# Politechnika Poznańska

Wydział Informatyki i Telekomunikacji Elektronika i Telekomunikacja

# Projekt z przedmiotu Komputerowe Wspomaganie Projektowania

Maciej Niedźwiecki

nr albumu: 147973

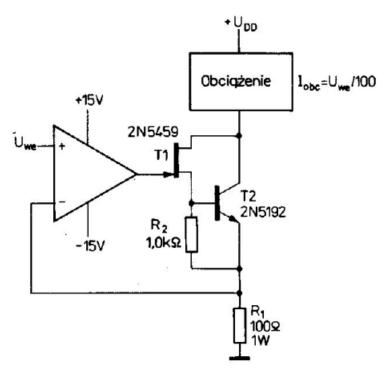
Prowadzący: dr inż. Sławomir Michalak

# Spis treści:

1. Schemat analizowanego układu.	3
2. Wybór elementów.	4
3. Symulacja układu w programie LTspice.	7
3.1 Analiza czasowa.	7
<ol><li>3.2. Analiza stałoprądowa DC.</li></ol>	9
3.3. Analiza zmiennoprądowa AC.	11
3.4. Analiza temperaturowa.	12
3.5. Analiza Statystyczna.	13
a) Monte Carlo.	13
b) Worst Case.	15
3.6. Analiza optymalizacyjna.	17
a) Monte Carlo.	17
b) Worst Case.	17
4. Podsumowanie.	18
5. Bibliografia.	19

# 1. Schemat analizowanego układu.

Celem projektu jest zapoznanie się z działaniem wybranego układu poprzez przeprowadzenie licznych symulacji w programie LTspice. Wybrałem do analizy układ "źródło prądowe z tranzystorem polowym i bipolarnym o dużej wartości prądu". Schemat tego układu został zaczerpnięty z książki "Sztuka elektroniki" (wydanie 2), napisanej przez P. Horowitza i W. Hilla.



Rys. 1. Źródło prądowe z tranzystorem polowym i bipolarnym o dużej wartości prądu (Rysunek 4.12 z powyższej literatury).

Zaletą układu jest usunięcie błędu wprowadzanego przez skończoną wartość prądu bazy tranzystora bipolarnego, uzyskane przez zastosowanie tranzystora polowego oraz, równoczesne, usunięcie ograniczenia wydajności prądowej źródła do wartości mniejszych niż  $I_{DS(on)}$ , dzięki użyciu tranzystora bipolarnego.

# 2. Wybór elementów.

Symulacja badanego układu będzie przeprowadzana w programie LTspice. Niestety, nie wszystkie elementy przedstawione na wzorowanym schemacie z literatury są dostępne w standardowej bibliotece programu. Aby móc zasymulować dany układ, pobrałem odpowiednie pliki z poniższych stron internetowych i zaimplementowałem je w programie.

- 2N5192.LIB (*link*)
- 2N5459.LIB (*link*)

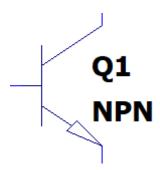
Poniżej zaprezentuję, w jaki sposób został dodany pożądany element na przykładzie tranzystora bipolarnego 2N5192.

Na początek pobieram pożądany plik i otwieram go w programie Notepad++ w celu sprawdzenia jego poprawności.

```
🔚 2N5192.LIB 🔀
      **********
            Model Generated by MODPEX
      *Copyright(c) Symmetry Design Systems*
  4
               All Rights Reserved
  5
          UNPUBLISHED LICENSED SOFTWARE
          Contains Proprietary Information *
            Which is The Property of
 8
           SYMMETRY OR ITS LICENSORS
  9
          Modeling services provided by
 10
      * Interface Technologies www.i-t.com *
      **********
 11
 12
      .MODEL Q2n5192 npn
13
      +IS=8.29193e-15 BF=227.67 NF=0.85 VAF=39.1081
14
      +IKF=0.514124 ISE=9.34801e-10 NE=3.50563 BR=22.767
 15
      +NR=0.75 VAR=42.1717 IKR=5.14124 ISC=5.72036e-13
 16
      +NC=1 RB=123.534 IRB=0.1 RBM=0.1
 17
      +RE=0.0175391 RC=0.0876957 XTB=0.782472 XTI=3.77615
 18
      +EG=1.206 CJE=3.23913e-10 VJE=0.62831 MJE=0.562741
 19
      +TF=1e-08 XTF=5.10189 VTF=7.58983 ITF=0.001
 20
      +CJC=3.07847e-10 VJC=0.917369 MJC=0.499708 XCJC=0.799172
 21
      +FC=0.8 CJS=0 VJS=0.75 MJS=0.5
 22
      +TR=4.78357e-08 PTF=0 KF=0 AF=1
 23
      * Model generated on Feb 21, 2004
 24
      * Model format: PSpice
 25
```

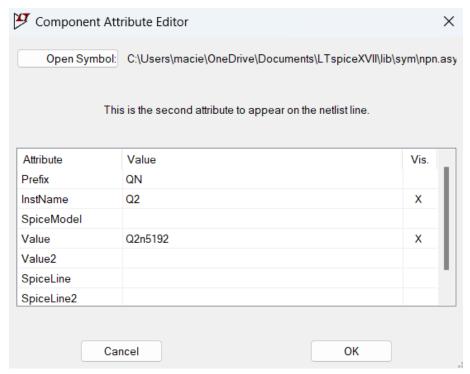
Rys. 2. Podgląd pliku "2N5192.LIB" w programie Notepad++.

W kolejnym kroku umieszczam na schemacie dowolny tranzystor bipolarny NPN.



Rys. 3. Tranzystor bipolarny NPN w programie LTspice.

Następnie otwieram okno "Component Attribute Editor" poprzez najechanie myszką na dany element i naciśnięciem go prawym przyciskiem myszy wraz z przytrzymanym klawiszem Ctrl. Następnie zmieniam wartość Value na podaną w pobranym pliku.



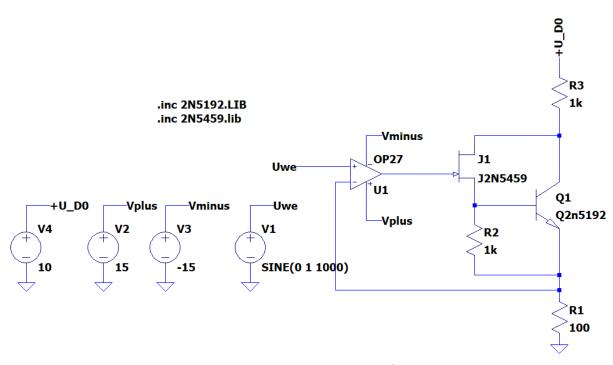
Rys. 4. Widok okna Component Attribute Editor.

Teraz pozostało tylko dołączenie pliku do projektu poprzez dodanie odpowiedniej dyrektywy.

#### .inc 2N5192.LIB

Powyższe czynności powtórzyłem dla tranzystora polowego 2N5459.

Po wgraniu tranzystorów do programu połączyłem wszystkie elementy według wzorcowego schematu. Na schemacie nie został wskazany konkretny wzmacniacz operacyjny, zatem użyłem elementu OP27. Za obciążenie przyjąłem rezystor R3 o wartości  $1 \, \mathrm{k}\Omega$ .



Rys. 5. Schemat badanego układu w programie LTspice. Źródło prądowe z tranzystorem polowym i bipolarnym o dużej wartości prądu.

# 3. Symulacja układu w programie LTspice.

Po zbudowaniu układu w programie LTspice zasymuluję i przeanalizuję jego działanie. W tym celu wykonam poniższe analizy:

- 1. Analiza czasowa
- 2. Analiza stałoprądowa DC
- 3. Analiza zmiennoprądowa AC
- 4. Analiza temperaturowa
- 5. Analiza statystyczna
- 6. Analiza optymalizacyjna

## 3.1. Analiza czasowa.

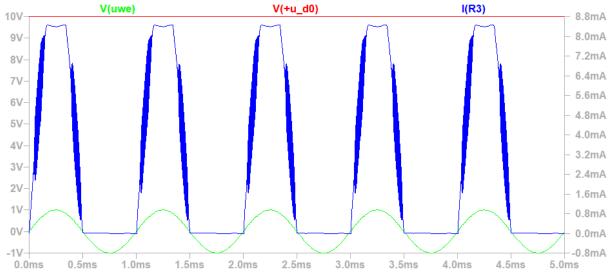
Analiza czasowa w LTspice pomaga nam zrozumieć zachowanie układu elektronicznego w dziedzinie czasu. Analiza ta umożliwia obserwację przebiegów czasowych napięć, prądów i innych parametrów w układzie w zależności od czasu. Dzięki niej jesteśmy w stanie:

- ocenić stabilność działania układu elektronicznego
- zidentyfikować ewentualne zniekształcenia sygnałów w układzie
- przeanalizować charakterystykę czasową układu
- ocenić różne parametry dynamiczne układu
- przeprowadzić symulację układu w czasie rzeczywistym

W celu przeprowadzenia analizy czasowej skorzystałem z poniższej dyrektywy:

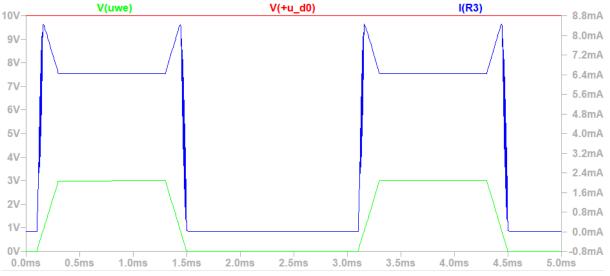
.tran 5m

#### a) Sygnał sinusoidalny.



Rys. 6. Analiza czasowa, sygnał sinusoidalny.

#### b) Sygnał prostokątny.



Rys. 7. Analiza czasowa, sygnał prostokątny.

#### Wnioski:

Układ na płaskich szczytach osiąga maksymalną wartość zasilania, natomiast dla ujemnych wartości nie działa, co jest zgodne z oczekiwaniami. Powyższy wniosek dowodzi, że układ jest poprawnie zbudowany.

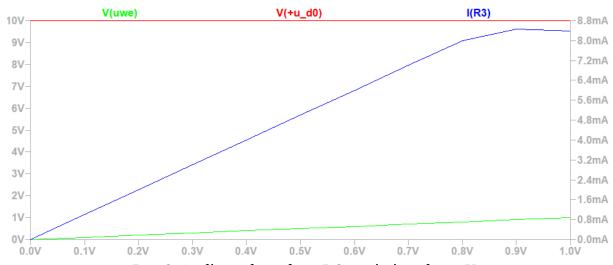
# 3.2. Analiza stałoprądowa DC.

Analiza stałoprądowa DC polega na ustaleniu wartości stałego prądu i obliczeniu napięć i prądów w całym obwodzie, przy założeniu, że prąd jest stały (niezależny od czasu). Dzięki niej możemy wyznaczyć punkty pracy elementów w obwodzie.

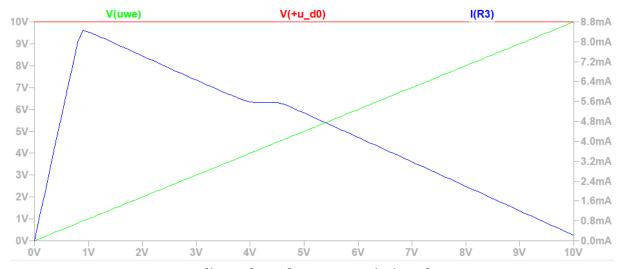
W celu przeprowadzenia analizy stałoprądowej DC skorzystałem z poniższych dyrektyw:

# .dc v1 0 1 0.1 .param RR = 1k .step param RR list 500 1k 1.5k

### a) napięcie stałe

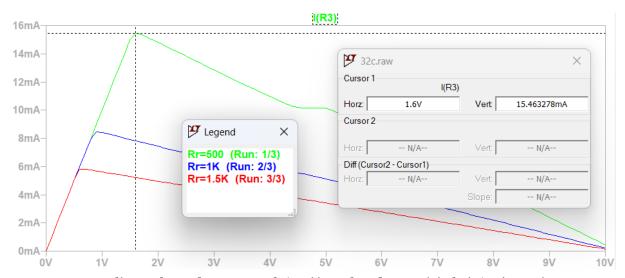


Rys. 8. Analiza stałoprądowa DC, napięcie stałe o-1 V.



Rys. 9. Analiza stałoprądowa DC, napięcie stałe 0-10 V.

#### b) Zależność prądu od wartości obciążenia R3



Rys. 10. Analiza stałoprądowa DC, zależność prądu od wartości obciążenia R3 (500  $\Omega$ , 1 k $\Omega$  i 1.5 k $\Omega$ )



Rys. 11. Analiza stałoprądowa DC, zależność prądu od wartości obciążenia R3 (1 k $\Omega$ , 2 k $\Omega$  i 5 k $\Omega$ )

#### Wnioski:

Maksymalne napięcie wejściowe układu dla badanego układu wynosi 0,9 V. W zależności od wielkości wartości obciążenia uzyskujemy inną wartość prądu. Im wartość obciążenia jest mniejsza, tym wartość prądu jest większa i na odwrót.

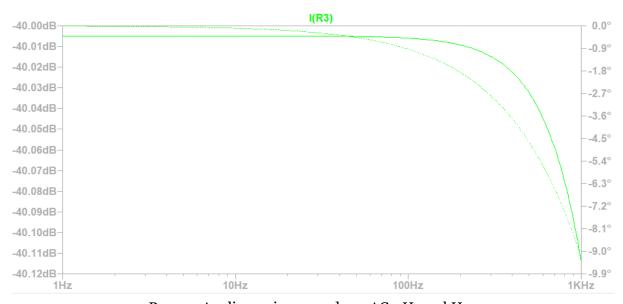
# 3.3. Analiza zmiennoprądowa AC.

Analiza zmiennoprądowa AC pozwala na symulowanie odpowiedzi obwodu na zmienny sygnał prądu. Przy jej użyciu można zbadać wiele parametrów obwodu w zakresie częstotliwości, takich jak:

- charakterystyki częstotliwościowe
- badanie wzmocnienie układu w zależności od czestotliwości
- badanie różnic fazowych między sygnałami wejściowymi a wyjściowymi w zależności od częstotliwości
- badanie impedancji obwodu w zależności od częstotliwości.

W celu przeprowadzenia analizy zmiennoprądowej AC skorzystałem z poniższych dyrektyw:

#### .ac dec 100 1 1k



Rys. 12. Analiza zmiennoprądowa AC 1 Hz - 1 kHz.

#### Wnioski:

Układ silnie tłumi sygnał wejściowy i ma charakterystykę amplitudową przypominającą filtr dolnoprzepustowy. Analizując charakterystykę fazową zauważamy, że nie jest ona liniowa, zatem wprowadza zmiany w fazie sygnału wyjściowego, wprowadzając dodatkowe zniekształcenia.

# 3.4. Analiza temperaturowa.

Analiza temperaturowa pozwala nam ocenić, jak parametry obwodu zmieniają się w zależności od temperatury. Dzięki niej możemy:

- zbadać, jak temperatura wpływa na parametry termiczne obwodu
- zbadać jak temperatura wpływa na charakterystykę elementów półprzewodnikowych
- ocenić stabilność termiczną obwodów

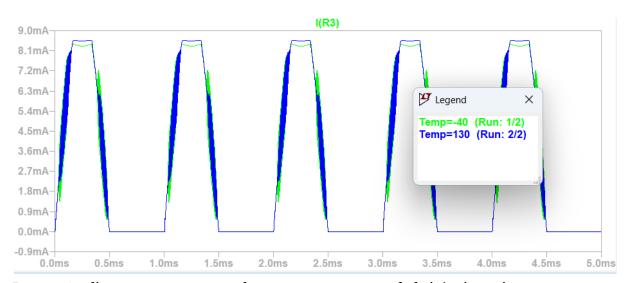
W celu przeprowadzenia analizy temperaturowej skorzystałem z poniższych dyrektyw:

# .tran 5m .step temp list -40 130

# .meas ac fo when x=mag(V(out)) .meas ac x max mag(V(out))

Natomiast wartość rezystorów w programie jest zdefiniowana jako:

### $[\Omega]$ tc=0.00005



Rys. 13. Analiza temperaturowa, wpływ temperatury na prąd obciążenia, zmiana temperatury pracy układu od -40  $^{\circ}$ C do 130  $^{\circ}$ C. Przyjęty współczynnik temperaturowy TC=50 ppm/ $^{\circ}$ C.

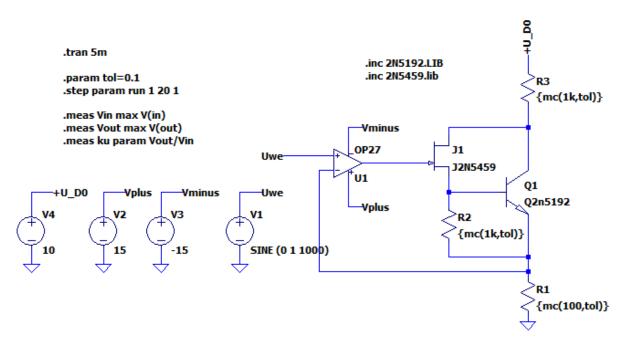
#### Wnioski:

Po dokonaniu analizy temperaturowej zauważamy, że układ nieznacznie reaguje na wahania temperatury przy danym współczynniku.

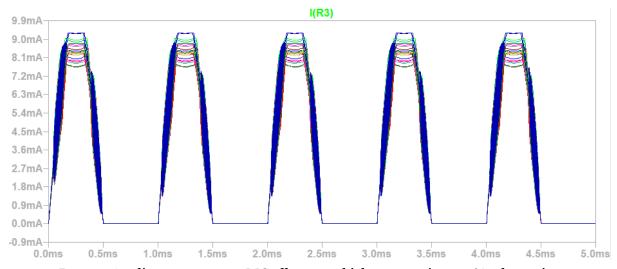
# 3.5. Analiza statystyczna.

#### a) Monte Carlo.

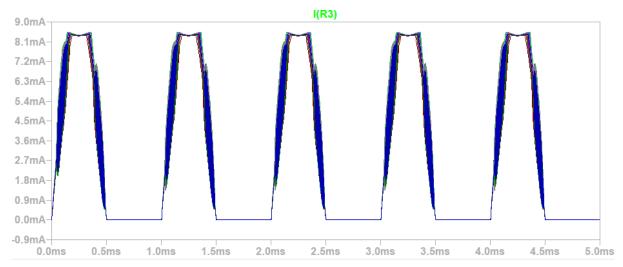
Analiza Monte Carlo polega na przeprowadzeniu wielokrotnej symulacji przy różnych wartościach losowych parametrów, w celu sprawdzenia jak zmienność ich wartości wpływa na wynik symulacji. Umożliwia ocenę statystycznych właściwości układu, takich jak zakres wartości wyjściowych, czy rozkład prawdopodobieństwa



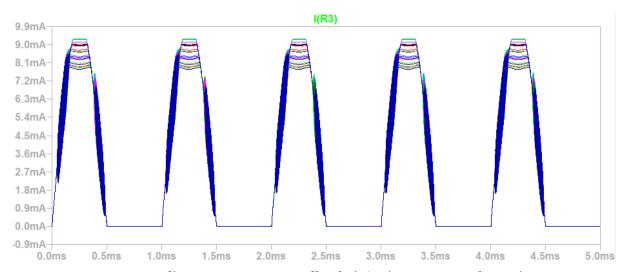
Rys. 14. Schemat badanego układu wykorzystywany do analizy statystycznej MC.



Rys. 15. Analiza statystyczna MC, dla wszystkich rezystorów z 10% tolerancją.



Rys. 16. Analiza statystyczna MC, dla rezystorów, poza obciążeniem R3 z 10% tolerancją.



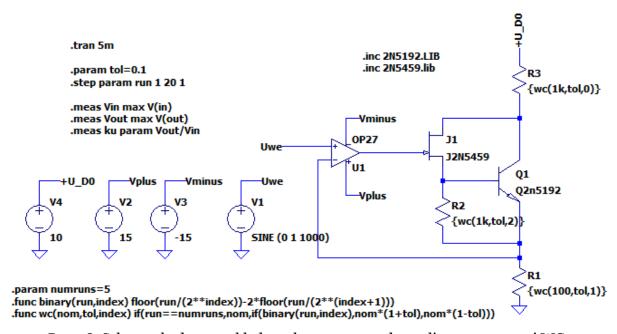
Rys. 17. Analiza statystyczna MC, dla obciążenia R3 z 10% tolerancją.

#### Wnioski:

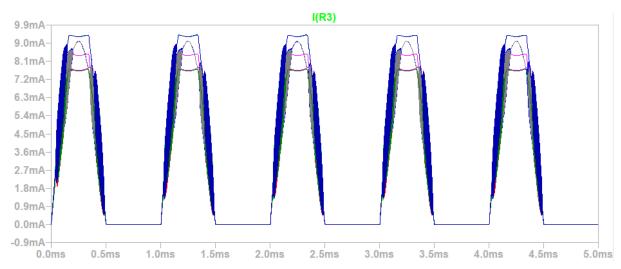
Rezystor pomiarowy R3 (obciążenie) ma największy wpływ na układ, zgodnie z przewidywaniami. Wyniki analizy Monte Carlo wskazują, że zmienność związana z szeroką tolerancją rezystorów prowadzi do znacznych odchyleń prądu wyjściowego. Prąd wyjściowy oscyluje w zakresie od 7,66 mA do 9,28 mA.

#### b) Worst Case.

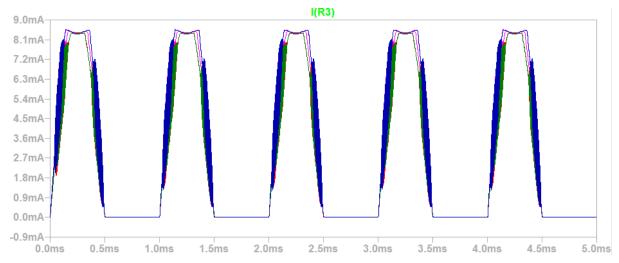
Analiza WorstCase polega na identyfikowaniu i ocenie najbardziej niekorzystnych warunków poprzez symulację pracy układu przy maksymalnych i minimalnych wartościach parametrów. Uzyskane wyniki reprezentują najgorszy możliwy scenariusz, dzięki niej możemy określić minimalne wymagania dla danego obwodu.



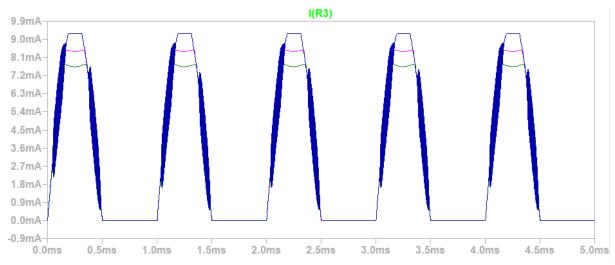
Rys. 18. Schemat badanego układu wykorzystywany do analizy statystycznej WC.



Rys. 19. Analiza statystyczna WC, dla wszystkich rezystorów z 10% tolerancją.



Rys. 20. Analiza statystyczna WC, dla rezystorów, poza obciążeniem R3 z 10% tolerancją.



Rys. 21. Analiza statystyczna WC, dla obciążenia R3 z 10% tolerancją.

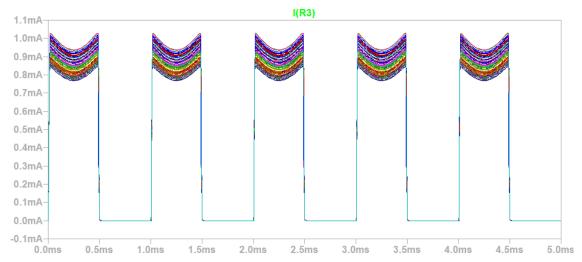
#### Wnioski:

Rezystor pomiarowy R3 (obciążenie) ma największy wpływ na układ, zgodnie z przewidywaniami. Prąd wyjściowy oscyluje w zakresie od 7,6 mA do 9,3 mA.

# 3.6. Analiza optymalizacyjna.

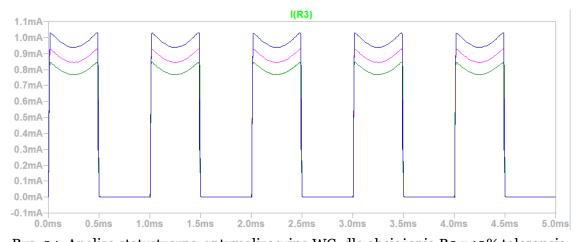
W celu wykonania analizy optymalizacyjnej postanowiłem zmienić wartość rezystancji obciążenia z 1 k $\Omega$  na 10 k $\Omega$ , w celu dogłębnego zbadania jej wpływu na działanie układu. Wykorzystam analizę statyczną Monte Carlo i Worst Case, a następnie porównam wyniki z poprzednimi symulacjami.

#### a) Monte Carlo.



Rys. 23. Analiza statystyczna-optymalizacyjna MC, dla obciążenia R3 z 10% tolerancja.

#### b) Worst Case.



Rys. 24. Analiza statystyczna-optymalizacyjna WC, dla obciążenia R3 z 10% tolerancją.

#### Wnioski:

Wykonując powyższe analizy dla najgorszego możliwego przypadku, oraz dla wielokrotnej symulacji przy różnych wartościach losowych parametrów zauważamy diametralną różnicę. W poprzednich analizach prąd wyjściowy oscylował w zakresie od ok. 7,66 mA do 9,28 mA, natomiast teraz potrafi oscylować od ok. 0,76 mA do 1,03 mA.

# 4. Podsumowanie.

LTspice jest przyjaznym i łatwym w obsłudze programem, pozwala na bezpłatną symulację obwodów elektronicznych umożliwiającą projektowanie, analizę i testowanie układów elektronicznych. Jest on często stosowany do modelowania zachowań różnych elementów elektronicznych i sprawdzania ich właściwości w czasie rzeczywistym.

Podczas pracy projektowej miałem okazję zasymulować pracę źródła prądowego z tranzystorem polowym i bipolarnym o dużej wartości prądu w obliczu różnych przypadków.

Układ na płaskich szczytach osiąga maksymalną wartość zasilania, natomiast dla ujemnych wartości nie działa. Jego zaletą jest usunięcie błędu wprowadzanego przez skończoną wartość prądu bazy tranzystora bipolarnego, oraz, równoczesne usunięcie ograniczenia wydajności prądowej źródła

Maksymalne napięcie wejściowe układu dla badanego układu wynosi 0,9 V. W zależności od wielkości wartości obciążenia uzyskujemy inną wartość prądu. Im wartość obciążenia jest mniejsza, tym wartość prądu jest większa i na odwrót.

Układ silnie tłumi sygnał wejściowy, a jego charakterystyka amplitudowa przypomina filtr dolnoprzepustowy. Natomiast nieliniowość charakterystyki fazowej wprowadza dodatkowe zmiany w fazie sygnału wyjściowego w porównaniu do sygnału wejściowego.

Podczas analizy Worst Case okazało się, że obciążenie ma największy wpływ na układ. Zmienność związana z szeroką tolerancją rezystorów prowadzi do znacznych odchyleń prądu wyjściowego, który oscyluje w zakresie od 7,66 mA do 9,28 mA.

# 5. Bibliografia.

- "Sztuka elektroniki", WKŁ, 2009 (wydanie 2) *P.Horowitz i W.Hill*
- "Układy elektroniczne", skrypt PP, 1999,2002 P. *K. Arnold, K. Lange, W. Nawrocki*
- "Wzmacniacze operacyjne podstawy, aplikacje, zastosowania", BTC, 2002 *Górecki*
- Wykłady "Komputerowe Wspomaganie projektowania" dr inż. Sławomir Michalak
- Laboratorium "Komputerowe Wspomaganie projektowania" dr inż. Michał Maćkowski