



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

Wersja 4.12m (luty 2017)
Podwersja Multisim

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 SPICE

Spis treści

Regulamin laboratorium (Tydzień 1)	1
Spis treści	2
Wprowadzenie do programu National Instruments Multisim v. 14.0	4
Podstawy obsługi programu Multisim	5
Uruchomienie programu	5
Rozbudowana pomoc Multisim	6
Edycja schematu i wstawianie elementów	7
Wizardy	9
Ustawianie rodzaju i parametrów symulacji, postprocesor	12
Wyniki symulacji i edycja wykresów, kursory, eksport danych	16
Edycja modeli elementów	21
Własne komponenty, podobwoły i schematy hierarchiczne	22
Wykorzystanie linii poleceń XSPICE	23
Widok breadboard	25
Symulacje z wykorzystaniem urządzeń wirtualnych i NI-myDAQ	25
Symulacje MCU	26
Rozwiązywanie problemów symulacji	27
Zaawansowane rozwiązywanie problemów symulacji – edycja opcji analiz	28
Ćwiczenie 1 (Tydzień 2, 3, 4, 5, 6) Podstawy opisu i analizy obwodów w programie Multisim SPICE	29
Zadanie 1.1 (Tydzień 2) Obwód RC	29
Zadanie 1.2a (Tydzień 3) Obwód RCEF	31
Zadanie 1.2b (Tydzień 4) Obwód RCEF	32
Zadanie 1.3 (Tydzień 5) Obwód RD	33
Zadanie 1.4 (Tydzień 6) Obwoły RLC	34
Ćwiczenie 2 (Tydzień 7) Tranzystory	36
Zadanie 2.1 (Tydzień 7, opcja 1) Obwoły z tranzystorami	36
Zadanie 2.2 (Tydzień 7, opcja 2) Tranzystor JFET	39
Zadanie 2.3 (Tydzień 7, opcja 3) Tranzystor MOS-FET	40
Zadanie 2.4 (Tydzień 7, opcja 4) Tranzystor bipolarny	41
Projekt 1 (Tydzień 8) Tranzystorowy wzmacniacz o zadanych parametrach	44
Ćwiczenie 3 (Tydzień 9, 10) Wzmacniacze operacyjne	45
Zadanie 3.1 (Tydzień 9) Obwoły ze wzmacniaczami operacyjnymi	45
Zadanie 3.2 (Tydzień 10) Obwoły ze wzmacniaczami operacyjnymi	46
Projekt 2 (Tydzień 11, 12) Filtr analogowy	47
Projekt 3 (Tydzień 13) Układy analogowe	48
Projekt 3.1 (Tydzień 13, opcja 1) Zasilacz (obwód magnetyczny)	48
Projekt 3.2 (Tydzień 13, opcja 2) Dławikowa przetwornica DC-DC (analiza TR)	49
Projekt 3.3 (Tydzień 13, opcja 3) Układ napięcia odniesienia pracujący na zasadzie wykorzystania pasma zabronionego	51
Projekt 3.4 (Tydzień 13, opcja 4) Przerzutnik Schmitta	53
Ćwiczenie 4 (Tydzień 14, opcja 1) Układy CMOS	54
Zadanie 4.1 (Tydzień 14, opcja 1.1) Symulacja inwertera wykonanego w technologii CMOS	54
Zadanie 4.2 (Tydzień 14, opcja 1.2) Układ z zastosowaniem inwerterów	56
Zadanie 4.3 (Tydzień 14, opcja 1.3) Bramka NAND	57
Zadanie 4.4 (Tydzień 14, opcja 1.4) Przerzutnik RS	57
Ćwiczenie 5 (Tydzień 14, opcja 2) Dynamiczne układy MOS	58
Ćwiczenie 6 (Tydzień 14, opcja 3) Analogowe zastosowania tranzystorów MOS	60
Zadanie 6.1 (Tydzień 14, opcja 3) Wzmacniacz operacyjny z tranzystorami MOS	60
Zadanie 6.2 (Tydzień 14, opcja 3) Wzmacniacz operacyjny z tranzystorami CMOS	62
Ćwiczenie 7 (Tydzień 14, opcja 4) Układy cyfrowe	64

Zadanie 7.1 (Tydzień 14, opcja 4) Cyfrowy generator przebiegu schodkowego	64
Dodatek 1. Modele elementów (wzmacniacze operacyjne)	66
Dodatek 2. Filtry analogowe	70
Dodatek 3. Współczynniki dla różnych typów filtrów.....	75
Dodatek 4. Zwięzły opis programu SPICE	79
1. Opis obwodu	79
Wpisywanie dodatkowych parametrów elementów	81
2. Opisywanie źródeł niezależnych	82
• Dziedzina DC	82
• Dziedzina AC	83
• Dziedzina TR	83
3. Instrukcje sterujące.....	85
a) Instrukcja .MODEL	85
b) Instrukcja .SUBCKT	86
4. Analizy w programie SPICE	87
a) Wyznaczenie punktu pracy	87
b) Analiza statyczna	87
c) Analiza małosygnałowa	87
d) Analiza stanów przejściowych.....	88
5. Wyniki obliczeń	88
Funkcje sygnałów dostępne przy użyciu .PROBE	88
6. Wybrane analizy dodatkowe	89
a) Zmiana temperatury	89
b) Obliczanie wrażliwości	89
c) Analiza Fouriera.....	90
d) Definiowanie punktów startowych i warunków początkowych.....	90
e) Analiza szumowa	90
f) Analiza Monte Carlo	91
g) Analiza najgorszego przypadku (Worst Case)	91
Literatura.....	92
Dodatek 5. Typoszeregi E	93

Wprowadzenie do programu National Instruments Multisim v. 14.0

National Instruments Multisim – to symulator obwodów elektronicznych standardu przemysłowego. Wykorzystuje jako silnik symulator SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis). Multisim został zbudowany przez firmę o nazwie Electronics Workbench, która obecnie jest oddziałem National Instruments.

Multisim zawiera przemysłowy standard symulatora SPICE 3F5 i XSPICE, do tego inne niestandardowe rozszerzenia w celu optymalizacji wydajności symulacji i polepszenia zbieżności. Strona domowa to:

<http://www.ni.com/multisim/>

SPICE został opracowany przy Electronics Research Laboratory na University of California, Berkeley. Wywodzi się z programu CANCER (CANCER akronim "Computer Analysis of Nonlinear Circuits, Excluding Radiation")

SPICE 3F5 – to najnowsza edycja rdzenia SPICE, zaprojektowana przez University of California w Berkeley. Strona domowa wraz z opisem i interaktywną instrukcją:

<https://bwrce.eecs.berkeley.edu/Courses/IcBook/SPICE/>

Natomiast XSPICE zawiera zestaw rozszerzeń wprowadzonych do SPICE w ramach umowy do US Air Force, m.in. zawiera symulację w trybie mieszanym oraz rozszerzalny podsystem modelowania dla użytkowników końcowych. Opatentowana technologia współpracy symulatorów umożliwia Multisimowi symulację VHDL i MCU obok układów analogowych i mixed-mode. Krótki opis jest na stronie:

<http://fides.fe.uni-lj.si/spice/xspice.html>

Druga cecha Multisima – to kompleksowy zestaw analiz, a także dodatkowe analizy uzupełniające np. obliczanie skutków tolerancji składowych i wrażliwości, skutków zmian temperatury itd. (w sumie 24 analizy w aktualnej wersji programu). Multisim przeprowadza symulację i wyprowadza wyniki do konfigurowalnego wizualizatora przebiegów: programu Grapher. Posiada także płynny eksport do programu do projektowania obwodów drukowanych NI Ultiboard.

SPICE był inspiracją i służył jako podstawa do wielu innych programów symulacyjnych obwodów elektronicznych w środowisku akademickim, w przemyśle oraz w produktach komercyjnych. Pierwszą komercyjną wersją SPICE był ISPACE National CSS. Najważniejsze wersje komercyjne SPICE to: HSPACE (pierwotnie sprzedawany przez Shawn i Kim Hailey Meta Software, ale obecnie jest własnością Synopsys) i PSPACE (obecnie własność Cadence Design Systems). W środowisku akademickim to XSPACE, opracowany na Georgia Tech, który dodaje mieszane analogowo- cyfrowe modele do symulacji behawioralnej i Cider (poprzednio kodeki z UC Berkeley / Oregon State Univ.), który dodaje symulację przyrządów półprzewodnikowych.

Aktualnie kilku producentów nadal rozwija programy symulacji obwodów wykorzystujące SPICE. Wśród nich są:

- Adice w Analog Devices,
- LTSpice w Linear Technology (dostępne publicznie jako freeware),
- Mica w Freescale Semiconductor,
- Tina w Texas Instruments (darmowa wersja to TINA-TI),
- Analog Devices oferuje bezpłatne narzędzie o nazwie ADIsimPE (w oparciu o SIMetrix / Simplis)

Symulatory z innych firm, które nie są bezpośrednio oparte na SPICE, to m.in. PowerSpice w IBM Titan w Infineon Technologies, Lynx w Intel Corporation i Pstar w NXP Semiconductor.

Program Multisim można pobrać ze strony: <http://www.ni.com/multisim/try/> . W wersji Demo działa 7 dni, ale po rejestracji na stronie NI student może przedłużyć ten czas do 45 dni. Jeśli wykonuje pracę dyplomową – może ubiegać się o pełną wersję studencką (pytać prowadzących). Może też dokonać samodzielnego zakupu na stronie:

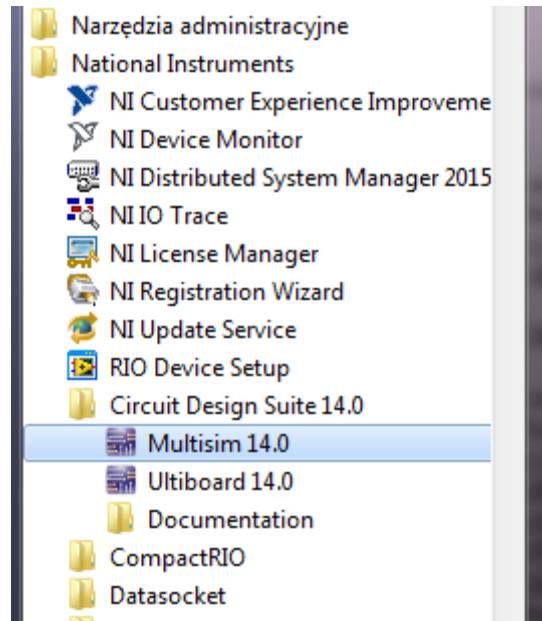
<http://www.studica.com/it/en/National-Instruments-students-ni-labview-mydaq/nicircuitdesignsuitestudentedition.html>

(cena ok. 89 Euro) lub skorzystać po rejestracji z Multisim Live <https://beta.multisim.com/> .

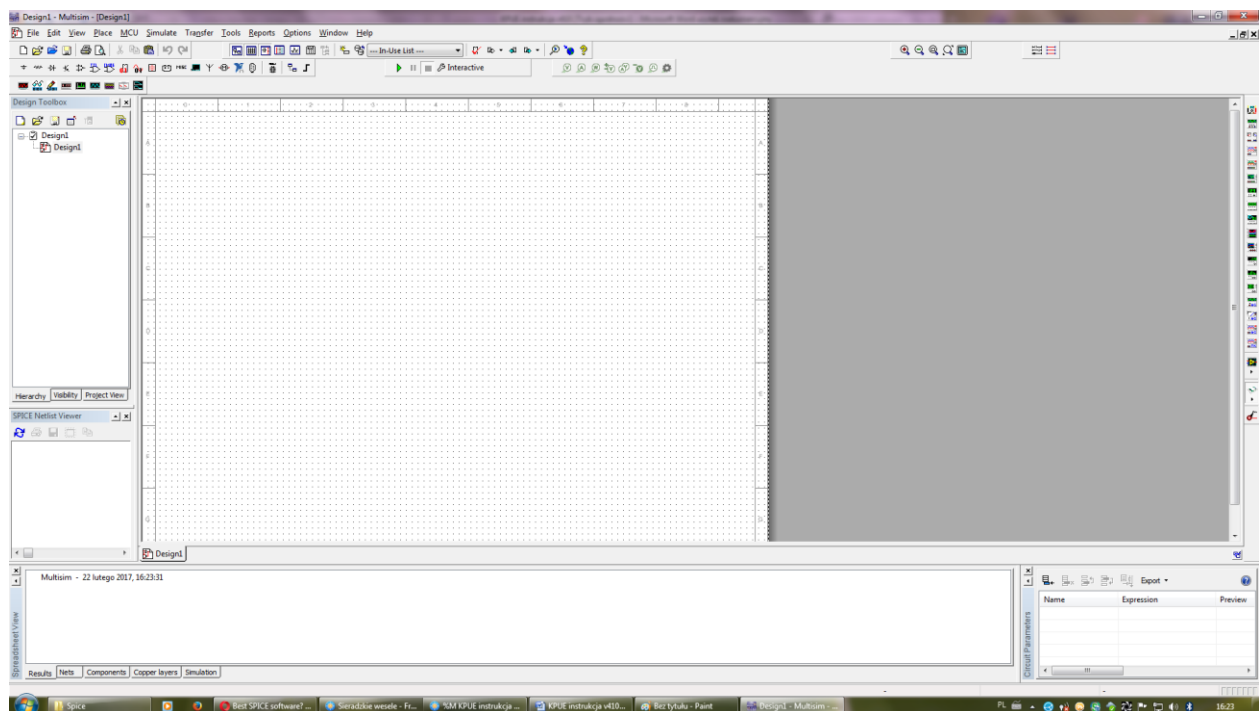
Podstawy obsługi programu Multisim

Uruchomienie programu

Uruchomienie programu Multisim – menu start komputera:



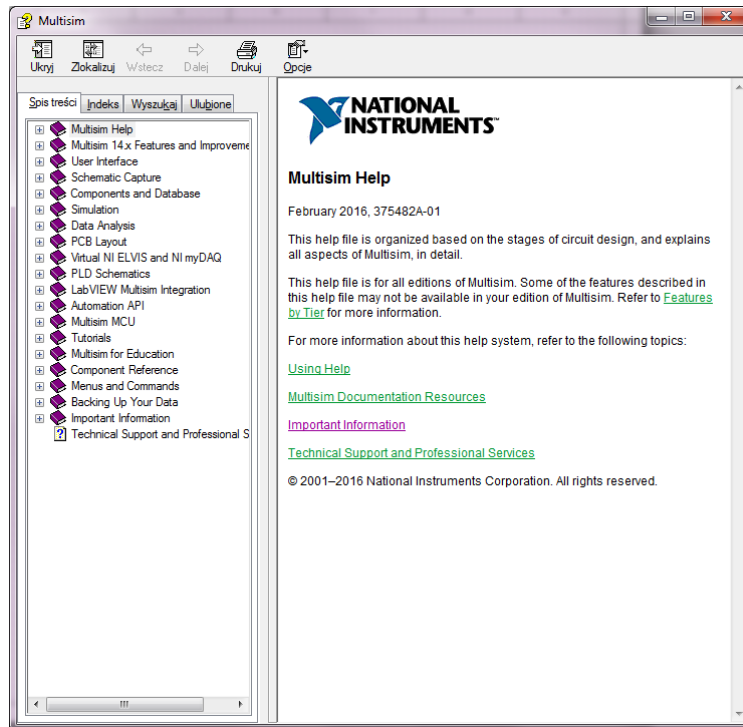
Po uruchomieniu programu – projekt domyślny, wygląd ekranu:



Rozbudowana pomoc Multisim

Program Multisim oferuje rozbudowaną pomoc:

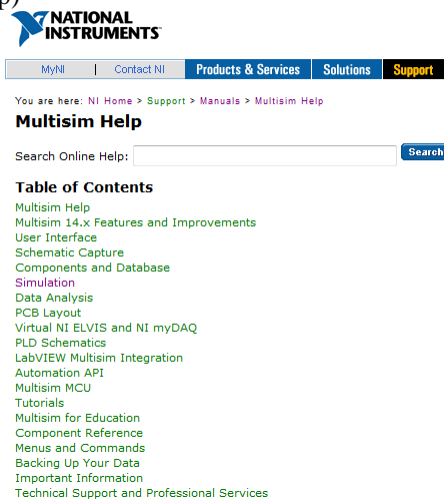
- klawisz F1 – Multisim Help



- strona internetowa:

<http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/375482A-01/>

(wersja zgodna/kopia z Multisim Help)

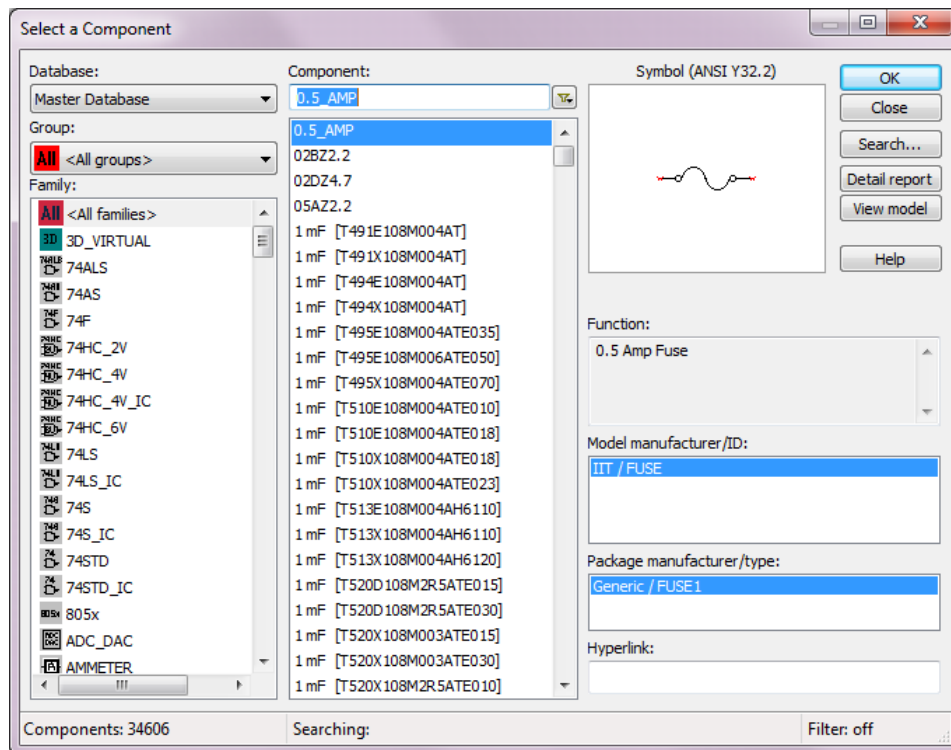


Polecane przed rozpoczęciem pracy w programie - wykaz źródeł w Multisim:

<http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/375482A-01/multisim/signalsources/>

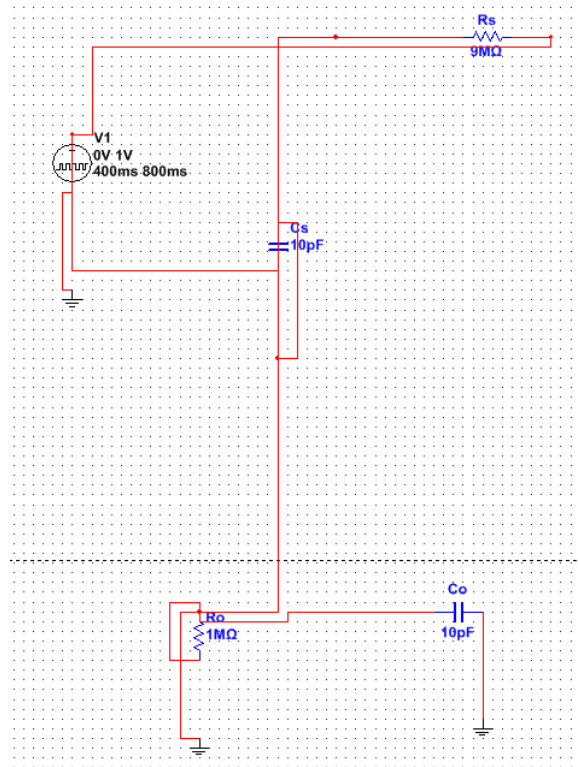
Edycja schematu i wstawianie elementów

Wklejanie elementów obwodu - Menu > Place > Component lub Ctrl-W (przydatne: obracanie elementu Ctrl-R, Ctrl-Shift-R, odbicie lustrzane poziome i pionowe: Alt-X, Alt-Y):



Po wprowadzeniu obwodu możemy podejrzeć netlistę w okienku SPICE netlist viewer (jeśli nie jest widoczne trzeba wybrać tę opcję z Menu > View i uaktywnić okno netlist viewer). SPICE netlist viewer posiada kilka przycisków do obsługi plików z netlistą (to samo można uzyskać z Menu > Tools > SPICE netlist viewer). Netlistę można także wyeksportować do pliku .cir poleceniem Menu > Transfer > Export SPICE netlist.

Istnieje druga metod wprowadzania obwodu – jeśli już posiadamy netlistę zgodną składniowo z Berkeley Spice (UWAGA: netlisty z innych symulatorów np. PSpice nie są w 100% zgodne ze Spice, dlatego mogą wystąpić problemy w ich imporcie) można ją zaimportować poleceniem „Open file”. Niestety – tak importowany obwód wymaga uporządkowania elementów na schemacie (ponieważ zostały one wprowadzone i połączone w kolejności wyznaczonej netlistą):

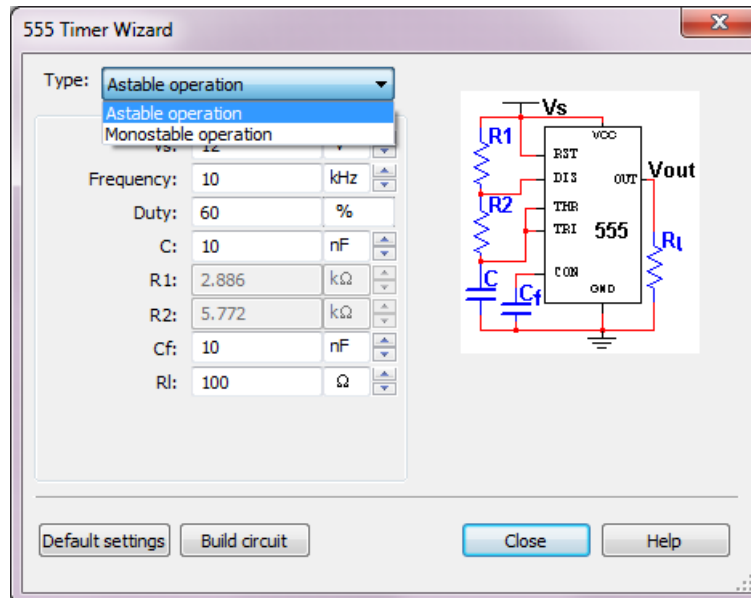


Uwaga: jeśli netlista zawiera dyrektywy symulacji (dotyczy także dyrektywy options) w pełni zgodne z Berkeley Spice – zostaną one także zaimportowane i pojawią się w oknie Analyses and simulation. Elementy elektroniczne, które nie zostały znalezione w wewnętrznych bibliotekach Multisima, będą natomiast zastąpione symbolami ogólnymi (w pełni konfigurowalnymi).

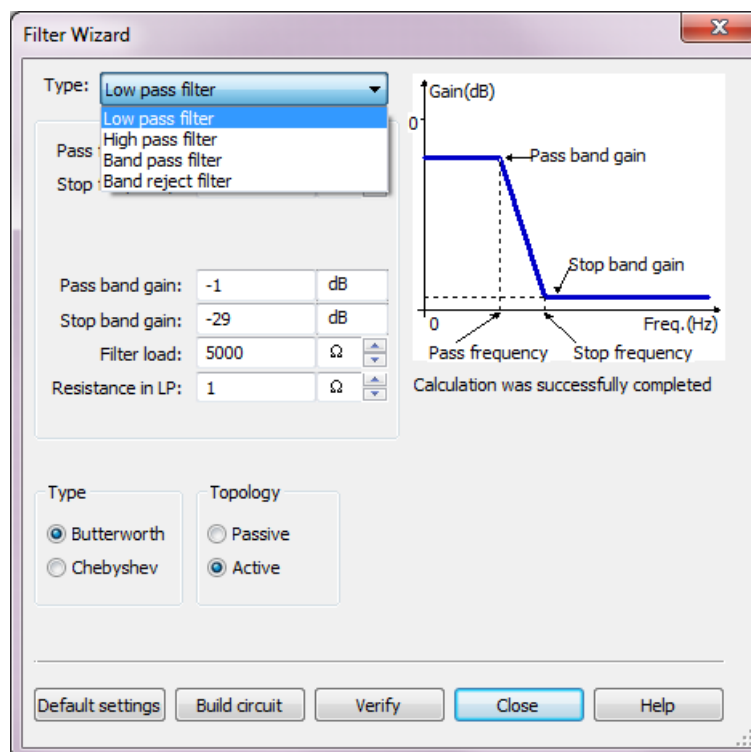
Wizardy

Multisim zawiera 4 wbudowane wizardy Menu > Tools > Circuit wizards.

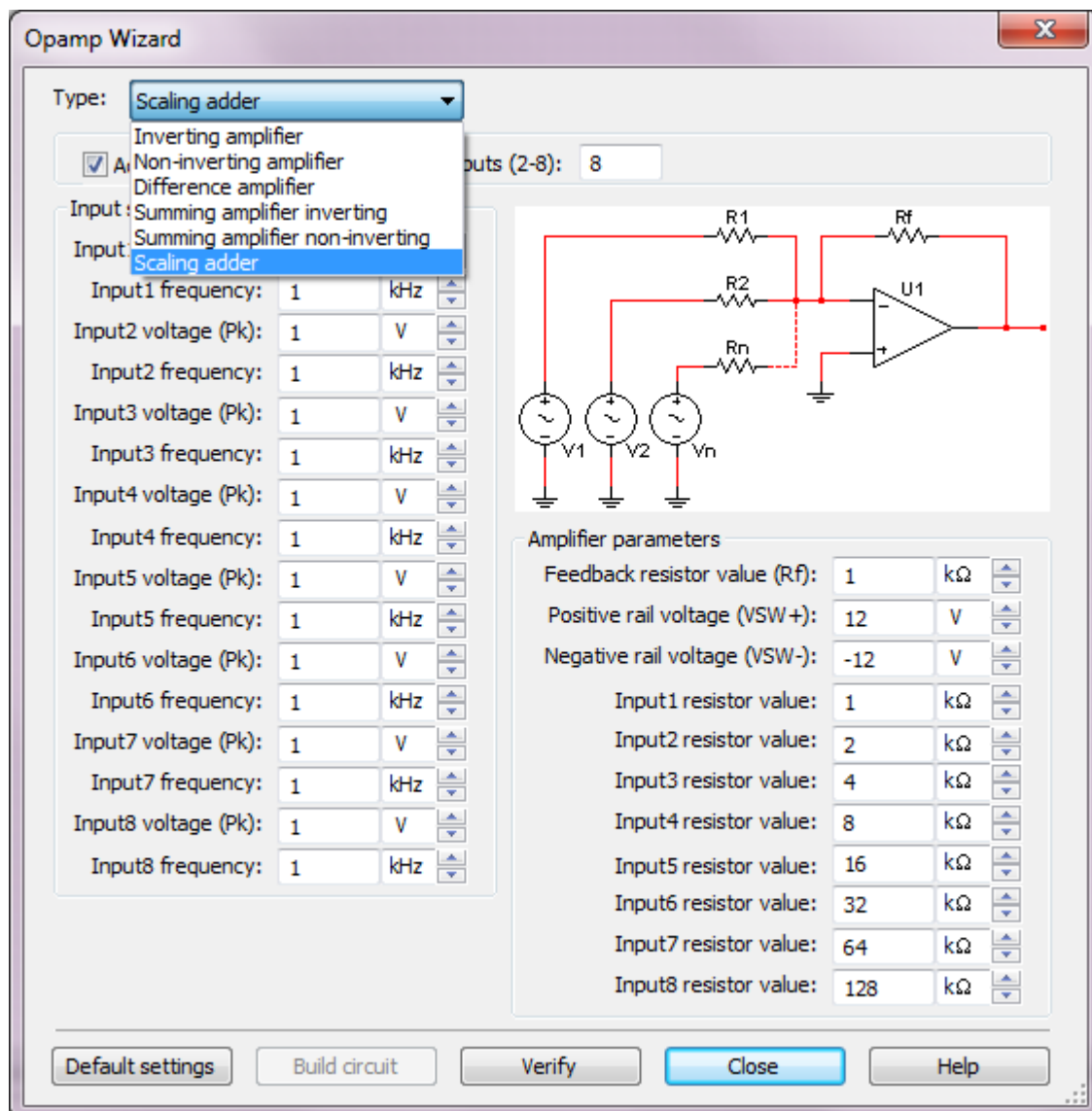
555 Timer Wizard:



Filter Wizard:



Opamp Wizard:



BJT Common Emitter Amplifier Wizard:

BJT Common Emitter Amplifier Wizard

BJT selection

Beta of the BJT (h_{fe}):

Saturated (V_{be}): mV

Amplifier specification

Peak input voltage (V_{pin}): mV

Input source frequency (f_s): kHz

Signal source resistance (R_s): Ω

Quiescent point specification
($R_c = R_l$ for maximum power transfer)

☒ Collector current (I_c): mA

☐ Collector-emitter voltage (V_{ce}): V

☐ Peak output volt. swing (V_{ps}): mV

Cutoff frequency (f_{cmin}): Hz

Load resistance and power supply

Power supply voltage (V_{cc}): V

Load resistance (R_l): k Ω

Amplifier characteristics

Small signal voltage gain (A_v):

Small signal current gain (A_i):

Maximum voltage gain (A_{vmax}):

Circuit Topology

DC Load Line
 $V_{ce} = V_{cc} - R_{dc} \times I_c$

Input

Output

I_c vs. V_{ce} - Operating (Q) Point

Default settings

Build circuit

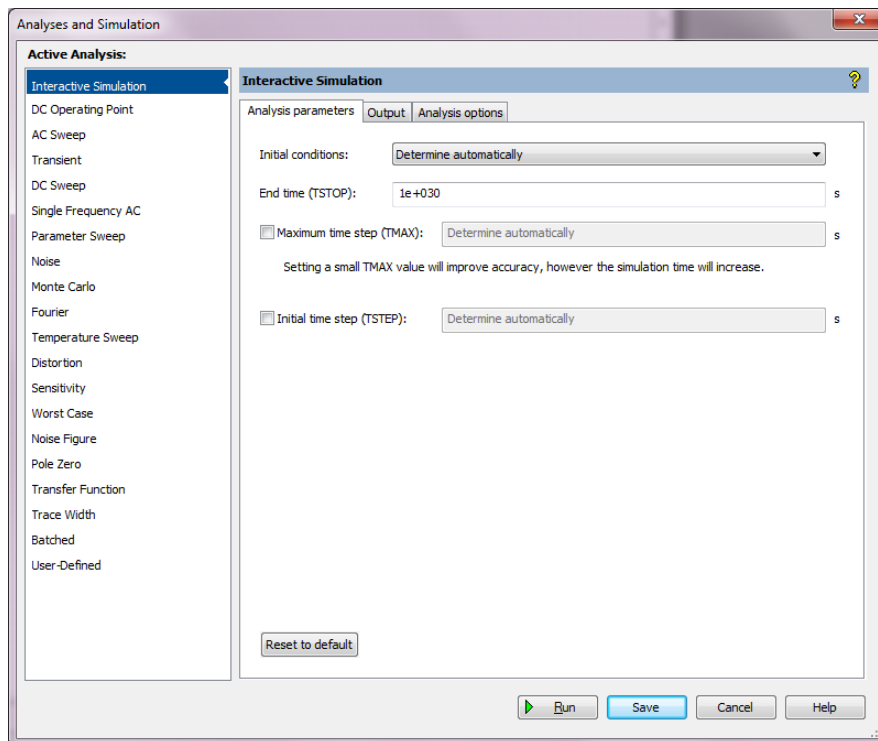
Verify

Close

Help

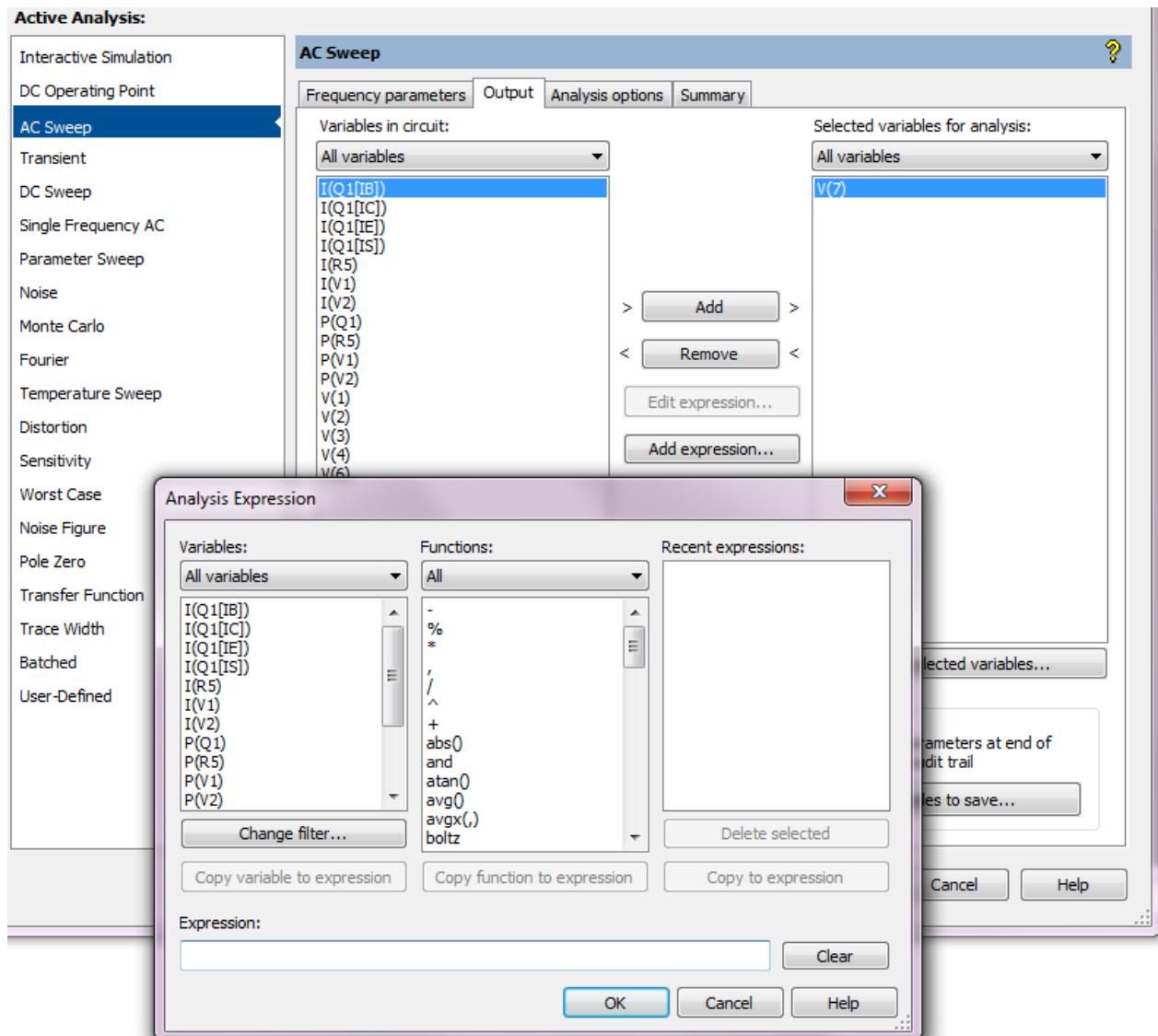
Ustawianie rodzaju i parametrów symulacji, postprocesor

Ustawianie parametrów symulacji - Menu > Simulation > Analyses and simulation lub przycisk belki „interactive”:



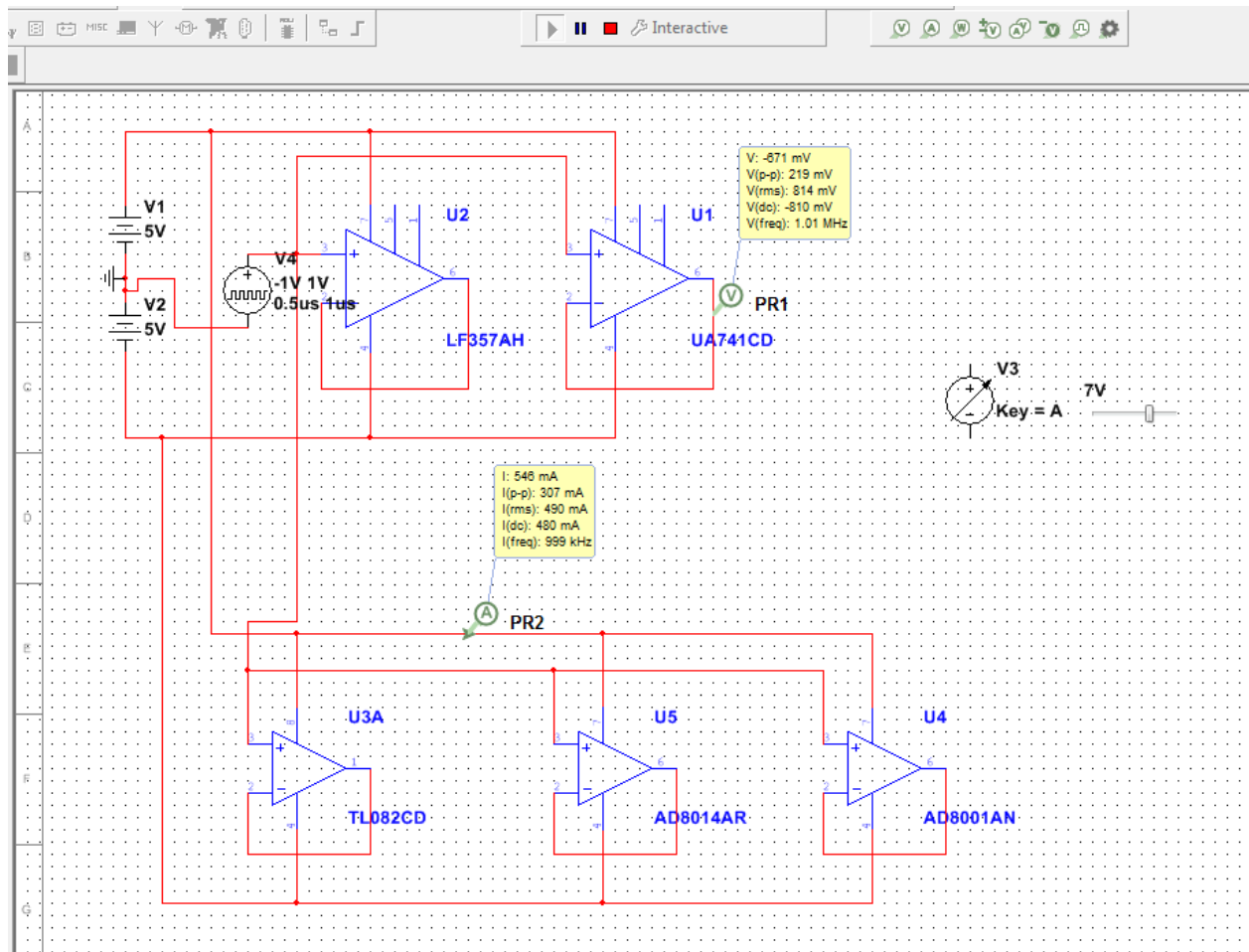
Analiza Multisim	Analiza Spice	Komentarz
Interactive simulation		Symulacja interaktywna – wyświetlanie na bieżąco wybranych napięć i prądów na schemacie: trzeba użyć punktów pomiarowych
DC Operating Point	.OP	
AC sweep	.AC	
Transient	.TRAN	
DC Sweep	.DC	
Single Frequency AC		.AC dla wybranej, jednej częstotliwości
Parameter Sweep		Odpowiednik .SWEEP i PARAM
Noise	.NOISE	
Monte Carlo	.MC	
Fourier	.FOUR	
Temperature Sweep		Zmodyfikowany .TEMP - przemiatanie
Distortion	.DISTO	
Sensitivity	.SENS	
Worst Case	.WCASE	
Noise Figure		Obliczanie szumu obwodu SNRin/SNRout
Pole Zero	.PZ	
Transfer Function	.TF	
Trace Width		Oblicza minimalną szerokość ścieżki dla danego prądu RMS
Batched		Obliczenia wsadowe – wyznaczenie kilku analiz do uruchomienia
User Defined		Obliczenia wsadowe z pliku

W celu wykonania różnych typów analiz należy wybrać typ analizy i koniecznie w zakładce output zmienną, która ma się pokazać na wykresie. Uwaga: przycisk Add expression pozwala na wykonanie zaawansowanych obliczeń na zmiennych z wykorzystaniem predefiniowanych funkcji:

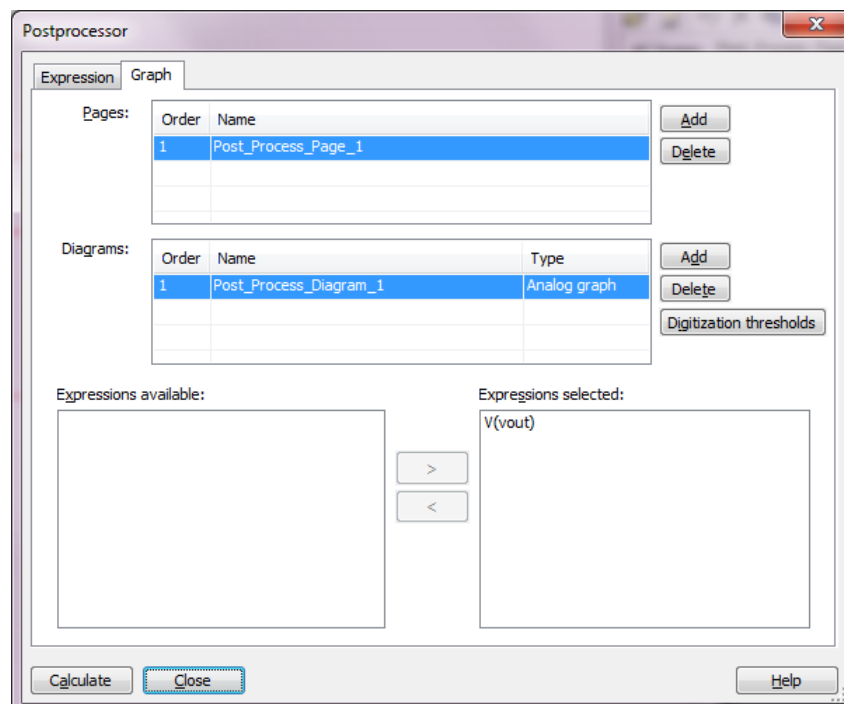
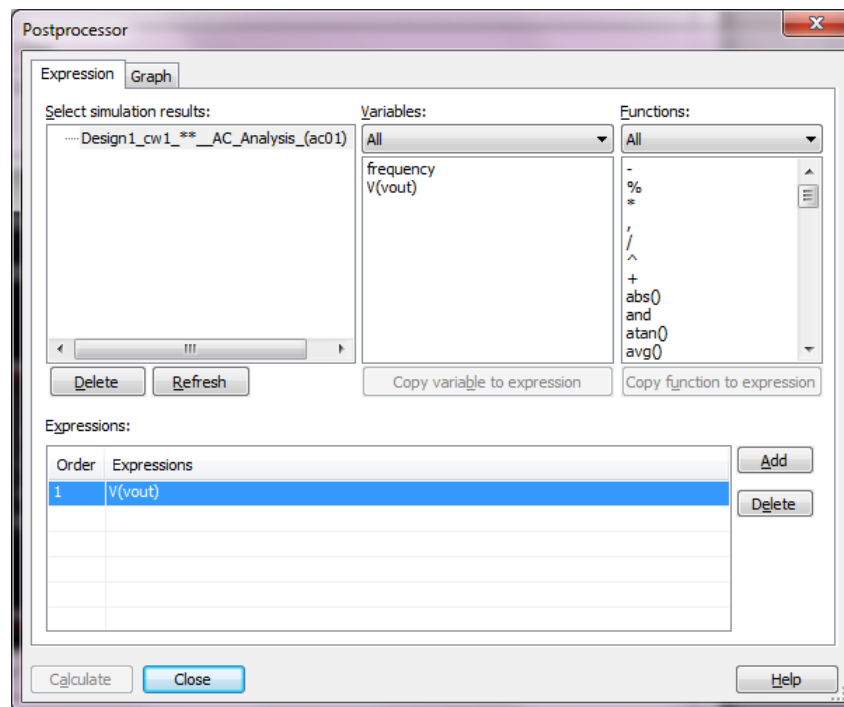


Symulacja interaktywna jest szczególnym rodzajem: obliczenia są wykonywane na bieżąco, wyniki wyświetlane na próbnikach (woltomierz - napięcie, amperomierz - prąd, watomierz, napięcie różnicowe, napięcie i prąd, napięcie odniesienia i cyfrowe przebiegi). Jeśli zostanie wykorzystane np. źródło o nazwie DC_INTRERACTIVE_VOLTAGE lub DC_INTERACTIVE_CURRENT, wreszcie INTERACTIVE_DIGITAL_CONSTANT – istnieje możliwość zmiany wartości źródła w trakcie symulacji z wykorzystaniem myszki lub klawiatury (kursorami oraz tak jak na zrzucie także klawiszem litery A) – przykład V3 na rysunku z małym suwakiem po prawo.

Wyjście z symulacji interaktywnej wymaga najpierw jej zatrzymania przyciskiem stop.

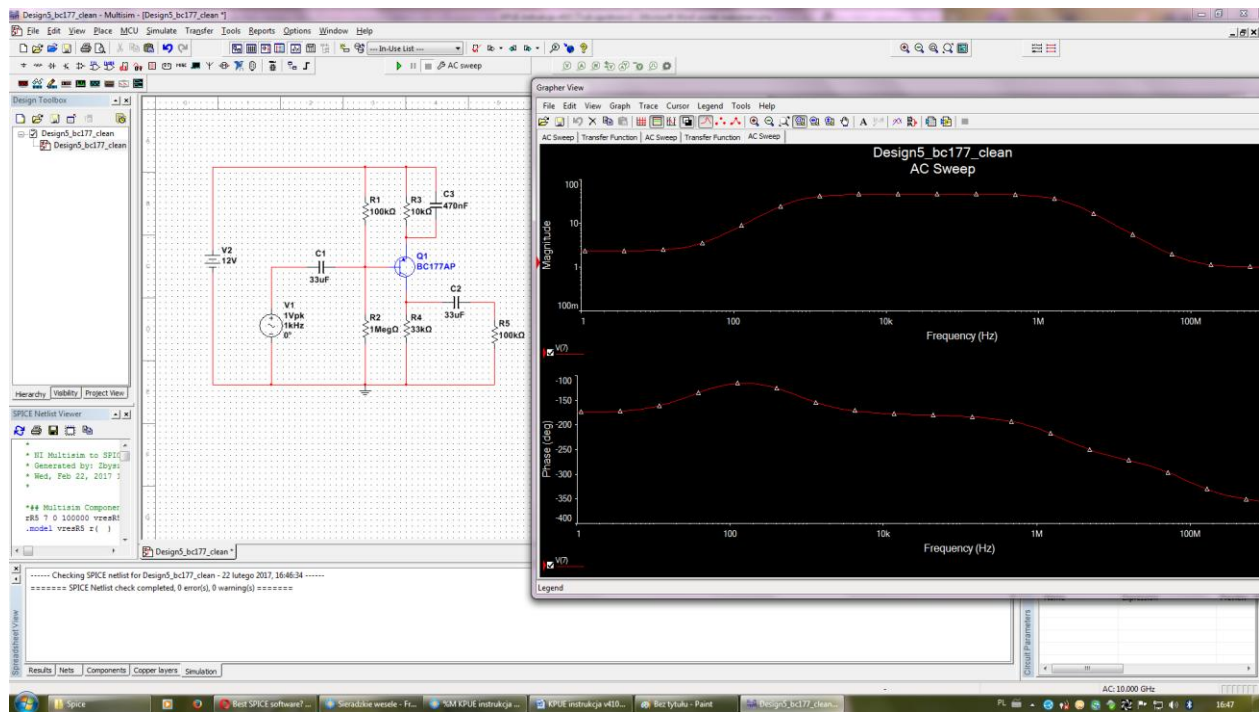


Inną opcją po już wykonanej wstępnej symulacji jest wykorzystanie postprocesora Menu > Simulate > Postprocessor. Zakładki Expression i Graph na dodawanie wyrażeń i następnie uzyskanie wartości ich przebiegów na wykresie.

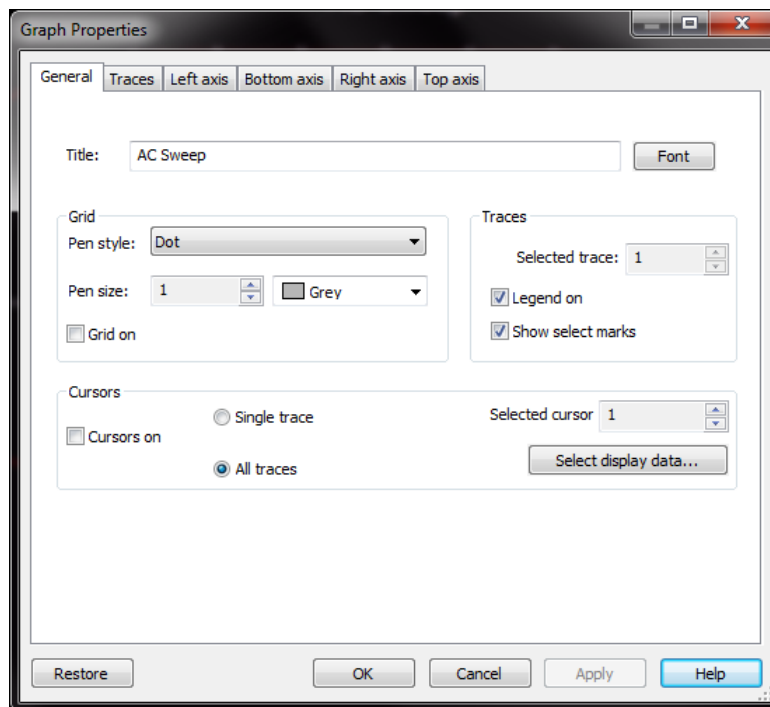


Wyniki symulacji i edycja wykresów, kursory, eksport danych

Wynik symulacji otrzymujemy w programie Grapher (okno Grapher View):

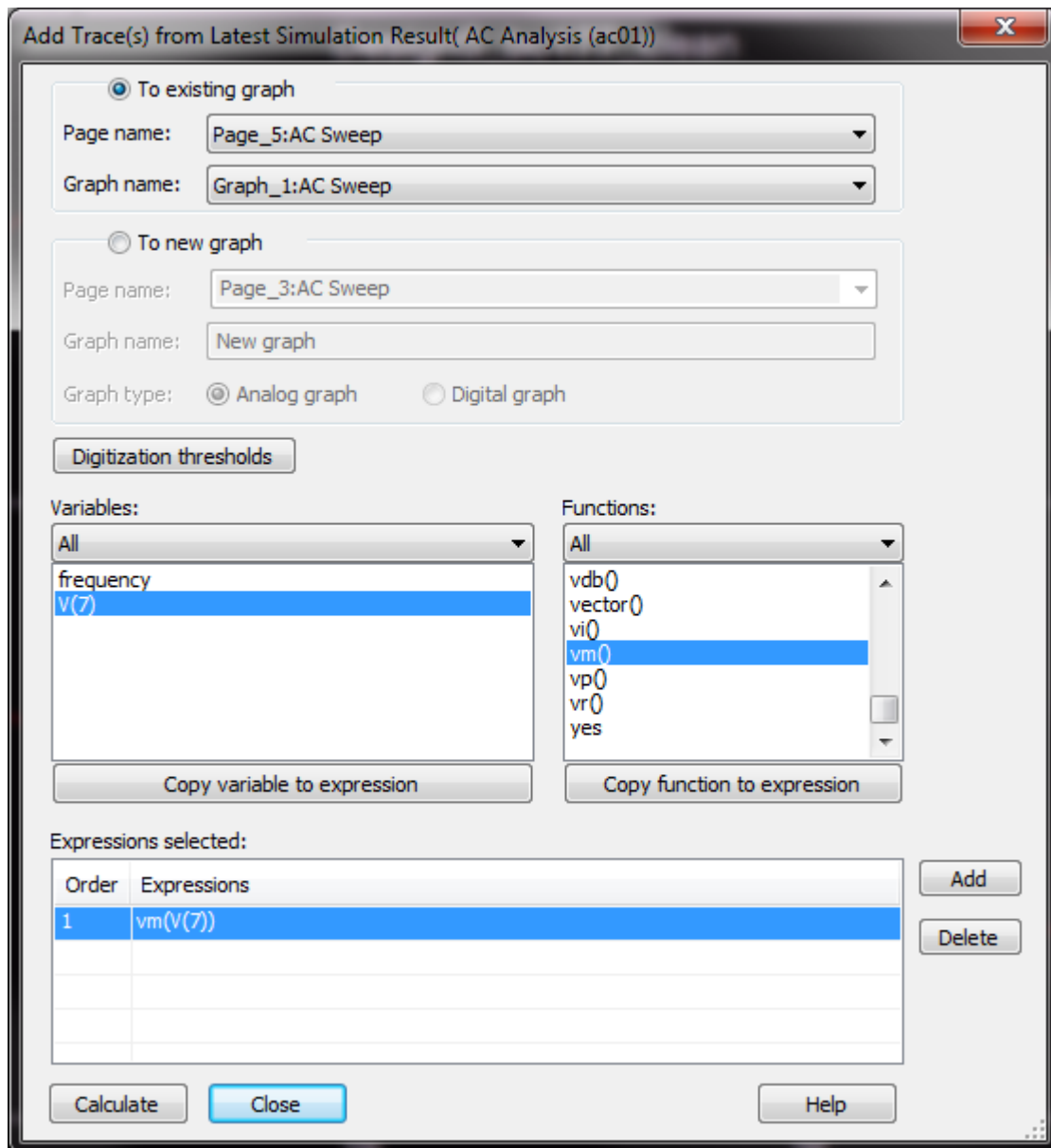


Modyfikacja uzyskanego wykresu: Menu > Graph > Properties, tutaj można zmienić skale na osiach, zakresy, nazwy osi, kolory itp.:

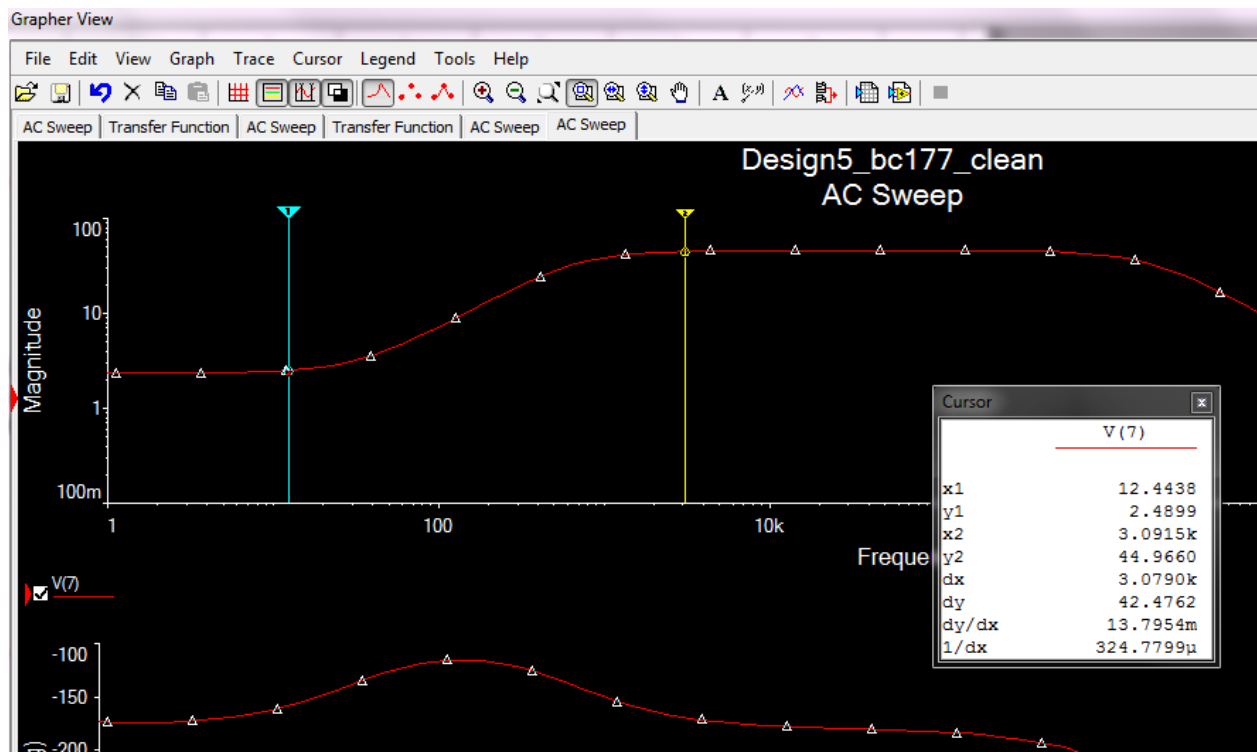


Dodawanie nowego wykresu lub dodawanie przebiegów do już istniejącego wykresu: Menu > Graph > Add Trace(s) from Latest Simulation Result (uwaga – trzeba wybrać opcję albo dodawania do już istniejącego wykresu, albo do nowego wykresu – czyli tym samym utworzenia nowego wykresu).

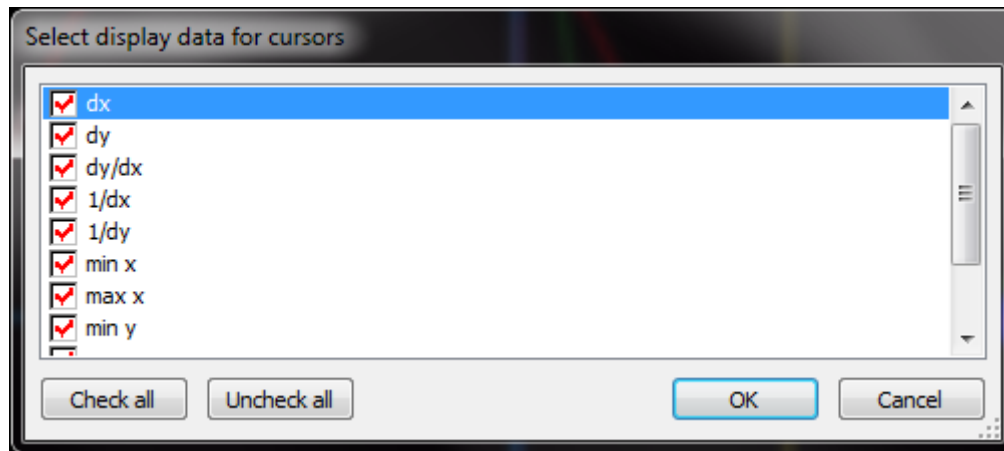
Proszę zwrócić uwagę, że w tym oknie można także definiować własne wyrażenia – obliczenia. W tym celu należy wykorzystać podokienka „zmiennie” (variables) i predefiniowane „funkcje” (Functions), tak jak pokazano na zrzucie ekranu.



Wykorzystanie kursorów: Menu > Cursor > Show cursors, a następnie należy kursory przeciągnąć myszką (początkowo pokazują się na osi wykresu, mogą być słabo widoczne), dalsze analizy (np. szukanie wybranych parametrów przebiegów wybieramy opcjami z Menu > Cursor > np. „Go to next Y max”):



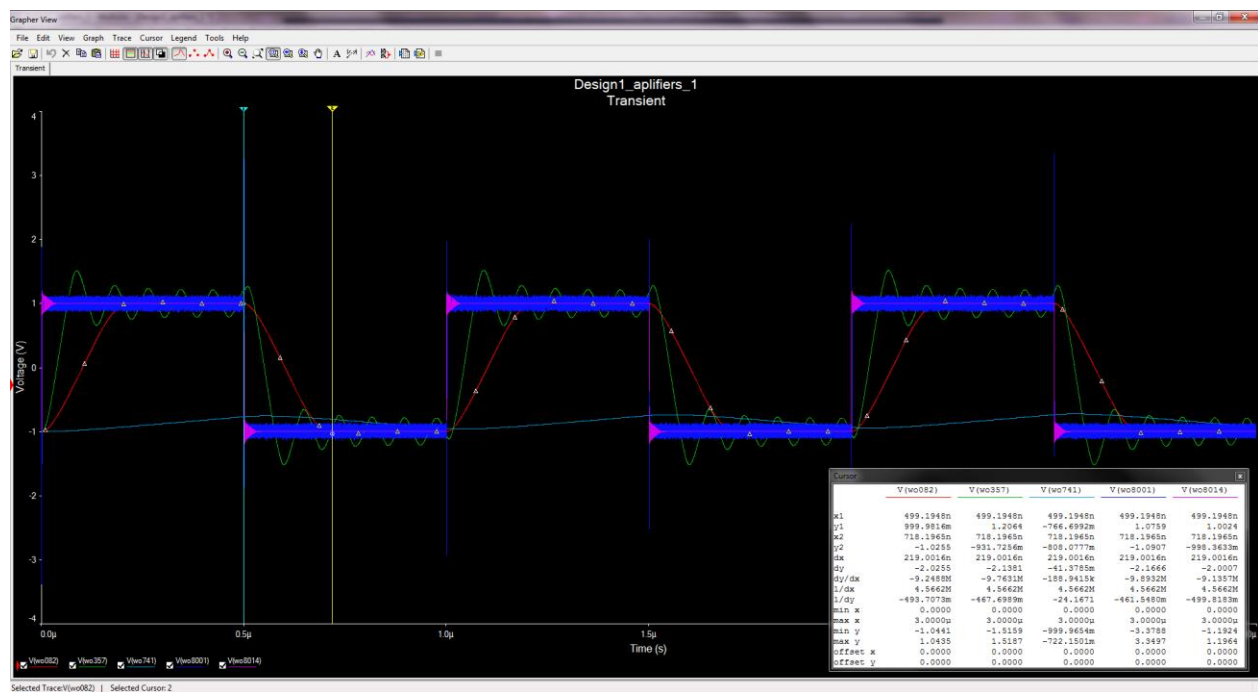
Jeśli kursory są włączone, po wejściu w Menu > Graph > Properties przycisk „Select display data” otrzymujemy menu wyboru wyświetlania dodatkowych parametrów wykresu:



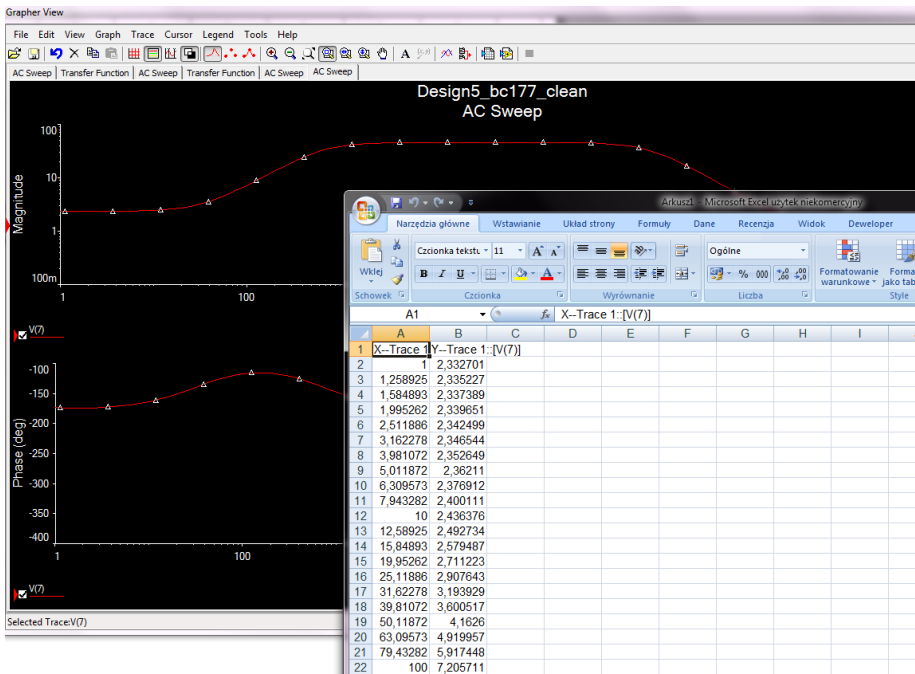
Dodatkowe parametry są wyświetlane w oknie:

	V (wo082)	V (wo357)	V (wo741)	V (wo8001)	V (wo8014)
x1	499.1948n	499.1948n	499.1948n	499.1948n	499.1948n
y1	999.9816m	1.2064	-766.6992m	1.0759	1.0024
x2	718.1965n	718.1965n	718.1965n	718.1965n	718.1965n
y2	-1.0255	-931.7256m	-808.0777m	-1.0907	-998.3633m
dx	219.0016n	219.0016n	219.0016n	219.0016n	219.0016n
dy	-2.0255	-2.1381	-41.3785m	-2.1666	-2.0007
dy/dx	-9.2488M	-9.7631M	-188.9415k	-9.8932M	-9.1357M
1/dx	4.5662M	4.5662M	4.5662M	4.5662M	4.5662M
1/dy	-493.7073m	-467.6989m	-24.1671	-461.5480m	-499.8183m
min x	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
max x	3.0000μ	3.0000μ	3.0000μ	3.0000μ	3.0000μ
min y	-1.0441	-1.5159	-999.9654m	-3.3788	-1.1924
max y	1.0435	1.5187	-722.1501m	3.3497	1.1964
offset x	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
offset y	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Wykres główny i okno dodatkowych parametrów pokazano poniżej:

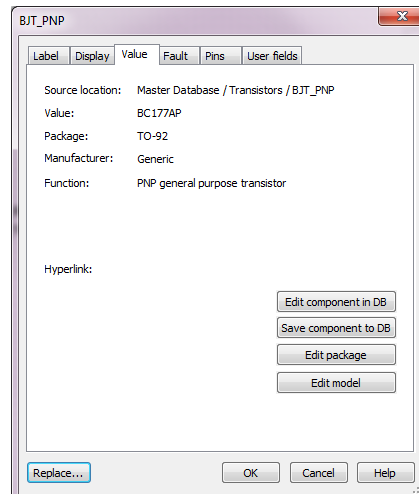


W przypadku konieczności wykonywania innych analiz programem zewnętrznym, można skorzystać z opcji Menu > Tools > Export to Excel:

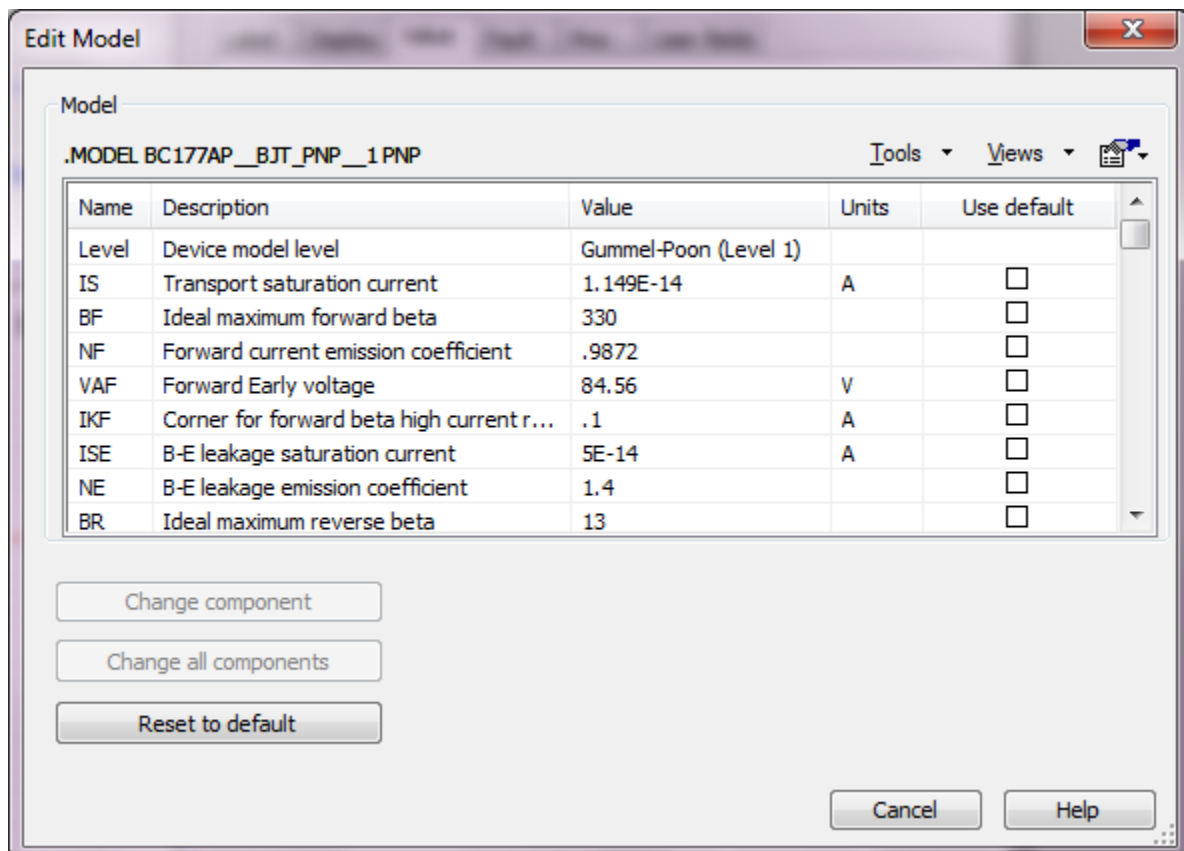


Edycja modeli elementów

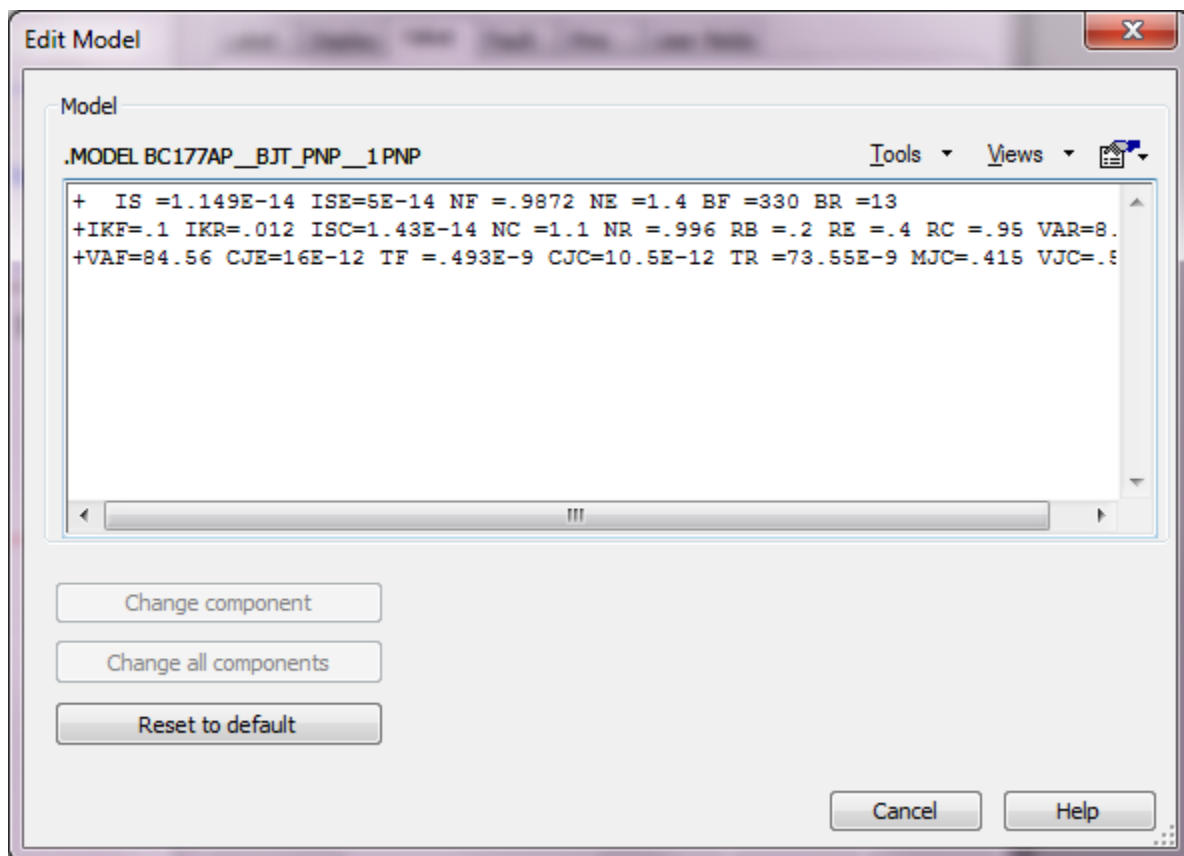
Edycja istniejących modeli elementów: należy wstawić element do schematu, a następnie dwukrotnie kliknąć w element w celu uzyskania okna dialogowego:



Jeżeli element posiada edytowalny model lub obudowę (wiele elementów np. rezystory, kondensatory, cewki – posiadają możliwość edycji tylko podstawowych ich parametrów czyli rezystancji, pojemności, indukcyjności) w zakładce Value należy kliknąć Edit Model (**UWAGA: proszę NIE wchodzić w „Edit komponent In DB”!**). Otrzymujemy dwie wersje edycji – okienkową („Table view”):



oraz po zmianie wyglądu listą rozwijalną „Views” na „Spice view”:



Po edycji zmiany należy zatwierdzić albo tylko dla danego komponentu, albo wszystkich na schemacie.

Własne komponenty, podobwoły i schematy hierarchiczne

W celu utworzenia nowego/własnego komponentu należy skorzystać z opcji Menu > Tools > Component wizard (pełny opis korzystania w <http://www.ni.com/tutorial/3173/en/>).

Natomiast w celu zbudowania podobwołu (subcircuit) należy skorzystać z Menu > Place > New Subcircuit w otworzonym nowym oknie schematu należy wprowadzić jego treść.

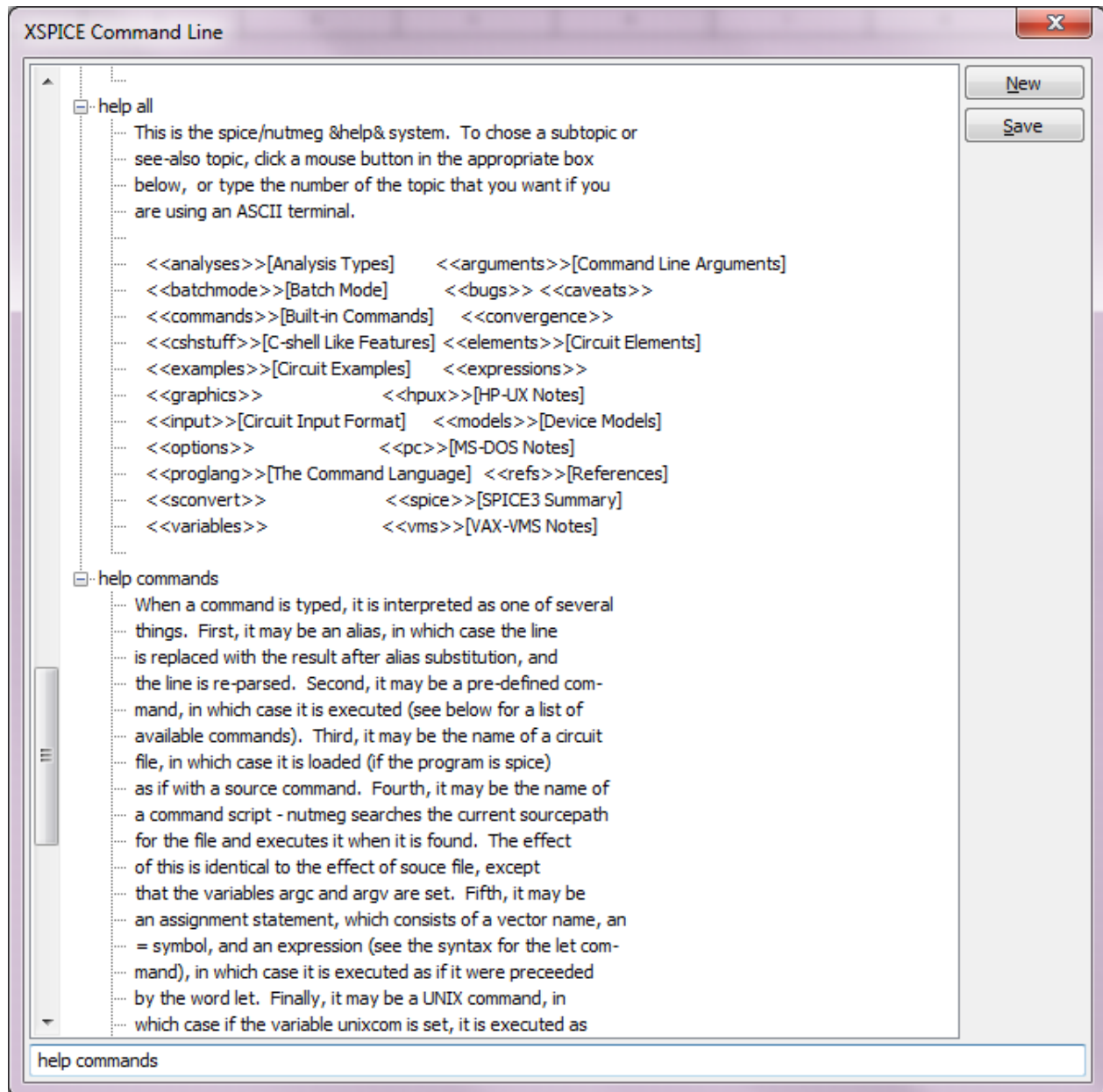
Można także skorzystać ze schematów hierarchicznych Menu > Place > New hierarchical Block, jednak dotyczy to raczej całych schematów (schemat nadrzędny + schematy podrzędne) niż pojedynczych elementów. UWAGA: w przypadku schematów hierarchicznych należy korzystać ze specjalnych połączeń między nimi (patrz Menu > Place > Connectors).

Natomiast schematy wielostronicowe uzyskać można wybierając Menu > Place > Multi_page.

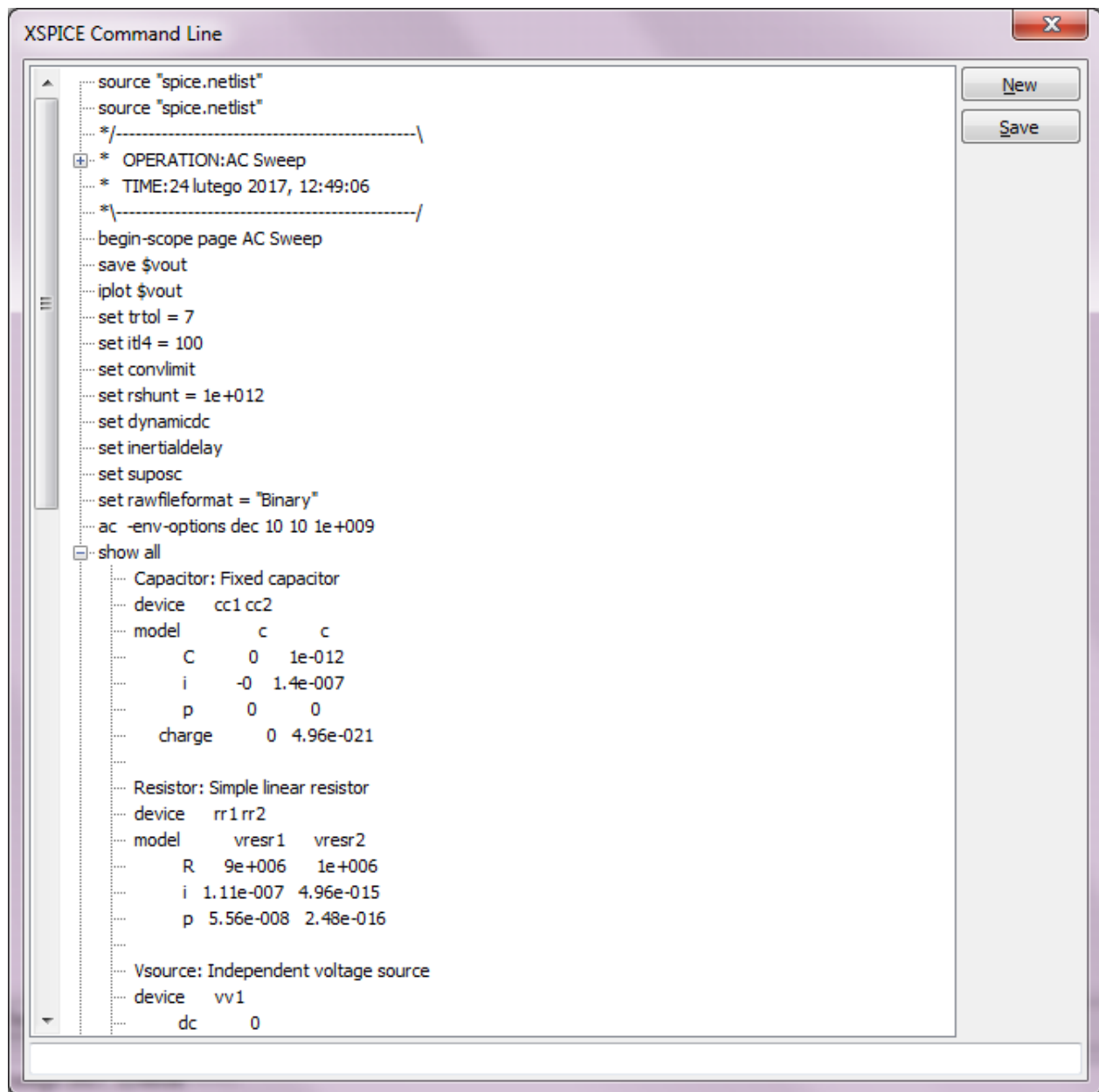
Wykorzystanie linii poleceń XSPICE

W celu wykorzystania interfejsu linii poleceń należy wybrać Menu > Simulate > XSPICE Command Line, następnie można wykonywać polecenia wpisując je w okienko na dole. Przydatne będzie wykorzystanie poleceń „help”, „help all”, „help commands”. Analizy można wykonać ładując uprzednio plik .cir, a następnie wykonując polecenia z wybranego pliku lub wpisując je oddzielnie w okno poleceń.

UWAGA: w tym przypadku polecenia wykonania symulacji wpisujemy bez kropki i małymi literami tj. zamiast „.DC” – „dc”. Ponadto należy zauważyć, że pewne polecenia są niedostępne np. .STEP (występuje mająca nieco inne znaczenie komenda step), PARAM, .TF, .SENS, .DISTO itd.



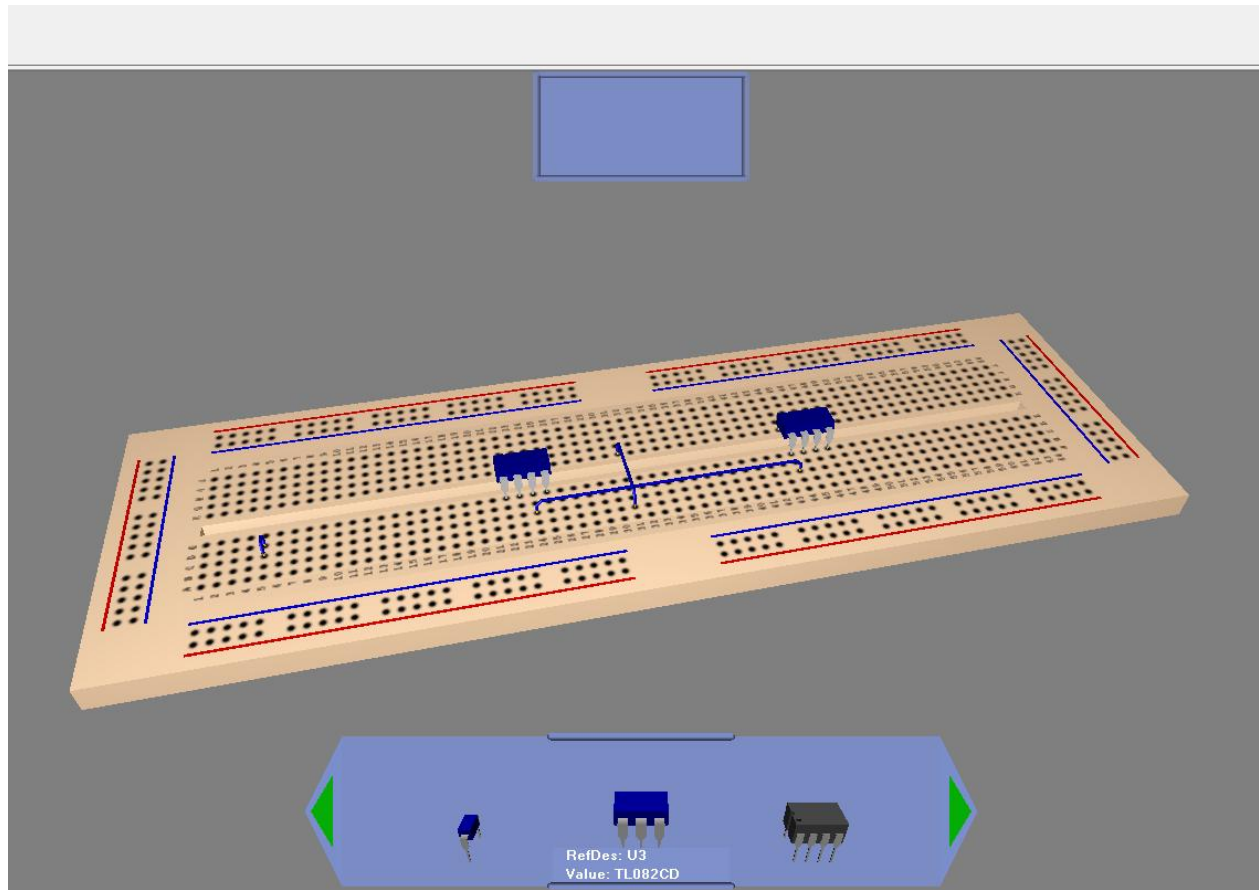
Przykładowy zestaw poleceń w oknie tego interfejsu można także uzyskać wywołując / wykonując dowolną symulację głównym menu symulacji programu Multisim – poniżej przykład takiego wydruku:



Widok breadboard

Po uaktywnieniu przyciskiem „View breadboard” otwiera się widok płytki prototypowej – a także elementów umieszczonych na schemacie elektrycznym (o ile miały zdefiniowane obudowy).

Funkcja „Makietowanie” zapewnia pomoc techniczną dla tych, którzy chcą, aby zilustrować rozmieszczanie elementów na płytce prototypowej, także widok 3D makiety wynikowej makiety – jak będzie wyglądała po zakończeniu budowy.

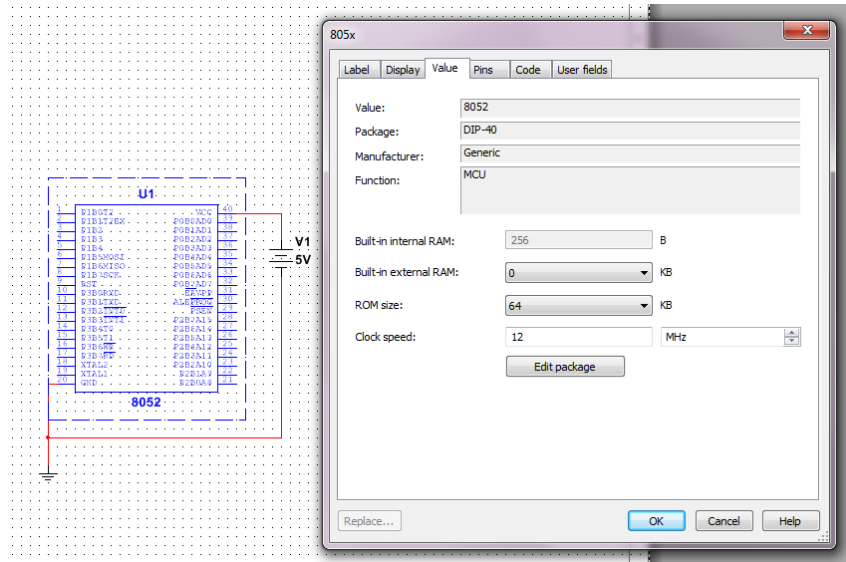


Symulacje z wykorzystaniem urządzeń wirtualnych i NI-myDAQ

Informacje o wykorzystaniu pakietu LabView, komponentów z bibliotek wbudowanych z grupy NI_Components oraz elementów pomiarowych z Menu > Simulate > Instruments – umieszczono w oddzielnej instrukcji.

Symulacje MCU

Multisim pozwala na wstawienie do schematu, a następnie wykonanie symulacji programowej mikrokontrolerów Intel 8051/52, PIC16F84 (dodatkowo zewnętrznej pamięci RAM i EPROM).



Symulacja programowa pozwala nie tylko na kompilację kodu (oraz podejrzenie kodu wynikowego), ale także wykonywanie go krok po kroku, zastawianie pułapek itd. (debugowanie), podgląd rejestrów, pamięci itd.

Source file debug listing: main.c

```

//LN# [ADDR ] Source Code
1 [-----] void main()
2 [00003] {
3 [-----] /* Insert your code here. */
4 [00005] long int i=0;
5 [0000E] long int c=0;
6 [-----]
7 [-----] for(;;)
8 [-----] {
9 [00017]     c++;
10 [0002F]    i++;
11 [00047]    if (i>=10) i=0;
12 [0006E]    }
13 [-----]
14 [00070] }

```

MCU Memory View

SFR

Name	Address	Hex	Bit-7	Bit-6	Bit-5	Bit-4	Bit-3	Bit-2	Bit-1	Bit-0
B	F0	00	0	0	0	0	0	0	0	0
ACC	E0	00	0	0	0	0	0	0	0	0

Rozwiązywanie problemów symulacji

Problemy w symulacji (w szczególności dotyczy obliczania punktu pracy lub symulacji DC).

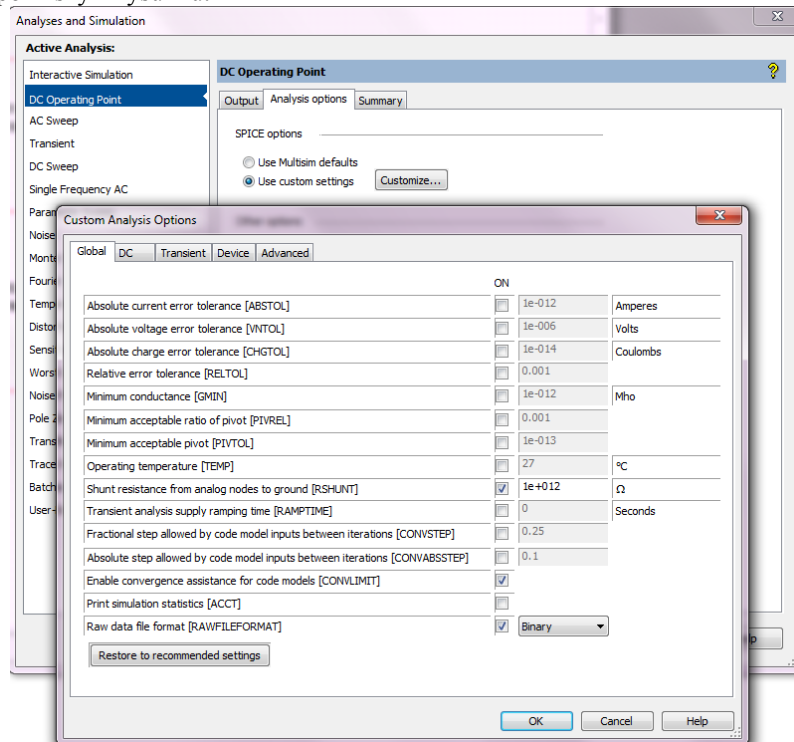
Należy sprawdzić topologię obwodu i połączenia. Upewnić się, że:

- a) Układ jest uziemiony.
- b) Układ jest prawidłowo podłączony, nie zawiera odłączonych podsieci lub części „bezpiecznych”.
- c) Nie mylić zera z literą O.
- d) Obwód zawiera węzeł 0 (Ground – grunt, ziemia, masa) i każdy węzeł w obwodzie ma ścieżki prądu stałego do ziemi.
- e) Upewnić się, że żadne odcinki obwodzie nie są całkowicie odizolowane od podłoża przez transformatory, kondensatory, itp.
- f) Kondensatory i źródła napięcia nie są równoległe.
- g) Cewki i źródła prądu nie są połączone szeregowo.
- h) Wszystkie urządzenia i źródła są ustawione na właściwe wartości (cokolwiek to nie znaczy: np. częsty błąd przecinka w ułamku zamiast kropki).
- i) Wszystkie współczynniki wzmocnienia w zależnych źródłach są poprawne.
- j) Własne modele / układy podrzędne zostały poprawnie wprowadzone.
- k) Sprawdzić wszystkie nazwy połączeń.
- l) Sprawdzić nazwę połączeń przypisanych do elementów uziemionych.
- m) Wszystkie podłączenia do ziemi muszą być oznaczone nazwą 0 (zero). Jeśli inaczej, usunąć ziemię i zastąpić ponownie symbolem z przybornika.
- n) Sprawdzić występowanie zduplikowanych nazw połączeń w obwodzie. Każda sieć musi mieć unikalną nazwę. Przypisać – w razie potrzeby poprzez dwukrotne kliknięcie w połączenie wskazujące – duplikat nazwy i nadać inną unikalną nazwę.
- o) Jeśli pracuje się z układami cyfrowymi – należy upewnić się, że zarówno ziemia, jak i obwody cyfrowe są pozostawione na obszarze roboczym.
- p) Skopiować i wkleić swój obwód do nowego pliku. Ponownie wykonać symulację obwodu.

Zaawansowane rozwiązywanie problemów symulacji – edycja opcji analiz

Jeśli problem nie zostanie rozwiązany, ustaw następujące parametry:

- Wybrać menu > Simulate > Analyses and Simulation > DC operating point, wybrać kartę Opcje Analysis - umożliwia używanie niestandardowych ustawień (kliknąć Dostosuj). Pojawia się okno Własne opcje analizy, jak pokazano na poniższym rysunku:



- Wybrać zakładkę globalną i wprowadzić następujące zmiany:
 - Zmniejszenie wartości **Shunt resistance from analog nodes to ground** [RSHUNT] przez współczynnik 100.
 - Zwiększenie minimalnej przewodności **Minimum Conductance** [Gmin] przez współczynnik 10. UWAGA: $G_{min} = 1 / R_p$, gdzie R_p jest najmniejszą pasożytniczą rezystancją w obwodzie.
- Wybrać kartę DC i wprowadzić następujące zmiany:
 - Ustawić limit iteracji **DC iteration limit** [ITL1] do wartości 500 lub więcej. Poprzez zwiększenie ITL1, dodatkowe iteracje będą wykorzystywane tylko wtedy, gdy są one potrzebne. ITL1 ustawiony na 1000 obejmuje około 90% obwodów.
 - Ustawić liczbę kroków źródeł **Number of source steps** [ITL6] do wartości 500.
 - Na schemacie, można również użyć polecenia .Nodeset i ustawić poziom napięcia DC, jeśli to możliwe.
- Dwukrotnie kliknąć przewód podłączony do obwodu, o którym mowa, zaznaczyć pole wyboru Use w zbiorze węzłów dla DC i wpisać napięcie stałe.

Po uruchomieniu obliczania punktu pracy DC dla obwodu zawierającego amperomierze i woltomierze (wskaźniki), jeżeli ich ustawienia wewnętrzne (rezystancja) zostały zmienione (od ich wartości domyślnych), wyniki symulacji wskazane przez punkt pracy DC będą nieprawidłowe. Usunąć amperomierze / woltomierze do rozwiązania problemu. Wyniki są poprawne, jeśli żadne zmiany nie zostały zastosowane do ustawień wewnętrznych amperomierzy / woltomierzy.

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

Cel: Zapoznanie ze sposobem wprowadzania schematów i wykonywania symulacji w programie Multisim oraz ze składnią języka SPICE, wykorzystanie elementów RCLEFD oraz instrukcji analiz: .DC, .AC, .TRAN, .TF, korzystanie z bibliotek - model diody

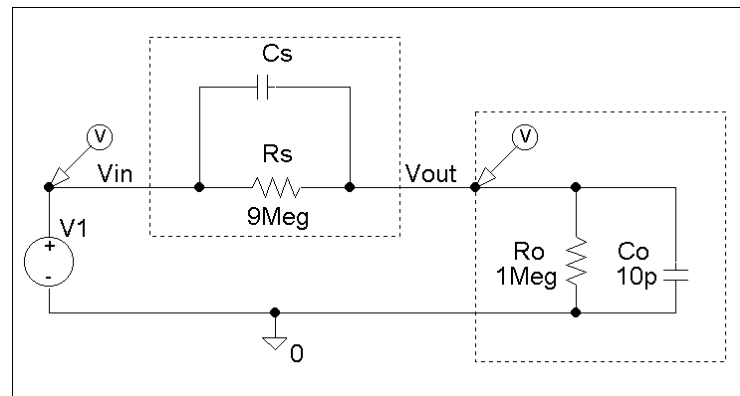
Wymagania: Wiedza na temat podstaw opisu obwodów w języku Spice (zgodnie z podaną literaturą podstawową). Wiedza z zakresu podstaw elektrotechniki - rozwiązywanie obwodów liniowych oraz nieliniowych (dioda półprzewodnikowa).

Literatura uzupełniająca:

Zadanie 1.1 (Tydzień 2) Obwód RC

Wprowadzić za pomocą programu Multisim do schematu 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 $C_s=0$ pF.

- ANALIZA DC:** Wykreślić napięcie V_{out} w funkcji napięcia V_1 zmieniającego się w zakresie -10 V do 10 V z krokiem 0,1 V. **Sprawozdanie:** 1) zamieścić odpowiedni wykres, 2) wyznaczyć graficznie wzmocnienie napięciowe układu $k_v=V_{out}/V_1$. **PODPOWIEDŹ:** w programie Multisim należy wykorzystać symulację „AC sweep”. Trzeba pamiętać nadaniu połączeniom nazw (podwójne kliknięcie w przewód) oraz o wybraniu w oknie ustawień symulacji > zakładka Output węzła, który ma być parametrem wyjściowym tej symulacji. Niezależne źródło napięcia stałego to w bibliotekach Multisima np. AC_VOLTAGE, DC_POWER.
- ANALIZA AC:** Wykonać analizę amplitudową i fazową w zakresie 10 Hz do 1000 MHz (101 punktów na dekadę) przyjmując $C_s=1$ pF i 10 pF. 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 „Grapher” w celu obliczenia częstotliwości granicznej i porównać z wartością wyznaczoną graficznie. **PODPOWIEDŹ:** w programie Multisim należy wykorzystać symulację „Parameter sweep”. Wybieramy element do analizy (kondensator C_s), punkty do przemiatania (w tym wypadku najlepiej lista z kolejnymi wartościami np.: 0, 1e-012, 1e-011) oraz typ analizy do przemiatania („AC Sweep”). Trzeba pamiętać o wybraniu w oknie ustawień symulacji > zakładka Output węzła, który ma być parametrem wyjściowym tej symulacji. Trzeba także dobrać odpowiednie niezależne źródło napięcia np. AC_VOLTAGE.
- 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 węźle 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 $C_s=1$ pF, 10 pF i na podstawie obliczeń Projektu I. **Sprawozdanie:** 1) zamieścić odpowiedni wykres analizy AC oraz TRAN jako dowód poprawności obliczeń. **PODPOWIEDŹ:** w programie Multisim należy wykorzystać symulację „Transient”. Trzeba pamiętać o wybraniu w oknie ustawień symulacji > zakładka Output węzła, który ma być parametrem wyjściowym tej symulacji, a także o dobraniu odpowiedniego niezależnego źródła napięcia np. PULSE_VOLTAGE.
- 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 .

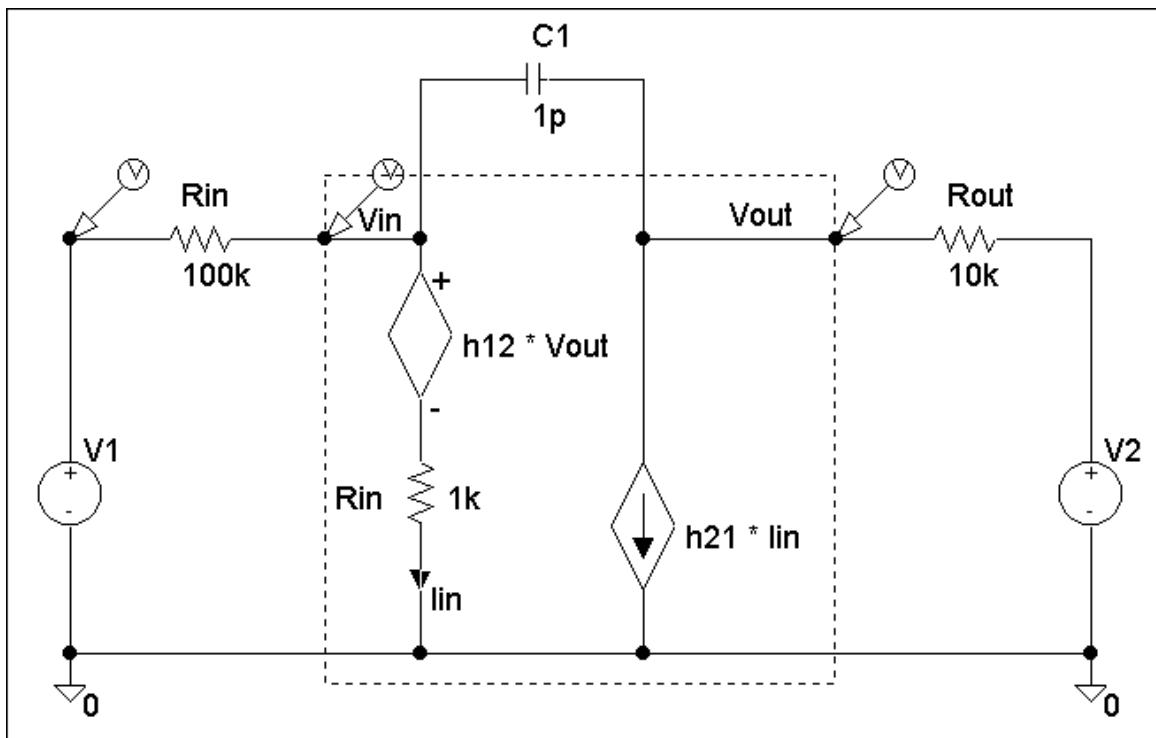


Rysunek 1.1.1

Zadanie 1.2a (Tydzień 3) Obwód RCEF

Wprowadzić za pomocą programu Multisim do schematu obwód pokazany na rysunku 1.2.1. Zgodnie z rysunkiem użyć źródła napięciowego sterowanego napięciem i prądowego sterowanego prądem. Na wstępie przyjąć $V2=10\text{ V}$, $h21=100$, $h12=0,01$, $C1=0$.

- f) ANALIZA DC: Wykreślić napięcie V_{out} w funkcji napięcia $V1$ zmieniającego się w zakresie -5 V do 10 V z krokiem $0,1\text{ V}$. **Sprawozdanie:** 1) zamieścić odpowiedni wykres, 2) wyznaczyć graficznie wzmocnienie napięciowe układu $k_v=V_{out}/V1$. **PODPÓWIEDŹ:** w programie Multisim należy na schemacie wykorzystać elementy z rodziny **CONTROLLED_VOLTAGE_SOURCES** i **CONTROLLED_CURRENT_SOURCES**. Pewnym utrudnieniem jest fakt, że element sterujący i sterowany są ze sobą graficznie sprzężone – utrudnia to rysowanie, dlatego można wykorzystać np. menu $\> \text{place} > \text{connectors} > \text{on-page connector}$.
- a) ANALIZA AC: Wykonać analizę amplitudową i fazową w zakresie 100 Hz do 100 MHz (101 punktów na dekadę) przyjmując $C1=1\text{ pF}$ i 10 pF . 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 Grapher w celu obliczenia częstotliwości granicznej i porównać z wyznaczoną graficznie częstotliwością graniczną
- b) 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
- c) PROJEKT II AC: Do węzłów V_{in} oraz zerowego dołączyć kondensator $C2$. Kondensator $C1=0\text{ pF}$. Dobrać pojemność kondensatora $C2$ tak, aby częstotliwość graniczna obwodu była taka sama jak dla $C1=10\text{ pF}$. 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

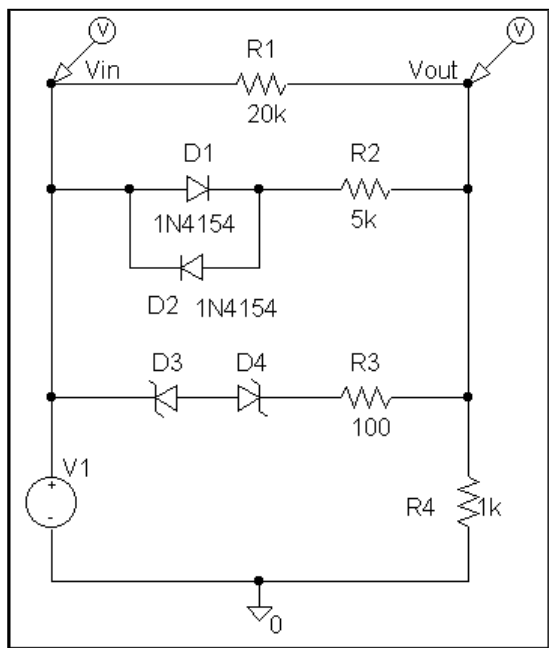
Wprowadzić za pomocą programu Multisim do schematu obwód pokazany na rysunku 1.2.1. Zgodnie z rysunkiem użyć źródła napięciowego sterowanego napięciem i prądowego sterowanego prądem. Na wstępie przyjąć $V_2=10\text{ V}$, $h_{21}=100$, $h_{12}=0,01$, $C_1=0\text{ pF}$.

- g) Wrażliwość: Z pomocą instrukcji analizy wrażliwości - SENS oszacować, które elementy i w jakim stopniu mają największy wpływ na zmianę napięcia V_{out} . **Sprawozdanie:** 1) zamieścić odpowiedni wydruk, 2) wyjaśnić przydatność analizy wrażliwości. **PODPOWIEDŹ:** w programie Multisim należy wykorzystać symulację „Sensitivity”. Analizowanym parametrem jest napięcie między węzłami wyjściowym V_{out} oraz węzłem zerowym. W zakładce „outputs” - aby mieć dostęp do wszystkich parametrów obwodu należy wcisnąć przycisk „Filter unselected variables” wybrać odpowiednie opcje. Wynik zostanie pokazany w oknie programu Grapher w postaci tabeli.
- a) 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 węźle V_{in} i na rezystancję wyjściową widzianą w węźle V_{out} ma zmiana parametru h_{21} i h_{12} ? Wyjaśnić zachowanie układu dla h_{12} dążącego do 0 oraz \pm nieskończoności. **Wskazówka:** obwód należy zmodyfikować. **Sprawozdanie:** 1) zamieścić odpowiedni wydruk, 2) obliczenia wykonane z pomocą funkcji przenoszenia zweryfikować obliczeniami własnymi (wyprowadzić odpowiednie wzory, wykonać obliczenia). **PODPOWIEDŹ:** w programie Multisim należy wykorzystać symulację „Transfer function”. Źródłem wejściowym – źródło V_1 . Analizowanym parametrem jest np. napięcie między węzłami wyjściowym V_{out} oraz węzłem zerowym (i nie tylko). Wynik zostanie pokazany w oknie programu Grapher w postaci tabeli. **UWAGA:** nie wszystkie podane w instrukcji powyżej parametry można tym sposobem obliczyć!
- b) 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.

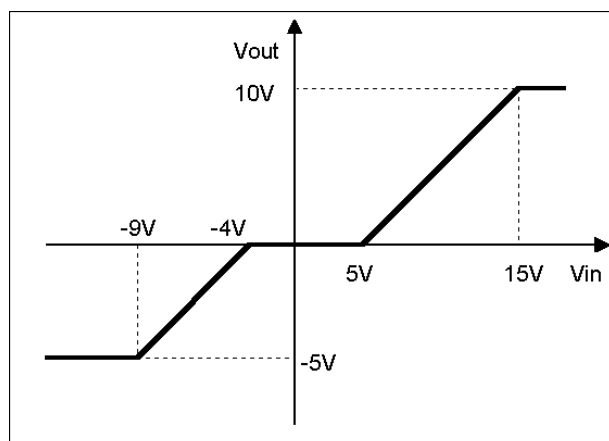
Zadanie 1.3 (Tydzień 5) Obwód RD

Wprowadzić za pomocą programu Multisim do schematu obwód pokazany na rysunku 1.3.1.

- ANALIZA DC:** Wykreślić napięcie V_{out} w funkcji napięcia V_{in} zmieniającego się w zakresie -5 V do 5 V z krokiem 0,05 V. 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. **UWAGA:** dla D3 i D4 należy użyć diod Zenera serii BZX84 (podserie A/B/C odpowiednio 1%, 2%, 5% tolerancji wykonania): BZX84-A3V3.
- 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. **PODPOWIEDŹ:** patrz dodatek „Typoszereg E”.
- 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 użyć diod Zenera serii BZX84 (podserie A/B/C odpowiednio 1%, 2%, 5% tolerancji wykonania).
- PROJEKT III:** 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 1N4148 (lub zbudować własny model w oparciu o domyślne parametry diody półprzewodnikowej), aby pełnił on funkcję stabilizatora o wymaganych parametrach napięcia przebicia. **PODPOWIEDŹ:** patrz w opisie programu Multisim – część poświęcona edycji parametrów modeli elementów. Alternatywnie można wykorzystać element wbudowany z biblioteki Multisim o nazwie **DIODE[DIODES_VIRTUAL]** lub **DIODE_RATED** (o możliwości definicji napięcia wstecznego breakdown). **UWAGA:** aby zmieniać parametry modelu należy najpierw we właściwościach diody, w oknie „value” wejść w „Edit model”.



Rysunek 1.3.1

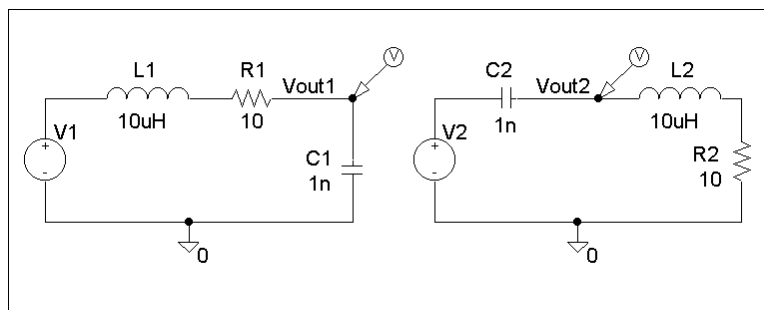


Rysunek 1.3.2

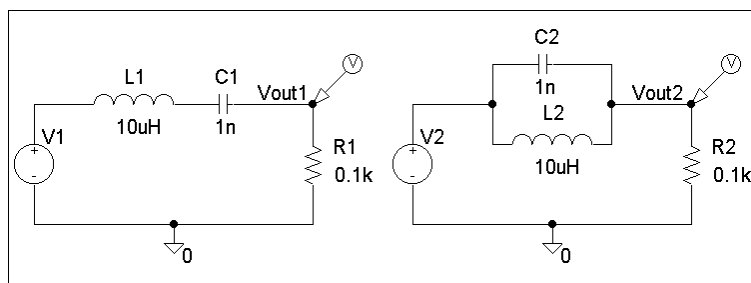
Zadanie 1.4 (Tydzień 6) Obwody RLC

Wprowadzić za pomocą programu Multisim do schematu obwody pokazane na rysunku 1.4.1a i 1.4.1b.

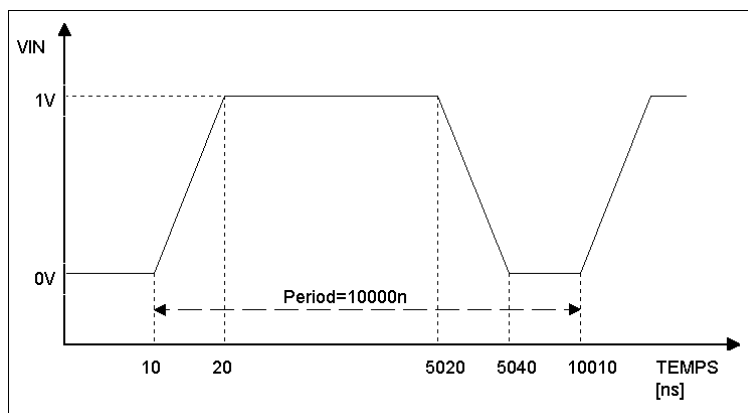
- ANALIZA AC: Wykreślić charakterystyki amplitudowe i fazowe obwodów w zakresie 100 Hz do 1000 MHz (101 punktów na dekadę). **Sprawozdanie:** zamieścić odpowiedni wykres
- ANALIZA TRAN: Wykonać analizę wielkosygnałową o wymuszeniu zgodnym z rysunkiem 1.4.2. Posługując się uzyskanymi wykresami wykazać 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.



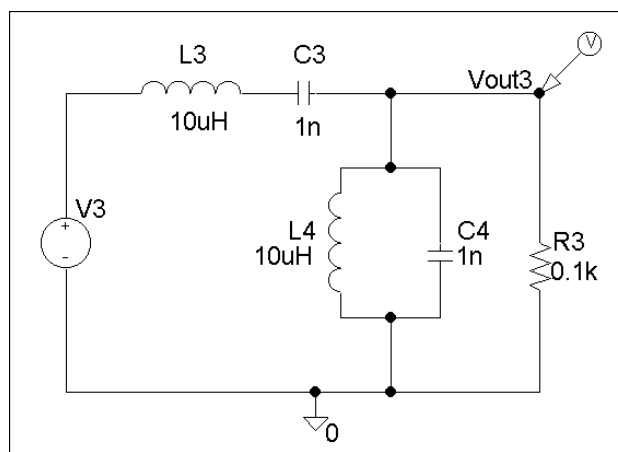
Rysunek 1.4.1a



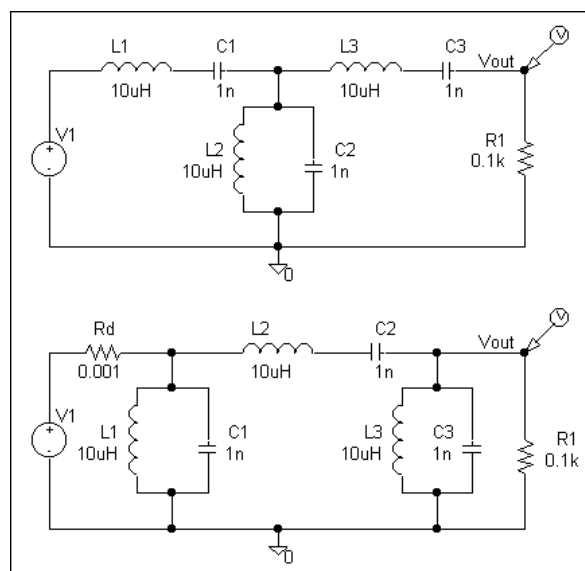
Rysunek 1.4.1b



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

Wprowadzić za pomocą programu Multisim do schematu 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: **PODPÓWIEDŹ:** jako modele w pełni konfigurowalne można wykorzystać elementy z wbudowanej biblioteki o symbolach JFET_N i JFET_P. Można też korzystać z modeli z arsenku galu GaAsFET_N, GaAsFET_P. UWAGA: aby zmieniać podane niżej parametry modelu należy najpierw we właściwościach tranzystora, w zakładce „value” (zawiera parametry obwodowe i początkowe wpływające na symulację) wejść w „Edit model” (pełna lista parametrów modelu).

1) Model 1

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

2) Model 2 (model wbudowany tranzystora JFET)

```
.MODEL XJDEF NJF
```

3) Tranzystor z wbudowanej biblioteki elementów np.: BF245 (do wyboru jest wersja: A, B i C – można porównać charakterystyki między nimi), BF256 (A, B), 2N3458, J108-113 i wersje P o oznaczeniach J174-177.

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

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

Rysunek 2.1.1 przedstawia układ potrzebny do wykonania symulacji.

Sprawozdanie: zamieścić odpowiedni wykres. **PODPÓWIEDŹ:** w programie Multisim należy wykorzystać analizę „DC sweep” – ale z zaznaczeniem opcji „Use Source 2”. Należy dokładnie się zastanowić nad kolejnością przemiatania obydwu źródeł, a także nad wykorzystywanym parametrem wyjściowym (i jego zwrotem, np. kierunkiem przepływu prądu).

- b) Tranzystor MOS-FET. Charakterystyki wyjściowe tranzystora MOS-FET dla różnych wartości parametrów modelu. **PODPÓWIEDŹ:** jako modele w pełni konfigurowalne można wykorzystać elementy z wbudowanej biblioteki o symbolach MOS_N i MOS_P. Wersje o 4 wyprowadzeniach (podłoże) są oznaczone MOS_N_4T i MOS_P_4T. Modele tranzystorów MOS zubożane mają w nazwie końcówkę „_DEP”. UWAGA: aby zmieniać podane niżej parametry modelu należy najpierw we właściwościach tranzystora, w oknie „value” wejść w „Edit model” i w pierwszej kolejności zmodyfikować odpowiednio poziom modelu LEVEL.

1) Model MOD1:

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

2) 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
```

3) Model MOD3:

```
.MODEL MOD3 NMOS
```

4) Tranzystor z wbudowanej biblioteki elementów np.: 2N7000, 2N7002, BS170, BSS138 i typu P BSH202, BSS84.

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

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

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 różnych wartości parametrów modelu: **PODPowiedź:** jako modele w pełni konfigurowalne można wykorzystać elementy z wbudowanej biblioteki o symbolach BJT_NPN i BJT_PNP (są też dostępne inne wersje np. z wyprowadzonym podłożem BJT_NPN_4T i BJT_PNP_4T). **UWAGA:** aby zmieniać podane niżej parametry modelu należy najpierw we właściwościach tranzystora, w oknie „value” wejść w „Edit model”.

1) 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

2) 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

3) Model MOD3

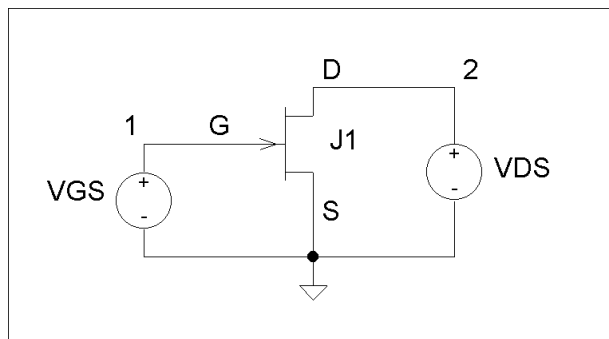
.MODEL MOD3 NPN

4) Tranzystor z wbudowanej biblioteki elementów np.: 2N3904, 2N3906, 2N2222, BC107-109, BC546-549 oraz PNP np. BC177-179, BC556-559.

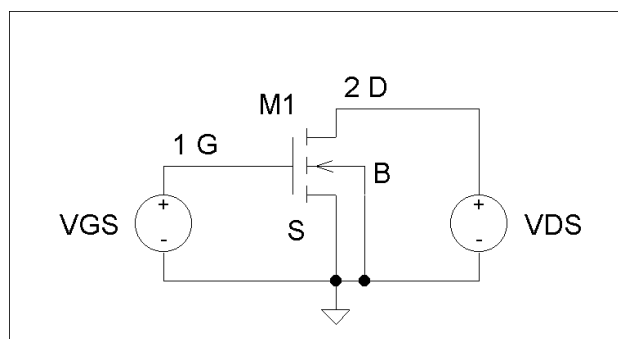
Rysunek 2.1.3 przedstawia układ potrzebny do wykonania symulacji.

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

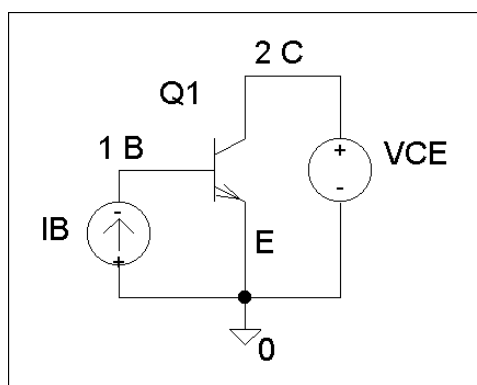
Sprawozdanie: zamieścić odpowiedni wykres



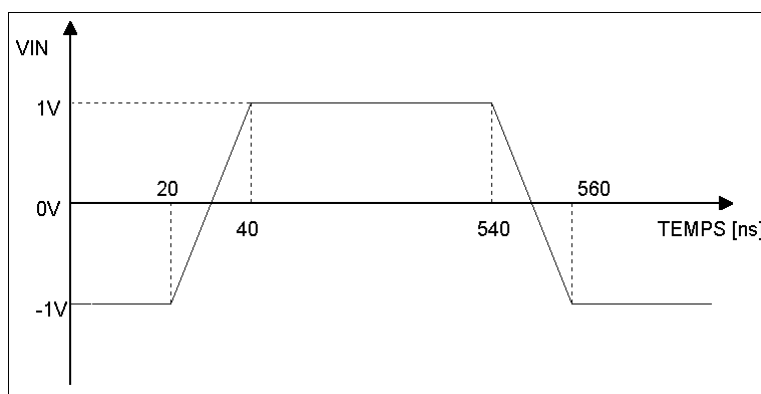
Rysunek 2.1.1



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:

a) `.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 SPICE

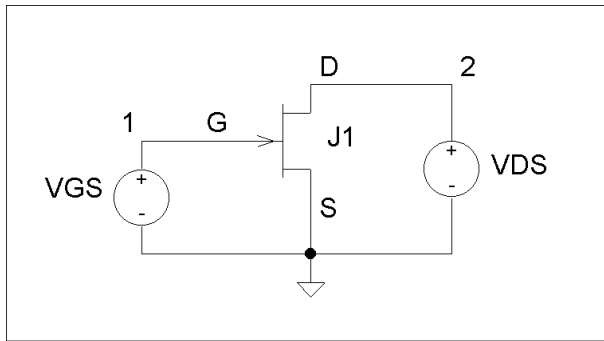
b) `.MODEL XJDEF NJF`

c) Wykorzystać tranzystory z wbudowanej biblioteki elementów jak w zadaniu 2.1

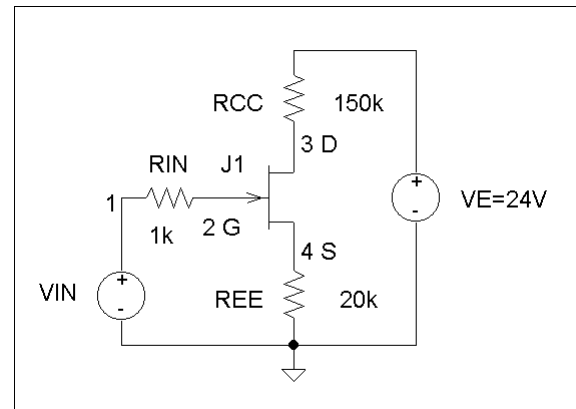
Napięcie V_{DS} zmienia się od 0 do 25 V z krokiem 0,5 V.

Napięcie V_{GS} zmienia się od -2 do 1 V z krokiem 1,0 V.

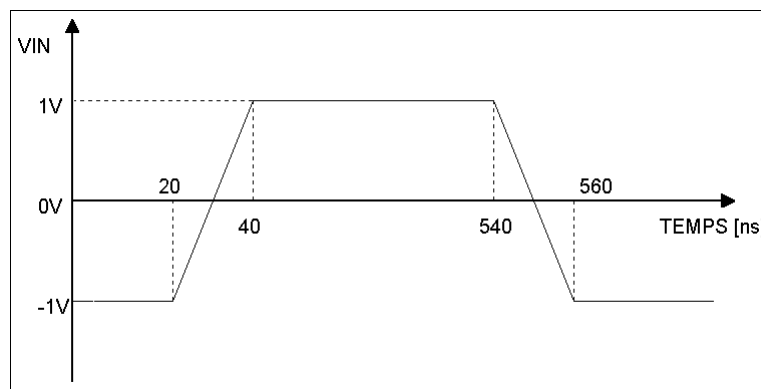
Rysunek 2.1.1 przedstawia układ potrzebny do wykonania symulacji.



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.

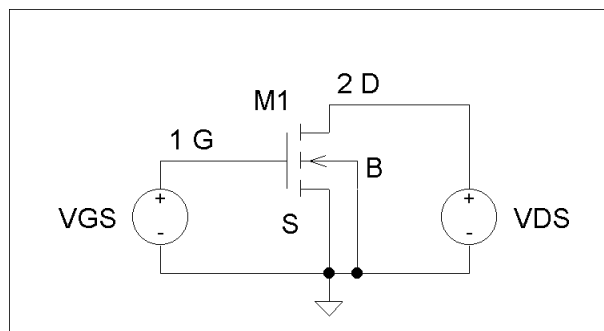
- ANALIZA DC: Wykreślić na wspólnym rysunku charakterystyki przejściowe obu tranzystorów JFET (napięcie $V(3)$ w funkcji napięcia V_{IN}). Napięcie V_{IN} zmienia się od $-0,5$ V do $10,0$ V z krokiem $0,2$ V.
- ANALIZA AC: Wykonać analizę AC od 100 Hz do 1000 MHz w skali logarytmicznej z 101 punktami 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 $1,0E-6$ s z krokiem $0,02E-6$ s 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
```
- Wykorzystać tranzystory z wbudowanej biblioteki elementów jak w zadaniu 2.1

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

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

2.3.2. Analiza układu zawierającego tranzystor MOS-FET.

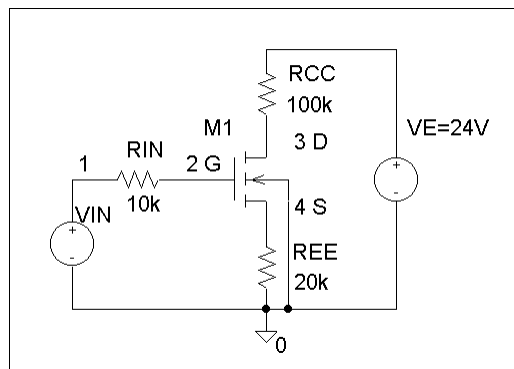
Na rysunku 2.3.2.1 przedstawiono układ elektroniczny zawierający tranzystor MOSFET. Wykonaj następujące symulacje.

- ANALIZA DC: Wykreślić na wspólnym rysunku charakterystyki przejściowe trzech tranzystorów MOS (napięcie $V(3)$ w funkcji napięcia VIN). Napięcie VIN zmienia się od 5,0 V do 5,0 V z krokiem 0,2 V.
- 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 100 Hz do 1000 MHz 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) powinny 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
```

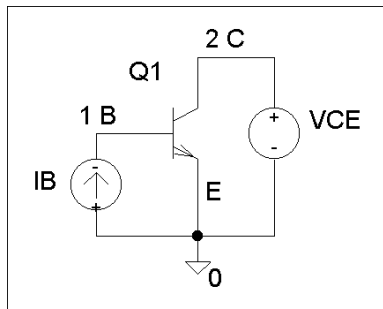
b) model Q2N5109

```
.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
```

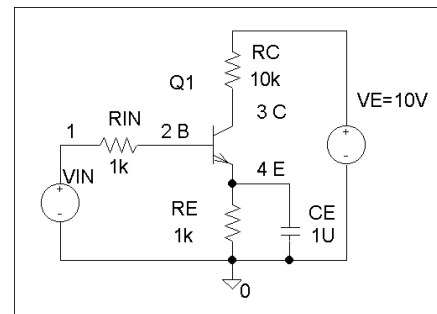
c) model MOD3

d) Wykorzystać tranzystory z wbudowanej biblioteki elementów jak w zadaniu 2.1

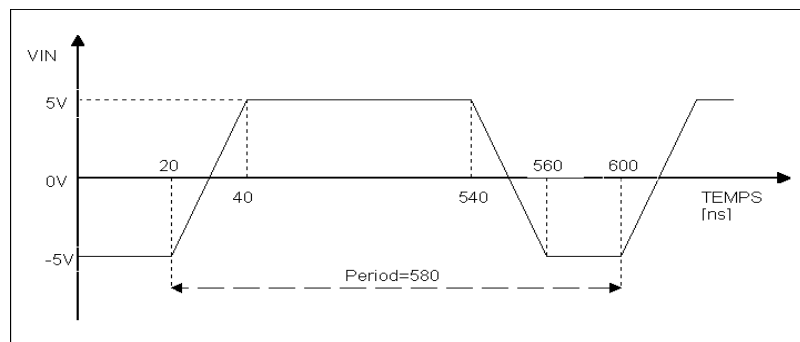
```
.MODEL MOD3 NPN
```



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 0 V do 10,0 V z krokiem 0,1 V. Wyjaśnić kształt uzyskanych przebiegów ze szczególnym uwzględnieniem przyczyn występowania załamań charakterystyki.
- ANALIZA AC:** Wykonać analizę AC od 10 Hz do 10000 MegHz w skali logarytmicznej z 101 punktami na dekadę. Zmien wartości elementów i / lub dodaj odpowiednie elementy tak, by pasmo przenoszenia wynosiło 10 kHz – 20 kHz, natomiast wzmacnienie napięciowe 10 (lub zgodnie z poleceniem prowadzącego).

- c) ANALIZA TR: Wykonać analizę TR wykorzystując parametry impulsu wejściowego VIN zgodnie z rysunkiem 2.4.2.2. Wykreślić następujące przebiegi:
- moc chwilowa tracona w tranzystorze oraz uśredniona za kilka okresów (np. 3-10)
 - moc chwilowa tracona w rezystorze RC oraz uśredniona za kilka okresów (np. 3-10)
- 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. $V(4) < 5\text{ V} < V(5)$.

```
.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.

PROJEKT I: Dodatkowo wygenerować w przypadku schematu 2.4.2.1 z wykorzystaniem Menu > Tools > Circuit wizards > BJT Common Emitter Amplifier Wizard wzmacniacz o zadanych parametrach i zweryfikować jego działanie.

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

Wprowadzić za pomocą programu Multisim do schematu 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} 1 k Ω , R_{Bx} 10 k Ω . Napięcia zasilające +15 V i -15 V. 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. **PODPOWIEDŹ: do wykonania wzmacniacza z rysunku 3.1.2. wykorzystać można np. obwód hierarchiczny, podobwód (patrz „Własne komponenty, podobwody i schematy hierarchiczne”). Można także wykorzystać wzmacniacz operacyjny CMOS z Ćwiczenia 6, zadanie 6.2.**

- 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 10 Hz do 1000 MHz 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 1 V. Zmieniając wartość jednego z wybranych elementów określić jego wpływ na otrzymane charakterystyki

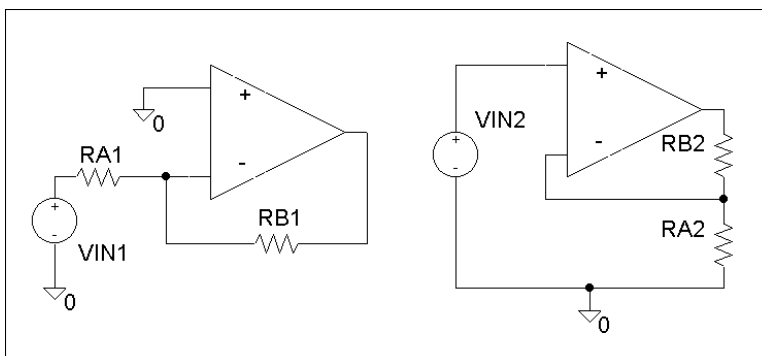
Sprawozdanie: zamieścić odpowiedni wykres

- d) PROJEKT I: zbadać czy można wykonać układ wzmacniacza odwracającego / nieodwracającego o wzmocnieniu 10000 i pasmie przenoszenia 100 kHz

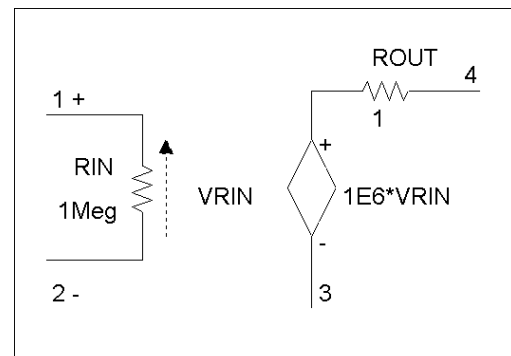
- e) PROJEKT II: wykorzystać nowoczesne wzmacniacze operacyjne z wbudowanych bibliotek Multisima: np. AD8014 (400 MHz), AD8001 (jak podłączyć super szybki wzmacniacz 800 MHz ze sprzężeniem prądowym?). Porównać z jednym z pierwszych komercyjnych wzmacniaczy operacyjnych dostępnych komercyjnie, a jeszcze występującym w bibliotekach wbudowanych uA741.

- f) **PROJEKT III:** Dodatkowo wygenerować z wykorzystaniem Menu > Tools > Circuit wizards > Opamp wizard wzmacniacz o strukturze i zadanych przez prowadzącego parametrach, i zweryfikować jego działanie.

Sprawozdanie: zamieścić odpowiednie uzasadnienie



Rysunek 3.1.1



Rysunek 3.1.2

Zadanie 3.2 (Tydzień 10) Obwody ze wzmacniaczami operacyjnymi

Wprowadzić za pomocą programu Multisim do schematu 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 1 k Ω , C_A i C_B 1 μ F. Napięcia zasilające +15 V i -15 V. Zastosować jako wzmacniacze makromodele wzmacniaczy operacyjnych podane w załączniku (lub można wykorzystać gotowe biblioteki): TL082, LF357 oraz model wzmacniacza operacyjnego z rysunku 3.1.2 (można także wykorzystać wzmacniacz operacyjny CMOS z Ćwiczenia 6, zadanie 6.2). W Multisimie dostępne są także nowoczesne wzmacniacze operacyjne z wbudowanych bibliotek: np. AD8014 (400 MHz), AD8001 (super szybki wzmacniacz 800 MHz ze sprzężeniem prądowym).

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

Sprawozdanie: zamieścić odpowiedni wykres

- b) ANALIZA TR: Wykonać analizę TR 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

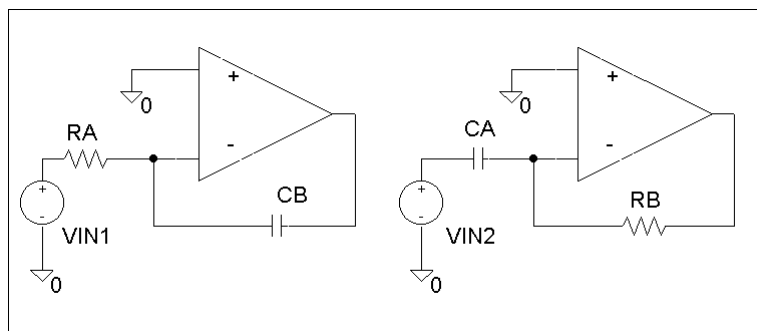
- c) PROJEKT I: Zgodnie z rysunkiem 3.2.1 zaprojektować filtr górno- lub dolnoprzepustowy o częstotliwości granicznej podanej przez prowadzącego. Należy użyć modeli wzmacniaczy operacyjnych TL082 i LF357. Zastosować analizę AC w zakresie 0,1 Hz do 100 MegHz oraz analizę wielkosygnałową.

- d) PROJEKT II: wykorzystać nowoczesne wzmacniacze operacyjne z wbudowanych bibliotek Multisima: np. AD8014 (400 MHz), AD8001 (jak podłączać super szybki wzmacniacz 800 MHz ze sprzężeniem prądowym?). Porównać z jednym z pierwszych komercyjnych wzmacniaczy operacyjnych dostępnych komercyjnie, a jeszcze występującym w bibliotekach wbudowanych uA741.

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.

Zastosować jako wzmacniacze makromodele wzmacniaczy operacyjnych podane w załączniku (lub można wykorzystać gotowe biblioteki): TL082, LF357 oraz model wzmacniacza operacyjnego z rysunku 3.1.2 (można także wykorzystać wzmacniacz operacyjny CMOS z Ćwiczenia 6, zadanie 6.2). W Multisimie dostępne są także nowoczesne wzmacniacze operacyjne z wbudowanych bibliotek: np. AD8014 (400 MHz), AD8001 (super szybki wzmacniacz 800 MHz ze sprzężeniem prądowym).

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

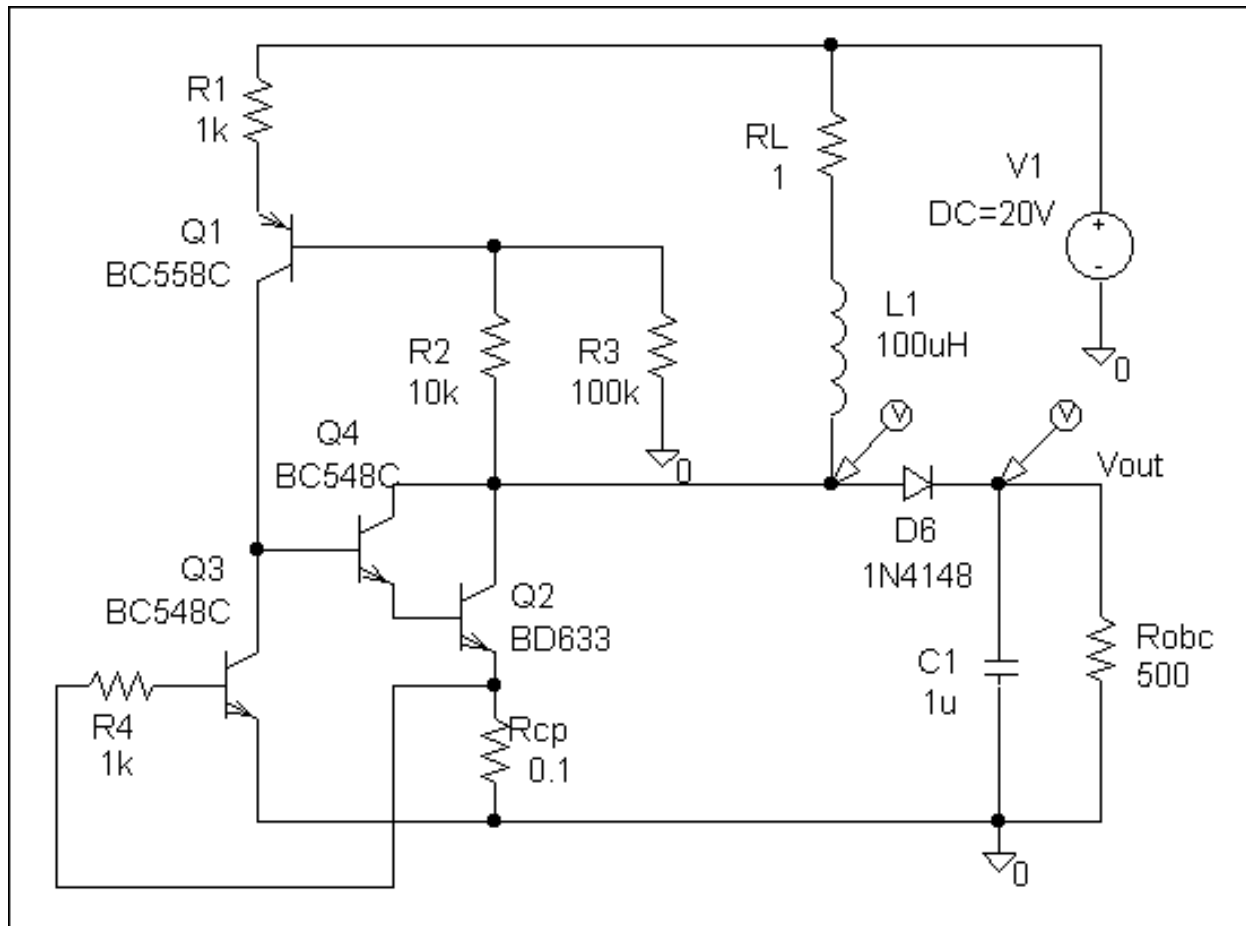
PROJEKT I: Dodatkowo wygenerować z wykorzystaniem Menu > Tools > Circuit wizards > Filter wizard filtr o zadanych parametrach i zweryfikować jego działanie.

Sprawozdanie: opisać, w jaki sposób dobrano wartości elementów filtru (jak zostały określone współczynniki filtru), zamieścić niezbędne obliczenia, załączyć wykres / przebieg udowadniający otrzymanie zadanej częstotliwości granicznej i rzędu filtru. Na podstawie charakterystyki amplitudowo - fazowej oraz odpowiedzi jednostkowej należy określić wartości podstawowych parametrów opisujących właściwości otrzymanych filtrów.

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. 100 us; udowodnić, czy parametry czasowe tranzystora Q4 i Q2 oraz diody D1 są w zadanych warunkach pracy przetwornicy wystarczające
- zmienić napięcie zasilania na 5 V i 40 V; określić na podstawie analizy DC minimalne napięcie startu układu
- zmienić obciążenie na 50 Ω i 500 k Ω
- zmienić rezystancję dławika na 0,2 i 20 Ω
- 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

PODPOWIEDŹ: W programie Multisim należy użyć tranzystorów BC548B, BC558A. Zamiast BD633 (jego model podano niżej) można użyć starszego typu BD241C lub nowszego BDP953.

WSKAZÓWKA: Samowzbudna przetwornica dławikowa wymaga zaburzenia pozwalającego na rozpoczęcie drgań. Zwykle dzieje się to podczas załączania zasilania. W warunkach idealnych jak na schemacie – czyli zasilana napięciem stałym – nie daje gwarancji wzbudzenia. W takim przypadku trzeba użyć źródła zasilania STEP_VOLTAGE (po starcie symulacji napięcie zasilania opóźnia się, a potem wzrasta zgodnie z zdanymi parametrami).

UWAGA: aby analiza Transient została przeprowadzona prawidłowo – należy koniecznie zmodyfikować Maximum time step i Initial time step (na krótsze odstępy czasu niż domyślnie wbudowane, np. można podać 1e-7).

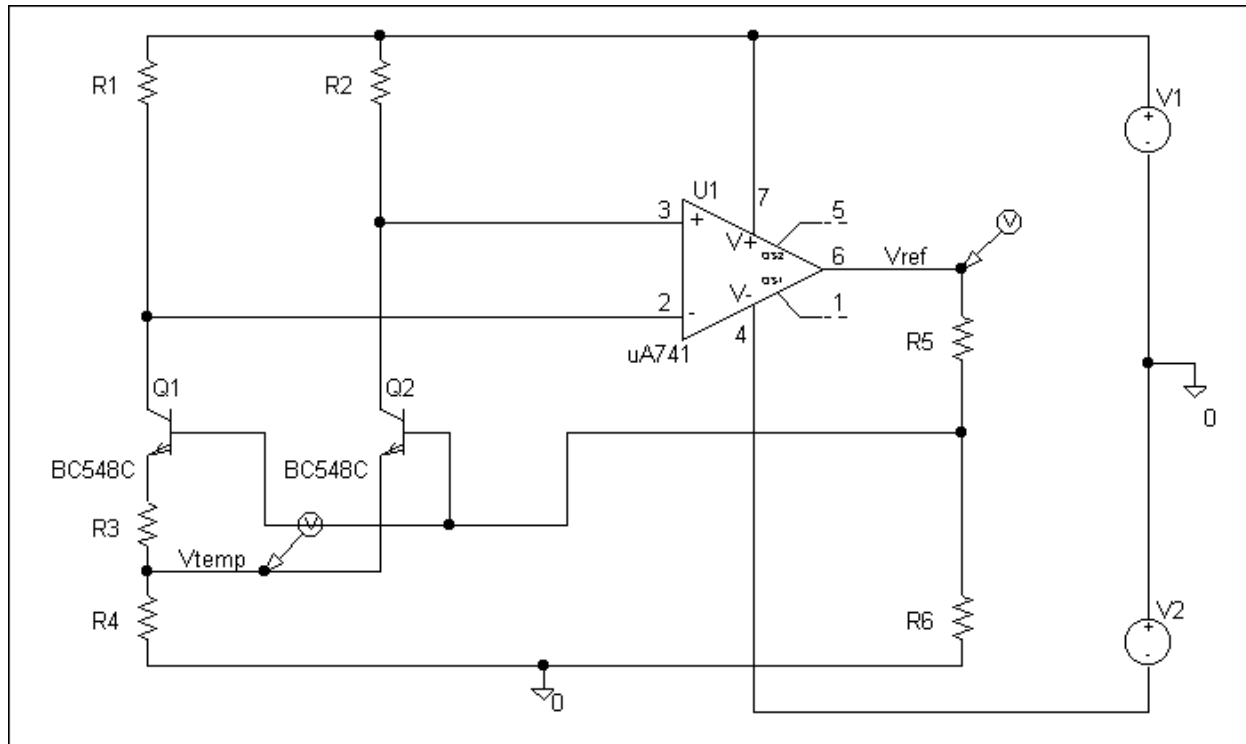
```
*.model BD633 ako:NSC_4F NPN() ; case TO-220
.MODEL BD633 NPN(Is=2.447p Xti=3 Eg=1.11 Vaf=100 Bf=208.2 Ise=70.69p
+ Ne=1.565 Ikf=.9743 Nk=.6134 Xtb=1.5 Br=12.59 Isc=11.68n
+ Nc=1.835 Ikr=3.86 Rc=.4685 Cjc=142p Mjc=.4353 Vjc=.75 Fc=.5
+ Cje=188.5p Mje=.4878 Vje=.75 Tr=194.2n Tf=19.85n Itf=164.1
+ 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=15 V
R2=7356	R4=531	R6=1e6	V2=15 V



Rysunek P3.3.1

Określić współczynnik stabilizacji napięcia odniesienia **Uref** 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 **Utemp** w funkcji temperatury (zakres temperatur jak wyżej).

PODPOWIEDŹ: W programie Multisim należy najpierw zdefiniować analizę DC Operating Point, a następnie w analizie Temperature Sweep zdefiniować zakres temperatur oraz w More Options podać analizę do przemiatania: „DC Operating Point”.

Zmienić współczynnik temperaturowy napięcia Utemp 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 $R_5=0$):

$$I_{C2} = n * I_{C1}$$

a zarazem stosunkiem rezystancji R_1 i R_2 :

$$R_2 = \frac{1}{n} R_1$$

Wyprowadzić wzory:

$$U_{TEMP} = k_u * U_T$$

oraz

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

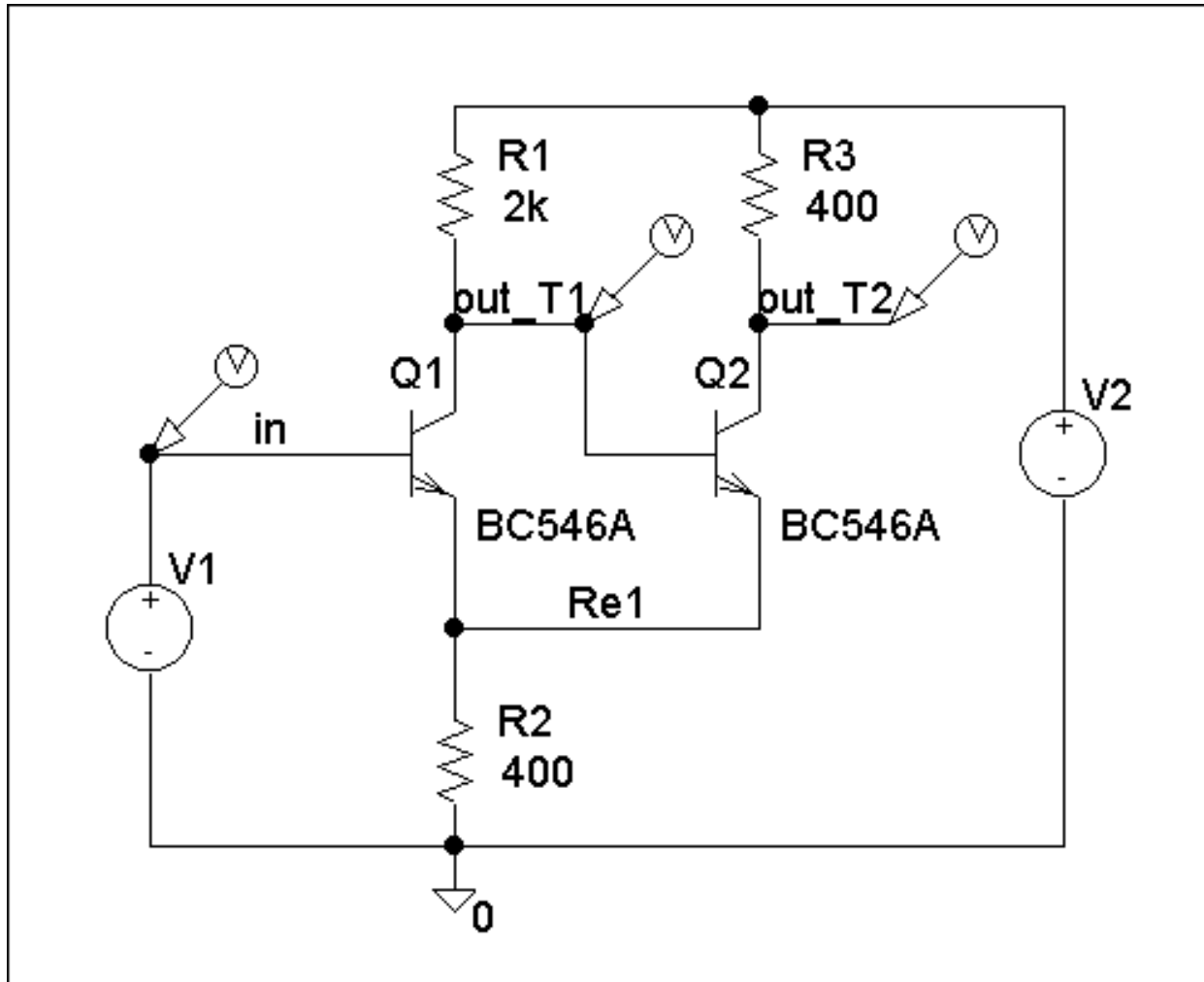
gdzie U_G jest napięciem przerwy energetycznej.

Jaki ważny warunek powinny spełniać tranzystory pracujące w układzie?

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

Przebadac układ przerzutnika Schmitta z rysunku p3.4.1. Należy porównac informacje uzyskane za pomoca analizy DC, TR i MC.

PODPOWIEDŹ: Oczywiście w tym wypadku narzucające się jest wykorzystanie analizy DC Sweep. Jednak przerzutnik Schmitta z zasady działania jest asymetryczny (dla wartości wejściowych narastających i opadających) – trzeba by było wykonać dwie analizy DC Sweep (Multisim nie dopuszcza analizy z malejącym parametrem). Dlatego, aby na jednym wykresie uzyskać pełny przebieg działania układu, należy rozważyć wykorzystanie np. analizy Transient ze źródłem np. PULSE_VOLTAGE.



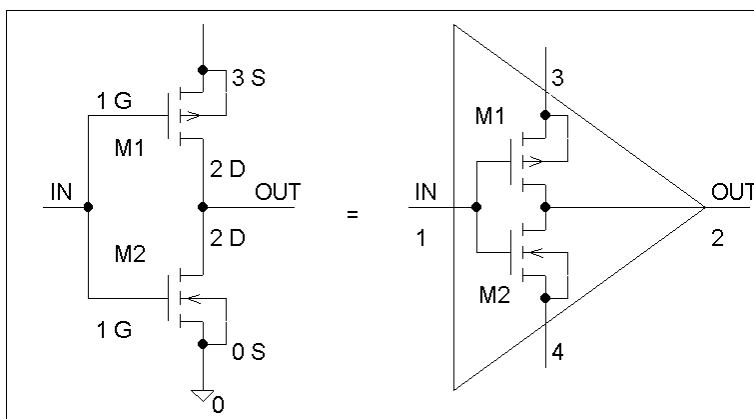
Rysunek P3.4.1

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 5 V. Wykonać jego symulację:

- ANALIZA DC: dla VIN zmieniającego się od 0 do 5 V z krokiem 0,1 V. 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

PODPOWIEDŹ: jako modele w pełni konfigurowalne można wykorzystać elementy z wbudowanej biblioteki Multisim o symbolach MOS_N i MOS_P. Wersje o 4 wyprowadzeniach (podłoże) są oznaczone MOS_N_4T i MOS_P_4T. **UWAGA:** aby zmieniać podane niżej parametry modelu należy najpierw we właściwościach tranzystora, w oknie „value” wejść w „Edit model” i w pierwszej kolejności zmodyfikować odpowiednio poziom modelu LEVEL.

PODOBWODY: w tym przypadku należy rozważyć wykorzystanie podobwodu: subcircuit (schemat hierarchiczny tutaj nie jest najlepszym rozwiązaniem). Podobwód edytuje się na oddzielnym schemacie. Warto także rozważyć „Edit symbol/title block” (kliknięcie w podobwód, prawy klawisz), który otwiera Symbol editor – tam można dostosować kształty symbolu i właściwości wyprowadzeń.

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

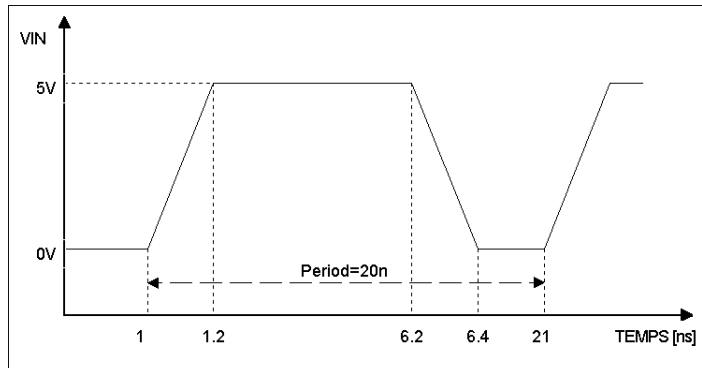
+JS=1E-16 TOX=3.5E-8 NSUB=6.9E15
+XJ=0.6E-6 LD=0.47E-6
+UO=255 UCRIT=5.8E4 UEXP=0.42

Uwaga: do symulacji układów CMOS należy zastosować następujące opcje (w Multisim nie jest to konieczne):

.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=4 U i L=4 U dla NMOS i PMOS.



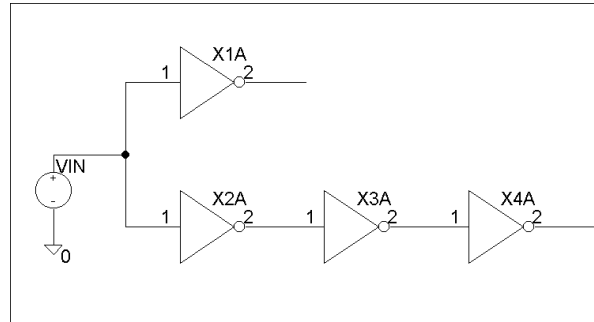
Rysunek 4.1.2

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

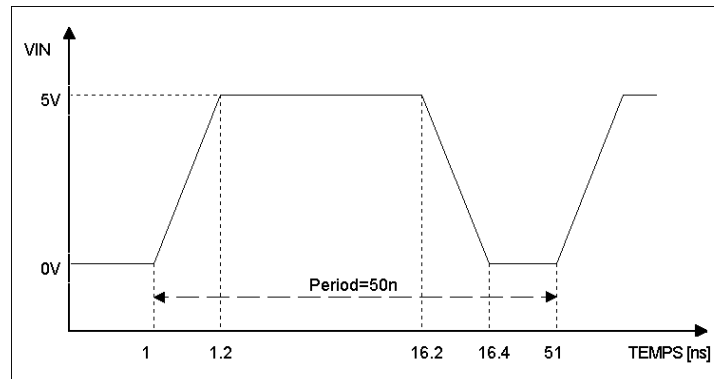
Wykonać symulację układu z rysunku 4.2.1. Wymiary tranzystorów są jednakowe dla wszystkich makromodeli: NMOS: $W=4\text{ U}$, $L=4\text{ U}$, PMOS: $W=4\text{ U}$, $L=4\text{ U}$. Wykonać analizę TR stosując sygnał z rysunku 4.2.2. Napięcie VDD wynosi 5 V.

- 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

PODOBWODY: należy rozważyć wykorzystanie podobowdu / subcircuit z poprzedniego zadania.



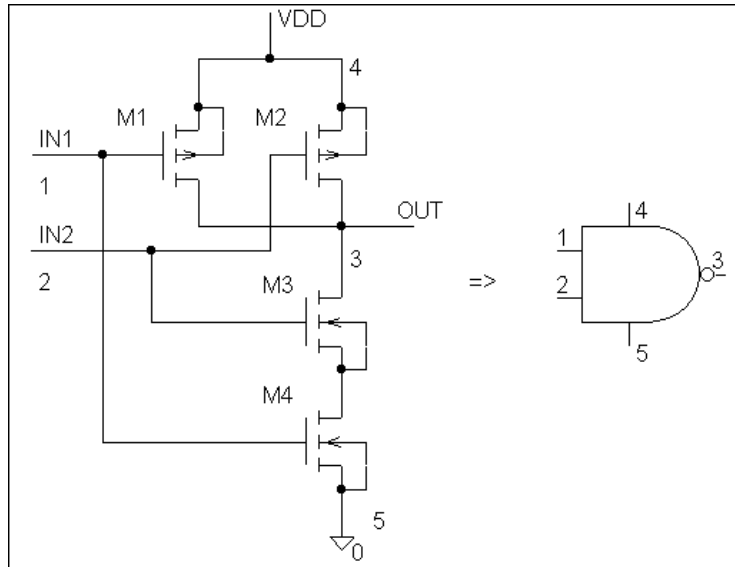
Rysunek 4.2.1



Rysunek 4.2.2

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

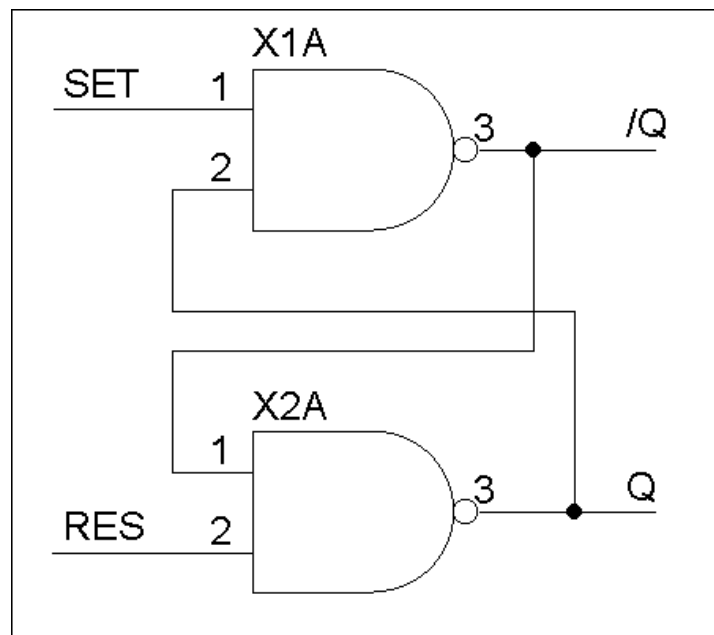
Wykonać makromodel bramki NAND z rysunku 4.3.1 (NMOS i PMOS: $W=4\text{ U}$, $L=4\text{ U}$). Wykonać testy bramki i określić maksymalną częstotliwość jej pracy ($V_{DD}=5\text{ V}$).



Rysunek 4.3.1

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

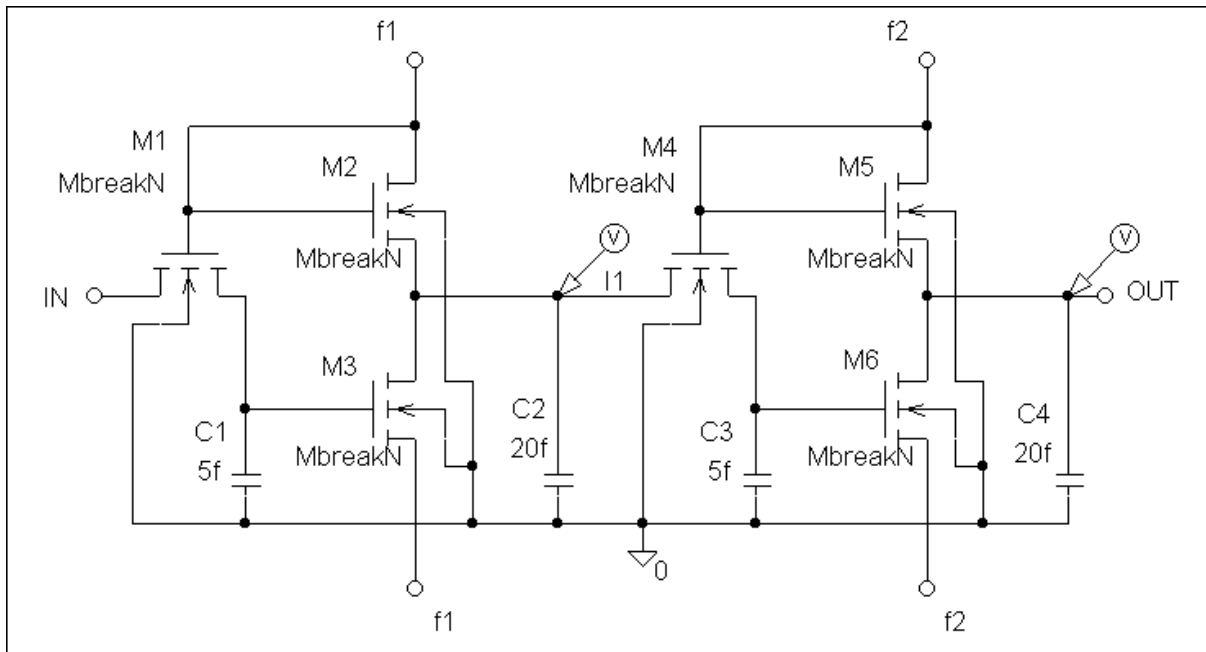
Wykonać makromodel przerzutnika RS stosując makromodel bramki NAND2. Wykonać testy bramki i określić maksymalną częstotliwość jej pracy ($V_{DD}=5\text{ V}$).



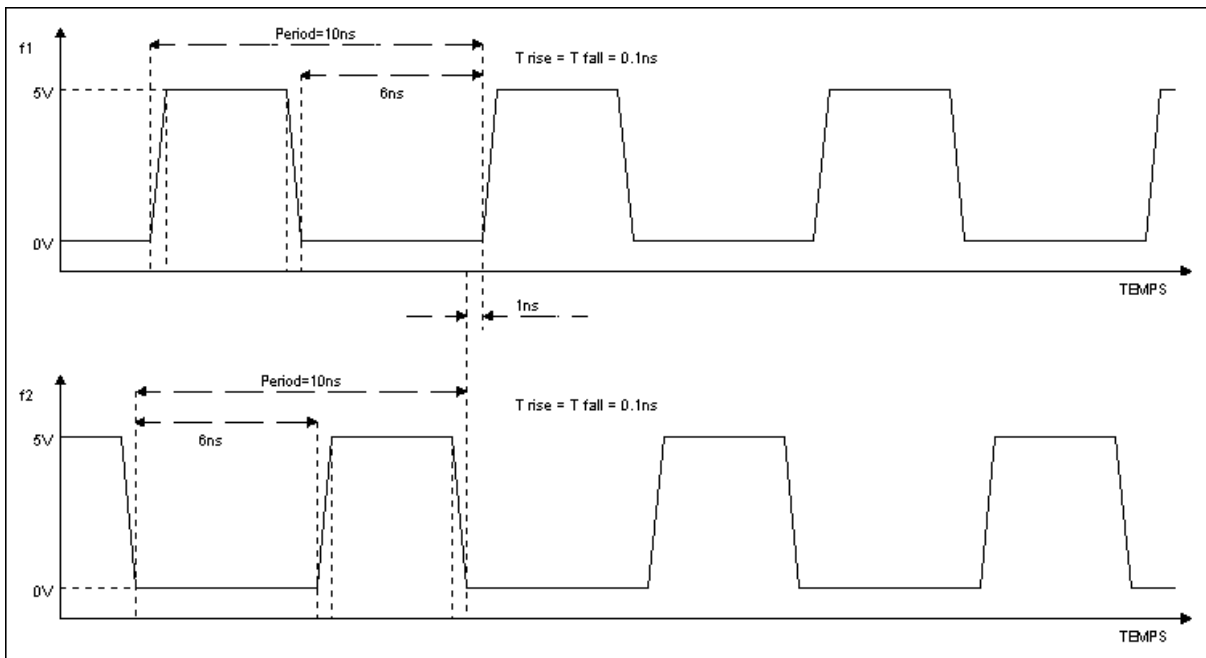
Rysunek 4.4.1

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 10 MHz i wypełnieniu 50%.



Rysunek 5.1.1

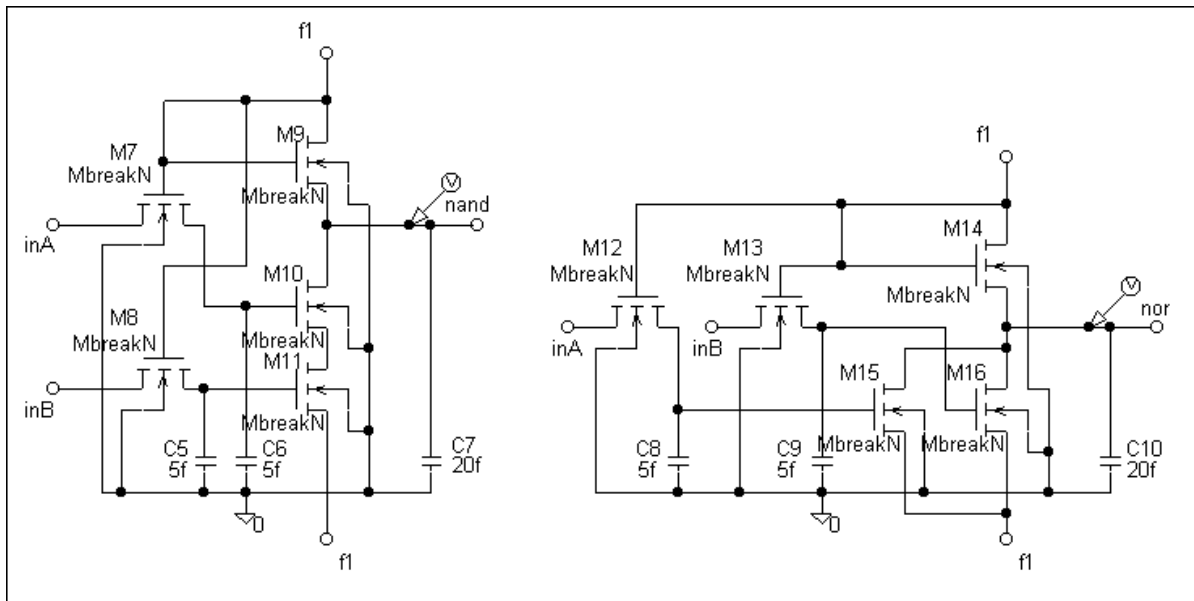


Rysunek 5.1.2

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 wymagania 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

Wprowadzić za pomocą programu Multisim do schematu 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 +15 V i -15 V), 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 – 10 mA

I2 – 100 mA

PMOS - do wyboru: BSP204/PLP lub IRF9540 (w Multisim także np. seria BSH201/2/3)

NMOS - IRF540 (w Multisim także np. seria 2N7000/2)

Ckomp - 0.1 nF

RS – 50 Ω

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

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

V1, V2 – 15 V

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 10 Hz 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 10 KHz i amplitudzie 1 mV (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).

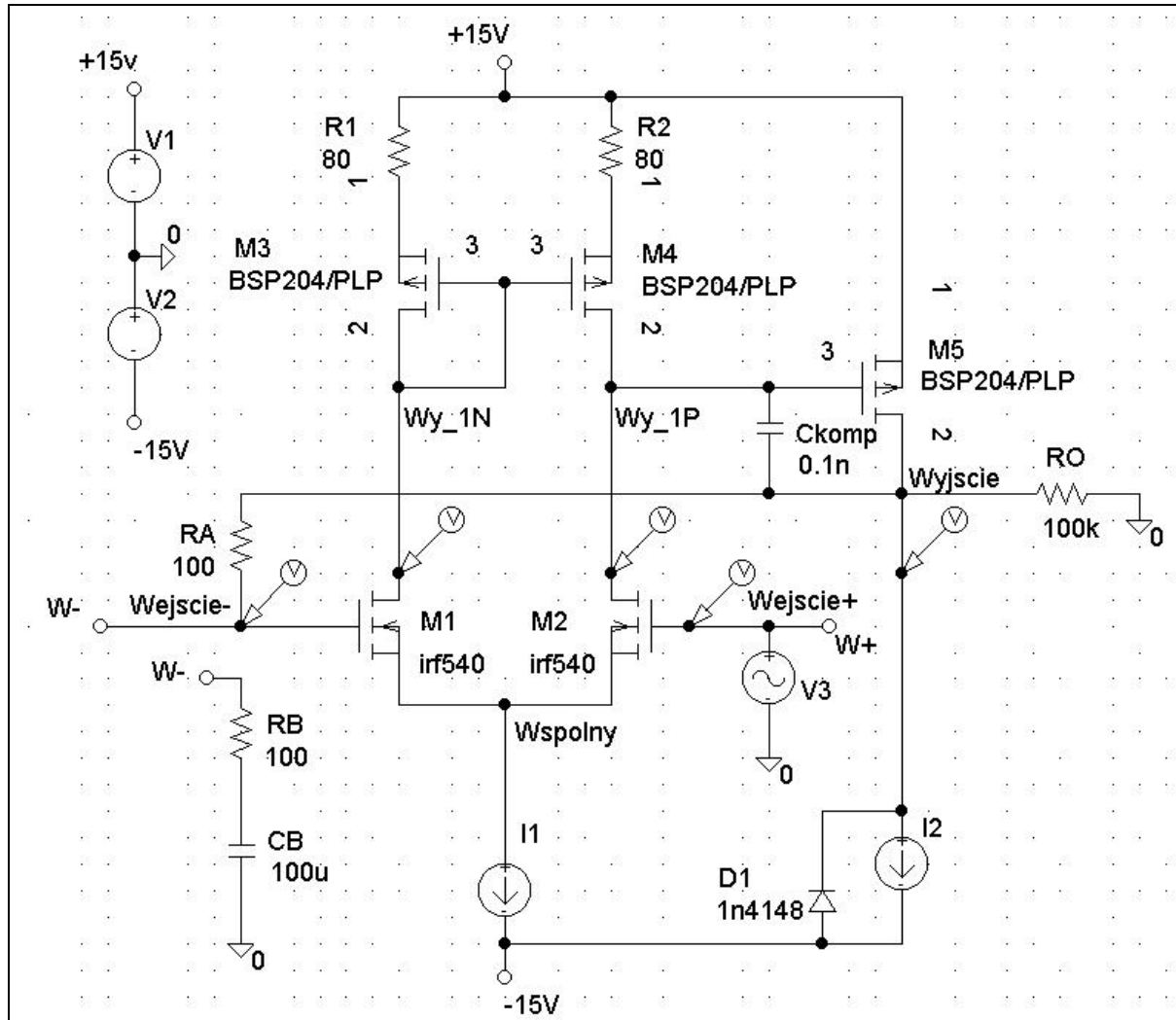
Sprawozdanie: Zamieścić odpowiednie obliczenia.

- 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

Zadanie 6.2 (Tydzień 14, opcja 3) Wzmacniacz operacyjny z tranzystorami CMOS

Wprowadzić za pomocą programu Multisim do schematu obwód pokazany na rysunku 6.2.

Schemat przedstawia klasyczny wzmacniacz operacyjny: dwustopniowy z wejściem ze wzmacniaczem różnicowym i drugim stopniem - wzmacniaczem w klasie A. Wyprowadzenia układu oznaczono: „Vin+”, „Vin-”, „Vout”, zasilanie stanowią niezależne źródła napięcia V1 i V2 (węzły +15 V i -15 V).

Pierwszy stopień - wejściowy wzmacniacz różnicowy (bez zabezpieczeń wejść) z tranzystorami NMOS Q1 i Q2. Polaryzacja pierwszego zrealizowana jest z wykorzystaniem źródła prądowego I1, a w obwodach drenów - lustrem prądowym PMOS (Q7 i Q8). W obwodzie źródeł – to lustro prądowe z tranzystorami NMOS Q3 i Q4. Drugi stopień wykonany jest z tranzystorem PMOS Q6 polaryzowanym z lustra prądowego NMOS Q5 oraz kondensatorem kompensacji charakterystyki częstotliwościowej C1.

UWAGA: na schemacie pokazano tylko wzmacniacz - elementy całego obwodu: układ połączeń i wartości elementów, należy dobrać w zależności od wykonywanych symulacji.

Na wstępie przyjąć wartości zastosowanych elementów:

I1 – 0.5 mA

PODPOWIEDŹ: jako modele w pełni konfigurowalne można wykorzystać elementy z wbudowanej biblioteki Multisim o symbolach MOS_N i MOS_P. Wersje o 4 wyprowadzeniach (podłoże) są oznaczone MOS_N_4T i MOS_P_4T. UWAGA: aby zmieniać podane niżej parametry modelu należy najpierw we właściwościach tranzystora, w oknie „value” wejść w „Edit model” i w pierwszej kolejności zmodyfikować odpowiednio poziom modelu LEVEL.

C1 – 0.1 pF

V1, V2 – 15 V

- 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 10 Hz do 100 GHz (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 10 KHz i amplitudzie 1 mV (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).

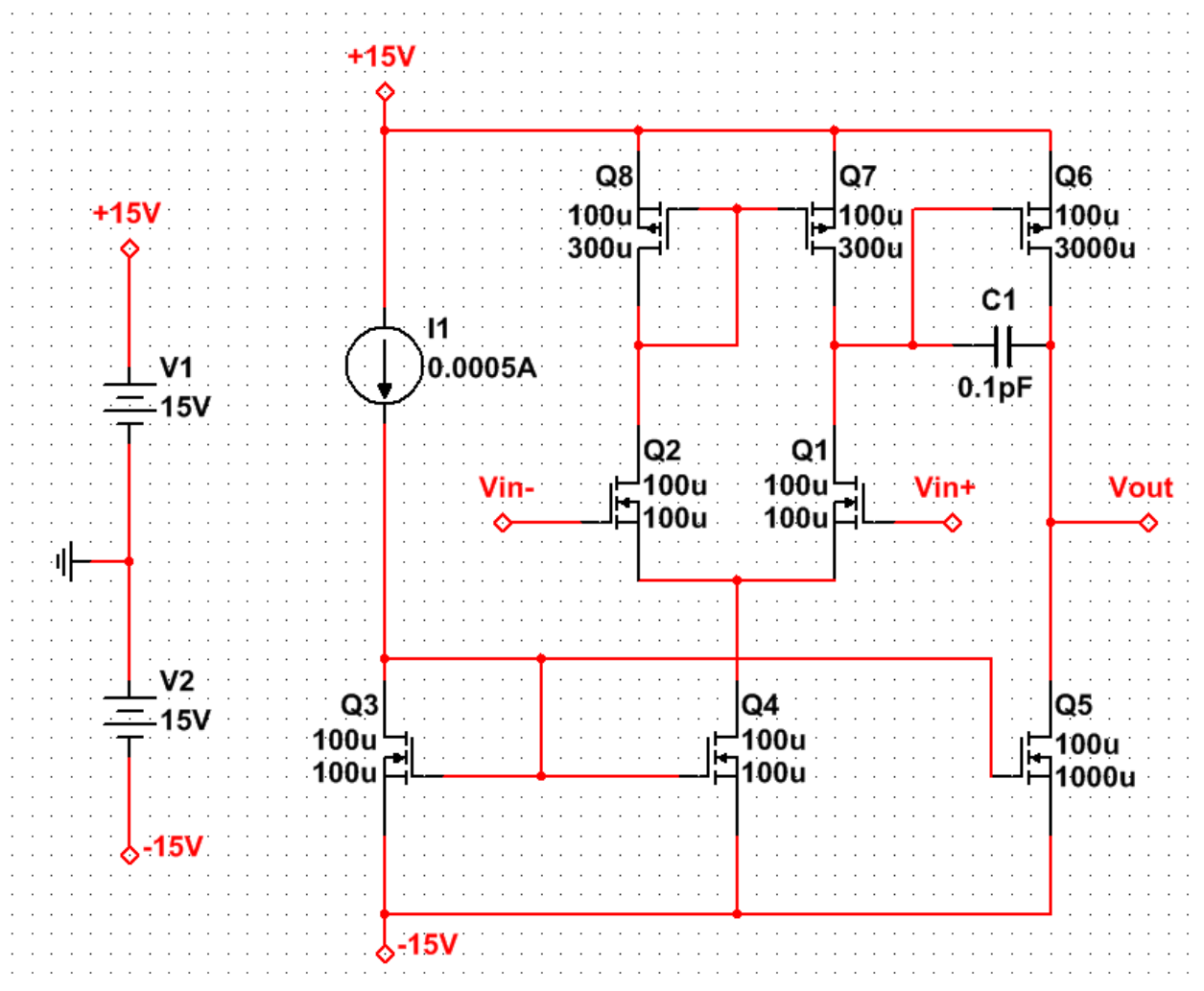
Sprawozdanie: Zamieścić odpowiednie obliczenia.

- e) PROJEKT II: Zastąpić źródło prądowe I1 - źródłem wykonanym z wykorzystaniem modeli elementów o rzeczywistych parametrach wykonanych w technologii MOS. Wyjaśnić na podstawie przeprowadzonych symulacji znaczenie stosowania modeli elementów o rzeczywistych parametrach. Wyjaśnić wpływ wartości prądu tego źródła na działanie wzmacniacza.

Sprawozdanie: Zamieścić odpowiednie obliczenia i wykresy.

- f) PROJEKT III: Na schemacie wykorzystano tranzystory o parametrach kanału: 100/100, 100/300, 100/1000 i 100/3000. Wyjaśnić na podstawie symulacji znaczenie takiego doboru parametrów kanału. Czy są to wartości stosowane w praktyce? Określić, w jaki sposób parametry te dobrać optymalnie.

Sprawozdanie: Zamieścić odpowiednie uzasadnienie.



Rysunek 6.2

Ćwiczenie 7 (Tydzień 14, opcja 4) Układy cyfrowe

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

Wprowadzić za pomocą programu Multisim do schematu 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 drabince rezystorowej R-2R z kluczami sterowanymi napięciem. Klucze są sterowane z inwerterów wykonanych na elementach cyfrowych U3/U4 (inwertery 74x04). Przełączają one drabinkę 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 – 1 kΩ, 2.2 nF

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

V1 – 10 V V2, V3 – 15 V V4 – 5 V

S1-S8 - klucze Sbreak (przyjąć: RON=1 Ω, ROFF=1E6 Ω, VON=1 V, VOFF=0 V)

PODPOWIEDŹ: Sbreak w Multisim VOLTAGE_CONTROLLED_SPST.

DSTIM, LO, HI - elementy cyfrowe

V5, V6 - źródła napięciowe - parametry dobrać samodzielnie

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

PODPOWIEDŹ: biblioteki Multisim zawierają serie TTL: 74STD (czyli 74 bramki standardowe), 74S, 74AS, 74LS, 74ALS, 74F – zapoznać się i zastanowić się nad kryteriami wyboru jednej z podanych rodzin.

- a) ANALIZA TRAN: Wykonać analizę wielkosygnałową. DSTIM na wstępie należy obrać ONTIME i OFFTIME po 5μs (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.

[illegible]

Strona 65 z 94

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} – wzmacnienie 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).

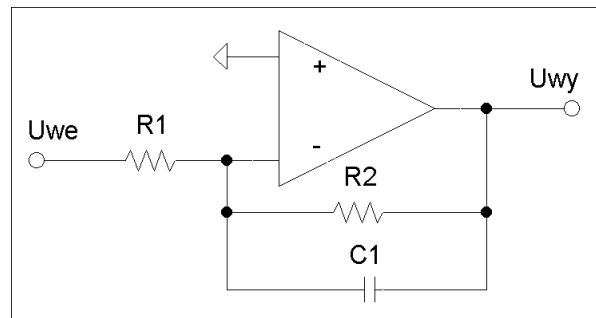
4. Realizacja filtrów

- 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

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

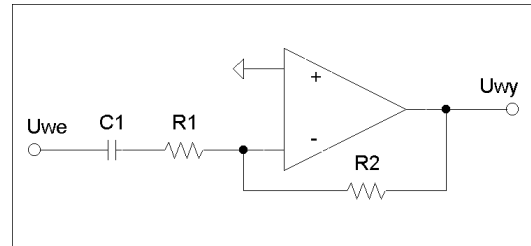


- b) filtr górnoprzepustowy pierwszego rzędu
Funkcja przenoszenia

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

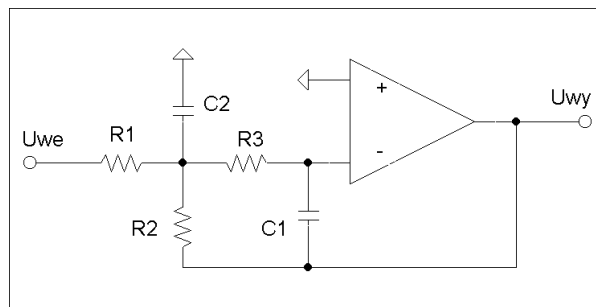
Określamy $k_{u\infty}$ oraz C_1 i stąd

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



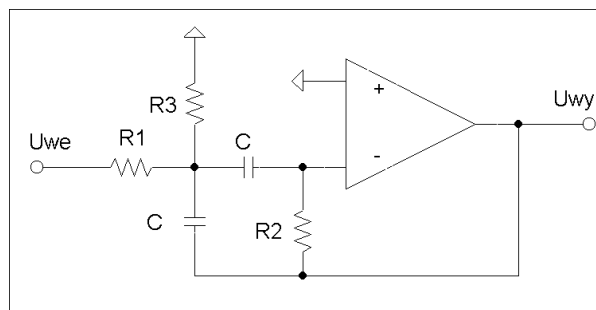
- c) filtr dolnoprzepustowy z wielokrotnym ujemnym sprzężeniem zwrotnym
Dla postaci ogólnej funkcji przenoszenia filtra dolnoprzepustowego otrzymujemy następujące wartości współczynników

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



- 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
$-\frac{R_2 R_3}{R_1 + R_3} C \omega_r$	$\frac{2R_1 R_3}{R_1 + R_3} C \omega_r$	$\frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 + R_3} C^2 \omega_r^2$

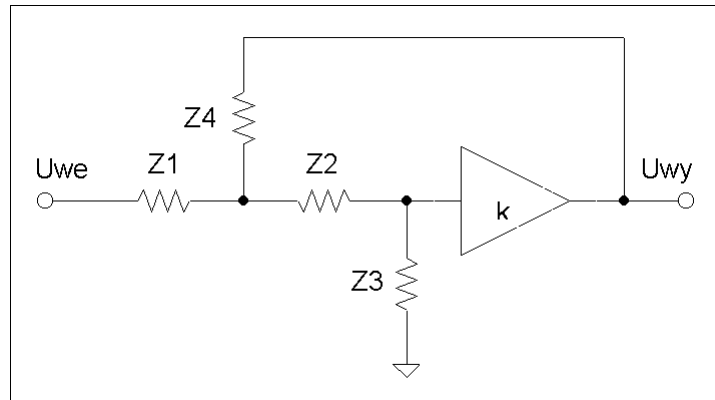


e) układ Sallen-Key'a

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: $Z1=R, Z2=R, Z3=C, Z4=C$
- filtr górnoprzepustowy: $Z1=C, Z2=C, Z3=R, Z4=R$
- filtr pasmowoprzepustowy: $Z1=C, Z2=R, Z3=C, Z4=R$

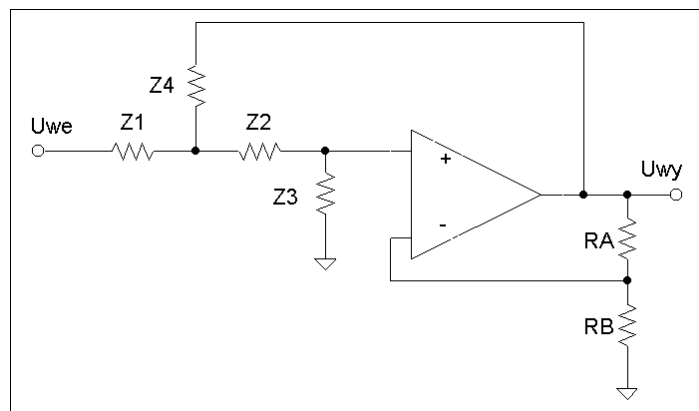
Schemat ogólny sekcji Sallen-Key'a:



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 $k_{u0} = RA/RB + 1$.

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_{oi}/f_o	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_{oi}/f_o	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
Filtry Butterwortha					
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
Filtry Czebyszewa o falistości 0,5 dB					
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_a	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_{oi}/f_g	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 SPICE

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 SPICE 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 GRAPHER). 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:

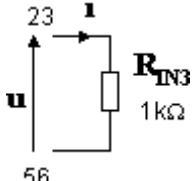
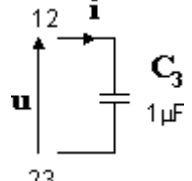
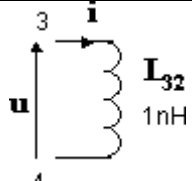
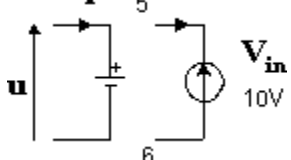
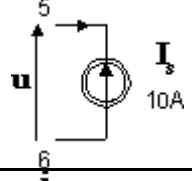
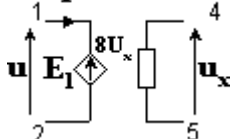
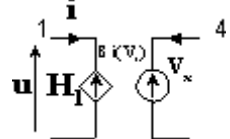
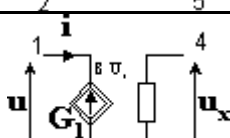
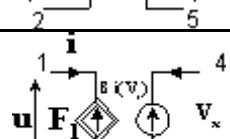
R - rezystancja
L - indukcyjność
K – indukcyjność sprzężona
C - pojemność
I – niezależne źródło prądowe
V - niezależne źródło napięciowe
E - źródło napięcia sterowane napięciem (VCVS)
H - źródło napięcia sterowane prądem (CCVS)
G - źródło prądu sterowane napięciem (VCCS)
F - źródło prądu sterowane prądem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

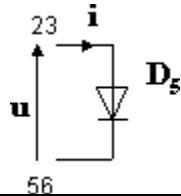
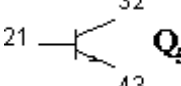
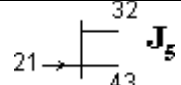
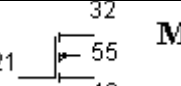
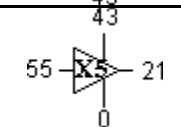
Do opisu każdego elementu przeznaczona jest jedna linia. Po nazwie elementu umieszczamy numery węzłów, między którymi znajduje się element; pierwszy węzeł ma potencjał „+” drugi potencjał „-”. Następnie umieszczamy wartości elementów w jednostkach SI. Można stosować następujące przedrostki :

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

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

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

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

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

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

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 $C_0=2$, $C_1=0.3$, 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

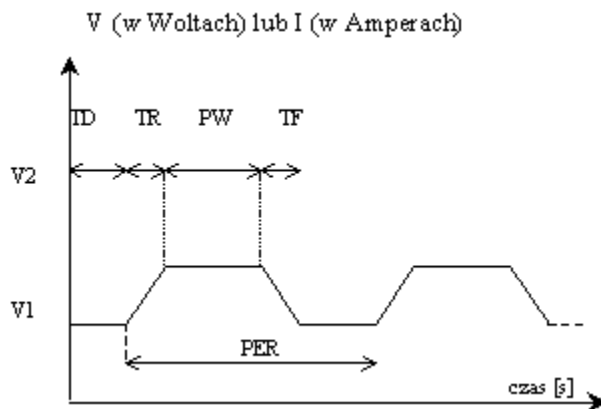
- **Dziedzina TR**

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 $T < TD1$, $V = V1$

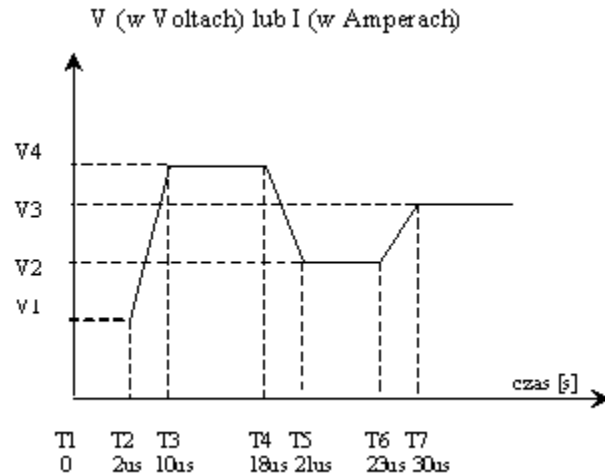
dla $TD1 < T < TD2$, $V = V1 + (V2 - V1) \cdot [1 - \exp(-(time - TD1)/TAU1)]$

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

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

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 SPICE 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 SPICE

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

SPICE 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 SPICE (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

Dodatek 5. Typoszeregi E

Szeregi wartości - wartości nominalne ("znamionowe") produkowanych seryjnie elementów.

Szereg E6 używany jest dla doboru podzespołów o tolerancjach $\pm 20\%$,
E12 - $\pm 10\%$, E24 - $\pm 5\%$, E48 - $\pm 2\%$, E96 - $\pm 1\%$, E192 - $\pm 0,5\%$.

E3	E6	E12	E24	E48	E96	E192	E3	E6	E12	E24	E48	E96	E192	E3	E6	E12	E24	E48	E96	E192
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	2.20	2.20	2.20	2.20	2.15	2.15	2.15	4.70	4.70	4.70	4.70	4.64	4.64	4.64
						1.01							2.18							4.70
					1.02	1.02						2.21	2.21					4.75	4.75	
					1.04							2.23								4.81
				1.05	1.05	1.05					2.26	2.26	2.26					4.87	4.87	4.87
					1.06							2.29								4.93
					1.07	1.07						2.32	2.32					4.99	4.99	
					1.09							2.34								5.05
			1.10	1.10	1.10	1.10				2.40	2.37	2.37	2.37				5.10	5.11	5.11	5.11
					1.11							2.40								5.17
					1.13	1.13						2.43	2.43					5.23	5.23	
					1.14							2.46								5.30
				1.15	1.15	1.15					2.49	2.49	2.49					5.36	5.36	5.36
					1.17							2.52								5.42
					1.18	1.18						2.55	2.55					5.49	5.49	
					1.20							2.58								5.56
		1.20	1.20	1.21	1.21	1.21			2.70	2.70	2.61	2.61	2.61			5.60	5.60	5.62	5.62	5.62
					1.23							2.64								5.69
					1.24	1.24						2.67	2.67					5.76	5.76	
					1.26							2.71								5.83
				1.27	1.27	1.27					2.74	2.74	2.74					5.90	5.90	5.90
					1.29							2.77								5.97
					1.30	1.30						2.80	2.80					6.04	6.04	
					1.32							2.84								6.12
			1.30	1.33	1.33	1.33				3.00	2.87	2.87	2.87				6.20	6.19	6.19	6.19
					1.35							2.91								6.26
					1.37	1.37						2.94	2.94					6.34	6.34	
					1.38							2.98								6.42
				1.40	1.40	1.40					3.01	3.01	3.01					6.49	6.49	6.49
					1.42							3.05								6.57
					1.43	1.43						3.09	3.09					6.65	6.65	
					1.45							3.12								6.73
	1.50	1.50	1.50	1.47	1.47	1.47		3.30	3.30	3.30	3.16	3.16	3.16		6.80	6.80	6.80	6.81	6.81	6.81
					1.49							3.20								6.90
					1.50	1.50						3.24	3.24					6.98	6.98	
					1.52							3.28								7.06
				1.54	1.54	1.54					3.32	3.32	3.32					7.15	7.15	7.15

[illegible]