



به نام خدا



دانشگاه تهران

پردیس دانشکده‌های فنی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

الکترونیک دیجیتال

تمرین کامپیوتری ۲

محمد تقی زاده

۸۱۰۱۹۸۳۷۳

پاییز ۱۴۰۱

چکیده

در این تمرین، ابتدا یک مدار تمام جمع کننده را با استفاده از نرم افزار HSPICE، طراحی کرده، سپس پارامتر های تاخیر، توان متوسط پویا و توان ایستا را برای مدار طراحی شده محاسبه می کنیم. در آخر مدار را در دماهای ۰، ۲۵ (دمای اتاق) و ۱۰۰ شبیه سازی کرده و اثر تغییر دما بر پارامتر های تاخیر، توان متوسط پویا و توان ایستا را بیان می کنیم.

بخش های الف و ب

ابتدا مدار تمام جمع کننده را در HSPICE، طراحی می کنیم:

- برای ترانزیستور از کتابخانه mm018 استفاده میکنیم. برای این کار از TT، استفاده می کنیم زیرا

کرر TT، برای ترانزیستور های معمولی با سرعت متوسط استفاده می شود.

- ترانزیستور های PMOS، را به صورت یک آرایه ۲ در ۱ دیدیم و نام گذاری کردیم.

- سپس ترانزیستور های NMOS متناظر با ترانزیستور های PMOS، را مشابه ترانزیستور های PMOS،

نام گذاری کردیم، با این تفاوت که بجای حرف P، حرف N را قرار دادیم.

- مدار اینورتر را به صورت Subcircuit، به کمک دستور subckt، تعریف می کنیم.

Full_Adder_temp_0 - Microsoft Word

File Home Insert Page Layout References Mailings Review View Acrobat

Courier New 10.5 A' Aa [Font icons] [Paragraph icons] [Style icons]

Normal No Spacing Heading 1 Heading 2 Title Subtitle Subtle Em... Change Styles Edit

```

***** Main Code*****

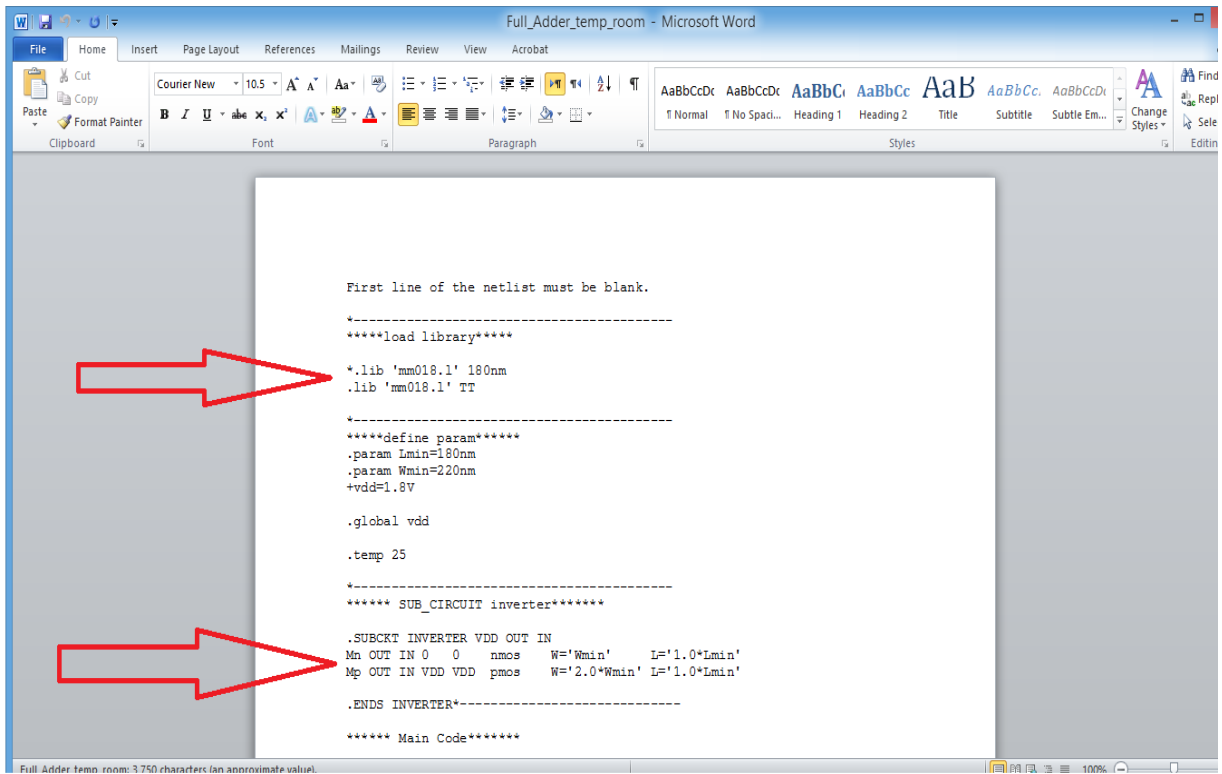
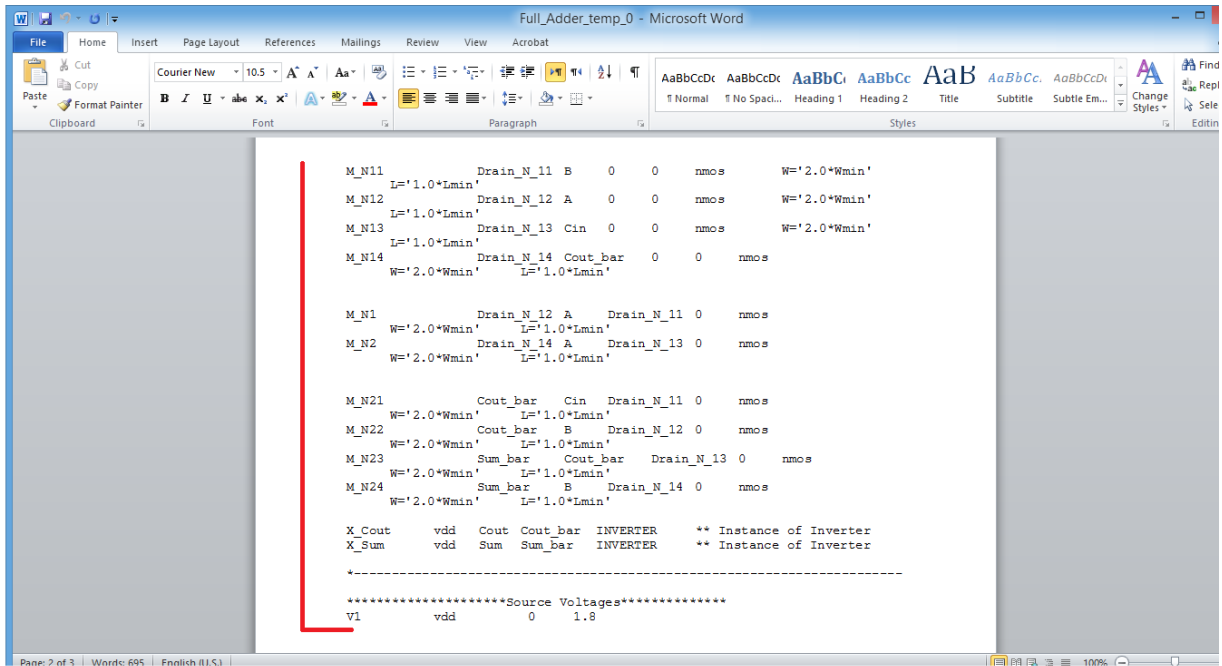
*M(name) ND NG NS NB Modelname W L
M_P11 Drain_P_11 B vdd vdd pmos W='6.0*Wmin'
      L='1.0*Lmin'
M_P12 Drain_P_12 A vdd vdd pmos W='6.0*Wmin'
      L='1.0*Lmin'
M_P13 Drain_P_13 Cin vdd vdd pmos W='6.0*Wmin'
      L='1.0*Lmin'
M_P14 Drain_P_14 Cout_bar Vdd vdd pmos
      W='6.0*Wmin'      L='1.0*Lmin'

M_P1 Drain_P_12 A Drain_P_11 vdd pmos
      W='6.0*Wmin'      L='1.0*Lmin'
M_P2 Drain_P_14 A Drain_P_13 vdd pmos
      W='6.0*Wmin'      L='1.0*Lmin'

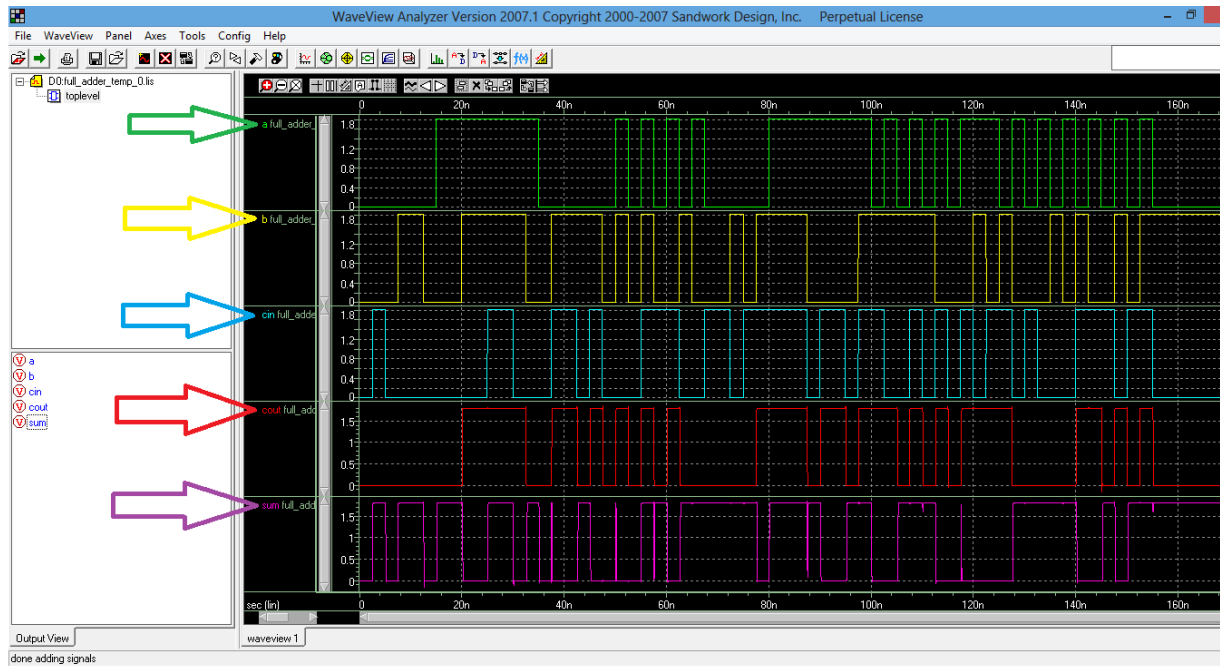
M_P21 Cout_bar Cin Drain_P_11 vdd pmos
      W='6.0*Wmin'      L='1.0*Lmin'
M_P22 Cout_bar B Drain_P_12 vdd pmos
      W='6.0*Wmin'      L='1.0*Lmin'
M_P23 Sum_bar Cout_bar Drain_P_13 vdd pmos
      W='6.0*Wmin'      L='1.0*Lmin'
M_P24 Sum_bar B Drain_P_14 vdd pmos
      W='6.0*Wmin'      L='1.0*Lmin'

```

Page: 1 of 1 Words: 695 English (US) 100%

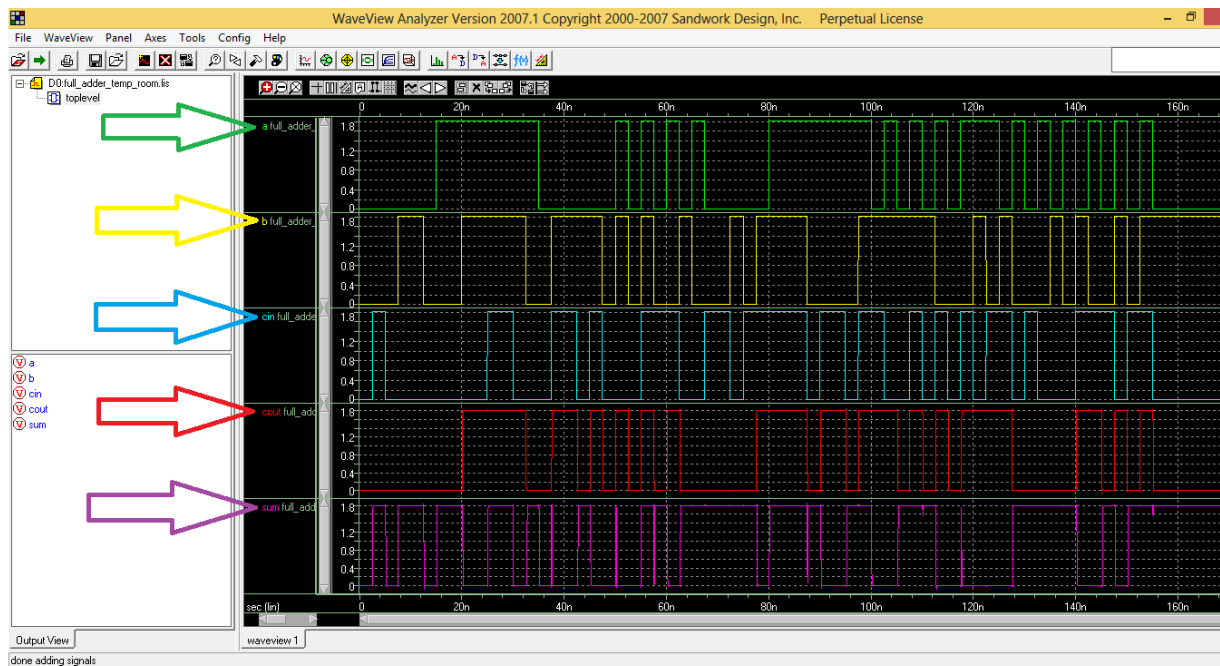


خروجی شبیه سازی مدار تمام جمع کننده در دمای ۰ درجه:



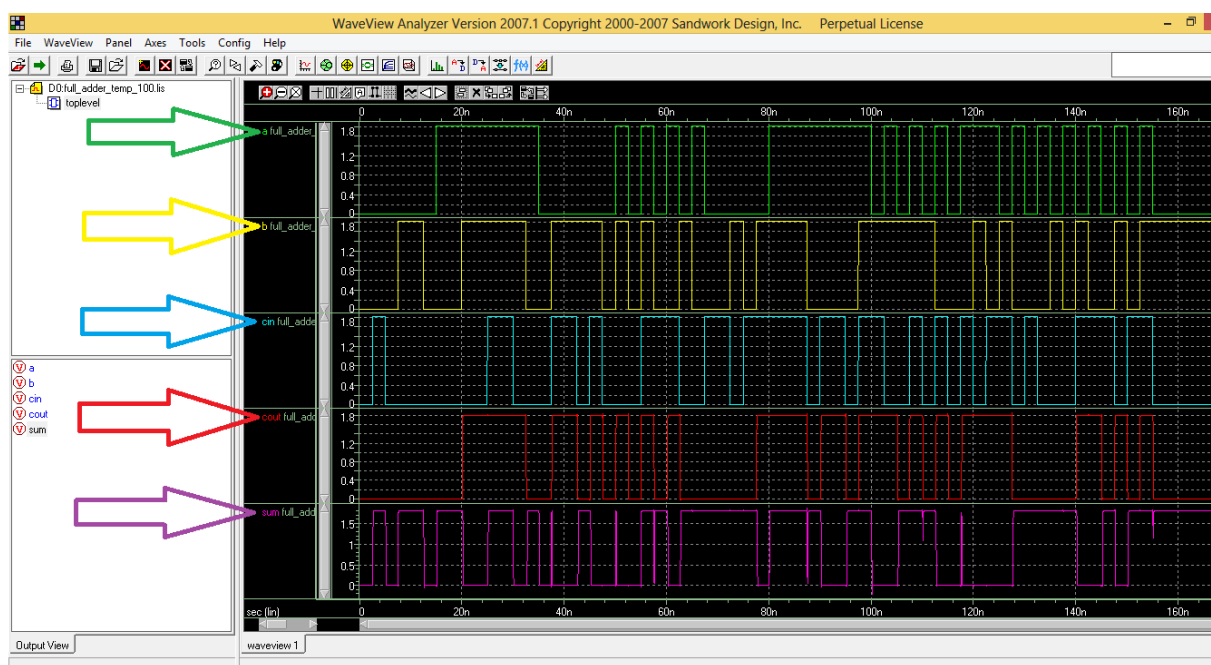
همان طور که در تصویر فوق میبینید، خروجی sum، زمانی که ۱ یا ۳ تا از ورودی ها ۱ باشند، ۱ شده است و خروجی cout، نیز زمانی که حداقل ۲ تا از ورودی ها ۱ باشند، ۱ شده است که این نشان دهنده درستی عملکرد مدار تمام جمع کننده ما در دمای ۰ درجه است.

خروجی شبیه سازی مدار تمام جمع کننده در دمای اتاق (۲۵ درجه):



همان طور که در تصویر فوق میبینید، خروجی sum، زمانی که ۱ یا ۳ تا از ورودی ها ۱ باشند، ۱ شده است و خروجی cout، نیز زمانی که حداقل ۲ تا از ورودی ها ۱ باشند، ۱ شده است که این نشان دهنده درستی عملکرد مدار تمام جمع کننده ما در دمای اتاق (۲۵ درجه) است.

خروجی شبیه سازی مدار تمام جمع کننده در دمای ۱۰۰ درجه:



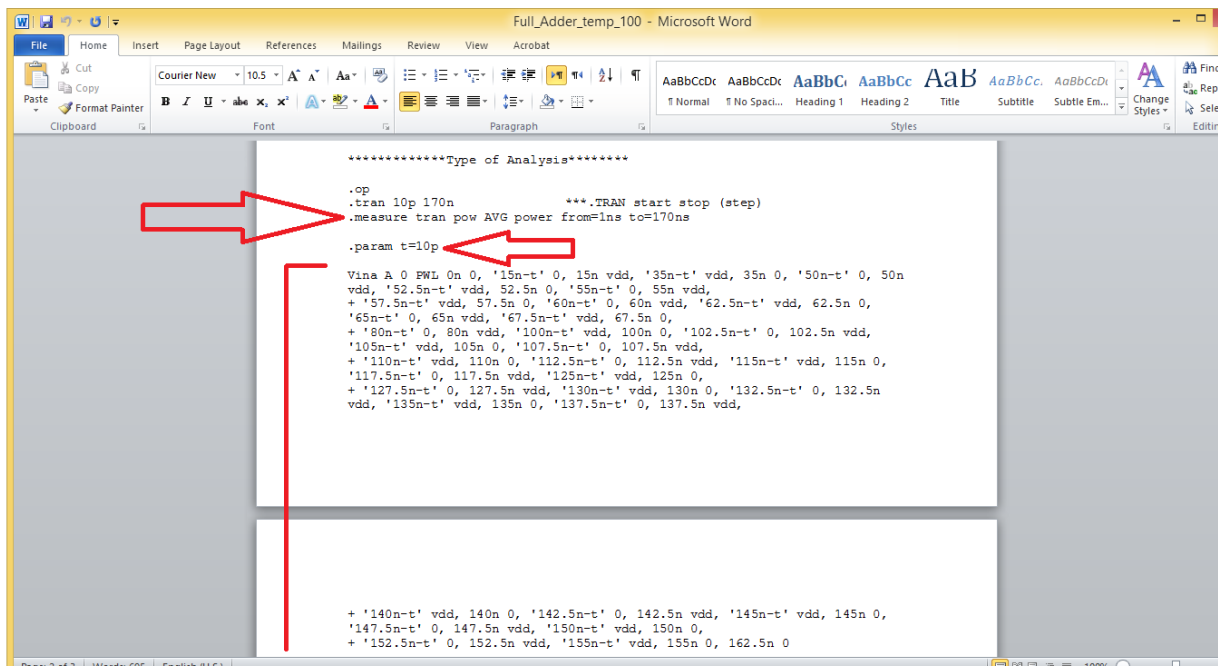
همان طور که در تصویر فوق میبینید، خروجی sum، زمانی که ۱ یا ۳ تا از ورودی ها ۱ باشند، ۱ شده است و خروجی cout، نیز زمانی که حداقل ۲ تا از ورودی ها ۱ باشند، ۱ شده است که این نشان دهنده درستی عملکرد مدار تمام جمع کننده ما در دمای ۱۰۰ درجه است.

محاسبه توان متوسط پویا

برای محاسبه توان پویا، تمام حالات ورودی ها A، B و C که در فایل Complete_3_input_Pattern موجود است را، به کد اضافه میکنیم، سپس از دستور

```
.measure tran pow AVG power from=1ns to=170ns
```

برای محاسبه توان متوسط پویا استفاده می کنیم:



توان متوسط پویا مدار تمام جمع کننده در دمای ۰ درجه:

```
full_adder_temp_0 - WordPad
File Home View
1 2 3 4 5 6 7
1.3399f
cgs 153.9300a 153.9300a 203.6388a 134.4800a 203.6388a
134.4800a
cgd 153.9300a 153.9300a 203.6388a 134.4800a 203.6388a
134.4800a

*****
first line of the netlist must be blank.
***** transient analysis tncm= 25.000 temp= 0.000 *****
pow= 1.3073E-05 from= 1.0000E-09 to= 1.7000E-07
x

time voltage voltage voltage voltage
sum cout a b
0. 0. 0. 0. 0.
10.00000p 0. 0. 0. 0.
20.00000p 0. 0. 0. 0.
30.00000p 0. 0. 0. 0.
40.00000p 0. 0. 0. 0.
50.00000p 0. 0. 0. 0.
60.00000p 0. 0. 0. 0.
70.00000p 0. 0. 0. 0.
80.00000p 0. 0. 0. 0.
90.00000p 0. 0. 0. 0.
100.00000p 0. 0. 0. 0.
110.00000p 0. 0. 0. 0.
120.00000p 0. 0. 0. 0.
130.00000p 0. 0. 0. 0.
140.00000p 0. 0. 0. 0.
150.00000p 0. 0. 0. 0.
160.00000p 0. 0. 0. 0.
170.00000p 0. 0. 0. 0.
180.00000p 0. 0. 0. 0.
100%
```

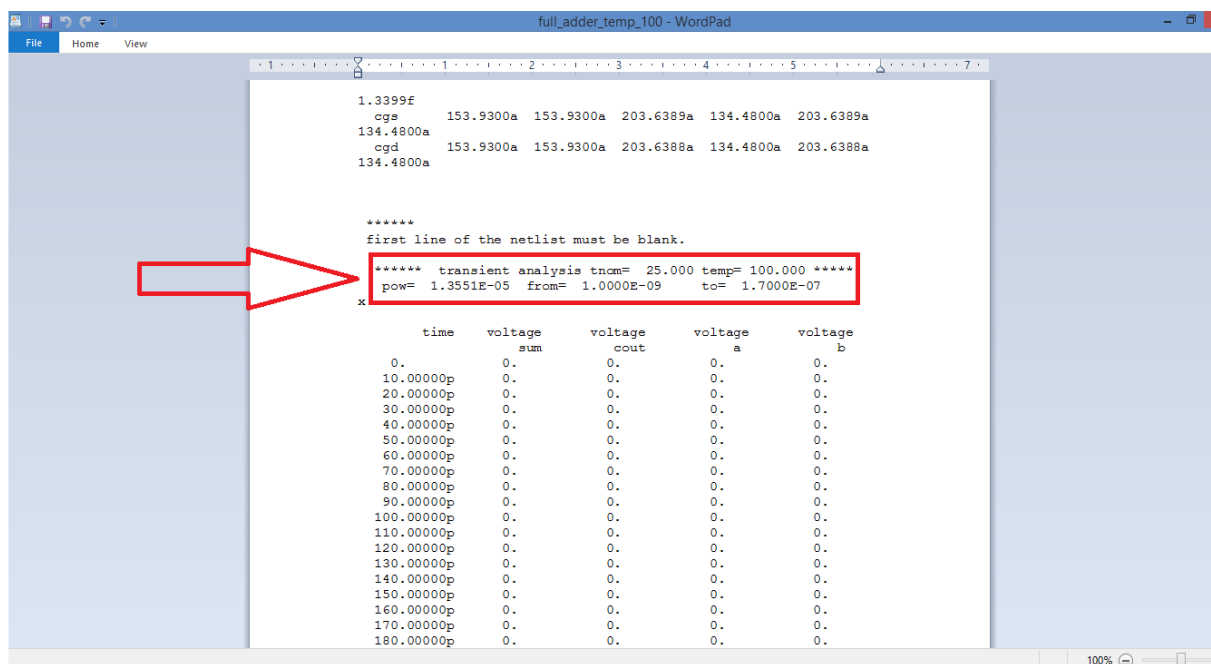
توان متوسط پویا مدار تمام جمع کننده در دمای اتاق (۲۵ درجه):

```
full_adder_temp_room - WordPad
File Home View
1 2 3 4 5 6 7
1.3399f
cgs 153.9300a 153.9300a 203.6388a 134.4800a 203.6388a
134.4800a
cgd 153.9300a 153.9300a 203.6388a 134.4800a 203.6388a
134.4800a

*****
first line of the netlist must be blank.
***** transient analysis tncm= 25.000 temp= 25.000 *****
pow= 1.3250E-05 from= 1.0000E-09 to= 1.7000E-07
x

time voltage voltage voltage voltage
sum cout a b
0. 0. 0. 0. 0.
10.00000p 0. 0. 0. 0.
20.00000p 0. 0. 0. 0.
30.00000p 0. 0. 0. 0.
40.00000p 0. 0. 0. 0.
50.00000p 0. 0. 0. 0.
60.00000p 0. 0. 0. 0.
70.00000p 0. 0. 0. 0.
80.00000p 0. 0. 0. 0.
90.00000p 0. 0. 0. 0.
100.00000p 0. 0. 0. 0.
110.00000p 0. 0. 0. 0.
120.00000p 0. 0. 0. 0.
130.00000p 0. 0. 0. 0.
140.00000p 0. 0. 0. 0.
150.00000p 0. 0. 0. 0.
160.00000p 0. 0. 0. 0.
170.00000p 0. 0. 0. 0.
180.00000p 0. 0. 0. 0.
100%
```

توان متوسط پویا مدار تمام جمع کننده در دمای ۱۰۰ درجه:



```
1.3399f
cgs      153.9300a 153.9300a 203.6389a 134.4800a 203.6389a
134.4800a
cgsd     153.9300a 153.9300a 203.6388a 134.4800a 203.6388a
134.4800a

*****
first line of the netlist must be blank.
***** transient analysis tncm= 25.000 temp= 100.000 *****
pow= 1.3551E-05 from= 1.0000E-09 to= 1.7000E-07
x

      time      voltage      voltage      voltage      voltage
      sum      cout      a      b
0.      0.      0.      0.      0.
10.00000p 0.      0.      0.      0.
20.00000p 0.      0.      0.      0.
30.00000p 0.      0.      0.      0.
40.00000p 0.      0.      0.      0.
50.00000p 0.      0.      0.      0.
60.00000p 0.      0.      0.      0.
70.00000p 0.      0.      0.      0.
80.00000p 0.      0.      0.      0.
90.00000p 0.      0.      0.      0.
100.00000p 0.      0.      0.      0.
110.00000p 0.      0.      0.      0.
120.00000p 0.      0.      0.      0.
130.00000p 0.      0.      0.      0.
140.00000p 0.      0.      0.      0.
150.00000p 0.      0.      0.      0.
160.00000p 0.      0.      0.      0.
170.00000p 0.      0.      0.      0.
180.00000p 0.      0.      0.      0.
```

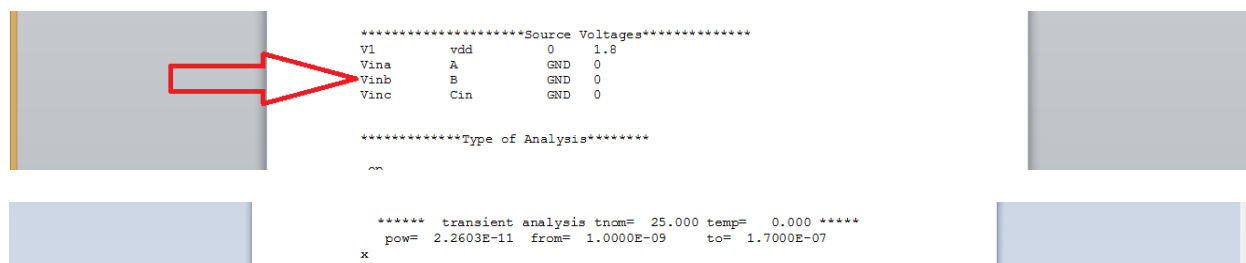
همان طور که در تصاویر فوق میبینید، با افزایش دما، توان متوسط پویا هم افزایش یافته است. افزایش دما باعث افزایش جریان درین ترانزیستور می شود و V_t و میو(موبیلیتی) نیز در اثر افزایش دما تغییر می کند. در نتیجه توان متوسط پویا نیز افزایش می یابد.

محاسبه توان ایستا

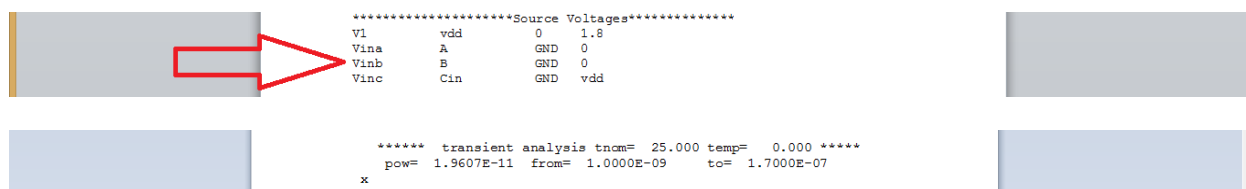
برای محاسبه توان ایستا، کافیت ورودی های قبلی، موجود در فایل Complete_3_input_Pattern، را حذف و در ۸ حالت، ترنزیشن های ۰۰۰، ۰۰۱، ۰۱۰، ۰۱۱، ۱۰۰، ۱۰۱، ۱۱۰ و ۱۱۱ را به مدار اعمال کنیم و در هر حالت، توان متوسط پویا را محاسبه کنیم. در آخر از توان های متوسط پویا بدست آمده در ۸ حالت، میانگین گرفته و توان ایستا بدست می آید.

توان ایستا مدار تمام جمع کننده در دمای ۰ درجه:

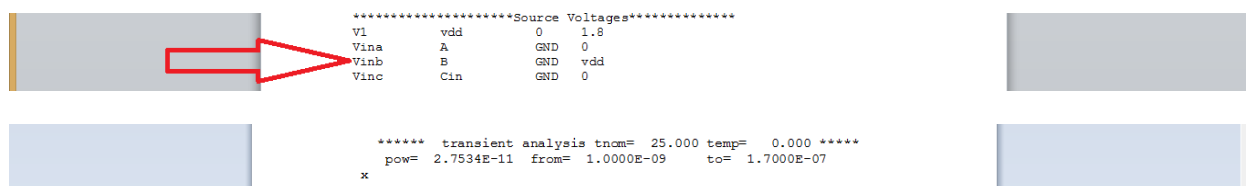
توان متوسط پویا حالت ۰۰۰:



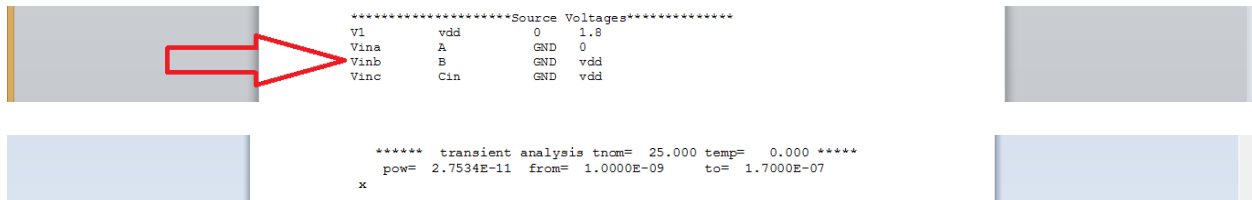
توان متوسط پویا حالت ۰۰۱:



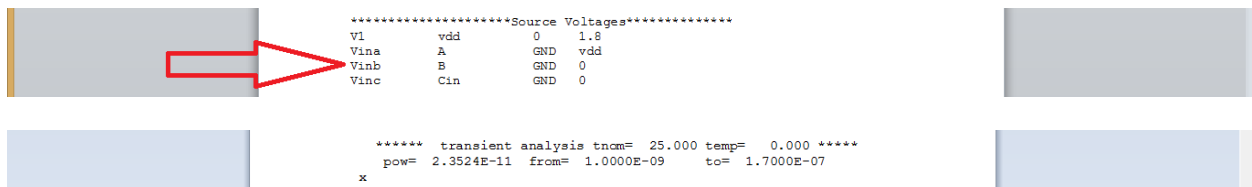
توان متوسط پویا حالت ۰۱۰:



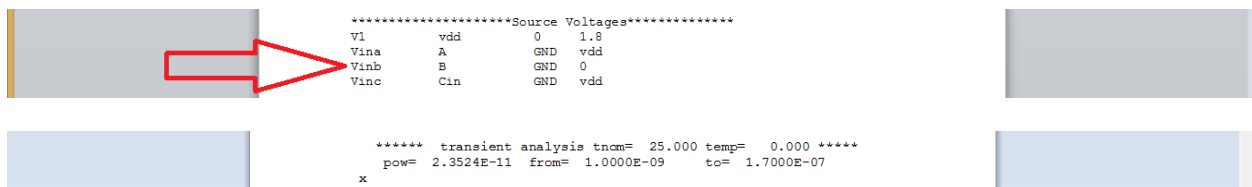
توان متوسط پویا حالت 011:



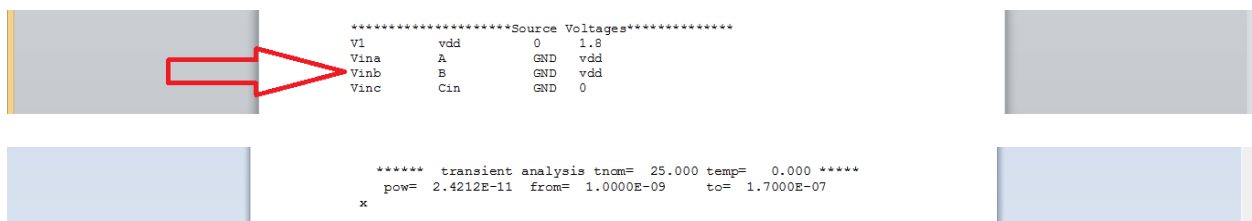
توان متوسط پویا حالت 100:



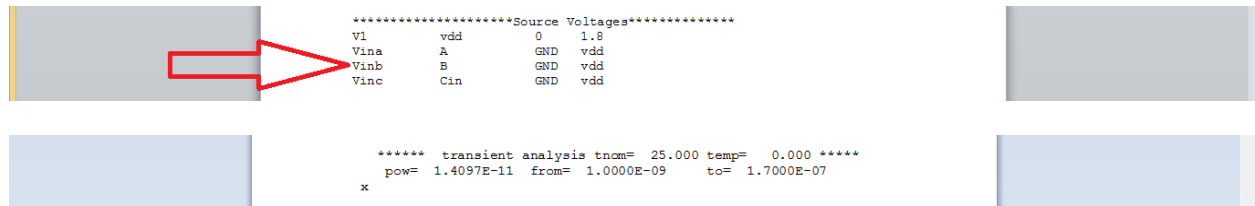
توان متوسط پویا حالت 101:



توان متوسط پویا حالت 110:



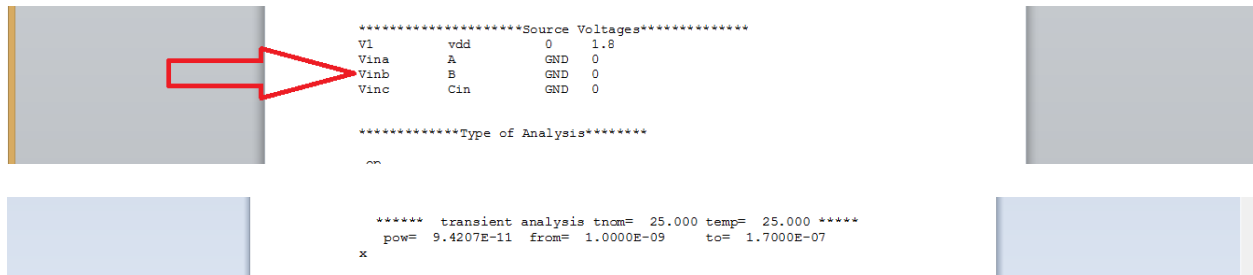
توان متوسط پویا حالت 111:



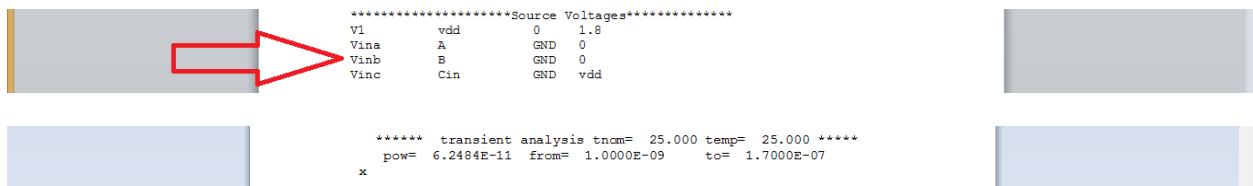
$$\Rightarrow P_{static} = (P_{000} + P_{001} + P_{010} + \dots + P_{111}) / 8 = 2.2829375 \times 10^{-11}$$

توان ایستا مدار تمام جمع کننده در دمای اتاق (۲۵ درجه):

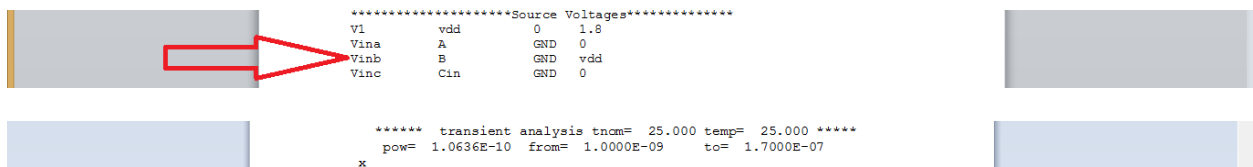
توان متوسط پویا حالت 000:



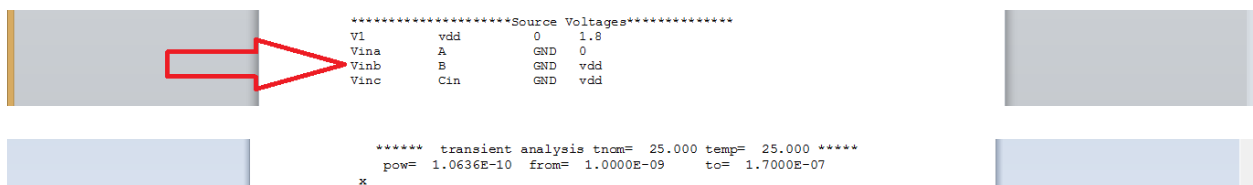
توان متوسط پویا حالت 001:



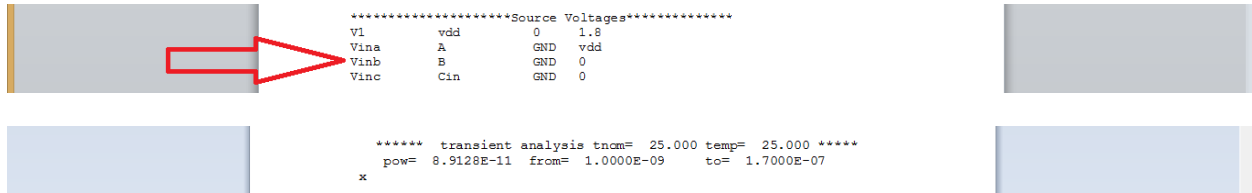
توان متوسط پویا حالت 010:



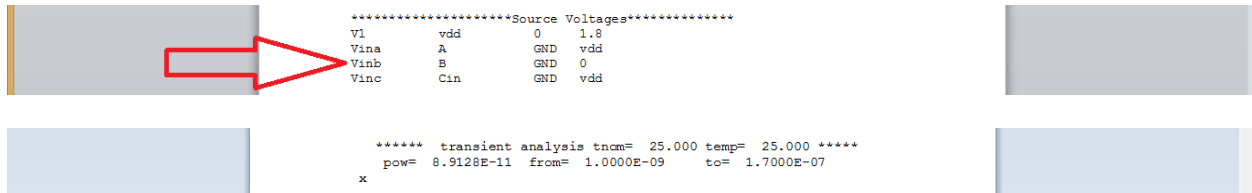
توان متوسط پویا حالت 011:



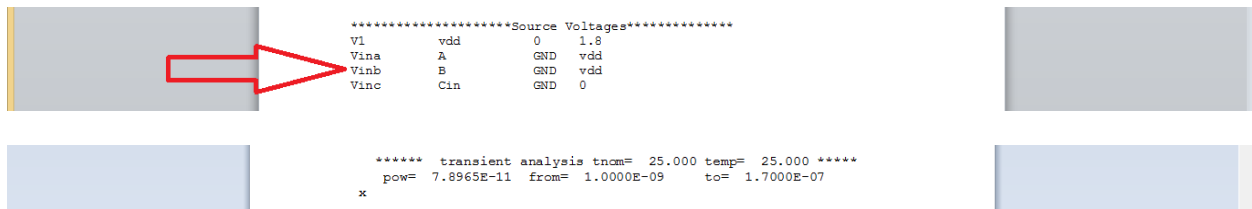
توان متوسط پویا حالت 100:



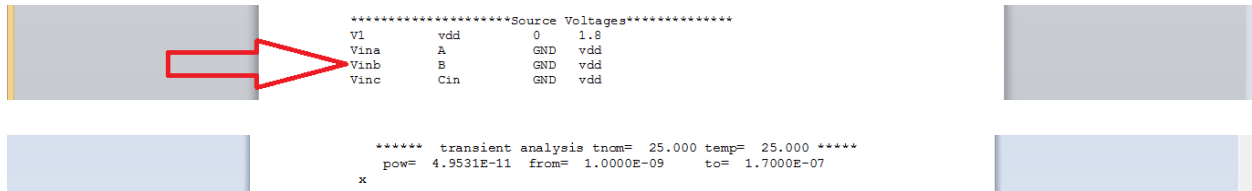
توان متوسط پویا حالت 101:



توان متوسط پویا حالت 110:



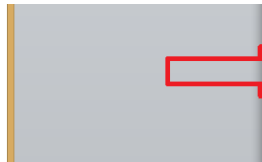
توان متوسط پویا حالت 111:



$$\Rightarrow P_{static} = (P_{000} + P_{001} + P_{010} + \dots + P_{111}) / 8 = 8.4520375 \times 10^{-11}$$

توان ایستا مدار تمام جمع کننده در دمای ۱۰۰ درجه:

توان متوسط پویا حالت 000:

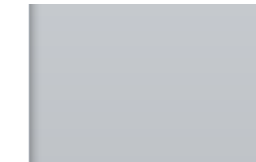


A circuit schematic for Case 000. It features a voltage source V1 connected to node A. Node A is connected to node B, which is connected to node C. Node C is connected to ground. A red arrow points to node A.

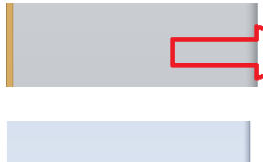
```
*****Source Voltages*****
V1      vdd      0      1.8
Vina    A        GND    0
Vinb    B        GND    0
Vinc    C        GND    0

*****Type of Analysis*****
tc

***** transient analysis tnom= 25.000 temp= 100.000 *****
pow= 2.3386E-09 from= 1.0000E-09 to= 1.7000E-07
x
```

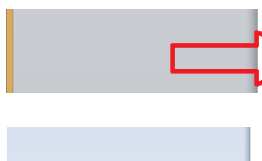


A circuit schematic for Case 001. It features a voltage source V1 connected to node A. Node A is connected to node B, which is connected to node C. Node C is connected to ground. A red arrow points to node A.



A circuit schematic for Case 010. It features a voltage source V1 connected to node A. Node A is connected to node B, which is connected to node C. Node C is connected to ground. A red arrow points to node A.

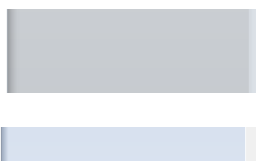
توان متوسط پویا حالت 001:



A circuit schematic for Case 001. It features a voltage source V1 connected to node A. Node A is connected to node B, which is connected to node C. Node C is connected to ground. A red arrow points to node A.


```
*****Source Voltages*****
V1      vdd      0      1.8
Vina    A        GND    0
Vinb    B        GND    0
Vinc    C        GND    vdd

***** transient analysis tnom= 25.000 temp= 100.000 *****
pow= 2.6608E-09 from= 1.0000E-09 to= 1.7000E-07
x
```



A circuit schematic for Case 011. It features a voltage source V1 connected to node A. Node A is connected to node B, which is connected to node C. Node C is connected to ground. A red arrow points to node A.

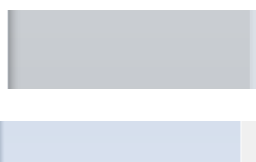
توان متوسط پویا حالت 010:



A circuit schematic for Case 010. It features a voltage source V1 connected to node A. Node A is connected to node B, which is connected to node C. Node C is connected to ground. A red arrow points to node A.


```
*****Source Voltages*****
V1      vdd      0      1.8
Vina    A        GND    0
Vinb    B        GND    vdd
Vinc    C        GND    0

***** transient analysis tnom= 25.000 temp= 100.000 *****
pow= 2.7942E-09 from= 1.0000E-09 to= 1.7000E-07
x
```



A circuit schematic for Case 011. It features a voltage source V1 connected to node A. Node A is connected to node B, which is connected to node C. Node C is connected to ground. A red arrow points to node A.

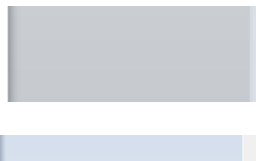
توان متوسط پویا حالت 011:



A circuit schematic for Case 011. It features a voltage source V1 connected to node A. Node A is connected to node B, which is connected to node C. Node C is connected to ground. A red arrow points to node A.

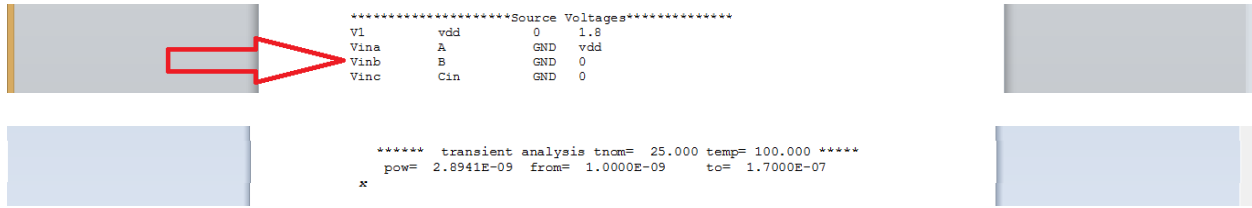
```
*****Source Voltages*****
V1      vdd      0      1.8
Vina    A        GND    0
Vinb    B        GND    vdd
Vinc    C        GND    vdd

***** transient analysis tnom= 25.000 temp= 100.000 *****
pow= 2.7942E-09 from= 1.0000E-09 to= 1.7000E-07
x
```

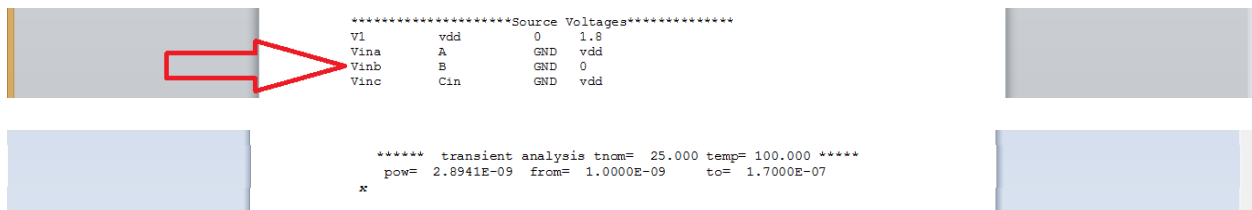


A circuit schematic for Case 011. It features a voltage source V1 connected to node A. Node A is connected to node B, which is connected to node C. Node C is connected to ground. A red arrow points to node A.

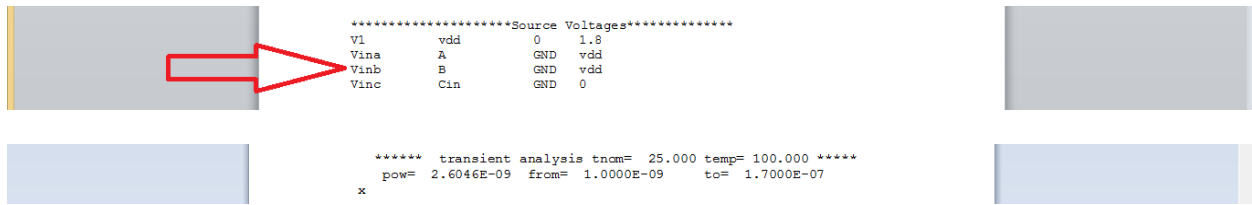
توان متوسط پویا حالت 100:



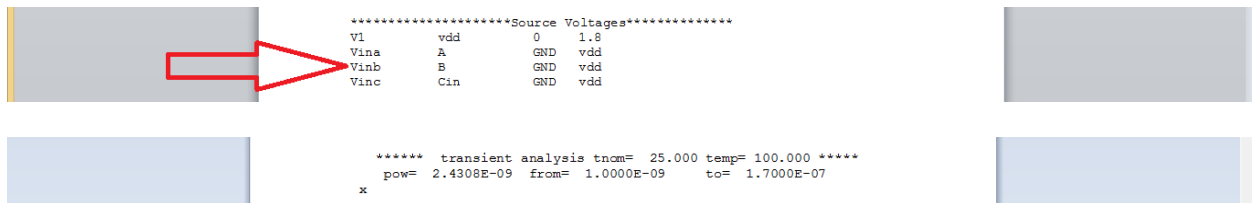
توان متوسط پویا حالت 101:



توان متوسط پویا حالت 110:



توان متوسط پویا حالت 111:



$$\Rightarrow P_{static} = (P_{000} + P_{001} + P_{010} + \dots + P_{111}) / 8 = 2.676425 \times 10^{-9}$$

همان طور که در تصاویر فوق میبینید، با افزایش دما، توان ایستا افزایش یافته است.

پیش تر دیدیم، که با افزایش دما، توان متوسط پویا افزایش می یابد. در نتیجه میانگین توان متوسط پویا

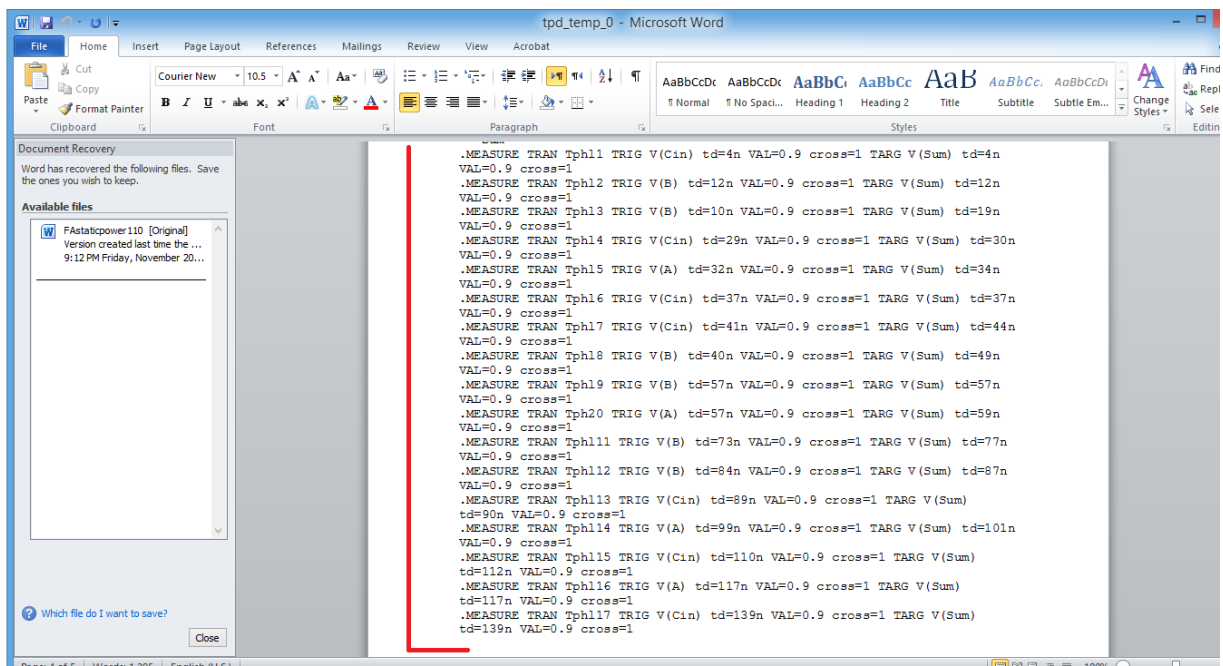
۸ حالت فوق نیز افزایش می یابد، در نتیجه توان ایستا نیز با افزایش دما، افزایش می یابد.

محاسبه تاخیر (Propagation delay)

برای محاسبه Propagation delay، شکل موج ها را بررسی می کنیم. زمان هایی که خروجی از ۰ به 1.8 یا بالعکس، رفته را در نظر میگیریم و بررسی می کنیم که تغییر در کدام ورودی باعث تغییر خروجی در آن زمان شده است. سپس اگر خروجی از ۰ به 1.8 رفته بود، Tplh و اگر برعکس بود، Tphl را برای خروجی محاسبه می کنیم. در آخر برای محاسبه تاخیر (tpd)، ماکسیم Tphl و Tplh را در نظر میگیریم. برای خروجی های Cout و Sum این کار را انجام می دهیم. ماکسیم دو مقدار بدست آمده، مقدار نهایی تاخیر (tpd) مدار تمام جمع کننده خواهد بود.

محاسبه Tplh و Tphl بر اساس توضیحات فوق:

```
.MEASURE TRAN Tplh1 TRIG V(Cin) td=1n VAL=0.9 cross=1 TARG V(Sum) td=2n VAL=0.9 cross=1
.MEASURE TRAN Tplh2 TRIG V(B) td=5n VAL=0.9 cross=1 TARG V(Sum) td=7n VAL=0.9 cross=1
.MEASURE TRAN Tplh3 TRIG V(A) td=14n VAL=0.9 cross=1 TARG V(Sum) td=15n VAL=0.9 cross=1
.MEASURE TRAN Tplh4 TRIG V(Cin) td=23n VAL=0.9 cross=1 TARG V(Sum) td=25n VAL=0.9 cross=1
.MEASURE TRAN Tplh5 TRIG V(B) td=30n VAL=0.9 cross=1 TARG V(Sum) td=32n VAL=0.9 cross=1
.MEASURE TRAN Tplh6 TRIG V(B) td=30n VAL=0.9 cross=1 TARG V(Sum) td=37n VAL=0.9 cross=1
.MEASURE TRAN Tplh7 TRIG V(Cin) td=42n VAL=0.9 cross=1 TARG V(Sum) td=42n VAL=0.9 cross=1
.MEASURE TRAN Tplh8 TRIG V(B) td=49n VAL=0.9 cross=1 TARG V(Sum) td=49n VAL=0.9 cross=1
.MEASURE TRAN Tplh9 TRIG V(B) td=54n VAL=0.9 cross=1 TARG V(Sum) td=54n VAL=0.9 cross=1
.MEASURE TRAN Tplh10 TRIG V(B) td=55n VAL=0.9 cross=1 TARG V(Sum) td=57n VAL=0.9 cross=1
.MEASURE TRAN Tplh11 TRIG V(B) td=62n VAL=0.9 cross=1 TARG V(Sum) td=66n VAL=0.9 cross=1
```



محاسبه تاخیر (tpd) مدار تمام جمع کننده در دما ۰ درجه:

tph1=	1.1251E-10	targ=	2.6075E-09	trig=	2.4950E-09
tph2=	6.6695E-11	targ=	7.5617E-09	trig=	7.4950E-09
tph3=	1.2045E-10	targ=	1.5115E-08	trig=	1.4995E-08
tph4=	1.3147E-10	targ=	2.5126E-08	trig=	2.4995E-08
tph5=	2.7125E-10	targ=	3.2766E-08	trig=	3.2495E-08
tph6=	5.0441E-09	targ=	3.7539E-08	trig=	3.2495E-08
tph7=	2.2296E-10	targ=	4.2718E-08	trig=	4.2495E-08
tph8=	6.0448E-11	targ=	5.0055E-08	trig=	4.9995E-08
tph9=	4.7279E-11	targ=	5.5042E-08	trig=	5.4995E-08
tph10=	7.8213E-11	targ=	5.7573E-08	trig=	5.7495E-08
tph11=	1.5262E-08	targ=	7.7757E-08	trig=	6.2495E-08
tph12=	1.2781E-10	targ=	8.0123E-08	trig=	7.9995E-08
tph13=	2.7080E-09	targ=	9.0203E-08	trig=	8.7495E-08
tph14=	2.6990E-10	targ=	9.5265E-08	trig=	9.4995E-08
tph15=	2.8008E-10	targ=	1.0528E-07	trig=	1.0500E-07
tph16=	9.8529E-11	targ=	1.1759E-07	trig=	1.1750E-07
tph17=	2.3372E-10	targ=	1.2773E-07	trig=	1.2749E-07
tph18=	2.7485E-09	targ=	1.4524E-07	trig=	1.4250E-07
tph19=	1.0239E-08	targ=	1.5023E-07	trig=	1.4000E-07
tph11=	1.5555E-10	targ=	5.1505E-09	trig=	4.9950E-09
tph12=	8.9938E-11	targ=	1.2585E-08	trig=	1.2495E-08
tph13=	7.7001E-09	targ=	2.0195E-08	trig=	1.2495E-08
tph14=	1.0756E-10	targ=	3.0103E-08	trig=	2.9995E-08
tph15=	1.3703E-10	targ=	3.5132E-08	trig=	3.4995E-08
tph16=	4.4126E-11	targ=	3.7539E-08	trig=	3.7495E-08
tph17=	2.6915E-09	targ=	4.5186E-08	trig=	4.2495E-08
tph18=	2.5604E-09	targ=	5.0055E-08	trig=	4.7495E-08
tph19=	7.8213E-11	targ=	5.7573E-08	trig=	5.7495E-08
tph20=	2.7442E-09	targ=	6.0239E-08	trig=	5.7495E-08
tph111=	2.7623E-09	targ=	7.7757E-08	trig=	7.4995E-08
tph112=	6.1164E-11	targ=	8.7556E-08	trig=	8.7495E-08
tph113=	2.0799E-10	targ=	9.0203E-08	trig=	8.9995E-08
tph114=	5.2801E-09	targ=	1.0528E-07	trig=	9.9995E-08
tph115=	2.0315E-10	targ=	1.1270E-07	trig=	1.1250E-07
tph116=	9.8529E-11	targ=	1.1759E-07	trig=	1.1750E-07
tph117=	2.2121E-10	targ=	1.4022E-07	trig=	1.4000E-07

tpd_temp_0 - WordPad			
File Home View			
1 2 3 4 5 6 7			
tph11=	1.5262E-08	targ=	7.7757E-08
tph12=	1.2781E-10	targ=	8.0123E-08
tph13=	2.7080E-09	targ=	9.0203E-08
tph14=	2.6990E-10	targ=	9.5265E-08
tph15=	2.8008E-10	targ=	1.0528E-07
tph16=	9.8529E-11	targ=	1.1759E-07
tph17=	2.3372E-10	targ=	1.2773E-07
tph18=	2.7485E-09	targ=	1.4524E-07
tph19=	1.0239E-08	targ=	1.5023E-07
tph11=	1.5555E-10	targ=	5.1505E-09
tph12=	8.9938E-11	targ=	1.2585E-08
tph13=	7.7001E-09	targ=	2.0195E-08
tph14=	1.0756E-10	targ=	3.0103E-08
tph15=	1.3703E-10	targ=	3.5132E-08
tph16=	4.4126E-11	targ=	3.7539E-08
tph17=	2.6915E-09	targ=	4.5186E-08
tph18=	2.5604E-09	targ=	5.0055E-08
tph19=	7.8213E-11	targ=	5.7573E-08
tph20=	2.7442E-09	targ=	6.0239E-08
tph11=	2.7623E-09	targ=	7.7757E-08
tph12=	6.1164E-11	targ=	8.7556E-08
tph13=	2.0799E-10	targ=	9.0203E-08
tph14=	5.2801E-09	targ=	1.0528E-07
tph15=	2.0315E-10	targ=	1.1270E-07
tph16=	9.8529E-11	targ=	1.1759E-07
tph17=	2.2121E-10	targ=	1.4022E-07
tph18=	2.0127E-10	targ=	1.4770E-07
tp1=	1.1809E-10	targ=	2.0113E-08
tp2=	5.1447E-09	targ=	4.2640E-08
tp3=	7.6006E-09	targ=	4.5096E-08
tp4=	2.6242E-09	targ=	5.0119E-08
tp5=	6.3945E-11	targ=	5.5059E-08
tp6=	2.6768E-09	targ=	6.0172E-08
tp7=	1.0583E-10	targ=	7.7601E-08
tp8=	1.5678E-10	targ=	9.0152E-08
tp9=	7.6940E-09	targ=	1.0519E-07
		targ=	9.7495E-08

$$\Rightarrow \quad Tplh = Tplh_{\max} = 1.5262 \times 10^{-8}, \quad Tphl = Tphl_{\max} = 7.7001 \times 10^{-9}$$

$$\Rightarrow \quad Tpd = (Tplh + Tphl) / 2 = 1.148105 \times 10^{-8} \quad \text{seconds}$$

محاسبه تاخیر (tpd) مدار تمام جمع کننده در دما اتاق (۲۵ درجه):

			tpd_temp_room - WordPad		
			File Home View		
			1 2 3 4 5 6 7		
tplh1=	1.1944E-10	targ=	2.6144E-09	trig=	2.4950E-09
tplh2=	6.9190E-11	targ=	7.5642E-09	trig=	7.4950E-09
tplh3=	1.2924E-10	targ=	1.5124E-08	trig=	1.4995E-08
tplh4=	1.4223E-10	targ=	2.5137E-08	trig=	2.4995E-08
tplh5=	2.7719E-10	targ=	3.2772E-08	trig=	3.2495E-08
tplh6=	5.0462E-09	targ=	3.7541E-08	trig=	3.2495E-08
tplh7=	2.3081E-10	targ=	4.2726E-08	trig=	4.2495E-08
tplh8=	6.3368E-11	targ=	5.0058E-08	trig=	4.9995E-08
tplh9=	4.9589E-11	targ=	5.5045E-08	trig=	5.4995E-08
tplh10=	7.9716E-11	targ=	5.7575E-08	trig=	5.7495E-08
tplh11=	1.5275E-08	targ=	7.7770E-08	trig=	6.2495E-08
tplh12=	1.3557E-10	targ=	8.0131E-08	trig=	7.9995E-08
tplh13=	2.7209E-09	targ=	9.0216E-08	trig=	8.7495E-08
tplh14=	2.7775E-10	targ=	9.5273E-08	trig=	9.4995E-08
tplh15=	2.8984E-10	targ=	1.0528E-07	trig=	1.0500E-07
tplh16=	1.0114E-10	targ=	1.1760E-07	trig=	1.1750E-07
tplh17=	2.3904E-10	targ=	1.2773E-07	trig=	1.2749E-07
tplh18=	2.7582E-09	targ=	1.4525E-07	trig=	1.4250E-07
tplh19=	1.0249E-08	targ=	1.5024E-07	trig=	1.4000E-07
tp11=	1.5737E-10	targ=	5.1524E-09	trig=	4.9950E-09
tp12=	9.2145E-11	targ=	1.2587E-08	trig=	1.2495E-08
tp13=	7.7076E-09	targ=	2.0203E-08	trig=	1.2495E-08
tp14=	1.1072E-10	targ=	3.0106E-08	trig=	2.9995E-08
tp15=	1.3908E-10	targ=	3.5134E-08	trig=	3.4995E-08
tp16=	4.6195E-11	targ=	3.7541E-08	trig=	3.7495E-08
tp17=	2.6996E-09	targ=	4.5195E-08	trig=	4.2495E-08
tp18=	2.5634E-09	targ=	5.0058E-08	trig=	4.7495E-08
tp19=	7.9716E-11	targ=	5.7575E-08	trig=	5.7495E-08
tp20=	2.7602E-09	targ=	6.0255E-08	trig=	5.7495E-08
tp111=	2.7749E-09	targ=	7.7770E-08	trig=	7.4995E-08
tp112=	6.1351E-11	targ=	8.7556E-08	trig=	8.7495E-08
tp113=	2.2093E-10	targ=	9.0216E-08	trig=	8.9995E-08
tp114=	5.2898E-09	targ=	1.0528E-07	trig=	9.9995E-08
tp115=	2.7138E-09	targ=	1.1271E-07	trig=	1.1000E-07
tp116=	1.0114E-10	targ=	1.1760E-07	trig=	1.1750E-07
tp117=	2.2885E-10	targ=	1.4022E-07	trig=	1.4000E-07

			tpd_temp_room - WordPad		
			File Home View		
			1 2 3 4 5 6 7		
tplh11=	1.5275E-08	targ=	7.7770E-08	trig=	6.2495E-08
tplh12=	1.3557E-10	targ=	8.0131E-08	trig=	7.9995E-08
tplh13=	2.7209E-09	targ=	9.0216E-08	trig=	8.7495E-08
tplh14=	2.7775E-10	targ=	9.5273E-08	trig=	9.4995E-08
tplh15=	2.8984E-10	targ=	1.0528E-07	trig=	1.0500E-07
tplh16=	1.0114E-10	targ=	1.1760E-07	trig=	1.1750E-07
tplh17=	2.3904E-10	targ=	1.2773E-07	trig=	1.2749E-07
tplh18=	2.7582E-09	targ=	1.4525E-07	trig=	1.4250E-07
tplh19=	1.0249E-08	targ=	1.5024E-07	trig=	1.4000E-07
tp11=	1.5737E-10	targ=	5.1524E-09	trig=	4.9950E-09
tp12=	9.2145E-11	targ=	1.2587E-08	trig=	1.2495E-08
tp13=	7.7076E-09	targ=	2.0203E-08	trig=	1.2495E-08
tp14=	1.1072E-10	targ=	3.0106E-08	trig=	2.9995E-08
tp15=	1.3908E-10	targ=	3.5134E-08	trig=	3.4995E-08
tp16=	4.6195E-11	targ=	3.7541E-08	trig=	3.7495E-08
tp17=	2.6996E-09	targ=	4.5195E-08	trig=	4.2495E-08
tp18=	2.5634E-09	targ=	5.0058E-08	trig=	4.7495E-08
tp19=	7.9716E-11	targ=	5.7575E-08	trig=	5.7495E-08
tp20=	2.7602E-09	targ=	6.0255E-08	trig=	5.7495E-08
tp111=	2.7749E-09	targ=	7.7770E-08	trig=	7.4995E-08
tp112=	6.1351E-11	targ=	8.7556E-08	trig=	8.7495E-08
tp113=	2.2093E-10	targ=	9.0216E-08	trig=	8.9995E-08
tp114=	5.2898E-09	targ=	1.0528E-07	trig=	9.9995E-08
tp115=	2.7138E-09	targ=	1.1271E-07	trig=	1.1000E-07
tp116=	1.0114E-10	targ=	1.1760E-07	trig=	1.1750E-07
tp117=	2.2885E-10	targ=	1.4022E-07	trig=	1.4000E-07
tp118=	2.1032E-10	targ=	1.4771E-07	trig=	1.4750E-07
tp1=	1.2303E-10	targ=	2.0118E-08	trig=	1.9995E-08
tp2=	5.1496E-09	targ=	4.2645E-08	trig=	3.7495E-08
tp3=	7.6050E-09	targ=	4.5100E-08	trig=	3.7495E-08
tp4=	2.6309E-09	targ=	5.0126E-08	trig=	4.7495E-08
tp5=	6.6952E-11	targ=	5.5062E-08	trig=	5.4995E-08
tp6=	2.6859E-09	targ=	6.0181E-08	trig=	5.7495E-08
tp7=	1.0957E-10	targ=	7.7605E-08	trig=	7.7495E-08
tp8=	1.6842E-10	targ=	9.0163E-08	trig=	8.9995E-08
tp9=	7.6998E-09	targ=	1.0519E-07	trig=	9.7495E-08

$$\Rightarrow T_{plh} = T_{plh_{\max}} = 1.5275 \times 10^{-8}, T_{phl} = T_{phl_{\max}} = 7.7076 \times 10^{-9}$$

$$\Rightarrow T_{pd} = (T_{plh} + T_{phl}) / 2 = 1.14913 \times 10^{-8} \quad \text{seconds}$$

محاسبه تاخیر (tpd) مدار تمام جمع کننده در دما ۱۰۰ درجه:

tpd_temp_100 - WordPad			
File Home View			
1 2 3 4 5 6 7			
tplh1=	1.3871E-10	targ=	2.6337E-09
tplh2=	7.9420E-11	targ=	7.5744E-09
tplh3=	1.5225E-10	targ=	1.5147E-08
tplh4=	1.6220E-10	targ=	2.5157E-08
tplh5=	3.1408E-10	targ=	3.2809E-08
tplh6=	5.0517E-09	targ=	3.7547E-08
tplh7=	2.5087E-10	targ=	4.2746E-08
tplh8=	7.3582E-11	targ=	5.0069E-08
tplh9=	5.7345E-11	targ=	5.5052E-08
tplh10=	8.3835E-11	targ=	5.7579E-08
tplh11=	1.5305E-08	targ=	7.7800E-08
tplh12=	1.5715E-10	targ=	8.0152E-08
tplh13=	2.7537E-09	targ=	9.0249E-08
tplh14=	3.1385E-10	targ=	9.5309E-08
tplh15=	3.1715E-10	targ=	1.0531E-07
tplh16=	1.1314E-10	targ=	1.1761E-07
tplh17=	2.7750E-10	targ=	1.2777E-07
tplh18=	2.7881E-09	targ=	1.4528E-07
tplh19=	1.0282E-08	targ=	1.5028E-07
tplh20=	2.7972E-09	targ=	6.0292E-08
tplh11=	1.7216E-10	targ=	5.1672E-09
tplh12=	9.8450E-11	targ=	1.2593E-08
tplh13=	7.7343E-09	targ=	2.0229E-08
tplh14=	1.1636E-10	targ=	3.0111E-08
tplh15=	1.4825E-10	targ=	3.5143E-08
tplh16=	5.1733E-11	targ=	3.7547E-08
tplh17=	2.7269E-09	targ=	4.5222E-08
tplh18=	2.5736E-09	targ=	5.0069E-08
tplh19=	8.3835E-11	targ=	5.7579E-08
tplh20=	2.7972E-09	targ=	6.0292E-08
tplh11=	2.8049E-09	targ=	7.7800E-08
tplh12=	6.2152E-11	targ=	8.7557E-08
tplh13=	2.5368E-10	targ=	9.0249E-08
tplh14=	5.3172E-09	targ=	1.0531E-07
tplh15=	2.7486E-09	targ=	1.1274E-07
tplh16=	1.1314E-10	targ=	1.1761E-07
tplh17=	2.5454E-10	targ=	1.4025E-07
tplh18=	2.5454E-10	targ=	1.4025E-07
tplh19=	2.5454E-10	targ=	1.4025E-07
tplh20=	2.5454E-10	targ=	1.4025E-07
tp1=	1.4036E-10	targ=	2.0135E-08
tp2=	5.1594E-09	targ=	4.2654E-08
tp3=	7.6191E-09	targ=	4.5114E-08
tp4=	2.6449E-09	targ=	5.0140E-08
tp5=	7.2794E-11	targ=	5.5068E-08
tp6=	2.7219E-09	targ=	6.0217E-08
tp7=	1.2737E-10	targ=	7.7622E-08
tp8=	2.0135E-10	targ=	9.0196E-08
tp9=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp10=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp11=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp12=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp13=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp14=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp15=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp16=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp17=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp18=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp19=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp20=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp21=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp22=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp23=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp24=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp25=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp26=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp27=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp28=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp29=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp30=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp31=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp32=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp33=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp34=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp35=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp36=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp37=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp38=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp39=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp40=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp41=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp42=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp43=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp44=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp45=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp46=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp47=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp48=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp49=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp50=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp51=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp52=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp53=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp54=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp55=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp56=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp57=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp58=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp59=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp60=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp61=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp62=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp63=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp64=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp65=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp66=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp67=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp68=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp69=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp70=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp71=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp72=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp73=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp74=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp75=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp76=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp77=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp78=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp79=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp80=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp81=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp82=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp83=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp84=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp85=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp86=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp87=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp88=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp89=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp90=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp91=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp92=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp93=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp94=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp95=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp96=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp97=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp98=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp99=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp100=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp101=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp102=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp103=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp104=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp105=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp106=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp107=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp108=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp109=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp110=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp111=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp112=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp113=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp114=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp115=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp116=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp117=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp118=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp119=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp120=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp121=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp122=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp123=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp124=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp125=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp126=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp127=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp128=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp129=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp130=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp131=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp132=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp133=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp134=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp135=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp136=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp137=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp138=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp139=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp140=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp141=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp142=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp143=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp144=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp145=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp146=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp147=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp148=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp149=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp150=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp151=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp152=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp153=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp154=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp155=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp156=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp157=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp158=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp159=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp160=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp161=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp162=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp163=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp164=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp165=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp166=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp167=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp168=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp169=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp170=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp171=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp172=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp173=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp174=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp175=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp176=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp177=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp178=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp179=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp180=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp181=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp182=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp183=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp184=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp185=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp186=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp187=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp188=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp189=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp190=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp191=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp192=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp193=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp194=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp195=	7.7190E-09	targ=	1.0521E-07
tp196=	7.7190E-09		

همان طور که در تصاویر فوق میبینید، با افزایش دما، تاخیر (Propagation Delay)، افزایش می یابد. در واقع با افزایش دما مقدار مقاومت مدار افزایش یافته و در نتیجه T_{ph} و T_{phl} که تابعی از مقاومت هستند، افزایش می یابند. در نتیجه مقدار تاخیر (Propagation Delay) نیز افزایش می یابد.