**AGH**

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej

---

## **Praca inżynierska**

**Rafał Wójcik**

kierunek studiów: **Fizyka Techniczna**

kierunek dyplomowania: **Fizyka Jądrowa**

## **Wykonanie projektu układu VLSI przy użyciu pakietu Cadence**

Opiekun: **dr hab. inż. Marek Idzik prof. AGH**

**Kraków, Styczeń 2010**

Oświadczam, świadomy(-a) odpowiedzialności karnej za poświadczenie nieprawdy, że niniejszą pracę dyplomową wykonałem(-am) osobiście i samodzielnie i nie korzystałem(-am) ze źródeł innych niż wymienione w pracy.

.....  
(czytelny podpis)

# Spis treści

<b>Wstęp</b>	<b>5</b>
<b>1 Komparator - Podstawy teoretyczne</b>	<b>7</b>
1.1 Wprowadzenie . . . . .	7
1.2 Charakterystyki . . . . .	8
1.2.1 Charakterystyka statyczna . . . . .	8
1.2.2 Charakterystyka dynamiczna . . . . .	10
1.3 Histereza . . . . .	11
1.4 Budowa komparatorów statycznych . . . . .	12
1.4.1 Komparatory "open-loop" . . . . .	12
1.4.2 Komparatory regeneracyjne . . . . .	13
<b>2 Projekt - Komparatora statycznego</b>	<b>15</b>
2.1 Założenia projektowe . . . . .	15
2.2 Projekt . . . . .	16
2.2.1 Stopień wejściowy . . . . .	16
2.2.2 Układ decyzyjny . . . . .	17
2.2.3 Bufor wyjściowy . . . . .	18
2.3 Rozmiary tranzystorów . . . . .	19
<b>3 Symulacje - Działanie komparatora</b>	<b>21</b>
<b>Podsumowanie</b>	<b>27</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>28</b>
<b>Spis rysunków</b>	<b>31</b>
<b>Spis tabel</b>	<b>33</b>



# Wstęp

Celem pracy inżynierskiej jest projekt układu scalonego. Aby zaprojektować układ scalony należało zdobyć wiedzę teoretyczną na temat projektowanego układu oraz praktyczną polegającą na zapoznaniu się ze środowiskiem Cadance, które służy do projektowania układów scalonych.

Wybrany układem do realizacji w niniejszej pracy inżynierskiej jest projekt komparatora statycznego. Układ ten został wybrany do realizacji, ponieważ jest jednym z podstawowych układów elektronicznych. Ponadto jest przykładem układu elektronicznego o zaawansowanej budowie, zawierającej część analogową i cyfrową. Jest układem z pogranicza elektroniki cyfrowej i analogowej.

Rozdział pierwszy przedstawia podstawy teoretyczne dotyczących komparatorów. Definiuje pojęcie komparatora, przedstawiające podstawowe parametry opisujące pracę komparatora.

W drugim rozdziale przedstawione zostaną założenia projektowe dotyczące realizacji projektu oraz opis zasady działania poszczególnych podukładów komparatora.

Rozdział trzeci zawierać będzie opis symulacji i wyniki pracy komparatora.



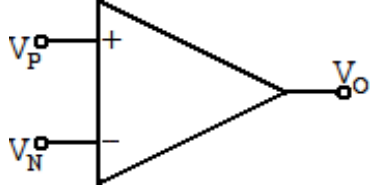
# Rozdział 1

## Komparator - Podstawy teoretyczne

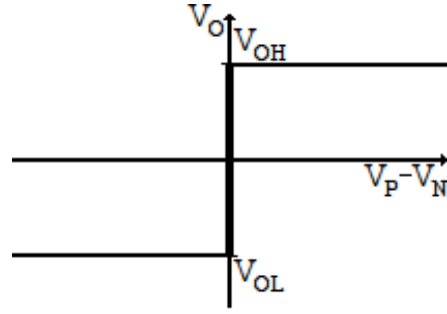
### 1.1 Wprowadzenie

**Komparator** to układ elektroniczny, którego zadaniem jest porównywanie sygnałów analogowych i generowaniem sygnału wyjściowego będącego wynikiem tej operacji. Prosty komparator jest zwykłym wzmacniaczem operacyjnym bez kompensacji. Nie jest ona potrzebna, ponieważ komparatory generalnie pracują w otwartej pętli sprzężenia zwrotnego. Dzięki temu osiągają najszerszy możliwy zakres, który skutkuje najszybszą możliwą odpowiedzią do uzyskania. W elektronice do oznaczenia komparatora używa się, takiego samego symbolu (rys.(1.1)) jak dla wzmacniacza operacyjnego, ponieważ oba układy posiadają wiele wspólnych cech takich jak np. wejście różnicowe, duże wzmocnienie. Pojedyncze komparatory możemy uważać za układy logiczno decyzyjne. Komparator sygnalizuje wynik porównania, poprzez generowanie odpowiedniego stanu logicznego na wyjściu. Jeżeli wejście nieodwracające "+" ma wyższy potencjał niż wejście odwracające "-", wtedy na wyjściu pojawi się napięcie  $V_{OH}$  symbolizujące stan wysoki, jeżeli zaś wejście odwracające ma na wyższy potencjał niż nieodwracające, to na wyjściu ustali się napięcie  $V_{OL}$  reprezentująca stan niski. Funkcje przenoszenia takiego komparatora przedstawia rysunek (1.2). Komparatory są powszechnie stosowane w procesie przetwarzania sygnałów analogowych na ich cyfrowe odpowiedniki. Można powiedzieć że pojedynczy komparator to nic innego jak jednobitowy przetwornik analogowo-cyfrowy. Wyróżnia się dwie architektury komparatorów: statyczny i dynamiczny. Główną różnicą pomiędzy tymi architekturami jest rodzaj pracy. Komparatory statyczne charakteryzują się pracą ciągłą, zaś komparatory dynamiczne charakteryzują się pracą wymuszoną co oznacza pracują tylko po podaniu sygnału wyzwającego.

$$V_O = \begin{cases} V_{OH} & \text{dla } V_P > V_N \\ V_{OL} & \text{dla } V_P < V_N \end{cases} \quad (1.1)$$



Rysunek 1.1: Symbol komparatora



Rysunek 1.2: Funkcja przenoszenia idealnego komparatora o nieskończonym wzmacnieniu.

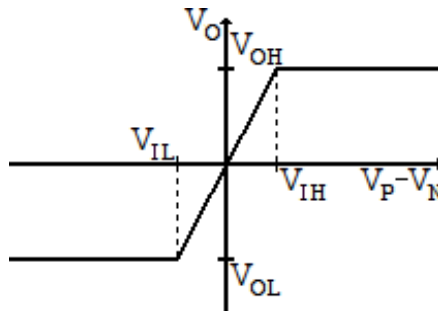
## 1.2 Charakterystyki

### 1.2.1 Charakterystyka statyczna

Jednym ze statycznych parametrów opisujących komparator jest wzmacnienie (ang. *gain*). Dla idealnego komparatora możemy je wyrazić za pomocą wzoru (1.2), gdzie  $\Delta V$  to różnica napięć wejściowych ( $\Delta V = V_P - V_N$ ). Ponieważ w przypadku idealnym wzmacnienie jest nieskończone, stąd otrzymujemy że nieskończenie mała różnica napięć wejściowych ( $\Delta V$ ) powoduje przełączenie idealnego komparatora.

$$A_v = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{V_{OH} - V_{OL}}{\Delta V} \quad (1.2)$$

W rzeczywistości komparatory mają skończone wzmacnienie, stąd funkcja przenoszenia przypomina bardziej funkcję przedstawioną na rysunku (1.3). Matematycznie funkcje przenoszenia możemy zapisać za pomocą wzoru (1.3). Gdzie  $V_{IH}$ ,  $V_{IL}$  reprezentują wartość napięć potrzebnych do uzyskania nasycenia wyjścia (to znaczy  $V_O = V_{OH}$  lub  $V_O = V_{OL}$ ).



Rysunek 1.3: Funkcja przenoszenia komparatora o skończonym wzmacnieniu.

$$V_O = \begin{cases} V_{OH} & \text{dla } V_P - V_N > V_{IH} \\ A_v(V_P - V_N) & \text{dla } -V_{IL} < V_P - V_N < V_{IH} \\ V_{OL} & \text{dla } V_P - V_N < -V_{IL} \end{cases} \quad (1.3)$$



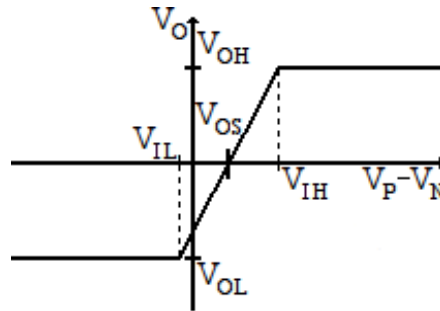
Wzmocnienie dla rzeczywistego komparatora można wyrazić za pomocą wzoru (1.4).

$$A_V = \frac{V_{OH} - V_{OL}}{V_{IH} - V_{IL}} \quad (1.4)$$

Różnice napięć  $V_{IH} - V_{IL}$  nazywamy **rozdzielczością** komparatora.

Kolejnym parametrem opisującym rzeczywisty komparator jest *offset* napięciowy lub napięciem niezrównoważenia.

Wpływ napięcia niezrównoważenia na funkcje przenoszenia ilustruje rysunek (1.4).



Rysunek 1.4: Funkcja przenoszenia komparatora o skończonym wzmocnieniu z uwzględnionym offsetem napięciowym.

Matematycznie funkcje przenoszenia z uwzględnionym offsetem napięciowym przedstawia wzór(1.5).

$$V_O = \begin{cases} V_{OH} & \text{dla } V_{OH} < V_P - V_N \pm V_{OS} \\ A_v(V_P - V_N \pm V_{OS}) & \text{dla } V_{IL} < V_P - V_N \pm V_{OS} < V_{IH} \\ V_{OL} & \text{dla } V_P - V_N \pm V_{OS} < V_{IL} \end{cases} \quad (1.5)$$

Offset napięciowy definiuje się jako: wartość różnicy napięć wejściowych przy których następuje zmiana stanu wyjścia. Dla idealnego komparatora *offset* jest równy zero ( $V_{OS} = 0$ ). W przypadku rzeczywistego układu problem jest nieco bardziej skomplikowany, ponieważ na etapie projektowania i produkcji nie jesteśmy w stanie określić jego wartości. Wartości offsetu są losowe i mogą się różnić dla poszczególnych układów.

Na całkowity offset składają się dwa rodzaje offsetu:

- **offset systematyczny** powodowany przez niedopasowanie napięć polaryzujących i wymiarów elementów
- **offset losowy** wynikający z błędów powstałych w procesie produkcji

### 1.2.2 Charakterystyka dynamiczna

Charakterystyki dynamiczne komparatora obejmują zarówno zachowanie małosygnałowe jak i wielosygnałowe. Jedną z dynamicznych charakterystyk jest charakterystyka opóźnienia między reakcją wejścia a wyjścia, nazywana **czasem propagacji** (*propagation delay time*). Graficznie problem ilustruje rysunek (1.5). Jest to bardzo ważny parametr komparatora, ponieważ określa on jak szybko komparator dokonuje konwersji sygnału analogowego na cyfrowy. Dodatkowo czas propagacji zależy od amplitudy sygnału wejściowego. Sygnały o większej amplitudzie są szybciej przetwarzane niż sygnały o mniejszej. Istnieje jednak górna granica amplitudy sygnału wejściowego, powyżej której dalszy wzrost amplitudy sygnału nie zmniejsza już czasu opóźnienia propagacji. Parametrem opisującym tę granicę jest *slew rate* ( $SR = \frac{dV}{dt}$ ), czyli maksymalna szybkość zmiany napięcia wyjściowego.

Dynamika mało-sygnałowa komparatora jest z charakteryzowana przez odpowiedź częstotliwościową. W najprostszym przypadku, funkcję przenoszenia komparatora możemy przedstawić za pomocą funkcji posiadającej jeden biegun dominujący (wzór (1.6)).

$$A_v(s) = \frac{A_v(0)}{\frac{s}{\omega_c} + 1} = \frac{A_v(0)}{s\tau_c + 1} \quad (1.6)$$

gdzie :

- $A_v(0)$  - stałoprądowe wzmocnienie różnicowe
- $\omega_c$  - częstość graniczna(dominującego bieguna)

Dla komparatorów wartość wzmocnienia różnicowego jest mniejsza, a częstość graniczna większa, niż dla wzmacniaczy operacyjnych.

Komparator nie jest w stanie przetwarzać sygnałów od dowolnej amplitudzie. Istnieje dolna granica wartości napięcia wejściowego jaką sygnał wejściowy powinien posiadać, aby komparator działał poprawnie. Napięcie to nazywamy **rozdzielczością** lub **minimalnym napięciem wejściowym** ( $V_{in}(min)$ ) komparatora. Wzór (1.7) opisuje sposób wyliczania wartości napięcia minimalnego.

$$V_{in}(min) = \frac{V_{OH} - V_{OL}}{A_v(0)} \quad (1.7)$$

Jeżeli na wejście podamy sygnał o minimalnej amplitudzie, to zachowanie wyjścia określać będzie funkcja czasowej odpowiedzi eksponencjalnej rzędu pierwszego (1.8)).

$$A_v(0)(1 - \exp(\frac{-t_p}{\tau_c}))V_{in}(min) = \frac{V_{OH} - V_{OL}}{2} \quad (1.8)$$

Gdzie :  $t_p$  to tzw. czas propagacji.

Podstawiając teraz do (1.8) wartość  $V_{in}(min)$  ze wzoru (1.7) i następnie rozwiązując

równanie ze względu na  $t_p$ , otrzymujemy maksymalną wartość czasu propagacji.

$$t_p(max) = \tau_c \ln(2) \quad (1.9)$$

Jeśli do komparatora zostanie podane napięcie  $k$  razy większe od napięcia  $V_{in}(min)$  to czas propagacji możemy obliczyć ze zmodyfikowanego wzoru (1.9).

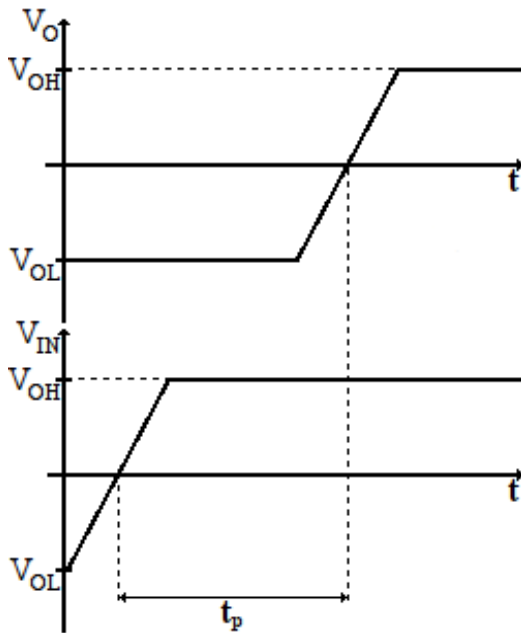
$$t_p(V_{in}) = \tau_c \ln\left(\frac{2k}{2k-1}\right) \quad (1.10)$$

gdzie :

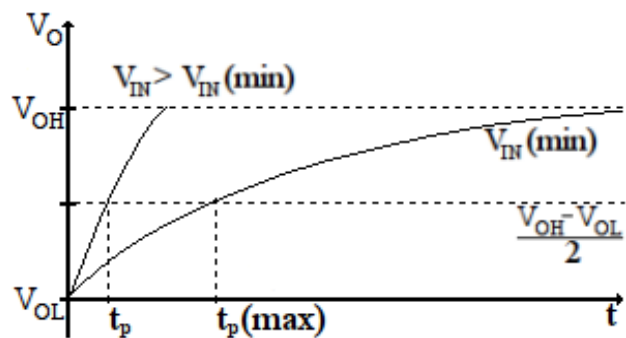
$$k = \frac{V_{in}}{V_{in}(min)} \quad (1.11)$$

Przy bardzo dużej amplitudzie sygnału wejściowego, czas opóźnienia odpowiedzi układu będzie determinowany przez parametr SR komparatora, wówczas wzór na  $t_p$  będzie postaci :

$$t_p = \Delta T = \frac{\Delta V}{SR} = \frac{V_{OH} - V_{OL}}{2SR} \quad (1.12)$$



Rysunek 1.5: Czas opóźnienia propagacji

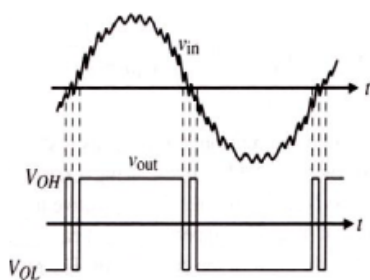


Rysunek 1.6: Zależność czasu opóźnienia propagacji od amplitudy sygnału wejściowego

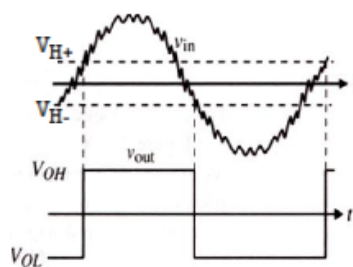
Komparatory projektuje się tak, aby uzyskać jak najmniejszy czas propagacji. Dlatego też używa się kilku kaskadowo połączonych ze sobą układów, o niskim wzmocnieniu cechujących się krótkim czasem odpowiedzi, zamiast jednego układu o wielkim wzmocnieniu, który charakteryzuje się dłuższym czasem odpowiedzi.

### 1.3 Histereza

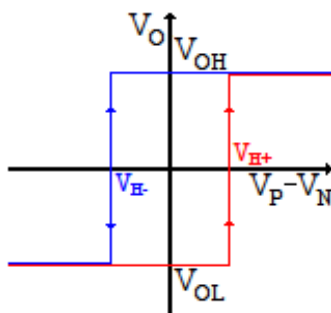
Często komparator musi pracować w zaszumionym środowisku. Jeśli komparator jest układem szybkim a amplituda szumów duża, to przy napięciu wejściowym bliskim napięciu odniesienia mogą wystąpić przypadkowe przełączanie sygnału na wyjściu, ilustruje ten problem to rysunek (1.7). Aby zapowiedzieć temu zjawisku, stosuje się komparatory histerezy, rysunek (1.8). Wartość histerezy dobiera się tak aby była nieco większa od maksymalnej spodziewanej amplitudy szumu. Odpowiedź komparatora z histerezą przedstawia rysunek (1.9).



Rysunek 1.7: Komparator bez histerezy.



Rysunek 1.8: Komparator z histerezą.



Rysunek 1.9: Charakterystyka komparatora z histerezą.

## 1.4 Budowa komparatorów statycznych

Wyróżniamy kilka typów komparatorów, które różnią się wymaganiami projektowymi, topologią i specyfikacją zastosowań. Wybór odpowiedniego rodzaju komparatora jest często kompromisem pomiędzy szybkością, rozdzielczością a poborem mocy.

Wyróżniamy komparatory :

- **Nieregeneracyjne(Open-loop)**
- **Regeneracyjne**

### 1.4.1 Komparatory "open-loop"

Komparatory nieregeneracyjne używają z wzmacniaczy operacyjnych do porównywania napięć wejściowych. Dla jednoczłonowego komparatora napięcie wyjściowe można wyrazić wzorem:

$$V_o = g_m R_L (1 - \exp(\frac{-t}{R_L C_L})) V_{in} \quad (1.13)$$

Zakładając że  $t \ll \tau = R_L C_L$

$$V_o \approx \frac{g_m}{C_L} V_{in} t \quad (1.14)$$

Wzmocnienie:

$$A_v = \frac{g_m}{C_L} \quad (1.15)$$

Czas propagacji:

$$t_p = \frac{C_L}{g_m} \quad (1.16)$$

Widać że wraz ze wzrostem wzmocnienia, rośnie szybkość układu, ale z drugiej strony rośnie też czas opóźnienia propagacji. Problem ten rozwiązuje się przez zastosowanie kilku wzmacniaczy o niskim wzmocnieniu. Wtedy napięcie wyjściowe opisuje wzór:

$$V_o = \frac{(\frac{g_m}{C_L} t)^n}{n!} V_{in} \quad (1.17)$$

gdzie: n - ilość wzmacniaczy.

Optymalną ilość stopni przy zadanym wzmocnieniu możemy obliczyć ze wzoru [4]:

$$A_n = \frac{(n+1)^n}{n!} \quad (1.18)$$

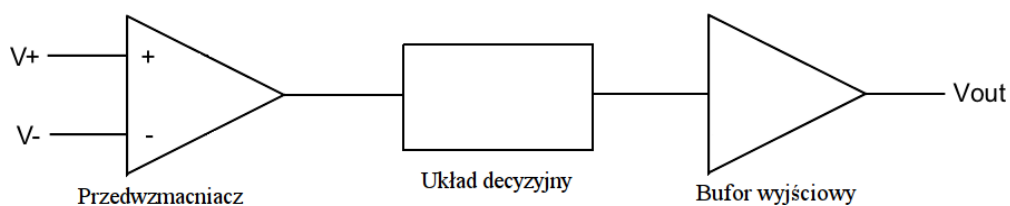
Czas propagacji będzie dla tak zbudowanego komparatora przedstawiał wzór:

$$t_n = (n+1) \frac{C_L}{g_m} \quad (1.19)$$

Niestety optymalna ilość stopni wymaga dużo miejsca, stąd ilość stopni i ich wzmocnienie często jest podyktowane kompromisem pomiędzy wydajnością a wielkością układu.

### 1.4.2 Komparatory regeneracyjne

Regeneracyjne komparatory są układami zatrzaskowymi, które używają pozytywnego sprzężenia dodatniego do detekcji różnic dwóch napięć wejściowych. Posiadają one możliwość implementacji histerezy, co sprawia że idealnie nadają się do pracy z zaszumionym sygnałem wejściowym. Czasem stosuje się połączenie komparatorów *open loop* z regeneracyjnymi. Dzięki takiemu połączeniu uzyskujemy znakomitą rozdzielczość dyskryminacji sygnału wejściowego oraz możliwość implementacji histerezy zachowując przy tym przyzwoity czas propagacji. Na wyjściu z układu decyzyjnego stosuje się dodatkowo bufor wyjściowy (ang. *post amplifier*), aby dostosować sygnał do odpowiedniej logiki napięciowej. Rysunek (1.10) przedstawia idee budowy tego typu komparatorów.



Rysunek 1.10: Budowa komparatora regeneracyjnego z przedwzmacniaczem i buforem wyjściowym

# Rozdział 2

## Projekt - Komparatora statycznego

### 2.1 Założenia projektowe

Założenia projektowe odnośnie komparatora statycznego zostały przedstawione poniżej:

- Minimalna amplituda sygnału wejściowego 20[mV]
- Pobór prądu na poziomie 1[mA]
- Możliwość pracy z histerezą
- Optymalizacja szybkości pracy
- Technologia AMS 0.35  $\mu m$

Do realizacji założeń został wybrany komparator regeneracyjny. Wybór padł na ten rodzaj komparatorów ze względu na dużą szybkość pracy, łatwość implementacji histerezy. Komparator będzie składał się z trzech stopni:

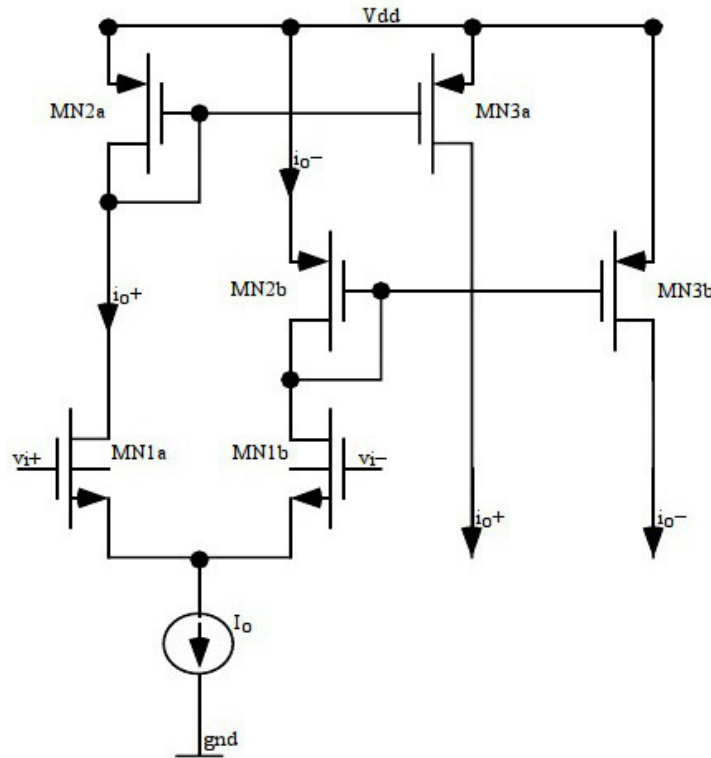
- Stopień wejściowy - przedwzmacniacz
- Blok decyzyjny - odpowiedzialny za rozstrzygnięcie które wejście komparatora jest na wyższym potencjale
- Bufor wyjściowy - dostosowujący wyjście komparatora do pracy w odpowiedniej logice napięciowej

Poszczególne stopnie zostaną omówione szczegółowo w kolejnych pod rozdziałach.

## 2.2 Projekt

### 2.2.1 Stopień wejściowy

Na stopień wejściowy komparatora został wybrany układ przedstawiony na rysunku(2.1). Jest to para różnicowa z obciążeniem aktywnym w postaci tranzystorów spiętych diodowo. Za główne parametry stopnia wejściowego, takie jak transkonduktancja, pojemność, rezystancja wejściowa , odpowiadają tranzystory MN1a i MN1b.



Rysunek 2.1: Schemat stopnia wejściowego komparatora.

Działanie stopnia wejściowego, polega przekształcaniu napięcia napięcia  $v_{i+}$  i  $v_{i-}$  na prądy  $i_{o+}, i_{o-}$ . Prądów tych używamy w stopniu decyzyjny, do którego są przenoszone za pomocą luster prądowych zbudowanych z tranzystorów MP2a, MP3a oraz MP2b i MP3b. Jeśli tranzystory MN1a, MN1b są takie same, to wartość prądu  $i_{o+}$  można obliczyć ze wzoru(2.1).

$$i_{o+} = g_m V_{GS} + \frac{I_0}{2} = g_m \left( \frac{v_{i+} - v_{i-}}{2} \right) + \frac{I_0}{2} = I_0 - i_{o-} \quad (2.1)$$

gdzie :  $g_m = g_{m1a} = g_{m1b}$

Dodatkowo wzmocnienie stopnia wejściowego możemy podnieść przeskalowując wymiary tranzystorów MP3a i MP3b.

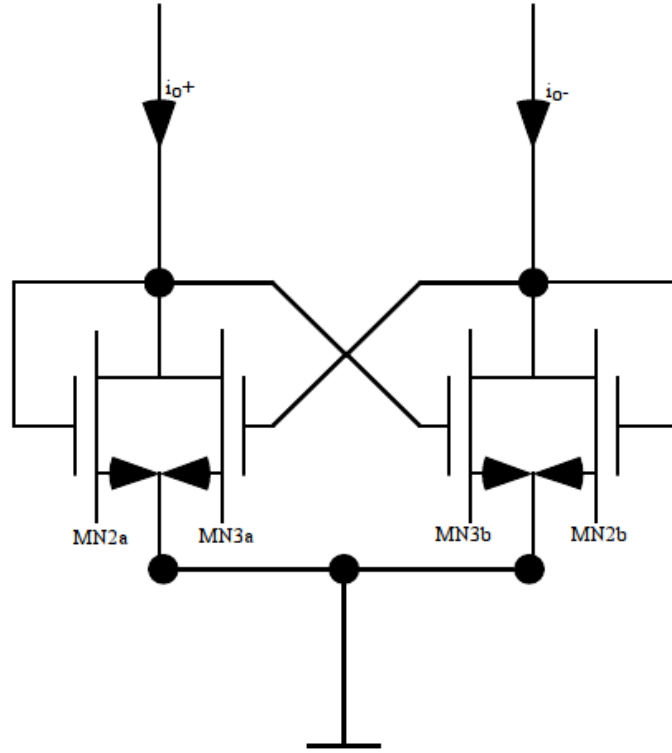
Wtedy :

$$i'_{o\pm} = i_{o\pm} \frac{\left( \frac{W}{L} \right)_{MP3a/b}}{\left( \frac{W}{L} \right)_{MP3a/b}} \quad (2.2)$$



### 2.2.2 Układ decyzyjny

Rysunek (2.2) przedstawia schemat zastosowanego w komparatorze układu decyzyjnego. Układ ten używa dodatniego sprzężenia zwrotnego do detekcji niewielkich różnic wartości prądów. Dodatkowo układ umożliwia implementację histerezy po przez odpowiednie dobranie wymiarów tranzystorów. Opis działania układu, zastał poprzedzony wprowadze-



Rysunek 2.2: Schemat stopnia układu decyzyjnego.

niem oznaczyć:

$$I'_o = i_{o+} + i_{o-} \quad (2.3)$$

$$\beta_A = \beta_{MN2a} = \beta_{MN2b} \quad (2.4)$$

$$\beta_B = \beta_{MN3a} = \beta_{MN3b} \quad (2.5)$$

Pierwszym rozpatrywanym przypadkiem jest sytuacja, gdy prąd  $i_{o+} \gg i_{o-}$ . Wtedy tranzystory MN2a i MN3b są włączone, zaś tranzystory MN3a i MN2b są w stanie odcięcia. Zapisując równania Kirchhoffa dla prądu  $i_{o+}$  otrzymujemy:

$$i_{o+} = i_{MN2a} + i_{MN3a} \quad (2.6)$$

Wiedząc że tranzystor MN3a jest w stanie odcięcia ( $i_{MN3a} = 0$ ) otrzymujemy:

$$i_{o+} = i_{MN2a} \quad (2.7)$$

Przeprowadzając analogiczne rozumowanie dla prądu  $i_{o-}$  otrzymujemy:

$$i_{o-} = i_{MN3b} \quad (2.8)$$

Stąd napięcie  $v_{o+}$  równa się napięciu bramy tranzystora MN2a ( $v_{o+} = V_{GSMN2a}$ ), zaś napięcie  $v_{o-}$  jest równe w przybliżeniu zeru ( $v_{o-} \approx 0$ ), ponieważ praktycznie cały prąd przepływa przez otwarty tranzystor MN3b. Tranzystor MNP2a pracuje w zakresie saturacji stąd wzór na prąd  $i_{o+}$  jest postaci:

$$i_{o+} = \frac{1}{2}\beta_A(v_{o+} - V_T)^2 \quad (2.9)$$

Jeżeli teraz prąd  $i_{o+}$  zacznie maleć, to równocześnie będzie rosnać prąd  $i_{o-}$  (2.3). Maleje napięcie  $V_{GSMN2a}$ , powodując spadek wartości prądu przepływającego przez tranzystor MN3b, co z kolei daje wzrost napięcia za tranzystorze MN2b. Przed wyłączeniem się tranzystora MN2a, a włączeniem tranzystora MN2b wzór opisujący  $i_{o-}$  jest postaci:

$$i_{o-} = \frac{1}{2}\beta_B(v_{o+} - V_T)^2 \quad (2.10)$$

Wartość napięć  $v_{o+}$ ,  $v_{o-}$  w zależności prądów  $i_{o+}$ ,  $i_{o-}$  opisują wzory:

$$v_{o+} = \sqrt{\frac{2i_{o+}}{\beta_A}} + V_{Th} \quad (2.11)$$

$$v_{o-} = \sqrt{\frac{2i_{o-}}{\beta_A}} + V_{Th} \quad (2.12)$$

Wartość prądów przy której następuje przełączenie tranzystorów, można obliczyć porównując wzory (2.9), (2.10). Stąd:

$$i_{o-} = \frac{\beta_B}{\beta_A} i_{o+} \quad (2.13)$$

Wzór 2.13 mówi przy jakiej wartości prądu  $i_{o-}$  nastąpi wyłączenie tranzystora MN3b i włączenie MN3a. Jeśli  $\beta_B = \beta_A$ , to przełączanie następuje, gdy prądy mają taką samą wartość, to komparator nie posiada histerezy. Jeżeli jednak komparator ma posiadać histerezę to parametry tranzystorów muszą tak dobrane, aby  $\beta_B > \beta_A$ . Wartość napięć  $V_{H+}$ ,  $V_{H-}$  przedstawiają następujące wzory:

$$V_{H+} = v_{o-} - v_{o+} \quad (2.14)$$

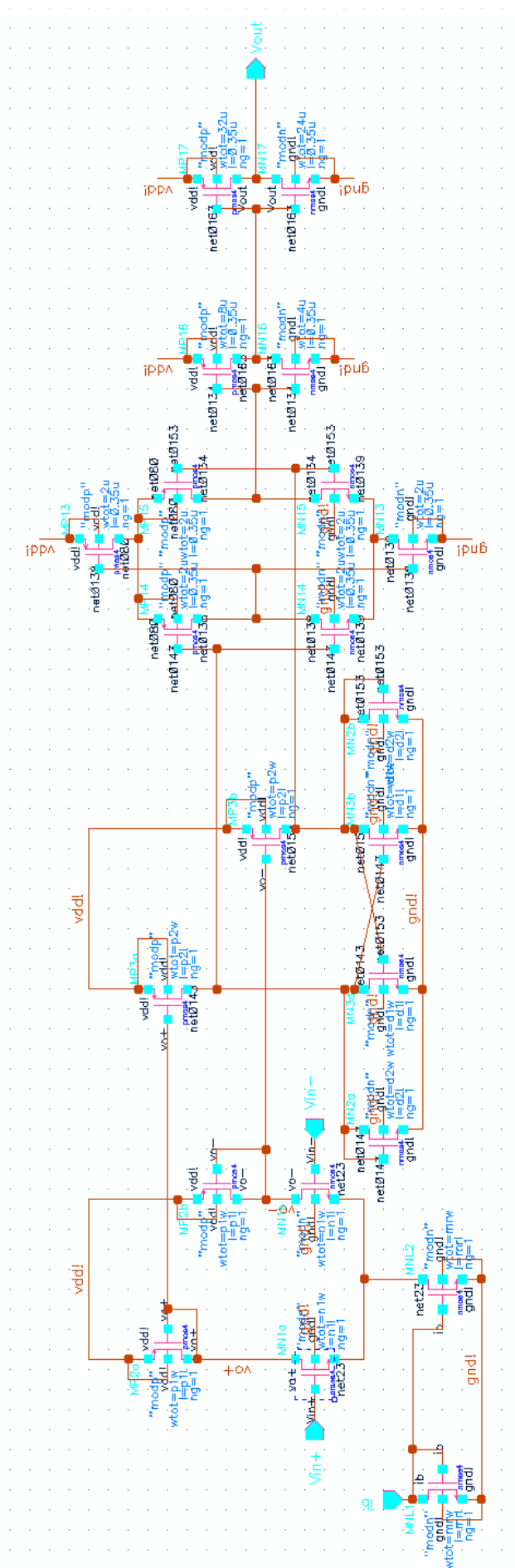
$$V_{H-} = v_{o-} - v_{o+} = -V_{H+} \quad (2.15)$$



nału, by uzyskać jak najszybszą pracę tych podukładów. Sygnał dochodzący do nich jest już wstępnie wzmocniony i nie musimy przejmować się ewentualnym niedopasowaniem elementów. Wymiary wszystkich tranzystorów przedstawia tabela (2.1).

Tranzystor	W[um]	L[um]
MN1a/b	20	3,43
MN2a/b	7	0,35
MN3a/b	8	0,35
MP1a/b	1	1
MP2a/b	10	0,35
MN13 = MN14 = MN15	2	0,35
MP13 = MP14 = MP15	2	0,35
MN16	4	0,35
MP16	8	1,29
MN17	24	0,35
MP17	48	0,35
MNL2	10	0,5
MNL1	10	0,5

Tabela 2.1: Wymiary tranzystorów



Rysunek 2.4: Schemat komparatora.

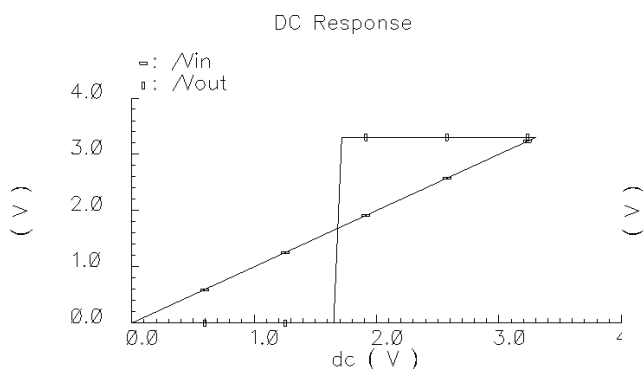


## Rozdział 3

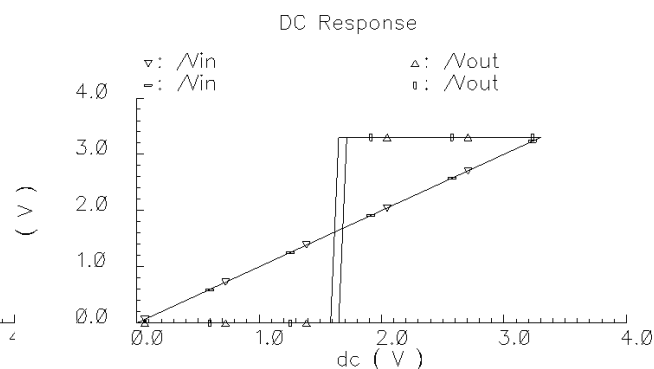
### Symulacje - Działanie komparatora

Symulacje pracy komparatora zostały przeprowadzone w programie Cadence, przy użyciu symulatora "Spectre". Na podstawie wyników symulacji zostały wyznaczone takie parametry jak: wzmacnienie, czas opóźnienia, moc pobierana przez układ. Szerokości tranzystorów były tak dobierane, aby jak najbardziej zminimalizować czas opóźnienia reakcji komparatora na sygnał wejściowy.

W pierwszej kolejności została zbadana statyczna charakterystyka napięciowa rys. (3.1) i rys. (3.2), na podstawie której zostało obliczone wzmacnienie i szerokość histerezy komparatora.



Rysunek 3.1: Charakterystyka napięciowa komparatora.



Rysunek 3.2: Histereza komparatora

Wzmacnienie zostało wyliczone ze wzoru (1.2) i wyniosło:

$$A_v = \frac{3.3V - 0V}{66mV} = 50 \frac{V}{V} \quad (3.1)$$

Szerokość histerezy została wyznaczona na :

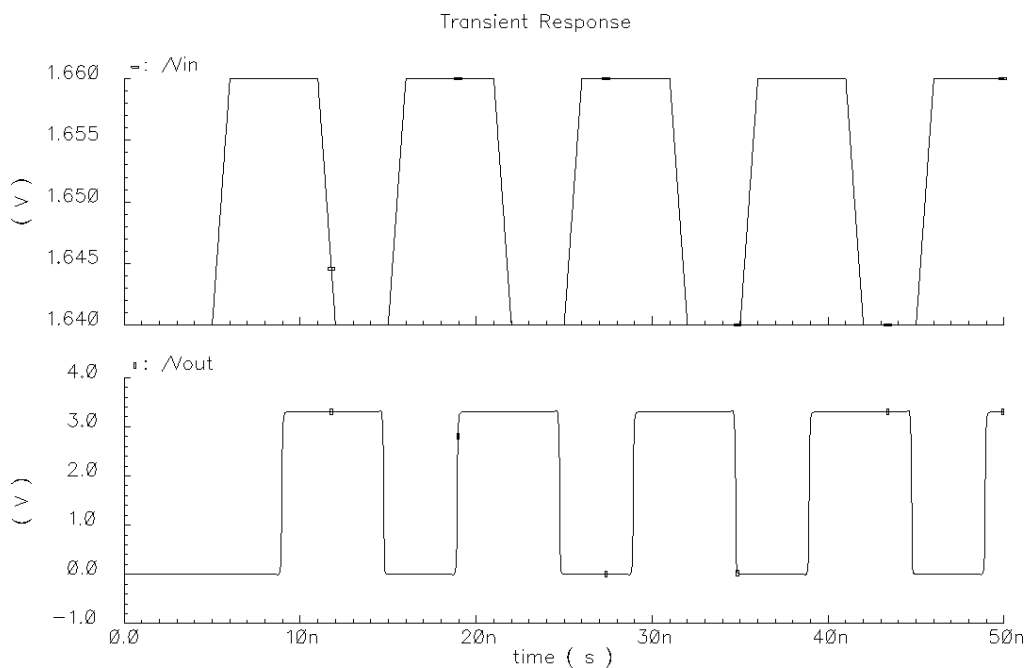
$$\Delta V_H = 18mV \quad (3.2)$$

Stąd :

$$V_{H+} = -V_{H-} = 9mV \quad (3.3)$$

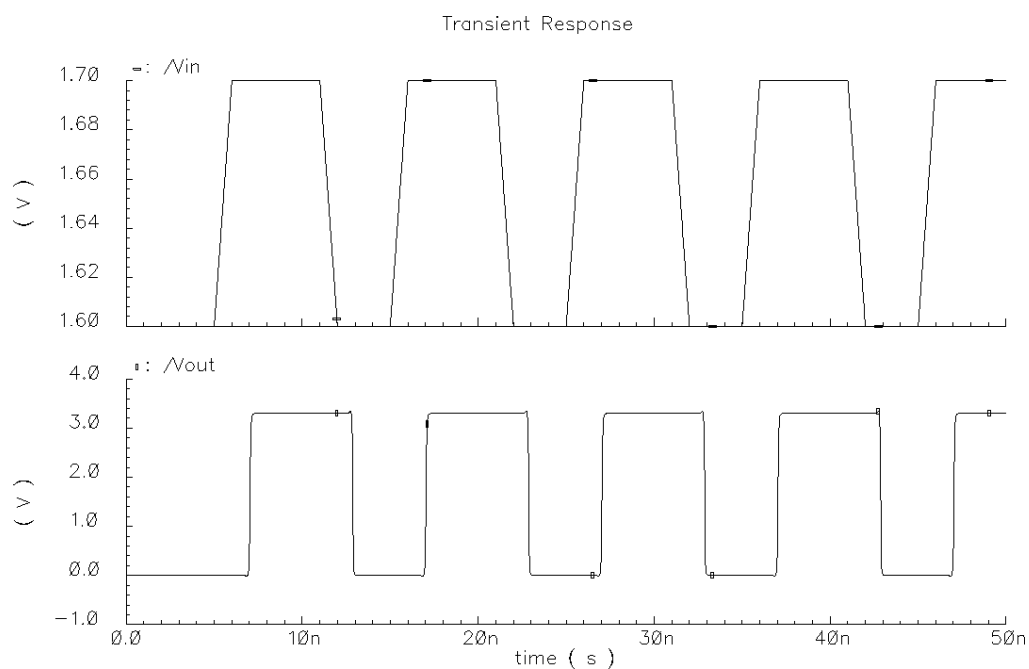
Pobór prądu przez komparator został określony na 1,5mA.

Kolejnym typem symulacji, którym został poddany układ, były symulacje typu *transient*. Pojedyncza symulacja polegała na podaniu sygnału prostokątnego na wejście komparatora i obserwowaniu sygnału wyjściowego. Przeprowadzane zostało pięć symulacji dla sygnałów prostokątnych o wysokościach: 20mV, 50mV, 100mV, 150mV i 200mV. W każdej symulacji sygnał prostokąty miał taki sam czas narastania i opadania równy 1ns i miał szerokość wynoszącą 5ns. Wyniki kilku symulacji zostały zaprezentowane poniżej w postaci graficznej na rysunkach: (3.3), (3.4), (3.5).

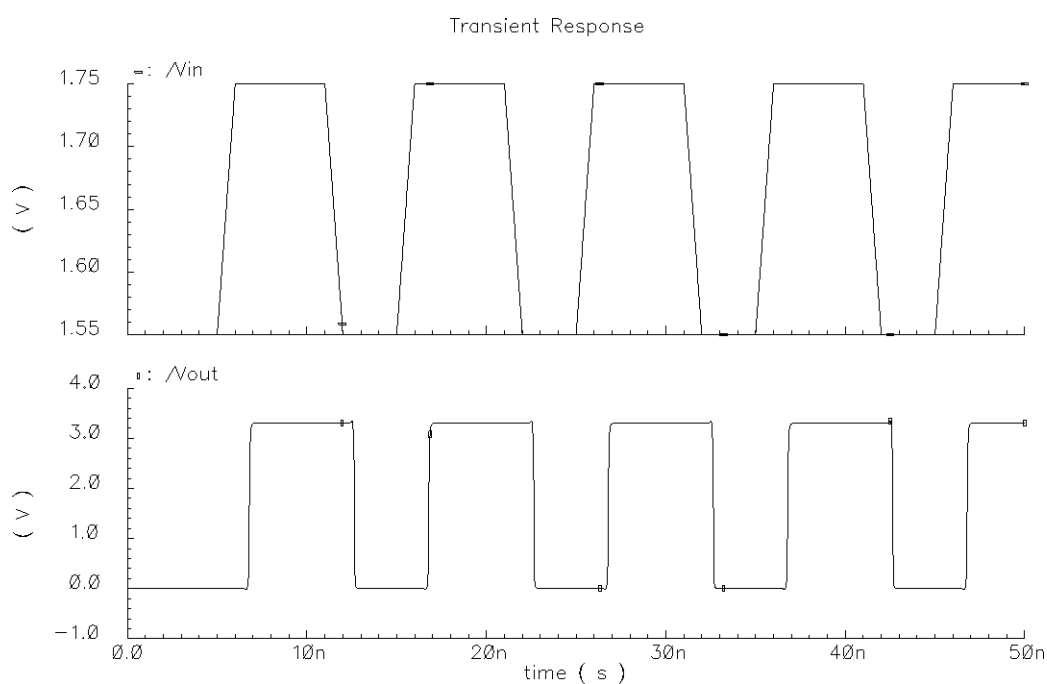


Rysunek 3.3: Symulacja transient: sygnał prostokątny o wysokości 20mV.





Rysunek 3.4: Symulacja transient: sygnał prostokątny o wysokości 100mV.

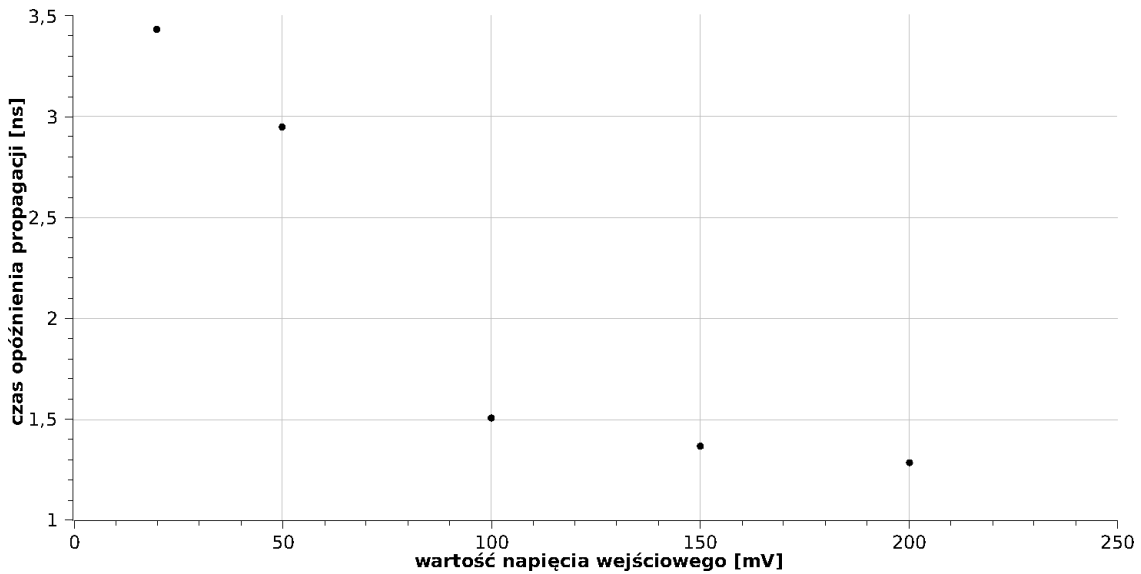


Rysunek 3.5: Symulacja transient: sygnał prostokątny o wysokości 200mV.

Na podstawie rezultatów symulacji został zmierzony czas opóźnienia reakcji komparatora od amplitudy sygnału wejściowego. Za czas propagacji był brany czas, który upływał od momentu osiągnięcia przez sygnał wejściowy 50% wysokości do momentu osiągnięcia przez wyjście komparatora 50% napięcia zasilania. Wyniki pomiarów zostały przedstawione w tabeli (3.1) i graficznie na rysunku (3.6).

lp.	Wysokość sygnału [mV]	Czas opóźnienia propagacji [ns]
1	20	3,43
2	50	2,95
3	100	1,51
4	150	1,37
5	200	1,29

Tabela 3.1: Wyniki pomiaru czasu narastania



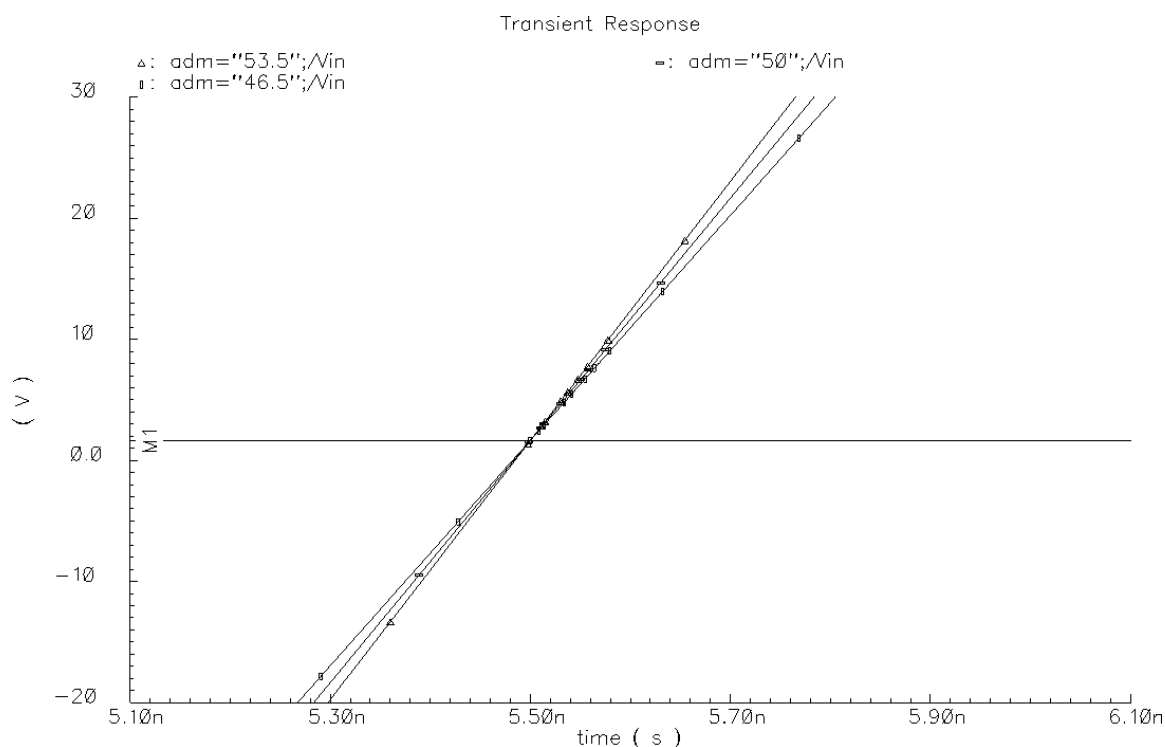
Rysunek 3.6: Wykres czasu opóźnienia propagacji od amplitudy sygnału wejściowego

Z wykresu przedstawionego na rysunku (3.6) widzimy zgodność wyników symulacji z teoretycznymi rozważaniami dotyczącymi czasu propagacji.

Kolejną symulacją miała być symulacja *transient* z uwzględnionym szumem, która przedstawiałaby wpływ szumu w sygnale wejściowym na czas załączania komparatora. Niestety wersja programu Cadence zainstalowana na serwerze fatcat, nie posiadała możliwości przeprowadzenia takiej symulacji. Dlatego zostały przeprowadzone symulacje *transient*, w których amplituda sygnału wejściowego została zmodulowana wartością  $\pm\sigma$  symulująca wpływ szumów na pracę komparatora. Wartość  $\sigma$ -my została obliczona przez podzielenie wartości szumów na wyjściu komparatora przez jego wzmocnienie.

$$\sigma = \frac{166,4mV}{50} \approx 3.5mV \quad (3.4)$$

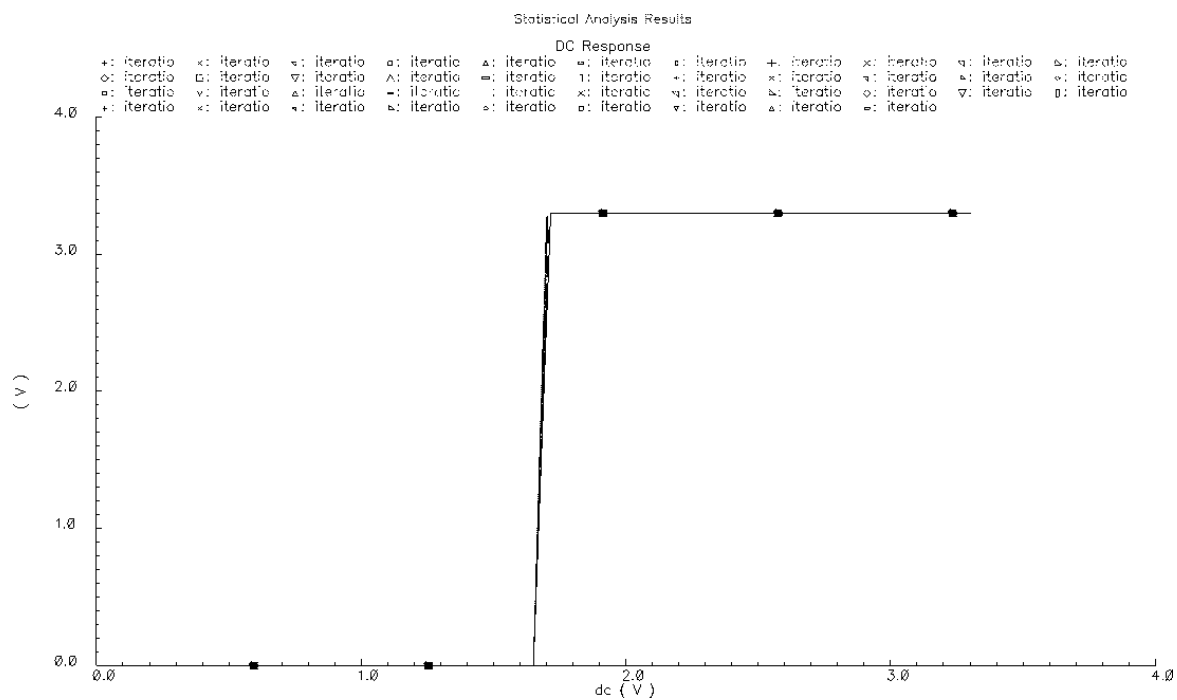
W symulacje zostały przeprowadzone dla sygnału prostokątnego o amplitudzie podstawowej 50mV. Wynik symulacji został przedstawiony poniżej na rysunku (3.7).



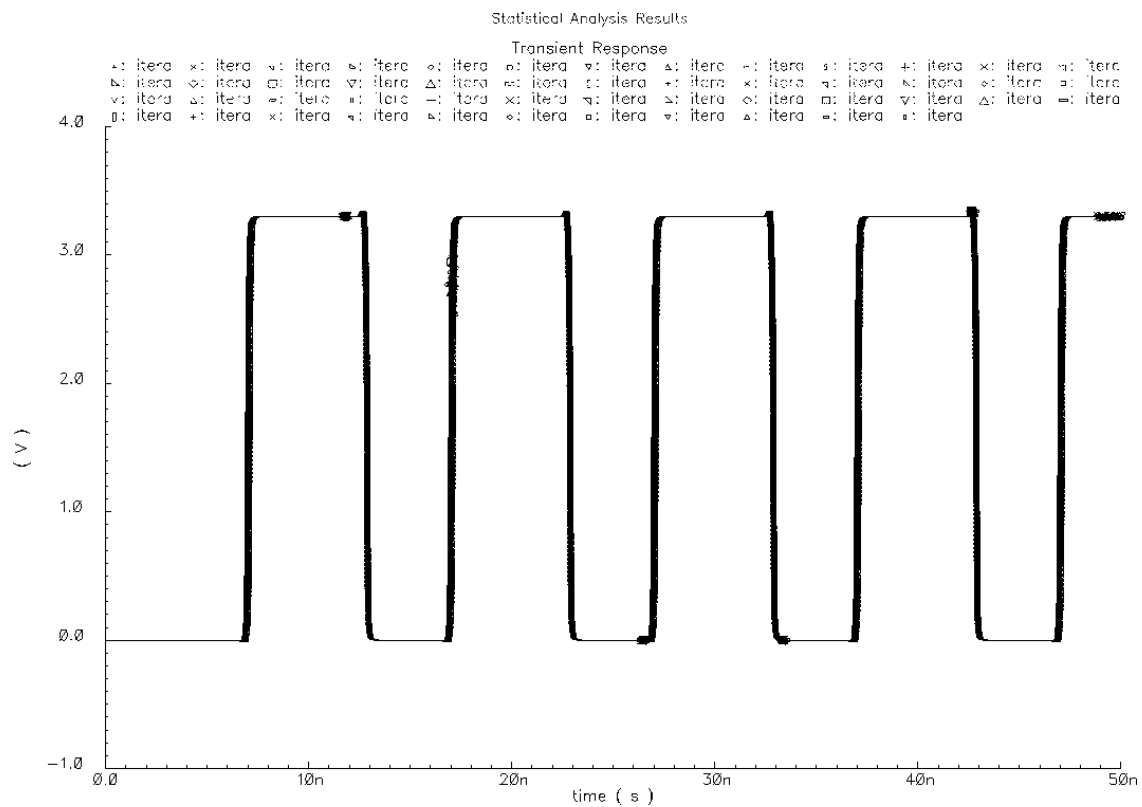
Rysunek 3.7: Symulacja transient: sygnał prostokątny o amplitudach: 46,5mv; 50mV; 53,5mV

Na podstawie tak przeprowadzonych symulacji, możemy jedynie jakościowo stwierdzić jak szum w sygnale wejściowym wpływa na czas reakcji komparatora. Z rysunku (3.7) jednak widać, że czas propagacji nie ulega zmianie dla takiego prostokątnego sygnału wejściowego.

Dodatkowo zostały przeprowadzone symulacje Monte Carlo komparatora uwzględniające rozrzut produkcyjny parametrów tranzystorów. Dla symulacji dc response i transient response zostało przeprowadzone 50 powtórzeń. W symulacji transient response sygnałem wejściowym był sygnał prostokątny o amplitudzie 30mV o czasie na narastania i opadania równym 1ns i miał szerokość 5ns. Wyniki symulacji Monte Carlo zostały zamieszczone na rysunkach (3.8), (3.9). Na podstawie rezultatów symulacji Monte Carlo, możemy stwierdzić że rozrzut produkcyjny parametrów tranzystorów nie będzie wpływał negatywnie na pracę komparatora.



Rysunek 3.8: Symulacja Monte Carlo: DC Response.



Rysunek 3.9: Symulacja Monte Carlo: Transient Response.

# Podsumowanie

W trakcie wykonywania pracy inżynierskiej pogłębiłem wiedzę teoretyczną na temat budowy i zasady działania komparatorów oraz zapoznałem się z podstawowymi zasadami projektowania układów scalonych. Nabyłem również doświadczenia w pracy z pakietem Cadence. Wynikiem pracy inżynierskiej był kompletny projekt komparatora statycznego, który spełnił wszystkie założenia projektowe.



# Bibliografia

- [1] Paul R. Gray, Paul J. Hurst, Stephen H. Lewis, Robert G. Meyer: *Analysis and design of analog integrated circuits*, John Wiley & Sons Inc., 2001.
- [2] R. Jacob Baker, Harry W. Li, David E. Boyce: *CMOS Circuit Design, Layout, and Simulation*, John Wiley & Sons Inc., 1997.
- [3] Roubik Gregorian: *Introduction to CMOS OP-AMPs and Comparators*, John Wiley & Sons Inc., 1999.
- [4] <http://ims.unipv.it/Microelettronica/PresentationNO06.pdf>, 10.12.2010.





# Spis rysunków

1.1	Symbol komparatora . . . . .	8
1.2	Funkcja przenoszenia idealnego komparatora o nieskończonym wzmacnieniu. . . . .	8
1.3	Funkcja przenoszenia komparatora o skończonym wzmacnieniu. . . . .	8
1.4	Funkcja przenoszenia komparatora o skończonym wzmacnieniu z uwzględnionym offsetem napięciowym. . . . .	9
1.5	Czas opóźnienia propagacji . . . . .	11
1.6	Zależność czasu opóźnienia propagacji od amplitudy sygnału wejściowego . . . . .	11
1.7	Komparator bez histerezy. . . . .	12
1.8	Komparator z histerezą. . . . .	12
1.9	Charakterystyka komparatora z histerezą. . . . .	12
1.10	Budowa komparatora regeneracyjnego z przedwzmacniaczem i buforem wyjściowym . . . . .	13
2.1	Schemat stopnia wejściowego komparatora. . . . .	16
2.2	Schemat stopnia układu decyzyjnego. . . . .	17
2.3	Schemat bufora wyjściowego. . . . .	18
2.4	Schemat komparatora. . . . .	20
3.1	Charakterystyka napięciowa komparatora. . . . .	21
3.2	Histereza komparatora . . . . .	21
3.3	Symulacja transient: sygnał prostokątny o wysokości 20mV. . . . .	22
3.4	Symulacja transient: sygnał prostokątny o wysokości 100mV. . . . .	23
3.5	Symulacja transient: sygnał prostokątny o wysokości 200mV. . . . .	23
3.6	Wykres czasu opóźnienia propagacji od amplitudy sygnału wejściowego . . . . .	24
3.7	Symulacja transient: sygnał prostokątny o amplitudach: 46,5mv; 50mV; 53,5mV . . . . .	25
3.8	Symulacja Monte Carlo: DC Response. . . . .	26
3.9	Symulacja Monte Carlo: Transient Response. . . . .	26



# Spis tabel

2.1	Wymiary tranzystorów . . . . .	19
3.1	Wyniki pomiaru czasu narastania . . . . .	24