נוסחאון מה״ט לבחינה

תורת החשמל ואלקטרוניקה

97100

לטכנאי והנדסאי אלקטרוניקה

מגמות הנדסת אלקטרוניקה

מקצועות:
תורת החשמל - 3959
מבוא לאלקטרוניקה - 3958

מספר בחינה	מהדורה מספר	תאריך
97100	5	01/25

נוסחאון תורת החשמל ואלקטרוניקה למבחן 97100

ראשי פרקים

תורת החשמל **עמוד**

1. ערכים פיזיקליים - סימונים ויחידות Physical Variables 3
2. אלקטרוסטטיקה – Electrostatics 6
3. יחסים בסיסיים במעגל חשמלי 7
4. משפטים בתורת החשמל – Theorems in Electricity 13
5. ערכים בסיסיים בזרם חילופין – Alternating Current 16
6. זרם חילופין סינוסוידלי – (AC) Alternating Current 17
7. מעגלי תהודה – Resonant Circuits 21
8. גלים מחזוריים לא סינוסוידליים 23
9. שונות 26

מבוא לאלקטרוניקה

10. צורות גל במעגלים ספרתיים ואנלוגיים 27
11. מעגלי RC ו- RL – תגובה לאות DC 29
12. דיודה – Diode 30
13. דיודת זנר – Zener Diode 37
14. טרנזיסטור ביפולרי – (BJT) Bipolar Transistor 39
15. טרנזיסטור MOSFET 42
16. מתמטיקה 47

1. ערכים פיזיקליים - סימונים ויחידות Physical Variables

מס	כינוי	סימון	יחידות במערכת SI	יחידות במערכת SI - עברית
1	מרחק, רדיוס, אורך	l, r, d	m	מטר
2	זווית	φ, α	rad	רדיאן, מעלה
3	שטח חתך, שטח	S, A	m^2	מטר מרובע
4	זרם חשמלי	I, i	A	אמפר
5	צפיפות זרם חשמלי	J	$\frac{A}{m^2}, \frac{A}{mm^2}$	אמפר למטר מרובע או לממ״ר
6	מטען חשמלי	Q	C	קולון
7	פוטנציאל חשמלי	V	V	וולט
8	מתח, כוח אלקטרומניע	E,V,U	V	וולט
9	הספק פעיל	P	W	ווט
10	הספק מדומה	S	VA	וולט-אמפר
11	הספק היגבי	Q	VAR	וולט-אמפר ראקטיבי
12	עבודה, אנרגיה	W	J, Wh	ווט שעה, גאול
13	התנגדות	R, r	Ω	אוהם
14	היגב	X, x	Ω	אוהם
15	עכבה	Z, z	Ω	אוהם
16	מוליכות	G, g	S, mho	מוא, סימנס
17	מוליכות הגבית - מניחות	b	S, mho	מוא, סימנס
18	מתירות	Y, y	S, mho	מוא, סימנס
19	טמפרטורה	T	$°K, °C$	מעלות קלוין, צלזיוס
20	זמן	t	sec	שנייה
21	זמן מחזור	T	sec	שנייה
22	תדירות	f	Hz	הרץ

מס	כינוי	סימון	יחידות במערכת SI	יחידות במערכת SI - עברית
23	תדירות זוויתית	ω	rad/sec	רדיאן לשנייה
24	כוח	F	N	ניוטון
25	מומנט	M	Nm	ניוטון מטר
26	קיבול	C	F	פארד
27	עוצמת שדה חשמלי	E	V/m	וולט למטר
28	קבוע דיאלקטרי	ε	F/m	פארד למטר
29	עוצמת שדה מגנטי	H	$AT/m ; A/m$	אמפר כריכות למטר ; אמפר למטר
30	מספר כריכות	N	T	כריכות
31	כוח מגנטומניע (כמ"מ)	IN	AT ; A	אמפר כריכות ; אמפר
32	שטף מגנטי	Φ	Wb	וובר
33	השראה מגנטית (צפיפות שטף מגנטי)	B	$T , \frac{Wb}{m^2}$	טסלה (וובר למטר מרובע)
34	מיאון, התנגדות מגנטית	R_m	$\frac{1}{H}$	אחד חלקי הנרי
35	השראות עצמית	L	H	הנרי
36	השראות הדדית	M	H	הנרי
37	חדירות מגנטית	μ	H/m	הנרי למטר
38	מתח מגנטי	$H \cdot l, U_m$	A, AT	אמפרכריכות, אמפר

נוסחאון תורת החשמל ואלקטרוניקה למבחן 97100

כופלי יחידות

כינוי		סימון	ערך
עברית	אנגלית		
מגה	Mega	M	10^6
קילו	kilo	k	10^3
סנטי	centi	c	10^{-2}
מילי	milli	m	10^{-3}
מיקרו	micro	μ	10^{-6}
ננו	nano	n	10^{-9}
פיקו	pico	p	10^{-12}

דוגמאות:

$$1\mu F = 10^{-6}\ F \qquad 1kg = 1000\ gr$$
$$1mm = 10^{-3}\ m \qquad 1MW = 10^{6}\ W$$

תוצאות מספריות רושמים עד שלוש ספרות משמעותיות (ללא התייחסות למקום הנקודה העשרונית) ובתוספת סימן הכופל (אם יש צורך בכך) ויחידות המציינות את הגודל הפיזיקלי, לדוגמא:

תוצאות המתקבלות ע"י חישוב: I= 342.3779 A

תשובה: I=342 A

או בצורה: I=0.342 kA

קבועים פיזיקליים - Physical Constants

תאור	סימון	יחידות	ערך
מטען אלקטרון	e, q	C	$1.602\cdot10^{-19}$
מסת מנוחה של אלקטרון	m_e	kg	$9.1066\cdot10^{-31}$
חדירות מגנטית של חלל ריק	μ_0	H/m	$\mu_0 = 4\pi\cdot10^{-7} = 12.56\cdot10^{-7}$
קבוע דיאלקטרי של חלל ריק	ε_0	F/m	$\varepsilon_0 = \frac{1}{36}\cdot10^{-9} = 8.85\cdot10^{-12}$

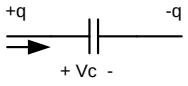
יחידות אורך:

$$1inch = 2.54\,cm \quad , 1cm = 0.3937\,inch$$
$$1\ feet = 0.3048\,m \ , \ 1m = 3.28\ ft$$

המרת טמפרטורה:

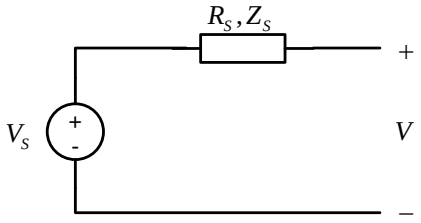
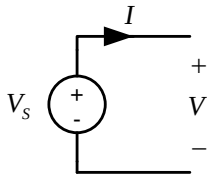
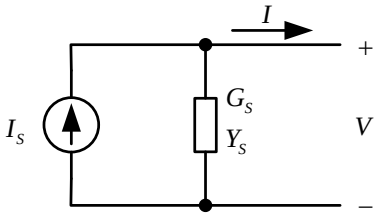
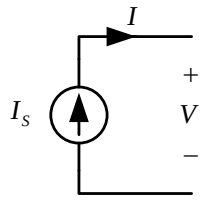
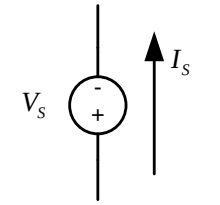
$$T[°K] = T[°C] + 273.15$$
$$T[°F] = \frac{9}{5}\cdot T[°C] + +32$$
$$T[°C] = \frac{5}{9}\cdot\left(T[°F] - 32\right)$$

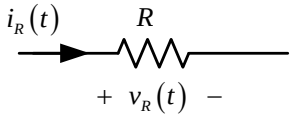
2. אלקטרוסטטיקה - Electrostatics

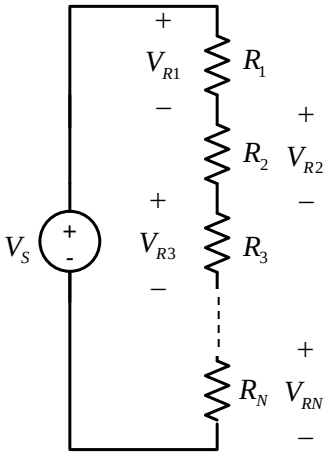
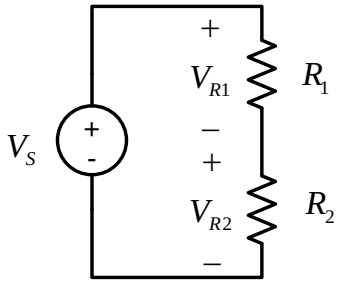
תיאור	יחידות	נוסחה
עוצמת שדה חשמלי (Intensity of Electric Field) E	$\frac{V}{m},\frac{N}{C}$	$E=\frac{F}{q}$
עוצמת שדה חשמלי של מטען נקודתי:	$\frac{V}{m},\frac{N}{C}$	$E(r)=\frac{q}{4\pi\cdot\varepsilon\cdot r^2}$
חוק קולון - Coulomb		
כוח חשמלי בין שני מטענים:	N	$F(r)=\frac{q_1\cdot q_2}{4\cdot\pi\cdot\varepsilon_0\cdot r^2}$
F שלילי - פירושו כוח משיכה		
F חיובי - פירושו כוח דחיה		
r - מרחק בין שני מטענים q_1 ו- q_2	m	
פוטנציאל של מטען נקודתי:	V	$V(r)=\frac{q}{4\cdot\pi\cdot\varepsilon\cdot r},V(\infty)=0$
עבודה בשדה חשמלי:	J	$W=q\cdot(V_a-V_b)=q\cdot V_{ab}$
קיבוליות, (קבל טהור)		
הגדרת קיבול:		
	F	$C=\frac{q}{V_c}$
קיבול של קבל לוחות:	F	$C=\frac{\varepsilon\cdot A}{d}$
A - שטח הלוחות	m^2	
d - המרחק בין הלוחות	m	
עוצמת שדה חשמלי בין לוחות קבל:	$\frac{V}{m}$	$E=\frac{V}{d}$
מקדם דיאלקטרי של חומר (Dielectric constant):	$\frac{F}{m}$	$\varepsilon=\varepsilon_0\cdot\varepsilon_r$
קיבול של קבל כדורי חלול:	F	$C=4\cdot\pi\cdot\varepsilon\cdot\left(\frac{R\cdot r}{R-r}\right)$
R - רדיוס חיצוני	m	
r - רדיוס פנימי	m	
קיבול של קבל גלילי:	F	$C=\frac{2\cdot\pi\cdot\varepsilon\cdot l}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)}$
l - אורך הגליל	m	
אנרגיה האגורה בקבל:	J	$W_C=\frac{1}{2}\cdot C\cdot V^2=\frac{Q^2}{2\cdot C}=\frac{1}{2}\cdot Q\cdot V$
אנרגיה האגורה בסליל:	J	$W_L=\frac{1}{2}\cdot L\cdot I_L^{\,2}$

3. יחסים בסיסיים במעגל חשמלי

חוק אוהם, מקור מתח ומקור זרם – Ohms Law, Voltage & Current Sources

חוק אוהם	
זרם ישר (בזרם חילופין המתח וזרם הם וקטורים):	$V = I \cdot Z \qquad V = I \cdot R$
מקור מתח Voltage Source:	$V = V_S - I \cdot Z_S \qquad V = V_S - I \cdot R_S$
	
מקור מתח Voltage Source אידיאלי:	
	במקור מתח אידיאלי מתקיים: $V = V_S$ ללא תלות בגודלו של זרם I. (אין נגד בטור למקור).
R_o, Z_o - התנגדות/עכבה פנימית של מקור מתח.	
מקור זרם – Current Source:	$I = I_S - V \cdot Y_S \qquad I = I_S - V \cdot G_S$
	Y_S, G_S - מוליכות/מתירות פנימית של מקור זרם.
מקור זרם Current Source אידיאלי	
	במקור זרם אידיאלי מתקיים: $I = I_S$ ללא תלות בגודלו של מתח V (אין נגד במקביל למקור). $P = V \cdot I_S$
הפיכת מקור מתח למקור זרם (ולהיפך):	$I_S = \frac{V_S}{R_S} \;\; ; \;\; G_o = \frac{1}{R_o}$
הספק של מקור מתח	
	$P = V_S \cdot I$ אם הזרם נכנס להדק (+) של המקור אזי המקור בטעינה (כמו בשרטוט). אם הזרם יוצא מהדק (+) של המקור אזי המקור בפריקה.

התנגדות חשמלית Resistance		
חוק אוהם:	V	$V = I \cdot R$
		
ערך רגעי של זרם חילופין:		$V_R(t) = R \cdot i_R(t)$
חישוב הספק המתפתח על הדקי הנגד:		$P_R = V_R \cdot I_R \ , p_R(t) = v_R(t) \cdot i_R(t)$
הספק בזרם ישר:		$P = I^2 \cdot R = \frac{V^2}{R}$
הספק בזרם חילופין:		$P_R = I_{R(RMS)}{}^2 \cdot R = \frac{V_{R(RMS)}{}^2}{R}$
חישוב אנרגיה (עבודה) בנגד:		$W_R(t) = p_R(t) \cdot t$ $W_R(t) = P \cdot t \ \ (constant \ \ power)$
כמות חום:		$Q = m \cdot c \cdot \Delta T = 0.24 \cdot P \cdot t \cdot \eta = 0.24 \cdot R \cdot I^2 \cdot t \cdot \eta$
Q - כמות חום	cal	
M - מסה	kg	
ΔT - הפרש טמפרטורות	$°C$	
חישוב התנגדות כתלות במימדים הגיאומטריים ובחומר: ρ - התנגדות סגולית, ($\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$) A – שטח חתך (mm^2) l – אורך המוליך (m)		$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$
חישוב התנגדות בתלות בטמפרטורה: α_T - מקדם טמפרטורה (נמדד ב- $\frac{1}{°C}$) T_1 – טמפרטורה התחלתית T_2 – טמפרטורה סופית		$R_{T2} = R_{T1} \cdot \left[1 + \alpha_T \cdot (T_2 - T_1)\right]$
צפיפות הזרם:		$j(t) = \frac{i(t)}{A} \ ; \ J = \frac{I}{A}$
<u>חיבור רכיבים , ערכים שקולים</u>		
א. חיבור בטור – Series Connection		
נגדים בטור:		$R_{eq} = R_1 + R_2 + ... + R_n$
עכבות בטור (העכבות הן וקטורים):		$Z_{eq} = Z_1 + Z_2 + ... + Z_n$

חיבור נגדים בטור (כלל מחלק מתח):	
	$V_{R1} = V_S \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3 + ... + R_N}$ $V_{R2} = V_S \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3 + ... + R_N}$ $V_{R3} = V_S \cdot \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3 + ... + R_N}$ $V_{Ri} = V_S \cdot \frac{R_i}{R_1 + R_2 + R_3 + ... + R_N}$
שני נגדים בטור (כלל מחלק מתח):	
	$V_{R1} = V_S \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$ $V_{R2} = V_S \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$
סלילים בטור:	$L_{eq} = L_1 + L_2 + ... + L_n$
קבלים בטור:	$C_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + ... + \frac{1}{C_n}}$
שני קבלים בטור:	$C_{eq} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$
n קבלים שווים בטור:	$C_{eq} = \frac{C}{n}$
ב. חיבור במקביל – Parallel Connection	
n נגדים שווים במקביל:	$R_{eq} = \frac{R}{n}$
מוליכות:	$G = \frac{1}{R}[mho]$
מוליכויות (של נגדים במקביל):	$G_{eq} = G_1 + G_2 + ... + G_n$
נגדים במקביל:	$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + ... + \frac{1}{R_n}}$
עכבות מרוכבות (העכבות הן וקטורים):	$Z_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + ... + \frac{1}{Z_n}}$

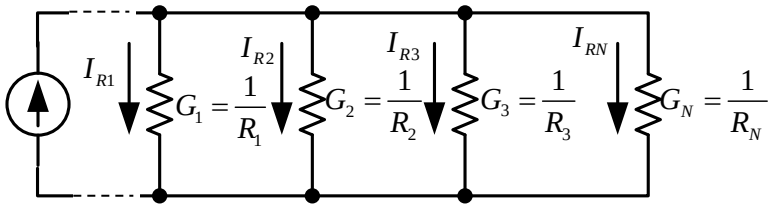
נגדים במקביל (כלל מחלק זרם):

$$I_{R1} = I_S \cdot \frac{G_1}{G_1 + G_2 + G_3 + ... + G_N}$$

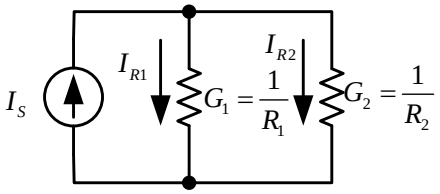
$$I_{R2} = I_S \cdot \frac{G_2}{G_1 + G_2 + G_3 + ... + G_N}$$

$$I_{R3} = I_S \cdot \frac{G_3}{G_1 + G_2 + G_3 + ... + G_N}$$

$$I_{RN} = I_S \cdot \frac{G_N}{G_1 + G_2 + G_3 + ... + G_N}$$



שני נגדים במקביל (כלל מחלק זרם):



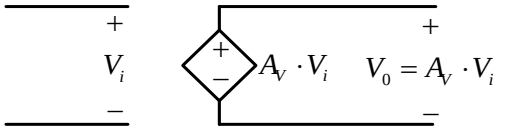
$$R_{eq} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

$$I_1 = I_S \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad ; \quad I_2 = I_S \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

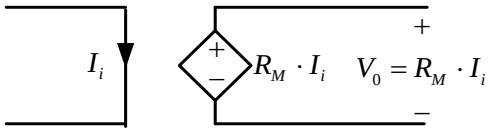
תיאור	יחידות	נוסחה
סלילים במקביל:	H	$L_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + ... + \frac{1}{L_n}}$
קבלים במקביל:	F	$C_{eq} = C_1 + C_2 + ... + C_n$
משוואות קבל:		
זרם דרך קבל:	A	$i_c(t) = C\frac{dv_c(t)}{dt}$
מתח על פני קבל:	V	$v_c(t) = \frac{1}{C}\int_0^t i_c(t)\,dt + V_C(0)$
משוואות סליל:		
זרם דרך סליל:	A	$i_L(t) = \frac{1}{L}\int_0^t v_L(t)\,dt + I_L(0)$
מתח על פני סליל	V	$v_L(t) = L\frac{di_L(t)}{dt}$

מקורות תלויים:

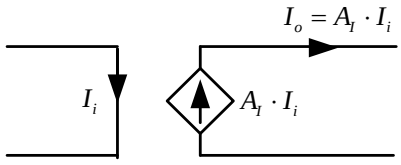
1. מקור מתח תלוי מתח:



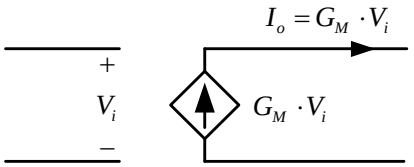
2. מקור מתח תלוי זרם:



3. מקור זרם תלוי זרם:



4. מקור זרם תלוי מתח:



<u>שיטת מתחי צמתים</u>

מערכת המשוואות הכללית (מתוך הסתכלות) ברישום מטריצוני:

$$\begin{pmatrix} G_{11} & -G_{12} & -G_{13} & \cdots\cdots & -G_{1n} \\ -G_{21} & G_{22} & -G_{23} & \cdots\cdots & -G_{2n} \\ -G_{31} & -G_{32} & G_{33} & \cdots\cdots & -G_{3n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdots\cdots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdots\cdots & \cdot \\ -G_{n1} & -G_{n2} & -G_{n3} & \cdots\cdots & G_{nn} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ V_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum I_{s1} \\ \sum I_{s2} \\ \sum I_{s3} \\ \cdot \\ \cdot \\ \sum I_{sn} \end{pmatrix}$$

<u>מטריצת המוליכויות</u> (מתאים גם למתירויות)

G_{ii} - מקדם שבאלכסון הראשי שווה לסכום המוליכויות המחוברים לצומת מספר i.
כל מקדמים האלה הם חיוביים.

G_{ij} - מקדמים מחוץ לאלכסון הראשי שווים לסכום המוליכויות המשותפות בין צומת מספר i לצומת מספר j .

V_i - מתח בצומת i.

<u>וקטור מקורות הזרם</u>

$\sum I_{si}$ - סה"כ מקורות זרם נכנסים ויוצאים מצומת מספר i .

כאשר מקור הזרם נכנס לצומת נלקח בסימן חיובי .
כאשר מקור הזרם יוצא מצומת נלקח בסימן שלילי .

<u>שיטת זרמי חוגים</u>

מערכת המשוואות הכללית (מתוך הסתכלות) ברישום מטריציוני:

$$\begin{pmatrix} R_{11} & \pm R_{12} & \pm R_{13} & ..... & \pm R_{1n} \\ \pm R_{21} & R_{22} & \pm R_{23} & ..... & \pm R_{2n} \\ \pm R_{31} & \pm R_{32} & R_{33} & ..... & \pm R_{3n} \\ . & . & . & ..... & . \\ . & . & . & ..... & . \\ \pm R_{n1} & \pm R_{n2} & \pm R_{n3} & ..... & R_{nn} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ . \\ . \\ I_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum E_1 \\ \sum E_2 \\ \sum E_3 \\ . \\ . \\ \sum E_n \end{pmatrix}$$

<u>מטריצת ההתנגדויות</u> (מתאים גם לעכבות)

R_{ii} - אבר באלכסון הראשי שווה לסכום ההתנגדויות בחוג מספר i.

$\pm R_{ij}$ - אברים שמחוץ לאלכסון הראשי שווה לסכום ההתנגדויות הנמצאות בענף שבין חוג i לחוג j.

הסימן (+) כאשר שני זרמי החוג מתלכדים בענף המשותף.

הסימן (-) כאשר שני זרמי החוג מנוגדים בענף המשותף.

Ii – זרם החוג

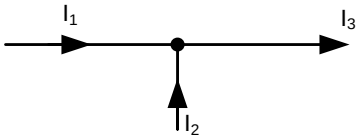
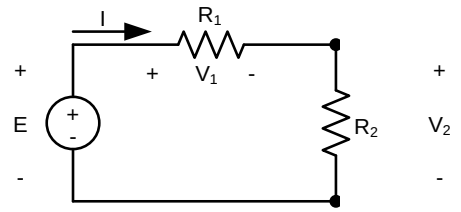
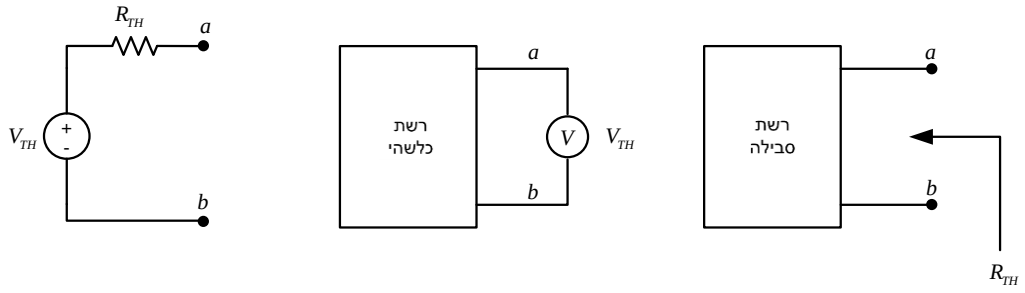
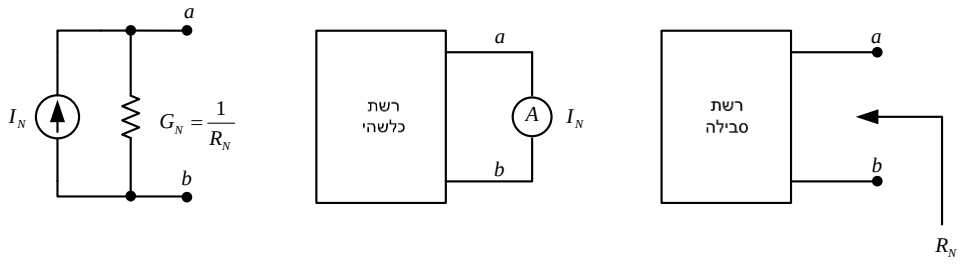
<u>וקטור מקורות המתח</u>

$\sum E_i$ - סה״כ מקורות מתח בחוג מס׳ i.

כאשר קוטביות המקור מתלכדת עם כיוון זרם החוג המקור נלקח בסימן חיובי.
כאשר קוטביות המקור מתנגדת לכיוון זרם החוג המקור נלקח בסימן שלילי.

<u>הערה</u>: אם מסמנים את כל זרמי החוגים בכיוון אחד (בד״כ עם כיוון השעון) אז:
באלכסון הראשי - סכום ההתנגדויות בחוג הוא חיובי
ביתר אברי המטריצה – סכום התנגדויות המשותפות בענף בין חוג i לחוג j בסימן שלילי.

4. משפטים בתורת החשמל – Theorems in Electricity

חוקי קירכהוף – Kirchoff's Laws	
חוק הזרמים (KCL):	
בדוגמאות: זרם יוצא מצומת – חיובי זרם נכנס לצומת – שלילי (אפשר גם להפך)	
סכום אלגברי של כל הזרמים הנכנסים לצומת שווה לאפס:	$-I_1 - I_2 + I_3 = 0 \;;\; I_1 + I_2 = I_3$
סכום אלגברי של כל הזרמים היוצאים מצומת שווה לאפס:	$-I_1 - I_2 + I_3 = 0$
סכום הזרמים הנכנסים לצומת שווה לסכום הזרמים שיוצאים ממנה.	$\sum I_{in} = \sum I_{out}$
חוק המתחים (KVL): סכום אלגברי של כל המתחים בחוג סגור שווה לאפס:	
	
	$E - V_1 - V_2 = 0$ $I \cdot R_1 + I \cdot R_2 = E$
משפט תבנין – Thevenin's Theorem:	
	
מתח V_{TH} הוא מתח הנמדד על הדקי העומס כאשר העומס מנותק (לא זורם דרכו זרם). התנגדות R_{TH} היא התנגדות שרואים מהדקי העומס (ללא העומס) כאשר כל המקורות מבוטלים: מקורות מתח מקוצרים, מקורות זרם מנותקים.	
משפט נורטון – Norton Theorem:	
	
זרם I_N הוא זרם הזורם דרך הדקי העומס כאשר העומס מקוצר. התנגדות R_N היא התנגדות שרואים מהדקי העומס (ללא העומס) כאשר כל המקורות מבוטלים: מקורות מתח מקוצרים, מקורות זרם מנותקים.	

הקשר בין מעגל תבנין ומעגל נורטון:

$$V_{TH} = R_{TH} \cdot I_N \quad , R_{TH} = R_N$$

רשת סבילה – מקורות מתח מוחלפים בקצר ומקורות זרם בנתק.

משפט ההרכבה – Superposition Theorem:

הזרם (מתח) בכל ענף של מעגל חשמלי שווה לסכום האלגברי של הזרמים (המתחים) החלקיים, כאשר כל אחד מהם נוצ ע"י ממקור מתח או זרם אחר הפועלים בנפרד ויתר המקורות מנוטרלים (מקור מתח מקוצר, מקור זרם מנותק).

$V', V'', V''', ...V^n$ מתחים חלקיים.

$$V = V' + V'' + ... + V^n$$

$I', I'', I''', ..., I^n$ זרמים חלקיים.

$$I = I' + I'' + ... + I^n$$

נוסחת מילמן – Milman's Theorem:

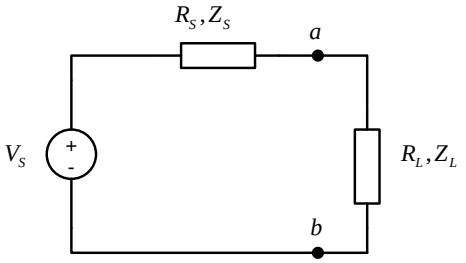
ברשת בעלת שני צמתים בלבד a, b

R – התנגדות ענפים מקבילים

I_S, V_S - מקורות מתח/זרם בענפים (אם יש)

$$V_{ab} = \frac{\sum \frac{V_S}{R} + \sum I_S}{\sum \frac{1}{R}}$$

תאום עכבות (העברת הספק מכסימלי לעומס) – Impedance Matching:

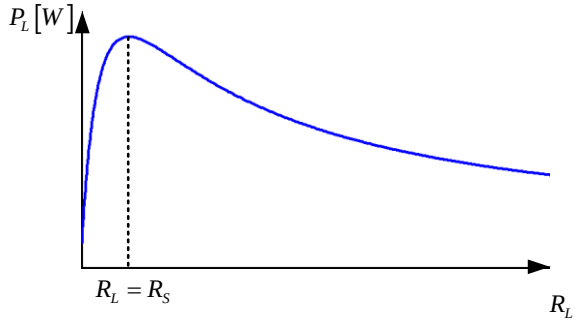


העכבות מרוכבות (AC) $Z_L = Z_S^*$

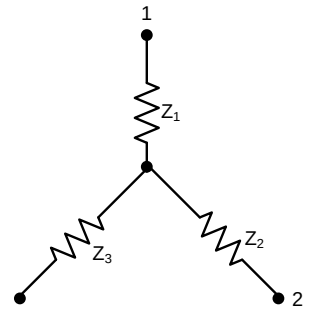
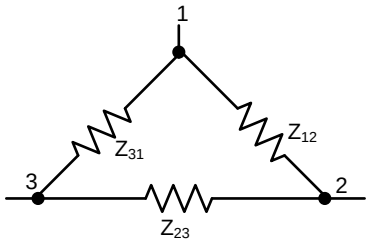
או:

(DC) $R_L = R_S$

הספק מכסימלי בעומס:



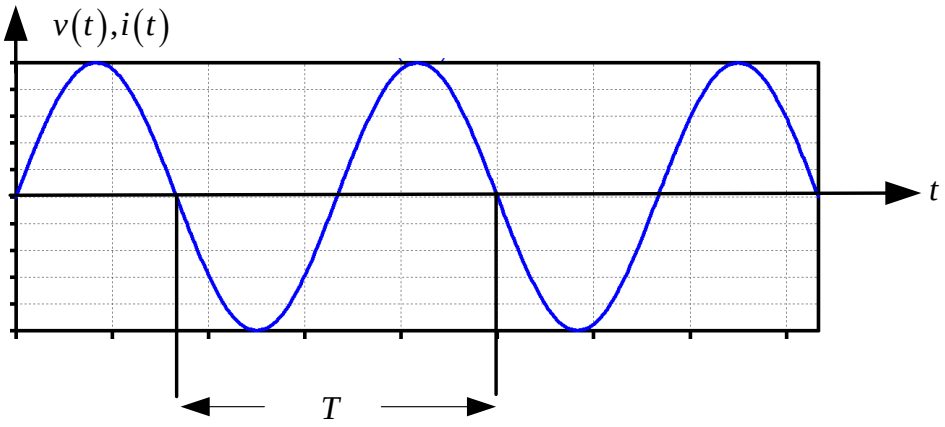
$$P_{\max} = \frac{V_S^2}{4 \cdot R_L}$$

<u>התמרת כוכב - משולש</u>	
	$Z_1 = \frac{Z_{12} \cdot Z_{31}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}}$ $Z_2 = \frac{Z_{12} \cdot Z_{23}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}}$ $Z_3 = \frac{Z_{23} \cdot Z_{31}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}}$ העכבות מרוכבות (וקטורים)
	$Z_{12} = \frac{Z_1 \cdot Z_2 + Z_2 \cdot Z_3 + Z_3 \cdot Z_1}{Z_3}$ $Z_{23} = \frac{Z_1 \cdot Z_2 + Z_2 \cdot Z_3 + Z_3 \cdot Z_1}{Z_1}$ $Z_{31} = \frac{Z_1 \cdot Z_2 + Z_2 \cdot Z_3 + Z_3 \cdot Z_1}{Z_2}$ העכבות מרוכבות (וקטורים)
<u>חיבור תאים בסוללה</u>:	
n - מס' תאים מחוברים בטור כענף אחד	r - ההתנגדות הפנימית של תא אחד
m - מס' הענפים המקבילים	R_L - התנגדות הצרכן
E - כא"מ של תא אחד	I - הזרם בצרכן
במקביל:	$I = \frac{E}{\frac{r}{m} + R}, \ Q_{eq} = m \cdot Q$
בטור:	$I = \frac{n \cdot E}{n \cdot r + R}, \ Q_{eq} = Q$
במעורב:	$I = \frac{n \cdot E}{\frac{n}{m} \cdot r + R}, \ Q_{eq} = m \cdot Q$
התנאי לאספקת זרם מירבי בסוללה:	$\frac{n}{m} \cdot r = R$
קיבול הסוללה: Q – קיבול הסוללה (ביחידות אמפר שעה $A \cdot h$ t - זמן (בשעות h)	$Q = I \cdot t$
נצילות הסוללה:	$\eta = \frac{R_L}{R_L + \frac{n}{m} \cdot r}$

5. ערכים בסיסיים בזרם חילופין – Alternating Current

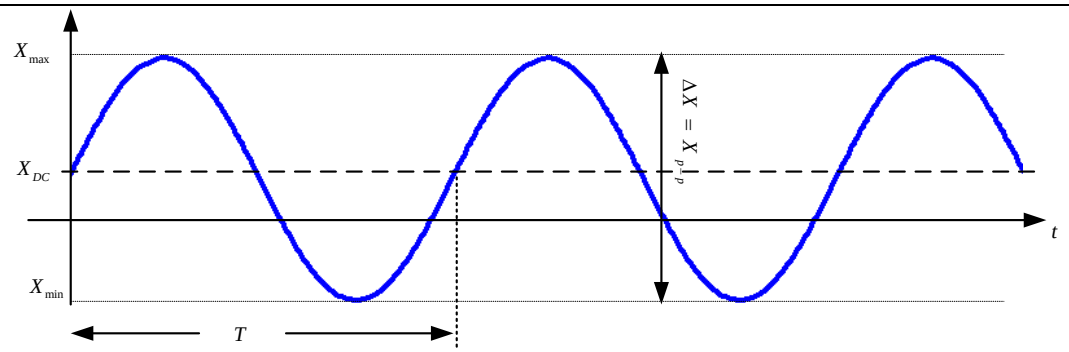
ערך ממוצע (Average) של פונקציות	
פונקציה מחזורית כללית v(t) עם מחזור T:	$V_{av}=\frac{1}{T}\int_0^T v(t)dt$ $i_{av}=\frac{1}{T}\int_0^T i(t)dt$
ערך יעיל או שורש של ממוצע הריבועים (Root Mean Square):	
זרם $i(t)$ הזורם דרך נגד טהור R ויוצר הספק $p(t)$ בעל ערך ממוצע P. אותו P יכול להתקבל באותו נגד R על ידי זרם קבוע I. אזי אומרים כי $i(t)$ הוא בעל ערך יעיל I_{RMS} השקול לזרם הקבוע I:	
	$I_{RMS}=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2(t)dt}$
באותו אופן מגדירים עבור פונקצית מתח ערך יעיל V_{rms}	$V_{RMS}=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T v^2(t)dt}$
בגל סינוסי הערך היעיל שווה ל:	$I_{RMS}=\frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}\quad ;\quad V_{RMS}=\frac{V_{\max}}{\sqrt{2}}$
גורם צורה (Form Factor):	
היחס בין הערך היעיל לערך הממוצע נקרא גורם הצורה FF של צורת הגל. לגודל זה ישנם שימושים בקביעת גורמי תיקון של מכשירים וביצירת מתחים:	
	$FF\left(Form\ Factor\right)=\frac{\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T v^2(t)dt}}{\frac{1}{T}\int_0^T v(t)dt}=\frac{V_{RMS}}{V_{avg}}$
מקדם האדווה (Ripple Factor)	$RF=\sqrt{FF^2-1}$

6. זרם חילופין סינוסוידלי – (AC) Alternating Current



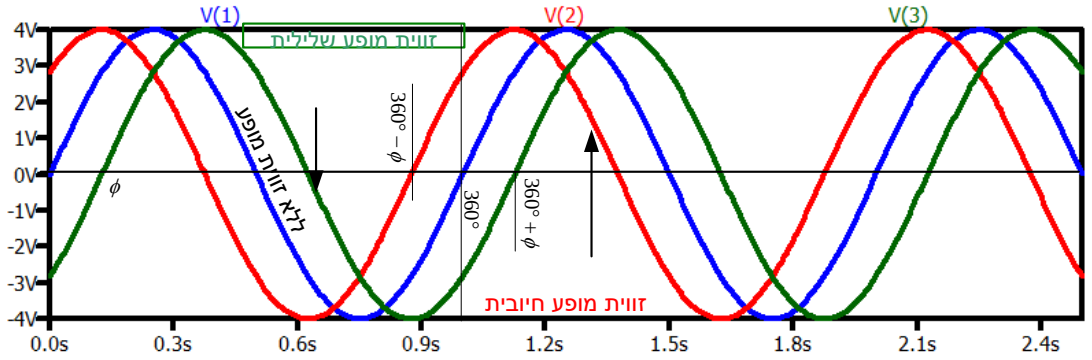
ערך רגעי של גל מחזורי של מתח (זרם):	
X_m - ערך מירבי (Amplitude) X יכול להיות זרם , מתח או כא"מ ω - תדירות זוויתית [rad/Sec] t – זמן בשניות φ - זווית מופע התחלתית ברדיאנים	$x(t) = X_m \cdot sin(\omega t + \varphi)$
זמן מחזור T (Period)	
f - תדירות (Frequency) [הרץ]	$T = \frac{1}{f}$
תדירות זוויתית (מעגלית):	$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$

גל סינוס לא סימטרי:

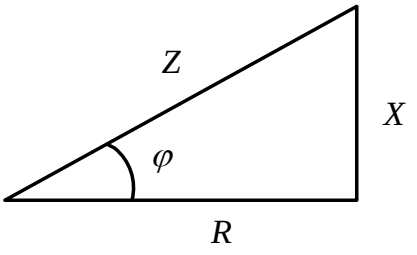
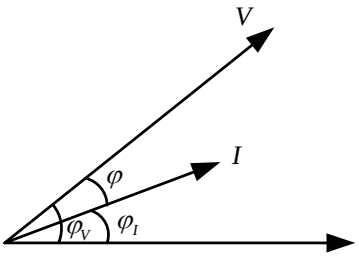
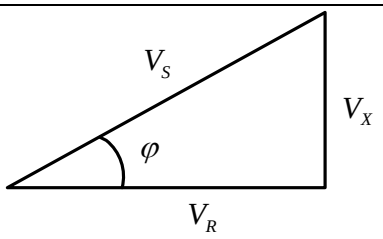
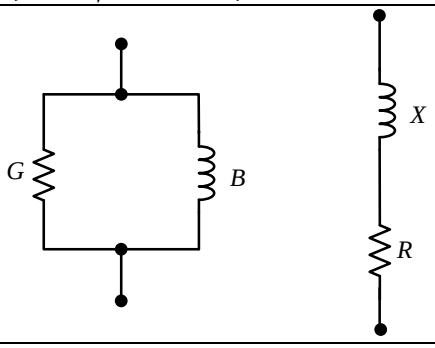


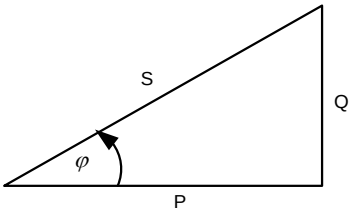
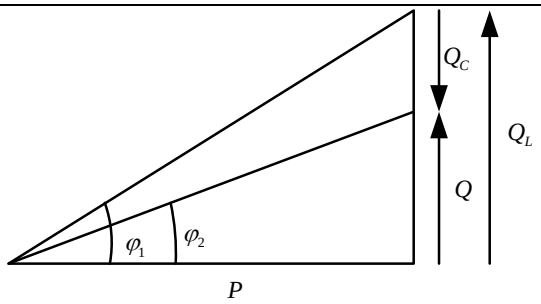
זמן מחזור של גל סינוסי:	T
תדר של גל סינוסי:	$f = \frac{1}{T}$
ערך שיא לשיא של גל סינוסי:	$\Delta X = X_{max} - X_{min}$
ערך האמפליטודה של הגל:	$X_{AMP} = \frac{\Delta X}{2}$
ערך ממוצע של גל סינוסי:	$X_{avg} = X_{DC}$
ערך אפקטיבי (יעיל) של גל סינוסי:	$X_{RMS} = \sqrt{X_{DC}^{\ 2} + \left(\frac{X_{AMP}}{\sqrt{2}}\right)^2}$

גל סינוסוידלי עם הזזת מופע:



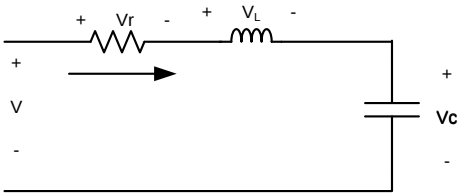
ביטוי לגל סינוסוידלי עם זווית מופע שלילית:	$x(t) = X_m \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi)$
ביטוי לגל סינוסוידלי עם זווית מופע חיובית:	$x(t) = X_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$

מעגל זרם חילופין:	
מתח רגעי:	$v(t) = V_{\max} \sin(\omega t + \varphi_u)$
זרם רגעי:	$i(t) = I_{\max} \sin(\omega t + \varphi_i)$
עכבות:	
היגב השראי (Inductive Reactance):	$X_L = \omega \cdot L$
עכבת הסליל:	$Z_L = jX_L = j\omega L = X_L \angle 90° = \omega L \angle 90°$
היגב קיבולי (Capacitive Reactance):	$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$
עכבת הקבל:	$Z_C = -jX_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{j}X_C = X_C \angle(-90°)$
היגב בחיבור טורי:	$X = X_L - X_C$
עכבה בחיבור טורי (Impedance):	$Z = R + jX = \lvert Z \rvert \angle \varphi = \lvert Z \rvert \angle tg^{-1}\left(\frac{X}{R}\right)$
ערך מוחלט וזווית:	$\lvert Z \rvert = \sqrt{R^2 + X^2}\ ;\ \varphi = \tan^{-1}\frac{X}{R}$ $R = \lvert Z \rvert \cos\varphi\ \ ;\ X = \lvert Z \rvert \sin\varphi$
משולש העכבות וזווית הפרש מופע בין מתח וזרם עבור עכבה טורית:	$\varphi = \varphi_V - \varphi_I$
	
משולש המתחים עבור עכבה טורית: V_R – הרכיב ההתנגדותי של המתח V_X – הרכיב ההגבי של המתח	
הפיכת חיבור טורי R, X לחיבור מקבילי B,G:	
	$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{R + jX}$ $Y = G - jB$ $G = \frac{R}{R^2 + X^2}\ \ ;\ B = \frac{X}{R^2 + X^2}$

הספקים:		
הספק רגעי:		$p(t)=v(t)\cdot i(t)$
אנרגיה חשמלית:	J	$W=\int_{t_1}^{t_2} p(t)\,dt$
הספק יעיל (ממשי):	W	$P=V\cdot I\cdot\cos\varphi$
הספק הגבי (עיוור):	VAR	$Q=V\cdot I\cdot\sin\varphi$
הספק כללי (מרוכב):	VA	$S=V\cdot I^*$
הספק מרוכב (משולש ההספקים):		
		$S=V\cdot I\cdot\cos\varphi+jV\cdot I\cdot\sin\varphi=P+jQ$
		$S=V\cdot I^*=P+jQ$
		$S=\sqrt{P^2+Q^2}$ $P=S\cos\varphi\ \ ;\ \ Q=S\sin\varphi$
הספק בעכבה Z:		$S=\lvert I\rvert^2\cdot Z=\frac{\lvert V\rvert^2}{Z^*}\ ;\ Q=\lvert I\rvert^2\cdot X\ \ ;\ P=\lvert I\rvert^2\cdot R$
גורם הספק:		$\cos\varphi=PF=\frac{P}{S}$
שיפור גורם הספק - $\cos\varphi$:		
ההספק ההיגבי הקיבולי הדרוש כדי להגדיל את מקדם ההספק של עומס חשמלי בעל אופי השראי:		$\lvert Q_C\rvert=P\cdot(\tan\varphi_1-\tan\varphi_2)$
		$C=\frac{P}{\omega\cdot V^2}\cdot(\tan\varphi_1-\tan\varphi_2)$
נצילות:		$\eta=\frac{P_{out}}{P_{in}}[\%]=1-\frac{\Delta P}{P_{in}}$
ההספק הפעיל במבוא של המכשיר:		$P_{in}=P_1$
ההספק הפעיל במוצא של המכשיר:		$P_{out}=P_2$
הספק כל איבודי האנרגיה במכשיר:		$\Delta P=P_{in}-P_{out}=P_1-P_2$

7. מעגלי תהודה – Resonant Circuits

תהודה טורית – תהודת מתחים – (Series Resonance):



בתהודה $V = V_r$; $X_L = X_C$ ועכבת המעגל $R =$

$$I_0 = \frac{V}{R}$$

תדר תהודה (שווה גם במעגל טורי וגם במעגל מקבילי):

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad ; \quad f_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

התנגדות אופיינית:

$$\rho = \omega_o \cdot L = \frac{1}{\omega_o \cdot C} = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

מקדם טיב (Quality Factor):

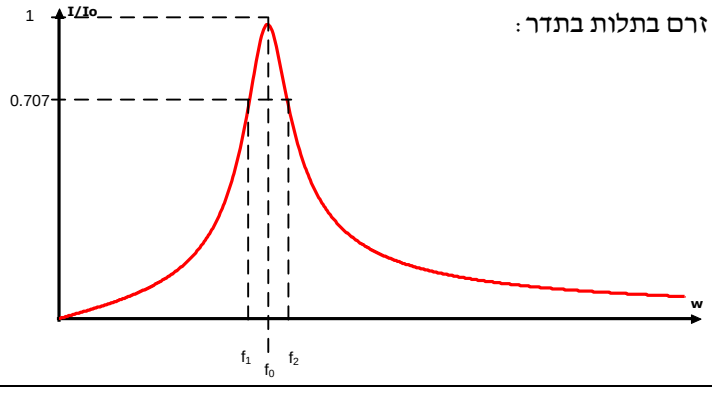
$$Q = \frac{V_L}{V_R} = \frac{V_c}{V_R} = \frac{\rho}{R} = \frac{\omega_o \cdot L}{R} = \frac{1}{\omega_o RC}$$

רוחב סרט (BandWidth):

$$BW = \Delta f = f_2 - f_1 \quad ; d = \frac{\Delta f}{f_o} = \frac{1}{Q}$$

$$Q = \frac{f_0}{BW} \quad ; \quad f_0 = \sqrt{f_1 \cdot f_2}$$

זרם בתלות בתדר:



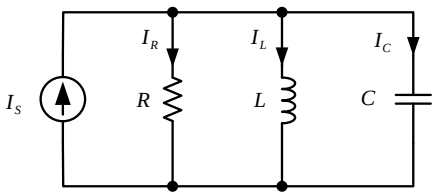
$$\frac{I}{I_o} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega} \right)^2}}$$

ω_1, ω_2 - תדרי מחצית ההספק.

$$f_1 = \frac{\omega_1}{2 \cdot \pi} \; , f_2 = \frac{\omega_2}{2 \cdot \pi}$$

<u>תהודה מקבילית – תהודה זרמים (Parallel Resonance)</u>:

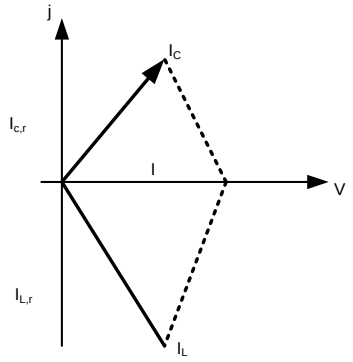
מעגל RLC מקבילי פשוט:

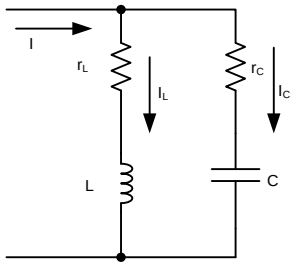


תדר תהודה: $\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$; $f_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$

מקדם טיב במעגל מקבילי:

$$Q=\omega_0 \cdot R \cdot C = R \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} = \frac{R}{\omega_0 \cdot L}$$

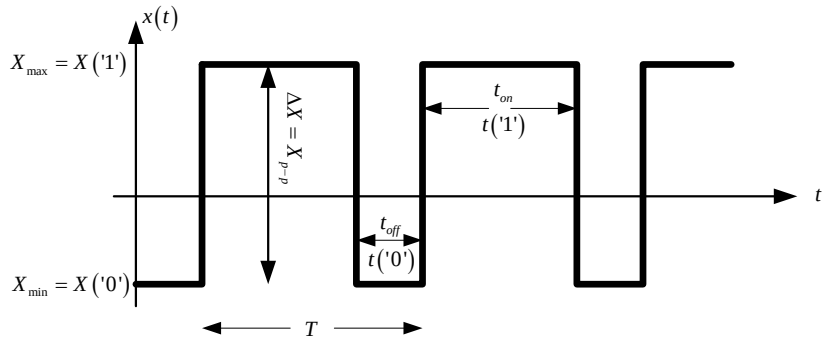
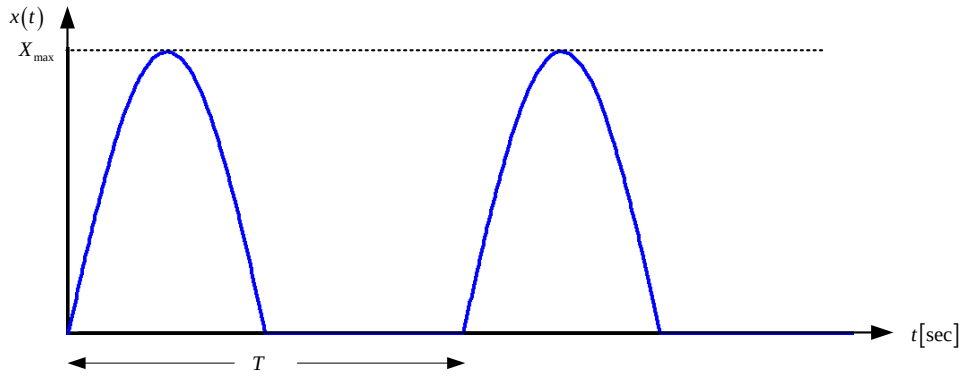




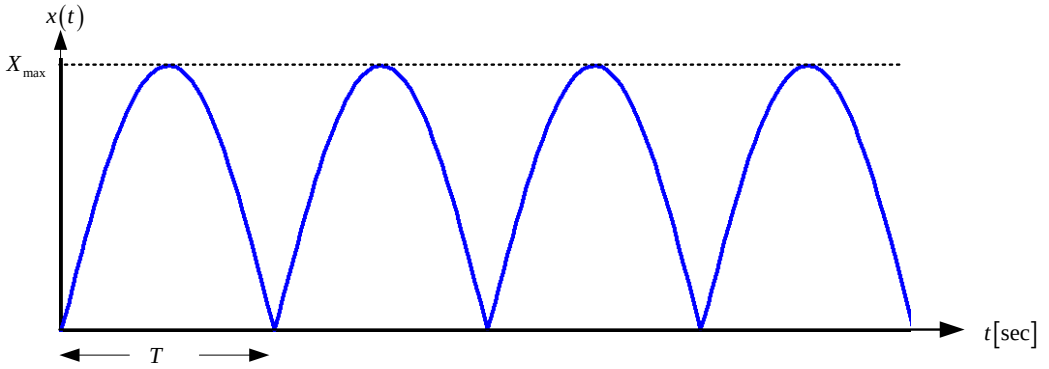
בתהודה: $I_{c,r} = I_{L,r}$

תדר זוויתי בתהודה:	$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \cdot \sqrt{\frac{\rho^2 - r_L^{\,2}}{\rho^2 - r_C^{\,2}}}$; $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$
מקדם טיב:	$Q = \frac{\omega_o \cdot L}{r_L + r_c \cdot \omega_o^{\,2} \cdot L \cdot C}$
במעגל תהודה עם קבל טהור $(r_c = 0)$:	$\omega_o = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C} - \frac{r_L^{\,2}}{L^2}}$
מקדם טיב עם קבל טהור $(r_c = 0)$:	$Q = \frac{\omega_o \cdot L}{r_L}$
התנגדות כניסה בתהודה:	$r_{in} = r_L \cdot \left(Q^2 - 1\right)$
תנאי כללי לתהודה:	$\frac{X_C}{r_c^{\,2} + X_C^{\,2}} = \frac{X_L}{r_L^{\,2} + X_L^{\,2}}$

8. גלים מחזוריים לא סינוסוידליים

אות ריבועי מחזורי:	
	
זמן מחזור של גל ריבועי מחזורי:	T
תדר של גל שן ריבועי מחזורי:	$f = \frac{1}{T}$
ערכו המינימלי של גל ריבועי מחזורי:	$X_{min} = X('0')$
ערכו המכסימלי של גל ריבועי מחזורי:	$X_{max} = X('1')$
ערך שיא לשיא של גל ריבועי מחזורי:	$X_{ptp} = \Delta X = X_{max} - X_{min} = X('1') - X('0')$
גורם מחזור של גל ריבועי מחזורי: Duty Cycle - D	$D = \frac{t_{on}}{T} \cdot 100[\%]$ $D = \frac{t_{on}}{T}\ ,\ (1-D) = \frac{t_{off}}{T}$
ערכו הממוצע של גל ריבועי מחזורי:	$X_{avg} = X_{max} \cdot D + X_{min} \cdot (1-D)$
ערכו הממוצע של גל ריבועי מחזורי סימטרי:	0
ערכו האפקטיבי (יעיל) של גל ריבועי מחזורי:	$X_{RMS} = \sqrt{D \cdot X_{max}^{\ 2} + (1-D) \cdot X_{min}^{\ 2}}$
ערכו האפקטיבי (יעיל) של גל ריבועי מחזורי סימטרי:	$X_{RMS} = X_{max}$
אות סינוסואידי מיושר חצי גל:	
	
זמן מחזור של שן סינוס מחזורי:	T
תדר של גל שן סינוס מחזורי:	$f = \frac{1}{T}$

ערך ממוצע של אות סינוסואידי מיושר חצי גל:	$X_{avg}=\frac{X_{max}}{\pi}$
ערך אפקטיבי (יעיל) של אות סינוסואידי מיושר חצי גל:	$X_{RMS}=\frac{X_{max}}{2}$
אות סינוסואידי מיושר גל שלם:	



זמן מחזור של גל סינוסואידי מיושר שלם מחזורי:	T
תדר של גל סינוסואידי מיושר שלם מחזורי:	$f=\frac{1}{T}$
ערך ממוצע של אות סינוסואידי מיושר גל שלם:	$X_{avg}=\frac{2\cdot X_{max}}{\pi}$
ערך אפקטיבי (יעיל) של אות סינוסואידי מיושר גל שלם:	$X_{RMS}=\frac{X_{max}}{\sqrt{2}}$
אות המורכב ממספר סופי של אותות מחזוריים	
אות המורכב מ- n אותות:	$x(t)=x_1(t)+x_2(t)+.....+x_n(t)$
ערך ממוצע של אות המורכב מ- n אותות:	$X_{avg}=X_{1(avg)}+X_{1(avg)}+.....X_{n(avg)}$
ערך אפקטיבי (יעיל) של אות המורכב מ- n אותות:	$X_{RMS}=\sqrt{X_{1(RMS)}{}^2+X_{2(RMS)}{}^2+.....X_{n(RMS)}{}^2}$

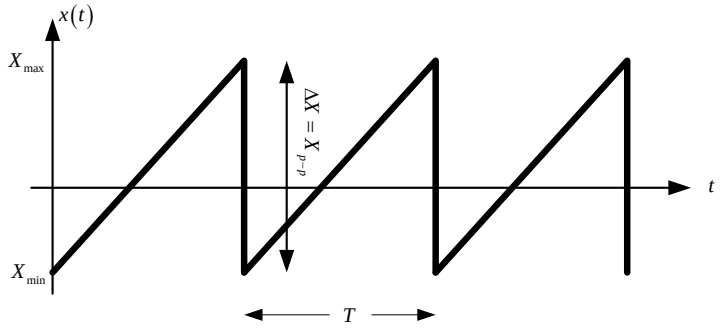
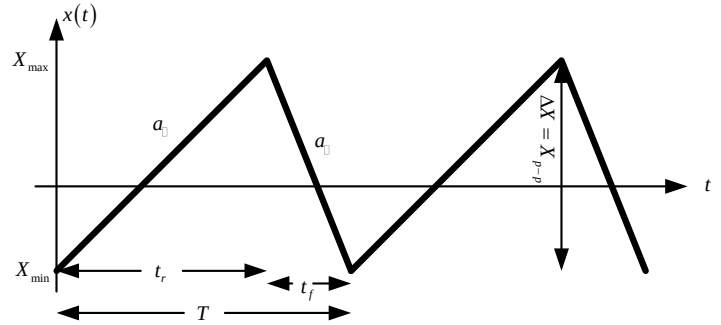
הערה: כאשר יש אותות לא אורטוגונליים (בעלי אותו תדר אך אמפליטודה וזווית שונה), יש קודם כל לחשב את התרומה של האותות בתדר זהה ולאחר מכן ניתן להפעיל את הנוסחה.

לדוגמא:

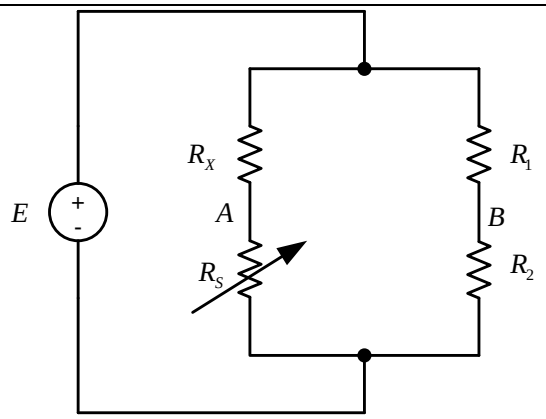
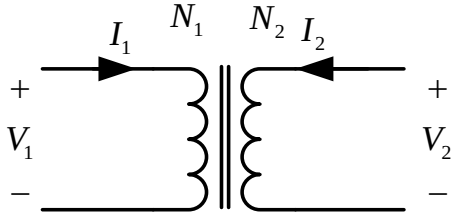
$$x(t)=4+3\cdot sin(4t)+2\cdot sin(5\cdot t)+6\cdot sin(5\cdot t+60°)$$

$$2\angle 0°+6\angle 60°=7.211\angle 46.102°$$

$$X_{RMS}=\sqrt{4^2+\left(\frac{3}{\sqrt{2}}\right)^2+\left(\frac{7.211}{\sqrt{2}}\right)^2}=6.819$$

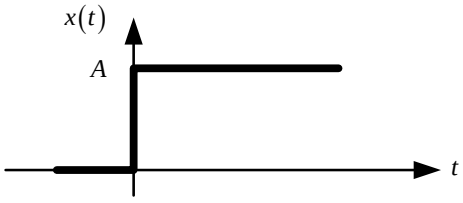
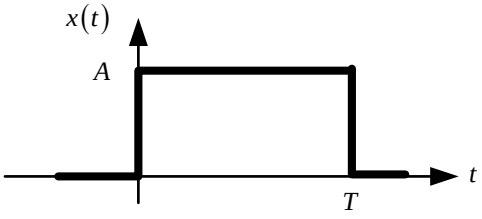
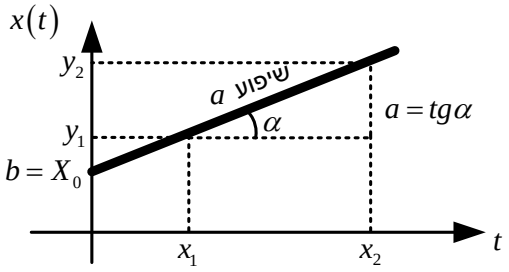
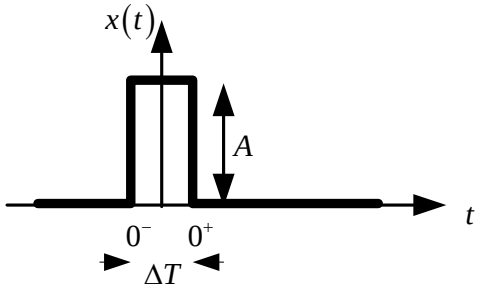
אות משולש/ שן משור מחזורי:	
	
	
זמן מחזור של גל שן משור/משולש:	T
תדר של גל שן משור/משולש:	$f = \frac{1}{T}$
ערכו המינימלי של גל שן משור/משולש:	X_{min}
ערכו המכסימלי של גל שן משור/משולש:	X_{max}
ערך שיא לשיא של גל שן משור/משולש:	$X_{ptp} = \Delta X = X_{max} - X_{min}$
קצב עלייה של גל שן משור:	$a = \frac{X_{max} - X_{min}}{T} = \frac{\Delta X}{T}$
קצב עלייה של גל משולש:	$a_{\square} = \frac{X_{max} - X_{min}}{t_r}$
קצב ירידה של גל משולש (שלילי):	$a_{\square} = \frac{X_{min} - X_{max}}{t_f}$
ערכו הממוצע של אות משולש או שן משור סימטרי $\left(X_{max} = X_{min}\right)$ לאורך מחזור אחד:	0
ערכו היעיל (אפקטיבי) של אות משולש סימטרי או שן משור סימטרי לאורך מחזור אחד:	$X_{RMS} = X_{eff} = \frac{X_{max}}{\sqrt{3}}$
ערכו היעיל (אפקטיבי) של אות משולש לא סימטרי או שן משור לא סימטרי לאורך מחזור אחד:	$X_{RMS} = \sqrt{\frac{X_{\min}{}^2 + X_{\max}{}^2 + X_{\min} \cdot X_{\max}}{3}}$
ערך ממוצע של אות מולש לא סימטרי, או שן משור לא סימטרי:	$X_{avg} = \frac{X_{max} + X_{min}}{2}$

9. שונות

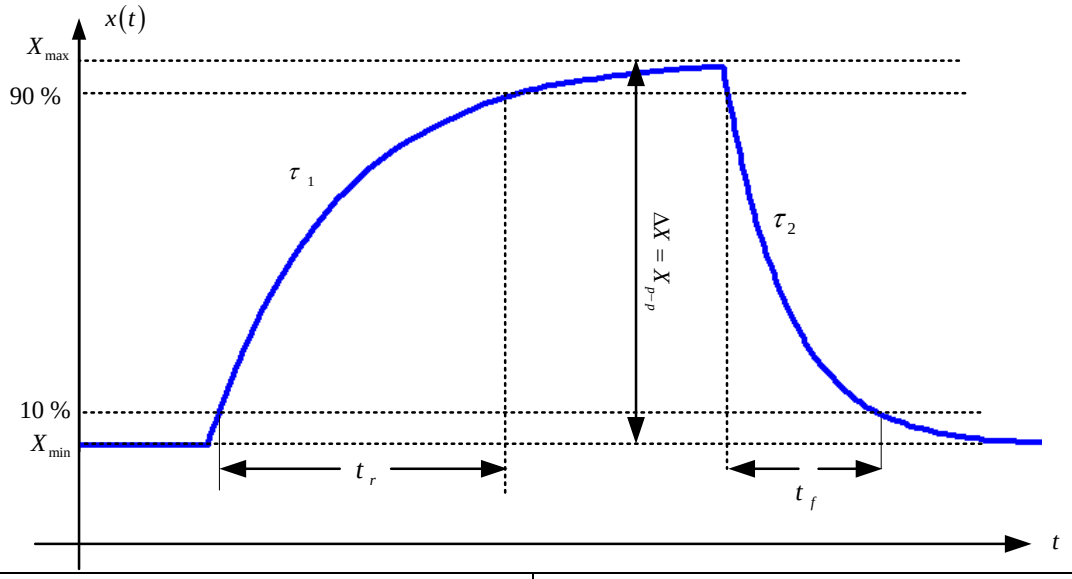
גשר ויסטון Wheaston's Bridge	
במצב מאוזן מתקיים: $R_x R_2 = R_S R_1$	
R_1, R_2 - התנגדות שהיחס שלהן ידוע.	
R_X, R_S - התנגדות משתנה והתנגדות נעלמת.	
שנאי Transformer	
יחסי זרם/מתח – מספר כריכות:	$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$ $\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$

מבוא לאלקטרוניקה

10. צורות גל במעגלים ספרתיים ואנלוגיים

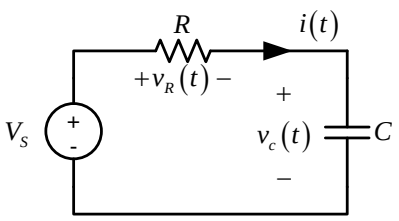
1. גל מדרגה $u(t)$:	
$x(t)=A\cdot u(t)=\begin{cases}0 & t<0\\ A & t>0\end{cases}$	
2. דופק יחיד:	
$x(t)=\begin{cases}0 & t<0\\ A & 0<t<T\\ 0 & T<t\end{cases}$	
3. גל שיפוע:	
	
b, X_0 ערך התחלתי	$x(0)=X_0=b$
a שיפוע של הגל	$a=\frac{\Delta x}{\Delta t}=\frac{x_2-x_1}{t_2-t_1}$
משוואת גל שיפוע	$x(t)=a\cdot t+b$
4. גל הלם $\delta(t)$:	
$\int_{0^-}^{0^+}\delta(t)=1$ $A\to\infty$ $\Delta T\to 0$ $A\cdot\Delta T=1$	

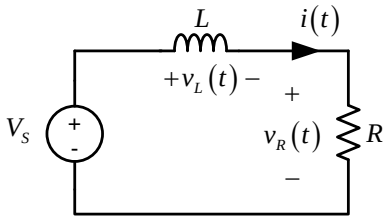
5. פרמטרים של גל מעריכי:



X_{min} ערך מינימלי (מתח או זרם)	X_{min} ערך מינימלי (מתח או זרם)
X_{max} ערך מכסימלי (מתח או זרם)	X_{max} ערך מכסימלי (מתח או זרם)
Δx ערך שיא לשיא	$X_{p-p} = \Delta X = X_{max} - X_{min}$
t_r - זמן עליה (מוגדר בין 10% לבין 90% מהתנופה שיא לשיא)	$t_r = \tau_1 \cdot ln9$
t_f - זמן ירידה (מוגדר בין 90% לבין 10% מהתנופה שיא לשיא)	$t_f = \tau_2 \cdot ln9$
τ_1 - קבוע זמן בעליה	
τ_2 - קבוע זמן בירידה	

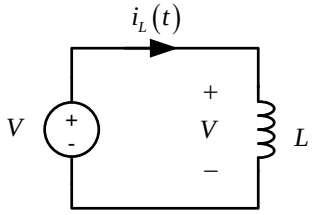
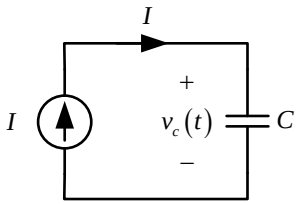
11. מעגלי RC ו- RL – תגובה לאותות DC





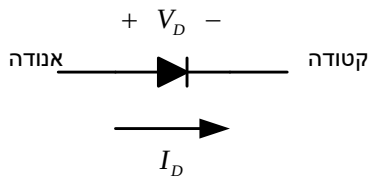
קבוע הזמן τ $[sec]$	$\tau = \frac{L}{R}$
	$\tau = R \cdot C$
משוואת דפקים: משוואה שנכונה עבור כל מתח או זרם במעגלי RC ו-RL	$x(t) = X(\infty) - \left[X(\infty) - X(0^+) \right] \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$
חישוב הזמן הדרוש למתח/זרם להגיע לערך מסוים:	$t = \tau \cdot ln \frac{X(\infty) - X(0_+)}{X(\infty) - X(t)}$

טעינת סליל במתח קבוע / טעינת קבל בזרם קבוע

מעגל RL מחובר למקור מתח קבוע:	מעגל RC מחובר למקור זרם קבוע:
	
זרם דרך הסליל יעלה ליניארית:	מתח על הדקי הקבל יעלה ליניארית:
$i_L(t) = I_L(0) + \frac{1}{L} \cdot V \cdot t$	$v_C(t) = V_C(0) + \frac{1}{C} \cdot I \cdot t$

12. דיודה - Diode

סימון דיודה רגילה:



משוואת דיודה (משוואת שוקלי):

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

$$V_T = \frac{K \cdot T}{q} \approx \frac{T}{11600}$$

כאשר:

I_D - זרם הזורם דרך הדיודה (הכיוון החיובי של זרם מוגדר מאנודה לקטודה).

I_S - זרם רוויה אחורי (זרם שזורם דרך הדיודה המורכב מנושאי מיעוט הזורם בממתח אחורי).

e - מספר טבעי $e = 2.71..$.

q - מטען אלקטרון. $q = 1.6 \cdot 10^{-19} \left[C \right]$.

K - קבוע בולצמן. $K = 1.38 \cdot 10^{-23} \left[J / °K \right]$

T - טמפרטורה במעלות קלווין $\left[°K \right]$.

η - מקדם: מקובל להניח עבור דיודת גרמניום $\eta_{Ge} = 1$ ועבור דיודת סיליקון $\eta_{Si} = 2$.

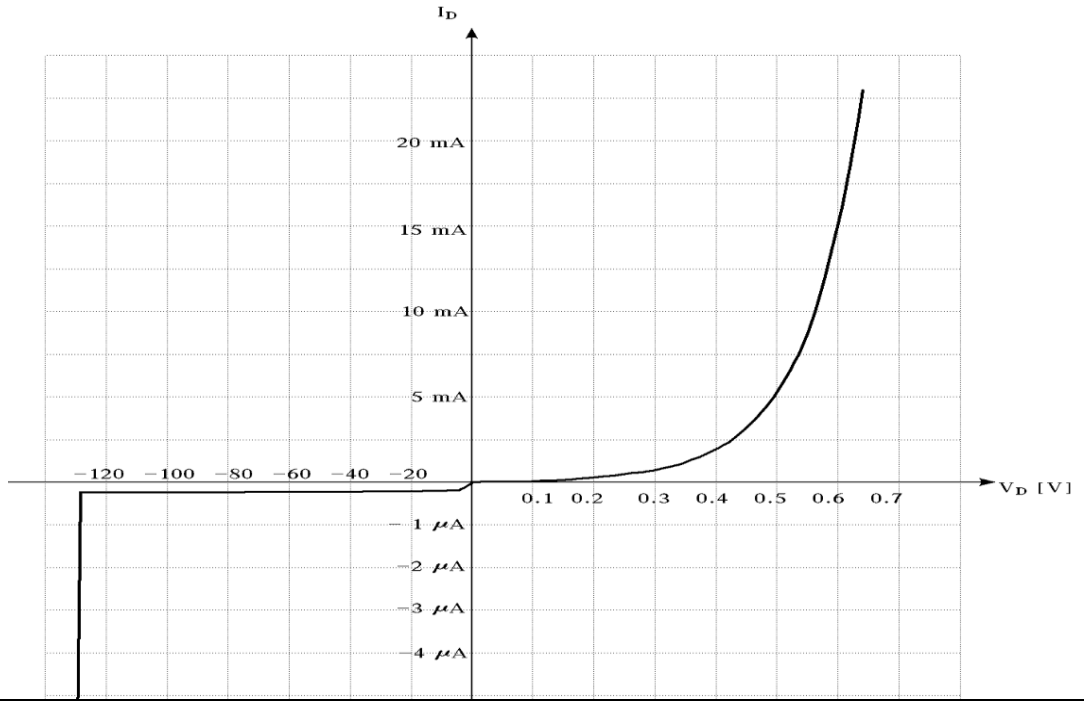
בטמפרטורת החדר ניתן להניח:

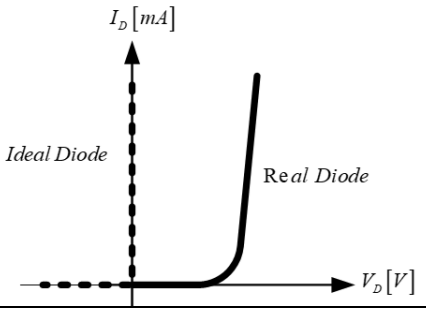
$$V_T \big|_{T=25°C} = \frac{273+25}{11600} = 25.6\,mV \approx 26\,mV$$

הקשר בין מתח V_D וזרם I_D בממתח קדמי:

$$V_D = \frac{\eta \cdot K \cdot T}{q} \cdot \ln \frac{I_D}{I_S} = \eta V_T \cdot \ln \frac{I_D}{I_S}$$

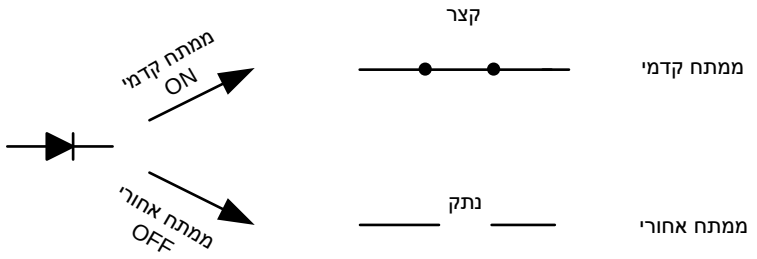
אופיין דיודה:



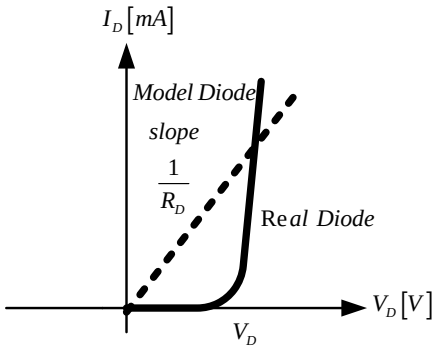
תלות זרם רוויה אחורי I_S בטמפרטורת סביבה:	$\frac{I_S(T_2)}{I_S(T_1)} = 2^{\frac{T_2-T_1}{10}}$
תלות מפל מתח קדמי על הדקי הדיודה בטמפרטורה:	$\frac{dV_D}{dT} = -2\frac{mV}{°C}$
מודלים ליניאריים לדיודה:	
	אופיין: 

1. דיודה אידיאלית:

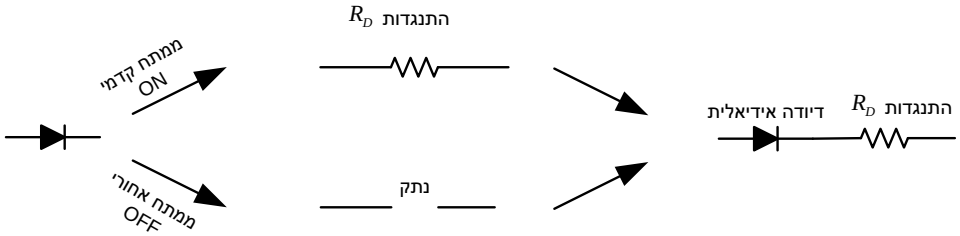
מעגל תמורה:



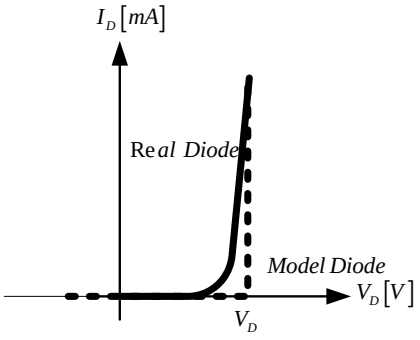
2. **דיודה בממתח קדמי מהווה התנגדות R_D:**



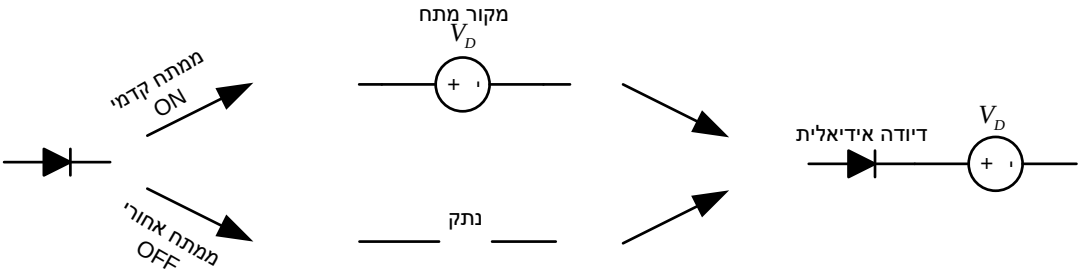
מעגל תמורה:



3. דיודה בממתח קדמי מהווה מקור מתח V_D המתנגד לזרם הדיודה:

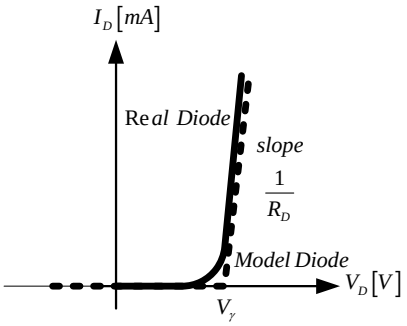


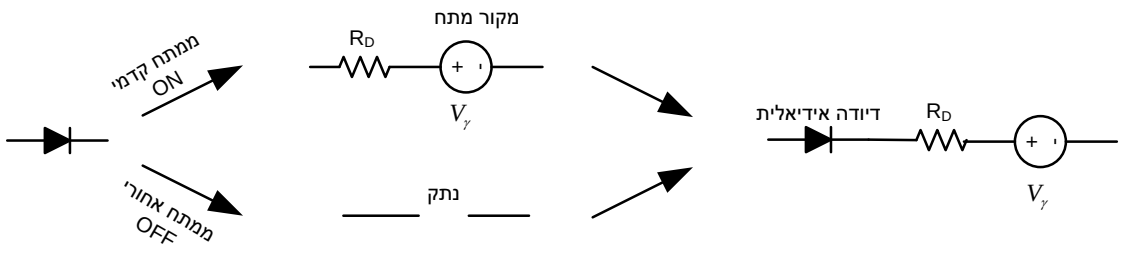
מעגל תמורה:



4. דיודה בממתח קדמי מהווה מקור מתח $V_D^* = V_\gamma$

בטור לנגד R_D

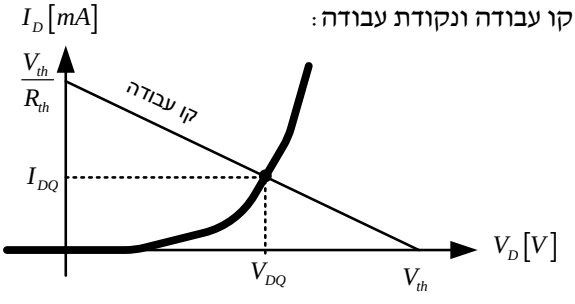


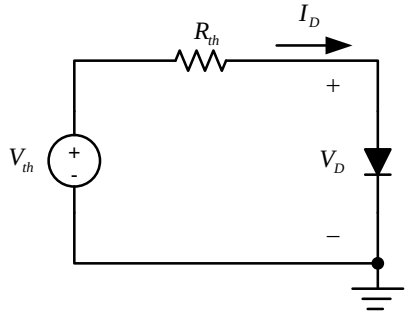


מתח פריצה אחורי: PIV – Peak Inverse Voltage

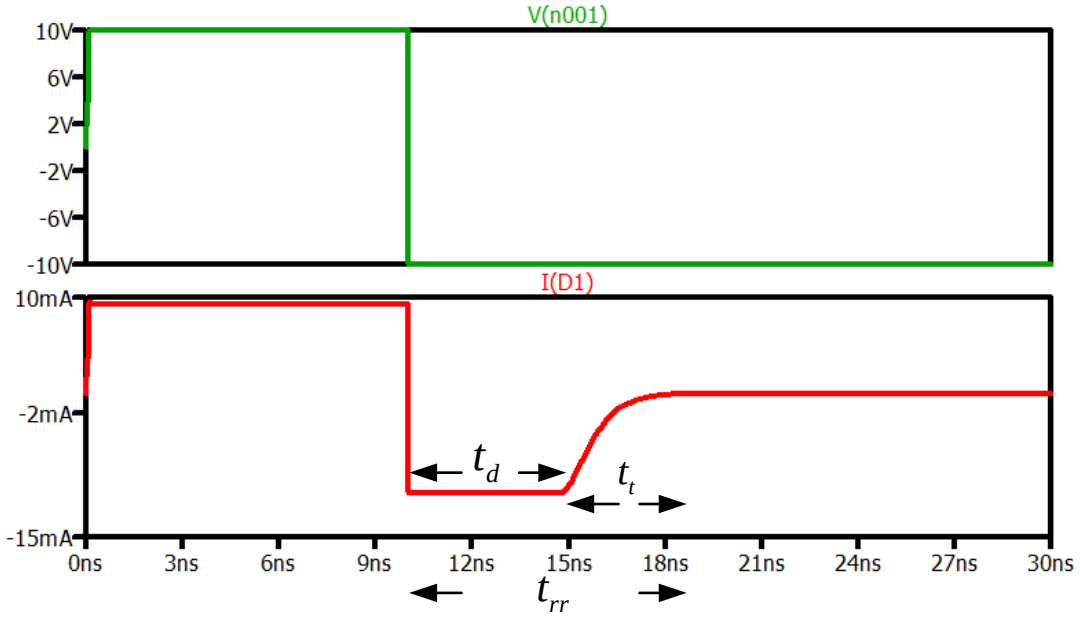
הספק פיזור בדיודה: $P_D = V_D \cdot I_D$

קו עבודה ונקודת עבודה:





התנגדות דינמית:	$r_d = \frac{\eta \cdot K \cdot T}{q \cdot I_{DQ}} = \frac{\eta \cdot V_T}{I_{DQ}}$
זמני התאוששות:	



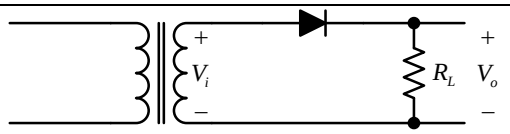
$t_{rr} = t_d + t_t$

t_d - זמן אחסנה - זמן השהייה Storage Time

t_t - זמן מעבר - Transision Time

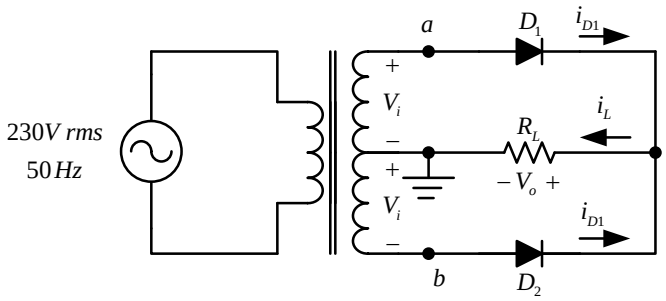
t_{rr} - זמן התאוששות - Recovery Time

<u>מיישר חצי גל</u>



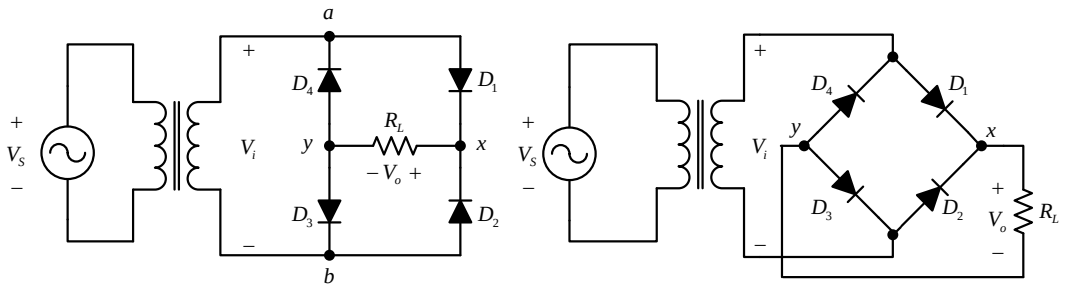
ערכו המכסימלי של מתח המוצא:	$V_{o(max)} = V_{i(max)} - V_D$
ערכו הממוצע של מתח המוצא:	$V_{o(avg)} = \frac{V_{o(max)}}{\pi}$
ערכו היעיל (האפקטיבי) של מתח המוצא:	$V_{o(RMS)} = \frac{V_{o(max)}}{2}$

מיישר גל שלם עם שנאי בעל סנף מרכזי:



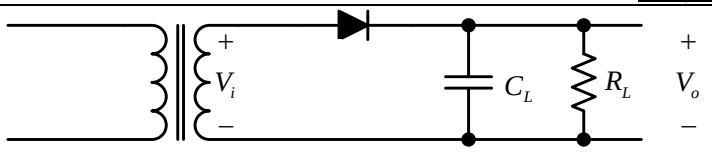
ערכו המכסימלי של מתח המוצא:	$V_{o(max)} = V_{i(max)} - V_D$
ערכו הממוצע של מתח המוצא:	$V_{o(avg)} = \frac{2 \cdot V_{o(max)}}{\pi}$
ערכו היעיל (האפקטיבי) של מתח המוצא:	$V_{o(RMS)} = \frac{V_{o(max)}}{\sqrt{2}}$
מתח הפוך מכסימלי על הדקי דיודה:	$\left\|V_{D(rev_{max})}\right\| = 2 \cdot V_{i(max)} - V_D$

מיישר גל שלם עם 4 דיודות (גשר):

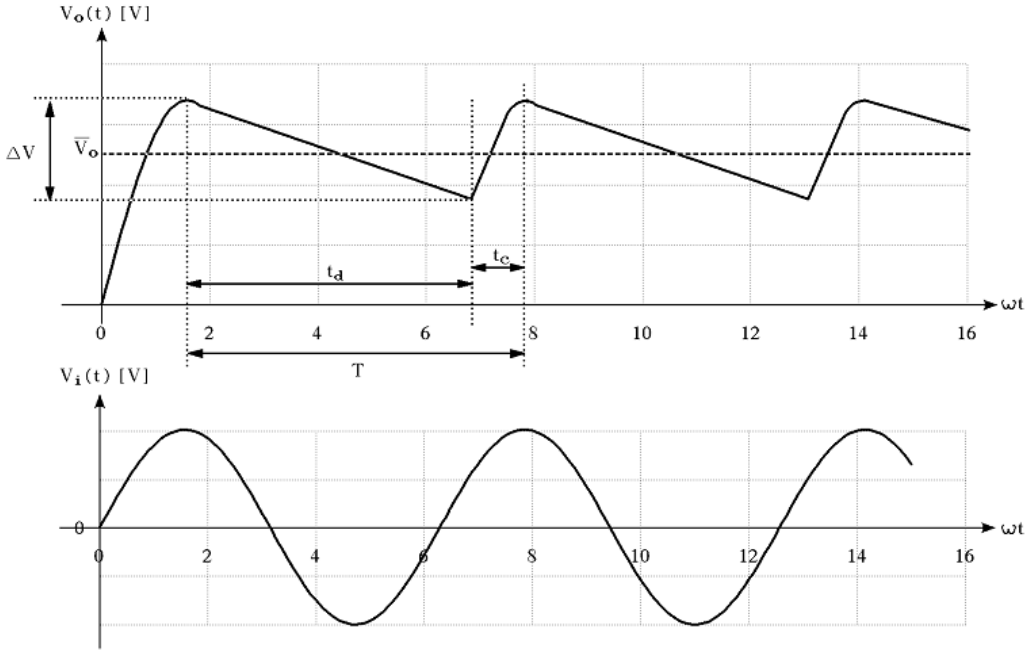


ערכו המכסימלי של מתח המוצא:	$V_{o(max)} = V_{i(max)} - 2 \cdot V_D$
ערכו הממוצע של מתח המוצא:	$V_{o(avg)} = \frac{2 \cdot V_{o(max)}}{\pi}$
ערכו היעיל (האפקטיבי) של מתח המוצא:	$V_{o(RMS)} = \frac{V_{o(max)}}{\sqrt{2}}$
מתח הפוך מכסימלי על הדקי דיודה:	$\left\|V_{D(rev_{max})}\right\| = V_{i(max)} - V_D$

מיישר חצי גל עם קבל :

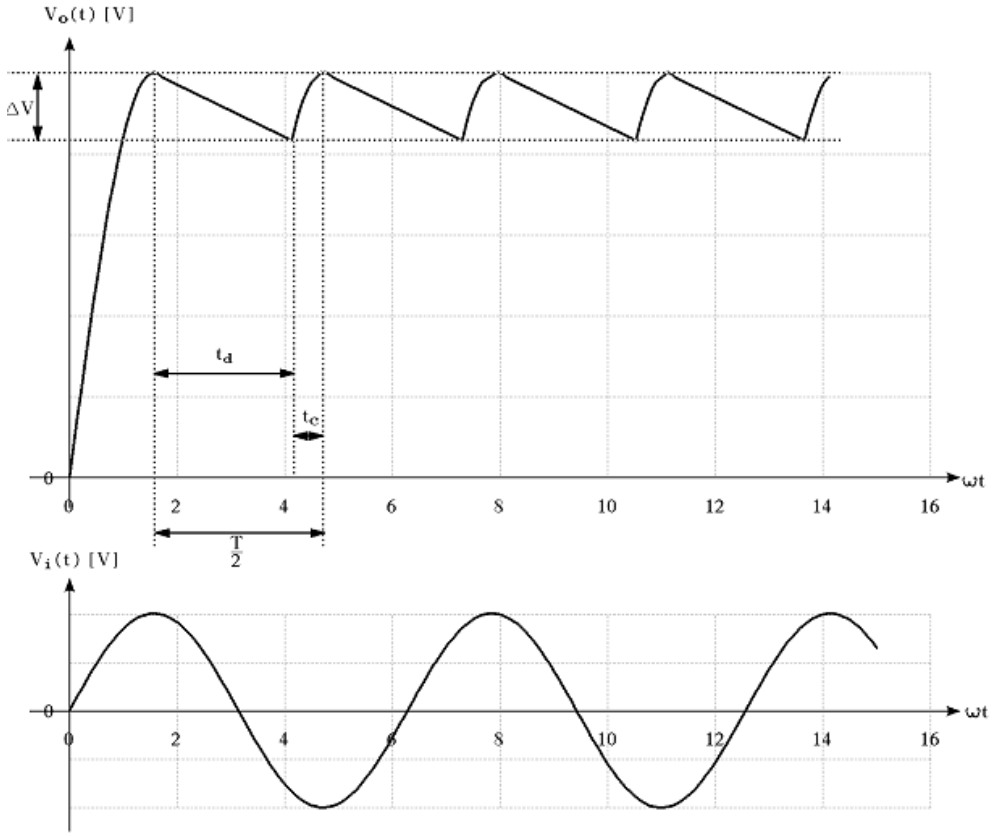


צורות גלים במוצא :



מתח שיא :	$V_{o(max)}$
שינוי מתח המוצא	$\Delta V = \frac{V_{o(max)}}{R \cdot C \cdot f}$
מתח מינימלי :	$V_{o(min)} = V_{o(max)} - \Delta V = V_{o(max)} - \frac{V_{o(max)}}{R \cdot C \cdot f}$
מתח מוצא ממוצע :	$V_{o(avg)} = V_{o(max)} - \frac{V_{o(max)}}{2 \cdot R \cdot C \cdot f}$

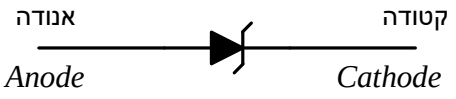
מיישר גל שלם עם קבל :



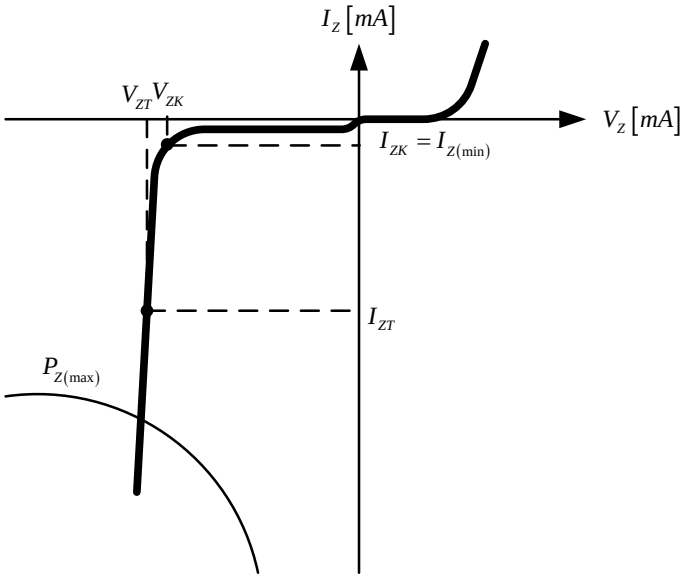
מתח שיא:	$V_{o(max)}$
שינוי המתח המוצא	$\Delta V = \frac{V_{o(max)}}{2 \cdot R \cdot C \cdot f}$
מתח מינימלי:	$V_{o(min)} = V_{o(max)} - \Delta V = V_{o(max)} - \frac{V_{o(max)}}{2 \cdot R \cdot C \cdot f}$
מתח מוצא ממוצע:	$V_{o(avg)} = V_{o(max)} - \frac{V_{o(max)}}{4 \cdot R \cdot C \cdot f}$

13. דיודת זנר - Zener Diode

סימון דיודת זנר:



אופיין של דיודת זנר:



פרמטרים אופייניים של דיודת זנר:

$I_{ZK}, I_{Z(\min)}$ - זרם ברך(Knee).

נקודת ברך מוגדרת כנקודת גבול בין אזור הקטעון ואזור הפריצה. זהו זרם מינימלי הדרוש לפריצת הדיודה.

V_{ZK} - מתח הברך.

I_{ZT} - זרם בנקודת עבודה אופיינית (Test). נקודה זו מוגדרת כנקודה בה הדיודה מפזרת $\frac{1}{4}$ מההספק המרבי $P_{Z(\max)}$.

V_{ZT} - מתח בנקודת עבודה אופיינית:

$$V_{ZT}\cdot I_{ZT}=\frac{1}{4}\cdot P_{Z(\max)}$$

$P_{Z(\max)}$ - הספק מרבי של דיודת זנר: מוגדר כ: $P_{Z(\max)}=V_{Z(\max)}\cdot I_{Z(\max)}$.

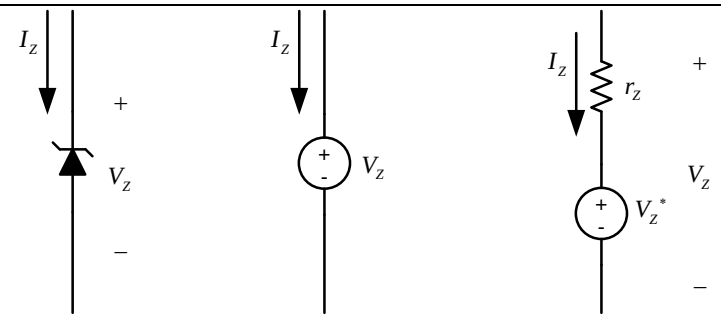
r_z - התנגדות הדיודה בתחום הפריצה. התנגדות זו נמדדת בנקודה האופיינית:

$$r_z=\frac{dV_Z}{dI_Z}\Big|_{TEST}$$

$T.C.$ - מקדם טמפרטורה. קיימות שתי הגדרות למקדם טמפרטורה:

$$T.C.=\frac{\left(\frac{\Delta V_Z}{V_Z}\right)}{\Delta T}\cdot 100[\%] \qquad T.C.=\frac{\Delta V_Z}{\Delta T}\cdot 100[\%]$$

מודלים ליניאריים לדיודת זנר בתחום הפריצה:

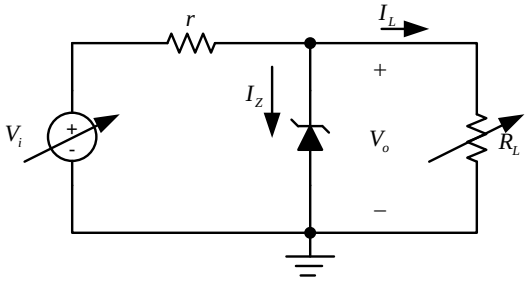


מודל של דיודת זנר ללא התנגדות פנימית

מודל של דיודת זנר עם התנגדות פנימית

מייצב מתח עם דיודת זנר:

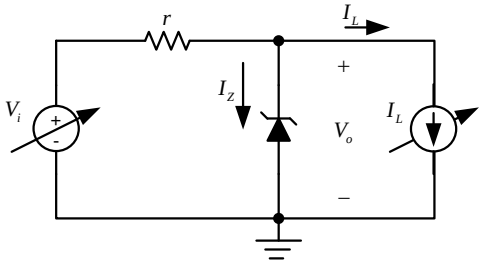
עומס התנגדותי:



חישוב תחום ערכי הנגד r:

$$r_{min} = \frac{V_{i(max)} - V_{Z(max)}}{I_{Z(max)} + I_{L(min)}}$$

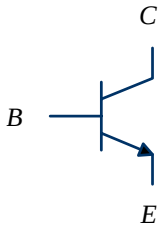
עומס עם מקור זרם:



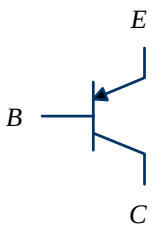
$$r_{max} = \frac{V_{i(min)} - V_{Z(min)}}{I_{Z(min)} + I_{L(max)}}$$

14. טרנזיסטור ביפולרי – (BJT) Bipolar Transistor

סוגים של טרנזיסטור ביפולרי:



npn



pnp

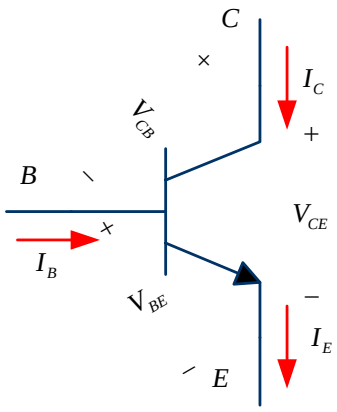
ההדקים של טרנזיסטור ביפולרי:

C – קולקטור (קולט)

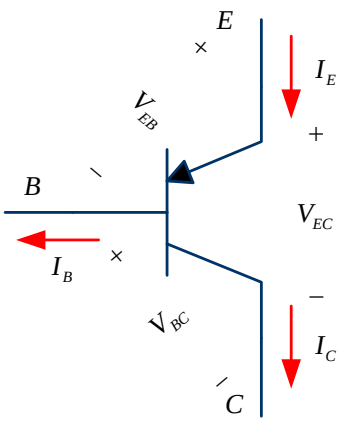
B - בסיס

E – אמיטר (פולט)

סימון מתחים וזרמים בטרנזיסטור ביפולרי:



npn



pnp

PNP	NPN
$I_E = I_C + I_B$	$I_E = I_C + I_B$
קשר בין מתחים בטרנזיסטור PNP: $V_{EC} = V_{BC} + V_{EB}$	קשר בין מתחים בטרנזיסטור NPN: $V_{CE} = V_{BE} + V_{CB}$

מצב פעיל

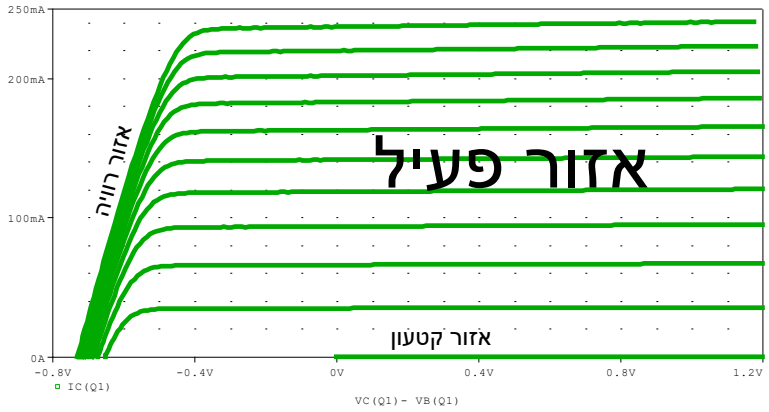
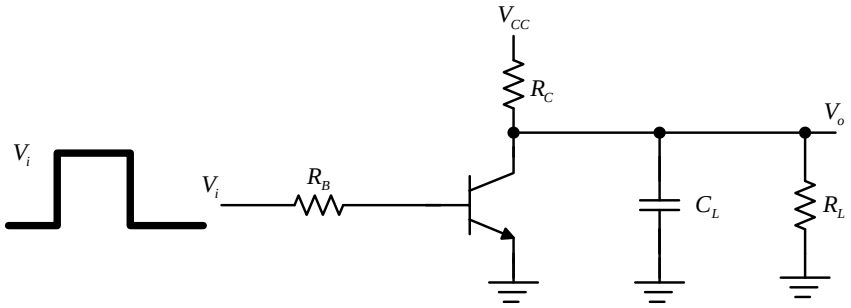
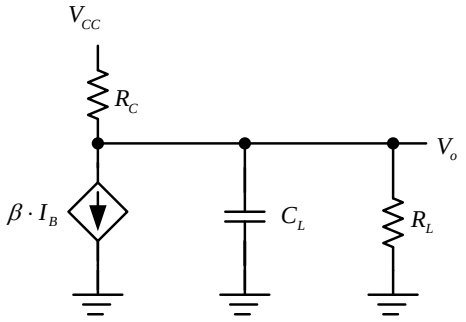
במצב פעיל מתקיים:	במצב פעיל מתקיים:
1. $\beta \cdot I_B = I_C$	1. $\beta \cdot I_B = I_C$
2. $V_{EC} > V_{EB}$ $(V_{BC} > 0)$	2. $V_{CE} > V_{BE}$ $(V_{CB} > 0)$

קשרים בין הזרמים במצב פעיל:

$$I_C = \beta \cdot I_B = \frac{\beta}{\beta+1} \cdot I_E$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{I_E}{\beta+1}$$

$$I_E = (\beta+1) \cdot I_B = \frac{\beta+1}{\beta} \cdot I_C$$

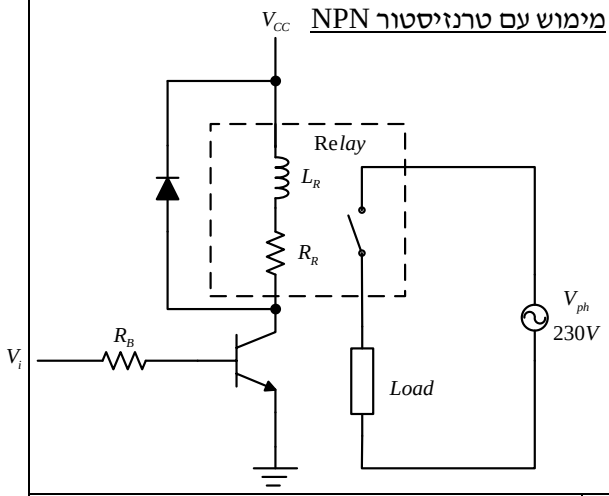
מצב רוויה	
תנאים למצב רוויה:	תנאים למצב רוויה:
1. $\beta \cdot I_B > I_C$ 2. $V_{EC} < V_{EB}$, $V_{CB} < 0$	1. $\beta \cdot I_B > I_C$ 2. $V_{CE} < V_{BE}$ $V_{CB} < 0$
ברוויה: $V_{EC} = V_{ECS}$ $V_{EB} = V_{EBS}$	$V_{CE} = V_{CES}$ $V_{BE} = V_{BES}$
מצב קטעון Cutoff	
במצב קטעון: $I_B = 0$	במצב קטעון: $I_B = 0$
בקטעון $V_{BE} = V_{EB} < V_{BE\gamma}$; $I_C = I_{CEO} \approx 0$	
אופיין מוצא של טרנזיסטור ביפולרי	
	
הספק של טרנזיסטור ביפולרי: $P_Q = V_{BE} \cdot I_B + V_{CE} \cdot I_C$	
טרנזיסטור ביפולרי כמתג לעומס קיבולי:	
	
מתח המוצא בזמן $t = 0^-$:	$V_o = V_{CC} \cdot \frac{R_L}{R_L + R_C}$
מעגל תמורה כאשר הטרנזיסטור מקבל מתח חיובי בבסיס:	
$V_{CE_{sat}} \le V_o < V_{CC} \cdot \frac{R_L}{R_L + R_C}$	

תנאי לרוויית הטרנזיסטור:

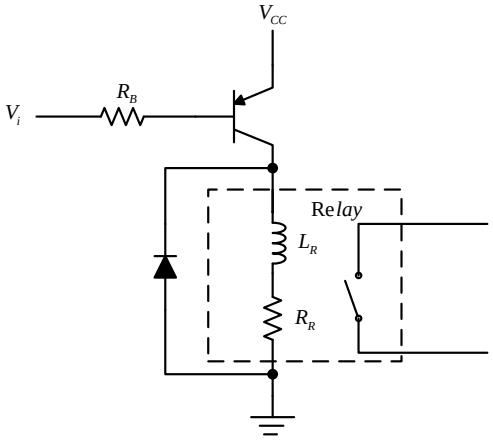
$$I_B = \frac{V_i('1') - V_{BE}}{R_B} \qquad \beta \cdot I_B > \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{R_C} - \frac{V_{CEsat}}{R_L}$$

טרנזיסטור ביפולרי כמתג לעומס השראי (חיבור ממסר):

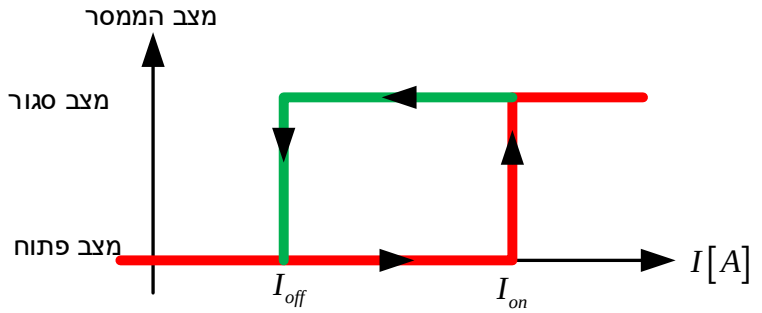
מימוש עם טרנזיסטור NPN



מימוש עם טרנזיסטור PNP

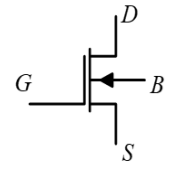
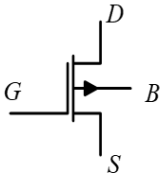
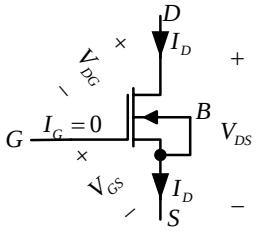
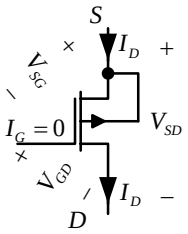
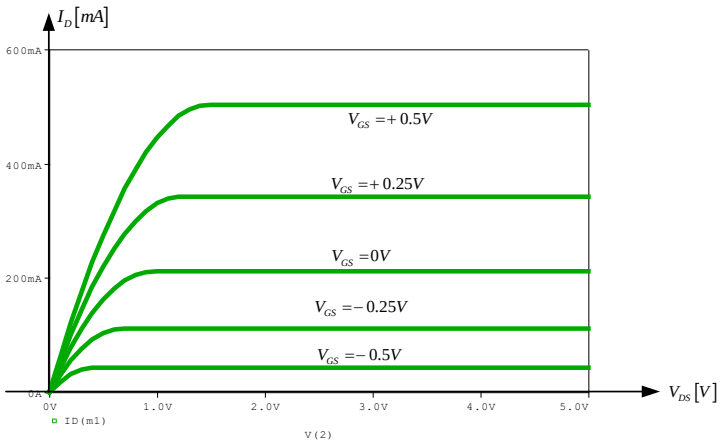


פרמטרים של ממסר:	
I_{on} - זרם תפיסה	זרם תפיסה הוא זרם מינימלי הגורם לסגירת המגע החשמלי.
I_{off} - זרם שחרור	זרם שחרור הוא זרם בו המגע של הממסר נפתח
בממסר מתקיים תמיד: $I_{on} > I_{off}$	
אופיין של ממסר מתואר באיור:	

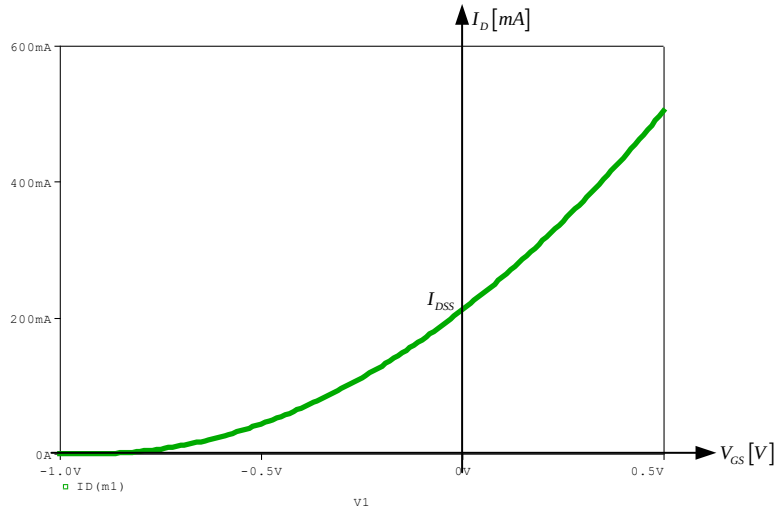


תנאי לרוויה במצב מתמיד:	$\beta \cdot I_B > \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{r}$
זרם בסיס במצב הולכה של הטרנזיסטור:	$I_B = \frac{V - V_{BE}}{R_B}$

15. טרנזיסטור MOSFET

טרנזיסטור MOSFET מסוג depletion (מחסור) D-MOSFET	
N-Channel	P-Channel
סימון:	
 *Depletion MOSFET* *n – channel*	 *Depletion MOSFET* *p – channel*
	הדקי הטרנזיסטור: שפך – Drain – D מקור – Source - S שער – Gate – G מצע – Substrate B (SS)
מתחים וזרמים בטרנזיסטור D-MOSFET:	
	
אופיין מוצא של טרנזיסטור N-Channel D-MOSFET:	
	

אופיין דינמי של טרנזיסטור N-Channel D-MOSFET :



משוואת הטרנזיסטור במצב רוויה ותנאי לרוויה :

$$|V_{DS}| > |V_P| - |V_{GS}| \qquad I_D = I_{DSS} \cdot \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right)^2$$

I_D - זרם הזורם בהדקי D ו-S

I_{DSS} - זרם הזורם במצב רוויה בהדקי D ו-S כאשר $V_{GS} = 0V$

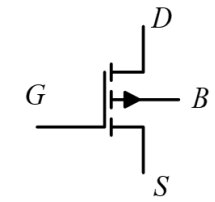
$V_p = V_{GS(off)}$ - מתח צביטה pinch off voltage

V_{GS} - מתח בין שער G ומקור S

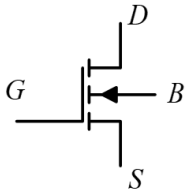
טרנזיסטור MOSFET מסוג enhancement (העשרה) E-MOSFET

P -Channel	N-Channel

סימון :

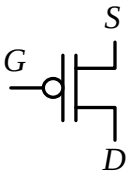


Enhancement MOSFET
p – channel

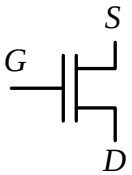


Enhancement MOSFET
n – channel

סימונים חילופיים :



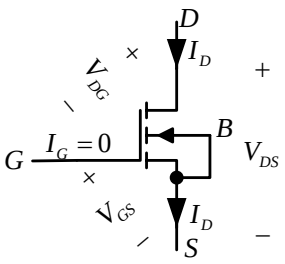
Enhancement MOSFET
p – channel

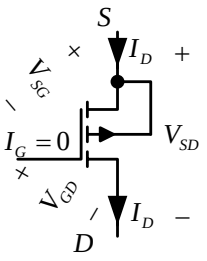


Enhancement MOSFET
n – channel

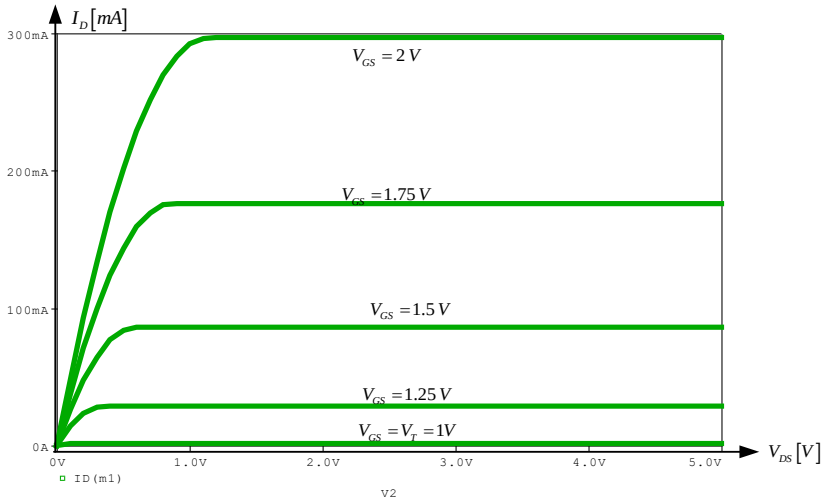
הדקי הטרנזיסטור :
D – Drain – שפך
S - Source – מקור
G – Gate – שער
B (SS) – Substrate מצע

מתחים וזרמים בטרנזיסטור E-MOSFET:

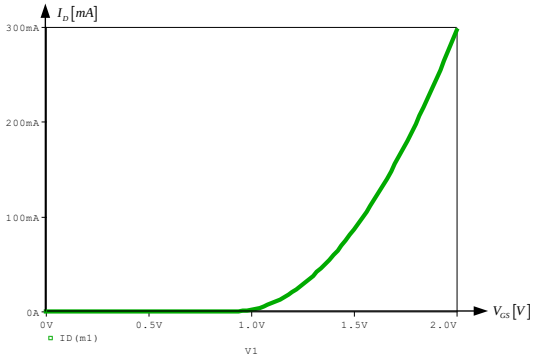




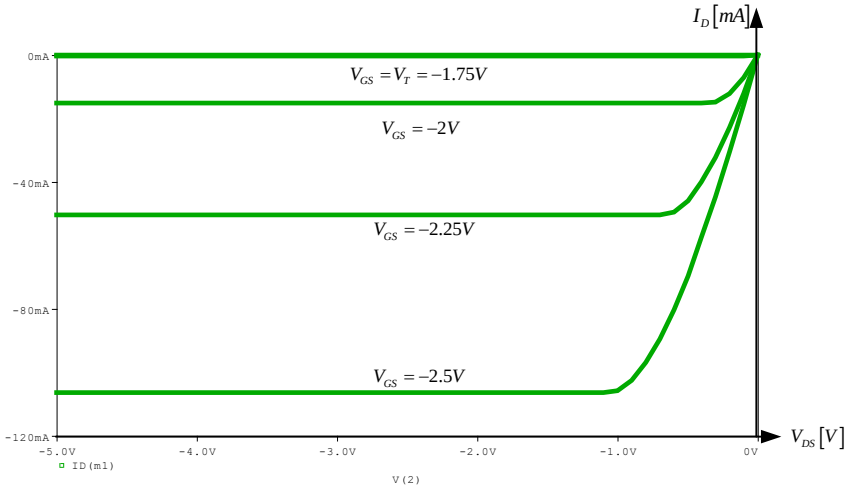
אופיין מוצא של טרנזיסטור N-Channel E-MOSFET:



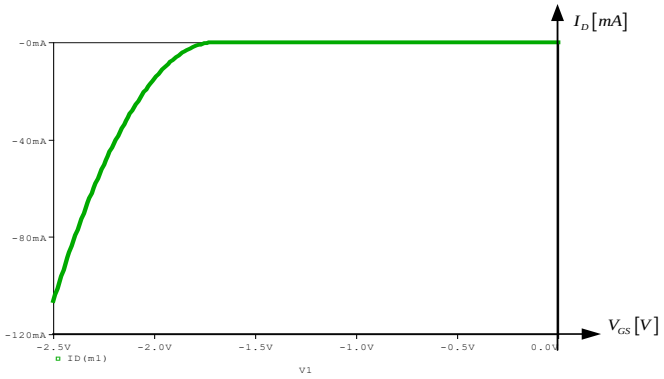
אופיין דינמי של טרנזיסטור N-Channel E-MOSFET



אופיין מוצא של טרנזיסטור P-Channel E-MOSFET :



אופיין דינמי של טרנזיסטור P-Channel E-MOSFET :



משוואת הטרנזיסטור במצב רוויה ותנאי לרוויה :

$$|V_{DS}| > |V_{GS}| - |V_T| \qquad I_D = k \cdot (V_{GS} - V_T)^2$$

I_D - זרם הזורם בהדקי D ו-S

V_T - מתח סף Threshold Voltage

k - קבוע הטרנזיסטור $\quad k = k' \cdot \frac{W}{L}$

W - רוחב התעלה

L - אורך התעלה

משוואת הטרנזיסטור במצב אוהמי ותנאי למצב אוהמי :

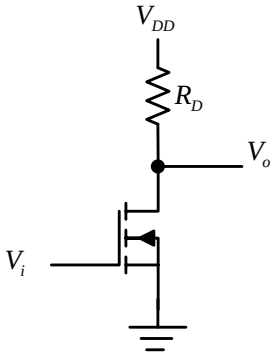
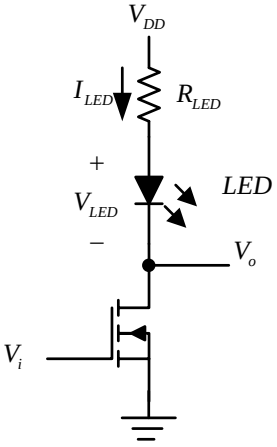
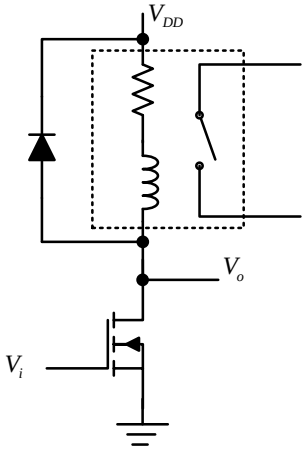
$$|V_{DS}| < |V_{GS}| - |V_T| \qquad I_D = K \cdot \left[2 \cdot (V_{GS} - V_T) \cdot V_{DS} - V_{DS}^{\,2} \right]$$

התנגדות הטרנזיסטור במצב אוהמי :

$$R_D = \frac{1}{2 \cdot k \cdot \left[V_{GS} - V_T - V_{DS} \right]} \overset{V_{DS} \approx 0V}{\approx} \frac{1}{2 \cdot k \cdot (V_{GS} - V_T)}$$

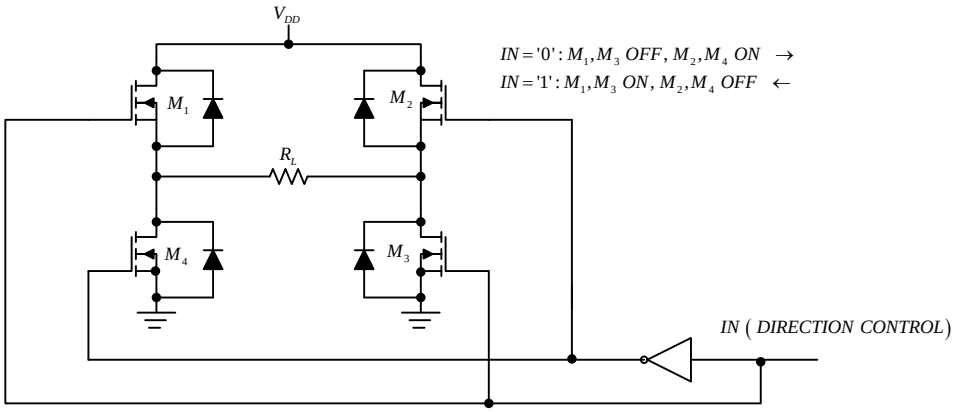
הספק פיזור בטרנזיסטור MOSFET : $P = V_{DS} \cdot I_D$

חיבורים שונים של טרנזיסטור E-MOSFET כדוחף:

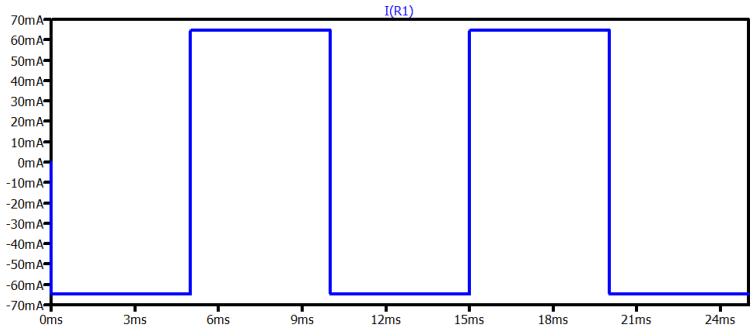
חיבור עומס אוהמי:	חיבור דיודת LED:	חיבור ממסר:
		

לפעולה תקינה של המעגלים יש להבטיח שהטרזיסטור יהיה במצב אוהמי ולא מצב רוויה.

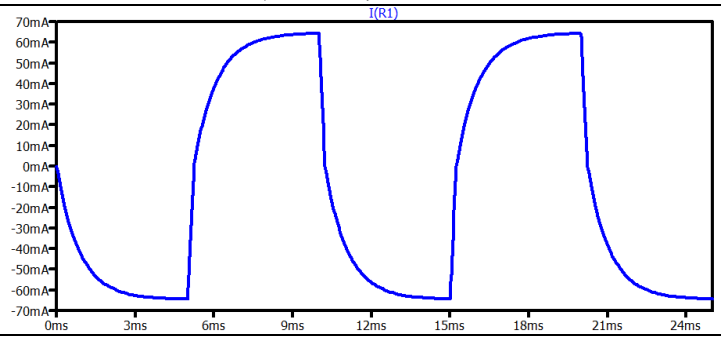
גשר H-Bridge להפיכת כוון הזרם דרך העומס:



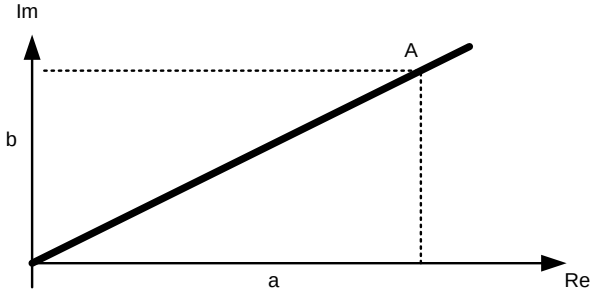
צורות גלים במעגל: זרם בעומס התנגדותי טהור:



צורות גלים במעגל: זרם בעומס המורכב מסליל ונגד (עומס RL):



16. מתמטיקה

שטח חתך של מוליך בעל קוטר D או רדיוס r:	$A=\pi\cdot r^2=\pi\cdot\frac{D^2}{4}$
רישום קרטזי של מספר מרוכב $\left(j=\sqrt{-1}\right)$	$x=a+jb$
רישום פולרי:	$x=A\angle\theta=A\cdot^{j\theta}$
ערך מוחלט:	$\lvert x\rvert=A=\sqrt{a^2+b^2}$
זווית מופע במישור המרוכב ומרכיביו של מספר מרוכב:	$\theta=\tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right)$ $a=A\cdot\cos\theta$ $b=A\cdot\sin\theta$
מספר מרוכב צמוד:	$X^*=a-jb=A\cdot e^{-j\theta}$
תאור גיאומטרי של מספר מרוכב:	
	
	$x=a+jb$ $y=c+jd$
	$x+y=(a+c)+j(b+d)$ $x-y=\left(a-c+j(b-d)\right)$

כפל קרטזי:

$$x\cdot y=(a+jb)\cdot(c+jd)=(a\cdot c-b\cdot d)+j(a\cdot d+b\cdot c)$$

כפל פולרי:

$$x\cdot y=(A_1\angle\theta_1)\cdot(A_2\angle\theta_2)=A_1\cdot A_2\angle(\theta_1+\theta_2)$$

חילוק קרטזי:

$$\frac{x}{y}=\frac{a+jb}{c+jd}=\frac{(a+jb)\cdot(c-jd)}{(c+jd)\cdot(c-jd)}=\frac{(a\cdot c+b\cdot d)+j(b\cdot c-a\cdot d)}{c^2+d^2}$$

חילוק פולרי:

$$\frac{x}{y}=\frac{A_1\angle\theta_1}{A_2\angle\theta_2}=\frac{A_1}{A_2}\cdot(\theta_1-\theta_2)$$