

F4: Den komplementära CMOS inverterarens DC-karakteristik

- Målsättning
 - Definiera DC-mässiga begrepp för statiska CMOS grindar
 - DC-mässig dimensionering för korrekt logisk funktion
- Innehåll
 - Härledning av CMOS inverterarens överföringsfunktion
 - β_n/β_p förhållande
 - Brusmarginal (Noise Margin)
 - Definition av brusmarginal
 - Definition och härledning av V_{IL} , V_{IH} , V_{OL} , V_{OH} , V_I

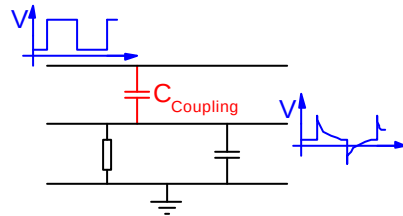
1 (22)

Digitalt brus

- Brus: Önskade variationer av spänning och strömmar i kretsens noder
- Digitalt brus:
 - Kapaktiv koppling
 - Induktiv koppling
 - Brus på matningsspänning (Vdd och jord)

2 (22)

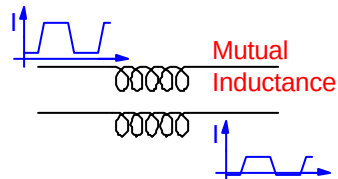
Kapaktiv och induktiv koppling



En förändring av spänning eller ström kan påverka en signal på en ledning som löper parallellt.

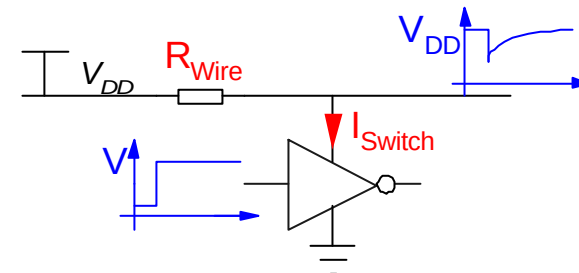
Detta gäller särskilt för:

- långa ledningar
- teknologier där det finns många ledningslager
- nedskalade teknologier (sub-micron)



3 (22)

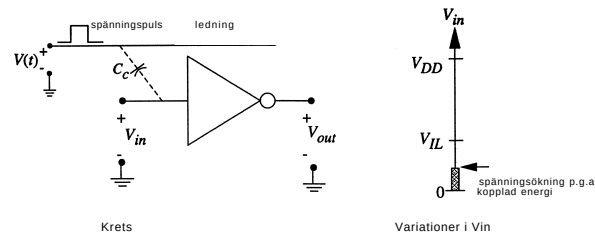
Brus på matningsspänningen (power and ground noise)



- Stort problem i stora synkrona kretsar
de flesta signalerna slår om vid tidpunkten strax efter den aktiva klockflanken och blir temporärt stora strömmar i nätet för matningsspänningen

4 (22)

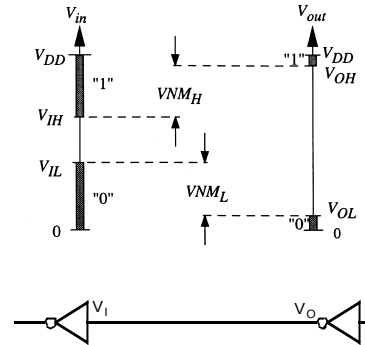
Brusmarginal - motivation



Om den oönskade spänningsökningen överstiger en viss spänning V_L som är den övre gränsen för vad som tolkas som en '0' så kommer vi få en "falskt" omslag i inverteraren.

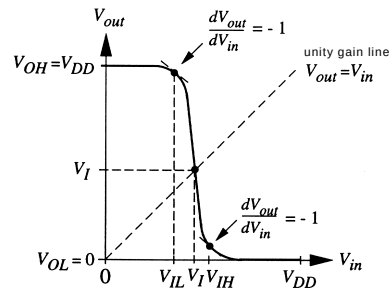
5 (2 2)

Definition av brusmarginal



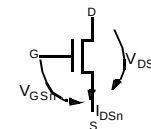
6 (2 2)

Kritiska spänningar i CMOS inverteraren



7 (2 2)

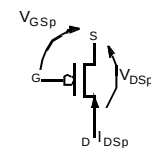
Definition av strömmar och spänningar i MOSFET



nMOS:

$$\text{Linjära området: } I_{DSn} = \beta \left[(V_{GSn} - V_{Tn}) V_{DSn} - \frac{V_{DSn}^2}{2} \right]$$

$$\text{Mättnadsområdet: } I_{DSn} = \frac{\beta}{2} (V_{GSn} - V_{Tn})^2$$



pMOS:

$$\text{Linjära området: } I_{DSp} = \beta_p \left[(V_{GS} - |V_{Tp}|) V_{SDp} - \frac{V_{SDp}^2}{2} \right]$$

$$\text{Mättnadsområdet: } I_{DSp} = \frac{\beta_p}{2} (V_{GS} - |V_{Tp}|)^2$$

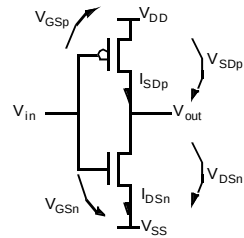
alternativt för pMOS:

$$\text{Linjära området: } I_{DSp} = \beta_p \left[(V_{SGp} - |V_{Tp}|) V_{SDp} - \frac{V_{SDp}^2}{2} \right]$$

$$\text{Mättnadsområdet: } I_{DSp} = \frac{\beta_p}{2} (V_{SGp} - |V_{Tp}|)^2$$

8 (2 2)

Strömmar och spänningar i inverteraren



Strömmar:

$$I_{DSn} = I_{SDp}$$

Spänningar:

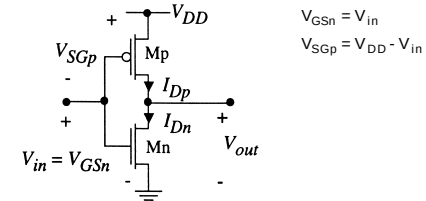
$$V_{GSp} = V_{in} - V_{DD}$$

$$V_{GSn} = V_{in} - V_{SS} = V_{in}$$

$$V_{SDp} = V_{DD} - V_{out}$$

$$V_{DSn} = V_{out} - V_{SS} = V_{out}$$

Definition av V_{OL}



$$V_{GSn} = V_{in}$$

$$V_{SGp} = V_{DD} - V_{in}$$

V_{in} antas vara inom området 0 till V_{DD}

Antag att en ingångsspänning som motsvarar en hög nivå $V_{in} = V_{DD}$ så blir

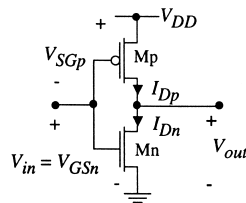
$$V_{GSn} = V_{DD}$$

$$V_{SGp} = 0$$

Det leder till att pMOS transistoren är i cut-off och nMOS transistoren leder i mättnadsområdet. nMOS transistoren medger ett väg till V_{SS} (0V) som resulterar i

$$V_{out} = V_{OL} = 0$$

Definition av V_{OH}



$$V_{GSn} = V_{in}$$

$$V_{SGp} = V_{DD} - V_{in}$$

V_{in} antas vara inom området 0 till V_{DD}

Antag att en ingångsspänning som motsvarar en hög nivå $V_{in} = V_{SS}$ så blir

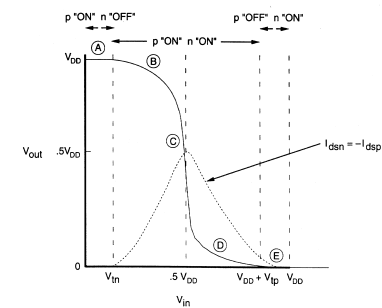
$$V_{GSn} = 0V$$

$$V_{SGp} = V_{DD}$$

Det leder till att nMOS transistoren är i cut-off och pMOS transistoren leder i mättnadsområdet. pMOS transistoren medger ett väg till V_{DD} som resulterar i

$$V_{out} = V_{OH} = V_{DD}$$

Voltage Transfer Curve



Överföringsfunktionen delas upp i fem regioner beroende på n- och pMOS transistorernas arbetsområden:

Region A: definieras av $0 < V_{in} < V_{Tn}$

Region B: definieras av $V_{Tn} < V_{in} < V_{DD}/2$

Region C: definieras av en punkt där både pMOS och nMOS transistoren är i mättnad

Region D: $V_{DD}/2 < V_{in} < V_{DD} + V_{Tp}$

Region E: $V_{in} > V_{DD} + V_{Tp}$

Region A

Definieras av $0 < V_{in} < V_{tn}$

nMOS transistorn är cut-off

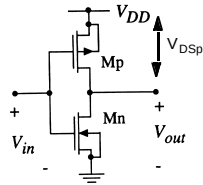
pMOS transistorn är i det linjära arbetsområdet

Eftersom vi enbart har en ström i kretsen som går genom nMOS transistorn och pMOS transistorn så är $I_{DSn} = I_{SDP}$.

Strömmen genom nMOS transistorn är 0 så blir strömmen genom pMOS transistorn följaktligen 0.

Spänningen över pMOS transistorn är $V_{DSP} = V_{out} - V_{DD}$

med $V_{DSP} = 0$ så blir utspänningen $V_{out} = V_{DD}$.



13 (22)

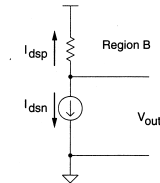
Region B

Definieras av $V_{tn} < V_{in} < V_{DD}/2$

nMOS transistorn är mättad

pMOS transistorn är i det linjära arbetsområdet

Inverteraren kan representeras av en ekvivalent krets



pMOS transistorn representeras av en resistor

nMOS transistorn representeras av en strömkälla

$$V_{GSP} = (V_{in} - V_{DD})$$

$$V_{DSP} = (V_{out} - V_{DD})$$

$$I_{DSn} = \beta_n/2 \cdot (V_{in} - V_{tn})^2$$

$$I_{DSP} = -\beta_p \cdot [(V_{in} - V_{DD} - V_{tp})(V_{out} - V_{DD}) - 1/2 \cdot (V_{out} - V_{DD})^2]$$

$$I_{DSP} = -I_{DSn}$$

$$V_{out} = (V_{in} - V_{tp}) + \sqrt{(V_{in} - V_{tp})^2 - 2 \left(V_{in} - \frac{V_{DD}}{2} - V_{tp} \right) V_{DD} - \frac{\beta_n}{\beta_p} (V_{in} - V_{tn})^2}$$

14 (22)

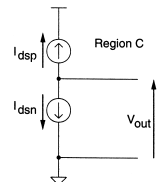
Region C

Definieras av ett område där både pMOS och nMOS transistorerna är i mättad

Inverteraren kan representeras av en ekvivalent krets

pMOS transistorn representeras av en strömkälla

nMOS transistorn representeras av en strömkälla



$$I_{DSn} = \beta_n/2 \cdot (V_{in} - V_{tn})^2$$

$$I_{DSP} = -\beta_p/2 \cdot (V_{in} - V_{DD} - V_{tp})^2$$

$$I_{DSP} = -I_{DSn}$$

$$V_{in} = \frac{V_{DD} + V_{tp} + V_{tn} \cdot \sqrt{\frac{\beta_n}{\beta_p}}}{1 + \sqrt{\frac{\beta_n}{\beta_p}}}$$

15 (22)

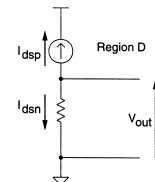
Region D

Definieras av $V_{DD}/2 < V_{in} < V_{DD} + V_{tp}$

nMOS transistorn är mättad

pMOS transistorn är i det linjära arbetsområdet

Inverteraren kan representeras av en ekvivalent krets



pMOS transistorn representeras av en strömkälla

nMOS transistorn representeras av en resistor

$$V_{GSP} = (V_{in} - V_{DD})$$

$$V_{DSP} = (V_{out} - V_{DD})$$

$$I_{DSP} = -\beta_p/2 \cdot (V_{in} - V_{DD} - V_{tp})^2$$

$$I_{DSn} = \beta_n \cdot [(V_{in} - V_{tn}) \cdot V_{out} - 1/2 \cdot V_{out}^2]$$

$$I_{DSP} = -I_{DSn}$$

$$V_{out} = (V_{in} - V_{tp}) - \sqrt{(V_{in} - V_{tp})^2 - \frac{\beta_p}{\beta_n} (V_{in} - V_{DD} - V_{tp})^2}$$

16 (22)

Region E

Definieras av $V_{in} > V_{DD} - V_{tp}$

pMOS transistoren är cut-off

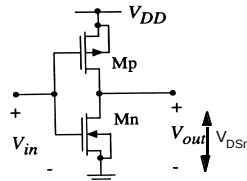
nMOS transistoren är i det linjära arbetsområdet

Eftersom vi enbart har en ström i kretsen som går genom nMOS transistoren och pMOS transistoren så är $I_{DSn} = I_{SDP}$.

Strömmen genom nMOS transistoren är 0 så blir strömmen genom pMOS transistoren följaktligen 0.

Spänningen över nMOS transistoren är $V_{DSn} = V_{out}$

med $V_{DSn} = 0$ så blir utspänningen $V_{out} = 0$



17 (22)

Input low voltage (V_{IL})

Definition:

$$\frac{dV_{out}}{dV_{in}} = -1$$

Härledning:

nMOS transistoren befinner sig i mättad

pMOS transistoren befinner sig i det linjära området

Eftersom vi har samma ström genom båda transistorerna sätts strömekvationerna lika

Det funktionella beroendet kan skrivas som:

$$I_{DSn}(V_{in}) = I_{SDP}(V_{in}, V_{out})$$

Differentiering av båda sidorna ger i slutänden:

$$V_{in} \left(1 + \frac{\beta_n}{\beta_p} \right) = 2 \cdot V_{out} - (V_{DD} - |V_{Tp}|) + \frac{\beta_n}{\beta_p} \cdot V_{Tn}$$

Ska V_{IL} bestämmas så ger man V_{in} värdet V_{IL} och löser ut det från ovanstående ekvation. Ska V_{IH} bestämmas så ger man V_{in} värdet V_{IH} och löser ut det från ovanstående ekvation.

Dessutom behövs ett uttryck $V_{out} = f(V_{in})$ för att kunna få ett uttryck för $V_{IL} = f(\beta_n, \beta_p, V_{DD}, V_{Tn}, V_{Tp})$

18 (22)

Input high voltage (V_{IH})

Definition:

$$\frac{dV_{out}}{dV_{in}} = -1$$

Härledning:

nMOS transistoren befinner sig i linjära området

pMOS transistoren befinner sig i mättad

Eftersom vi har samma ström genom båda transistorerna sätts strömekvationerna lika

Det funktionella beroendet kan skrivas som:

$$I_{SDP}(V_{in}) = I_{DSn}(V_{in}, V_{out})$$

Differentiering av båda sidorna ger i slutänden:

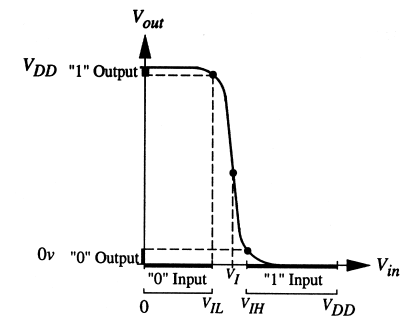
$$V_{in} \left(1 + \frac{\beta_p}{\beta_n} \right) = 2 \cdot V_{out} + V_{Tn} + \frac{\beta_p}{\beta_n} \cdot (V_{DD} - |V_{Tp}|)$$

Ska V_{IH} bestämmas så ger man V_{in} värdet V_{IH} och löser ut det från ovanstående ekvation.

Dessutom behövs ett uttryck $V_{out} = f(V_{in})$ för att kunna få ett uttryck för $V_{IH} = f(\beta_n, \beta_p, V_{DD}, V_{Tn}, V_{Tp})$

19 (22)

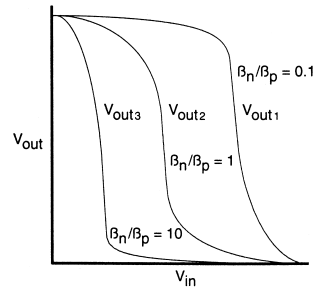
Summering kritiska spänningar



20 (22)

β_n/β_p förhållande

- Grindens tröskelspänning V_{inv} ($V_{in} = V_{out}$) är beroende av β_n/β_p
- Detta förhållande ändras genom att ändra W/L förhållandet för transistorerna
- Ett ökat β_n/β_p skiftar omslagspunkten mot vänster i VTC



Variation av β_n/β_p förhållande

