

**Politechnika Łódzka**  
**Katedra Mikroelektroniki i Technik Informatycznych**  
**ul. Wólczańska 221/223, budynek B18**  
**90-924 Łódź**  
***<http://www.dmcs.p.lodz.pl>***

Laboratorium

**KOMPUTEROWE PROJEKTOWANIE UKŁADÓW**  
SYMULACJA UKŁADÓW ELEKTRONICZNYCH Z ZASTOSOWANIEM PROGRAMU SPICE

Opracował dr inż. Michał Szermer

Łódź, dn. 03.01.2017 r.



# Spis treści

Regulamin laboratorium .....	4
Ćwiczenie 1. Podstawy opisu i analizy obwodów w programie SPICE .....	5
Zadanie 1.1 – obwód RC .....	5
Zadanie 1.2 – obwód RCEF .....	6
Zadanie 1.3 – obwód RD .....	7
Zadanie 1.4 – obwody RLC .....	8
Ćwiczenie 2. Tranzystory .....	9
Zadanie 2.1 – Charakterystyki wyjściowe tranzystorów MOSFET .....	9
Zadanie 2.2 – Charakterystyki przejściowe tranzystorów MOSFET .....	10
Ćwiczenie 3. Wzmacniacze operacyjne .....	11
Zadanie 3.1 – układy podstawowe .....	11
Zadanie 3.2 – filtry .....	12
Ćwiczenie 4. Układy CMOS .....	13
Zadanie 4.1 – symulacja inwertera wykonanego w technologii CMOS .....	13
Zadanie 4.2 – układ z zastosowaniem inwerterów .....	14

## Regulamin laboratorium

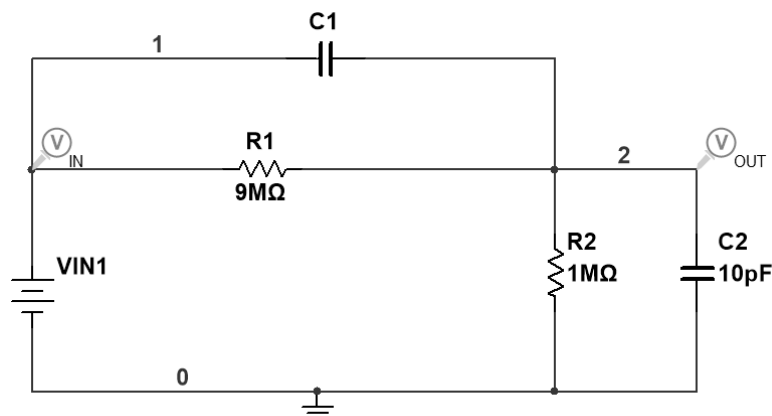
1. Zaliczenia laboratorium odbywa się na podstawie pełnego sprawozdania zawierającego wszystkie ćwiczenia z własnymi uwagami i obliczeniami studenta oraz na podstawie ocen cząstkowych z kolokwium przeprowadzanych przez prowadzącego zajęcia.
2. Laboratorium jest obowiązkowe w związku, z czym jedna nieusprawiedliwiona 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.

# Ćwiczenie 1. Podstawy opisu i analizy obwodów w programie SPICE

## Zadanie 1.1 – obwód RC

Zbadać zachowanie się obwodu pokazanego na rysunku 1.1. Jest to uproszczony model obwodu wejściowego oscyloskopu wraz z dzielnikiem 1:10. Na wstępie przyjąć  $C1 = 0,01 \text{ pF}$ .

- ANALIZA DC:** Wykreślić napięcie wyjściowe w funkcji napięcia wejściowego, zmieniającego się w zakresie od  $-10 \text{ V}$  do  $10 \text{ V}$  z krokiem  $0,01 \text{ V}$ . **Sprawozdanie:** 1) zamieścić odpowiedni wykres, 2) wyznaczyć graficznie wzmocnienie napięciowe układu  $k_v = V(OUT)/V(IN)$ .
- ANALIZA AC:** Wykonać analizę amplitudową i fazową w zakresie od  $10 \text{ Hz}$  do  $100 \text{ MHz}$  ze 101 punktami na dekadę przyjmując  $C1 = 0,1 \text{ pF}$  i  $10 \text{ pF}$ . Na podstawie wykresów zinterpretować, jaką rolę pełni pojemność  $C1$ . **Sprawozdanie:** 1) zamieścić odpowiedni wykres (dwa przebiegi na jednym rysunku), 2) podać częstotliwość graniczną obwodu (zaznaczyć na wykresie).
- PROJEKT:** Wyjaśnić za pomocą odpowiednich przebiegów (analiza AC) znaczenie elementu  $C1$  i na podstawie obliczeń zaproponować jego wartość tak, aby charakterystyka amplitudowa w węzle drugim była płaska w jak największym zakresie. **Sprawozdanie:** 1) zamieścić obliczenia optymalnej wartości kondensatora  $C1$ .
- ANALIZA TRAN:** Podać na wejście obwodu przebieg prostokątny o okresie  $100 \mu\text{s}$  dla  $C1 = 0,1 \text{ pF}$ ,  $10 \text{ pF}$  i wartości obliczonej w punkcie c. **Sprawozdanie:** 1) zamieścić odpowiedni wykres analizy AC oraz TRAN jako dowód poprawności obliczeń.



Rysunek 1.1.

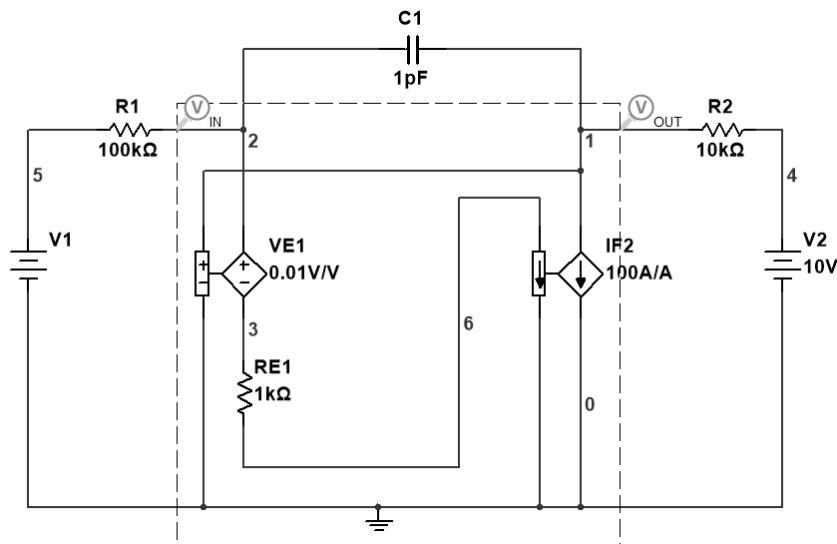
## Zadanie 1.2 – obwód RCEF

Zbadać zachowanie się obwodu pokazanego na rysunku 1.2. Zgodnie z rysunkiem użyć źródła napięciowego sterowanego napięciem (E) i prądowego sterowanego prądem (F). Na wstępie przyjąć  $V_2 = 10\text{ V}$ ,  $h_{21} = 100$ ,  $h_{12} = 0,01$ ,  $C_1 = 1\text{ pF}$ .

- ANALIZA DC: Wykreślić napięcie  $V(OUT)$  w funkcji napięcia  $V(IN)$  zmieniającego się w zakresie od  $-5\text{ V}$  do  $10\text{ V}$  z krokiem  $0,01\text{ V}$ . **Sprawozdanie:** 1) zamieścić odpowiedni wykres, 2) wyznaczyć graficznie wzmocnienie napięciowe układu  $k_v = V(OUT)/V(IN)$ .
- ANALIZA AC: Wykonać analizę amplitudową i fazową w zakresie od  $100\text{ Hz}$  do  $100\text{ MHz}$  ze 101 punktami na dekadę przyjmując  $C_1 = 1\text{ pF}$  i  $10\text{ pF}$ . Na podstawie wykresów zinterpretować, jaką rolę pełni pojemność  $C_1$ , powiązać jej działanie z funkcją pełnioną przez napięciowe źródło sterowane i współczynnik  $h_{12}$ . **Sprawozdanie:** 1) zamieścić odpowiedni wykres, 2) podać częstotliwość graniczną obwodu (zaznaczyć na wykresie).
- PROJEKT: Wykonać obliczenia obwodu: zaproponować zmianę wartości jednego z parametrów (np.:  $R_2$  lub  $h_{21}$ ) tak, aby wzmocnienie napięciowe  $k_v = -80\text{ V/V}$ . Obliczenia własne zweryfikować obliczeniami funkcji przenoszenia w symulatorze. **Sprawozdanie:** 1) zamieścić odpowiedni wykres, 2) zamieścić obliczenia.

### Wskazówka:

W celu wykonania obliczeń w punkcie c należy przyjąć napięcie na źródle  $V_2 = 0\text{ V}$ .



Rysunek 1.2.

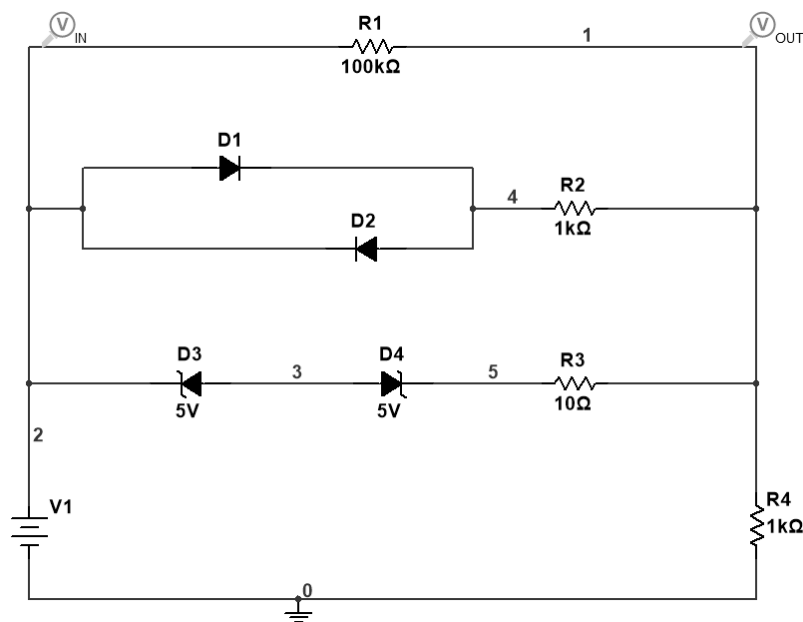
### Zadanie 1.3 – obwód RD

Zbadać zachowanie się obwodu pokazanego na rysunku 1.3.a.

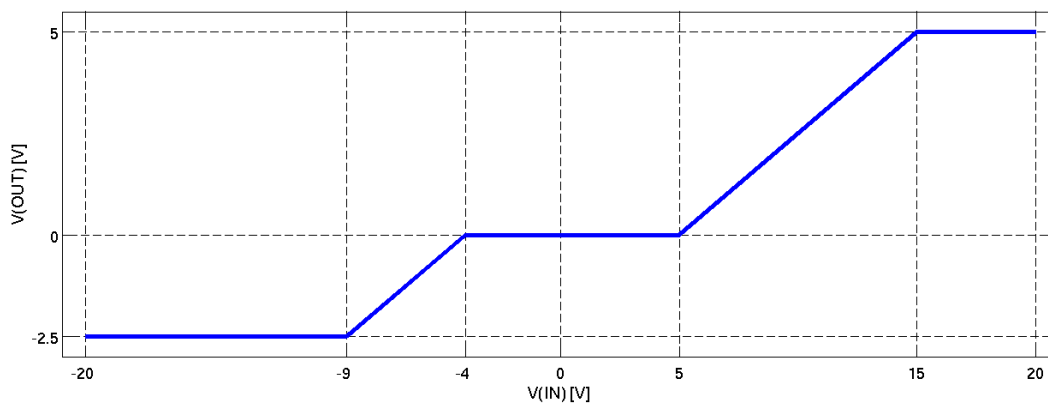
- ANALIZA DC: Wykreślić napięcie  $V(OUT)$  w funkcji napięcia  $V(IN)$  zmieniającego się w zakresie  $-15\text{ V}$  do  $15\text{ V}$  z krokiem  $0,005\text{ V}$ . Wyjaśnić sposób działania obwodu i znaczenie poszczególnych elementów w kształtowaniu charakterystyki wyjściowej. **Sprawozdanie:** 1) zamieścić odpowiedni wykres.
- PROJEKT: Wykonać obwód kształtujący napięcie wyjściowe zgodnie z rysunkiem 1.3.b, z dokładnością  $\pm 10\%$ . **Sprawozdanie:** 1) zamieścić odpowiedni wykres, 2) wyjaśnić działanie poszczególnych elementów.

#### UWAGA:

W celu wykonania zadania należy zastosować diody z biblioteki *DIODES\_VIRTUAL* oraz zmodyfikować w modelu diody Zenera napięcie przebicia (*Breakdown voltage*).



Rysunek 1.3.a.

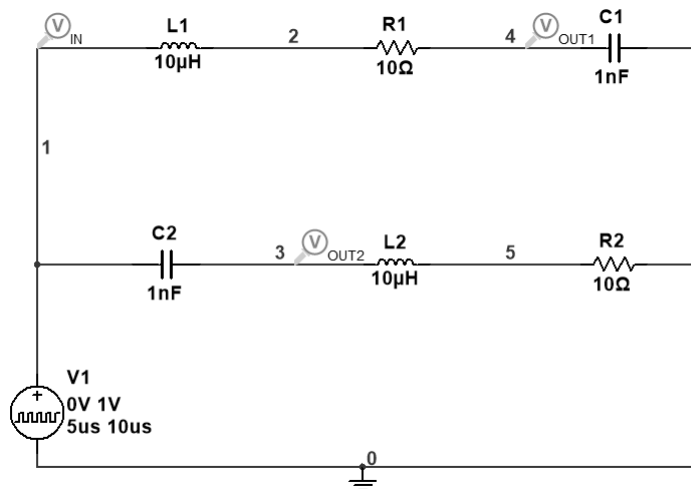


Rysunek 1.3.b.

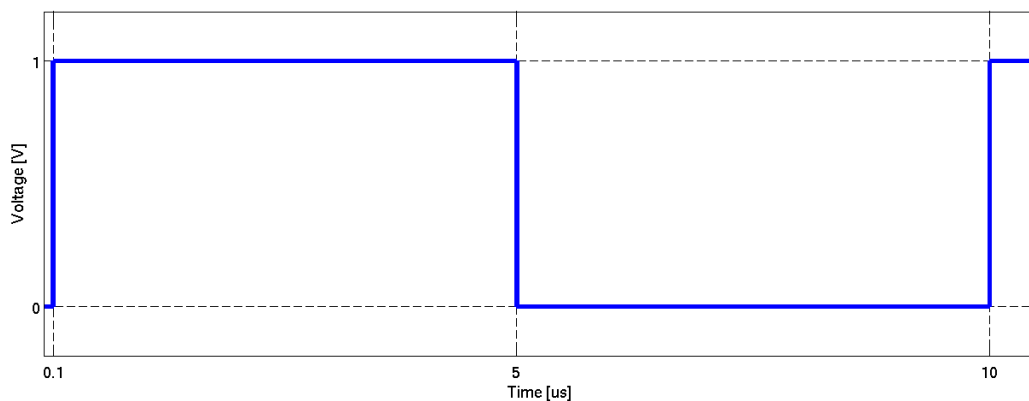
## Zadanie 1.4 – obwody RLC

Zbadać zachowanie się obwodu pokazanego na rysunku 1.4.a.

- ANALIZA AC: Wykreślić charakterystyki amplitudowe i fazowe obwodów w zakresie od 100 Hz do 10 GHz ze 101 punktami na dekadę. **Sprawozdanie:** zamieścić odpowiednie wykresy.
- ANALIZA TRAN: Wykonać analizę wielkosygnałową o wymuszeniu zgodnym z rysunkiem 1.4.b. Posługując się uzyskanymi wykresami wykazać związek między odpowiedzią w funkcji czasu i częstotliwości. **Sprawozdanie:** zamieścić odpowiedni wykres.
- PROJEKT: 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. **Sprawozdanie:** 1) zamieścić odpowiedni wykres, 2) wymienić zalety i ograniczenia w stosowaniu obwodu.



Rysunek 1.4.a.



Rysunek 1.4.b.



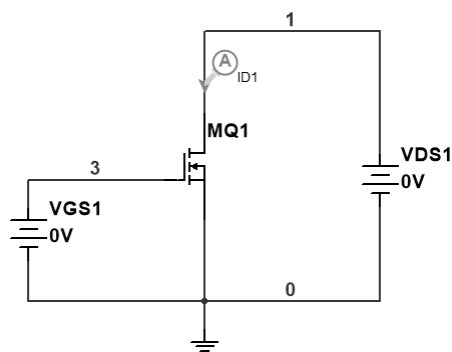
## Ćwiczenie 2. Tranzystory

### Zadanie 2.1 – Charakterystyki wyjściowe tranzystorów MOSFET

Wykreślić na jednym wykresie pęk charakterystyk wyjściowych tranzystora MOSFET. Przyjąć trzy różne modele tranzystora MQ1 (*Level 1, Level 8, Level 44*). Rysunek 2.1 przedstawia układ potrzebny do wykonania symulacji. Napięcie VDS1 zmienia się od 0 do 10 V z krokiem 0,01 V. Napięcie VGS1 zmienia się od 2 V do 4 V z krokiem 2 V.

#### Wskazówki

Należy połączyć równolegle trzy tranzystory, przyjmując dla każdego z nich inny model. Przyjąć długość kanału  $L = 2 \mu\text{m}$  oraz szerokość kanału  $W = 4 \mu\text{m}$  we wszystkich tranzystorach.

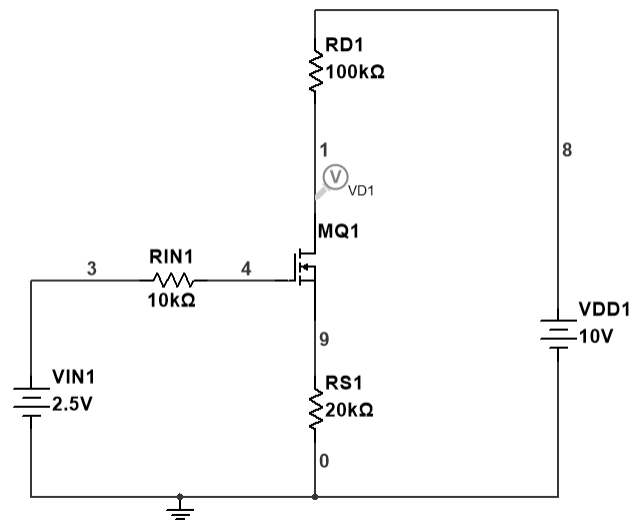


Rysunek 2.1.

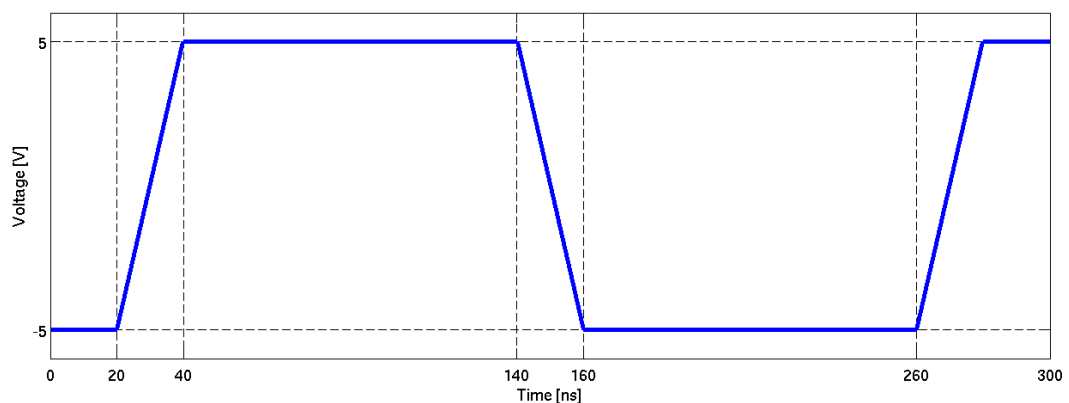
## Zadanie 2.2 – Charakterystyki przejściowe tranzystorów MOSFET

Na rysunku 2.2.a, przedstawiono układ elektroniczny zawierający tranzystor MOSFET. Wykonaj następujące symulacje:

- ANALIZA DC: Wykreślić na wspólnym rysunku charakterystyki przejściowe trzech tranzystorów MOSFET (napięcie w węzle pierwszym w funkcji napięcia wejściowego). Napięcie VIN1 zmienia się od  $-5\text{ V}$  do  $10\text{ V}$  z krokiem  $0,01\text{ V}$ .
- ANALIZA AC: Wykonać analizę AC od  $10\text{ kHz}$  do  $10\text{ GHz}$  w skali logarytmicznej z 101 punktami na dekadę. **Uwaga:** Należyysterować tranzystor poprzez podanie na bramkę stałego napięcia dodatniego VIN1 =  $2,5\text{ V}$ .
- ANALIZA TRAN: Wykonać analizę TRAN od  $0$  do  $250\text{ ns}$  z krokiem  $0,05\text{ ns}$  przy sygnale wejściowym z rysunku 2.2.b. Wykreślić krzywe na wspólnym rysunku.



Rysunek 2.2.a.



Rysunek 2.2.b.

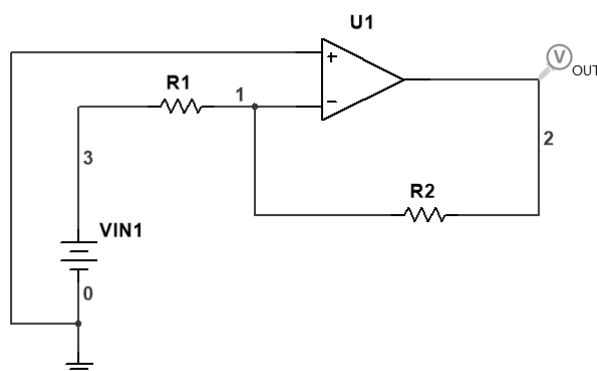
## Ćwiczenie 3. Wzmacniacze operacyjne

### Zadanie 3.1 – układy podstawowe

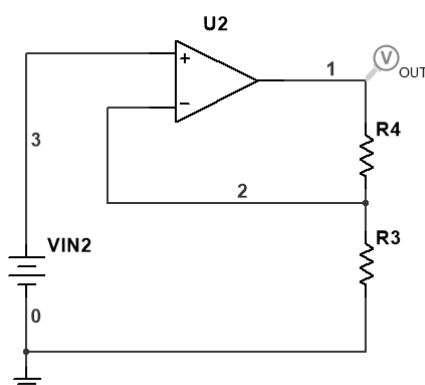
Zbadać działanie układów pokazanych na rysunkach 3.1.a oraz 3.1.b. Na wstępie przyjąć wartości rezystancji  $R1 = R3 = 1 \text{ k}\Omega$  oraz  $R2 = R4 = 10 \text{ k}\Omega$ . Zastosować następujące modele wzmacniaczy operacyjnych: *OPAMP\_3T\_VIRTUAL*, *ADTL082ARZ (A)*, *LF357H*. Napięcia zasilające są równe:  $VCC = 15 \text{ V}$  i  $VEE = -15 \text{ V}$ .

W sprawozdaniu należy zamieścić na dwóch rysunkach charakterystyki dla trzech modeli wzmacniacza operacyjnego, zastosowanych w układzie pierwszym oraz dla trzech modeli, zastosowanych w układzie drugim.

- ANALIZA DC: Wykonać analizę DC podając taki zakres napięć wejściowych, aby przebadać cały użyteczny zakres pracy wzmacniacza. **Sprawozdanie:** zamieścić odpowiedni wykres.
- ANALIZA AC: Wykonać analizę AC od 10 Hz do 1 GHz w skali logarytmicznej ze 101 punktami na dekadę. **Sprawozdanie:** zamieścić odpowiedni wykres (charakterystyka amplitudowa i fazowa).
- ANALIZA TRAN: Wykonać analizę TRAN przy wymuszeniu sygnałem jednostkowym o amplitudzie 1 V. Zmieniając wartość jednego z wybranych elementów określić jego wpływ na otrzymane charakterystyki. **Sprawozdanie:** zamieścić odpowiedni wykres.



Rysunek 3.1.a.

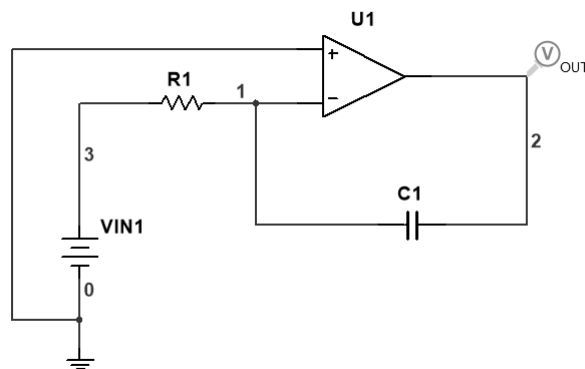


Rysunek 3.1.b.

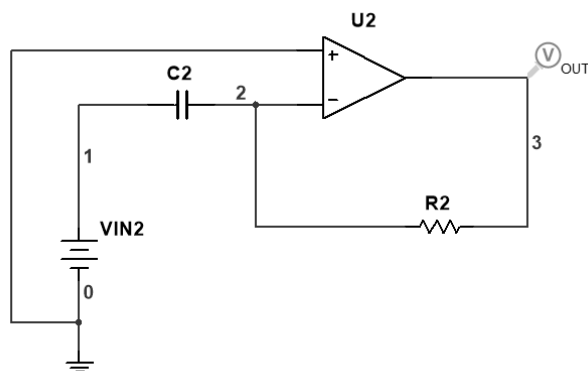
### Zadanie 3.2 – filtry

Zbadać działanie układów pokazanych na rysunkach 3.2.a, oraz 3.2.b. Na wstępie przyjąć wartości rezystancji  $R1 = R2 = 1 \text{ k}\Omega$  oraz pojemności  $C1 = C2 = 1 \text{ }\mu\text{F}$ . Zastosować te same modele wzmacniaczy operacyjnych jak poprzednio. W sprawozdaniu należy zamieścić na dwóch rysunkach charakterystyki dla trzech modeli wzmacniacza operacyjnego, zastosowanych w układzie pierwszym oraz dla trzech modeli, zastosowanych w układzie drugim.

- ANALIZA AC:** Wykonać analizę AC od 10 Hz do 10 MHz w skali logarytmicznej ze 101 punktami na dekadę. **Sprawozdanie:** zamieścić odpowiedni wykres, przyjąć skalę decybelową dla amplitudy!
- ANALIZA TRAN:** Wykonać analizę TRAN przy wymuszeniu sygnałem jednostkowym o amplitudzie 1 V. Zmieniając wartość jednego z wybranych elementów określić jego wpływ na charakterystyki amplitudowe i fazowe oraz na odpowiedź jednostkową. **Sprawozdanie:** zamieścić odpowiedni wykres. Należy pamiętać o podaniu wartości napięcia na kondensatorze równego 0 V, panującego w chwili początkowej.
- PROJEKT:** Zaprojektować filtr górno lub dolnoprzepustowy o częstotliwości granicznej podanej przez prowadzącego. Należy użyć modelu wzmacniacza operacyjnego *ADTL082ARZ (A)*. Zastosować analizę AC w odpowiednio dobranym zakresie częstotliwości. **Sprawozdanie:** zamieścić odpowiedni wykres i obliczenia.



Rysunek 3.2.a.



Rysunek 3.2.b.

## Ćwiczenie 4. Układy CMOS

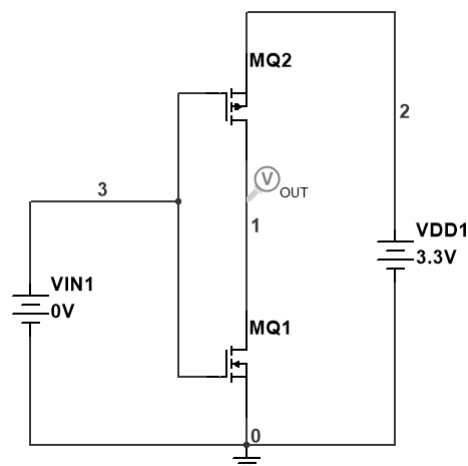
### Zadanie 4.1 – symulacja inwertera wykonanego w technologii CMOS

Na rysunku 4.1.a, przedstawiono schemat elektryczny inwertera CMOS. Napięcie VDD1 wynosi 3,3 V. Przeprowadzić symulację jego działania.

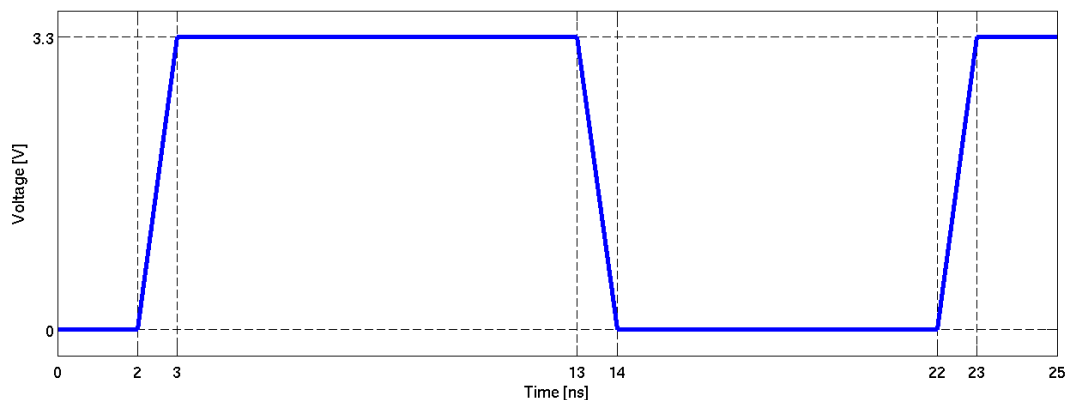
- ANALIZA DC: dla napięcia VIN1 zmieniającego się od 0 do 3,3 V z krokiem 0,01 V należy wykreślić napięcie wyjściowe inwertera (charakterystyka przejściowa).
- ANALIZA TRAN: dla napięcia VIN1 jak na rysunku 4.1.b, należy wykreślić napięcie wyjściowe i prąd zasilania inwertera.

#### Wskazówki

Należy przyjąć długość kanału  $L = 0,5 \mu\text{m}$  oraz szerokość kanału  $W = 0,5 \mu\text{m}$  w obu tranzystorach i przeprowadzić analizę parametryczną zmieniając szerokość tranzystora PMOS od  $0,5$  do  $2 \mu\text{m}$  z krokiem  $0,5 \mu\text{m}$  w obydwu przypadkach. Przyjąć model *Level 8* dla obu tranzystorów.



Rysunek 4.1.a.

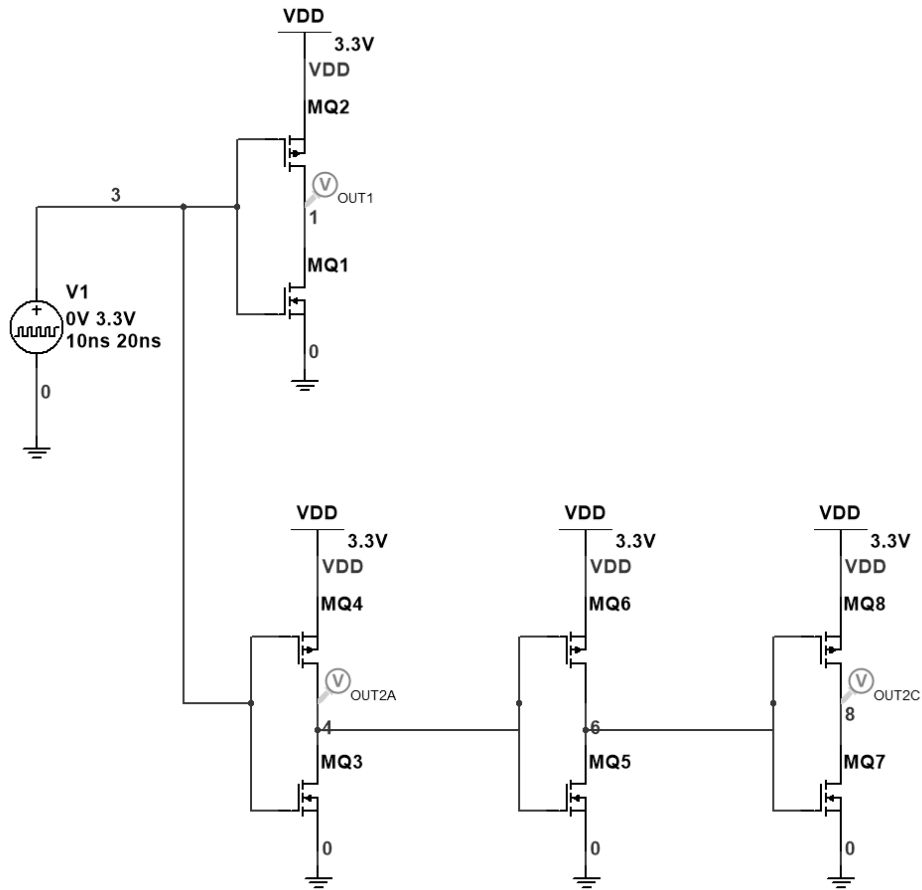


Rysunek 4.1.b.

### Zadanie 4.2 – układ z zastosowaniem inwerterów

Wykonać symulację układu z rysunku 4.2. Wymiary tranzystorów są jednakowe dla wszystkich inwerterów: NMOS:  $W = 0,5 \mu m$ ,  $L = 0,5 \mu m$ , PMOS:  $W = 1,5 \mu m$ ,  $L = 0,5 \mu m$ . Wykonać analizę TRAN stosując sygnał wejściowy z rysunku 4.1.b.

Wykreślić na jednym rysunku napięcia wyjściowe inwertera nieobciążonego (OUT1), inwertera obciążonego (OUT2A) oraz inwertera końcowego (OUT2C). Wyznaczyć czasy propagacji sygnału dla wszystkich inwerterów.



Rysunek 4.2.

**Koniec instrukcji**