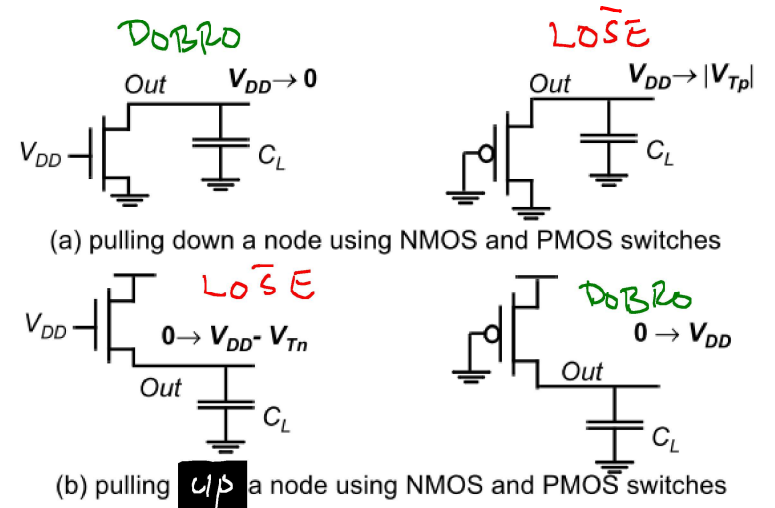
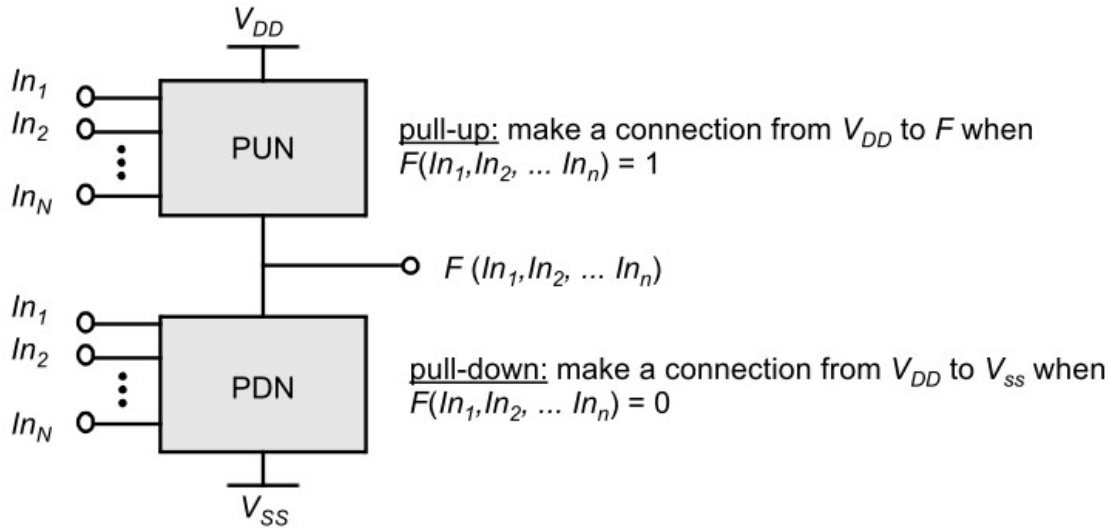
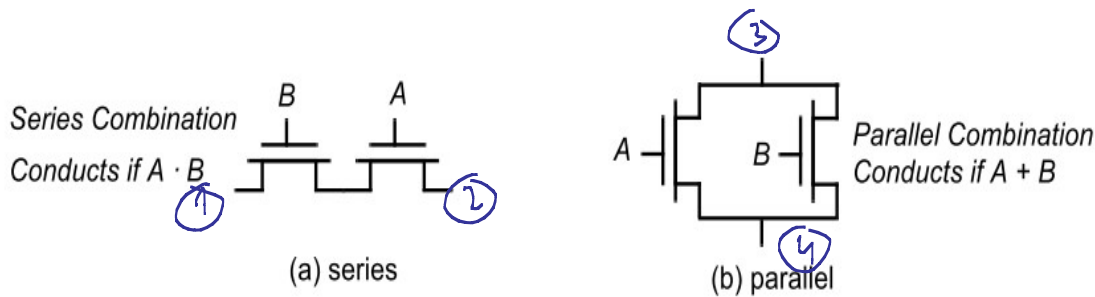


CMOS KOMBINACIÓNA KOLA

STATIČKA CMOS (EKSTENZIJA CMOS INVERTORA, COMPLEX GATES)



- NMOS DOBAR DRADVER ZA LOGIČKU "0", A LOŠ ZA LOGIČKU "1".
- PMOS DOBAR DRADVER ZA LOGIČKU "1", A LOŠ ZA LOGIČKU "0".



- LOGIČKA "I" FUNKCIJA SE OSTVARUJE PETHOM VEZOM TRANZISTORA (MORAJU DA VODE "I" A "I" B DA BI PROTEKLA STRUJA IZMEĐU 1 i 2).

- Logička "ILI" funkcija se ostvaruje paralelnom vezom tranzistora (mora da vodi "ILI" A "ILI" B da bi protekla struja između ③ i ④).
- Pošto je bazična komponenta inverter, defaultno se implementiraju invertorske funkcije, $[Y = \overline{(\text{logička funkcija})}]$.
- NMOS se aktivira logičkom "1", a PMOS logičkom "0".
- Kada je u aktivnom stanju NMOS obezbeđuje logičku "0", a PMOS logičku "1", na izlazu kola.

D REALIZACIJA LOGIČKE FUNKCIJE SA VIŠE ULAZA (ALGORITAM)

- ① Pošto NMOS (Pull-Down-PDN) mreža realizuje logičku "0", logička funkcija pod komplementom određuje interkonekciju NMOS mreže.
- ② Pošto se PMOS (Pull-Up-PU) mreža aktivira logičkom "0" na ulazu, interkonekcija PMOS mreže je određena logičkom funkcijom koja se dobija primenom De-Morganovog pravila na izvornu funkciju.

PRIMER 1 ODREDITI ELEKTRIČNIY ŠEMU KOLA KOJA IMPLEMENTIRAJU SLEDEĆE

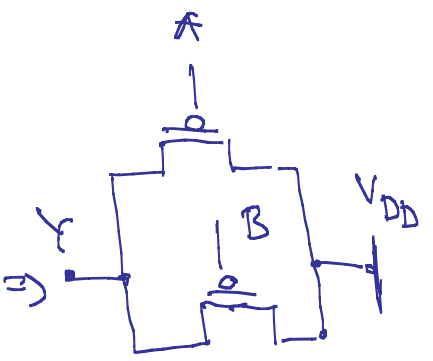
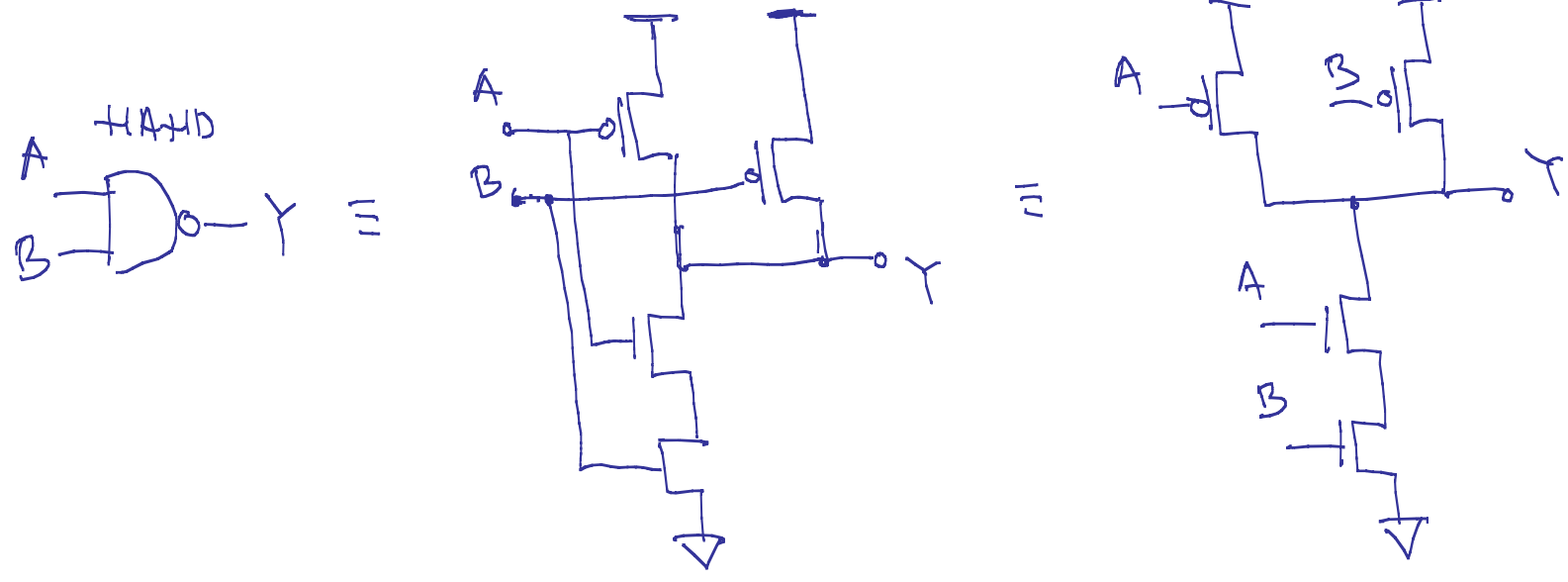
LOGIČKE FUNKCIJE: (a) $Y = A \cdot B$, (b) $Y = A + B$, (c) $Y = \overline{A \cdot (B + C)}$ i

(d) $Y = \overline{(A + B) \cdot (C + D)}$. (e) $Y = \overline{A \cdot B + C + D \cdot E}$

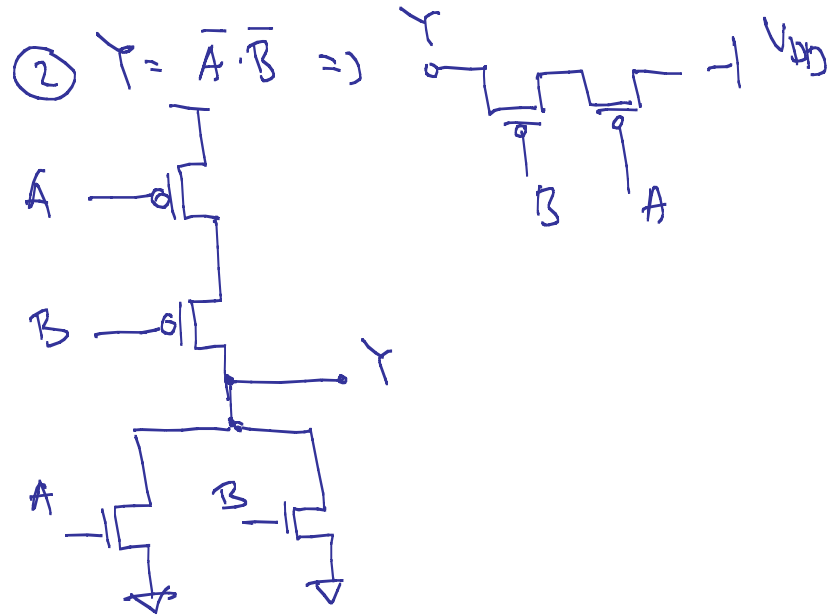
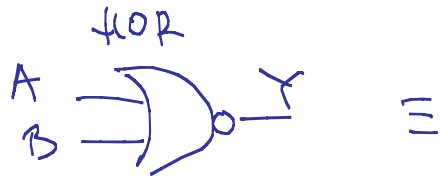
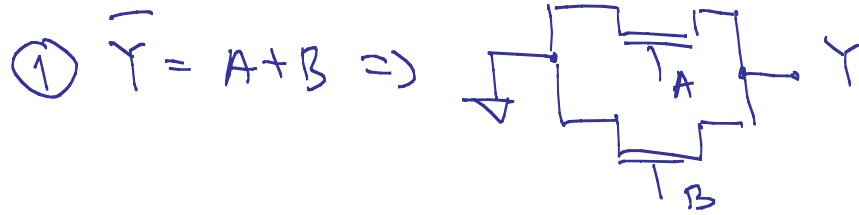
(a) $Y = \overline{A \cdot B}$ (NAND ≡ "HI")

(1) \overline{Y} ODREĐUJE NMOS PREŽU: $\overline{Y} = A \cdot B \Rightarrow$

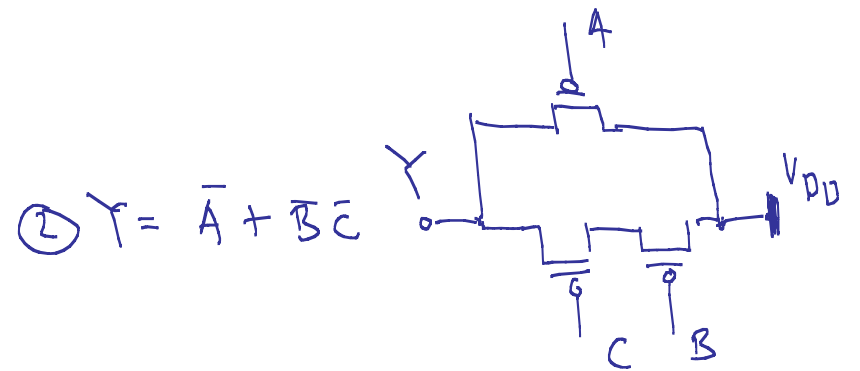
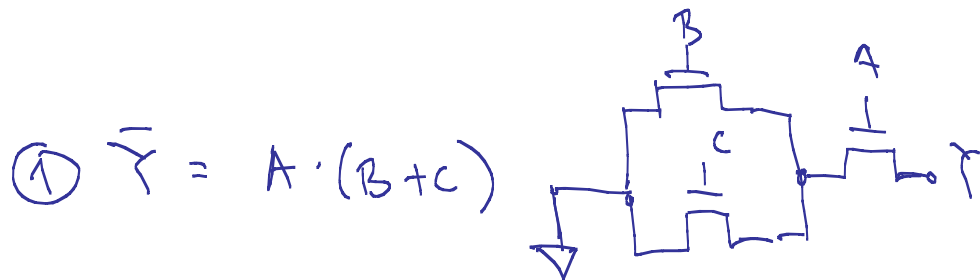
(2) De-Morgan (\overline{Y}) ODREĐUJE PMOS PREŽU: $\overline{Y} = A \cdot B = \overline{\overline{A} + \overline{B}} \Rightarrow$

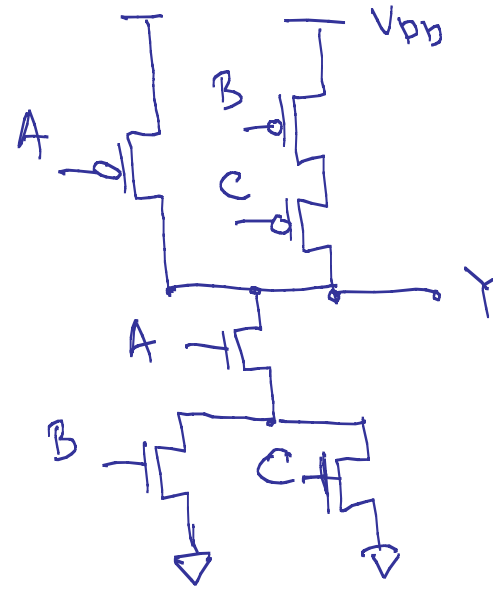
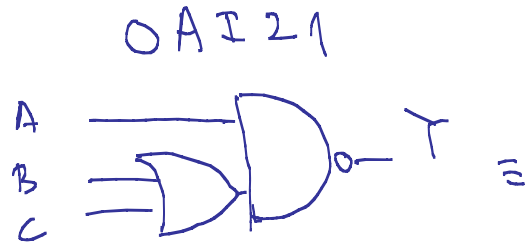


⑥ $Y = \overline{A+B}$ (NOR = "HiLi")



⑦ $Y = \overline{A \cdot (B+C)}$

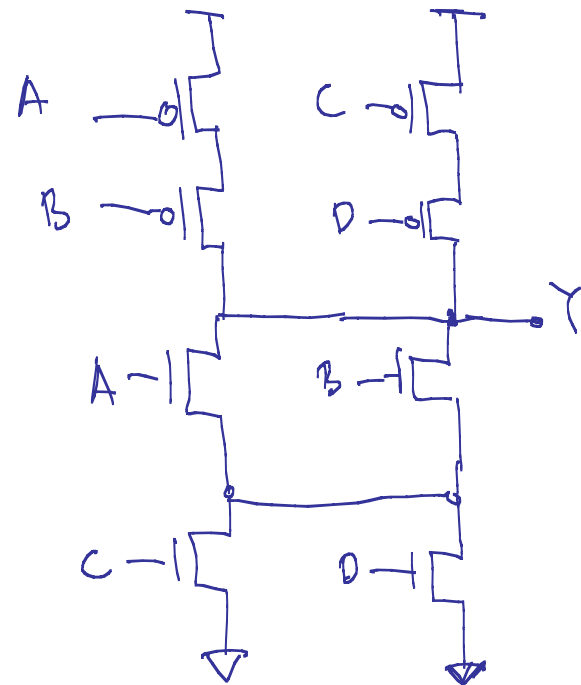
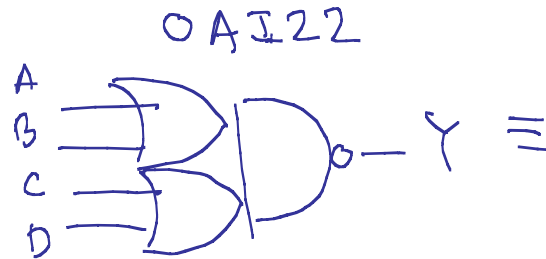




d) $Y = \overline{(A+B)(C+D)}$

① $\bar{Y} = (A+B) \cdot (C+D)$

② $Y = \bar{A} \cdot \bar{B} + \bar{C} \cdot \bar{D}$

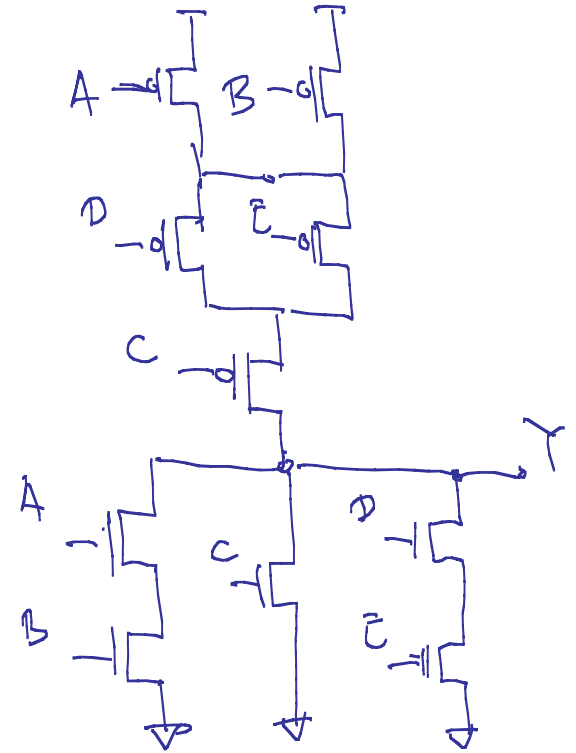
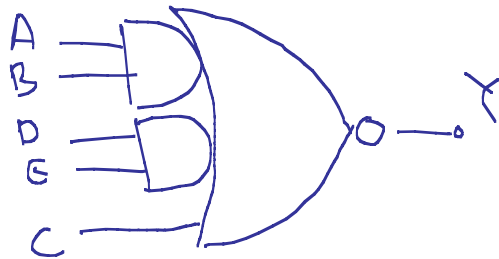


$$\textcircled{e} Y = \overline{AB + C + D \cdot E}$$

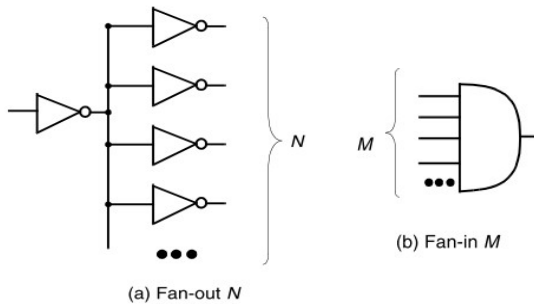
$$\textcircled{1} \overline{Y} = A \cdot B + C + D \cdot E$$

$$\textcircled{2} Y = (\overline{A + B}) \cdot \overline{C} \cdot (\overline{D + E})$$

AOI221



D VTC KOMPLEKSNIJS GEDTA (GEDT ZA VIŠE ULAZA)

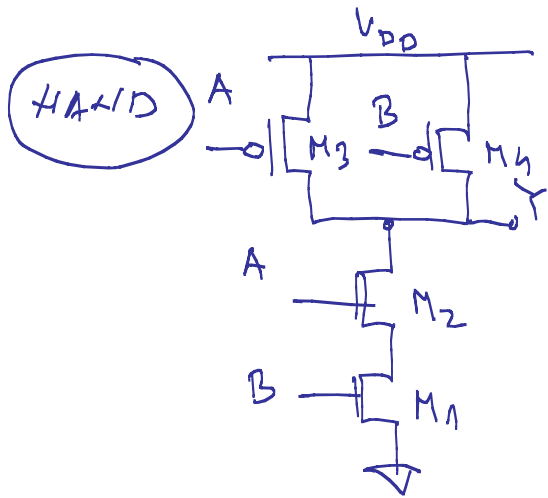


- FAN-IN $\equiv M$ - BROJ ULAZNIH PIKOVA/PORTOVA
- FAN-OUT $\equiv N$ - MAKSIMALNI BROJ GEDTOVA ISTE VRSTE KOJIMA SE MOŽE OPTERETITI KONKRETNI GEDT, A DA PRI TOJE PERFORMANSE OSTAJU U SPECIFICIRANIM GRANICAMA.
- ZA KOMPLEKSNI GEDT VAŽI $M \geq 2$.

PRIMER 2

ZA OSNOVNU KWALITATIVNU ANALIZU NAHO I HOR KOLA SKICIRATI

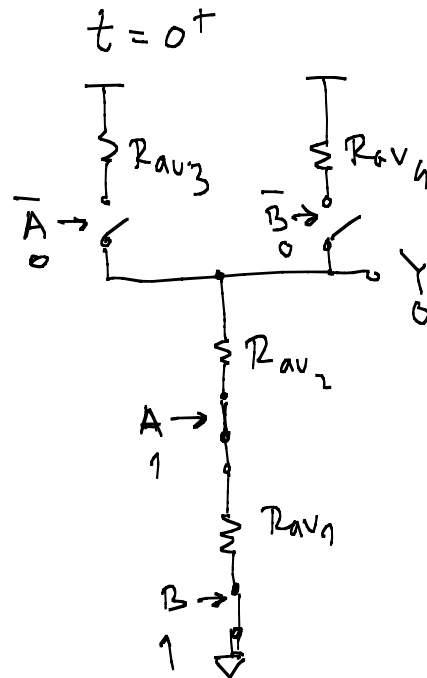
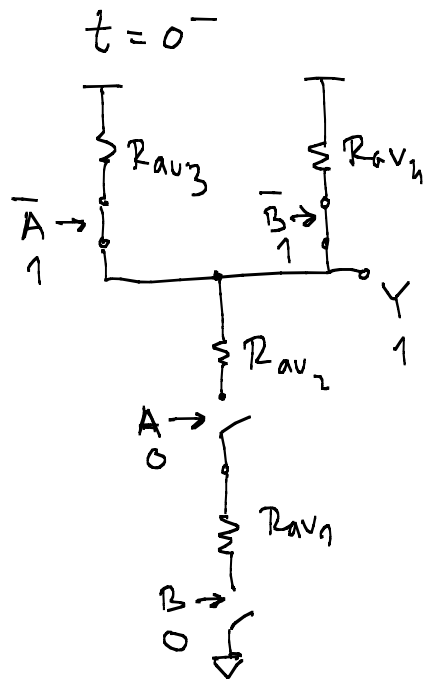
VTC ZA RAZLIČITE KOMBINACIJE ULAZA



A	B	Y	KONSTANTA
0	0	1	(M1, M2) OFF; M3, M4 ON
0	1	1	(M1, M2) OFF; M3 ON, M4 OFF
1	0	1	(M1, M2) OFF; M3 OFF, M4 ON
1	1	0	(M1, M2) ON; M3, M4 OFF

- $Y = 1 \rightarrow 0$, ZA: (a) $A=B=0 \rightarrow 1$, (b) $A=0 \rightarrow 1, B=1$; (c) $A=1, B=0 \rightarrow 1$.

(a) $A=B=0 \rightarrow 1$



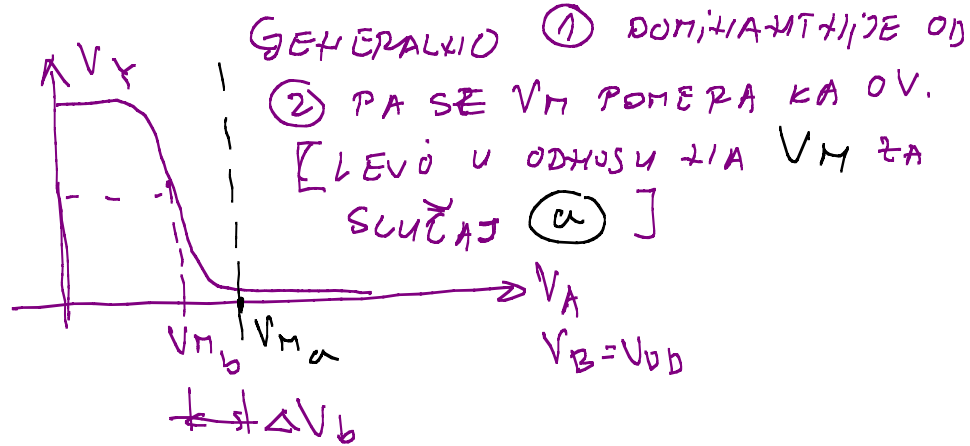
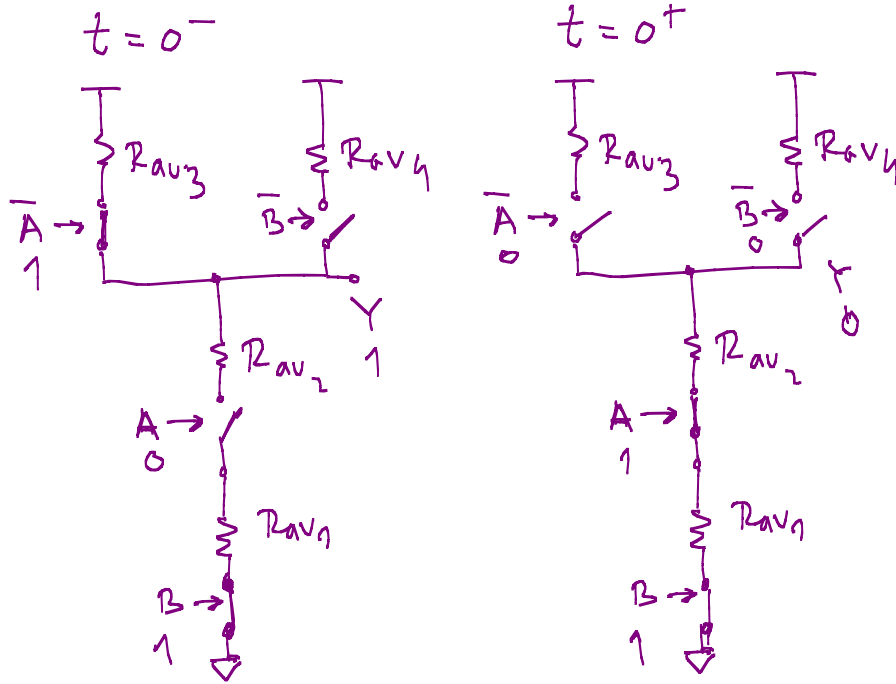
• ISTA DRADVERSKA SPOSOBNOST ZA P; UMOS MREŽU. \Rightarrow SIMETRIČNA VTC

$$R_{pup} = Rav_3 \parallel Rav_4$$

$$R_{podn} = Rav_1 + Rav_2$$

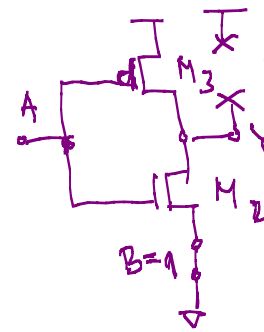


Ⓐ $A=0 \rightarrow 1, B=1$

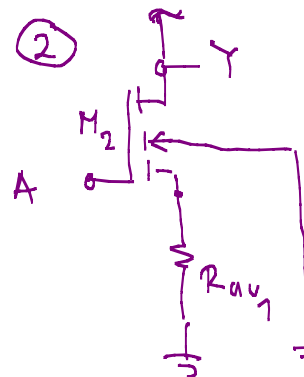


MAHA DRAVRSKA SPOSOBNOST ZA PMOS MREŽU (LOGIČKA "1" NA Y OBEZBEDENA SAMO JEDNIM TRANZISTOROM $R_{av3} \parallel R_{av3} \parallel R_{av4}$).

① EFEKTIVNO, KOLO IZGLEDA:



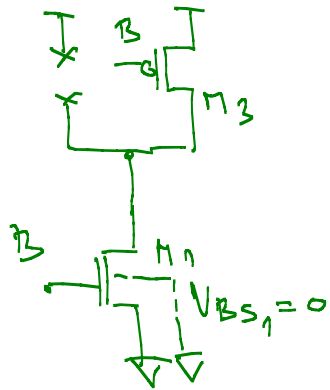
KAO DA JE PMOS DUPLO
 UŽI. ($W_P \downarrow$) $\Rightarrow r = W_P / W_N \downarrow$
 $\Rightarrow V_M \approx \frac{r}{1+r} V_{DD} \downarrow$



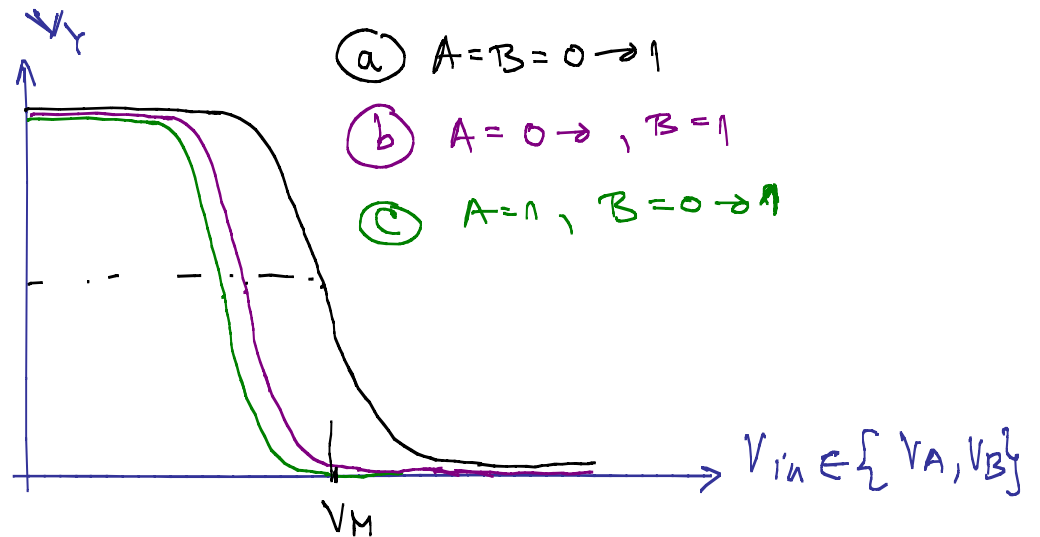
② $V_{SB} > 0 \Rightarrow V_{TH2} > V_{TH0} \Rightarrow$
 $V_A(V_{SB}=0V) < V_A(V_{SB} > 0V)$
 $\Rightarrow V_M \propto V_A \Rightarrow V_M \uparrow$

Ⓒ $A=1, B=0 \rightarrow 1$. U OVOM SLUČAJU VAŽI ISTO KAO I ZA SLUČAJ Ⓑ STIM ŠTO NEMA EFEKTA PODLOGE (SORS I BALK M_1 KRATKO SPOJENI) PA SE V_M POMERA ZA

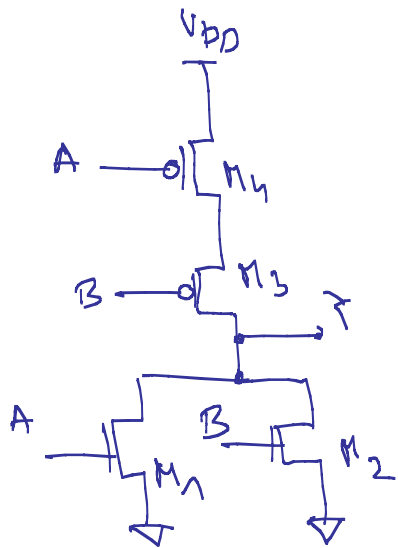
V_{E1} izkros τj. $\Delta V_c > \Delta V_b$.



• GLEDANU ZBIRANU VTC HATI D GZETA
IMA PROFIL:



1102

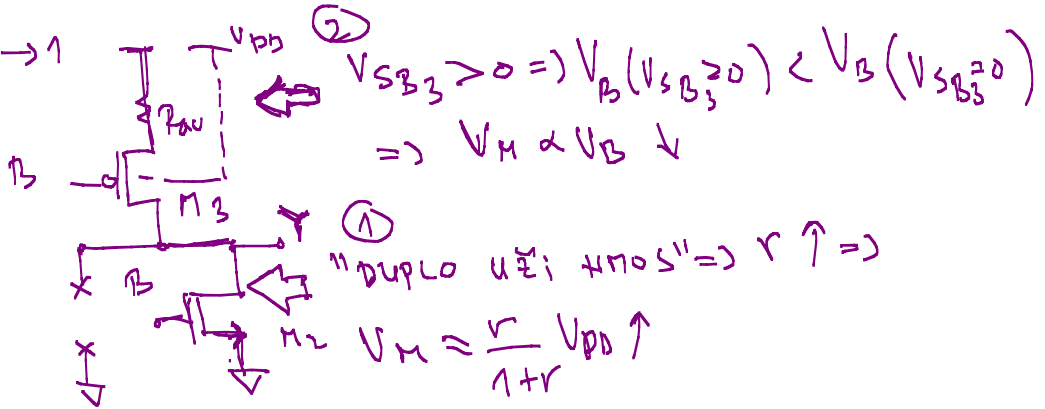


A	B	Y	KOMENTAR
0	0	1	(M1, M2) OFF, (M3, M4) ON
0	1	0	M1 OFF, M2 ON, (M3, M4) OFF
1	0	0	M1 ON, M2 OFF, (M3, M4) OFF
1	1	0	(M1, M2) ON, (M3, M4) OFF

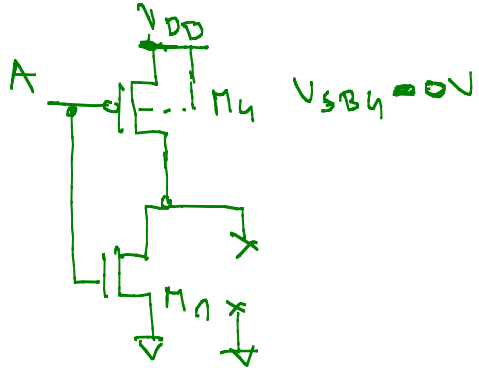
• $Y = 1 \rightarrow 0$; ZA: (a) $A=B=0 \rightarrow 1$, (b) $A=0, B=0 \rightarrow 1$
(c) $A=0 \rightarrow 1, B=0$.

(a) SIMETRIČNA VTC

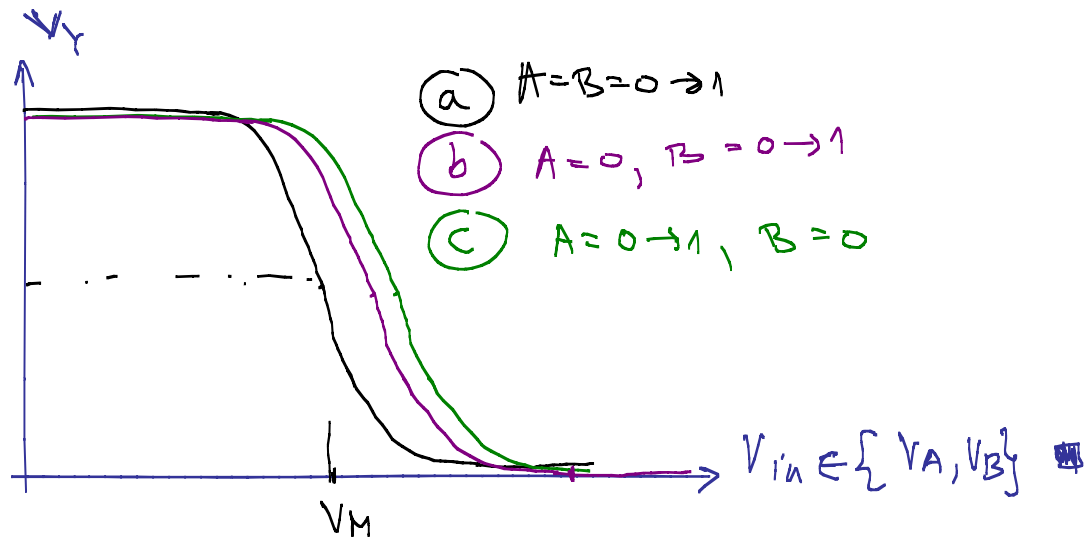
(b) $A=0, B=0 \rightarrow 1$



(c) $A=0 \rightarrow 1, B=0$, ISTO KAO ZA (b)
SARU BEŽ EFEKTA PODLOGE

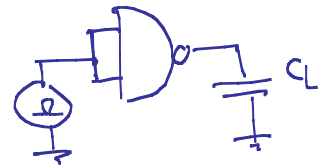


• PROFIL VTC ZA KOR:

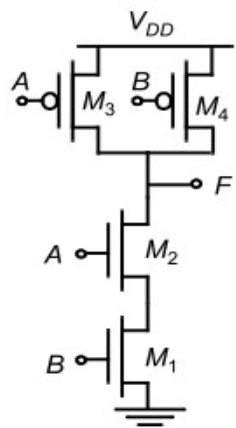


- (a) $A=B=0 \rightarrow 1$
- (b) $A=0, B=0 \rightarrow 1$
- (c) $A=0 \rightarrow 1, B=0$

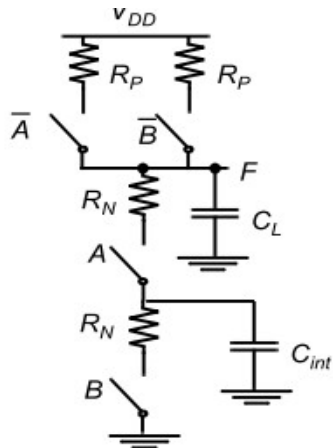
• VTC, ODHOSNO MARGINE ŠUMA, JAKO ZAVISNE OD KOMBINACIJE ULAŽNIH SIGNALA. PROCENA MARGINE ŠUMA ZA KOMPEKSATI GJEJT NIJE TRIVIJALAN POSAO. U PRAKSI SE OBIČNO VTC I MARGINE ŠUMA PROCENJUJU PRI ISTOVREMNOJ PODUDI SVIH ULAŽA:



D PROPAGACIONO KAŠIJEHJE KOMPLEKSNIH GEOTOVA



(a) Two-input NAND



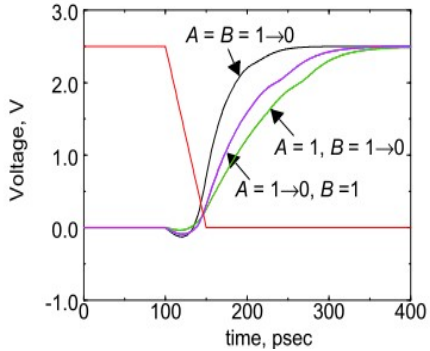
(b) RC equivalent model

• ZA ANALIZU SE, SLIČNO KAO KOD INVERTORA, KORISTI RC MODEL UZ PRIMENU CLMOROVE FORTULE.

• U PRVOJ APROKSIMACIJI OBIČNO SE ZAHTEVAJUŠE UTICAJ PARAZITNIH KAPACITIVOSTI IZTERNIH ČVUROVA (ČVUROVI KOJI NISU DIREKTNO VEŽANI

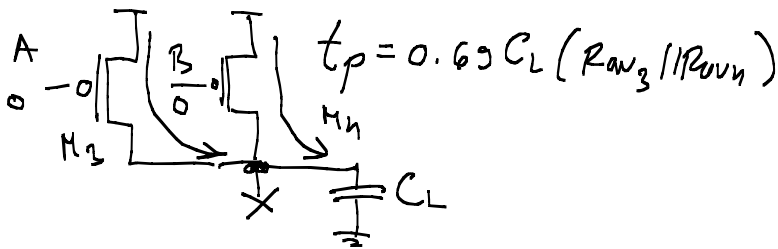
ZA IZLAZNI ČVOR). ZA GEOTOVE MAHJŠIH

DIMENZIJA OVA APROKSIMACIJA JE VALIDNA, DOK SE ZA GEOTOVE SA VELIKIM BROJEM ULAZA (VELIKI FANIN) OVE KAPACITIVOSTI MORAJU UZETI U OZBIQ.

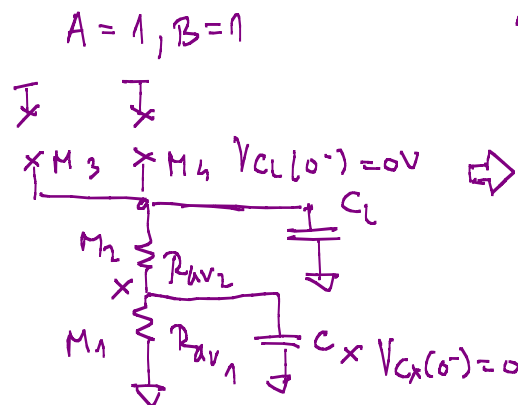


Input Data Pattern	Delay (psec)
A = B = 0 → 1	69
A = 1, B = 0 → 1	62
A = 0 → 1, B = 1	50
A = B = 1 → 0	35
A = 1, B = 1 → 0	76
A = 1 → 0, B = 1	57

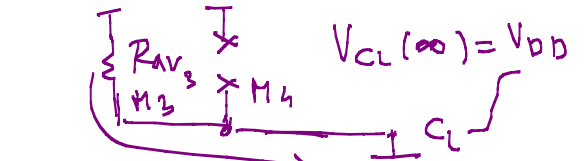
(a) A = B = 1 → 0



(b) A = 1 → 0, B = 1



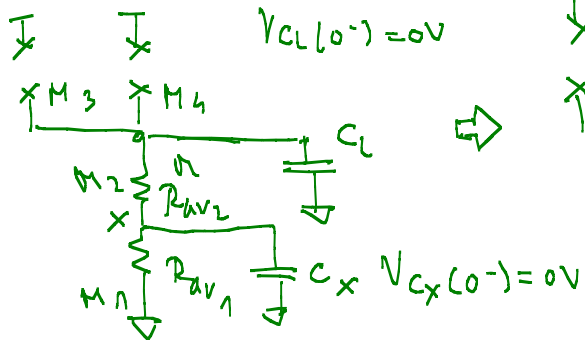
A = 0, B = 1 $t_p = 0.69 C_L R_{AV3}$



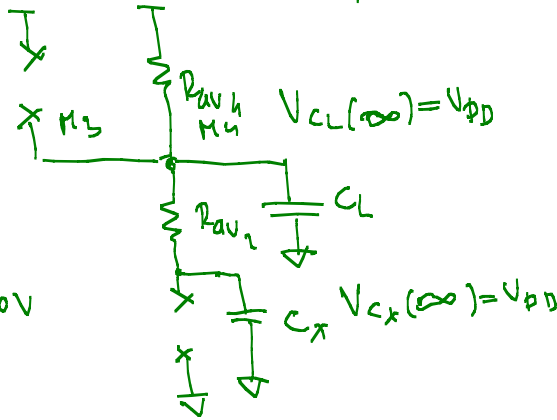
A = 0, B = 1 $C_X \times V_{CX(infinity)} = 0$

(C) $A=1, B=1 \rightarrow 0$

$A=1, B=1$



$A=1, B=0 \quad t_p = 0.69 [C_L R_{av1} + C_x (R_{av1} + R_{av2})]$



$t_{pa} < t_{pb} < t_{pc}$

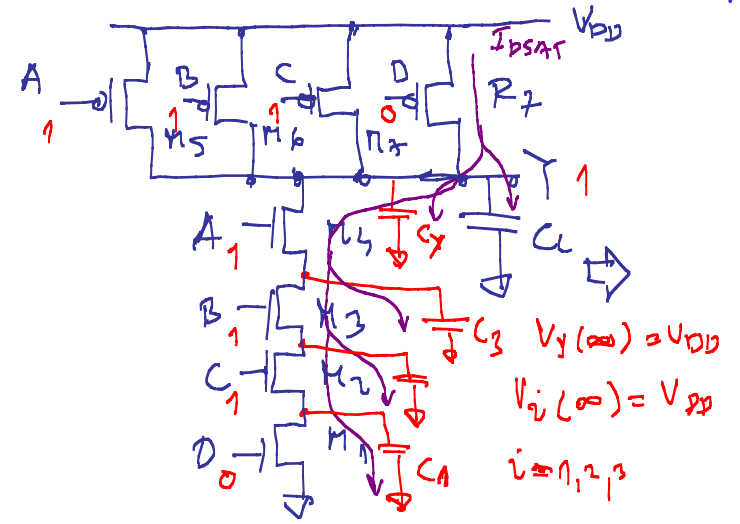
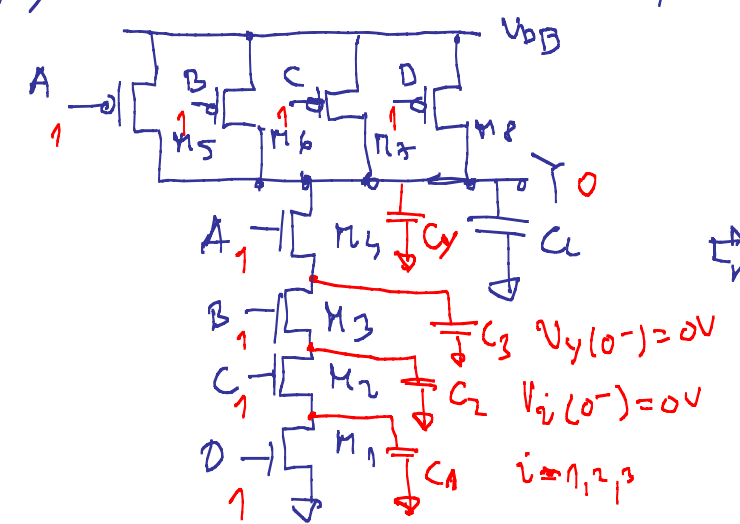
• PROPAGACIONO KVAŠTIJEHJE, KAO I VTC, JAKO ZAFISI OD KOMBINACIJE ULAZA (ULAZNOG PATERZIA / VEKTORA).

PRIMER 3 ODREDITI PROPAGACIONO KVAŠTIJEHJE ZA (FAXI-ITI = 4, KVAID 4) ZA HADGORI SLUČAJ. t_{pLH}

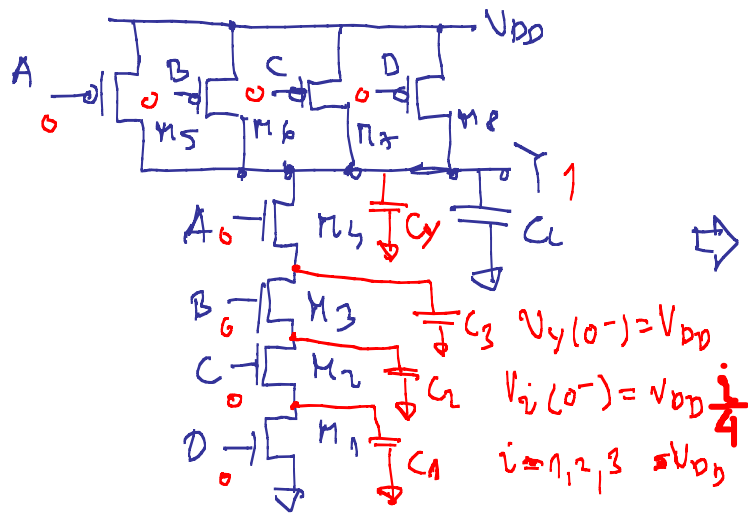
KVAID GOST SA ČETIRI ULAZA $= 0.69 (C_L + C_Y + C_1 + C_2 + C_3) R_T$

$t_p = \frac{t_{pLH} + t_{pHL}}{2}$

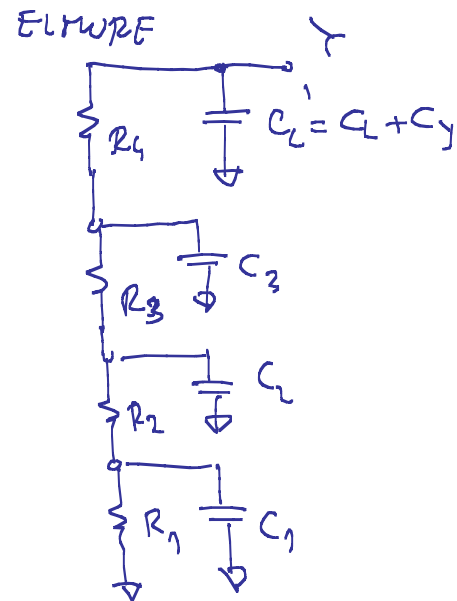
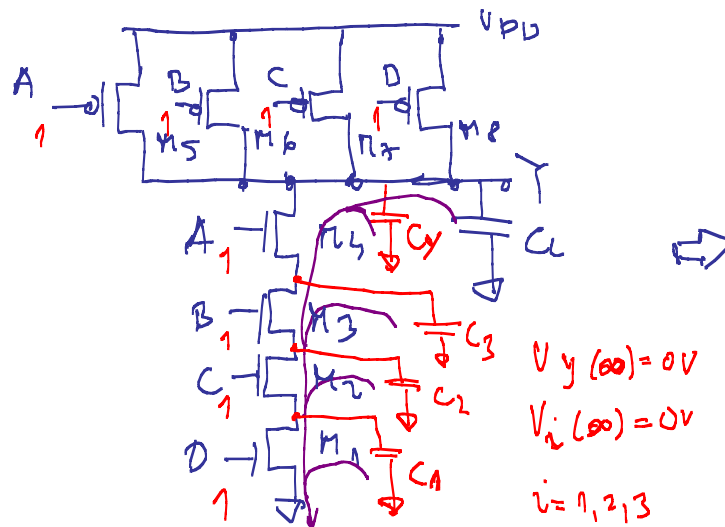
$R_{av} = R$
 $C_{int} = C$



$C_Y = C_4 + C_5 + C_6 + C_7 + C_8$



$$C_y = C_4 + C_5 + C_6 + C_7 + C_8$$



$$t_{pHL} = 0.69 \left[C_1 R_1 + C_2 (R_1 + R_2) + C_3 (R_1 + R_2 + R_3) + C'_L (R_1 + R_2 + R_3 + R_4) \right] \quad t_{pHL} \approx t_p (gnd \rightarrow Y)$$

• Pošto je $t_{pHL} \gg t_{pLH}$, za minimizaciju t_p treba optimizovati tranzistor M_1 (R_1 se povećuje uz svaku parazitu kapacitivnost).

• t_p kompleksnog šeta, kao i UTC, takođe zavisi od ulaznog vektora. Procena t_p kompleksnog šeta nije uvek jednostavan posao (pogotovo za šetove sa velikim fan-in-om), pa se gotovo uvek pribegava SPICE simulaciji;

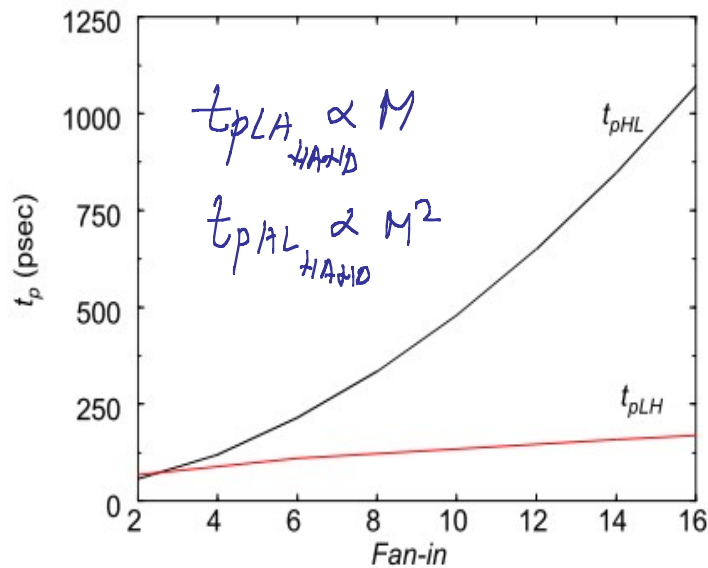


Figure 6.13 Propagation delay of CMOS NAND gate as a function of fan-in. A fan-out of one inverter is assumed, and all pull-down transistors are minimal size.

- GENERALIZACIJA, PERFORMANSE GEJTA SE ZNAČAJNO DEGRADIRAJU SA PORASTOM FAN-INA. ZA SLUČAJ NANO GEJTA SA M ULAZA:

$$t_{pHL} \approx RC (1 + 2 + 3 + \dots + M) = RC \frac{M \cdot (M+1)}{2}$$

- ZA $M \gg 1$: $t_p \propto M^2$

- U OPŠTEM SLUČAJU PROPAGACIONO KAŠNJENJE KOMPLEKSNOS GEJTA SE MOŽE PROČENITI POMOĆU:

$$t_p = t_{a1} M + t_{a2} M^2 + t_{a3} \quad \begin{matrix} \text{TEHNOLOŠKI} \\ \text{PARAMETRI} \\ \text{FAN-IN} \quad \text{FAN-OUT} \end{matrix}$$

- "OPTIMALAN" BROJ ULAZA

KOJI GARANTUJE DOBAR KOMPROMIS

IZMEĐU PERFORMANSI/POTROŠNJE I KOMPLEKSNOSTI JE $M_{OPT} = 4$.

PRIMER 4 PROČENITI ZA KOLIKO ĆE SE PROCENTUALNO DEGRADIRATI t_p GEJTA SA FAN-OUTOM, $N=5$, PROJEKTOVANOG ZA PROCES SA, $t_{a1} = 10 \text{ ps}$, $t_{a2} = 5 \text{ ps}$ I $t_{a3} = 7 \text{ ps}$, AKO SE, UMESTO OPTIMALNOG, USVOZI FAN-IN, $M=5$.

$$M_{opt} = 4 \Rightarrow t_{popt} = \frac{10ps \times 4}{40ps} + \frac{5ps \times (4)^2}{80ps} + \frac{7ps \times (5)}{35ps} = 155ps$$

$$M = 5 \Rightarrow t_p = \frac{10ps \times 5}{60ps} + \frac{5ps \times (5)^2}{125ps} + \frac{7ps \times (5)}{35ps} = 210ps$$

$$S t_p = 100 \cdot \frac{|t_{popt} - t_p|}{t_{popt}} = 35.48\% \quad \blacksquare$$

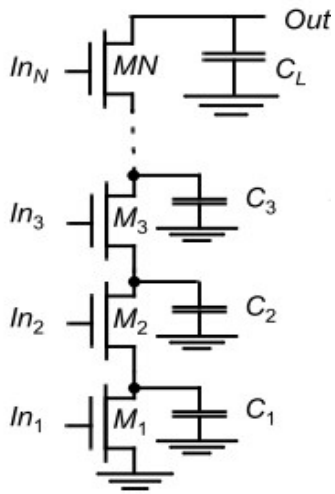
• STRATEGIJE ZA MINIMIZACIJU t_p KOMPLEKSNOS GJETA:

① UNIFORMNO POVEĆANJE DIMENZIJA.

KPR. ZA MALO GJEST (PRIMER3) TREBA MINIMIZOVATI t_{pHL} . NAJEDNOSTAVNIJI PRISTUP JE ESTE UNIFORMNO POVEĆATI ŠIRINU KANALA I MOS TRANZISTORA ($W \uparrow \Rightarrow R \downarrow$) MEĐUTIM NIE TREBA IZGUBITI IZ VIDA DA SA POVEĆANJEM W RASTU I PARAZITNE KAPACITIVNOSTI PA JE OVAJ PRISTUP VRLO OGRANIČEN TO. TREBA BA KORISTITI SA OPREZOM. RADIKALNIOM PRIMENOM OVE TEHNIKE DOBITCI OSTVARENJI MINIMIZACIJOM OTPORNOSTI MOGU BITI POHISTENI SELF-LOADING EFEKTOM.

② PROGRESIVNO POVEĆANJE DIMENZIJA

KPR. ZA MALO GJEST, DOMINANTAN UTICAJ NA t_{pHL} IMA OTPORNOST KANALA

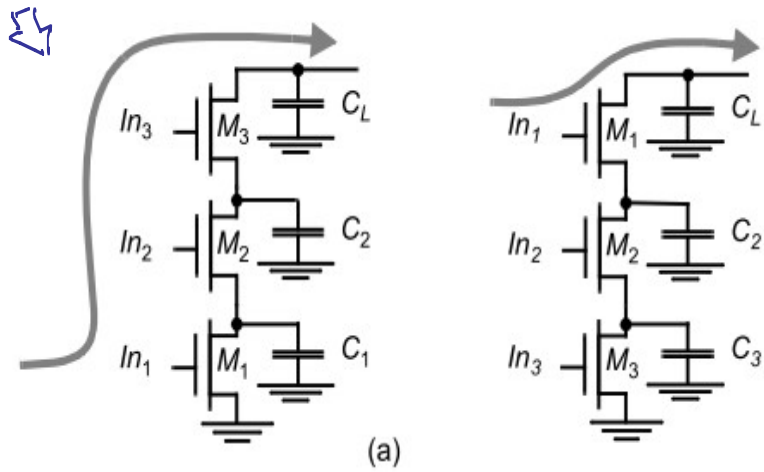


CMOS TRANZISTORA KOJI JE NAJUDALJEJIJI OD IZLAZA (NAJBLIŽI MASI). BOLJI PRISTUP OD UNIFORNIZNOG POVEĆANJA DIMENZIJA, JESTE PROGRESIVNO DIMENZIONISANJE: $W_1 > W_2 > \dots > W_N$.

3 OPTIMIZACIJA RASPOREDA ULAZA (INPUT-REORDERING).

OVAJ PRISTUP ZAHTEVA PAŽLJIVO SAGLEDAVANJE OKRUŽENJA U KOME SE JEŠTA HALAZI. NA OSNOVU ANALIZE OKRUŽENJA MOŽE SE IDENTIFIKOVATI ULAZ KOJI SE HALAZI NA KRITIČNOM PUTANJU. POZICIJA OVAKVOG ULAZA MOŽE ZNAČAJNO DA UTIČE NA t_{pD} .

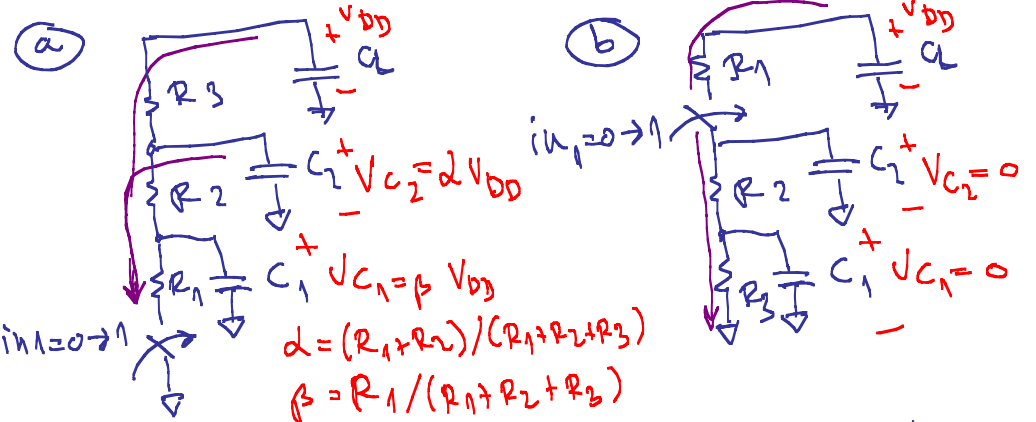
IPR. AKO NA ULAZ (in_N) VANDZ JEŠTA POLAZI KRITIČAN SIGNAL (in_1 LEŽI NA



$$t_{pHL a} > t_{pHL b}$$

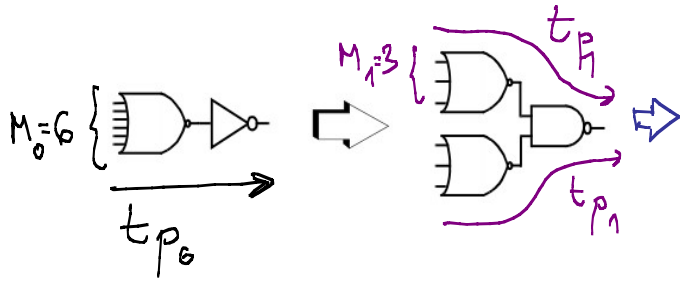
KRITIČNOM PUTANJU), POSTAVLJANJE (in_1) BLIŽE IZLAZNOM ČVORU MINIMIZUJE SE t_{pHL} .

• ZA: $in_1 = 0 \rightarrow 1$, $in_2 = in_3 = 1$



TRABA ISPRAVNITI C_L, C_1, C_2 TRABA ISPRAVNITI SAMO C_L

3) ALTERNATIVNA IMPLEMENTACIJA LOGIČKE FUNKCIJE. SVAKA LOGIČKA FUNKCIJA VIŠES PEDA MOŽE DA SE REALIZUJE PRAZLIČITIM KOMBINACIJAMA LOGIČKIH FUNKCIJA NIŠES PEDA. NA OVAJ NAČIN SE MOŽE REDUKOVATI FAN-IN, A SAMIM TIM MINIMIZOVATI t_p ($t_p \propto M^2$).



SUSTINSKI, 1 NOR6 GJEOT JE ZAMEHJELI SA 2 NOR3 GJEOTA KOJA SE SA STAKUJETA KAŠHJELJA "VIDE" KA-O 1 NOR3 GJEOT, PA JE $t_{p1}/t_{p0} \propto M_1^2/M_0^2 = 9/36 = 1/4$
 T.J. $t_{p1} \approx t_{p0}/4$ POD PRETPUSTAVOM DA JE $t_{p1} \approx t_{p1AV}$

D DIMENZIONISANJE TRANZISTORA KOM PLEKSNOS GJEOTA.

• OPSTE PRIHVACENA STRATEGIJA ZA DIMENZIONISANJE JEŠTE SIMETRIČNA VTC, ODHOSHO

$$t_{pLH} \approx t_{pHL}$$

• ODHOS (w_p/w_n) JE PRVENSTVENO ODREĐEN ODHOSOM PORRETLIVOSTI KOSJACA

(μ_n/μ_p), ŠDE JE (μ_n/μ_p) $\in [1.5, 4]$. ZA ANALIZU PRVOG PEDA OBIČNO SE

UZIMA $\mu_n \approx 2 \mu_p$. POSTO JE, $R_{AVH} = \frac{3}{4} \frac{V_{DD}}{I_{DSATn}} \propto \frac{1}{\mu_n (w/L)_n}$

$$I_{DSAT} = k_n \left(\frac{w}{L}\right)_n V_{DSAT} \left(V_{in} - V_{THn} - \frac{V_{DSAT}}{2}\right)$$

$$k_n' = \mu_n C_{ox}$$

DA BI SE DOBILA SIMETRIČNA VTC TREBA DA VAŽI $R_{AVH} = R_{AVP}$:

$$\frac{R_{AVP}}{R_{AVH}} = \frac{\frac{1}{k_p' (W/L)_p}}{\frac{1}{k_n' (W/L)_n}} = \frac{k_n' \cdot \frac{W_H}{W_P}}{k_p'} = 1 \Rightarrow \frac{W_H}{W_P} = \frac{k_p'}{k_n'} = \frac{\mu_p \epsilon_{ox}}{\mu_n \epsilon_{ox}} = \frac{\mu_p}{\mu_n} \Rightarrow W_P = \left(\frac{\mu_n}{\mu_p} \right) W_H$$

$L_p = L_H = L_{min}$

ALO SE UZME $\mu_n \approx 2\mu_p \Rightarrow \frac{W_H}{W_P} = \frac{1}{2} \Rightarrow W_P = 2 \cdot W_H$.

- ZA SVAKI PROCES OBİČNO SE MOŽE UZETI $(W/L)_{min} = [3/2, 2]$

PRIMER 5 OPREDITI DIMENZIJE NADMAH, EG, MOGUĆES, INVERTORA ZA TEHNOLOŠKI PROCES

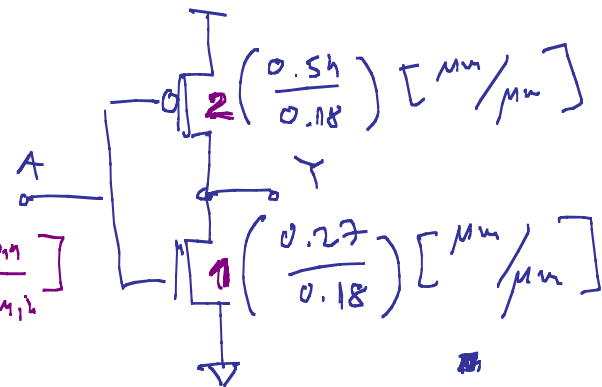
180nm. U SVODITI $\mu_n/\mu_p = 2$. I $(W/L)_{min} = 3/2$.

$$\left(\frac{W}{L} \right)_{min} = \frac{3}{2} \quad ; \quad L_{min} = 180nm \Rightarrow W_{min} = \left(\frac{W}{L} \right)_{min} \cdot L_{min} = \frac{3}{2} \cdot 180nm = 270nm$$

$$\frac{W_P}{W_n} = \frac{\mu_n}{\mu_p} \Rightarrow W_{Pmin} = \left(\frac{\mu_n}{\mu_p} \right) W_{min} = 2 \cdot W_{min} = 540nm$$

$W_H = W_{min}$

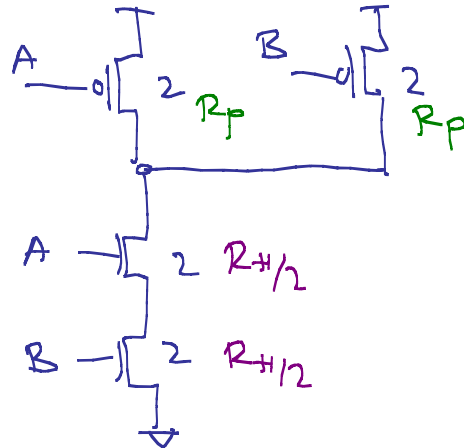
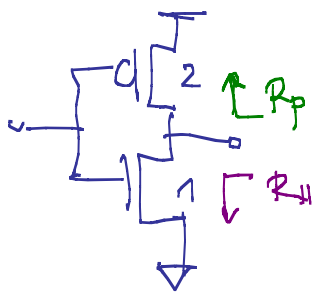
- ČESTO SE DIMENZIJE TRANZISTORA GEJTA IZRAČUNAVAJU U $\left[\frac{W_{min}}{L_{min}} \right]$



- DA BI SE OBEZBEDILA REGULARNOST, SUI KOMPLEKSNI GEJTOVI U BIBLIOTECI STANDARDNIH ĆELIJA SE DIMENZIONISU NA OSNOVU MINIMALNOS INVERTORA. PRAKTIČNO, CIJ JE DIMENZIONISATI TRANZISTORE TAKO DA KOMPLEKSNI GEJT IMA Približno iste PERFORMANSE KAO I MINIMALNI INVERTOR. POSTUPAK SE SUDI NA UPRIVANJE (MEČOVANJE) OTPORNOSTI P_{UP}/P_{DN} MREŽE I OTPORNOSTI KANALA PMOS/ NMOS TRANZISTORA U MINIMALNOM INVERTORU (ČESTO SE IZRAŽAVA I "JEDINIČNI" INVERTOR)
- POSTOJA KOMPLEKSNI GEJT NIJE MOGUĆE OSTVARITI SIMETRIČNU VTC ZA SVAKU KOMBINACIJU ULAZA, POSMATRA SE NAJGORI SLUČAJ, ODNOSNO NAJVEĆA OTPORNOST P_{UP}/P_{DN} MREŽE.

PRIMER 6 ODREDITI DIMENZIJE TRANZISTORA ZA KOLA IZ PRIMERA 1, TAKO DA LIJHOVE PERFORMANSE, U NAJGOREM SLUČAJU, BUDU ISTE KAO I PERFORMANSE JEDINIČNOG INVERTORA DIMENZIJA $(M_P/M_N) = (2/1)$.

α) $T = \overline{A \cdot B}$



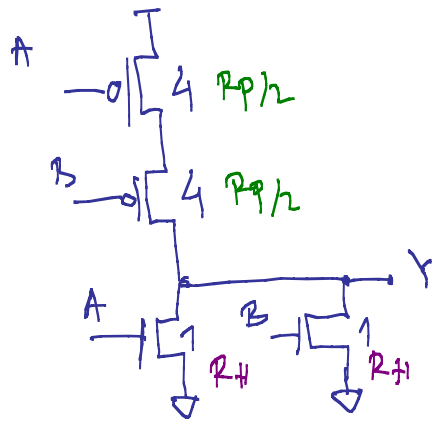
- U NAJGOREM SLUČAJU U P_{DN} MREŽI VODE OBA NMOS TRANZISTORA (REPA VEZA) TAKO DA OTPORNOST OVIH TRANZISTORA TREBA DA BUDE DUPLO MANJA, ODNOSNO ŠIRINA DUPLO VEĆA ($R_{av} \propto 1/W$), U ODNOSU NA NMOS

TRANZISTOR JEDINIČNOG INVERTORA. SA DRUGE STRANE, MAKSIMALNA OTPORNOST PUP MREŽE

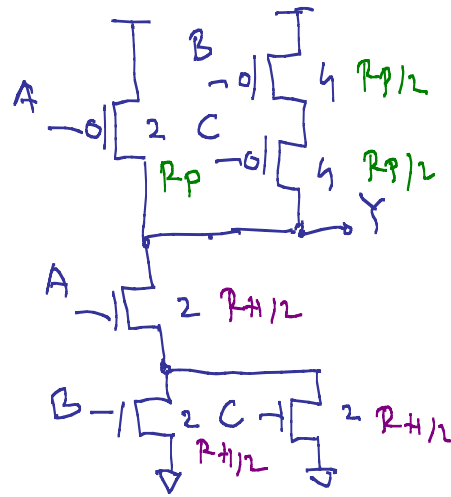
(PARALELNA VEZA) SE OSTVARUJE KADA UODI SAPO JEDAN PMOS TRANZISTOR.

($R_1 || R_2 < \min\{R_1, R_2\}$). PO ISTOM PRINCIPU SU ODREĐENE DIMENZIJE ZA OSTALE SLUČAJEVE.

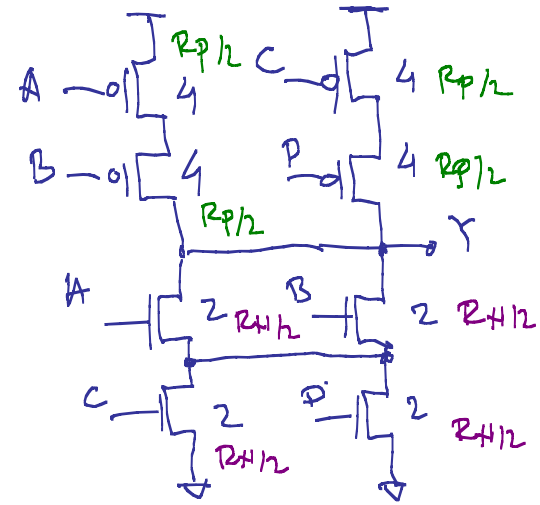
(b) $Y = \overline{A+B}$



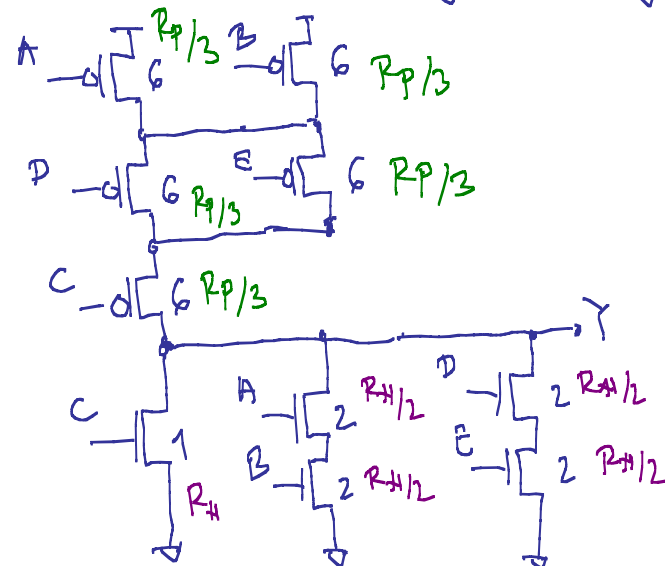
(c) $Y = \overline{A \cdot (B+C)}$



(d) $Y = \overline{(A+B) \cdot (C+D)}$

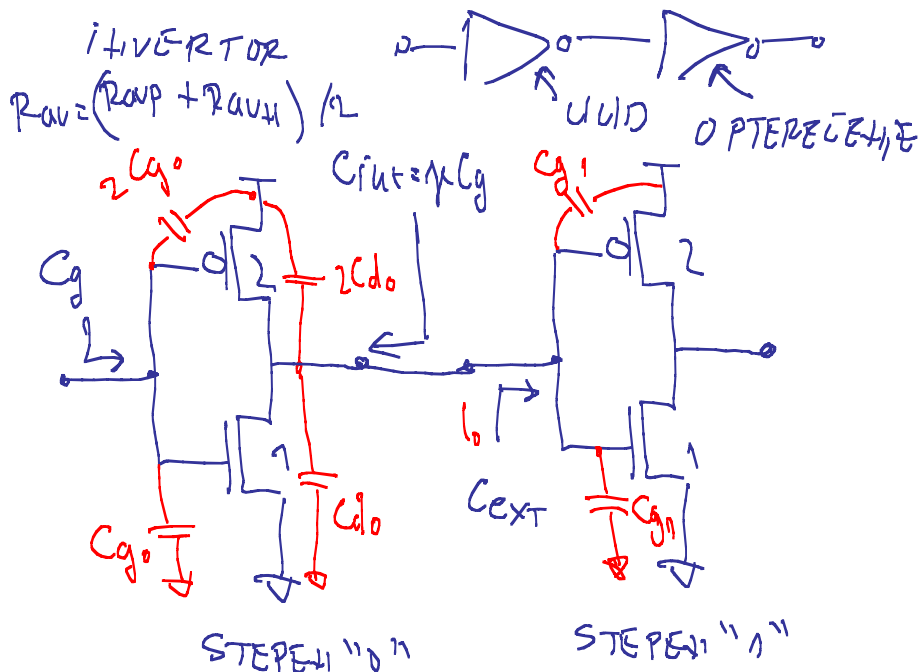


(e) $Y = \overline{A \cdot B + C + D \cdot E}$



D MODEL PROPAGACIONOG KAŠIJEŃIJA KOMPLEKSNOG GEJTA.

- PRETHODNO JE IZVEDENI KOMPAKTAN MODEL PROPAGACIONOG KAŠIJEŃIJA ZA INVERTOR, $t_p = t_{pu} (1 + \frac{t}{\mu})$, KOJI OMOGUĆAVA RELATIVNU JEDNOSTAVNU ANALIZU NA OSNOVI KOJE SU KONTASTOVANE BITNE RELACIJE IZMEĐU PERFORMANSI I POTRUŠIJE I DIMENZIJA.
- IDEJA JE IZVESTI MODEL t_p ZA KOMPLEKSNI GEJT U SLIČNOJ FORMI. DA BI SE TO POSTIGLO POTRBU ĆE BITI IZVEDENI MODEL t_p ZA INVERTOR POD, ZA NIKAKVI, REALISTIČNIJIM USLOVIMA. PRETPOSTAVKA: ULD (ULIT UNDER DESIGN) POTRBU IJE KAO ISTOG TIPIA. AKO SE RADI O INVERTORU, TO PRAKTIČNO ZNAČI DA INVERTOR POSIJEDE



- PARAZITNI EFEKTI VEĆE MOGU BITI ZAMENARIVANI ($V_w \rightarrow 0, C_w \rightarrow 0$); POŠTO SE RADI O MALOM RASTUJANJU IZMEĐU GEJTOVA. $\Rightarrow C_{ext} = C_w + C_{g1} \approx C_{g1}$
- AKO SE SA C_{g_i} / C_{d_i} OZNAČE PARAZITNE KAPACITIVNOSTI GEJTA / DRŽIJA I MOS TRANZISTORA U i -TOM STEPENU, OMOGA (U ZAMENARIVANJE MILEROVOG EFEKTA) VAŽI:

$$C_g = 3 C_{g0}, \quad C_{int} = 3 C_{d0}, \quad C_{ext} \approx 3 C_{g1}$$

$$t_p = 0.69 R_{av} (C_{int} + C_{ext}) = 0.69 R_{av} (3C_{d0} + 3C_{g1}) = \underbrace{0.69 R_{av} (3C_{g0})}_{t_{inv}} \left(\underbrace{\frac{C_{d0}}{C_{g0}}}_{\mu} + \underbrace{\frac{C_{g1}}{C_{g0}}}_{f} \right)$$

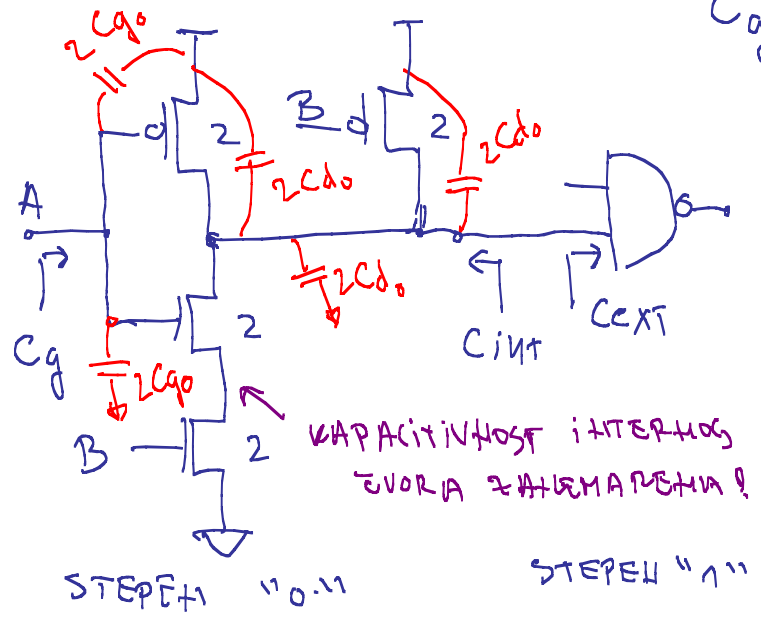
$$t_{inv} = 0.69 R_{av} (3C_{g0}), t_{po} = 0.69 R_{av} C_{int} = 0.69 R_{av} (3C_{d0})$$

$$\mu = \frac{C_{int}}{C_g} = \frac{3C_{d0}}{3C_{g0}} = \frac{C_{d0}}{C_{g0}} \quad ; \quad f = \frac{C_{ext}}{C_{int}} = \frac{3C_{g1}}{3C_{g0}} = \frac{C_{g1}}{C_{g0}} \quad ; \quad \frac{t_{po}}{t_{inv}} = \frac{C_{d0}}{C_{g0}} = \mu \Rightarrow t_{po} = \mu t_{inv}$$

$$t_p = t_{inv} (\mu + f) = t_{po} / \mu (\mu + f) = t_{po} (1 + f/\mu) \Rightarrow \text{PRAKTIČE DOBIZELI REZULTAT.}$$

• ISTA PROCEDURA SE MOŽE SPROVESTI ZA KOMPLEKSNIJE GJESTOVE. POŠTO SE OVAJ MODEL KORIŠTI NA ARHITEKTURAMA NIŽIH NIVONA, PRAKTIČNO JE ZAHTEVATI PARAZITNE KAPACITIVNOSTI INTERNIH ČVOROVA. TAKOĐE, ZA ANALIZU TREBA UZETI ULAZ SA NAJVEĆOM PARAZITNOM KAPACITIVNOŠĆU, KAKO BI SE DOBILA "WORST-CASE" PROCENA.

• PRAKID 2



$$C_g = 4C_{g0}; C_{int} = 6C_{d0}, C_{ext} = 4C_{g1}$$

$$t_{p_PRAKID} = 0.69 R_{av} (C_{int} + C_{ext}) = 0.69 R_{av} (6C_{d0} + 4C_{g1})$$

$$= \underbrace{0.69 R_{av} (3C_{g0})}_{t_{inv}} \left(2 \frac{C_{d0}}{C_{g0}} + \frac{4}{3} \frac{C_{g1}}{C_{g0}} \right)$$

$$t_{p_PRAKID} = t_{inv} \left(2\mu + \frac{4}{3}f \right) = \frac{t_{inv}}{\mu} \left(2 + \frac{4}{3} \frac{f}{\mu} \right)$$

$$t_{p_PRAKID} = t_{po} \left(2 + \frac{4}{3} \frac{f}{\mu} \right) = t_{po} \left(p + g \cdot \frac{f}{\mu} \right)$$

KAPACITIVNOST INTERNIH ČVOROVA ZAHTEVATI!

• U OPŠTEM SLUČAJU MOGU SE DEFINISATI DVA PODATNA PARAMETRA KOJA KARAKTERIŠU t_p KOMPLEKSNOS GĚJTA:

① PARAMETAR (p) PREDSTAVLJA ODHOS KASNIJEŠIA NEOPTEREĆENOS GĚJTA,

($t_{p\text{HAND}}(C_{\text{EXT}}=0)$) i KASNIJEŠIA NEOPTEREĆENOS INVERTORA

$$(t_{p\text{INV}}(C_{\text{EXT}}=0)) = \frac{t_{p\text{HAND}}}{t_{p\text{INV}}} = \frac{t_{p0} \left(2 + \frac{1}{3} \frac{1}{\mu} \right)}{t_{p0} \left(1 + \frac{1}{\mu} \right)} = \frac{2}{1}$$

$C_{\text{EXT}}=0 \Rightarrow f = \frac{C_{\text{EXT}}}{C_g} = 0$

ZA GĚJTOVE SA MAHIOM KOMPLEKSNOSŤU (KPR. HAND), PODSUARA FAN-INV_n (BRJOM ULAZA, M). GĚLLERALHO, (p) JE FUNKCIJA TOPOLOGIJE i FIZIČKE PREDSTAVE (LEJAUTA) GĚJTA.

② PARAMETAR (g) JE MĚRA KOJA KAZUJE KOLIKO VIŠE "TRUDA" TREBA DA ULOŽI

GĚJT DA BI OBEZBEDIO SLIČAN ODZIV KAO I OBIČAN INVERTOR. OVAJ PARAMETAR SE NAZIVA LOGIČKI "NAPOR" (LOGICAL EFFORT) ILI LOGIČKA EFIKASNOST

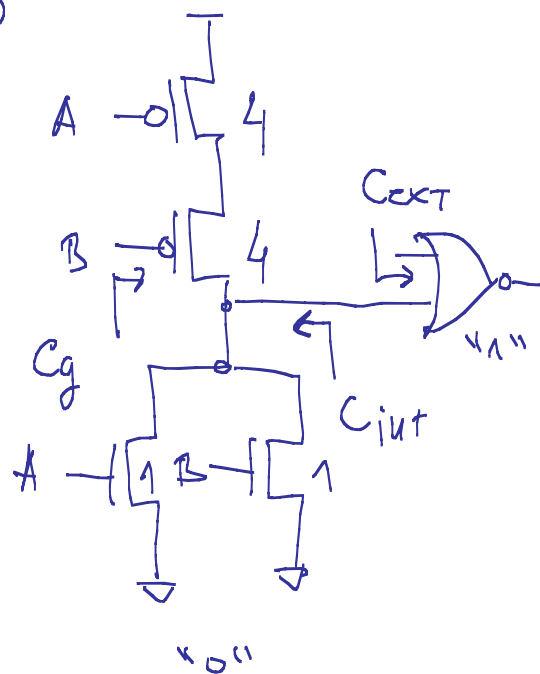
GĚJTA i ZAVISI ISKJUČIVO OD TOPOLOGIJE KOLA. ACO SE INVERTOR UZME

KAO PREFERENTNO KOLO PO PITANJU PERFORMANSI, OHOA SE LOGIČKA EFIKASNOST

ЏЕЈТА (g) МОЏЕ, У ЕЛЕКТРИЧНОМ СМИСЛУ, ДЕФИНИСАТИ И КАО ОДНОС УЛАЗНЕ КАПАЦИТИВНОСТИ ЏЕЈТА И УЛАЗНЕ КАПАЦИТИВНОСТИ ИНВЕРТОРА.

ПРИМЕР 7 ОПРЕДИТИ (p) И (g) ЧОД ЏЕЈТА: (a) ЗА ЏЕЈТ ВЕЛИЧИНЕ 1; (b) ЗА ЏЕЈТ ВЕЛИЧИНЕ 3; (c) ЗА ЧОД ЏЕЈТ СА ТРИ УЛАЗА (ЧОД3).

(a)



$$C_g = 5 C_{g0}; C_{int} = 6 C_{d0}; C_{ext} = 5 C_{g1}$$

$$t_{p\text{ЧОД}} = 0.69 R_{av} (C_{int} + C_{ext}) = 0.69 R (6 C_{d0} + 5 C_{g1})$$

$$= 0.69 R_{av} (3 C_{g0}) \left(2 \frac{C_{d0}}{C_{g0}} + \frac{5}{3} \frac{C_{g1}}{C_{g0}} \right)$$

$$= t_{inv} \left(2 \mu + \frac{5}{3} f \right)$$

$$\Rightarrow t_{p0} \left(2 + \frac{5}{3} \frac{f}{\mu} \right) \Rightarrow p = 2; g = \frac{5}{3}$$

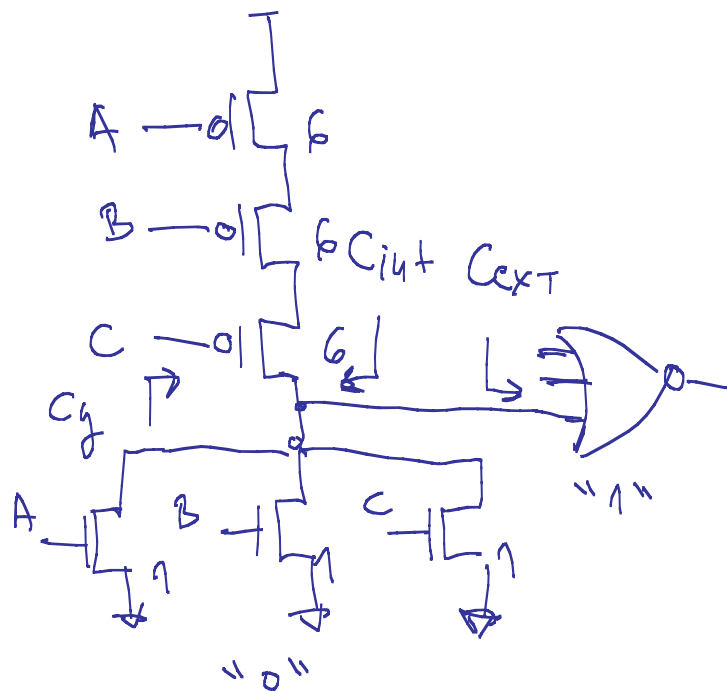
(b) ЗА: ЧАЧД 2 X 5 $\Rightarrow C_g = 25 C_{g0}, C_{int} = 30 C_{d0}, C_{ext} = 25 C_{g1}$

$$t_{p\text{ЧОД}} = 0.69 R_{av} \cdot (C_{int} + C_{ext}) = 0.69 R_{av} (3 C_{g0}) \left(\frac{C_{int}}{3 C_{g0}} + \frac{C_{ext}}{3 C_{g0}} \right)$$

$$= t_{inv} \left(\frac{30}{3} \frac{C_{d0}}{C_{g0}} + \frac{25}{3} \frac{C_{g1}}{C_{g0}} \right) = t_{inv} \left(10 \mu + \frac{25}{3} f \right)$$

$$= t_{p0} \left(10 + \frac{25}{3} \frac{f}{\mu} \right) \Rightarrow p = 10; g = \frac{25}{3}$$

Ⓒ ЗА КОРЗ ; $C_g = 7 C_{g0}$, $C_{int} = 9 C_{d0}$; $C_{ext} = 7 C_{g1}$



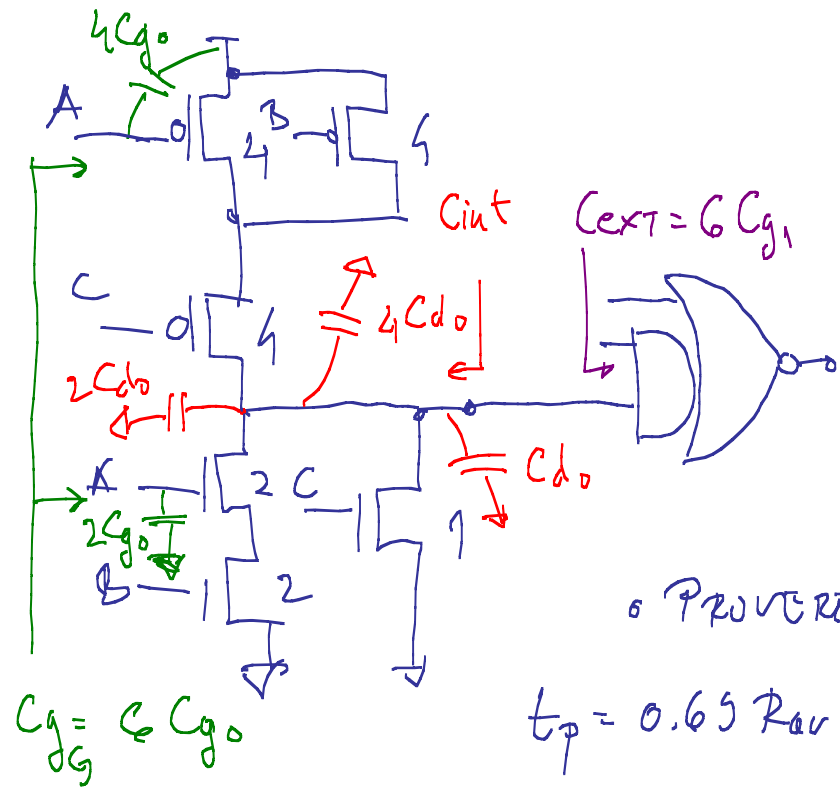
$$t_p = 0.69 R_{ov} (C_{int} + C_{ext}) = 0.69 R_{ov} (3 C_{g0}) \left(\frac{C_{int}}{3 C_{g0}} + \frac{C_{ext}}{3 C_{g0}} \right)$$

$$= t_{inv} \left(\frac{9}{3} \frac{C_{d0}}{C_{g0}} + \frac{7}{3} \frac{C_{g1}}{C_{g0}} \right) = t_{inv} \left(3 \mu + \frac{7}{3} f \right)$$

$$= t_{p0} \left(3 + \frac{7}{3} \frac{f}{\mu} \right) \Rightarrow p = 3, g = \frac{7}{3}$$

ПРИМЕР 8 ОДРЕДИТИ (p) И (g) ЗА КОЛО КОЈЕ РЕАЛИЗУЈЕ ЛОГИЧКУ ФУНКЦИЈУ

$Y = \overline{A \cdot B + C}$. НАПОМЕНА: КОРИСТИТИ ДЕФИНИЦИЈЕ ЗА (p) И (g) [БЕЗ ИЗВОЂЕЊА]



$$\rho \triangleq \frac{t_p(f=0)}{t_{pMUX}(f=0)} = \frac{C_{int} t_g}{C_{int} t_{MUX}} = \frac{7 C_{db0}}{3 C_{db0}} = 7/3$$

$$g \triangleq \frac{C_{gs}}{C_{gMUX}} = \frac{6 C_{g0}}{3 C_{g0}} = 2$$

• PROVERE RADI:

$$\begin{aligned} t_p &= 0.69 R_{av} (C_{int} + C_{ext}) = 0.69 R_{av} (3 C_{g0}) \left(\frac{C_{int}}{3 C_{g0}} + \frac{C_{ext}}{3 C_{g0}} \right) \\ &= t_{MUX} \left(\frac{7 C_{db0}}{3 C_{g0}} + \frac{6 C_{g1}}{3 C_{g1}} \right) = t_{MUX} \left(\frac{7}{3} \mu + 2 f \right) \\ &= t_{p0} \left(\frac{7}{3} + 2 \frac{f}{\mu} \right) \Rightarrow \rho = 7/3, \quad g = 2 \end{aligned}$$

• GENERALNO i , (ρ) i (g) DIREKTNO ZAVISI OD BROJA ULAZA GEJTA.

• ZA NEKE STANDARDNE GEJTOVE ZAVISNOST OD BROJA ULAZA SE MOZE

FORMULISATI U ZATVORENOM OBLIKU.

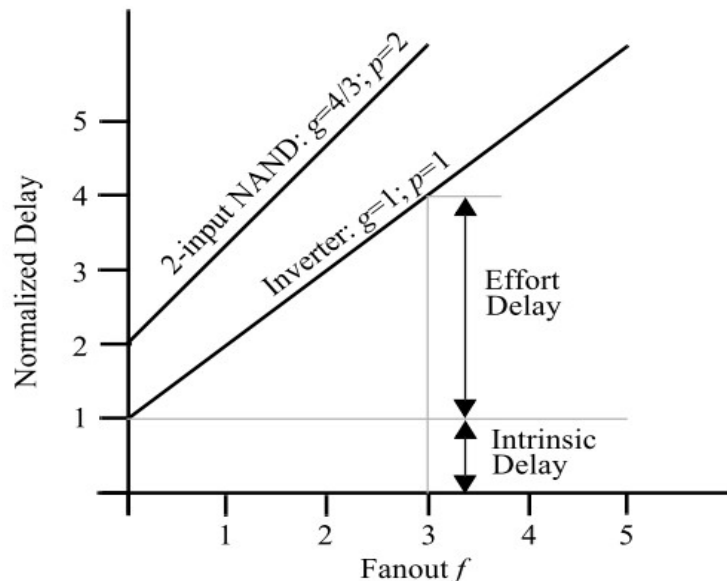
ПАРАМЕТАР "p"

Gate type	p
Inverter	1
n-input NAND	n
n-input NOR	n
n-way multiplexer	2n
XOR, NXOR	$n2^{n-1}$

ЛОГИЧКА ЕФИКАСНОСТ "g"

Gate Type	Number of Inputs			
	1	2	3	n
Inverter	1			
NAND		4/3	5/3	$(n+2)/3$
NOR		5/3	7/3	$(2n+1)/3$
Multiplexer		2	2	2
XOR		4	12	

- ПАРАМЕТАР (p) УТИЧЕ НА "DC" КОМПОНЕНТИ А ЛОГИЧКА ЕФИКАСНОСТ (g) УТИЧЕ НА "НАСИВ" ФУНКЦИЈЕ КАЏИЈЕЊА:



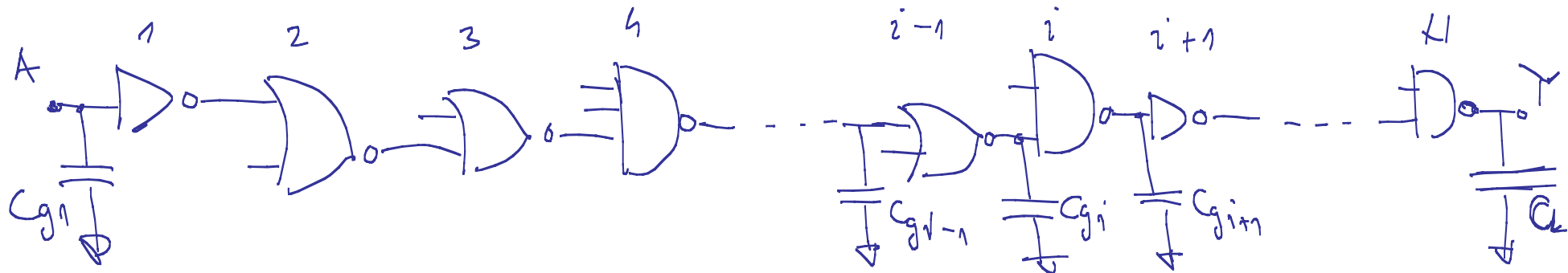
- ЗА ГЕДТ СЕ ОБИЧНО ДЕФИНИШЕ И ПАРАМЕТАР $h = g \cdot f$ КОЈИ СЕ НАЗИВА "НАПОР" ГЕДТА ИЛИ ЕФИКАСНОСТ ГЕДТА. ЗАВИСИ ОД ТОПОЛОГИЈЕ И БРОЈА УЛАЗА

$$t_p = t_{p0} \left(p + \frac{1}{\mu} \cdot h \right) = \underbrace{t_{p0} p}_{\text{TEAHOLOGIJE}} + \underbrace{\frac{t_{p0}}{\mu}}_{\text{BROJA ULAZA}} h$$

ЗАВИСИ ОД ТЕАНОЛОГИЈЕ И БРОЈА УЛАЗА

D OPTIMIZACIJA KAŠTIJEHJA KRITIČNE PUTANJE SA KOMPLEKSNIM GEDOVIMA

- UVODENIH PARAMETRA h MOGUĆE JE ISKORISTITI RANJE DOBIJEN REZULTAT ZA OPTIMIZACIJU KAŠTIJEHJA NIŽA INVERTORA:



$$t_p = \sum_{i=1}^N t_{p0} \left(p_i + \frac{h_i}{\mu} \right); \quad h_i = g_i \cdot f_i = g_i \frac{C_{g_{i+1}}}{C_{g_i}}; \quad \frac{\partial t_p}{\partial C_{g_i}} = 0 \Rightarrow$$

$$\frac{\partial t_p}{\partial C_{g_i}} = \frac{\partial}{\partial C_{g_i}} \left(t_{p0} \left(p_1 + \frac{h_1}{\mu} \right) + t_{p0} \left(p_2 + \frac{h_2}{\mu} \right) + \dots + t_{p0} \left(p_{i-1} + \frac{h_{i-1}}{\mu} \right) + t_{p0} \left(p_i + \frac{h_i}{\mu} \right) \right)$$

$$t_{p0} \left(p_{i+1} + \frac{h_{i+1}}{\mu} \right) + \dots + t_{p0} \left(p_N + \frac{h_N}{\mu} \right) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial c_{g_i}} (h_{i-1} + h_i) = \frac{\partial}{\partial c_{g_i}} \left(g_{i-1} \cdot \frac{c_{g_i}}{c_{g_{i-1}}} + g_i \cdot \frac{c_{g_{i+1}}}{c_{g_i}} \right) = g_{i-1} \frac{1}{c_{g_{i-1}}} - g_i \frac{c_{g_{i+1}}}{(c_{g_i})^2} = 0$$

$$g_{i-1} \cdot \frac{c_{g_i}}{c_{g_{i-1}}} = g_i \frac{c_{g_{i+1}}}{c_{g_i}} \Rightarrow g_{i-1} \cdot f_{i-1} = g_i \cdot f_i \Rightarrow \boxed{h_{i-1} = h_i, \quad i=2, \dots, n,}$$

• ПОШТО ЗА МИНИМАЛНО КАШТЛЈЕТИЈЕ ВАЖИ ИСТИ УСЛОВ КАО И ЗА МИНИМАЛНО КАШТЛЈЕТИЈЕ УИЗА ОБИЧНИХ ИНВЕРТОРА ($h_{i-1} = h_i = h, f_{i-1} = f_i = f$), ДЕФИНИСАТИЈЕМ

ЕФИКАСНОСТИ УИЗА БЕДТОВА КА КРИТИЧНОС ПУТАТИЈЕ КАО: $H = G \cdot F$, СДЕ

ЈЕ $G = \prod_{i=1}^n g_i$, $F = \prod_{i=1}^n f_i$, ОПТИМАЛНИ БРОД БЕДТОВА КОДИ

МИНИМИЗУЈЕ КАШТЛЈЕТИЈЕ КРИТИЧНЕ ПУТАТИЈЕ (H) СЕ МОЖЕ ПРОЦЕНИТИ ИЗ

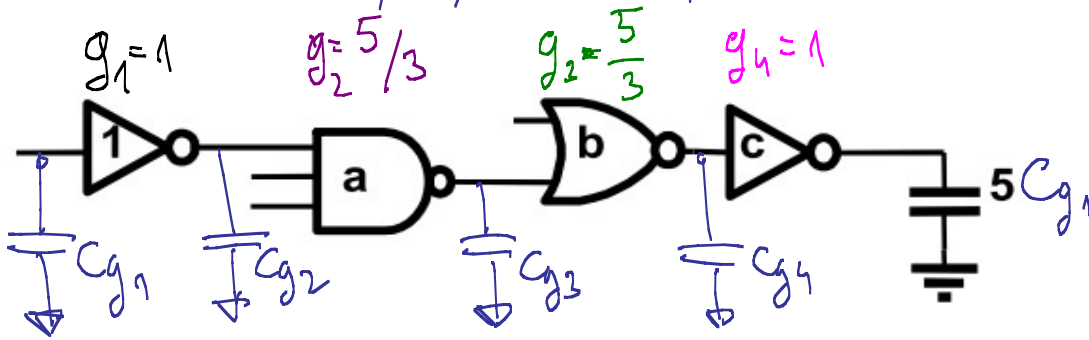
УСЛОВА:

ОПТИМАЛНИ БР. БЕДТОВА $\leftarrow H$ \rightarrow ЕФИКАСНОСТ УИЗА БЕДТОВА
 $\leftarrow h = \sqrt{H}$ \rightarrow $H = G \cdot F; F = \frac{CL}{c_{g_1}}$
 ЕФИКАСНОСТ БЕДТА, $h = g \cdot f$ $G = \prod_{i=1}^n g_i$

PRIMER 9

ODREĐITI DIMENZIJE ŠEPTOVA KOJI LEŽE NA KRITIČNOS PUTANJI

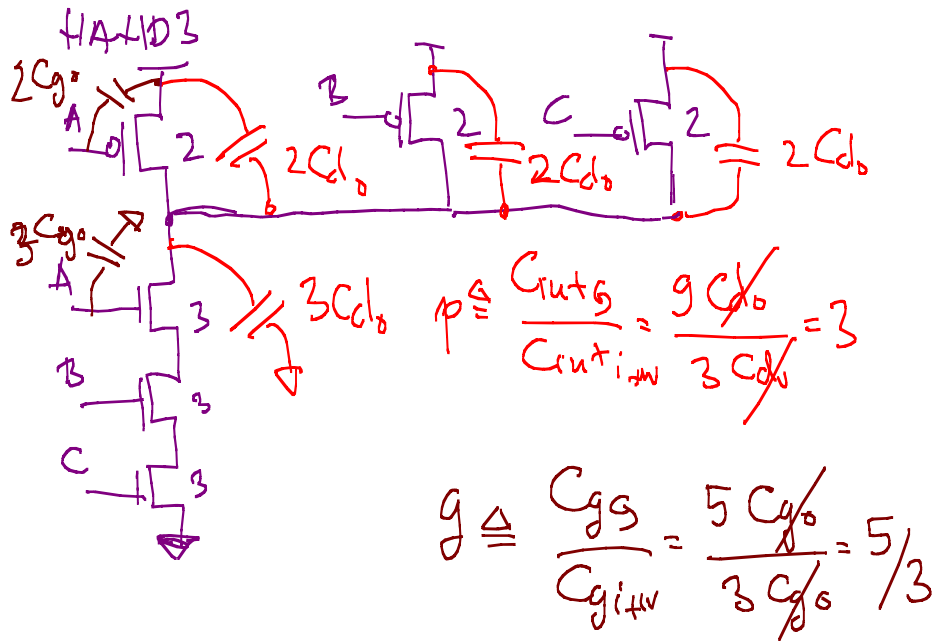
TAKO DA VAŠIJE,JE PUTANJE BUDE MINIMALNO.



$$C_L = 5 C_{g1} \Rightarrow F = \frac{C_L}{C_{g1}} = 5, \quad h = 4$$

$$G = g_1 \cdot g_2 \cdot g_3 \cdot g_4 = 1 \cdot \frac{5}{3} \cdot \frac{5}{3} \cdot 1 = \frac{25}{9}$$

$$h = (G \cdot F)^{\frac{1}{H}} = \left(5 \times \frac{25}{9} \right)^{\frac{1}{4}} = 1.93$$



(1) $h_4 = h_3 \Rightarrow g_4 \cdot f_4 = g_3 \cdot f_3 \Rightarrow f_4 = \frac{g_3}{g_4} f_3$

(2) $h_3 = h_2 \Rightarrow g_3 \cdot f_3 = g_2 \cdot f_2 \Rightarrow f_3 = \frac{g_2}{g_3} f_2$

(3) $h_2 = h_1 \Rightarrow g_2 \cdot f_2 = g_1 \cdot f_1 \Rightarrow f_2 = \frac{g_1}{g_2} f_1$

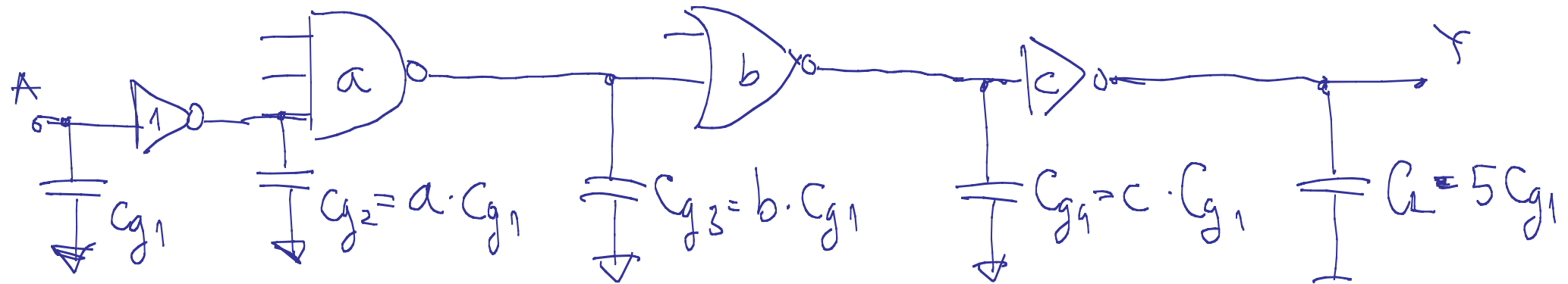
$$f_4 = \frac{g_3}{g_4} \cdot \frac{g_2}{g_3} \cdot \frac{g_1}{g_2} \cdot f_1 = \frac{5}{3} \cdot 1 \cdot \frac{3}{5} \cdot f_1 = f_1 = 1.93$$

$$f_3 = \frac{g_2}{g_3} \cdot \frac{g_1}{g_2} \cdot f_1 = 1 \times \frac{3}{5} f_1 = \frac{3}{5} f_1 = 1.16$$

$$f_2 = \frac{g_1}{g_2} f_1 = \frac{3}{5} f_1 = 1.16$$

$$h_1 = f_1 \cdot g_1 \Rightarrow f_1 = \frac{h_1}{g_1} = \frac{1.93}{1} = 1.93$$

$$f_1 = \frac{C_{g2}}{C_{g1}} ; f_2 = \frac{C_{g3}}{C_{g2}} ; f_3 = \frac{C_{g4}}{C_{g3}} ; f_4 = \frac{C_L}{C_{g4}} ; h_1 = h_2 = h_3 = h_4 = h = 1.93$$



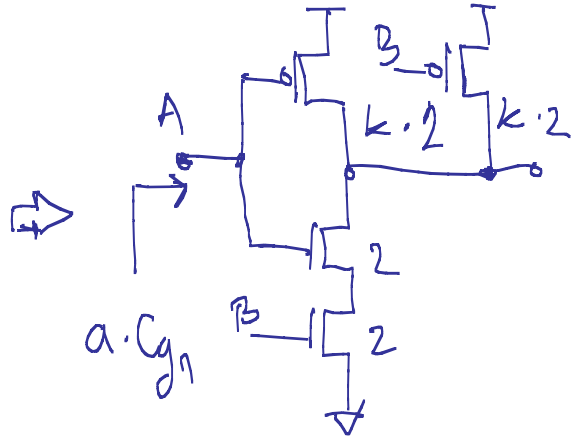
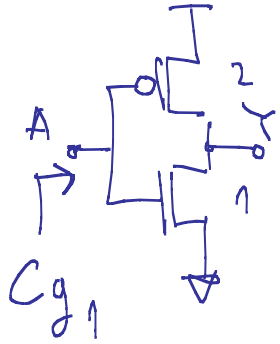
$$h_1 = g_1 \cdot f_1 = g_1 \cdot \frac{C_{g2}}{C_{g1}} = g_1 \cdot \frac{a \cdot C_{g1}}{C_{g1}} = g_1 \cdot a \Rightarrow a = \frac{h_1}{g_1} = f_1 = 1.93$$

$$h_2 = g_2 \cdot f_2 = g_2 \cdot \frac{C_{g3}}{C_{g2}} = g_2 \cdot \frac{b \cdot C_{g1}}{a \cdot C_{g1}} = g_2 \cdot \frac{b}{a} \Rightarrow b = \frac{h_2 \cdot a}{g_2} = f_2 \cdot a = (1.16) \cdot (1.93) = 2.38$$

$$h_3 = g_3 \cdot f_3 = g_3 \cdot \frac{C_{g4}}{C_{g3}} = g_3 \cdot \frac{c \cdot C_{g1}}{b \cdot C_{g1}} = g_3 \cdot \frac{c}{b} \Rightarrow c = \frac{h_3 \cdot b}{g_3} = f_3 \cdot b = (1.16) \cdot (2.38) = 2.76$$

• НАПОМЕНА: СМЕР ОДРЕЂИВАЊА ДИМЕНЗИЈА ЈЕ ПРОИЗВОДЈАН Т.Ј. ДО ИСТОГ РЕЗУЛТАТА
 СЕ ДОЛАЗИ, И АКО СЕ КРЕЊЕ ОД Y КА A .

• NAND 2, $\alpha = 1.93$



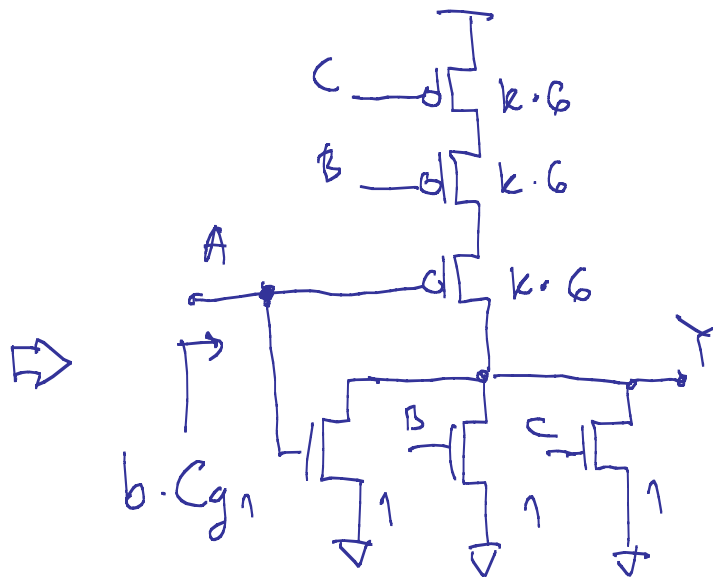
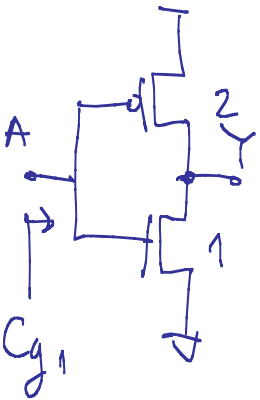
$$C_{g1} = 3C_{g0} ; \alpha \cdot C_{g1} = (2 + k \cdot 2) C_{g0}$$

$$\alpha \cdot (3C_{g0}) = (2 + k \cdot 2) C_{g0}$$

$$3\alpha = 2 + k \cdot 2$$

$$k = \frac{3\alpha - 2}{2} = 1.895$$

• NOR 3, $b = 2.38$



$$C_{g1} = 3C_{g0} ; b \cdot C_{g1} = (1 + 6 \cdot k) C_{g0}$$

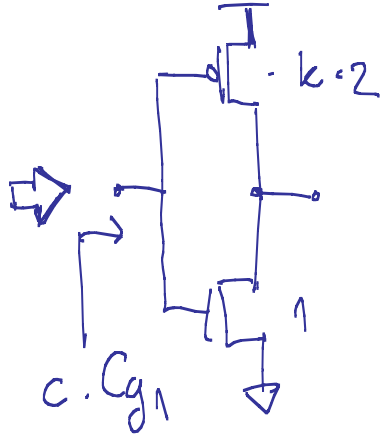
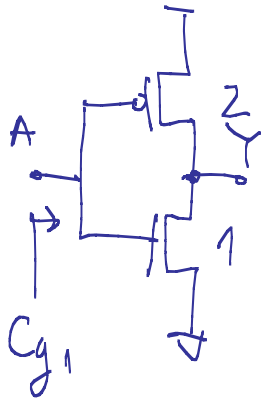
$$3b C_{g0} = (1 + 6 \cdot k) C_{g0}$$

$$3b = 1 + 6 \cdot k$$

$$k = \frac{3 \cdot b - 1}{6} = 1.023$$

• 14U, C = 2.76

$$C_{g1} = 3C_{g0}, \quad \text{č. } C_{g1} = (1 + 2 \cdot k) \cdot C_{g0}$$

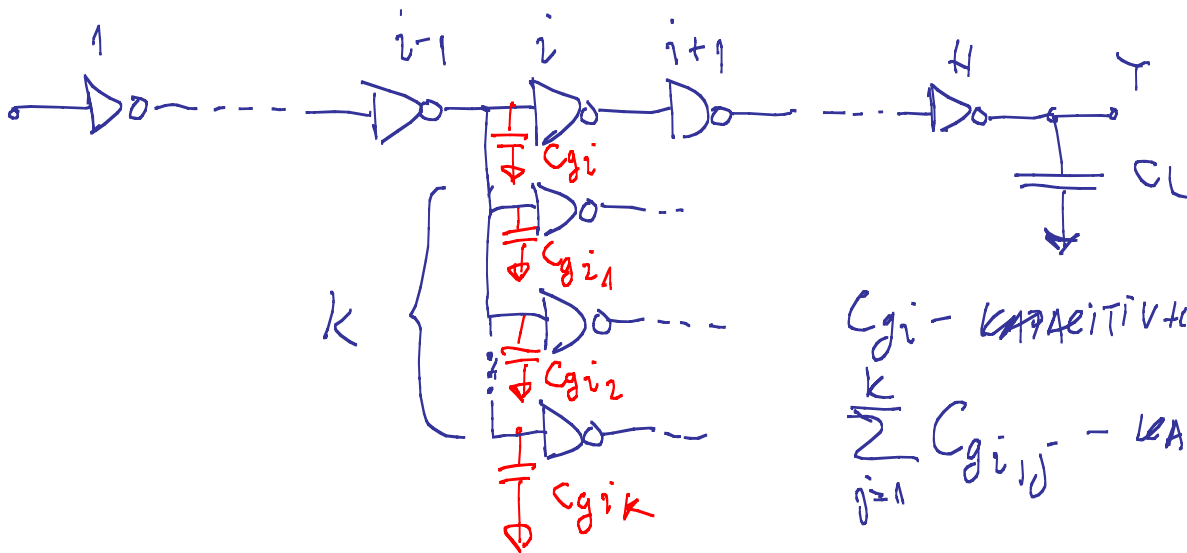


$$3C \cdot C_{g0} = (1 + 2k) \cdot C_{g0}$$

$$3 \cdot C = 1 + 2k$$

$$k = \frac{3 \cdot C - 1}{2} = 3.64$$

• Ukoliko kritična putanja ima susedne putanje (granje) uvodi se korekcijski faktor (b) koji se naziva faktor granjanja (branching factor).

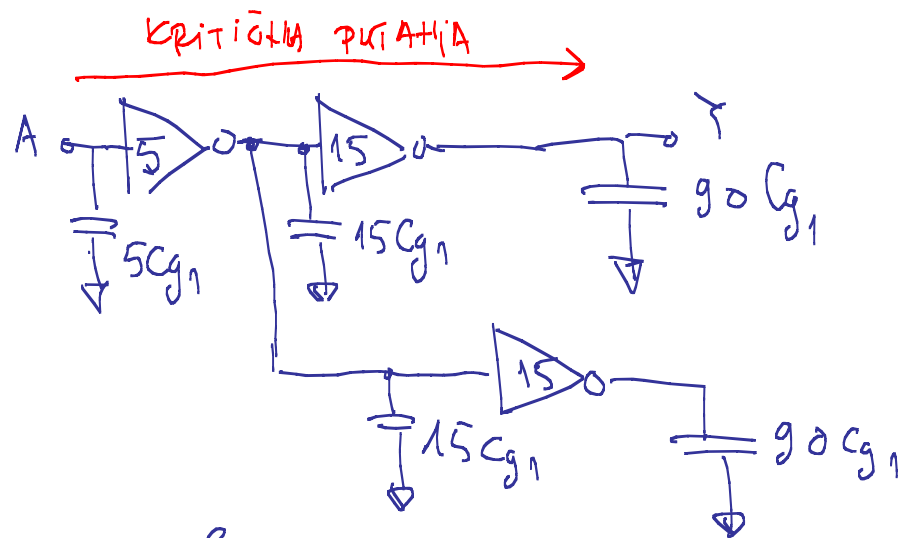
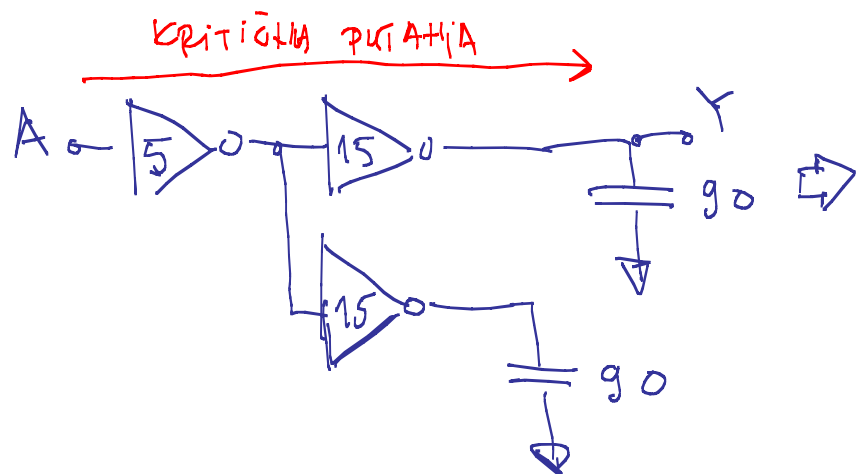


$$b \triangleq \frac{C_{gi} + \sum_{j=1}^k C_{gi_j}}{C_{gi}}$$

C_{gi} - kapacitivnost na putanji (ON-PATH)

$\sum_{j=1}^k C_{gi_j}$ - kapacitivnost svih putanji (OFF-PATH)

PRIMER 10 ZA KRITIČNU PUTANJU SA SLIKE ODREDITI EFIKASNOST PUTANJE (A) SA I BEZ UZIMANJA U OBZIR FAKTORA GRAHANJA. KOLIKA SE GREŠKA PRAVI ZA SLUČAJ KADA SE U OBZIR NE UZME FAKTOR GRAHANJA.



a) BEZ FAKTORA GRAHANJA: $G = 1 \cdot 1 = 1$; $F = \frac{g_0 C_{g1}}{5 C_{g1}} = 18 \Rightarrow A = G \cdot F = 18$

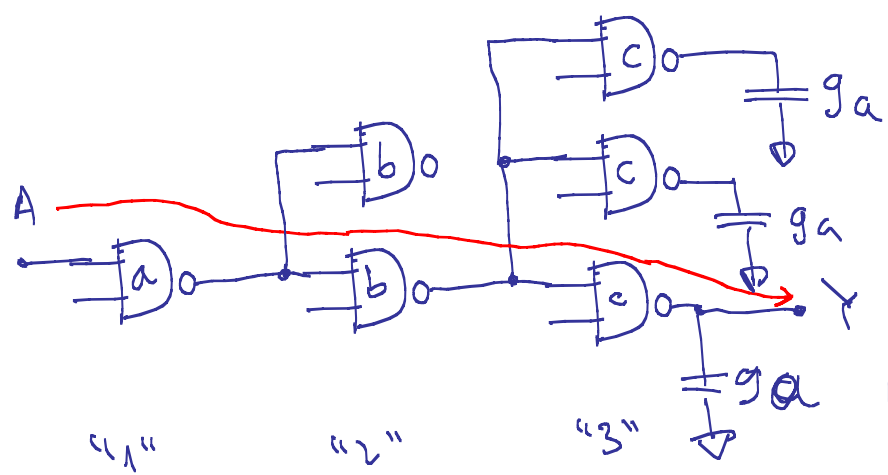
b) SA FAKTOROM GRAHANJA: $b = \frac{15 C_{g1} + 15 C_{g1}}{15 C_{g1}} = 2$, $A = G \cdot F \cdot b = 36$.

UKOLIKO SE NE UZME U OBZIR FAKTOR GRAHANJA, U OVOM SLUČAJU, PRAVI SE GREŠKA OD, $18/36 = 0.5$ (50%)!

- KADA PUTANJA IMA VIŠE GRANANJA, EFIKASNOST PUTANJE TREBA KORIGOVATI FAKTOROM GRANANJA PUTANJE, $B = \prod_{j=1}^M b_j$, GDE JE (M) BROJ GRANANJA, A b_j FAKTOR GRANANJA ZA j -TOM OVRU. U OVOM SLUČAJU EFIKASNOST PUTANJE JE: $H = G \cdot F \cdot B$; $G = \prod_{i=1}^N g_i$; $F = \prod_{i=1}^N f_i$; $B = \prod_{j=1}^M b_j$.

PRIMER 11

ODREDITI RELATIVNE DIMENZIJE GESTOVA (b i c) TAKO DA KAŠIJEHJE KRITIČKE PUTANJE BUDE MINIMALNO. KOLIKO JE MINIMALNO KAŠIJEHJE PUTANJE U ODNOSH NA KAŠIJEHJE MINIMALNOG INVERTORA? POZEMATO JE $a=5$.



$$F = \frac{g_a}{1 \cdot a} = g; \quad G = \frac{4}{3} \cdot \frac{4}{3} \cdot \frac{4}{3} = \frac{64}{27}$$

$$b_1 = \frac{b+b}{b} = 2; \quad b_2 = \frac{c+c+c}{c} = 3$$

$$B = b_1 \cdot b_2 = 6$$

$$H = G \cdot F \cdot B = \frac{64}{27} \times g \times 6 = 128 \Rightarrow h = \sqrt[3]{H} = 5.04 \approx 5$$

$$h_1 = h_2 = h_3 = h \approx 5$$

$$h_3 = g_3 \cdot f_3 = g_3 \cdot \frac{g a}{c} \Rightarrow c = g \cdot \frac{g_3}{h_3} \cdot a = g \cdot \frac{4/5}{5} a = \frac{12}{5} \cdot a \Rightarrow c = \frac{12}{5} \cdot a = 2.4 a$$

$$h_2 = g_2 \cdot f_2 = g_2 \cdot \frac{3C}{b} \Rightarrow b = 3 \cdot \frac{g_2}{h_2} \cdot c = 3 \cdot \frac{4/5}{5} \cdot c = \frac{4}{5} \cdot \frac{12}{5} \cdot a \Rightarrow b = \frac{48}{25} a = 1.92 a$$

$$a = 5, \quad b = \frac{12}{5} \cdot a = 12; \quad c = \frac{48}{25} \cdot a = \frac{48}{5} = 9.6$$

• УКУПНО КАЏИЈЕТИЈЕ КРИТИЧНЕ ПУТАНИЈЕ: $t_p = \sum_{i=1}^3 t_{pi}$, $p_1 = p_2 = p_3 = p_{1+1+1} = 2$

$$t_p = t_{p0} \left(p_1 + \frac{h_1}{\mu} \right) + t_{p0} \left(p_2 + \frac{h_2}{\mu} \right) + t_{p0} \left(1 + \frac{h_3}{\mu} \right)$$

$$= t_{p0} \left[3 p_1 + (h_1 + h_2 + h_3) \right] = t_{p0} (3 \cdot 2 + 3 \cdot 5) = 21 t_{p0}$$

КАЏИЈЕТИЈЕ КРИТИЧНЕ ПУТАНИЈЕ ЈЕ 21 ПУТ ДУЉЕ ("ГОРЕ") У ОДНОСУ НА

КАЏИЈЕТИЈЕ ИНВЕРТОРА НИЖИНА ЛНЕ ДИМЕНЗИЈЕ.

• SISTEMATIŽACIJA

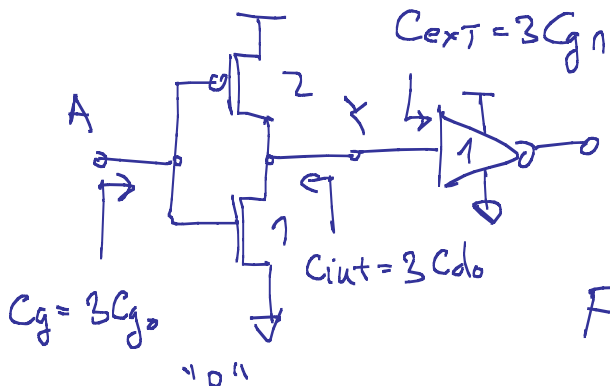
INVERTOR

$$t_p = 0.69 R_{av} (C_{int} + C_{ext})$$

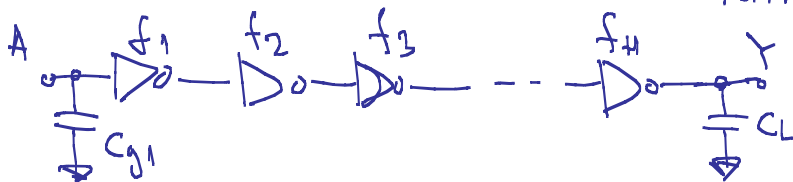
$$t_p = t_{inv} (\mu + f) ; t_{inv} = 0.69 R_{ov} C_g$$

$$t_p = t_{p0} \left(1 + \frac{f}{\mu}\right) ; t_{p0} = \frac{t_{inv}}{\mu}$$

$$C_{int} = \mu \cdot C_g ; f = \frac{C_{ext}}{C_g} \equiv \text{ELEKTRIČNI (EFFECTIVNI) FAH-OUT.}$$



$$F = \frac{C_L}{C_{g1}} \Rightarrow \text{ELEKTRIČNI FAH-OUT PUTANJE}$$



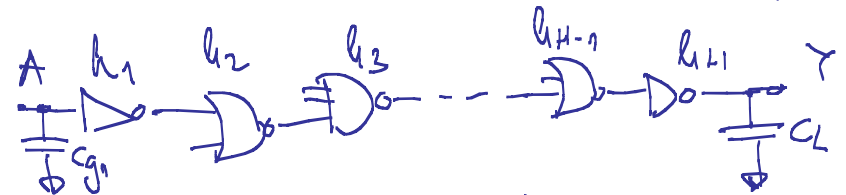
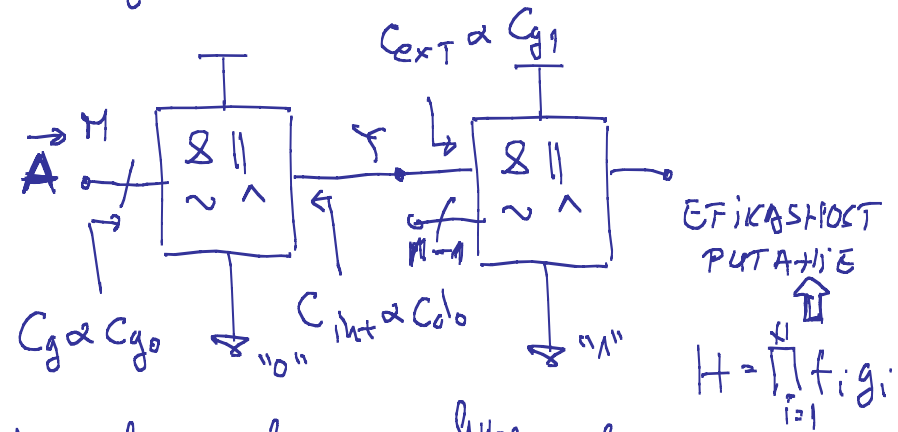
ZA t_{pmin} , $f_i = f_{i+1} = f = \sqrt[H]{F}$, $H_{opt} = \frac{\ln(F)}{\ln(f)} \approx 4$
 $i = 1, \dots, H-1$

KOMPLEKSNAH GEOT

$$t_p = t_{p0} \left(p + \frac{h}{\mu}\right), h = g f \Rightarrow \text{EFIKASNOST GEOTA (STEPENJA)}$$

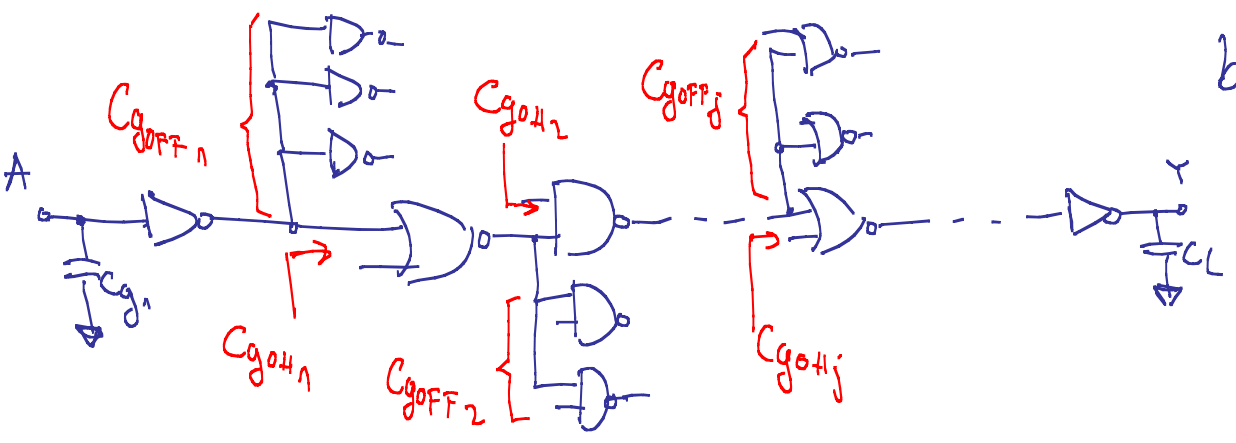
$$p \triangleq \frac{t_p(f=0)}{t_{p_{inv}}(f=0)} = \frac{C_{int}}{C_{int}(inv)} = \frac{C_{int}}{3C_{do}}$$

$$g \triangleq \frac{C_g}{C_{g_{inv}}} = \frac{C_g}{3C_{g0}} \Rightarrow \text{LOGIČKA EFIKASNOST (LOGICAL EFFORT)}$$



ZA t_{pmin} , $h_i \cdot h_{i+1} = h = \sqrt[H]{H}$; $H_{opt} = \frac{\ln(H)}{\ln(h)} \approx 4$
 $i = 1, \dots, H-1$

ИНВЕРТОР & КОМПЛЕКСИАНН ГЕЭТ



$$b_j = \frac{C_{gohj} + C_{goffj}}{C_{gohj}} \Rightarrow \text{ФАКТОР СРАВНЕНИЯ ГЕЭТ (СТЕПЕНА)}$$

$$B = \prod_{j=1}^M b_j \Rightarrow \text{ФАКТОР СРАВНЕНИЯ ПУТАНИЙ}$$

$$F = \frac{CL}{Cg1}; G = \prod_{i=1}^H g_i; H = F \cdot G$$

$$h_i = h_{i+1} = h = \sqrt[H]{H}, h_i = g_i \cdot f_i$$

$i = 1, \dots, H-1$