

F7: Effektförbrukning

- **Målsättning**
 - Beskriva de olika källorna till effektförbrukning i CMOS kretsar samt hur man kan estimerar effektförbrukningen för ett chip
- **Innehåll**
 - statisk effektförbrukning
 - dynamisk effektförbrukning
 - kortslutningsströmmar
 - Den totala effektförbrukningen på ett chip

Effektförbrukning

- **Två mått är viktiga:**
 - Maximal effekt (bestämmer tvärsnittsarean för ledare)
$$P_{\text{peak}} = V_{DD} \cdot I_{DD\text{max}}$$
 - Medelvärde av effekten (bestämmer dimensioneringen av batteri och kylning)
$$P_{\text{medel}} = \frac{V_{DD}}{T} \int_0^T i_{DD}(t) dt$$

Power-Delay Product (PDP)

- Ett mått som anger energiåtgång per operation

$$PDP = t_p \times P_{medel} \quad [J]$$

- PDPs beroende av matningsspänningen (V_{DD})

$$PDP \sim \frac{V_{DD}^3}{(V_{DD} - V_T)^2}$$

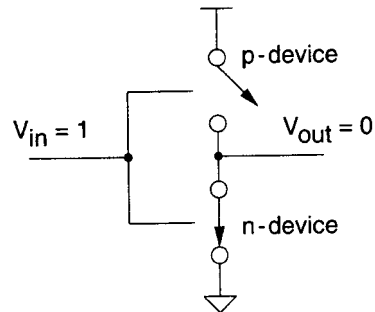
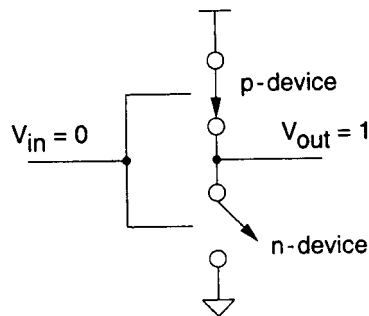
Effektförbrukning i CMOS

- Dynamisk effektförbrukning
 - Laddning och urladdning av kapacitanser
- Kortslutningsströmmar
 - Kortslutning mellan matningsspänning och jord under omslag
- Läckströmmar -- statisk effektförbrukning
 - Läckströmmar i dioder och transistorer

Introduktion

- I en ideal CMOS grind

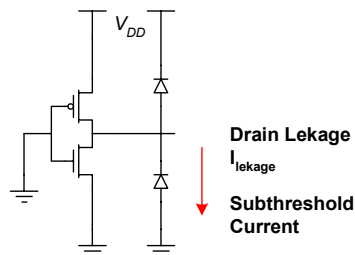
- finns det ingen direkt väg från V_{DD} till jord eftersom pMOS trådet aldrig leder samtidigt som nMOS trådet.
- Gate-terminalen har hög ingångskapacitans så strömmen är noll



Idealt sett förbrukar inte CMOS grinden någon effekt i vila

5 (17)

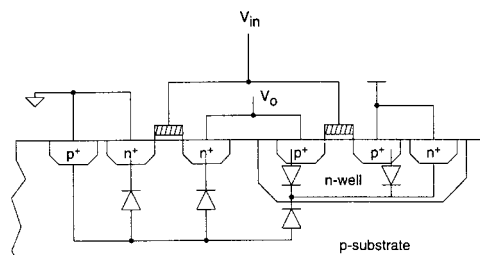
Statisk effektförbrukning



$I_{leakage}$ increases with decreasing V_T

$$P_{stat} = I_{leakage} \times V_{DD}$$

- läckströmmar i backspända PN-dioder som är parasitkomponenter i MOS transistorer



6 (17)

Statisk effektförbrukning

- Den statiska effekten beror på antalet komponenter i kretsen

$$P_{stat} = \sum_{i=1}^N i_{leakage} \times V_{DD}$$

där

$$i_{leakage} = i_s \cdot \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

n = antal komponenter

q = elektronens laddning ($1.6 \cdot 10^{-19}$ C)

V = spänningen över dioden

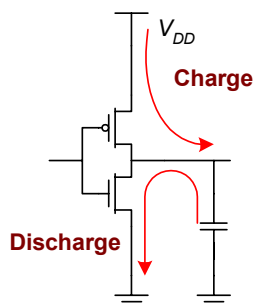
k = Boltzmann's konstant ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K)

T = Temperatur (K)

N = antal komponenter

Dynamisk effektförbrukning

- effektförbrukning vid upp- och urladdning av kapacitiv last (C_L)



Energi i uppladdad kapacitans

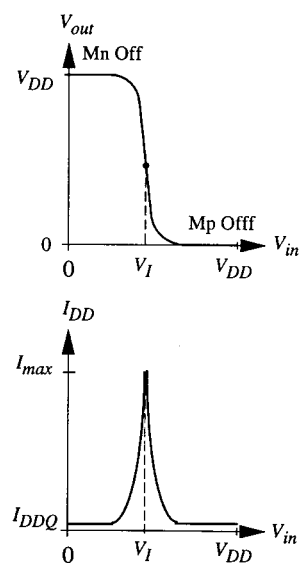
$$E_C = CV^2/2 = C_L V_{DD}^2/2$$

Energien E_C laddas också ur

$$E_{tot} = C_L V_{DD}^2$$

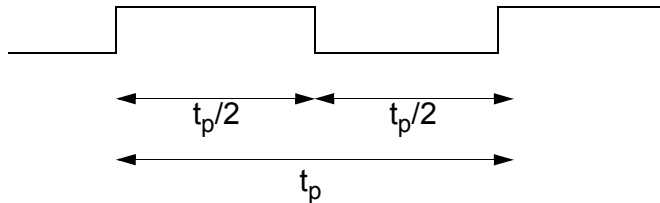
Effektförbrukning

$$P = C_L V_{DD}^2 f$$



Härledning av dynamisk effektförbrukning

- Antag att stig- och falltider är mycket mindre än periodtiden
- V_{in} anges som en fyrkantvåg med periodtiden t_p



- Den dynamiska effektförbrukningen P_d ges av

$$P_d = \frac{1}{t_p} \left[\int_0^{t_p/2} i_p(t) \cdot (V_{DD} - V_{out}) dt + \int_{t_p/2}^{t_p} i_n(t) \cdot V_{out} dt \right]$$

där

i_n = nMOS transistorens transientström

i_p = pMOS transistorens transientström

Härledning av dynamisk effektförbrukning

- Uppladdning (i_p) och urladdningsströmmarna (i_n) ges av

$$i_p(t) = i_n(t) = C_L \cdot \frac{dV_{out}}{dt}$$

där C_L är den kapacitiva last som finns på inverterarens utgång.

- P_d kan då beskrivas som

$$P_d = \frac{C_L}{t_p} \left[\int_0^{V_{DD}} V_{out} dV_{out} + \int_{V_{DD}}^0 (V_{DD} - V_{out}) d(V_{DD} - V_{out}) \right]$$

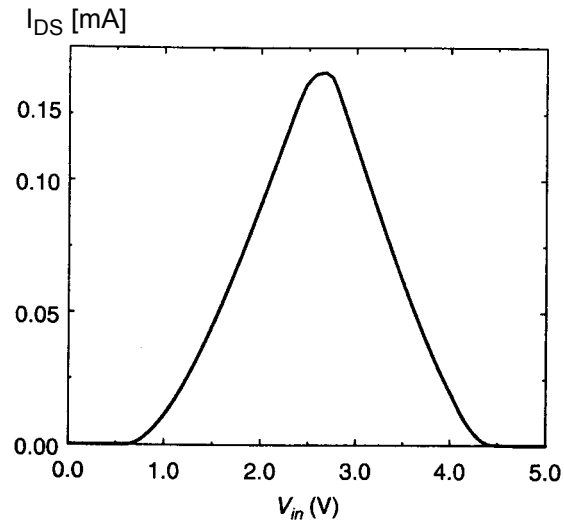
- Den dynamiska effektförbrukningen:

$$P_d = \frac{C_L \cdot V_{DD}^2}{t_p} = C_L \cdot V_{DD}^2 \cdot f$$

där frekvensen av fyrkantsvågen är $f = 1/t_p$

Kortslutningsström

Kortslutningsströmmen uppkommer då omslagstiderna på ingången är icke-ideala, d.v.s större än noll. Under omslaget finns det en väg från VDD till jord genom pMOS och nMOS transistorn.



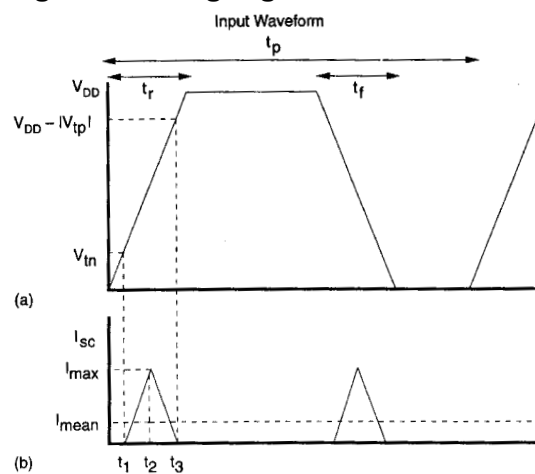
11 (17)

Härledning av kortslutningseffekten

- Kortslutningseffekten ges av

$$P_{SC} = I_{mean} \cdot V_{DD}$$

- Antag följande vågform för ingången



12 (17)

Härledning av kortslutningseffekten

- För en obelastad inverterare (d.v.s $C_L = 0$) blir medelströmmen

$$I_{mean} = 2 \times \left[\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} I(t) dt + \frac{1}{T} \int_{t_2}^{t_3} I(t) dt \right]$$

- Antag att $V_{Tn} = -V_{Tp}$, $\beta_n = \beta_p$ och insignalens beteende är symmetriskt kring t_2 .

$$I_{mean} = 2 \times \frac{\beta}{T} \int_{t_1}^{t_2} (V_{in}(t) - V_T)^2 dt$$

där

$$V_{in}(t) = \frac{V_{DD}}{t_r} \cdot t$$

$$t_1 = \frac{V_T}{V_{DD}} t_r$$

$$t_2 = \frac{t_r}{2}$$

Härledning av kortslutningseffekten

- Kortslutningseffekten för en inverterare utan last

$$P_{SC} = \frac{\beta}{2} (V_{DD} - 2V_T)^3 \frac{t_{rf}}{t_p}$$

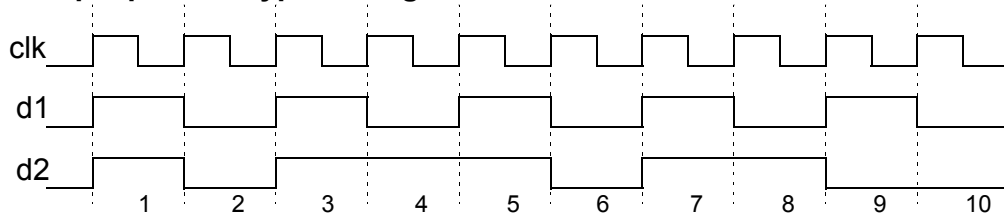
där $t_{rf} = t_r = t_f$

Omslagsaktivitet (α)

- Den dynamiska effektförbrukningen beror helt på frekvensen av signalen.

$$P_d = C_L V_{DD}^2 f \quad (1)$$

- Exempel på olika typer av signaler



- Klocksignalen *clk* som insignal med frekvensen f resulterar i en effektförbrukning given av (1).
- Datasignalen *d1* är en datasignal som har maximal omslagsfrekvens i ett system som klockas av *clk*. och har ett medelvärde för en transition ($0 \rightarrow 1$ eller $1 \rightarrow 0$) på $\alpha = 10/10$
- Datasignalen *d2* är en datasignal som har (över det visade intervallet) ett medelvärde för att ha en transition på $\alpha = 6/10$.

Generellt kan beskriva den dynamiska effekten som: $P_d = \frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot C \cdot V_{DD}^2 \cdot f$

Totala effektförbrukningen

- Den totala effektförbrukningen fås genom att summera de olika komponenterna:

$$P_{total} = P_{static} + P_{shortcurrent} + P_{dynamic}$$

Den dynamiska effektförbrukningen domineras av den dynamiska i CMOS grindar.

- Estimera effektförbrukningen i ett digitalt CMOS system
 - Alla delar som drar statisk ström, p.g.a sin konstruktion, summeras för sig.
 - Gruppera samman de delar som har samma typ av dynamisk effektförbrukning.
 - T.ex de som klockas med samma klockfrekvens eller
 - har liknande omslagsfrekvens på noderna eller
 - har samma storleksordning på lasterna (C_L) på utgångarna.

Exempel på effektestimering för ett chip

- Dynamisk effektförbrukning i CMOS logik

$$P_{\text{logic}} = \frac{1}{2} \alpha \cdot C_{\text{logic}} \cdot V_{DD}^2$$

- Effektförbrukning i klockdistributionsnätet

$$P_{\text{clock}} = (C_{DFF} \cdot V_{DD} \cdot f) \times k_{\text{drv}}$$

- Effektförbrukning i utgångspaddar

$$P_{\text{out}} = \# \text{utgångar} \cdot (C_{\text{pad}} + C_{\text{load}}) \cdot V_{DD}^2 \cdot f \cdot \alpha_{\text{pad}}$$

- Statisk effektförbrukning

- analoga moduler
- RAM
- ROM