

שם הקורס: מעגלים אלקטרוניים	סוג המבחן: בחינת סיום הסמסטר
מס' קורס: 3030007	תוכניות לימוד: הנדסת מחשבים
סמסטר: לא רלוונטי	מועד: בחינת דוגמה תאריך:
מסלול: לימודי יום + ערב	
סגל הקורס: דר' ינון סתיו	

בחינת דוגמה + פתרון

הוראות לנבחן

- משך המבחן: **180 דקות (3 שעות)** – חובה להגיש בסיום הזמן שהוקצה, אי-עמידה בהגשה בזמן צפויה לגרור הורדת ניקוד ופסילת הבחינה.
- הבחינה כוללת **מספר שאלות**, שונות במשקלן והיקפן, הניקוד של כל סעיף מצוין ;
 - יש לפתור את כל חלקי הבחינה.
 - מומלץ מאד לקרוא מראש את השאלות בעיון רב.
 - אנא חלקו את הזמן בין השאלות בצורה מושכלת.
- שימו לב כי זו בחינה לדוגמה , בחינת פטור להנדסאים עשויה לכלול סעיפים דומים, אך המענה עליהן יהיה בפורמט שאלות 'רב-ברירה' (שאלות אמריקאיות) בבחינה זו לדוגמה קיימים 12 סעיפים שיכולים להיות 12 שאלות רב-ברירה נפרדות.**
כמו כן לא כל נושאי הלימוד האפשריים מופיעים בבחינה זו (ייתכנו גם שאלות בנושאים נוספים, למשל : מעגלי דיודה, משוואת הדפקים, מחוללי אותות, זיכרונות ספרתיים)
- חומר עזר:
 - הסטודנט יביא עמו תקציר נוסחאות אישי בן מספר עמודים, הכול סיכום אישי ונוסחאות, אך ללא תרגילים או דוגמאות. המרצה או המתרגל יחתמו על הדף כאסמכתא לאישור בזמן הבחינה !
 - ניתן להשתמש במחשבוני בלבד. חל איסור לעשות שימוש במחשבי לוח (טבלטים) או מחשבים אישיים (PC).
 - יש להשאיר טלפונים סלולריים, מחשבים וכל ציוד אלקטרוני שהוא (כולל שעוני-יד חכמים), כמו גם כל חומר עזר אחר, שאינו מאושר לשימוש, בתיקים בקדמת הכיתה.
 - חריגה מהנחיות אלו, הינה עבירת משמעת.

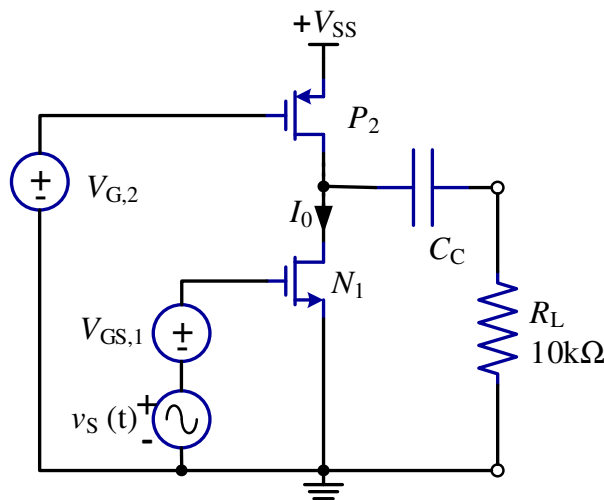
בהצלחה.

ט.ל.ח.



שאלה 1 ; (30%)

מגבר טרנזיסטורי בחיבור CS לאות קטן



נתון מעגל המגבר המתואר באיור משמאל :
כמו כן נתונים ערכי הרכיבים והמתחים :

$$V_{SS} = +2.5[V]$$

$$V_{G,2} = +1.5[V]$$

$$V_{t,n} = 0.5[V] \quad , \quad V_{t,p} = -0.5[V]$$

$$k_n' = 400 \left[\frac{\mu A}{V^2} \right]$$

$$k_p' = 100 \left[\frac{\mu A}{V^2} \right]$$

$$V_{A,n} = 10[V] \quad , \quad V_{A,p} = -10[V]$$

$$\left(\frac{W}{L} \right)_{N1} = \frac{10[\mu m]}{2[\mu m]} \quad , \quad \left(\frac{W}{L} \right)_{P2} = \frac{40[\mu m]}{2[\mu m]}$$

נתון כי אות הכניסה המשתנה בזמן הוא : $v_S(t) = V_{in} \cdot \cos(\omega t)$, ומתקיים :

$$\frac{1}{\omega C_C} \rightarrow 0 \quad : \quad V_{in} \ll V_{GS,1} \quad , \quad \text{כך שזהו אות קטן . והתדירות הזוויתית גבוהה מספיק כך ש :}$$

1.1 (5%) מהו זרם נקודת העבודה, המסומן I_0 ?

1.2 (5%) כיצד יש לקבוע, כלומר מהו ערכו של מקור מתח ה DC ; $V_{GS,1}$, המגדיר את נקודת העבודה של טרנזיסטור ה NMOS, המסומן N_1 , אם נדרש שהמעגל יפעל כמגבר לאות קטן ?

1.3 (12%) שרטטו סכמת מעגל התמורה (קירוב ליניארי) עבור האות הקטן בלבד, תוך ציון ערכם של הגדלים העיקריים. : g_{m1}, r_{O1}, r_{O2}

1.4 (8%) מהו ההגבר לאות הקטן $A_{V,o} = \frac{v_o}{v_s}$ בריקם (כלומר ללא חיבור עומס במוצא) , ומהו ההגבר לאחר חיבור נגד העומס במוצא ?



פתרון:

(1.1) כדי לקבל פונקציונליות של מגבר CS לאות קטן, נדרש כי שני הטרנזיסטורים יהיו ברוויה; NMOS משמש כמגבר ואילו PMOS כמקור זרם מעשי. כיוון שלטרנזיסטורים אותו K ואותה התנגדות מוצא r_o , אם שניהם ברוויה, וזורם דרכם אותו זרם DC, כנראה ש $v_{DS1} = v_{SD2} = +\frac{V_{SS}}{2}$, ואם $V_{OV} < 1.25 [V]$, זה מצדיק את הנחת הרוויה. כעת נחשב את הזרם ע"פ הנחת הרוויה:

$$I_{SD2} = \frac{1}{2} k'_p \left(\frac{W}{L} \right)_{p2} \cdot (V_{SG2} - |V_{tp}|)^2 = \frac{1}{2} \cdot 100 \left[\frac{\mu A}{V^2} \right] \cdot \left(\frac{40}{2} \right) \cdot [(2.5 - 1.5) - 0.5] [V^2]$$

$$I_0 = I_{SD2} = 1000 [\mu A] \cdot 0.5^2 = 0.25 [mA]$$

(1.2) NMOS ברוויה וזורם דרכו אותו זרם:

$$250 [\mu A] = I_{DS,1} = \frac{1}{2} k'_n \left(\frac{W}{L} \right)_{n1} \cdot V_{OV1}^2 = \frac{1}{2} \cdot 400 \left[\frac{\mu A}{V^2} \right] \cdot \left(\frac{10}{2} \right) \cdot V_{OV1}^2 [V^2]$$

$$\Rightarrow V_{OV1}^2 = \frac{250 [\mu A]}{1000 \left[\frac{\mu A}{V^2} \right]} = 0.25 [V^2] \Rightarrow V_{OV1} = 0.5 [V]$$

$$\Rightarrow V_{GS1} = V_{OV1} + V_{tn} = 0.5 + 0.5 = 1 [V]$$

(1.3) נחשב את התנגדות התקצרות התעלה של שני הטרנזיסטורים:

$$r_{O1} = \frac{V_{A,1}}{I_{DS,1}} = \frac{10 [V]}{0.25 [mA]} = 40 [k\Omega]$$

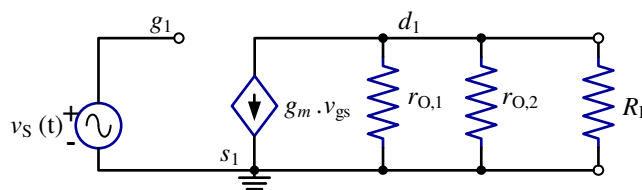
$$r_{O2} = \frac{|V_{A,2}|}{I_{SD,2}} = \frac{10 [V]}{0.25 [mA]} = 40 [k\Omega]$$

NMOS הוא זה שמשמש כמגבר, לכן נחשב את תגובת הזרם שלו לשינויי מתח קטן בשער:

$$g_{m,1} = \sqrt{2 \cdot K_n \cdot I_{DS,1}} = \sqrt{2 \cdot 400 \left[\frac{\mu A}{V^2} \right] \cdot \left(\frac{10}{2} \right) \cdot 0.25 [mA]} = \sqrt{4000 \left[\frac{\mu A}{V^2} \right] \cdot 0.25 [mA]} = \sqrt{1 \left[\frac{mA^2}{V^2} \right]}$$

$$g_{m,1} = 1 \left[\frac{mA}{V} \right] = 1 [mS]$$

לכן סכימת התמורה תראה כך:



(1.4) מכאן שההגבר לאות קטן, תחילה ללא ואח"כ כולל נגד העומס הוא:

$$A_{V0} = \left. \frac{v_{DS,1}}{v_S} \right|_{R_L=\infty} = -g_{m1} \cdot (r_{O1} || r_{O2}) = -1 [mS] \cdot (40 [k\Omega] || 40 [k\Omega]) = -20 \left[\frac{V}{V} \right]$$

$$A_V = \frac{v_{DS,1}}{v_S} = -g_{m1} \cdot (r_{O1} || r_{O2} || R_L) = -1 [mS] \cdot (40 || 40 || 10) [k\Omega] = -\frac{20}{3} \left[\frac{V}{V} \right]$$

שאלה מס' 2 ; (40%) ;

שערים לוגיים סטטיים, מבוססי CMOS

נתון תהליך CMOS, המתוכנן למתחי אספקה: $V_{DD} = +4V$, $V_{SS} = 0$, המקיים:

$$k'_n = 250 \frac{\mu A}{V^2}, V_{t,N} = 1.1V$$

$$k'_p = 100 \frac{\mu A}{V^2}, V_{t,P} = -1.1V$$

הנחייה: עבור חישובי הזמנים, יש להיעזר בקירוב חישוב משוערך על בסיס ממוצע הזרמים.

2.1 (8%) מהם ממדי שני הטרנזיסטורים, הנדרשים ליצירת **מהפך CMOS סימטרי**, אם נדרש

כי עבור קיבול מוצא של $C_L = 4 [fF]$, זמן התגובה יהיה:

$$t_{pd,HL} = t_{pd,LH} = 5 [ps]$$

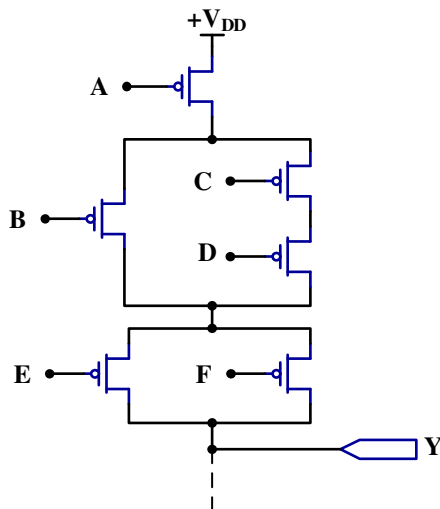
2.2 (12%) עבור המהפך הסימטרי הנ"ל

חשבו את המתחים $V_M, V_{OH}, V_{OL}, V_{IH}, V_{IL}$

חשבו את שולי הרעש NM_H, NM_L

שרטטו את אופיין המעבר (VTC) המתאר את v_O כנגד v_{IN} וצינו על גביו גדלים אילו.

כעת נתון כי על בסיס התהליך המתואר, מומשה רשת ה PUN המתוארת באיור משמאל:



2.3 (5%) מצאו ושרטטו את רשת ה PDN הנדרשת על מנת

לממש את החלק המשלים של אותה פונקציה לוגית, ושרטטו את השער המלא, תוך מיספור כל הטרנזיסטורים. (הקפידו על סימון משתני הכניסה).

2.4 (5%) מצאו מה צריכים להיות ממדי כל

הטרנזיסטורים על מנת שהדרישה לזמני המיתוג, במקרה הגרוע ביותר תהיה זהה למהפך ה-CMOS.

2.5 (5%) מהי הפונקציה הלוגית Y הממומשת?

2.6 (5%) כעת נתון כי כל הכניסות השתנו ממצב: $A = B = C = D = E = F = 0$,

לערך חדש: $A = B = C = D = E = F = 1$

השוו את זמן המיתוג במקרה זה למהפך CMOS בסיסי, עד כמה הוא מהיר/איטי יותר?



פתרון:

(2.1) נשתמש בתוצאות שפיתחנו בשיעור עבור מהפך CMOS סימטרי, כאשר נעזרנו בקירוב הזרם הממוצע, עבור מהפך CMOS סימטרי :

$$t_{PHL} = \frac{C}{k'_n \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_n \cdot V_{DD}} \cdot \alpha_n$$

$$\alpha_p = \alpha_n = \frac{2}{\frac{7}{4} - 3 \cdot \frac{V_t}{V_{DD}} + \left(\frac{V_t}{V_{DD}}\right)^2} = \frac{2}{\frac{7}{4} - \frac{3 \cdot 1.1}{4} + \left(\frac{1.1}{4}\right)^2} = 1.99 \cong 2$$

ועל בסיס הקשר למעלה :

$$\Rightarrow \left(\frac{W}{L}\right)_n = \frac{C}{k'_n \cdot t_{PHL} \cdot V_{DD}} \cdot \alpha_n = \frac{4 \cdot 10^{-15} [F]}{250 \cdot 10^{-6} \left[\frac{A}{V^2}\right] \cdot 5 \cdot 10^{-12} [s] \cdot 4 [V]} \cdot 2 = 1.6$$

לכן :

$$n = \left(\frac{W}{L}\right)_n = 1.6 \left[\frac{\mu m}{\mu m}\right]$$

עבור ה PMOS דרישה לשער סימטרי, תגדיר את רוחב ה PMOS להיות :

$$\left(\frac{W}{L}\right)_p = \left(\frac{W}{L}\right)_n \cdot \frac{k'_n}{k'_p} = 1.6 \cdot \frac{250}{100} = 4$$

$$p = \left(\frac{W}{L}\right)_p = 4$$

(2.2) גדלים מידיים : $V_{OH} = +V_{DD} = +4 [V]$, $V_{OL} = 0$, $V_M = \frac{V_{DD}}{2} = +2 [V]$, נחשב את נק' כד'

לחשב את V_{IL} נשתמש בקשר שפיתחנו עבור מהפך סימטרי :

$$V_{IL} = \frac{3}{8} V_{DD} + \frac{1}{4} V_t = \frac{3}{8} \cdot 4 + \frac{1}{4} \cdot 1.1 = 1.5 + 0.275 = 1.775 [V]$$

$$V_{IH} = \frac{5}{8} V_{DD} - \frac{1}{4} V_t = \frac{5}{8} \cdot 4 - \frac{1}{4} \cdot 1.1 = 2.5 - 0.275 = 2.225 [V]$$

כעת נוכל לחשב את שולי הרעש :

$$NM_L = V_{IL} - V_{OL} = 1.775 - 0 = 1.775 V$$

$$NM_H = V_{OH} - V_{IH} = 4 - 2.225 = 1.775 V$$

כדי למפות על עקום ה VTC את נק' ה "ברך" בה, $slope = -1$, נחשב את מתח המוצא, עבור

: $slope = -1$, זאת ע"י שימוש בקשר עבור נקודת $V_{IN} = V_{IH} = 2.225 V$

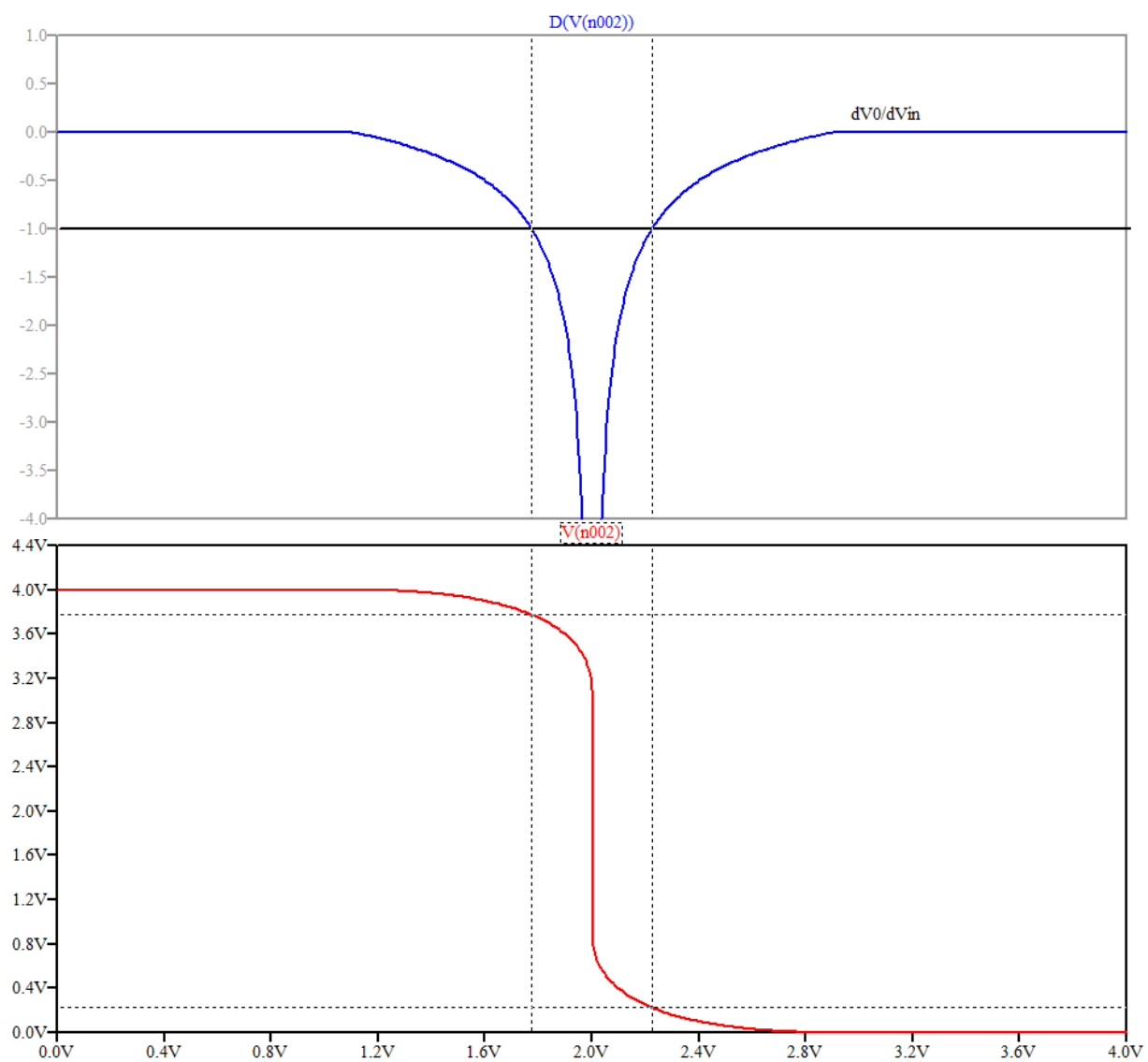
$$V_O(v_{IN} = V_{IH}) = V_{IH} - \frac{V_{DD}}{2} = 2.225 - 2 = 0.225 V$$

ומסימטריה של העקום :

$$V_O(v_{IN} = V_{IL}) = 3.775 V$$

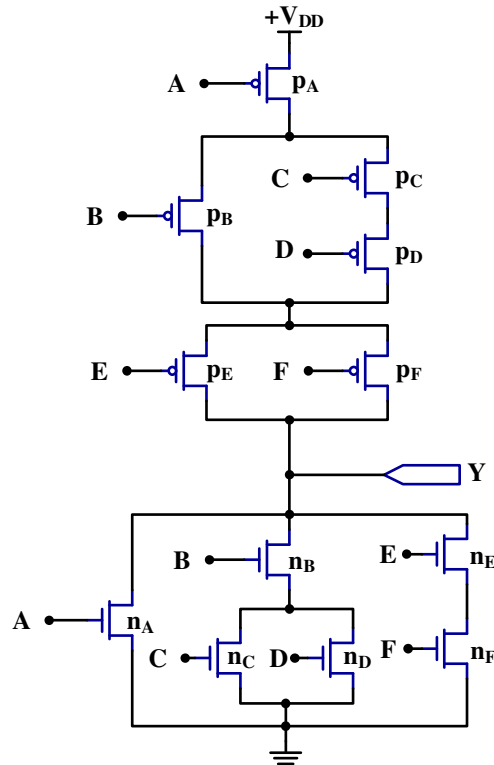
העקום בפועל (סימולציית LTspice) בעמוד הבא, מציג את עקום ה VTC באדום, מעליו מופיע עקום הנגזרת $\frac{dV_O}{dv_{in}}$, בו

קל לזהות את המתח עבורו הנגזרת -1 , המגדירות את שולי הרעש בעקום ה VTC





(2.3) רשת ה PDN מתוארת באיור משמאל :



(2.4) גדלי הטרנזיסטורים :

PUN : כאשר לוקחים את המקרה הגרוע ביותר ; טעינה דרך הענף הימני, כלומר $(A + C + D + E/F)$ אזי, L גדל פי 4 ולכן יש להגדיל את W פי 4 בשביל לקבל טרנזיסטור אקוויולנטי למהפך , מכאן שכל טרנזיסטור צריך להיות $4p$.

$$p_A = p_C = p_D = p_E = p_F = 4p$$

אם הטעינה היא דרך $(A+B+E/F)$, ממדי p_B צריכים להיות :

$$p_B = 2p \quad (\text{כי הוא מחליף שני טרנזיסטורים ברוחב } 4p \text{ בטור})$$

גודל זה הוא המינימלי שמקיים $p_{eff} \geq p$:

$$\frac{1}{4p} + \frac{1}{4p} + \frac{1}{2p} = \frac{1}{p}$$

PDN : אם הפריקה דרך A , מדובר על טרנזיסטור בודד ולכן

$$n_A = n$$

אם הפריקה היא דרך הענף הימני, מדובר על מקרה של שני

$$n_E = n_F = 2n$$

במקרה של פריקה דרך הענף המרכזי של ה PDN, אזי , נוח לבחור : $n_B = n_C = n_D = 2n$

(2.5) נרשום את הפונקציה הלוגית מהתבוננות,

גם ב PUN וגם ב PDN :

$$Y = \bar{A} \cdot [\bar{B} + (\bar{D} \cdot \bar{C})] \cdot (\bar{E} + \bar{F})$$

$$\bar{Y} = A + B \cdot (C + D) + E \cdot F$$

(2.6) הפריקה המהירה ביותר :

אם כל ה NMOS מוליכים, אזי ניתן לחשב מוליכות שקולה :

$$n_{eff} = n_A + \left(\frac{1}{n_E} + \frac{1}{n_F}\right)^{-1} + \left(\frac{1}{n_B} + \frac{1}{n_C + n_D}\right)^{-1} = n + n + \left(\frac{1}{2n} + \frac{1}{2n + 2n}\right)^{-1} = n + n + \frac{4}{3}n$$

$$n_{eff} = \frac{10}{3}n$$

לכן זמן המיתוג יהיה מהיר יותר ע"פ יחס זה :

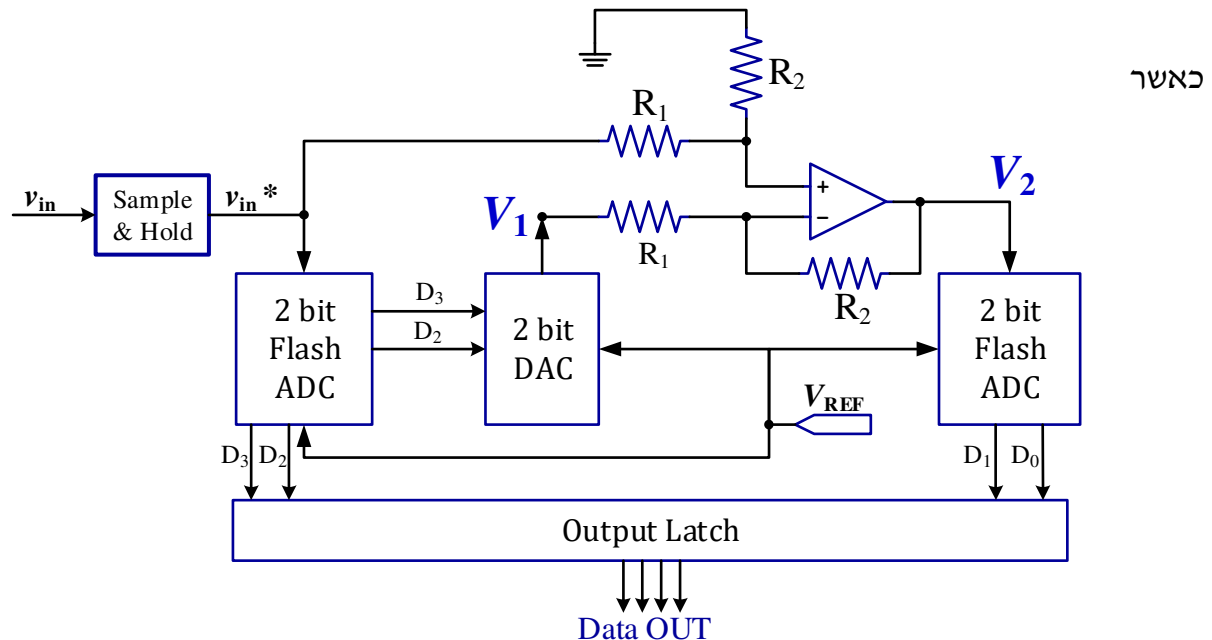
$$t_{PD,HL} = t_{PD}^{inv} \cdot \frac{n}{n_{eff}} = t_{PD}^{inv} \cdot \frac{3}{10} = 0.3 \cdot t_{PD}^{inv}$$

$$t_{PD,HL} = 0.3 \cdot 5 [ps] = 1.5 [ps]$$

שאלה 3 (30%);

ממיר נתונים, מסוג "Flash-זו-דרגתי"

נתון מעגל ממיר ADC מסוג Flash-זו-דרגתי, המתואר באיור הבא:



נתונים פרמטרי הממיר הבאים:

$$N = 4, \quad V_{REF} = 16 [V]$$

3.1 (10%) מה תפקידו של מגבר השרת ומה צריך להיות יחס ערכי הנגדים R_1, R_2 ?
הסבירו מדוע

3.2 (20%) נתונים 4 ערכי כניסות מתח שונות:

$$v_{IN} = 2V, \quad v_{IN} = 4V, \quad v_{IN} = 9V, \quad v_{IN} = 15V$$

עבור כל ערך כניסה, יש לחשב את:

- הערך הספרתי, במוצא הממיר, הקפידו על אבחנה בין הביטים השונים ($D_4 D_3 D_2 D_1$)
- המתח המסומן V_1
- המתח המסומן V_2

לשם הנוחות, ארגנו את התוצאות בפורמט של טבלה.



פתרון:

(3.1) מגבר השרת משמש מגבר מחסר (מגבר הפרש) המחשב את ההפרש $v_{IN} - V_1$, ומכפילו בתחום הדינמי של ה ADC הראשון.

כיוון שה ADC הראשון הוא בן 2 ביט, הוא מחלק את התחום ל 4 תחומים, וההפרש הוא בתחום $[0, \frac{V_{REF}}{4}]$, על כן יש להכפילו פי 4 לפני חישוב ה LSB, ומכאן:

$$\frac{R_2}{R_1} = 4$$

(3.2) נחשב:

מאחר ש $V_{REF} = 16V$ כל LSB יהיה שווה 1V.

ב ADC הראשון יהיו 4 רמות, במרווח של $LSB = 4V$ (בין 0 ל 16 וולט)

המתח בכניסה ל ADC השני יוגבר פי 4, ויעבור שוב דרך בדיקה של 4 רמות עם $LSB = 4[V]$

להלן פירוט בטבלה של כל התוצאות:

Vin	D3 D2 (MSB)	V1	$v_{IN} - V_1$	V2	D1 D0 (LSB)	DATA OUT
2	00	0	2	8	10	0010
4	01	4	0	0	00	0100
9	10	8	1	4	01	1001
15	11	12	3	12	11	1111