

BAR-ILAN UNIVERSITY (RA)
School of Engineering
Ramat-Gan 52900, Israel



אוניברסיטת בר-אילן (ע"ר)
הפקולטה להנדסה
רמת-גן 52900

Tel: 03-5317722
engbi@mail.biu.ac.il

מעגלי ומערכות VLSI דיגיטליים

תשע"ו סמסטר א' מועד א'

83-612

מרצה: פרופ' שמואל וימר

מתרגל: מר בנימין פרנקל

- יש לקרוא היטב את ההוראות.
- חובה לענות על כל השאלות.
- ציון מקסימלי בבחינה: 100 נקודות.
- יש לנמק את כל תשובותיכם.
- אין צורך לפתח מחדש תוצאות שהוכחו בכיתה, אלא אם כן נאמר מפורשות לעשות כן.
- יש לשרטט תרשימים באופן ברור!
- יש להקפיד על כתב יד קריא!
- **חומר עזר מותר:** כל חומר עזר מודפס מותר בשימוש.
- **משך הבחינה:** שלוש שעות

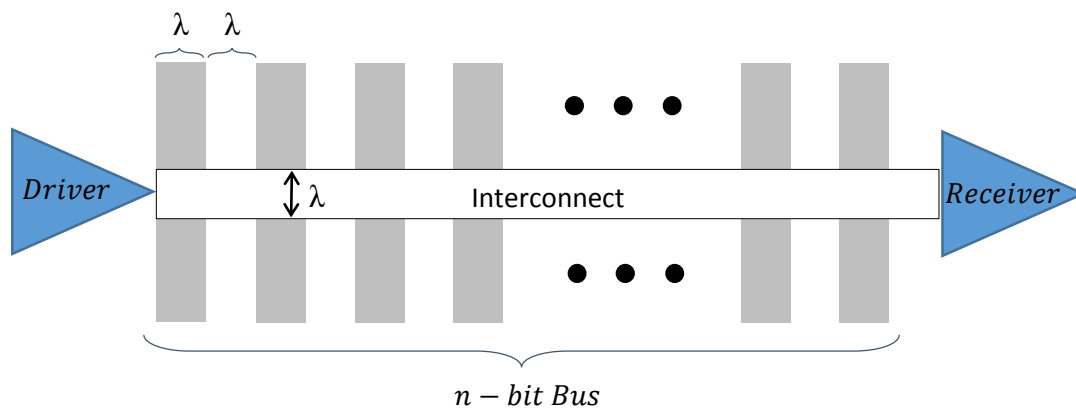
בהצלחה!

שאלה מספר 1 (60 נקודות):

נתון מוליך (Interconnect) באורך L המחבר בין Driver לבין Receiver.
רוחב המוליך הוא λ .

המוליך עובר באופן אורתוגונלי מעל $n - bit$ Address Bus, המורכב מ- n מוליכים זהים באורכם וברוחבם למוליך שעובר מעליהם, ומחברים גם הם כל אחד בין Driver לבין Receiver. המרווח בין כל מוליך למוליך הוא λ , וכן המרחק בין שכבת מתכות אחת לשנייה הוא λ .

המוליך העליון מכסה בדיוק את כל רוחב ה-Bus, כמתואר בתמונה (מבט על):



כל ה-Drivers זהים בגודלם.

התנגדות המוצא של Driver הנמצא במצב רוויה הינה: $R_D = 3[k\Omega]$,

ואילו התנגדותו של Driver הנמצא במצב לינארי הינה $R_D = 1[k\Omega]$.

התנגדות המוליכים ליחידת אורך נתונה ע"י: $r [\Omega/\mu m]$

קיבול הכניסה של ה-Receiver זניח לעומת קיבולי המוליכים.

הקיבול הכללי של המוליך ליחידת אורך מורכב משני מרכיבים:

- קיבול ליחידת אורך בין מוליך אחד לבין מוליך הסמוך לו באותה שכבה: $C_0 [fF/\mu m]$
 - קיבול ליחידת אורך בין מוליך לבין שכבה אחרת סמוכה: $C_1 = C_0/2 [fF/\mu m]$
- (מניחים כי צפיפות המתכות בשכבה סמוכה הינה 50%, שכן המוליכים בשכבות סמוכות אורתוגונליים).

נניח כי ה-Address Bus פונה לכתובות בזיכרון באופן אקראי, והמוליך העליון נמצא במצב סטטי במתח של $0[V]$.

- א. מהו המצב עבורו ה- רעש במוליך העליון יהיה מקסימלי? מהי ההסתברות לכך?
- ב. נתון: $V_{DD} = 1[V]$, וכן כי עבור ה- Receiver העליון מתקיים: $V_{IL} = 100[mV]$. האם ב- Worst Case עלולה להיות שגיאה לוגית? הסבר.
- ג. עליך לחשב מהו ה- Sizing המינימלי הדרוש ל- Driver של המוליך העליון, כך שלא תתרחש שגיאה לוגית. האם הוא תלוי ב- n ? רשום משוואות באופן מפורש. הנח: $n = 64$.
- ד. מהנדס החליט כי במקום לבצע Sizing ל- Driver של המוליך העליון, הוא פשוט יכניס Repeaters על הקו. מהו מספר ה- Repeaters המינימלי שיבטיח חסינות בפני רעש? רשום את המשוואות באופן מפורש.

כעת, נתון כי המוליך העליון מבצע מיתוג מ- $0[V]$ ל- $1[V]$, ובאותה העת כל הסיביות של ה- Bus מבצעות מיתוג בכיוון הנגדי. נרצה לחשב את ה- $t_{pd}(50\%)$ של המוליך העליון במצב זה. בסעיפים הבאים יש להתחשב בקיבול הכניסה של ה- Receiver: C_g

ה. **בהנחה** שבוצע Sizing של 2 ל- Driver של המוליך העליון, חשב את ה- t_{pd} של המוליך

העליון. הבע תשובתך כפונקציה של: $R_D, r, C_g, C_0, \lambda, n$.

ו. בהנחה שהוכנס Repeater אחד במרכז המוליך העליון (ולא בוצע Sizing), חשב את ה-

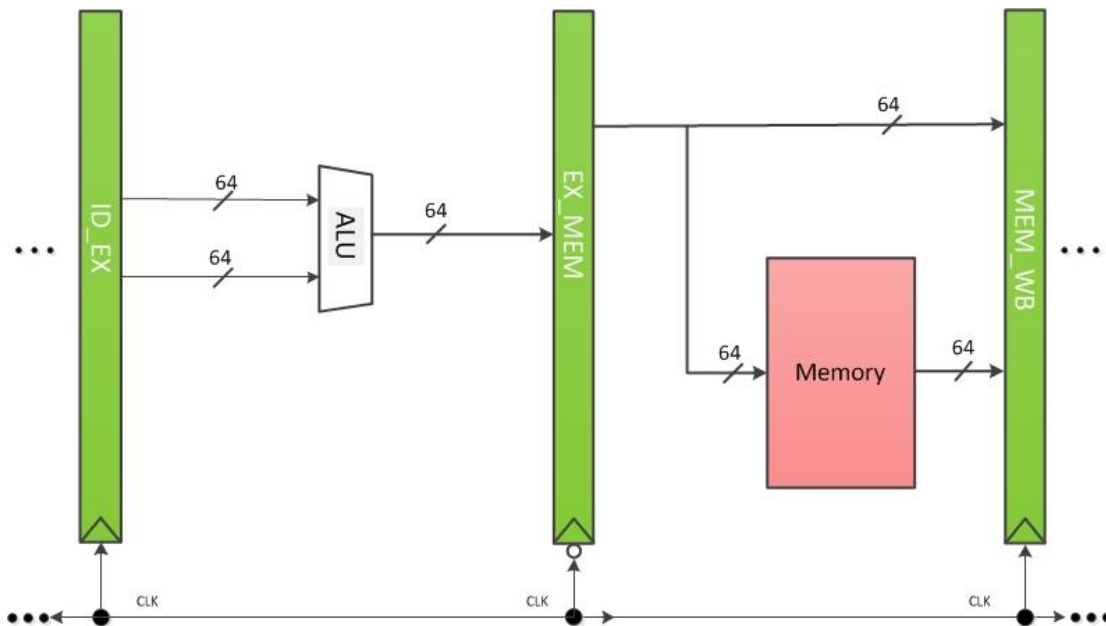
t_{pd} של המוליך העליון. גודלו ה- Repeater זניח ביחס לאורך המוליך. הבע תשובתך

כפונקציה של: $R_D, r, C_g, C_0, \lambda, n$.

ז. חשב את הפרש הזמנים בין תשובתך בסעיף ו' לבין תשובתך בסעיף ה'.

שאלה מספר 2 (50 נקודות):

נתונה יחידת ALU הפועלת לצד יחידת זיכרון במעבד MIPS של 64 סיביות, כמתואר בציור הבא (שימו לב לחיבורי השעונים):



נתון כי ה-ALU הוא תמיד הרכיב הקריטי מבחינת זמן המחזור של שעון המערכת.

ה-ALU משתמש ב-RCA (Ripple Carry Adder).

נתון t_{pd_0} עבור כל יחידה לוגית ב-RCA.

נניח שמריצים תכנית המבצעת פעולות זיכרון בלבד.

עבור התכנית נתון: $Activity Factor = \alpha_0$

בתנאים נומינליים, המעבד פועל בתדר מקסימלי של $f_0 = 100 [MHz]$, כאשר: $CPI = 1.0$.

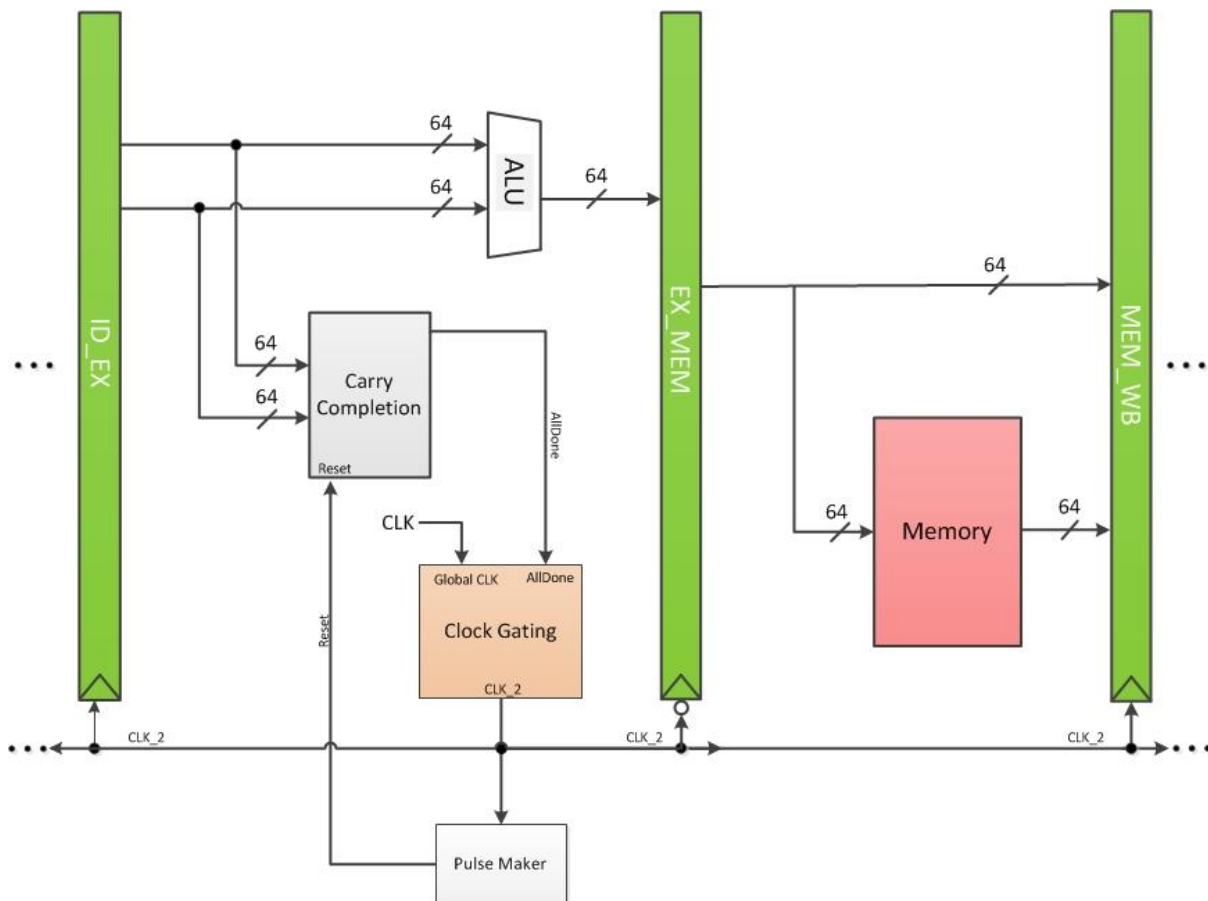
א. רשום את זמן המחזור של השעון במונחים של: $t_{su}, t_{cq}, t_{hold}, t_{pd_0}$.

ב. עבור V_{DD} נתון ועבור קיבול כולל נתון C, מהו ההספק הדינמי המתבזבז ע"י ה-Adder?

• כעת, רוצים לבחון אלטרנטיבות לשיפור הביצועים של המעבד. נשתמש במעגל Carry-

Completion Detection, לצורך יצירת סיבית AllDone.

בתרשים הבא מתוארת הצעה לארכיטקטורה של המעגל:



כאשר, הבלוק של ה-Carry-Completion צריך לעבור Reset לפני כל פעולת חישוב של ה-ALU, על-מנת לאתחל את סיביות המידע של ה-Carry-Completion Detection המכילות מידע מהחישוב הקודם, שכבר איננו רלוונטי.

- ג. לשם מה משמש הסיגנל CLK_2, ובמה הוא שונה מ-CLK (השעון הכללי של המעבד)?
- ד. שרטט מימוש עבור הבלוקים: Carry-Completion, Clock-Gating, ו-Pulse Maker. הסבר את השרטוטים ונמק את האופן בו מימשת כל אחד מהבלוקים הנ"ל.
- ה. מהי סיבוכיות הזמן הממוצע הדרוש לביצוע פעולת חיבור? רשום תשובתך באופן כללי, כפונקציה של מספר הסיביות ($n - bits$). השווה את השיפור בסיבוכיות הזמן לעומת זו של RCA רגיל.

- כעת, נבחנת האפשרות לעבוד בתדר של: $800[MHz]$.

ניתן להניח כי: $t_{su}, t_{cq}, t_{hold} \rightarrow 0$

נניח כי עבור עבודה בתדר $800[MHz]$ נתון ה-CPI החדש: $CPI_{(800)} = 1.1$

נרצה להשוות בין עבודה בתדר $800[MHz]$ לבין עבודה בתדר הנומינלי ($100[MHz]$).

- ו. האם **ההספק הדינמי** הממוצע הנצרך ע"י ה- Adder השתנה עבור עבודה בתדר החדש $(800[MHz])$? אם כן, מהו יחס ההספק הדינמי החדש לעומת ההספק הדינמי עבור עבודה ב- $100[MHz]$?
- ז. האם **ההספק הסטטי** הנצרך ע"י ה- Adder השתנה עבור עבודה בתדר החדש? אם כן, מהו יחס ההספק הסטטי החדש לעומת ההספק הסטטי עבור עבודה ב- $100[MHz]$?
- ח. מריצים קוד מסוים בשני המימושים: פעם בתדר של $800[MHz]$ ופעם בתדר של $100[MHz]$. האם השינוי בתדר משפיע על **האנרגיה הדינמית** הנצרכת ע"י ה- ALU? אם כן, כיצד?
- ט. האם השינוי בתדר משפיע על **האנרגיה הסטטית** הנצרכת ע"י ה- ALU? אם כן, כיצד?
- י. האם השינוי בתדר משפיע על ה- **Latency** (במונחי זמן)? אם כן, כיצד?

תשובות למבחן בקורס מעגלי ומערכות VLSI זיגל תשע"ו סמסטר א' מועד א'

שאלה מספר 1

א) הנחיה עבורו הנדס במחלק העליון יהיה מקסימלי הוא כאשר כל הסיביות של ה-Bus מתחברות כולן 0-N ו-VDD או להפך.

הסתברות לכל הוא:

$$P = \left(\frac{1}{2}\right)^n \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n + \left(\frac{1}{2}\right)^n \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n = 2 \cdot 2^{-2n} = 2^{-2n+1}$$

הסיביות של הסיביות יהיו במצב אפס
הסיביות של הסיביות יהיו במצב אפס
הסיביות של הסיביות יהיו במצב אפס
הסיביות של הסיביות יהיו במצב אפס

ב) נחשב את הנדס במחלק העליון כאשר כל הסיביות של ה-Bus עוברות 0-N ו-VDD (כל המקרה שגורם לנדס הכי גדול שלילי אחרים)
שאלה זו היא:

$$\Delta V_{vic} = \frac{C_{adj}}{C_{gnd-v} + C_{adj}} \cdot \frac{1}{1 + K} \cdot \Delta V_{agg}$$

$$K = \frac{R_{agg} (C_{gnd-a} + C_{adj})}{R_{vic} (C_{gnd-v} + C_{adj})}$$

קיבול הצמוד בין המחלק לבין ה-Bus מתחיל:

$$C_{adj} = L \cdot C_1 = 2\lambda \cdot n \cdot C_1 = 2\lambda \cdot n \cdot \frac{C_0}{2} = \lambda \cdot n \cdot C_0$$

קיבול הצמוד בין המחלק לבין השכבה מעל:

$$C_{gnd-v} = L \cdot C_1 = \lambda n C_0$$

קיבול הצמוד לבין ה-Bus מתחיל:

$$C_{gnd-a} = n \cdot (L \cdot C_1) = n \cdot (\lambda n C_0) = \lambda n^2 C_0$$

ההתנגדות של ה-Driver תלויה במצב הטרינזיסטורים, ולכן, גם כאשר עוצר ה-Drivers זהה, עדיין יש יחס של $\frac{3}{1}$ בין Driver התוקף הנמצא במצב רוויה במהלך המיתוך, לבין Driver הקורבן הנמצא במצב אינרטי במהלך המיתוך. בנוסף, התוקף הוא Bus שלו פולאים n-Drivers במקרה, ולכן, האופן לקוד:

$$\frac{R_{agg}}{R_{vic}} = \frac{\frac{3k}{n}}{1k} = \frac{3}{n}$$

$$K = \frac{R_{agg} (C_{gnd-a} + C_{adj})}{R_{vic} (C_{gnd-v} + C_{adj})} = \frac{3 (\lambda n^2 C_0 + \lambda n C_0)}{n (\lambda n C_0 + \lambda n C_0)} = \frac{3}{2} \left(1 + \frac{1}{n} \right)$$

$$K \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \frac{3}{2}$$

* ניתן היה לבצע את הקירוב: תחת הנחה של n מספיק גדול.

$$\Delta V_{vic} = \frac{C_{adj}}{C_{adj} + C_{gnd-v}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{3}{2} \left(1 + \frac{1}{n} \right)} \geq \frac{1}{8} > 0.1$$

דכן, עבור כל ערך (חיובי) של n עולה אחריות לעליה של $V_{IL} = 100mV$: N

© כאשר נמצאים את ה-Driver פי S $\Leftarrow$ מקטנים את ההתנגדות הנמצא שלו פי S, ולכן:

$$\frac{R_{agg}}{R_{vic}} = \frac{\frac{3k}{n}}{\frac{1k}{S}} = S \cdot \frac{3}{n}$$

ואכן, לאחר ביצוע Sizing הסקטור S נקבע:

$$K = S \cdot \frac{3}{2} \left(1 + \frac{1}{n}\right)$$

לדור $n = 64$:

$$\Delta V_{ic} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1 + S \cdot \frac{3}{2} \left(1 + \frac{1}{64}\right)}$$

$$\Delta V_{ic} \leq 0.1$$

נדרש:

$$S \geq 2.625641026$$

ונקבע:

$$K \approx S \cdot \frac{3}{2}$$

* גם נ' שבצע הנחה, וחלש:

$$S \geq 2\frac{2}{3} = 2.6667$$

ואם קבע:

קבע את מלא התקלות.

3) לבדוק האם הכנסת Repeater אחת מספיקה:

$$\tilde{L} = \frac{L}{2} = \frac{2\lambda \cdot n}{2} = \lambda n$$

אורך המוליך החזש:

$$\tilde{C}_{adj} = \tilde{L} \cdot C_1 = \lambda n \cdot \frac{C_0}{2}$$

קיבול הצמוד החזש:

קיבול הצמוד בין קטע אחד למוליך אחר השכבה המלאה:

$$\tilde{C}_{gnd-v} = \tilde{L} \cdot C_1 = \lambda n \cdot \frac{C_0}{2} = \tilde{C}_{adj}$$

קיבול הצמוד בין התוקף (תחנות מסביות ה-Bus) לבין השכבה

השכבה למתחתיו:

$$\tilde{C}_{gnd-a} = \frac{n}{2} \cdot (L \cdot C_1) = \frac{n}{2} \left(2\lambda n \cdot \frac{C_0}{2}\right) = \lambda n^2 \frac{C_0}{2}$$

התנגדות המוצא של ה-Driver העשיון (התקופה) לא השתנה,

אלו, התנגדות המוצא של התוקף (תחנות מסביות ה-Bus) ה'א:

$$\tilde{R}_{agg} = \frac{3k}{n/2}$$

$$\frac{\tilde{R}_{agg}}{\tilde{R}_{vic}} = \frac{\frac{3k}{n/2}}{1k} = 2 \cdot \frac{3}{n} = \frac{6}{n} \quad \text{:כדי}$$

$$\tilde{K} = \frac{\tilde{R}_{agg} (\tilde{C}_{gnd-a} + \tilde{C}_{adj})}{\tilde{R}_{vic} (\tilde{C}_{gnd-v} + \tilde{C}_{adj})} = \frac{6(\lambda n^2 \frac{C_0}{2} + \lambda n \frac{C_0}{2})}{n(\lambda n \frac{C_0}{2} + \lambda n \frac{C_0}{2})} = \text{:כדי}$$

$$= 3(1 + \frac{1}{n})$$

נבדוק את היחס של אחת המילים ל המילים השניות:

$$\Delta \tilde{V}_{vic} = \frac{\tilde{C}_{adj}}{\tilde{C}_{adj} + \tilde{C}_{gnd-v}} \cdot \frac{1}{1 + 3 \cdot (1 + \frac{1}{64})} = 0.12355 \text{ v}$$

ניתן לראות כי הוספת Repeater אחת למילים השניות של הספרה ע"י להוסיף את היחס של המילים מתחת - 0.1 v.

הוספת Repeater אחת חסרה את המילים של חלקים שונים, וברמה של הקיבולים קטן פי 2. יחס הקיבולים לא השתנה.

מה של השתנה הוא יחס ההתנגדות, כאשר R_{agg}

עצם פי 2, מה שהגדיל את K פי 2.

הסעף ה ראון כי עדיין להגדיל את K פי 2.625 בפחות ע"י דרון את היחס של המילים השניות.

הכנסת של Repeaters $\Leftarrow$ חסרה של המילים שלפניה חלקים שונים תעשה את המבואה:

אם נחלק את המילים שלפניה חלקים באורך $\frac{L}{3}$ כל אחת,

$$\tilde{L} = \frac{L}{3} = \frac{2\lambda n}{3} = \frac{2\lambda \cdot 64}{3} \quad \text{:כדי}$$

$$\tilde{C}_{adj} = \tilde{L} \cdot C_1 = \frac{2\lambda n}{3} \cdot C_1 = \frac{2\lambda n}{3} \cdot \frac{C_0}{2} = \lambda n \cdot \frac{C_0}{3}$$

$$C_{TOT} = C_{TOP} + \underbrace{2 \cdot C_{adj}}_{MCF} = L \cdot C_1 + \underbrace{2 \cdot L \cdot C_1}_{MCF} = 3 \cdot \lambda n C_0$$

ה-Delay עבור הנתון:

$$\begin{aligned} t_{pd} &= 0.69 \cdot R_{out} (C_{TOT} + C_g) + 0.38 R_{int} \cdot C_{TOT} + \\ &+ 0.69 \cdot R_{int} \cdot C_g = \\ &= 0.69 \cdot \frac{R_0}{2} \cdot (3\lambda n C_0 + C_g) + 0.38 \cdot 2\lambda n r \cdot 3\lambda n C_0 + \\ &+ 0.69 \cdot 2\lambda n r \cdot C_g \end{aligned}$$

① נניח כי ה-Delay עבור כל שלב (הוא זהה):

$$R_{out} = R_0$$

$$C_{TOT} = C_{top} + \overset{MCF}{2} \cdot C_{adj} = \frac{L}{2} \cdot C_1 + \overset{MCF}{2} \cdot \frac{L}{2} \cdot C_1 = \frac{3}{2} \lambda n C_0$$

$$R_{int} = \frac{L}{2} \cdot r = \frac{2\lambda n}{2} \cdot r = \lambda n r$$

$$\begin{aligned} t_{pd-1} &= 0.69 \cdot R_{out} (C_{TOT} + C_g) + 0.38 \cdot R_{int} \cdot C_{TOT} + \\ &+ 0.69 \cdot R_{int} \cdot C_g = \\ &= 0.69 \cdot R_0 \left(\frac{3}{2} \lambda n C_0 + C_g \right) + 0.38 \cdot \lambda n r \cdot \frac{3}{2} \lambda n C_0 + \\ &+ 0.69 \cdot \lambda n r \cdot C_g \end{aligned}$$

ה-Delay עבור כל שלב (הוא זהה):

$$\begin{aligned} t_{pd} &= 2 \cdot t_{pd-1} = 2 \cdot 0.69 \cdot R_0 \left(\frac{3}{2} \lambda n C_0 + C_g \right) + 3 \cdot 0.38 \cdot \lambda^2 n^2 r \cdot C_0 + \\ &+ 2 \cdot 0.69 \cdot \lambda n r \cdot C_g \end{aligned}$$

$$\Delta t_{pd} = t_{pd}^{(1)} - t_{pd}^{(0)} = 3 \cdot 0.69 \cdot \frac{R_0}{2} (\lambda n C_0 + C_g) - 3 \cdot 0.38 \cdot \lambda^2 n^2 r C_0 \quad (5)$$

סיק כי התשובה לכמה שיתון (Repeater Sizing) תלויה במסלול המעלה.

שאלה מספר 2

(א) ה-ALU מבצע את פעולתו במחצית מנמן המחזור, ואכן:

$$\frac{T}{2} = 5ns = T_{cq} + 64 \cdot t_{pd-o} + T_{su}$$

$$T = 10ps = 2 \cdot (T_{cq} + 64 \cdot t_{pd-o} + T_{su})$$

ואכן:

$$P_{dyn} = C \cdot V_{DD}^2 \cdot \alpha_0 \cdot 100M$$

(ב)

(ג) CLK-2 כמו השמן שמדגמן בפועל את ה-Registers ב- MIPS,

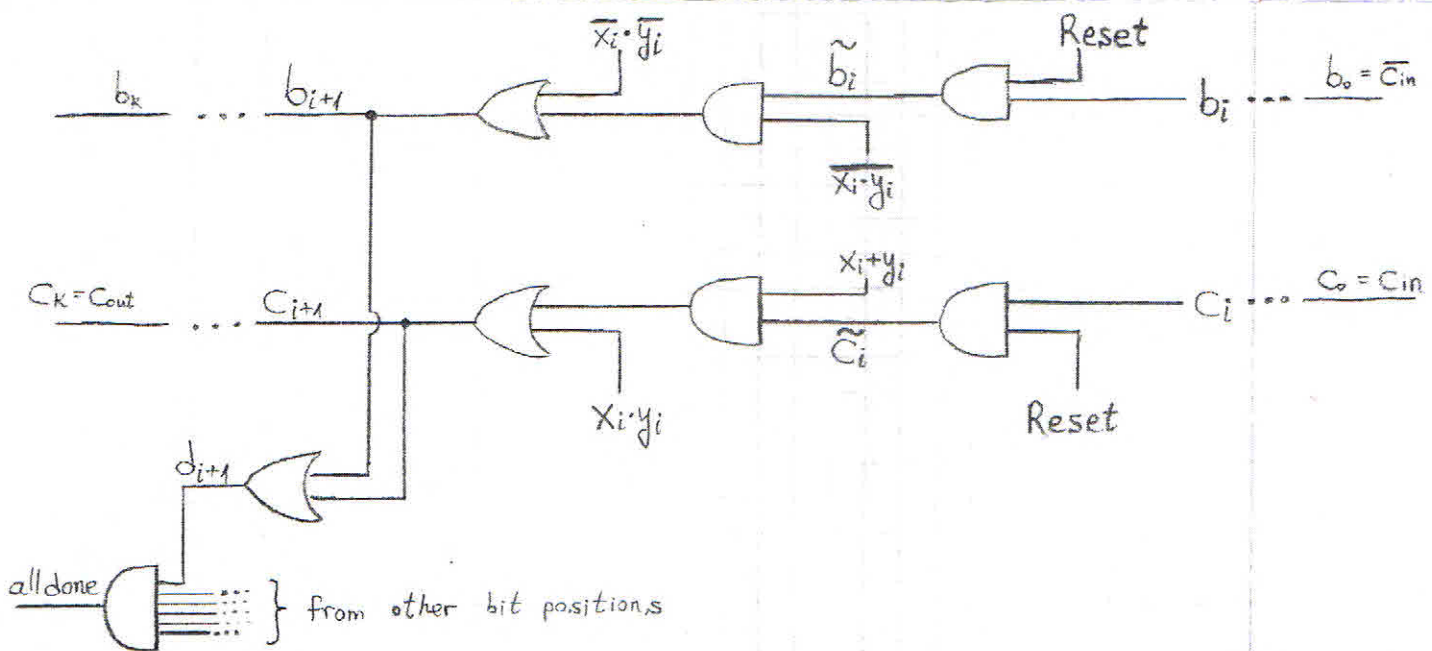
כאשר, CLK, כמו השמן הכפול שמגיע מבחוץ, ובמידת הצורך,

מגיע ה- Carry Comp. יצורם מהקבוצה השמן CLK-2

דמיים החיבור ב- Carry ה- Adder כולו.

Carry Completion (3)

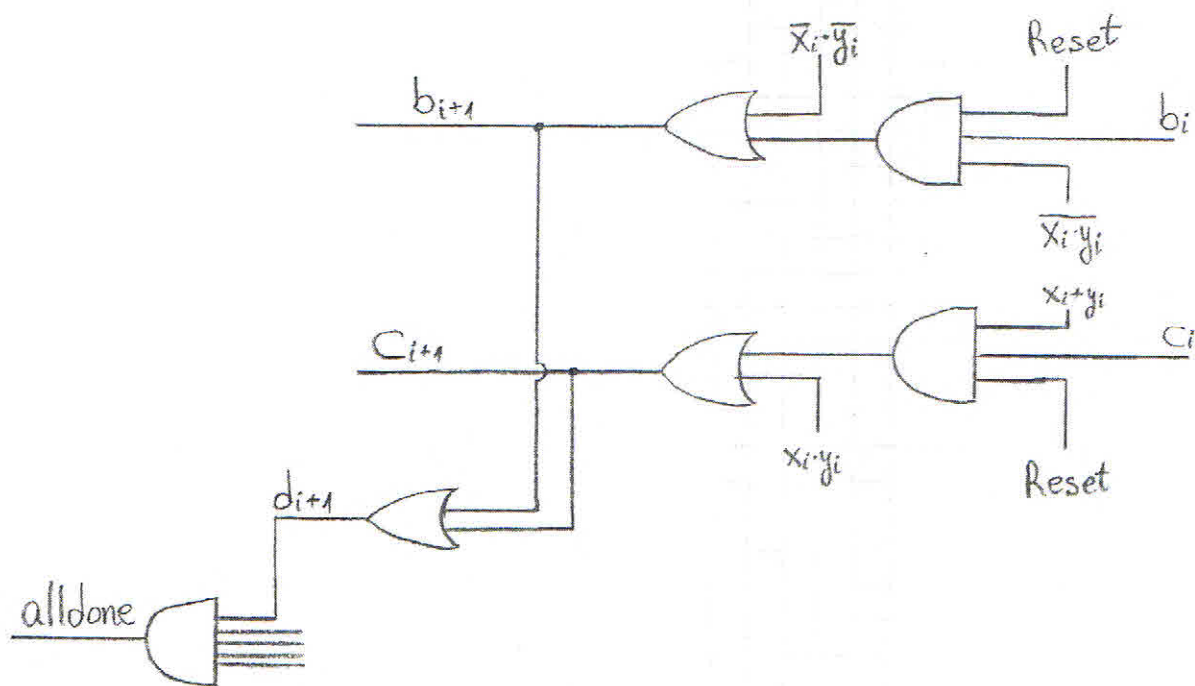
אפשרות אחת למימוש היא:



כאשר $\tilde{b}_i, \tilde{C}_i$ אלו סיביות המיוצגות שנייה למעלה.

המשמעות של $d_i = 1$ הוא שהמחנה ה- i יודעת כבר מה ה-Carry שלה.

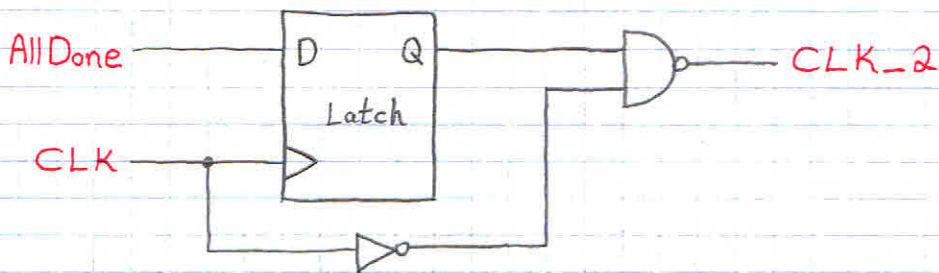
המחיר שלנו מולמים באיחור הזה והוא שלכאן, המוצא מוצא בפרוסות ציף ציף אלסור בעוד שער AND אס רמה, וכן מצאיר בעוד שמה, הספק וכו'. אפשרות נוספת לאפס את סיביות המוצא היא:



כאשר, במחנה הזה מספר השברים לא גדל, אבל המחיר שלנו הוא שער ה-AND שלו והוא בעל $f_{anin} = 3$, מה שמחנן מציב את ה- t_{pd} שלו, את השער שלו ואת ציבת ההספק שלו.

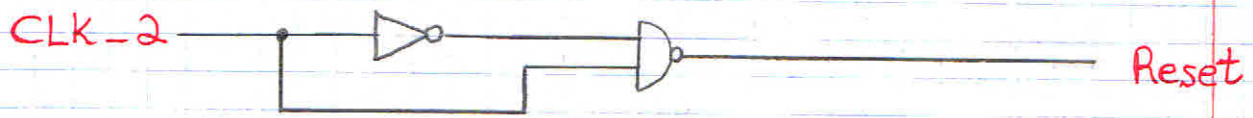
Clock Gating

המטרה ציף למנוע מהשעון CLK-2 מלרדת במקרה שבו הסיבית "All Done" עדין לא נצטקה, ועדין:



Pulse Maker

נרצה לבצע Reset בכל תחילת מחזור, ולכן:



אם ה-Pulse של ה-Reset יהיה קצר מדי בשלבים הבאים (תלוי בפרמטרי הקצה), אז ניתן להרחיב אותו מעט ע"י הוספת 2 או 4 אינורטרים לפני שער ה-NAND (או כל מספר זוגי, ככלי הדגוש עיצובי Reset).

$$O(\log(n)) \quad (ה)$$

כאשר, עבור RCA: $O(n)$

① כן, ההספק הדינמי הממוצע הנצרך ע"י ה-Adder גדל פי $\frac{8}{1.1}$,

משום שה-Adder צורך את אותה אנרגיה דינמית בפחות זמן.

③ לא, ההספק הסטטי לא השתנה. אמנם, יש פחות איבוד של אנרגיה סטטית, אך גם הזמן קטן באותו פרקטור.

④ לא, אין שינוי בזרימת האנרגיה הדינמית, שכן ה-Adder טען את אותם קיבולים אותו מספר פעמים.

⑥ האנרגיה הסטטית הנצרכת יקטן פי $\frac{8}{1.1}$

⑦ גם ה-Latency יקטן פי $\frac{8}{1.1}$