7	1	4,9520	0,0000	0,202	—
	2	1,6338	4,4899	0,655	1,30
	3	0,3987	1,5834	1,213	3,16
	4	0,0937	1,0423	1,520	10,90
8	1	5,1019	14,7608	0,276	0,75
	2	0,8916	3,0426	0,849	1,96
	3	0,2806	1,4334	1,285	4,27
	4	0,0717	1,0432	1,520	14,24
9	1	6,3415	0,0000	0,158	—
	2	2,1252	7,1711	0,514	1,26
	3	0,5624	2,3278	0,994	2,71
	4	0,2076	1,3166	1,346	5,53
	5	0,0562	1,0258	1,533	18,03
10	1	6,3634	22,7468	0,221	0,75
	2	1,1399	4,5167	0,694	1,86
	3	0,3939	1,9665	1,093	3,56
	4	0,1616	1,2569	1,381	6,94
	5	0,0455	1,0277	1,532	22,26
Filtry Czebyszewa o falistości 2 dB					
1	1	1,0000	0,0000	1,000	—
2	1	1,1813	1,7775	1,000	1,13
3	1	2,7994	0,0000	0,357	—
	2	0,4300	1,2036	1,378	2,55
4	1	2,4025	4,9862	0,550	0,93
	2	0,2374	1,1896	1,413	4,59
5	1	4,6345	0,0000	0,216	—
	2	0,9090	2,6036	0,908	1,78
	3	0,1434	1,0750	1,493	7,23
6	1	3,5880	10,4648	0,373	0,90
	2	0,4925	1,9622	1,085	2,84
	3	0,0995	1,0826	1,491	10,46
7	1	6,4760	0,0000	1,154	—
	2	1,3258	4,7649	0,665	1,65
	3	0,3067	1,5927	1,218	4,12
	4	0,0714	1,0384	1,523	14,28

n	i	a_i	b_i	f_{ai}/f_a	Q_i
8	1	4,7743	18,1510	0,282	0,89
	2	0,6991	3,1353	0,853	2,53
	3	0,2153	1,4449	1,285	5,58
	4	0,0547	1,0461	1,518	18,69
9	1	8,3198	0,0000	0,120	—
	2	1,7299	7,6580	0,522	1,60
	3	0,4337	2,3549	0,998	3,54
	4	0,1583	1,3174	1,349	7,25
10	5	0,0427	1,0232	1,536	23,68
	1	5,9618	28,0376	0,226	0,89
	2	0,8947	4,6644	0,697	2,41
	3	0,3023	1,9858	1,094	4,66
	4	0,1233	1,2614	1,380	9,11
	5	0,0347	1,0294	1,531	29,27

Filtry Czebyszewa o falistości 3 dB

1	1	1,0000	0,0000	1,000	—
2	1	1,0650	1,9305	1,000	1,30
3	1	3,3496	0,0000	0,299	—
	2	0,3559	1,1923	1,396	3,07
4	1	2,1853	5,5339	0,557	1,08
	2	0,1964	1,2009	1,410	5,58
5	1	5,6334	0,0000	0,178	—
	2	0,7620	2,6530	0,917	2,14
	3	0,1172	1,0686	1,500	8,82
6	1	3,2721	11,6773	0,379	1,04
	2	0,4077	1,9873	1,086	3,46
	3	0,0815	1,0861	1,489	12,78
7	1	7,9064	0,0000	0,126	—
	2	1,1159	4,8963	0,670	1,98
	3	0,2515	1,5944	1,222	5,02
	4	0,0582	1,0348	1,527	17,46
8	1	4,3583	20,2948	0,286	1,03
	2	0,5791	3,1808	0,855	3,08
	3	0,1765	1,4507	1,285	6,83
	4	0,0448	1,0478	1,517	22,87
9	1	10,1759	0,0000	0,098	—
	2	1,4585	7,8971	0,526	1,93
	3	0,3561	2,3651	1,001	4,32
	4	0,1294	1,3165	1,351	8,87
	5	0,0348	1,0210	1,537	29,00
10	1	5,4449	31,3788	0,230	1,03
	2	0,7414	4,7363	0,699	2,94
	3	0,2479	1,9952	1,094	5,70
	4	0,1008	1,2638	1,380	11,15
	5	0,0283	1,0304	1,530	35,85

Tablica 14.7. Wewnętrzne wzmocnienie w filtrze z pojedynczym dodatnim sprzężeniem zwrotnym

	Tłumienie krytyczne	Filtry			Drgania samowzbudne
		Bessela	Butterwortha	Czebyszewa (3 dB)	
α	1,000	1,268	1,586	2,234	3,000

Dodatek 4. Zwięzły opis programu PSpice

Opracowanie Małgorzata Napieralska

*Niniejszy dokument został opracowany do celów dydaktycznych
i można go wykorzystywać wyłącznie do niekomercyjnego użytku własnego.*

W celu symulacji układu elektronicznego przy pomocy programu PSPICE należy dokonać edycji pliku zawierającego dane o symulowanym obwodzie oraz instrukcje sterujące.

Nazwa pliku jest dowolna z rozszerzeniem **.cir**, np. *cwiczenie1.cir*. Zbiór wyjściowy w postaci tekstowej jest automatycznie zakończony **.out** a zbiór danych graficznych **.dat** (można go przeglądać przy pomocy programu PROBE). Plik może być utworzony przy użyciu dowolnego edytora tekstowego np. Notepad.

1. Opis obwodu

Pierwsza linia zbioru musi zawierać tytuł symulacji np. nazwę symulowanego obwodu. Następnie wprowadzany jest opis obwodu z numeracją wszystkich węzłów. Węzeł masy musi mieć numer « 0 ». Każdy element powinien mieć swoją indywidualną nazwę. Nazwa elementu jest dowolna a pierwsza litera oznacza typ elementu:

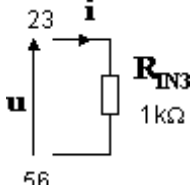
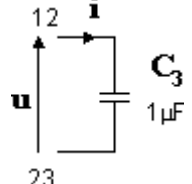
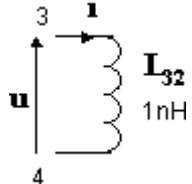
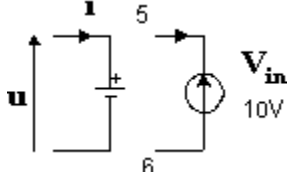
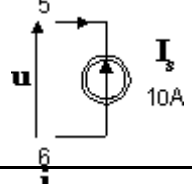
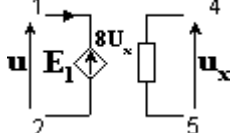
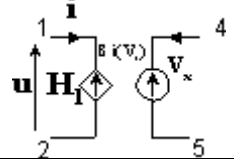
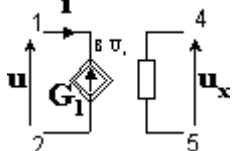
R - rezystancja
L - indukcyjność
K – indukcyjność sprzężona
C - pojemność
I – niezależne źródło prądowe
V - niezależne źródło napięciowe
E - źródło napięcia sterowane napięciem (VCVS)
H - źródło napięcia sterowane prądem (CCVS)
G - źródło prądu sterowane napięciem (VCCS)
F - źródło prądu sterowane prądem (CCCS)
D - dioda
Q – tranzystor bipolarny
J – tranzystor JFET
M - tranzystor MOS
X – makromodel (podobwód)

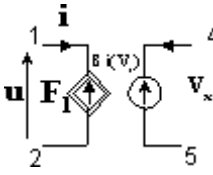
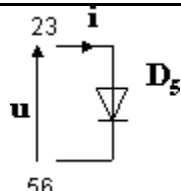
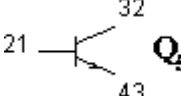
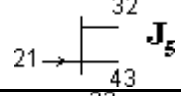
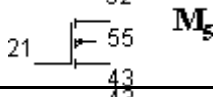
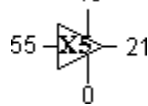
Do opisu każdego elementu przeznaczona jest jedna linia. Po nazwie elementu umieszczamy numery węzłów, między którymi znajduje się element; pierwszy węzeł ma potencjał „+” drugi potencjał „-”. Następnie umieszczamy wartości elementów w jednostkach SI. Można stosować następujące przedrostki :

T = E12	G = E9	MEG = E6	K = E3	
M = E-3	U = E-6	N = E-9	P = E-12	F = E-15

W przypadku elementów półprzewodnikowych czy makromodeli zamiast wartości podawana jest nazwa modelu lub podobwodu.

WPISYWANIE ELEMENTÓW

Typ elementu	Symbol	Instrukcja w SPICE
1) Rezystancja R		RIN3 23 56 1K
2) Pojemność C		C3 12 23 1U
3) Indukcyjność L		L32 3 4 1N
4) Źródła niezależne a) źródło napięciowe V		VIN 5 6 DC 10
b) źródło prądowe I		IS 6 5 DC 10
5) Liniowe źródła sterowane VCVS - źródło napięcia sterowane napięciem E		E1 1 2 4 5 8.0
a) CCVS – źródło napięcia sterowane prądem H		H1 1 2 VX 8.0
b) VCCS – źródło prądu sterowane napięciem G		G1 2 1 4 5 8.0

c) CCCS – źródło prądu sterowane prądem F		F1 2 1 V3 8.0
6) dioda D		* Anoda katoda D5 23 56 MOD12
7) Tranzystor bipolarny Q		* C B E Q5 32 21 43 BC107
8) Tranzystor JFET J		* D G S J5 32 21 43 MODJF1
9) Tranzystor MOS M		* D G S Sub. M5 32 21 43 55 MOS55
10) Makromodel (.SUBCKT/.ENDS) X		* IN OUT VDD GND X5 55 21 43 0 INWERTER

Kolejność umieszczania węzłów przy opisywaniu przyrządów półprzewodnikowych jest następująca:

Dioda: anoda - katoda

Tranzystor bipolarny: kolektor – baza – emiter (podłoże)

Tranzystor JFET: dren – bramka – źródło

Tranzystor MOS: dren – bramka – źródło – podłoże

W przypadku źródeł sterowanych dwie pierwsze cyfry oznaczają numery węzłów, do których przyłożone jest źródło. Dla źródła sterowanego napięciowo następne dwie cyfry podają numery węzłów, do których przyłożone jest napięcie sterujące. Dla źródła sterowanego prądowo należy podać nazwę źródła napięciowego, którego prąd jest prądem sterującym.

Wpisywanie dodatkowych parametrów elementów

Dane elementów mogą być uzupełnione przez podanie dodatkowych informacji za pomocą współczynników.

a) Rezystancja może być zależna od temperatury przez podanie wartości współczynników TC1 i TC2

$$R(T)=R(T_{nom}) [1 + TC1(\delta T) + TC2(\delta T)^2]$$

gdzie: $\delta T = T - T_{nom}$

przykład

R1 2 0 15K TC=0.001 0.0025

b) Indukcyjność i pojemność mogą być nieliniowe w funkcji prądu lub napięcia co jest opisane przez wielomiany

$$L = L_0 + L_1 \cdot I + L_2 \cdot I^2 + \dots$$

$$C = C_0 + C_1 \cdot U + C_2 \cdot U^2 + \dots$$

Postać ogólna instrukcji:

Cxxxxxxx N+ N- POLY C0 C1 C2 ... <IC=INCOND>
Lxxxxxxx N+ N- POLY L0 L1 L2 ... <IC=INCOND>

Instrukcja IC=INCOND pozwala na zdefiniowanie warunków początkowych (INITIAL CONDITION) napięcia lub prądu niezbędnych do obliczenia stanów początkowych.

przykład

C45 18 21 POLY 2 0.3 IC=10

Gdzie C0=2, C1=0.3, początkowa wartość napięcia na kondensatorze wynosi 10V.

c) Indukcyjności sprzężone opisane są w postaci

Kxxxx LCxxxx LMxxxx liczba

przykład

K21 LC1 LMR32 0.99

litera K oznacza, że indukcyjność LC1 jest sprzężona z indukcyjnością LMR32 a współczynnik sprzężenia wynosi 0.99.

d) Źródła sterowane

Mogą być nieliniowe oraz zależeć od wielu zmiennych. Opisuje się je wówczas instrukcją POLY(N), gdzie N jest wymiarem zależności. Następnie należy podać N par węzłów dotyczących napięć sterujących lub N nazw źródeł napięcia dotyczących prądów sterujących. Na końcu podawane są współczynniki wielomianu w następującej postaci dla 2 zmiennych i wielomianu 2go stopnia:

$$a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 x^2 + a_4 xy + a_5 y^2$$

przykład

1. dla **VCVS**:

E25 7 21 POLY(2) 12 18 31 45 1 10 5 0.5 0.6 0.7 IC=12
(x y a₀ a₁ a₂ a₃ a₄ a₅)

2. dla **CCCS**

F36 8 54 POLY(2) VIN V5 0.1M 1K 10.1 1 1 0.1 IC=1
(x y a₀ a₁ a₂ a₃ a₄ a₅)

2. Opisywanie źródeł niezależnych

- **Dziedzina DC**

- podajemy wartość napięcia lub prądu

Przykład

VIN 2 0 DC 10

IIN 2 0 DC 10

- **Dziedzina AC**

- podajemy wartość amplitudy i fazy sygnału

Przykład

VIN 2 0 AC 1 180

IIN 2 0 AC 1 0

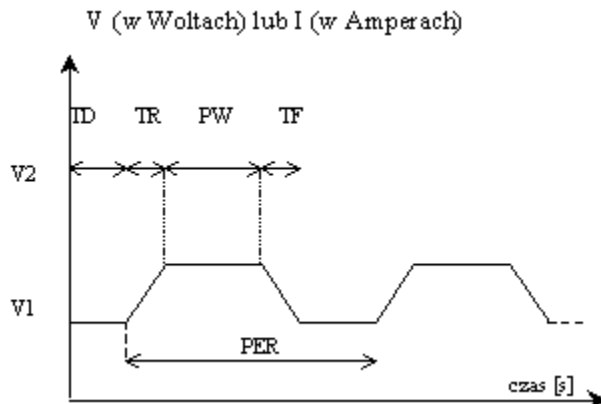
- **Dziedzina TR**

Istnieje 5 typów źródeł :

a) Deklaracja źródła impulsowego ma postać

PULSE (V1 V2 TD TR TF PW PER) –

gdzie V1 – wartość początkowa (w Voltach lub Amperach)
V2 – wartość impulsu (w Voltach lub Amperach)
TD – czas opóźnienia (w sekundach, wartość wbudowana 0.0)
TR – czas narastania (w sekundach, wartość wbudowana 0.0)
TF – czas opadania (w sekundach, wartość wbudowana 0.0)
PW – szerokość impulsu
PER – okres impulsu



Przykład

Impuls jednostkowy o amplitudzie 1 zapisany jest w postaci :

VUNIT 1 0 PULSE (0 1 0 0)

b) Deklaracja źródła sinusoidalnego ma postać

SIN (VO VA FREQ TD THETA)

Gdzie VO – wartość składowej stałej (w Voltach lub Amperach)
VA - amplituda (w Voltach lub Amperach)
FREQ - częstotliwość - (w Hz, wartość wbudowana $f=1/TSTOP$)
TD - czas opóźnienia (w sekundach, wartość wbudowana 0.0)
THETA – współczynnik w sekundach, wartość wbudowana 0.0)

Źródło sinusoidalne jest opisane wzorem

dla $T < TD$, $V = VO$
dla $TD < T < TSTOP$:

$$V = VO + VA \cdot \exp[-(time - TD) \cdot THETA] \cdot \sin[2\pi \cdot FREQ \cdot (time + TD)]$$

Przykład

V31 5 8 SIN (0 1 500MEG 0 0)

c) Deklaracja źródła wykładniczego ma postać

EXP (V1 V2 TD1 TAU1 TD2 TAU2) –

gdzie V1 – wartość początkowa (w Voltach lub Amperach)
V2 – wartość impulsu (w Voltach lub Amperach)
TD1 - czas opóźnienia dla zbocza narastającego impulsu (w sekundach, wartość wbudowana 0.0)
TAU1 – stała czasu narastania impulsu (w sekundach, wartość wbudowana =TSTOP)
TD2 – czas opóźnienia określający początek opadania sygnału (w sekundach, wartość wbudowana = TD1+TSTEP)
TAU2 – stała czasu opadania impulsu (w sekundach, wartość wbudowana =TSTEP)

Źródło wykładnicze jest opisane wzorem

dla $T < TD1$, $V = V1$

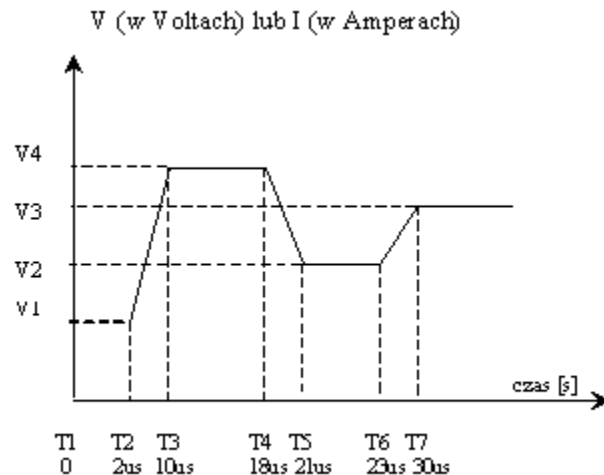
dla $TD1 < T < TD2$, $V = V1 + (V2 - V1) \cdot [1 - \exp[-(time - TD1)/TAU1]]$

dla $TD2 < T < TSTOP$, $V = V1 + (V2 - V1) \cdot [1 - \exp[-(time - TD1)/TAU1]] + (V1 - V2) \cdot [1 - \exp[-(time - TD2)/TAU2]]$

d) Deklaracja źródła odcinkowo-liniowego ma postać

PWL (T1 V1 <T2 V2 T3 V3 ...>) –

gdzie źródło zmienia się liniowo i przyjmuje wartości V1 dla czasu $T = T1$, V2 dla czasu $T = T2$, itd...



przykład

dla $V1 = 1V$, $V2 = 1.2V$, $V3 = 2V$, $V4 = 2.2V$
i czasów przedstawionych na rysunku :

VIT 1 0 PWL (0 1 2U 1 10U 2.2 18U 2.2 21U 1.2 23U 1.2 30U 2)

e) Deklaracja źródła o modulowanej częstotliwości ma postać

SFFM (VO VA FC MDI FS) -

gdzie VO - wartość składowej stałej (w Voltach lub Amperach)
VA - amplituda (w Voltach lub Amperach)
FC - częstotliwość nośna - (w Hz, wartość wbudowana $f=1/TSTOP$)
MDI - współczynnik modulacji
FS - częstotliwość sygnału - (w Hz, wartość wbudowana $f=1/TSTOP$)

Źródło o modulowanej częstotliwości jest opisane wzorem

$$V = VO + VA \cdot \sin[(2\pi \cdot FC \cdot \text{time}) + MDI \cdot \sin (2 \pi \cdot FS \cdot \text{time})]$$

przykład

V1 5 8 SFFM (0 1M 10K 6 1K)

3. Instrukcje sterujące

Po opisie topologii analizowanego obwodu i wpisaniu elementów w programie należy umieścić instrukcje sterujące. Każda instrukcja sterująca musi zaczynać się od kropki.

W celu określenia szerokości danych wejściowych i wyjściowych można stosować instrukcję **.WIDTH** o postaci

.WIDTH IN=80 OUT = 80

a) Instrukcja **.MODEL**

Służy do zdefiniowania modelu przyrządu półprzewodnikowego, elementu nieliniowego lub bramki logicznej. Ogólna postać instrukcji jest następująca:

.MODEL **Nazwa modelu** **Typ przyrządu** **Nazwa listy parametrów modelu**

Nazwa modelu jest dowolna lecz musi zaczynać się od litery.

Typ przyrządu (wybrane elementy)

D	dioda
NPN	tranzystor bipolarny NPN
PNP	tranzystor bipolarny PNP
NJF	tranzystor JFET z kanałem typu N
PJF	tranzystor JFET z kanałem typu P
NMOS	tranzystor MOS z kanałem typu N
PMOS	tranzystor MOS z kanałem typu P

Nazwa listy parametrów modelu zawiera wartości parametrów modelu. Parametry nie określone przez użytkownika przyjmują wartości wbudowane.

Przykład

.MODEL MOD1 NPN BF=60 IS=1.2E-13

.MODEL MOD2 D

.MODEL MOD3 NJF VTO=-3V BETA=1E-4 LAMBDA=2.0E-2 CGS=2PF CGD=2PF
+ PB=1V IS=1.0E-14

b) Instrukcja .SUBCKT

Przeznaczona jest do zdefiniowania makromodelu (podobwodu) (wywoływanego przez X....).
Ogólna postać instrukcji jest następująca:

.SUBCKT **Nazwa makromodelu** **Węzły N1 N2 ...**

Opis makromodelu

.ENDS **Nazwa makromodelu**

Numeracja węzłów wewnątrz makromodelu jest niezależna od numeracji węzłów obwodu głównego. Nie należy stosować „0”, który jest zarezerwowany dla masy.

Opis makromodelu - opisuje się go jak obwód zewnętrzny. Opis kończy instrukcja **.ENDS**.

Węzły N1 N2 ... są węzłami zewnętrznymi makromodelu. Nie mogą zawierać węzła o numerze „0”.

Przykład

.SUBCKT WZMOP 1 2 3 4 5

.ENDS WZMOP

W przypadku gdy chcemy stosować makromodel znajdujący się w jednej z bibliotek programu PSPICE należy wywołać tę bibliotekę.

Przykład

Stosujemy wzmacniacz operacyjny Ampli-Op μ A741 znajdujący się w bibliotece OPNOM.LIB

.LIB OPNOM.LIB

* wywołanie biblioteki, w której znajduje się Ampli-Op μ A741

X1 1 2 0 4 5 6 UA741

* umieszczenie wzmacniacza w układzie

4. Analizy w programie PSPICE

Obliczenia wpisanego układu elektronicznego mogą być wykonane w 3 dziedzinach:

- a) analiza statyczna (**DC**)
- b) analiza prądu przemiennego, zwana też analizą małosygnałową (**AC**), (dla układu zlinearyzowanego w punkcie pracy wyznaczonym w wykonanej uprzednio analizie DC).
- c) analiza stanów przejściowych (**TR**)

a) Wyznaczenie punktu pracy

Aby otrzymać w zbiorze wyjściowym wszystkie informacje o napięciach, prądach i małosygnałowych modelach elementów w punkcie pracy stosujemy instrukcję

.OP

b) Analiza statyczna

Obliczenia w dziedzinie .DC mogą być wykonane dla wielu wartości prądów i napięć. Instrukcja ma postać:

.DC	Nazwa źródła	Wartość początkowa	Wartość końcowa	Krok
-----	--------------	--------------------	-----------------	------

W przypadku wielu źródeł należy wpisać kolejno wartości ich parametrów

Przykład

.DC VCE 0 100 5 VBE 0 0.7 0.1

c) Analiza małosygnałowa

Zmienną niezależną w analizie .AC jest częstotliwość. Zmienia się ona od wartości FSTART do FSTOP. Dla analizy .AC należy zdefiniować minimum jedno źródło AC podając jego amplitudę i fazę. Postacie analizy :

.AC DEC ND FSTART FSTOP

.AC OCT NO FSTART FSTOP

.AC LIN NP FSTART FSTOP

gdzie **DEC**: skala logarytmiczna, **ND** liczba punktów na dekadę.
OCT: skala logarytmiczna, **NO** liczba punktów na oktawę.
LIN: zmiany liniowe, **NP** liczba punktów między **FSTART** i **FSTOP**.

Przykład

.AC DEC 5 1K 10MEG

W celu otrzymania charakterystyki przejściowej (output/input), rezystancji wejściowej i wyjściowej stosuje się instrukcję **.TF**. Pierwsza zmienna następująca po tej instrukcji określa zmienną wyjściową, druga wejściową.

Przykład

.TF V(23) VIN1

PSpice liczy stosunek V(23)/VIN, małosygnałową rezystancję wejściową dla VIN1 oraz małosygnałową rezystancję wyjściową dla V(23).

d) Analiza stanów przejściowych

Wywoływana jest przy pomocy instrukcji **.TRAN**. Zmienną niezależną w analizie jest czas. Postać analizy:

.TRAN TSTEP TSTOP <TSTART <TMAX>> <UIC>

gdzie

TSTEP - wartość kroku dla wydruku wyników
TSTOP - czas końcowy symulacji
TSTART - początek symulacji (wartość wbudowana =0)
TMAX - maksymalna wartość kroku (wartość wbudowana TSTOP/50)
UIC - polecenie uwzględnienia warunków początkowych określonych w instrukcji **.IC** i nie wykonywania analizy DC

Przykład

.TRAN 1N 0.2U UIC

5. Wyniki obliczeń

Wyniki można przedstawić w formie:

- .PRINT** – forma tabelaryczna
- .PLOT** – rysowanie w formie alfanumerycznej
- .PROBE** – forma graficzna. Zastosowanie postprocesora graficznego pozwala na wszechstronne opracowanie otrzymanych wykresów.

Funkcje sygnałów dostępne przy użyciu **.PROBE**

ABS(x)	wartość bezwzględna
SGN(x)	1 dla $x > 0$, 0 dla $x=0$, -1 dla $x < 0$
SQRT(x)	pierwiastek kwadratowy

EXP(x)	funkcja wykładnicza
LOG(x)	logarytm naturalny
LOG10(x)	logarytm décimal
DB(x)	decybel ($20 \log_2(x)$)
PWR(x,y)	potęga $(\text{abs}(x))^y$
SIN(x)	sinus (x w radianach)
COS(x)	cosinus
TAN(x)	tangens
ATAN(x)	arctangens
d(y)	pochodna y względem zmiennej osi x
s(y)	całka y względem zmiennej osi x
AVG(y)	wartość średnia y
RMS(y)	wartość skuteczna y

6. Wybrane analizy dodatkowe

a) Zmiana temperatury

Obliczenia wykonywane są dla temperatury nominalnej $T_{NOM}=27^{\circ}\text{C}$ (300K). Można ją zmienić globalnie dla całego symulowanego układu przy użyciu następującej instrukcji:

.TEMP = wartość
(TEMP > -223°C)

Przykład

.TEMP = 125

Dla elementów, które zależą od temperatury należy podać odpowiednie współczynniki temperaturowe. Temperatura odniesienia pozostaje równa $T_{NOM} = 27^{\circ}\text{C}$. W celu zmiany temperatury odniesienia należy zastosować instrukcję **.OPTIONS**.

Przykład

.OPTIONS TNOM = wartosc

Instrukcji tej można użyć w celu wyeliminowania stronicowania i drukowania nagłówek na każdej stronie, co jest wygodne gdy pliki wyjściowe oglądamy na ekranie monitora.

.OPTIONS NOPAGE

b) Obliczanie wrażliwości

Wrażliwość (małosygnałowa AC) jest liczona dla każdej podanej zmiennej wyjściowej względem wszystkich parametrów obwodu.

Ogólna postać instrukcji:

.SENS OV1 <OV2 ...>

Przykład

.SENS V(1) V(2,6) I(VIN)

c) Analiza Fouriera

Wykonywana jest dla analizy czasowej **TRAN**
Ogólna postać instrukcji:

.FOUR FREQ OV1 <OV2 OV3 ...>

gdzie **FREQ** częstotliwość sygnału

OV1 OV2 OV3 ... sygnały, które mają być poddane analizie Fouriera

Przykład

.FOUR 10K V(1)

d) Definiowanie punktów startowych i warunków początkowych

Instrukcja **.NODESET** stosowana jest dla analizy DC i ustawia punkt startowy do nieliniowych iteracji.
Przydatna np. przy analizie układów przerzutnikowych w celu wymuszenia ich stanu początkowego.
Ogólna postać instrukcji:

.NODESET V(NODNUM)=WARTOŚĆ V(NODNUM)= WARTOŚĆ...

Przykład

.NODESET V(1)=10 V(2)=5.1 V(14)=7.12

Warunki początkowe dla analizy TRAN określa się za pomocą instrukcji **.IC**
Ogólna postać instrukcji:

.IC V(NODNUM)= WARTOŚĆ V(NODNUM)= WARTOŚĆ ...

Przykład

.IC V(4)=14 V(3)=6.9 V(24)=33

e) Analiza szumowa

Wykonywana jest dla analizy zmiennoprądowej AC i powinna być poprzedzona analizą AC. Składowe widma mocy szumu, pochodzące od każdego z elementów układu, są sumowane na wyjściu napięciowym. Do przeprowadzenia analizy szumowej potrzebne są modele szumowe elementów. W układzie mogą występować dwa rodzaje elementów szumowych: rezystory generujące szumy termiczne, przyrządy półprzewodnikowe generujące szumy termiczne i szumy migotania.

Ogólna postać instrukcji:

.NOISE OUTV INSRC NUMS

gdzie **OUTV** napięcie wyjściowe, dla którego jest analizowany wkład każdej składowej szumu

INSRC źródło niezależnego napięcia lub prądu, dla którego jest liczony równoważny szum wejściowy

NUMS liczba określająca co ile punktów na osi częstotliwości (w stosunku do analizy zmiennoprądowej) będzie wykonywana analiza szumów.

Przykład

.NOISE V(3) VIN 5

f) Analiza Monte Carlo

Umożliwia wykonanie obliczeń z uwzględnieniem tolerancji wartości parametrów modeli. Podajemy ile razy ma być wykonana analiza, każdorazowo po wyznaczeniu nowych wartości zmienianych parametrów oraz rodzaj analizy głównej (DC, AC, TRAN). Obliczenia analizy Monte Carlo są wykonywane w ramach odrębnego typu analizy i nie mają wpływu na wyniki pozostałych analiz.

Ogólna postać instrukcji:

.MC RUNS ANALYSIS VOUT FUN options

gdzie **RUNS** - liczba przeprowadzonych analiz Monte Carlo

ANALYSIS - rodzaj analizy, np. AC, DC, TRAN

VOUT - zmienna obwodowa, którą chcemy badać

FUN - funkcja obliczana na podstawie wartości wszystkich przebiegów analizy Monte Carlo w celu określenia liczbowego parametru określającego wrażliwość zmiennej VOUT na przypadkowe zmiany parametrów modeli. Najczęściej stosuje się YMAX oznaczającą maksymalną odchyłkę zmiennej od wartości nominalnej.

options - jedna lub więcej opcji analizy Monte Carlo. Najczęściej stosowane opcje to **list** oznaczająca wypisanie parametrów poszczególnych modeli w każdym przebiegu analizy i **output all** po zastosowaniu której wyniki wszystkich analiz możemy porównać w programie probe na jednym wykresie.

g) Analiza najgorszego przypadku (Worst Case)

W przeciwieństwie do analizy Monte Carlo analiza najgorszego przypadku uwzględnia jedynie skrajne wartości tolerancji parametrów przy wykonywaniu obliczeń układu.

Ogólna postać instrukcji:

.WCASE ANALYSIS VOUT FUN

oznaczenia identyczne jak w przypadku analizy Monte Carlo.

Przykład programu do analizy wzmacniacza w programie PSPICE (po lewej) i jego modyfikacja w celu przeprowadzenia analizy Monte Carlo (po prawej)

```
WZMACNIACZ
.OPTIONS ACCT LIST NOPAGE
.WIDTH IN=80 OUT=132
.MODEL MODTR1 NPN
.MODEL MODTR2 PNP
RG 1 2 1.5K
RB 4 3 18K
```

```
WZMACNIACZ
.OPTIONS ACCT LIST NOPAGE
.MODEL MODTR1 NPN
.MODEL MODTR2 PNP
.MODEL R1 RES (R=1 DEV 10%)
.MODEL C1 CAP (C=1 DEV 10%)
RG 1 2 R1 1.5K
```

```
R1 4 7 85
R2 7 6 17
R3 6 5 26
RL 9 0 18
C1 2 3 100U
C2 8 9 100U
QTA 5 3 0 MODTR1
QTB 7 6 5 MODTR1
QTC 4 7 8 MODTR1
QTD 0 5 8 MODTR2
VC 4 0 DC 12V
VIN 1 0 AC 1 0 SIN(0 1 1E3 1M)
.OP
.TRAN 0.05M 4M
.FOUR 1K V(9)
.PLOT TRAN V(9)
.AC DEC 10 100HZ 100KHZ
.PLOT AC VM(9) VP(9)
.PROBE
.END
```

```
RB 4 3 R1 18K
R1 4 7 R1 85
R2 7 6 R1 17
R3 6 5 R1 26
RL 9 0 R1 18
C1 2 3 C1 100U
C2 8 9 C1 100U
QTA 5 3 0 MODTR1
QTB 7 6 5 MODTR1
QTC 4 7 8 MODTR1
QTD 0 5 8 MODTR2
VC 4 0 DC 12V
VIN 1 0 AC 1 0 SIN(0 1 1E3 1M)
.TRAN 0.05M 4M
.MC 100 TRAN V(9) YMAX LIST OUTPUT ALL
*.WCASE TRAN V(9) YMAX
.PROBE
.END
```

Literatura

- [1] A. Napieralski. „*La Description Condensée de PSPICE*”. Cykl wykładów prowadzonych w INSA de Toulouse
- [2] A. Napieralski. „*Komputerowe Projektowanie Układów Elektronicznych*”. Skrypt dla wyższych szkół, Łódź 1990
- [3] A. Napieralski. „*Analiza i Projektowanie Komputerowe Układów Elektronicznych Przy Pomocy Programu SPICE*”. Skrypt dla wyższych szkół, Łódź 1993
- [4] J. Porębski, P. Korohoda. „*SPICE Program Analizy Nieliniowej Układów Elektronicznych*”. USE, WNT, Warszawa 1992
- [5] Praca zbiorowa pod. Red. M. Matuszyka. „*Symulacja Układów Elektronicznych PSpice Pakiet DESIGN Center*”, EDU-MIKOM, Warszawa 1996
- [6] T. L. Quarles, A. R. Newton, D. O. Pederson, and A. Sangiovanni-Vincentelli, “*SPICE3 Version 3f5 User's Manual, Department of Electrical Engineering and Computer Sciences*”, University of California, Berkeley, CA, USA, 1994