4.2

$k_n' = 100 \mu A/V^2$
$k_p' = 40 \mu A/V^2$
$V_{Tn} = 0.7V$
$V_{Tp} = -0.8V$
$(W/L)_n = 10$
$(W/L)_p = 15$
$V_{DD} = 5V$

b) $\beta_n = k_n' \left(\frac{W}{L}\right)_n = 100 \cdot 10 = 1000 \mu A/V^2$

$\beta_p = k_p' \left(\frac{W}{L}\right)_p = 40 \cdot 15 = 600 \mu A/V^2$

Bestäm V_{IL}

$I_{DSn} = I_{DSp}$

(1) $\frac{\beta_n}{2}(V_{IL} - V_{Tn})^2 = \frac{\beta_p}{2}\left[2(V_{DD} - V_{IL} - |V_{Tp}|)(V_{DD} - V_o) - (V_{DD} - V_o)^2\right]$

Då $\frac{dV_{out}}{dV_{in}} = -1$ i region B så gäller

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

med insatta värden blir (1)

$$\frac{1000}{2}(V_{IL} - 0.7)^2 = \frac{600}{2}\left[(5 - V_{IL} - 0.8)(5 - V_o) - (5 - V_o)^2\right]$$

(3) $\frac{5}{3}(V_{IL} - 0.7)^2 = (4.2 - V_{IL})(5 - V_o) - (5 - V_o)^2$

med insatta värden i (2)

$2.67 V_{IL} = 2V_o - 4.2 + 1.17$

(4) $V_o = 1.33 V_{IL} + 1.52$

(4) i (3)

$$1.67(V_{IL}-0.7)^2 = (4.2-V_{IL})(5-1.33V_{IL}-1.52) - (5-1.33V_{IL}-1.52)^2$$
$$1.67V_{IL}^2 - 2.34V_{IL} + 0.82 = (4.2-V_{IL})(3.48-1.33V_{IL}) - (3.48-1.33V_{IL})^2$$
$$1.67V_{IL}^2 - 2.34V_{IL} + 0.82 = (14.62 - 9.1V_{IL} + 1.33V_{IL}^2) - (12.11 - 9.26V_{IL} + 1.77V_{IL}^2)$$

$$V_{IL}^2(1.67 - 1.33 + 1.77) + V_{IL}(-2.34 + 9.1 - 9.26) + (0.82 - 14.62 + 12.11) = 0$$
$$2.11V_{IL}^2 - 2.5V_{IL} - 1.69 = 0$$
$$V_{IL}^2 - 1.18V_{IL} - 0.80 = 0$$
$$V_{IL} = \frac{1.18}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{1.18}{2}\right)^2 + 0.80}$$
$$V_{IL} = 0.59 \overset{+}{(-)} 1.07$$
$$V_{IL} = 1.66\,V \qquad (V_o = 3.73\,V)$$

Bestäm V_{IH}

$$\frac{\beta_n}{2}\left[2(V_{IH}-V_{Tn})V_o - V_o^2\right] = \frac{\beta_p}{2}\left(V_{DD}-V_{IH}-|V_{Tp}|\right)^2$$

med insatta värden

$$1.67\left(2(V_{IH}-0.7)V_o - V_o^2\right) = (5 - V_{IH} - 0.8)^2$$

(5) $$(3.34V_{IH} - 2.34)V_o - 1.67V_o^2 = (4.2 - V_{IH})^2$$

Då $\frac{dV_{out}}{dV_{in}} = -1$ i region D så gäller

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

med insatta värden

$$1.6V_{IH} = 2V_o + 0.7 + 0.6(5 - 0.8)$$

$$1.6V_{IH} = 2V_o + 3.22$$

(6) $$V_o = 0.8V_{IH} - 1.61$$

(6) i (5) ger

$$(3.34V_{IH} - 2.34)(0.8V_{IH} - 1.61) - 1.67(0.8V_{IH} - 1.61)^2 = (4.2 - V_{IH})^2$$

$$2.672V_{IH}^2 - 7.25V_{IH} + 3.77 - 1.67(0.64V_{IH}^2 - 2.58V_{IH} + 2.592) = (17.64 - 8.4V_{IH} + V_{IH}^2)$$

$$2.672V_{IH}^2 - 7.25V_{IH} + 3.77 - 1.07V_{IH}^2 + 4.31V_{IH} - 4.33 = 17.64 - 8.4V_{IH} + V_{IH}^2$$

$$V_{IH}^2(2.672 - 1.07 - 1) + V_{IH}(-7.25 + 4.31 + 8.4) + (3.77 - 4.33 - 17.64)$$

$$0.602V_{IH}^2 + 5.46V_{IH} - 18.2 = 0$$

$$V_{IH}^2 + 9.07V_{IH} - 30.23 = 0$$

$$V_{IH} = -\frac{9.07}{2} \overset{+}{(-)} \sqrt{\left(\frac{9.07}{2}\right)^2 + 30.23}$$

$$-4.535 \pm 7.127$$

$$V_{IH} = 2.592 \qquad (V_o = 0.4636)$$

Brusmarginalen blir

$$NM_H = V_{DD} - V_{IH} = 5 - 2.592 = 2.41\,V$$
$$NM_L = V_{IL} - 0 = 1.66\,V$$

Svar 4,2 b) $V_{IL} = 1.7\,V$

$V_{IH} = 2.6\,V$

$NM_L = 1.7\,V$, $NM_H = 2.4\,V$

— 6 —

4,2a Bestäm inverterarens tröskel (d.v.s $V_{in} = V_{out} = V_I$)

Använd följande uttryck.

$$V_I = \frac{V_{DD} - |V_{TP}| + \sqrt{\beta_n/\beta_p} \cdot V_{Tn}}{1 + \sqrt{\frac{\beta_n}{\beta_p}}}$$

med insatta värden:

$$V_I = \frac{5 - 0.8 + \sqrt{\frac{5}{3}} \cdot 0.7}{1 + \sqrt{\frac{5}{3}}} = 2.23\,V$$

Svar 4,2 a) $V_{in} = V_{out} = 2.2\,V$

7.1 Sök effektförbrukningen

$\alpha = 20\%$

$f = 40MHz$

$V_{DD} = 3.6V$

$C_{tot} = 100pF$

$$P = \frac{1}{2}\alpha C V_{DD}^2 f$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot 0.2 \cdot 100 \cdot 10^{-12} \cdot 3.6^2 \cdot 40 \cdot 10^6 = 5.18mW$$

Svar: Effektförbrukningen blir 5.2 mW

7.4 Estimera effektförbrukningen i ett chip med följande data:

$n_{gates} = 30000$
$n_{reg} = 9000$
$V_{DD} = 3.3V$
$f_{ch} = 40 MHz$
$t_{rf} = 1.0\ ns$
$n_{128\times8} = 2$
$n_{64\times14} = 8$
$n_{bidir} = 14$
$P_{gate} = 5\mu W/MHz/gate$
$C_{ch} = 38fF$
$\alpha = 20\%$
$\alpha_{IO} = 40\%$
$C_L = 30pF$

Total effektförbrukning: $P_{tot} = P_{dyn} + P_{stat} + P_{clock} + P_{IO}$
där: P_{dyn} är dynamisk effekt i logiken, P_{stat} är statisk effekt i RAM, P_{clock} är effekten i klockträdet och P_{IO} är effekten i IO-paddar.

Dynamisk effekt P_{dyn}:

$$P_{dyn} = P_{gate} \cdot n_{gates} \cdot f_{ck} \cdot \alpha = 5 \cdot 10^{-6} \cdot 30000 \cdot 40 \cdot 0.2 = 1200 mW$$

Statisk effekt P_{stat}:

$$P_{stat} = n_{128\times8} \cdot P_{128\times8} + n_{64\times14} \cdot P_{64\times14} = 2 \cdot 6 + 8 \cdot 87.75 = 714 mW$$

Effekt i klockdistr. P_{clock}:

$$P_{clock} = P_{load}\left(\frac{0.14}{t_{rf}^2} + 1.065\right)$$

där

$$P_{load} = n_{reg} \cdot C_{ck} \cdot V_{DD}^2 \cdot f = 9000 \cdot 38 \cdot 10^{-15} \cdot 3.3^2 \cdot 40 \cdot 10^6 = 149 mW$$

$$P_{clock} = 149\left(\frac{0.14}{1} + 1.065\right) = 179.5 mW$$

Effekt i IO P_{IO}:

$$P_{IO} = \alpha_{IO}\left[n_{bidir} \cdot (292 + V_{DD}^2 \cdot C_L) f + n_{out}(121 + V_{DD}^2 \cdot C_L) f\right] = 196 mW$$

Total effekt: P_{tot}

$$P_{tot} = 1200 + 714 + 149 + 196 = 2290 mW \approx \boxed{2.3W}$$

7.5 Bestäm hur mycket effektförbrukningen kan minskas genom att sänka V_{DD} så att timingmarginalen på 3ns blir 0ns.

$$P_{tot} = P_{intern} + P_{IO}$$

där $P_{Intern} = P_{dyn} + P_{stat} + P_{clock} = 1200 + 714 + 149 = 2063\,mW$

och $P_{IO} = 196\,mW$.

P_{intern} kan reduceras genom att sänka V_{DD}, däremot kommer P_{IO} att vara konstant med konstant matning.

$V_{DD1} = 3.3V$
$V_T = 0.7V$
$f = 40MHz \Rightarrow T = 25ns$

$t_{marg1} = 3ns$, $t_{marg2} = 0ns$

Eftersom vi har en 3 ns timingmarginal så kan vi sänka matningsspänningen till V_{DD2} där $V_{DD2} < V_{DD1}$, så att timingmarginalen t_{marg2} blir 0ns.

Grindfördröjningen kan betecknas som:

$$t_D = \frac{1}{\beta (V_{DD} - V_T)} \cdot C_L \cdot S$$

där vi kan anta att C_L, β och S är oberoende av V_{DD}.

Bestäm hur mycket matningsspänningen kan sänkas:

$$T - t_{marg1} = \frac{1}{\beta (V_{DD1} - V_T)} \cdot C_L \cdot S \qquad (1)$$

$$T - t_{marg2} = \frac{1}{\beta (V_{DD2} - V_T)} \cdot C_L \cdot S \qquad (2)$$

dividera (1) med (2)

$$\frac{T - t_{marg1}}{T - t_{marg2}} = \frac{V_{DD2} - V_T}{V_{DD1} - V_T}$$

lös ut V_{DD2}

$$V_{DD2} = \frac{T - t_{marg1}}{T - t_{marg2}} (V_{DD1} - V_T) + V_T \qquad (3)$$

forts. 7.5

med insatta värden i (3) fås:

$$V_{DD2} = \frac{22}{25}(3.3 - 0.7) + 0.7 \approx 2.988V$$

Vi kan alltså sänka matningsspänningen till 2,988V och kretsen kommer fortfarande att fungera vid 40MHz

Med den sänkta spänningen får vi effektförbrukningen P_2.

Vi vet att $P \sim V_{DD}^2$

$P_1 = k \cdot V_{DD1}^2$ (4) (där k är en konstant oberoende av V_{DD})

$P_2 = k \cdot V_{DD2}^2$ (5)

dividera (4) med (5)

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_{DD1}^2}{V_{DD2}^2}$$

lös ut P_2

$$P_2 = \left(\frac{V_{DD2}}{V_{DD1}}\right)^2 \cdot P_1$$

Från tidigare ~~vet~~ vi att P_{intern} skalas med V_{DD}.

$P_1 = 2063$ mW (P_{intern} vid $V_{DD} = V_{DD1} = 3.3V$)

$$P_2 = \left(\frac{2.988}{3.3}\right)^2 \cdot 2063 \approx \cancel{1691 mW}$$

Den totala effekten blir P_2;

$$P_2 = P_2 + P_{Io} = 1691 + 196 = 1887 \text{ mW}$$

<u>Svar</u>: Med sänkt matningsspänning till 2.988V blir effektförbrukningen 1.9 W.

forts. 7.5

med insatta värden i (3) fås:

$$V_{DD2} = \frac{22}{25}(3.3-0.7)+0.7 \approx 2.988V$$

Vi kan alltså sänka matningsspänningen till 2,988V och kretsen kommer fortfarande att fungera vid 40MHz

Med den sänkta spänningen får vi effektförbrukningen P_2.

Vi vet att $P \sim V_{DD}^2$

$P_1 = k \cdot V_{DD1}^2$ (4) (där k är en konstant oberoende av V_{DD})

$P_2 = k \cdot V_{DD2}^2$ (5)

dividera (4) med (5)

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_{DD1}^2}{V_{DD2}^2}$$

lös ut P_2

$$P_2 = \left(\frac{V_{DD2}}{V_{DD1}}\right)^2 \cdot P_1$$

Från tidigare vet vi att P_{intern} skalas med V_{DD}.

$P_1 = 2\,063$ mW (P_{intern} vid $V_{DD} = V_{DD1} = 3.3V$)

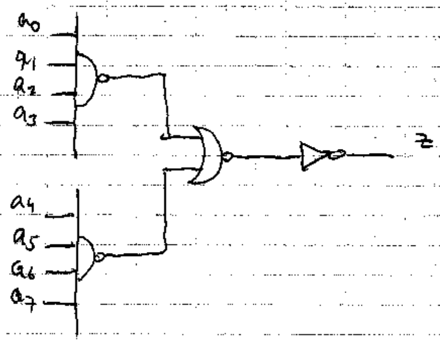
$$P_2 = \left(\frac{2.988}{3.3}\right)^2 \cdot 2063 \approx 1691\,mW$$

Den totala effekten blir P_2;

$$P_2 = P_2 + P_{Io} = 1691 + 196 = 1887\,mW$$

<u>Svar</u>: Med sänkt matningsspänning till 2.988V blir effektförbrukningen 1.9 W.

Fall 2:

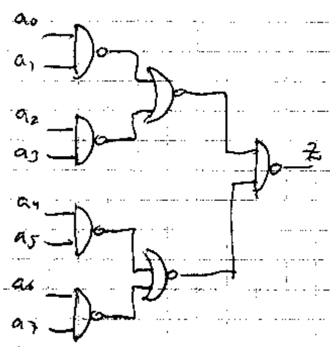


nand4: $t_{pf} = R_nC_g 4(4+2) = 24R_nC_g$; $t_{pr} = R_pC_g(4+2) = 6R_pC$

nor2: $t_{pf} = R_nC_g(2+2) = 4R_nC_g$; $t_{pf} = R_pC_g 2(2+2) = 8R_p$

inv: $t_{pf} = 3R_nC_g$; $t_{pr} = 3R_pC_g$

Fall 3:



nand2: $t_{pr} = 4R_pC_g$

$t_{pf} = 8R_nC_g$

Antag att $R_p = 2R_n = 2R$, det ger följande fördröjningar

nand8:	$t_{pf} = 80RC_g$	$t_{pr} = 20RC_g$
nand4:	$t_{pf} = 24RC_g$	$t_{pr} = 12RC_g$
nand2:	$t_{pf} = 8RC_g$	$t_{pr} = 8RC_g$
nor2:	$t_{pf} = 4RC_g$	$t_{pr} = 16RC_g$
inv:	$t_{pf} = 3RC_g$	$t_{pr} = 6RC_g$

Summera värsta signalvägen i vart och ett av fallen (1-3)

Fall 1: $t_{pf} = 80RC_g$

Fall 2: $t_{pf,nand4} + t_{pr,nor2} + t_{pf,inv} = 24RC_g + 16RC_g + 3RC_g = 43RC$

Fall 3: $t_{pf,nand2} + t_{pr,nor2} + t_{pf,nand2} = 8RC_g + 16RC_g + 8RC_g = 32R$

Svar: Fall 3 ger den snabbaste lösningen men kräver flest transistorer (28 st tr mot 16 st tr i Fall 1).