

# Filtry scalone czasu ciągłego – laboratorium

## Organizacja laboratorium

W czasie laboratorium należy wykonać 5 ćwiczeń symulacyjnych z użyciem symulatora PSPICE a wyniki symulacji należy przesłać prowadzącemu laboratorium na jego adres email. Każde ćwiczenie jest punktowane jednakowo (20pkt.) a ocena końcowa z laboratorium jest ustalana na podstawie następującego kryterium:

Ocena	Od pkt.	Do pkt.
2	0	50
3	51	60
3,5	61	70
4	71	80
4,5	81	90
5	91	100

Wyniki symulacji należy umieścić w tabeli, której wzór znajduje się w załączniku do każdego z ćwiczeń. Jako modele tranzystorów MOS należy zastosować modele dla technologii AMI C5 dostępne tu: [http://www.ue.eti.pg.gda.pl/~bpa/fsc/ami\\_c5.lib](http://www.ue.eti.pg.gda.pl/~bpa/fsc/ami_c5.lib). Wzory protokołów w postaci tabel w formacie MS-WORD można pobrać tu: [http://www.ue.eti.pg.gda.pl/~bpa/fsc/lab\\_tabelki.zip](http://www.ue.eti.pg.gda.pl/~bpa/fsc/lab_tabelki.zip).

**Uwaga:** w przypadku wykonywania zadań w domu przy użyciu symulatora LTSpice, zamiast symulatora PSpice dostępnego w laboratorium, należy zwrócić uwagę na następujące niezbędne zmiany:

1) W pliku "ami\_c5.lib", we wszystkich umieszczonych tam modelach tranzystorów MOS należy zamienić parametr LEVEL na wartość 8 (LEVEL=8).

2) W symulatorze LTSpice w deklaracji podukładu nie może być wykorzystana składnia skrócona polecenia, należy użyć pełnej składni tj. podukład należy umieścić tak jak pokazano poniżej:

```
.subckt (deklaracja nazwy podukładu, wyprowadzeń i
      parametrów)
..... (zawartość podukładu)
.ends
```

3) W symulatorze LTSpice, w danym przebiegu symulacyjnym, możliwy jest do wykonania tylko jeden typ symulacji.

4) W symulatorze LTSpice symulację szumową wykonuje się niezależnie od symulacji częstotliwościowej i jej składnia jest następująca:

```
.noise V(<out>[,<ref>]) <src> <oct, dec, lin> <Nsteps>
+ <StartFreq> <EndFreq>
```

Przykładowo dla symulacji szumowej dla ćwiczenia 1 polecenie mogłoby być o następującej postaci:

```
.noise v([out_p],[out_m]) vid dec 100 10 10g
```

W celu znalezienia scałkowanej wartości napięcia szumów należy na wykresie wykreślić wartość szumów (na wyjściu V(onoise) lub odniesioną do wejścia V(inoise)) a następnie kliknąć na wykreślaną nazwę myszką przytrzymując klawisz **Ctrl**. Aby znaleźć szum scałkowany w danym paśmie można albo:

- ustawić ograniczony do tego pasma zakres symulacji w poleceniu .noise albo,
- w pliku wejściowym dodać polecenie .measure, np. w postaci:

```
.measure noise NOISERMS integ v(inoise) from 30 to 1meg
```

wynik będzie znajdował się w pliku Error\_log (otwarcie pliku przez kombinację klawiszy **Ctrl+L** lub menu **View/Spice Error log**) w postaci linii o przykładowej zawartości:

```
noiserms: INTEG(v(inoise))=4.03776e-05 FROM 30 TO 1e+06
```

Aby wstawić bezszumny rezystor należy wykorzystać źródło sterowane np. w postaci jak poniżej:

```
go out_p out_m out_p out_m 1
```

5) W symulatorze LTSpice nie da się wykonać symulacji Monte Carlo.

## Zadania do wykonania w czasie laboratorium

**Ćwiczenie 1** – badania symulacyjne wzmacniacza transkonduktancyjnego.

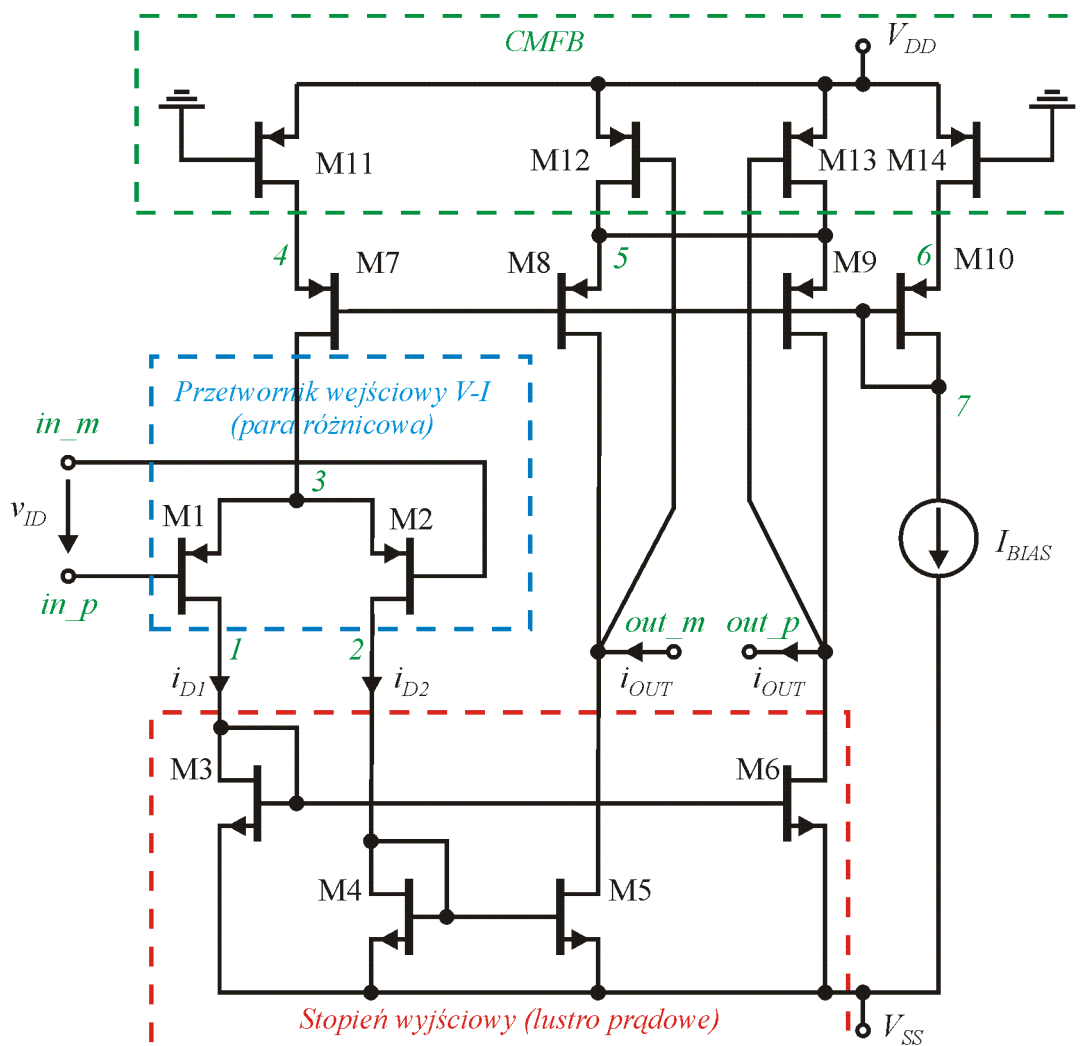
Schemat badanego wzmacniacza przedstawiony jest na poniższym rysunku, natomiast wymiary tranzystorów MOS są podane w tabeli 1. Opis wymiaru 4\*2/5 oznacza 4 tranzystory MOS, każdy o wymiarach 2/5 połączone równolegle. Aby wprowadzić kilka elementów połączonych równolegle można zastosować:

- ręczne, wielokrotne wpisy elementów o unikalnych nazwach połączonych do tych samych węzłów lub
- jeden wpis tranzystora MOS z dodatkowym parametrem M=x, gdzie x oznacza liczbę równolegle łączonych, identycznych tranzystorów MOS.

Należy koniecznie przy tworzeniu listy połączeniowej użyć nazw węzłów podanych kursywą w kolorze zielonym na rysunku wzmacniacza. Podłoża tranzystorów MOS należy podłączyć odpowiednio do Vss lub Vdd. Do wejścia wzmacniacza należy dołączyć 2 niezależne źródła napięciowe:

- **Vid** ustalające wyłącznie wartość napięcia różnicowego podawanego na wejście wzmacniacza, oraz
- **Vcm** ustalające wyłącznie wartość wejściowego napięcia wspólnego.

Wartości napięć zasilających i prądu polaryzującego podane są w tabeli 2.



Rys. 1. Schemat badanego wzmacniacza transkonduktancyjnego. Przy każdym węzle umieszczone są obligatoryjne nazwy jakie należy użyć w czasie przygotowywania listy połączeniowej (kolor zielony).

Tabela 1. Wymiary elementów badanego wzmacniacza OTA.

Element	Wymiary [ $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ ]
M1, M2	12/4
M3, M4	2/2
M5, M6	4 * 2/2
M7	2 * 4/2
M8, M9	4 * 4/2
M10	4/2
M11	2 * 2/2
M12, M13	4 * 2/2
M14	2/2

Tabela 2. Napięcia i prądy zasilające.

Parametr	Wartość
Vdd	2,5V
Vss	-2,5V
Ibias	10 $\mu\text{A}$

W ramach ćwiczenia należy wykonać:

- 1) Wprowadzić listę połączeniową badanego wzmacniacza oraz źródła napięcia wejściowego, napięcia i prądu zasilające.
- 2) Jako obciążenie należy pomiędzy węzły *out\_p* i *out\_m* włączyć źródło napięciowe o zerowej wydajności. Dla takiej konfiguracji i zerowych napięć wejściowych należy

przeprowadzić analizę stałoprądową i zapisać prądy drenów poszczególnych tranzystorów oraz wartość napięcia na wyjściu. Należy porównać zapisane prądy z wartościami wzorcowymi i w przypadku stwierdzenia różnic należy odnaleźć błąd w liście połączeniowej i go poprawić.

Wartości wzorcowe prądów drenów:

NAME	M1	M2	M3	M4	M5
MODEL	pfet	pfet	nfet	nfet	nfet
ID	-9.76E-06	-9.76E-06	9.76E-06	9.76E-06	4.00E-05
NAME	M6	M7	M8	M9	M10
MODEL	nfet	pfet	pfet	pfet	pfet
ID	4.00E-05	-1.95E-05	-4.00E-05	-4.00E-05	-1.00E-05
NAME	M11	M12	M13	M14	
MODEL	pfet	pfet	pfet	pfet	
ID	-1.95E-05	-4.00E-05	-4.00E-05	-1.00E-05	

- 3) Przy obciążeniu jak w pkt. 2) należy wykonać analizę stałoprądową przy zmianie napięcia wejściowego różnicowego Vid w zakresie od -1V do 1V. Należy podać odczytane na podstawie tej analizy wartości: transkonduktancji wzmacniacza, napięcia Vid dla którego następuje 1% błąd prądu oraz napięcia Vid dla którego następuje 1% błąd transkonduktancji.
- 4) Z symulacji jak w pkt. 3) należy odczytać zakres napięć stałych na wyjściu wzmacniacza przy zmianach Vid od -1V do 1V.
- 5) Dla ciągle tego samego obciążenia należy wykonać analizę czasową przy pobudzeniu harmonicznym o częstotliwości 10kHz i przy różnych amplitudach napięcia wejściowego. Należy znaleźć taką amplitudę wejściowego napięcia harmonicznego dla którego THD prądu na obciążeniu wynoszą 1%. Amplitudę tą należy wyznaczyć z dokładnością 10mV.
- 6) Dla ciągle tego samego obciążenia należy wykonać analizę częstotliwościową i znaleźć częstotliwość 3dB spadku prądu wyjściowego oraz częstotliwość dla której występuje 1° zmiana fazy.
- 7) Należy usunąć obciążenie w postaci źródła napięciowego i ponownie wykonać analizę zmiennoprądową. Na jej podstawie należy wyznaczyć napięciowe wzmocnienie dla niskich częstotliwości oraz częstotliwość dla których wzmocnienie napięciowe spada o 3dB.
- 8) Wzmacniacz należy obciążyć rezystorem bezszumnym o rezystancji 1Ω a następnie należy wykonać analizę szumową i podać wartość skuteczną napięcia szumu odniesioną do wejścia wzmacniacza scałkowaną w paśmie częstotliwości od 10Hz do 10MHz.
- 9) Należy wyznaczyć zakres dynamiki (ang. Dynamic Range - DR) wzmacniacza jako stosunek wartości skutecznych wyznaczonych w pkt. 5 i pkt. 8.
- 10) Należy wyznaczyć wartości różnicowej pojemności wejściowej i wyjściowej. Pojemności te można wyznaczyć z definicji, badając napięcie i prąd źródła niezależnego dołączonego odpowiednio do wejścia lub wyjścia a następnie wyznaczając wartość pojemności przekształcając zależność na impedancję kondensatora.

$$C = \frac{1}{2\pi f Z_C} = \frac{I_{\text{źródła}}}{2\pi f V_{\text{źródła}}}$$

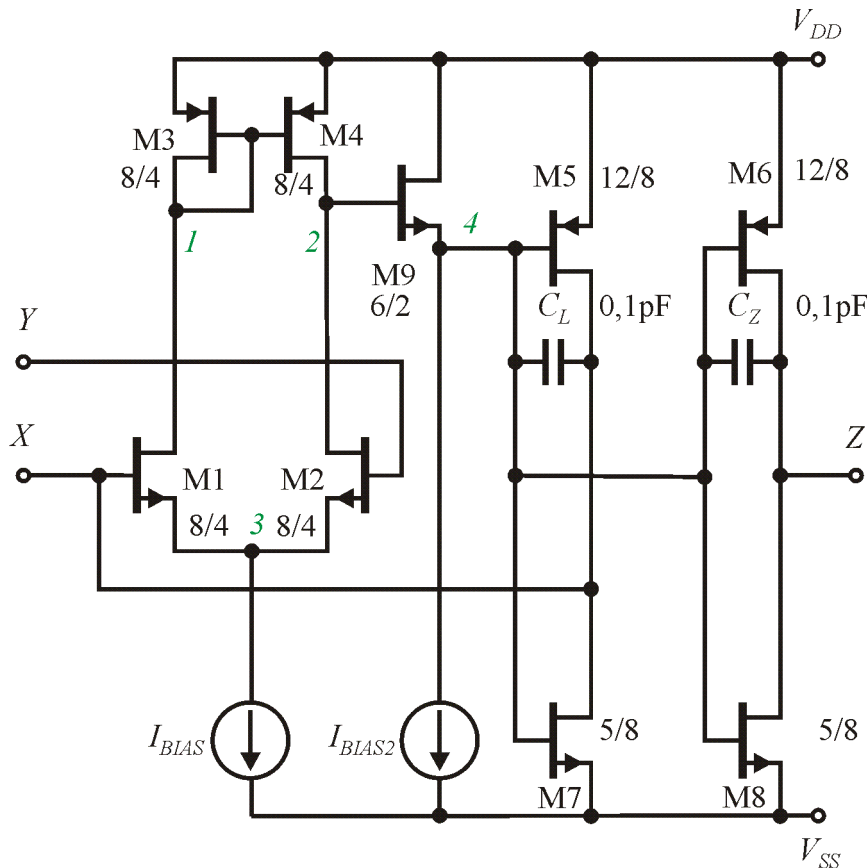
Wzór powyższy jest słuszny wyłącznie w zakresie pojemnościowego charakteru impedancji wejściowej/wyjściowej czyli dla częstotliwości dla których przesunięcie fazowe pomiędzy napięciem a prądem tego źródła wynosi 90°.

Dodatek – wzór protokołu. Tabelę tą należy skopiować, uzupełnić a następnie wysłać prowadzącemu zajęcia na jego adres email.

<b>Ćwiczenie nr 1 – badanie wzmacniacza OTA</b>			
<b>L.p.</b>	<b>Opis</b>	<b>Jednostka</b>	<b>Wartość</b>
1	Nazwiska osób wykonujących ćwiczenie		
2	Data wykonania ćwiczenia		
3	Symulacja wg pkt. 2 – wartość napięcia wyjściowego	mV	
4	Symulacja wg pkt. 3 – transkonduktancja @ $V_{ID}=0V$	$\mu S$	
5	Symulacja wg pkt. 3 – $V_{ID}$ dla 1% błędu prądu	mV	
6	Symulacja wg pkt. 3 – $V_{ID}$ dla 1% błędu transkonduktancji	mV	
7	Symulacja wg pkt. 4 – zakres napięć wyjściowych	mV	
8	Symulacja wg pkt. 5 – amplituda $V_{ID}$ dla 1% THD na wyjściu	mV	
9	Symulacja wg pkt. 6 – częstotliwość 3dB	MHz	
10	Symulacja wg pkt. 6 – częstotliwość 1° zmiany fazy	MHz	
11	Symulacja wg pkt. 7 – wzmacnienie dla małych częstotliw.	dB	
12	Symulacja wg pkt. 7 – częstotliwość 3dB	kHz	
13	Symulacja wg pkt. 8 – wartość skuteczna szumów	mV	
14	DR wg pkt. 9	dB	
15	Różnicowa pojemność wejściowa $C_{ID}$ wg pkt. 10	fF	
16	Różnicowa pojemność wyjściowa $C_{OD}$ wg pkt. 10	fF	
17	Tu można umieścić własne uwagi i wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia		

**Ćwiczenie 2** – badania symulacyjne konweyora prądowego II generacji CCII+.

Schemat badanego konweyora prądowego typu CCII+ przedstawiony jest na rysunku 2. Należy koniecznie, przy tworzeniu listy połączeniowej użyć nazw węzłów podanych kursywą w kolorze zielonym. Podłoża tranzystorów MOS należ podłączyć odpowiednio do Vss lub Vdd. Do wejścia Y wzmacniacza należy dołączyć niezależne źródło napięciowe  $V_y$ . Wartości napięć zasilających i prądów polaryzujących podane są w tabeli 3.



Rys. 2. Schemat badanego konweyora prądowego typu CCII+. Przy każdym węźle umieszczone są obligatoryjne nazwy jakie należy użyć w czasie przygotowywania listy połączeniowej (kolor zielony). Podane wymiary tranzystorów są wyrażone w  $\mu\text{m}$ .

Tabela 3. Napięcia i prądy zasilające.

Parametr	Wartość
Vdd	2,5V
Vss	-2,5V
Ibias, Ibias2	10 $\mu\text{A}$

W ramach ćwiczenia należy wykonać:

- 1) Wprowadzić listę połączeniową badanego wzmacniacza, źródło napięcia wejściowego  $V_y$  oraz napięcia i prądy zasilające.
- 2) Jako obciążenie należy pomiędzy węzły  $X$  i  $\theta$  włączyć rezystor o wartości 10k $\Omega$  oraz pomiędzy węzeł  $Z$  i  $\theta$  źródło napięciowe o zerowej wydajności. Dla takiej konfiguracji i zerowego napięcia wejściowego  $V_y$  należy przeprowadzić analizę stałoprądową i zapisać prądy drenów poszczególnych tranzystorów oraz wartość napięcia na wyjściu  $X$  i prądu na wyjściu  $Z$ . Należy porównać zapisane prądy drenów z wartościami wzorcowymi i w przypadku stwierdzenia różnic należy odnaleźć błąd w liście połączeniowej i go poprawić.

Wartości wzorcowe prądów drenów:

NAME	M1	M2	M3	M4	M5
MODEL	nfet	nfet	pfet	pfet	pfet
ID	5.00E-06	5.00E-06	-5.00E-06	-5.00E-06	-5.88E-05
NAME	M7	M6	M8	M9	
MODEL	nfet	pfet	nfet	nfet	
ID	5.87E-05	-5.88E-05	5.87E-05	1.00E-05	

- 3) Przy połączeniu konweyora jak w pkt. 2) należy wykonać analizę stałoprądową przy zmianie napięcia wejściowego  $V_y$  w zakresie od  $-1V$  do  $1V$ . Należy podać odczytane na podstawie tej analizy wartości: wzmocnienia napięciowego z  $V_y$  do  $V_x @ V_y=0$ , wzmocnienia transkonduktancyjnego z  $V_y$  do prądu źródła napięciowego  $V_z @ V_y=0$ , oraz zakres napięć wejściowych dla których w.w. wzmocnienia nie odbiegają więcej niż o 1% w stosunku do wartości teoretycznej.
- 4) Przy połączeniu konweyora jak w pkt. 2) należy wykonać analizę częstotliwościową i znaleźć pasmo 3dB napięcia  $V_x$  i prądu źródła  $V_z$ . Należy znaleźć również częstotliwość zmiany fazy sygnału wyjściowego o  $1^\circ$ .
- 5) Należy odłączyć źródło obciążające  $V_z$  i wykonać symulację częstotliwościową. Należy odczytać wzmocnienie napięciowe do wyjścia  $Z$  i częstotliwość samoistnego bieguna węzła  $Z$  (spadek napięcia o 3dB).
- 6) Należy wykonać symulacje na podstawie których można wyznaczyć rezystancję węzła  $X$  (bez rezystora  $R_x$ ) oraz węzła  $Z$ .

Dodatek – wzór protokołu. Tabelę tą należy skopiować, uzupełnić a następnie wysłać prowadzącemu zajęcia na a jego adres email.

Ćwiczenie nr 2 – badanie konweyora prądowego typu CCII+			
L.p.	Opis	Jednostka	Wartość
1	Nazwiska osób wykonujących ćwiczenie		
2	Data wykonania ćwiczenia		
3	Symulacja wg pkt. 2 – wartość napięcia $V_x$	mV	
4	Symulacja wg pkt. 2 – prąd źródła napięciowego $V_z$	nA	
5	Symulacja wg pkt. 3 – wzmocnienie do $V_x$	V/V	
6	Symulacja wg pkt. 3 – transkonduktancja do $I(V_z)$	$\mu S$	
7	Symulacja wg pkt. 3 – zakres 1% błędu wzmocnienia do $V_x$	mV	
8	Symulacja wg pkt. 3 – zakres 1% błędu transk. do $I(V_z)$	mV	
9	Symulacja wg pkt. 4 – częstotliwość 3dB napięcia $V_x$	MHz	
10	Symulacja wg pkt. 4 – częstotliwość 3dB prądu $I(V_z)$	MHz	
11	Symulacja wg pkt. 4 – częstotliwość $1^\circ$ zmiany fazy $V_x$	MHz	
12	Symulacja wg pkt. 4 – częstotliwość $1^\circ$ zmiany fazy $I(V_z)$	MHz	
13	Symulacja wg pkt. 5 – wzmocnienie napięciowe przy braku obciążenia węzła $Z$	dB	
14	Symulacja wg pkt. 5 – częstotliwość bieguna nieobciążonego węzła $Z$	kHz	
15	Symulacja wg pkt. 6 – rezystancja węzła $X$	$\Omega$	
16	Symulacja wg pkt. 6 – rezystancja węzła $Z$	k $\Omega$	
17	Tu można umieścić własne uwagi i wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia		

### Ćwiczenie 3 – badania symulacyjne filtra kaskadowego VI rzędu.

Przed przystąpieniem do ćwiczenia należy najpierw zaprojektować filtr dolnoprzepustowy VI rzędu o aproksymacji Butterwortha, metodą kaskadową, w pełni różnicowy, z użyciem wzmacniaczy OTA z ćwiczenia nr 1, parametry  $H=1$ ,  $f_0=500\text{kHz}$ . W czasie projektowania, wartości rzeczywiste pojemności należy pomniejszyć o zsumowane pojemności wejściowe i wyjściowe wzmacniaczy OTA występujące w danych węzłach sygnałowych. Należy wzmacniacze z ćw. 1 osadzić w podukładach, a następnie tak osadzone wzmacniacze użyć do wykonania symulacji filtra. Równocześnie, należy wykonać symulację filtra idealnego (np. poprzez wykreślenie charakterystyk transmitancji idealnych poleceniem LAPLACE lub poprzez symulację idealnego prototypu RLC zdenormalizowanego do częstotliwości 500kHz).

W ramach ćwiczenia należy wykonać następujące symulacje:

- 1) Wykonać symulację częstotliwościową i wykreślić charakterystyki amplitudową i fazową. Należy wyznaczyć częstotliwość 3dB filtra, oraz częstotliwość dla, której faza wyjściowa jest równa  $-270^\circ$ .
- 2) Wykonać równocześnie symulacją j.w. ale dla filtra idealnego. Znaleźć częstotliwość dla której charakterystyka amplitudowa filtra rzeczywistego różni się o więcej niż 1dB w stosunku do filtra idealnego. Podobnie należy znaleźć częstotliwość dla której charakterystyka fazowa filtra rzeczywistego różni się o więcej niż  $1^\circ$  w stosunku do filtra idealnego.
- 3) Należy wykonać analizę czasową przy pobudzeniu harmonicznym o częstotliwości 10kHz i przy różnych amplitudach napięcia wejściowego. Należy znaleźć taką amplitudę wejściowego napięcia harmonicznego dla którego zniekształcenia THD napięcia na wyjściu wynoszą 1%. Amplitudę tą należy wyznaczyć z dokładnością do 10mV.
- 4) Należy wykonać analizę szumową i podać wartość skuteczną napięcia szumu odniesioną do wejścia wzmacniacza scałkowaną w paśmie częstotliwości od 10Hz do 1MHz.
- 5) Należy wyznaczyć zakres dynamiki (ang. Dynamic Range - DR) wzmacniacza jako stosunek wartości skutecznych wyznaczonych w pkt. 3 i pkt. 4.
- 6) Należy wykonać analizę punktu pracy i z pliku wyjściowego odczytać pobór mocy filtra.

Dodatek – wzór protokołu. Tabelę tą należy skopiować, uzupełnić a następnie wysłać prowadzącemu zajęcia na a jego adres email.

Ćwiczenie nr 3 – badanie filtra kaskadowego LP VI rzędu			
L.p.	Opis	Jednostka	Wartość
1	Nazwiska osób wykonujących ćwiczenie		
2	Data wykonania ćwiczenia		
3	Tu należy umieścić schemat zaprojektowanego filtra. Schemat ten powinien zawierać symbole wzmacniaczy OTA i pojemności z naniesionymi wartościami tych pojemności.		
4	Symulacja wg pkt. 1 – częstotliwość 3dB filtra	kHz	
5	Symulacja wg pkt. 1 – częstotliwość wystąpienia fazy $-270^\circ$ na wyjściu	kHz	
6	Symulacja wg pkt. 2 – częstotliwość 1dB błędu charakterystyki częstotliwościowej	kHz	
7	Symulacja wg pkt. 2 – częstotliwość $1^\circ$ błędu charakterystyki fazowej	kHz	
8	Symulacja wg pkt. 3 – amplituda $V_{ID}$ dla 1% THD na wyjściu	mV	



9	Symulacja wg pkt. 4 – wartość skuteczna napięcia szumów odniesiona do wejścia filtru	$\mu\text{V}$	
10	DR wg pkt. 5	dB	
11	Symulacja wg pkt. 6 – pobór mocy	mW	
12	Tu można umieścić własne uwagi i wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia		

**Ćwiczenie 4** – badania symulacyjne filtra typu Gm-C VI rzędu, środkowoprzepustowego.

Przed przystąpieniem do ćwiczenia należy najpierw zaprojektować filtr środkowoprzepustowy VI rzędu o aproksymacji Butterwortha, metodą bezpośredniej symulacji prototypu RLC, w pełni różnicowy, z użyciem wzmacniaczy OTA z ćwiczenia nr 1, parametry  $H=1$ ,  $f_0=400\text{kHz}$ , pasmo przepustowe o szerokości  $100\text{kHz}$ . W czasie projektowania, wartości rzeczywiste pojemności należy pomniejszyć o zsumowane pojemności wejściowe i wyjściowe wzmacniaczy OTA występujące w danych węzłach sygnałowych. Należy wzmacniacze z ćw. 1 osadzić w podukładach, a następnie tak osadzone wzmacniacze użyć do wykonania symulacji filtra. Równocześnie, należy wykonać symulacje filtra idealnego (np. poprzez wykreślenie charakterystyk transmitancji idealnych poleceniem LAPLACE lub poprzez symulację idealnego prototypu RLC zdenormalizowanego do częstotliwości  $400\text{kHz}$ ).

W ramach ćwiczenia należy wykonać następujące symulacje:

- 1) Wykonać symulację częstotliwościową i wykreślić charakterystyki amplitudową i fazową. Należy wyznaczyć częstotliwości 3dB filtra (w stosunku do poziomu dla częstotliwości środkowej), oraz częstotliwość środkową poprzez wyznaczenie częstotliwości dla której faza wyjściowa jest równa  $0^\circ$ .
- 2) Wykonać równocześnie symulację j.w. ale dla filtra idealnego. Należy porównać charakterystyki idealną i rzeczywistą. Ile wynosi wzmocnienie dla filtra idealnego i dla filtra rzeczywistego dla  $f=400\text{kHz}$ ? Skąd biorą się tak duże różnice w charakterystykach amplitudowych dla środka pasma filtra?
- 3) Należy wykonać analizę czasową przy pobudzeniu harmonicznym o częstotliwości  $400\text{kHz}$  i przy różnych amplitudach napięcia wejściowego. Należy znaleźć taką amplitudę wejściowego napięcia harmonicznego dla którego zniekształcenia THD napięcia na wyjściu wynoszą 1%. Amplitudę tą należy wyznaczyć z dokładnością do  $10\text{mV}$ . Dlaczego amplituda ta jest większa niż dla pojedynczego wzmacniacza OTA?
- 4) Należy wykonać analizę szumową i podać wartość skuteczną napięcia szumu odniesioną do wejścia wzmacniacza scałkowaną w paśmie częstotliwości od  $300\text{kHz}$  do  $500\text{kHz}$ .
- 5) Należy wyznaczyć zakres dynamiki (ang. Dynamic Range - DR) wzmacniacza jako stosunek wartości skutecznych wyznaczonych w pkt. 3 i pkt. 4.
- 6) Należy wykonać analizę punktu pracy i z pliku wyjściowego odczytać pobór mocy filtra.

Dodatek – wzór protokołu. Tabelę tą należy skopiować, uzupełnić a następnie wysłać prowadzącemu zajęcia na a jego adres email.

<b>Ćwiczenie nr 4 – badanie filtra środkowoprzepustowego VI rzędu</b>			
<b>L.p.</b>	<b>Opis</b>	<b>Jednostka</b>	<b>Wartość</b>
1	Nazwiska osób wykonujących ćwiczenie		
2	Data wykonania ćwiczenia		
3	Tu należy umieścić schemat zaprojektowanego filtra. Schemat ten powinien zawierać symbole wzmacniaczy OTA i pojemności z naniesionymi wartościami tych pojemności.		
4	Symulacja wg pkt. 1 – częstotliwości 3dB filtra i środkowa	kHz	
5	Symulacja wg pkt. 2 – częstotliwości 3dB filtra i środkowa dla filtra idealnego	kHz	
6	Symulacja wg pkt. 2 – błąd wzmocnienia dla $f=400\text{kHz}$	dB	
7	Symulacja wg pkt. 3 – amplituda $V_{ID}$ dla 1% THD na wyjściu	mV	
8	Symulacja wg pkt. 4 – wartość skuteczną napięcia szumów odniesiona do wejścia filtra	$\mu\text{V}$	

9	DR wg pkt. 5	dB	
10	Symulacja wg pkt. 6 – pobór mocy	mW	
11	Tu można umieścić własne uwagi i wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia oraz odpowiedzi na pytania z pkt. 2 i 3.		

**Ćwiczenie 5** – badania symulacyjne, porównawcze filtru kaskadowego i opartego na prototypie RLC typu Gm-C VI rzędu.

Przed przystąpieniem do ćwiczenia należy najpierw zaprojektować filtr dolnoprzepustowy VI rzędu o aproksymacji Butterwortha, metodą symulacji prototypu RLC w pełni różnicowy, z użyciem wzmacniaczy OTA z ćwiczenia nr 1, parametry  $H=1$ ,  $f_0=500\text{kHz}$ . Jest to filtr identyczny jak w ćw 3 zaprojektowany inną metodą syntezy. W czasie projektowania, podobnie jak poprzednio, wartości rzeczywiste pojemności należy pomniejszyć o zsumowane pojemności wejściowe i wyjściowe wzmacniaczy OTA występujące w danych węzłach sygnałowych. Należy wzmacniacze z ćw. 1 osadzić w podukładach, a następnie tak osadzone wzmacniacze użyć do wykonania symulacji filtru. Równocześnie, należy wykonać symulację filtru idealnego (np. poprzez wykreślenie charakterystyk transmitancji idealnych poleceniem LAPLACE lub poprzez symulację idealnego prototypu RLC zdenormalizowanego do częstotliwości 500kHz).

W ramach ćwiczenia należy wykonać następujące symulacje:

- 1) Wykonać symulację częstotliwościową i wykreślić charakterystyki amplitudową i fazową. Należy wyznaczyć częstotliwość 3dB filtru, oraz częstotliwość dla, której faza wyjściowa jest równa  $-270^\circ$ .
- 2) Wykonać równocześnie symulacją j.w. ale dla filtru idealnego. Znaleźć częstotliwość dla której charakterystyka amplitudowa filtru rzeczywistego różni się o więcej niż 1dB w stosunku do filtru idealnego. Podobnie należy znaleźć częstotliwość dla której charakterystyka fazowa filtru rzeczywistego różni się o więcej niż  $1^\circ$  w stosunku do filtru idealnego.
- 3) Należy wykonać analizę czasową przy pobudzeniu harmonicznym o częstotliwości 10kHz i przy różnych amplitudach napięcia wejściowego. Należy znaleźć taką amplitudę wejściowego napięcia harmonicznego dla którego zniekształcenia THD napięcia na wyjściu wynoszą 1%. Amplitudę tą należy wyznaczyć z dokładnością do 5mV.
- 4) Należy wykonać analizę szumową i podać wartość skuteczną napięcia szumu odniesioną do wejścia wzmacniacza scałkowaną w paśmie częstotliwości od 10Hz do 1MHz.
- 5) Należy wyznaczyć zakres dynamiki (ang. Dynamic Range - DR) wzmacniacza jako stosunek wartości skutecznych wyznaczonych w pkt. 3 i pkt. 4.
- 6) Należy wykonać analizę punktu pracy i z pliku wyjściowego odczytać pobór mocy filtru.
- 7) Należy wykonać analizę częstotliwościową Monte Carlo przy zmianach napięcia progowego i wsp. K tranzystorów w zakresie 1%, należy wykonać 100 przebiegów tej analizy. Analizę tą należy wykonać zarówno dla filtru z ćw. 3 jak i 5. Na podstawie tej analizy należy znaleźć zakres zmian wartości wzmocnienia dla niskich częstotliwości jak również zakres zmian częstotliwości dla której faza jest równa  $-270^\circ$ .

Dodatek – wzór protokołu. Tabelę tą należy skopiować, uzupełnić a następnie wysłać prowadzącemu zajęcia na a jego adres email.

<b>Ćwiczenie nr 5 – badania porównawcze filtrów kaskadowego i sym. prot. RLC VI rzędu</b>				
<b>L.p.</b>	<b>Opis</b>	<b>Jedn.</b>	<b>Filtr z ćw. 3</b>	<b>Filtr z ćw. 5</b>
1	Nazwiska osób wykonujących ćwiczenie			
2	Data wykonania ćwiczenia			
3	Tu należy umieścić schemat zaprojektowanego filtru. Schemat ten powinien zawierać symbole wzmacniaczy OTA i pojemności z naniesionymi wartościami tych pojemności.			

4	Symulacja wg pkt. 1 – częstotliwość 3dB filtru	kHz		
5	Symulacja wg pkt. 1 – częstotliwość wystąpienia fazy - 270° na wyjściu	kHz		
6	Symulacja wg pkt. 2 – częstotliwość 1dB błędu charakterystyki częstotliwościowej	kHz		
7	Symulacja wg pkt. 2 – częstotliwość 1° błędu charakterystyki fazowej	kHz		
8	Symulacja wg pkt. 3 – amplituda $V_{ID}$ dla 1% THD na wyjściu	mV		
9	Symulacja wg pkt. 4 – wartość skuteczna napięcia szumów odniesiona do wejścia filtru	$\mu$ V		
10	DR wg pkt. 5	dB		
11	Symulacja wg pkt. 6 – pobór mocy	mW		
12	Symulacja wg pkt. 7 – zakres zmian wzmocnienia	dB		
13	Symulacja wg pkt. 7 – zakres zmian częstotliwości -270°	kHz		
14	Tu można umieścić własne uwagi i wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia			