

אלקטרוניקה ומחשבים ה'

מגמת הנדסת אלקטרוניקה ומחשבים

(כיתה י"ד)

הוראות לנבחן

א. משך הבחינה: ארבע שעות.

ב. מבנה השאלון ומפתח הערכה: בשאלון זה שני פרקים, ובהם עשר שאלות.
יש להשיב על **ארבע שאלות בלבד**.

לכל שאלה – 25 נקודות. סך-הכול – 100 נקודות.

ג. חומר עזר מותר לשימוש: נוסחאון בית-ספרי מודפס לשפת C, ומחשבון.

ד. הוראות מיוחדות:

1. ענה על מספר השאלות הנדרש בשאלון. המעריך יקרא ויעריך את מספר השאלות הנדרש בלבד, לפי סדר כתיבתן במחברתך, ולא יתייחס לתשובות נוספות.

2. התחל כל תשובה לשאלה חדשה בעמוד חדש.

3. רשום את כל תשובותיך **אך ורק בעט**.

4. הקפד לנסח את תשובותיך כהלכה ולסרטט את תרשימיך בבהירות.

5. כתוב את תשובותיך בכתב-יד ברור, כדי לאפשר הערכה נאותה של תשובותיך.

6. אם לדעתך חסרים נתונים הדרושים לפתרון שאלה, אתה רשאי להוסיף אותם, בתנאי שתנמק מדוע הוספת אותם.

7. בכתיבת פתרונות חישוביים, קבלת מִצָּב הנקודות מותנית בהשלמת כל המהלכים שלהלן, בסדר שבו הם רשומים:

* רישום הנוסחה המתאימה.

* הצבה של כל הערכים ביחידות המתאימות.

* חישוב (אפשר באמצעות מחשבון).

* רישום התוצאה המתקבלת, ביחד עם יחידות המידה המתאימות.

* ליווי הפתרון החישובי בהסבר קצר.

8. **הדבק על הנוסחאון הבית-ספרי את מדבקת הנבחן שלך, והגש אותו בתום הבחינה עם מחברת הבחינה שלך.**

בשאלון זה 11 עמודים ו-12 עמודי נספח.

ההנחיות בשאלון זה מנוסחות בלשון זכר,

אך מכוונות לנבחנות ולנבחנים כאחד.

בהצלחה!

השאלות

ענה על ארבע מבין השאלות 1-10 (לכל שאלה – 25 נקודות).

פרק ראשון: אלקטרוניקה תקבילית ב'

שאלה 1

באיור לשאלה 1 מתואר המעגל החשמלי של מגבר, המורכב מטרנזיסטור תוצא שדה (Q_1 (FET) ומטרנזיסטור ביפולרי Q_2 .

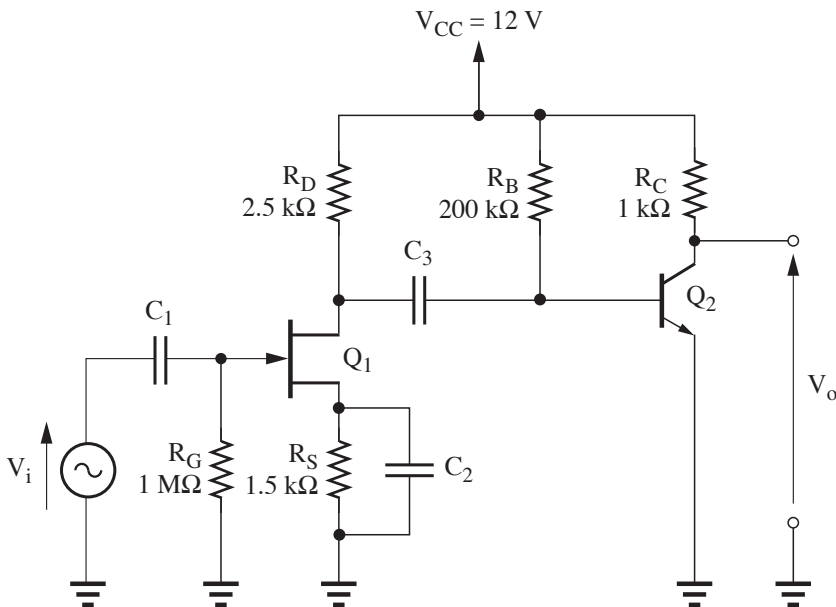
נתוני הטרנזיסטור תוצא השדה (FET) :

$$r_d = \infty, \quad g_m = 1.33 \text{ mS}, \quad I_{DSS} = 8 \text{ mA}, \quad V_P = -6 \text{ V}$$

נתוני הטרנזיסטור הביפולרי:

$$V_{BE} = 0.7 \text{ V}, \quad h_{ie} = 1 \text{ k}\Omega, \quad h_{fe} = 100, \quad \beta = 100$$

היגבי הקבלים במעגל זניחים.



איור לשאלה 1

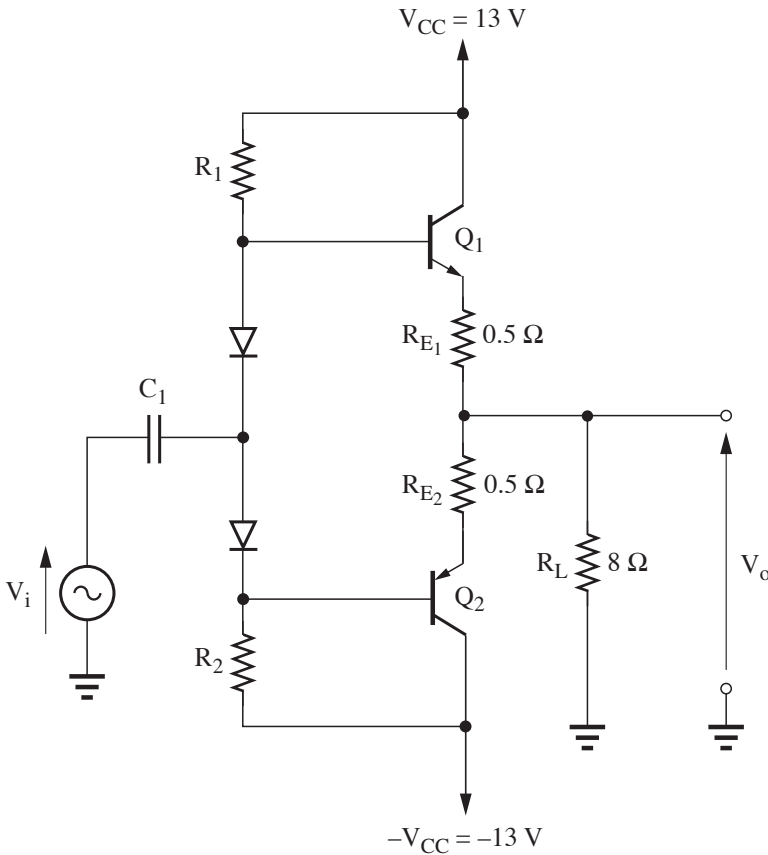
א. חשב את נקודת העבודה של הטרנזיסטור Q_1 (V_{DS} , I_D) ואת המתח V_{GS} .

ב. סרטט מעגל תמורה לאות חילופין של המעגל הנתון.

ג. חשב את הגבר המתח $\frac{V_o}{V_i}$.

שאלה 2

באיור לשאלה 2 מתואר המעגל החשמלי של מגבר הספק. נתון: $V_{CE1(SAT)} = V_{EC2(SAT)} = 1 \text{ V}$.



איור לשאלה 2

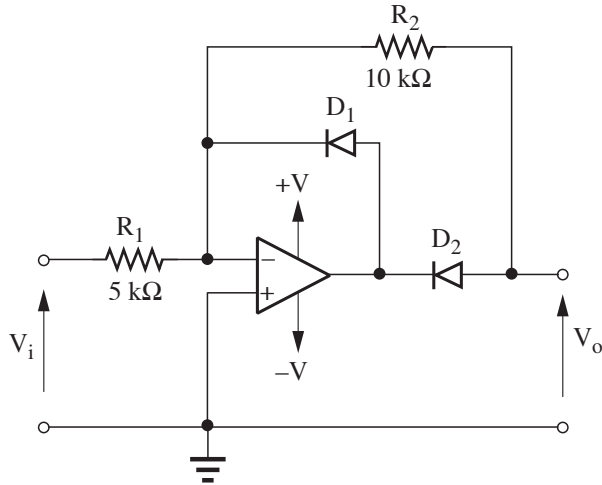
א. חשב את ההספק היעיל המרבי על העומס R_L .

ב. חשב את נצילות המעגל כאשר ההספק היעיל על העומס R_L הוא מרבי.

ג. הסבר את תפקיד הדיודות ואת תפקיד הנגדים R_1 ו- R_2 במעגל הזה.

שאלה 3

באיור לשאלה 3 נתון מעגל חשמלי. מגבר השרת והדיודות שבמעגל – אידיאליים.



איור לשאלה 3

א. ציין את המצב (ON/OFF) של כל אחת מן הדיודות D_1 ו- D_2 , כאשר:

1. $V_i > 0$

2. $V_i < 0$

ב. חשב את היחס $\frac{V_o}{V_i}$, כאשר:

1. $V_i > 0$

2. $V_i < 0$

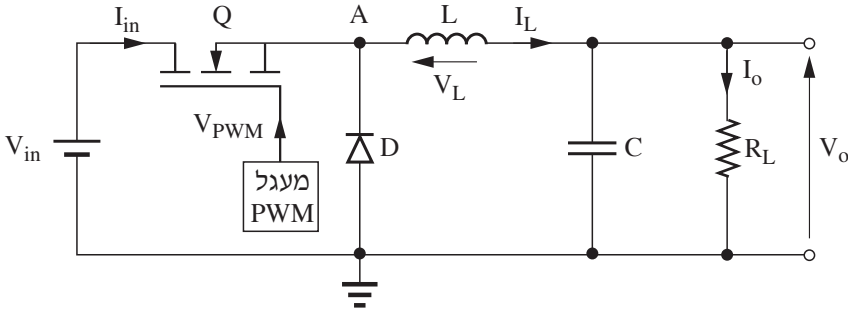
ג. 1. ציין את ייעודו של המעגל הזה.

2. נתון: $V_i = 2 \sin(2\pi 1000 t)$.

סרטט, זו מתחת לזו בהתאמה, את צורת הגל של מתח המבוא V_i ואת צורת הגל של מתח המוצא V_o , כפונקציה של הזמן.

שאלה 4

באיור א' לשאלה 4 נתון המעגל החשמלי של ממיר ממותג מסוג BUCK (step down). הדיודה וה-MOSFET אידיאליים (ה-MOSFET מהווה קצר בזמן t_{on}).

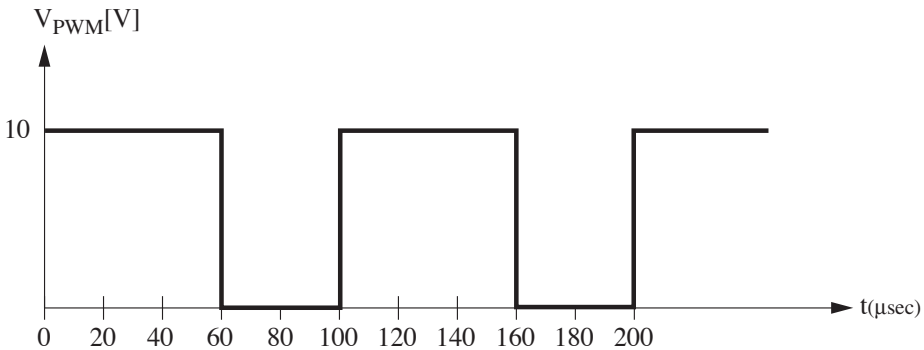


איור א' לשאלה 4

נתוני המעגל הם:

$$\Delta I_L = 0.1 I_o \quad ; \quad V_o = 9 \text{ V} \quad ; \quad R_L = 90 \Omega$$

באיור ב' לשאלה 4 מתואר המתח במוצא של מעגל ה-PWM, כפונקציה של הזמן.



איור ב' לשאלה 4

א. חשב את מתח המבוא, V_{in} .

ב. חשב את השראות הסליל, L .

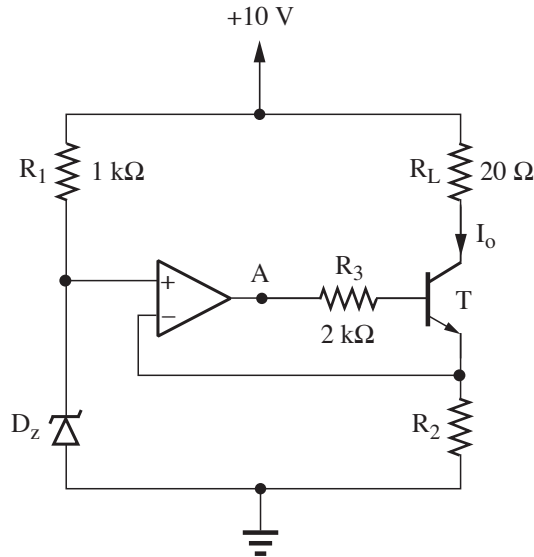
ג. העתק למחברתך את צורת הגל של המתח במוצא מעגל ה-PWM, וסרטט זו מתחת לזו בהתאמה (כולל ערכים), את צורת הגל של המתח V_A (המתח בנקודה A), את צורת הגל של המתח V_L (המתח על הסליל L), ואת צורת הגל של הזרם I_L (הזרם בסליל), כפונקציה של הזמן.

המשך בעמוד 6

שאלה 5

באיור לשאלה 5 נתון מעגל חשמלי המשמש כמקור זרם I_0 . מגבר השרת שבמעגל – אידיאלי.

נתוני המעגל: $V_z = 4\text{ V}$; $\beta = 100$; $V_{BE} = 0.7\text{ V}$; $I_0 = 100\text{ mA}$.



איור לשאלה 5

- א. חשב את התנגדותו של הנגד R_2 .
- ב. חשב את המתח בנקודה A.
- ג. חשב את התנגדותו המרבית של הנגד R_L , אם בנוסף לנתוני המעגל נדרש גם $V_{CE} \geq 1\text{ V}$.

פרק שני: שפה עילית

שאלה 6

לפניך תכנית הכתובה בשפת C :

```
1.  #include <stdio.h>
2.  void main (void)
3.  {
4.      int arr[10] = {12,2,35,15,99,33,3,17,55,1};
5.      int i,j,tmp;
6.      for(i=0;i<10;i++)
7.      {
8.          for(j=1;j<(10-i);j++)
9.          {
10.             if(arr[j-1]>arr[j])
11.             {
12.                 tmp=arr[j-1];
13.                 arr[j-1]=arr[j];
14.                 arr[j]=tmp;
15.             }
16.         }
17.     }
18.     for(i=0;i<10;i++) printf("%d",arr[i]);
19. }
```

א. הסבר כל אחת מן ההוראות שבשורות 4, 6, 13, 18.

ב. הסבר מה התכנית הנתונה מבצעת, ורשום את פלט התכנית.

ג. מחליפים את התנאי שבשורה 10 בתנאי הזה:

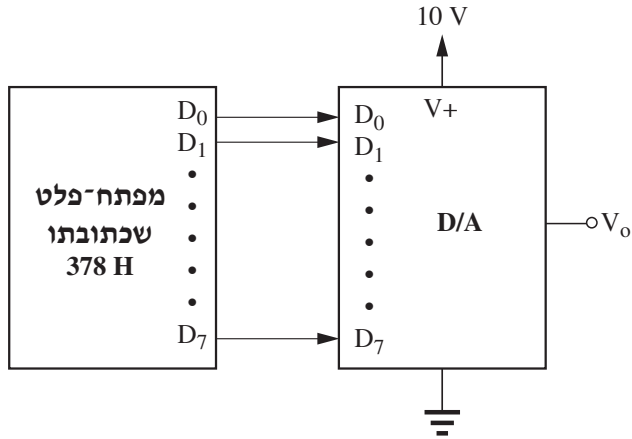
```
10.         if(arr[j-1]<arr[j])
```

מה יהיה פלט התכנית לאחר החלפת התנאי?

המשך בעמוד 8

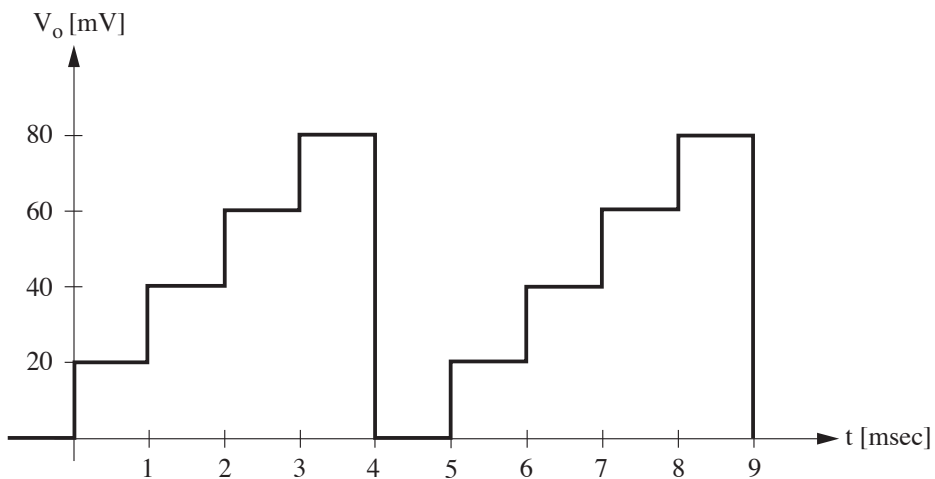
שאלה 7

באיור א' לשאלה 7 מתואר חיבור עקרוני בין מפתח-מחשב ובין ממיר אות ספרתי לתקבילי (D/A).



איור א' לשאלה 7

כאשר הצירוף $00_{(H)}$ מתקבל במבוא של ממיר ה-D/A – הממיר מפיק מתח מוצא של 0 V.
 כאשר הצירוף $01_{(H)}$ מתקבל במבוא של ממיר ה-D/A – הממיר מפיק מתח מוצא של 20 mV.
 כתוב תכנית מחשב בשפת C שתיצור במוצא הממיר את האות התקבילי המחזורי המתואר באיור ב' לשאלה.



איור ב' לשאלה 7

המשך בעמוד 9

שאלה 8

לפניך תוכנית בשפת C:

```
1.  #include <stdio.h>
2.  void MyFunction ( int *pa, int *pb )
3.  {
4.      *pb=*pa%10;
5.      *pa=*pa/10;
6.  }
7.  void main (void)
8.  {
9.      int a=82,b=0;
10.     printf ("a=%d b=%d",a,b);
11.     MyFunction (&a,&b);
12.     printf ("a=%d b=%d",a,b);
13. }
```

- א. הסבר כל אחת מן ההוראות שבשורות 4, 9, 10, 11.
- ב. הסבר מה התכנית הנתונה מבצעת, ורשום את פלט התכנית.
- ג. שנה את התכנית, כך שהיא תחייב את המשתמש להקליד ערך הקטן מ-99 כדי להציבו במשתנה a, כתנאי לביצוע הפונקציה MyFunction.

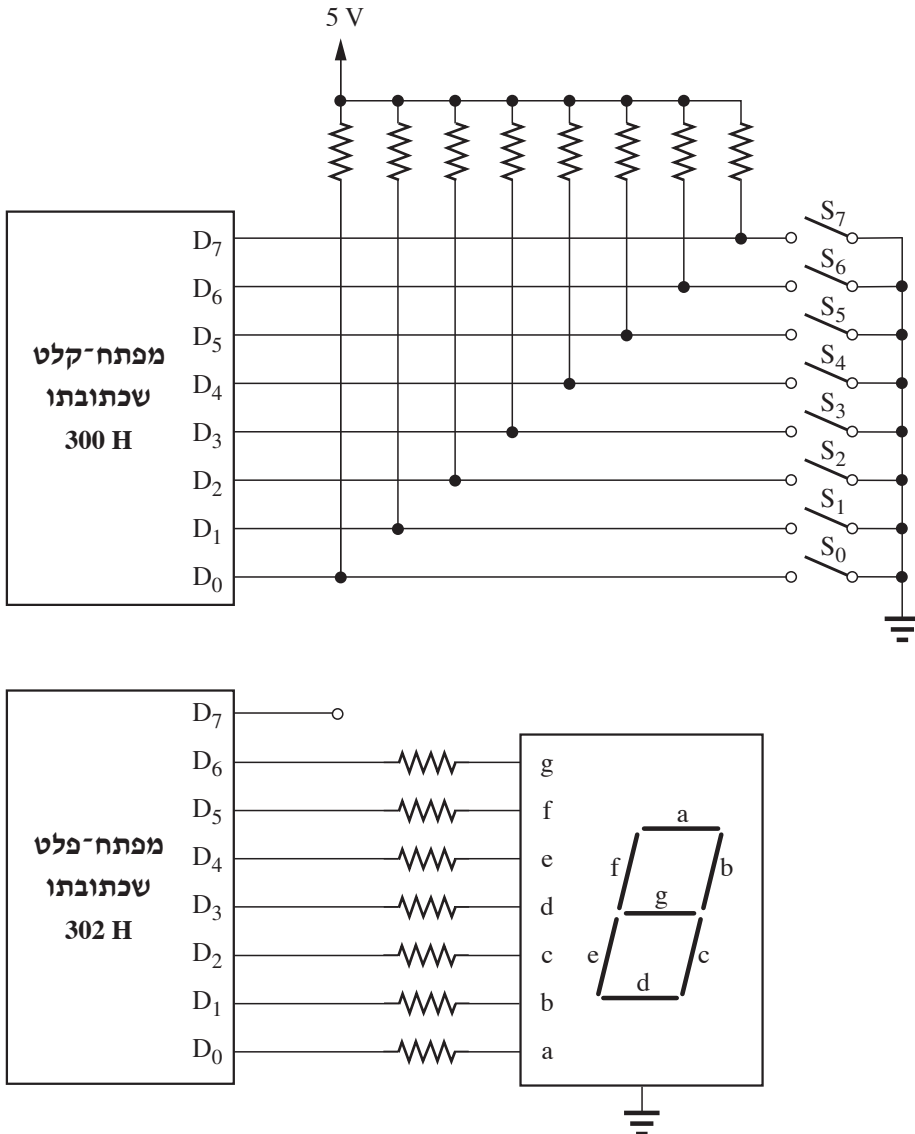
שאלה 9

כתוב תכנית בשפת C, שתבצע את הפעולות האלה:

1. תגדיר מערך הכולל עשרה איברים שלמים.
2. תקלוט מהמקלדת עשרה נתונים ותציב אותם לתוך איברי המערך.
3. תמנה את מספר האיברים במערך הגדולים מ-10 וקטנים מ-50.
4. תדפיס את תוצאות המנייה שהתקבלה בפעולה 3.

שאלה 10

באיור לשאלה 10 נתונים מפתח-קלט שכתובתו 300 H ומפתח-פלט שכתובתו 302 H , המחובר לתצוגת 7-SEG .



איור לשאלה 10

כתוב תכנית בשפת C, שתבצע את המשימות האלה:

1. תקלוט את ערכו של כל אחד מן המתגים $S_0 - S_7$.
 2. תבדוק האם מצב המתגים המחוברים לסיביות D_0 ו- D_1 זהה, בהתאמה, למצב המתגים המחוברים לסיביות D_6 ו- D_7 .
- אם כן – התכנית תציג את הספרה 1 בתצוגת ה-7-SEG.
- אם לא – התכנית תציג את הספרה 0 בתצוגת ה-7-SEG.

בהצלחה!

זכות היוצרים שמורה למדינת ישראל.
אין להעתיק או לפרסם אלא ברשות משרד החינוך.

אין להעביר את הנוסחאון
לנבחן אחר

מקום לנכתוב נבחן

נוסחאון באלקטרוניקה תקבילית ב' לכיתה י"ד

(12 עמודים)

דיודת צומת

משוואת זרם-מתח של דיודת מעשית:

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1 \right)$$

זרם הדיודת — I_D [A]

זרם זליגה אחורי — I_S [A]

מתח הדיודת — V_D [V]

מתח התלוי בטמפרטורה — V_T [V]

מקדם — $\eta = \begin{cases} 1 & \text{גרמניום} \\ 2 & \text{סיליקון} \end{cases}$

$$V_D = \eta V_T \ln \left(\frac{I_D}{I_S} + 1 \right)$$

טרנזיסטור דו-נושאי (בתחום הפעיל)

זרם קולט — I_C [A]

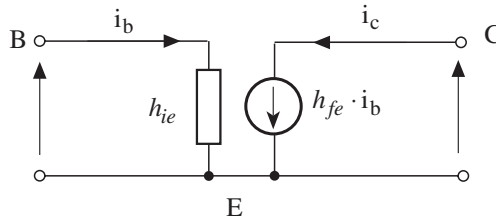
זרם פולט — I_E [A]

זרם בסיס — I_B [A]

$$I_C = \beta I_B, I_E = (\beta + 1) I_B, I_E = I_C + I_B$$

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} = \frac{\beta}{\beta + 1}, \quad \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

תרשים תמורה מקורב מסוג h של טרנזיסטור דו-נושאי



טרנזיסטור FET (איזור הרוויה)

- זרם אפיק — I_D [A]
 המתח בין השער למקור — V_{gs} [V]
 מתח צביטה — V_p [V]
 זרם האפיק עבור $V_{gs} = 0$ — I_{DSS} [A]

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{gs}}{V_p} \right)^2$$

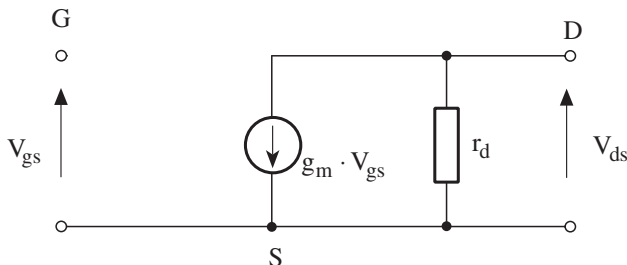
- מוליכות הדדית — $g_m \left[\frac{1}{\Omega} \right]$

$$g_m = \frac{2I_{DSS}}{|V_p|} \left(1 - \frac{V_{gs}}{V_p} \right)$$

- מוליכות הדדית עבור $V_{gs} = 0$ — $g_{m0} \left[\frac{1}{\Omega} \right]$

$$g_{m0} = \frac{2I_{DSS}}{|V_p|}$$

תרשים תמורה מקורב של FET



טרנזיסטור MOSFET (איזור הרוויה)

עבור טרנזיסטור מסוג N-CHANNEL :

מתח צביטה — V_T [V]

מקדם — $k \left[\frac{\text{mA}}{\text{V}^2} \right]$

$$I_D = k(V_{GS} - V_T)^2$$

תנאי הרוויה:

$$V_{GS} > V_T$$

$$V_{DS} > V_{GS} - V_T$$

הערה: מעגל התמורה לאות חילופין של טרנזיסטור MOSFET זהה לזה של טרנזיסטור FET .

מגברי הספק

מאזן הספקים

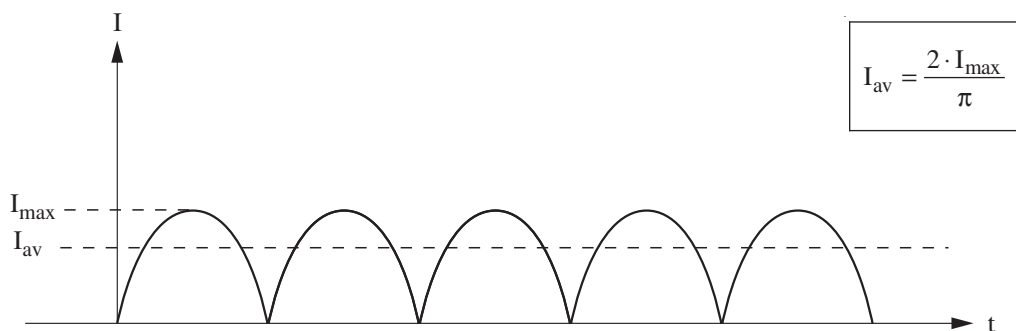
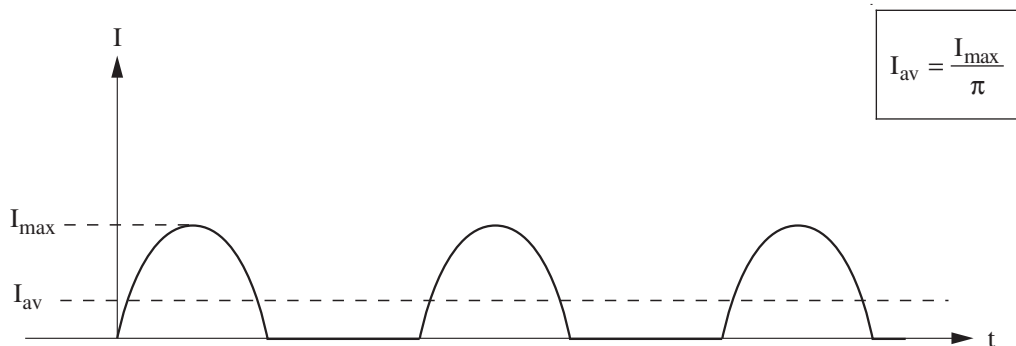
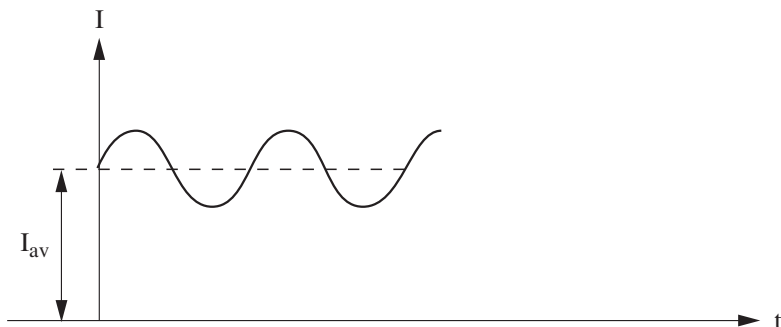
הספק מבוא	—	P_I	[W]
הספק נצרך מספק הכוח	—	P_{CC}	[W]
הספק העומס	—	P_L	[W]
הספק מבוזבז	—	P_{diss}	[W]
הספק המתפתח על העומס הנובע מאות חילופין	—	P_{LAC}	[W]
המתח היעיל על העומס	—	V_{Leff}	[V]
הזרם היעיל על העומס	—	I_{Leff}	[A]
נגד העומס	—	R_L	[Ω]
המתח הסינוסי המרבי על העומס	—	V_{Lmax}	[V]
הזרם הסינוסי המרבי דרך העומס	—	I_{Lmax}	[A]
הזרם הממוצע (DC) המסופק על-ידי ספק-הכוח	—	I_{av}	[A]

$$P_I + P_{CC} = P_L + P_{diss}$$

$$P_{LAC} = V_{Leff} \cdot I_{Leff} = \frac{V_{Leff}^2}{R_L} = I_{Leff}^2 \cdot R_L$$

$$V_{Leff} = \frac{V_{Lmax}}{\sqrt{2}} \quad , \quad I_{Leff} = \frac{I_{Lmax}}{\sqrt{2}}$$

$$P_{CC} = V_{CC} \cdot I_{av}$$



מגברי הפרש

$$V_o = A_1 \cdot V_1 + A_2 \cdot V_2$$

$$A_1 = \frac{V_o}{V_1} \Big|_{V_2 = 0}$$

מתח מבוא — V_1 [V]

$$A_2 = \frac{V_o}{V_2} \Big|_{V_1 = 0}$$

מתח מבוא — V_2 [V]

$$A_d = \frac{A_1 - A_2}{2}$$

הגבר הפרשי — A_d

$$A_c = A_1 + A_2$$

הגבר האות המשותף — A_c

$$CMRR = \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$$

יחס דחיית האות המשותף — CMRR

$$V_o = A_d \cdot V_d + A_c \cdot V_c$$

הפרש מתחי המבוא — V_d [V]

$$V_d = V_1 - V_2$$

ממוצע הסכום של
מתחי המבוא — V_c [V]

$$V_c = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

$$A_d = \frac{V_o}{V_d} \Big|_{V_c = 0} = \frac{V_o}{2V_i}$$

$$A_c = \frac{V_o}{V_c} \Big|_{V_d = 0} = \frac{V_o}{V_i}$$

ממירים ממותגים

א. ממירים

מתח מוצא	—	V_o	[V]	$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}$	
מתח מבוא	—	V_{in}	[V]	$V_o = D V_{in}$	ממיר STEPDOWN (BUCK) :(ללא הפסדים)
הספק במוצא	—	P_o	[W]		
הספק במבוא	—	P_{in}	[W]	$V_o = \frac{V_{in}}{1 - D}$	ממיר STEP UP (BOOST) :(ללא הפסדים)
נצילות	—	η		$P_o = \eta P_{in}$	
מחזור פעולה (Duty Cycle)	—	D			

ב. משוואת מתח-זרם של הסליל

מתח על-פני הסליל	—	V_L	[V]	
השראות הסליל	—	L	[H]	$V_L = L \frac{\Delta I_L}{\Delta T}$
השינוי בזרם הסליל	—	ΔI_L	[A]	
השינוי בזמן	—	ΔT	[sec]	

ג. משוואת מתח-זרם של הקבל

זרם הקבל	—	I_C	[A]	
קיבול	—	C	[F]	$I_C = C \frac{\Delta V_C}{\Delta T}$
השינוי במתח על-פני הקבל	—	ΔV_C	[V]	

ד. מתח האדווה בממיר STEP DOWN

מתח אדווה	—	ΔV	[V]	
תדר המיתוג	—	f	[Hz]	$\Delta V = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot f \cdot C} = \frac{V_{in} \cdot D \cdot (1 - D)}{8 \cdot L \cdot C \cdot f^2}$

ה. מתח האדווה בממיר STEP UP

זרם דרך נגד העומס	—	I_o	[A]	$\Delta V = \frac{I_o \cdot D}{f \cdot C}$
-------------------	---	-------	-----	--

היענות התדר של מגבר טרנזיסטורי

בתחום התדרים הנמוכים:

קבלי העקיפה והצימוד קובעים את תדר חצי ההספק התחתון.

חישוב מקורב של תדר חצי ההספק התחתון : f_L

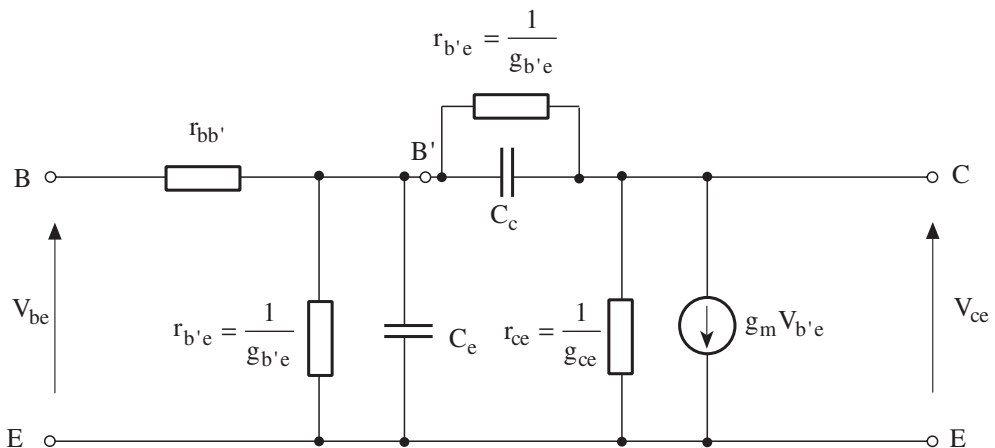
$$f_L \approx \sqrt{f_{L1}^2 + f_{L2}^2 + f_{L3}^2 \dots}$$

$$f_{Li} = \frac{1}{2\pi \cdot R_{eq} \cdot C_i} \quad \text{כאשר:}$$

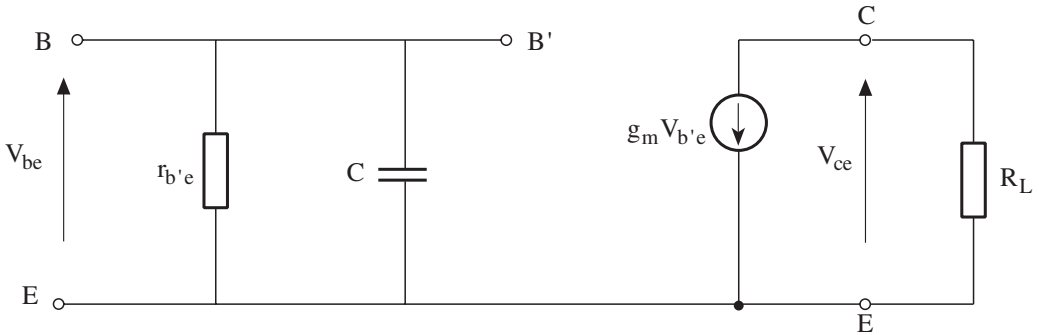
R_{eq} – ההתנגדות ש"רואה" הקבל C_i כאשר שאר הקבלים מקוצרים (וגם מתח הכניסה מקוצר)

בתחום התדרים הגבוהים:

תרשים תמורה מסוג π היברידי לחיבור פולט משותף בתדר גבוה



תרשים תמורה מקורב מסוג π היברידי עם נגד עומס R_L לחיבור פולט
משותף בתדר גבוה



מוליכות ההעברה של
הטרנזיסטור — $g_m \left[\frac{1}{\Omega} \right]$

$$C = C_e + C_c (1 + g_m R_L)$$

התדר בו הגבר זרם הקצר
בתצורת פולט משותף
מגיע ל-1 — f_T [Hz]

$$g_m = \frac{I_c \text{ (mA)}}{26}$$

הגבר הזרם — A_i

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi (C_e + C_c)} \cong \frac{g_m}{2\pi C_e}$$

ערכו המעשי של רוחב הפס
של β במגבר — f_β [Hz]

$$A_i = \frac{-h_{fe}}{1 + j h_{fe} \left(\frac{f}{f_T} \right)}$$

תדר גבולי עליון של
הטרנזיסטור — f_H [Hz]

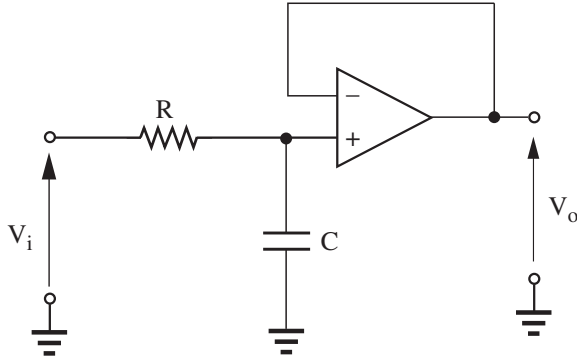
$$f_\beta = \frac{g_m}{h_{fe} \cdot 2\pi (C_e + C_c)} = \frac{g_{b'e}}{2\pi (C_e + C_c)}$$

ההתנגדות ש"רואה" הקבל
C לפי תבנית. — R_{eq} [Ω]

$$f_H = \frac{1}{2\pi \cdot R_{eq} \cdot C}$$

מסננים פעילים

א. מסנן מעביר נמוכים מסדר I



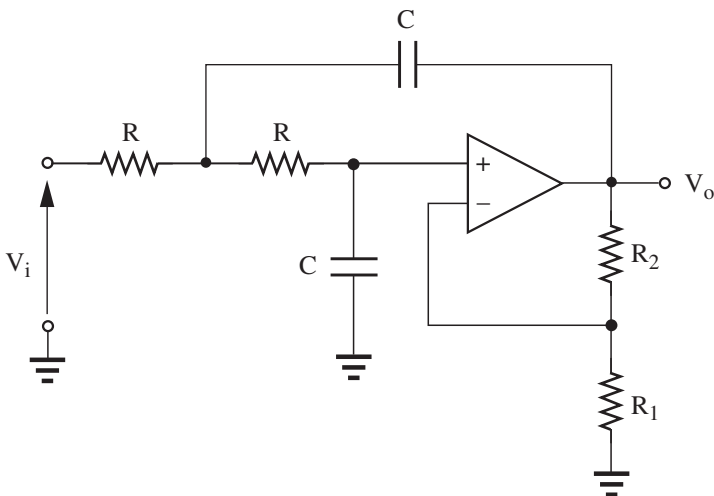
פונקציית תמסורת — $A_v(s)$

$$A_v(s) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 + RC \cdot s}$$

תדר קטעון (תדר 3 dB) — $\omega_c \left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$

$$\omega_c = \frac{1}{RC}$$

ב. מסנן מעביר נמוכים מסדר II מסוג (Sallen and Key) VCVS



הגבר בתחום המעבר
(עבור $\omega = 0$) A_{v_o} —

$$A_v(s) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{A_{v_o} \cdot \left(\frac{1}{RC}\right)^2}{s^2 + \left(\frac{3 - A_{v_o}}{RC}\right) \cdot s + \left(\frac{1}{RC}\right)^2}$$

$$\omega_c = \frac{1}{RC}$$

$$A_{v_o} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$A_v(s) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{A_{v_o}}{s^2 + (3 - A_{v_o}) \cdot s + 1}$$

עבור $\omega_c = 1 \frac{\text{rad}}{\text{sec}}$ מתקבלת פונקציה מנורמלת:

הערה: עבור מסנן מעביר גבוהים (HPF), יש להחליף במעגלים שבעמוד הקודם את המיקום בין נגדי R לקבלי C.

טבלת רבי האיברים המנורמלים (של המכנה) לפי באטרוורת' (Butterworth)

הגורמים של רב-האיברים	n
$(s + 1)$	1
$(s^2 + 1.414 s + 1)$	2
$(s + 1)(s^2 + s + 1)$	3
$(s^2 + 0.765 s + 1)(s^2 + 1.848 s + 1)$	4
$(s + 1)(s^2 + 0.618 s + 1)(s^2 + 1.618 s + 1)$	5
$(s^2 + 0.518 s + 1)(s^2 + 1.414 s + 1)(s^2 + 1.932 s + 1)$	6
$(s + 1)(s^2 + 0.445 s + 1)(s^2 + 1.247 s + 1)(s^2 + 1.802 s + 1)$	7
$(s^2 + 0.390 s + 1)(s^2 + 1.111 s + 1)(s^2 + 1.663 s + 1)(s^2 + 1.962 s + 1)$	8

n — סדר המסנן

מתנדים סינוסואידליים לתדר נמוך

קריטריון ברקהאוזן לקיום תנודות:

1. תנאי התנופה: $|\beta \cdot A| \geq 1$ — A הגבר בחוג פתוח
2. תנאי המופע: $\angle \beta \cdot A = 0$ — β מקדם המשוב

מתנד גשר ווין

- f [Hz] — תדר התנודות
- R [Ω] — ערכו של כל אחד מהנגדים ברשת המשוב β
- C [F] — ערכו של כל אחד מהקבלים ברשת המשוב β
- R_f [Ω] — נגד המשוב ברשת המשוב השלילי
- R_l [Ω] — נגד ברשת המשוב השלילי

$$f = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$\frac{R_f}{R_l} \geq 2$$

תדר התנודות ברשת משוב LC

- L [H] — השראות
- C [F] — קיבול

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

משוב שלילי

- A_f — הגבר בחוג סגור
- A — הגבר בחוג פתוח
- β — מקדם המשוב

$$A_f = \frac{A}{1 + A\beta}$$

בהצלחה!