אביב 2002

מיתוג ומערכות ספרתיות

תזמון - Timing

RAM wasn't built in a day.

מימוש פונקציה בוליאנית על ידי רכיבים אלקטרוניים מוסיף מימד חדש (ובעיתי), מימד הזמן. רכיבים אלקטרוניים פועלים בזמנים הגדולים מאפס. ולכן חייבים לתזמן אותם בכדי להימנע מהפרעות בחישוב פונקצית המטרה.
בשיעור זה נתמקד בעיית תזמון הרכיבים במעגלים ללא לולאת משוב, מעגלים הנקראים "מעגלים צירופיים". בשיעורים הבאים נטפל בבעיית התזמון במעגלים בעלי משוב.
על מנת לתזמן מעגל צירופי, נרצה לדעת עבור כל רכיב במעגל, ועבור כל שנוי של כניסה בו, את <u>הזמן המקסימלי</u> בו מובטח לנו כי היציאה טרם השתנתה, ואת <u>הזמן המינימלי</u> בו מובטח לנו כי היציאה כבר השתנתה. נשים לב, כי זמנים אלו ישתנו מרכיב לרכיב, מכניסה לכניסה באותו הרכיב ובהתאם למעברים שונים (מ 0 ל 1 או מ 1 ל 0).
נתוני היצרן עבור כל רכיב הם:

t_{LH} – זמן השהיה מכניסה ליציאה כאשר היציאה "עולה" ($0 \leftarrow 1$). נמדד בדר"כ מהרגע בו הכניסה הגיעה ל – 50% בין 0 ל – 1 עד הרגע בו היציאה הגיעה לאותו ערך של 50%.

t_{HL} – זמן השהייה מכניסה ליציאה כאשר היציאה יורדת.

$$\{t_{HL} \text{ or } t_{LH}\} \le t_{pd} \quad (pd = \text{propagation delay})$$

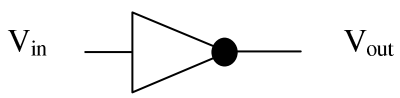
t_r – זמן עלייה (rise) מהרגע בו המתח עבר 10% מכלל השינוי שאותו יעבור עד שהגיע ל – 90%.

t_f – זמן הירידה (fall).

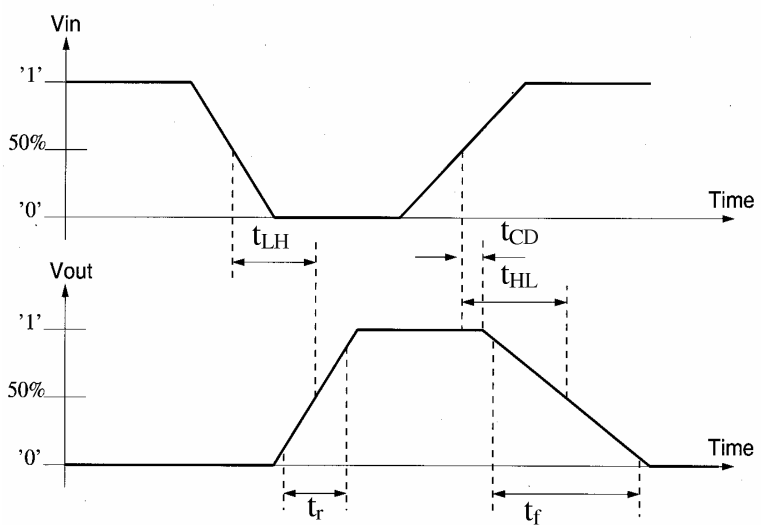
t_{CD} – זמן "זיהום" – משך הזמן מהרגע בו הכניסה החלה "להשתנות" (ערך 50%) אשר בו מובטח שהיציאה לא תשתנה (קטן מאוד).

מנתונים אלו ניתן לחשב את הזמנים (המינימליים והמקסימליים) של כל רכיב, ואת הזמנים של מעגל המורכב ממספר רכיבים.

<u>**דוגמא 1:**</u> שער NOT:



נתבונן בדיאגרמת הזמנים של מתחי הכניסה והיציאה של שער ה - NOT:



הזמן המינימלי (בו מובטח כי היציאה כבר התייצבה על ערכה החדש):

יציאה משתנה מ 0 ל 1: $t_{LH} + \max\{t_r(NOT), t_f(PREV)\}$

יציאה משתנה מ 1 ל 0: $t_{HL} + \max\{t_f(NOT), t_r(PREV)\}$

הזמן המקסימלי (בו מובטח כי היציאה טרם השתנתה): t_{CD} (בשני סוגי המעברים).

שימו לב כי אלו הם חסמים על הזמנים המינימליים והמקסימליים.

שרשור רכיבים

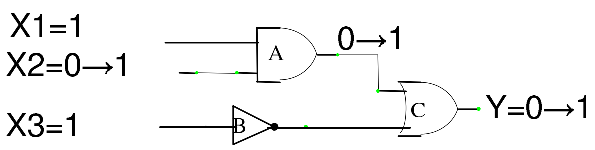
כאשר מחברים מספר רכיבים (שערים) למעגל, מצטברים זמני העיכוב t_{pd} של הרכיבים לזמן עיכוב מינימלי של כל המעגל. בנוסף, יש להוסיף את זמן העיכוב בגין השינוי הראשוני ואת זמן העיכוב בגין השינוי האחרון.

כמו כן, מצטברים הזמנים המקסימליים t_{CD} לזמן מקסימלי של כל המעגל.

על מנת לחשב את הזמן המקסימלי בו מובטח לנו כי יציאת המעגל טרם השתנתה, נחפש מסלול מינימלי (המסלול "המהיר" ביותר) ונסכום את כל ה t_{cd} באותו המסלול. ועל מנת לחשב את הזמן המינימלי בו מובטח כי יציאת המעגל התייצבה על הערך הסופי, נחפש מסלול מקסימלי (המסלול "האיטי" ביותר), ונחשב את זמן העיכוב הכולל בהתאם לשינוי הערכים במסלול הנ"ל.

<u>דוגמא 2:</u> מעגל פשוט:

המעגל ממש את הפונקציה: $Y = X1 \cdot X2 + X3'$



נתונים (בננו שניות):

	X2	A (AND)	B (NOT)	C (OR)
t_{HL}	-	100	90	80
t_{LH}	-	110	70	100
t_{CD}	-	12	8	10
t_r	14	20	12	18
t_f	15	17	13	19

במעבר מההשמה $(X1, X2, X3) = (1, 0, 1)$ להשמה $(1, 1, 1)$ משתנה היציאה Y מ 0 ל 1.

זמן מינימלי בו מובטח שינוי היציאה: $110 + 100 + \max\{18,14\} = 228ns$

זמן מקסימלי בו היציאה לא משתנה: $12 + 10 = 22ns$

זהו זוג הזמנים המתאים לערכי הכניסות שבדוגמא, אולם עבור ערכים וכניסות אחרים נקבל זמנים אחרים.

לעיתים נרצה לתת זמן מינימלי עבור המעגל כולו, ללא תלות בערכי הכניסות ובשינוי בהן. במקרה זה, עלינו לחפש את המסלול ה"איטי" ביותר על ידי סקירת כל ההשמות האפשריות וכל שינויי הביטים האפשריים ומציאת זמן העיכוב הגבוה ביותר. שימו-לב כי אם ערך הפלט אינו משתנה עבור שינוי ביט מסוים – אין צורך בחישוב הזמנים.

באותו אופן נוכל לתת את הזמן המקסימלי עבור המעגל כולו.

אם יש בידנו את הזמנים המינימליים והמקסימליים של המעגל כולו, נוכל להתייחס אליו כאל כל שער אחר בבואנו לתזמן מעגל אחר המורכב ממעגל זה.

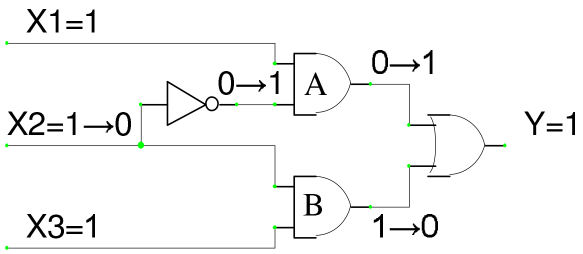
Hazards (הבהובים)

ראינו שבמעגל צירופי ישנם מסלולים בעלי השהיות שונות. השפעת שינויים בקלט על הפלט תלויים, כמובן, בפונקציה שהמעגל מממש אך ישנן השפעות זמניות הנובעות מזמני השהיה שונים במסלולים מקלט לפלט.

הגדרה: Static Hazard זה מצב בו שינוי של משתנה כניסה יחיד אשר אינו אמור לשנות את ערכי הפלט (ע"פ הפונקציה הבוליאנית הממומשת) גורם לשינוי זמני בערך הפלט.

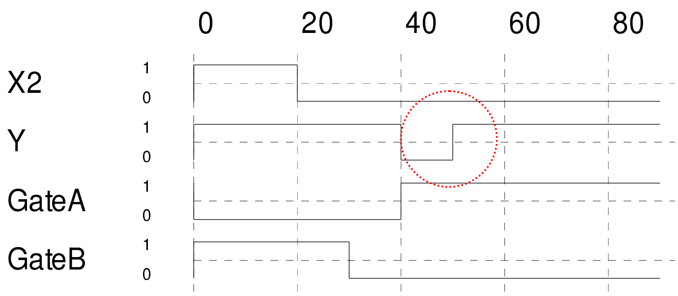
דוגמא: נתבונן במעגל אשר מממש את הפונקציה הבאה:

$$Y = x_2 x_3 + x_1 x_2'$$



נניח שלכל השערים $T_{HL} = T_{LH} > 0$ ונתבונן בשינוי בערכו של x_2 מ1 ל0.

התוצאה היא שינוי של 2 הכניסות של שער הOR. הכניסה התחתונה תשתנה (מ1 ל0) לפני שהכניסה העליונה תשתנה (מ0 ל1) והתוצאה היא הבהוב בערך הפלט y.



כאשר מדובר בהבהוב 1-0-1 זה נקרא Static 1-hazard. כשמדובר בהבהוב 0-1-0 זה נקרא Static 0-hazard.

הגדרה: Dynamic-Hazard זה מצב בו שינוי של משתנה אחד, <u>אמור</u> לגרום לשינוי בפלט אך גורם להבהוב בפלט לפני התיצבות על ערך הסופי. (למשל 0-1-0-1).

במערכות רבות, אין סיבה למנוע הופעת hazards כיוון שהשימוש בפלט נעשה רק לאחר התייצבות ערכיו. לעומת זאת, לעיתים יש צורך להימנע מהבהובים שכאלה. זה קורה כאשר לא מובטח שהפלט יקרא רק לאחר שהתיצבותו הובטחה כבר. בהמשך נראה מעגלים עם משוב (מעגל בגרף השערים). במעגלים שכאלה קיים מושג של מצבים יציבים ויציבות של ערכי הרכיבים במעגל. הבהובי hazard עלולים להשפיע על אופן המעבר בין מצבים יציבים ועל יציבות מעגלים שכאלו בכלל.

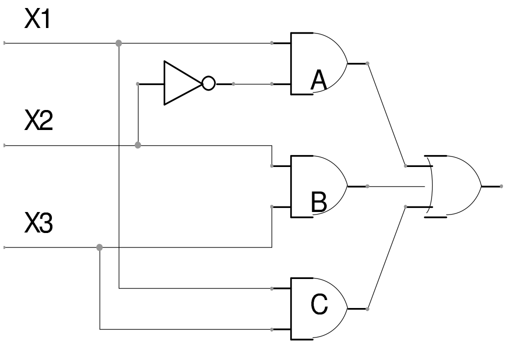
מניעת Hazards

נניח שאנו ממשים פונקציה בוליאנית בצורה הסטנדרטית (ע"י סכום של מכפלות), כפי שנעשה בדוגמא הקודמת. נתבונן במפת הקרנו של הפונקציה ובחלוקה שלה לשטחים כפי שהיא ממומשת במעגל. עבור הדוגמא הקודמת נקבל

X_1 \ X_2,X_3	00	01	11	10
0			1	
1	1	1	1	

הבהוב מופיע במעבר בין 2 שטחים. נוצר מצב רגעי בו מינטרם אחד כבר אינו נותן 1 והמינטרם השני עדיין אינו מוציא 1. ניתן למנוע אותו ע"י הוספת מימוש של מינטרם נוסף אשר מכסה את המעבר:

X_1 \ X_2,X_3	00	01	11	10
0			1	
1	1	1	1	



התוצאה של מימוש שרשרת שכזו היא שכל עוד משנים כניסה אחת בלבד בו זמנית, לא נוצר מצב בו כל הכניסות לOR משתנות בבת אחת.

באופן כללי, אם מניחים שבכל פעם משתנה כניסה אחת בלבד ואין שינויים בכניסות עד להתייצבות היציאות, ניתן למנוע Static-hazards במעגל הממומש כסכום מכפלות סטנדרטי ע"י כיסוי כל שני מינטרמים שכנים (משבצות שכנות במפת הקרנו) שנותנים '1' ע"י מכפלה אחת לפחות. מניעת Static 1-hazards מבטיחה מניעת Static 0-hazards ולהיפך. מניעת Dynamic hazards אינה ניתנת לפתרון בשיטה זו, ולא תידון בקורס זה