נוסחאון מה״ט לבחינה

97111

תורת החשמל

ומבוא לאלקטרוניקה

לטכנאים והנדסאים

מגמת הנדסת בקרה ואוטומציה

מקצועות:
תורת החשמל - 3959
מבוא לאלקטרוניקה - 3958

מספר	מהדורה מספר	תאריך
97111	4	02/25

נוסחאון תורת החשמל ומבוא לאלקטרוניקה - 97111

ראשי פרקים

תורת החשמל

1. ערכים פיזיקליים - סימונים ויחידות 3
2. מבוא ומושגי יסוד 7
3. מעגלי זרם ישר 9
4. מגנטיות ואלקטרומגנטיות 16
5. אלקטרודינמיקה 23
6. אלקטרוסטטיקה 27
7. תופעות מעבר מסדר ראשון, תגובה לאות מדרגה 29
8. אותות 31
9. מעגלי זרם חילופין 40
10. הספקים במתח חילופין 44
11. מעגלי תהודה 46
12. רשתות תלת פאזיות 50

מבוא לאלקטרוניקה

13. דיודות ומעגלי יישור 52
14. טרנזיסטור ביפולרי 57
15. מגברי שרת 59

תורת החשמל

1. ערכים פיזיקליים - סימונים ויחידות

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

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:

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

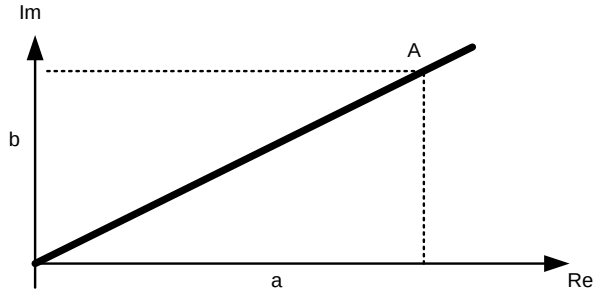
קבועים פיזיקליים - Physical Constants

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	$\varepsilon_0 = \frac{1}{36}\cdot10^{-9} = 8.85\cdot10^{-12}$

המרת טמפרטורה:

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

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:

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

2. <u>מושגים בסיסיים בחשמל</u>

המטען החשמלי

$$\boxed{I = \frac{Q}{t}}$$

I - הזרם העובר במוליך $[A]$

Q - כמות המטען החשמלי $[c]$

t - משך הזמן $[sce]$

תלות התנגדות בתכונות החומר ומידותיו

$$\boxed{R = \rho \frac{\ell}{\mathrm{A}}}$$

R - מסמן את ההתנגדות החשמלית (Ω)

ℓ - אורך המוליך (m)

A - שטח חתך של מוליך (mm^2)

ρ - התנגדות סגולית, סוג החומר ממנו עשוי המוליך $\left(\frac{\Omega mm^2}{m}\right)$

תלות ההתנגדות בטמפרטורה

$$\boxed{R_{(T)} = R_0 \cdot \left[1 + \alpha \cdot \left(T - T_0\right)\right]}$$

$R_{(T)}$ - התנגדות המוליך בטמפרטורה מסוימת (Ω).

R_0 - התנגדות המוליך בטמפרטורה התחלתית (Ω).

α - מקדם טמפרטורה של המוליך, תלוי בסוג החומר, ביחידות $\left(\frac{1}{^\circ c}\right)$.

מוליכות חשמלית

$$\boxed{G = \frac{1}{R}}$$

G - מסמן את מוליכות חשמלית $[S]$.

R - מסמן את ההתנגדות החשמלית $[\Omega]$.

חוק אוהם

$$\boxed{R=\frac{U}{I}}$$

U - מסמן את המתח החשמלי ביחידות $[V]$

I - מסמן את הזרם החשמלי ביחידות אמפר $[A]$

R - מסמן את ההתנגדות החשמלית ביחידות אום $[\Omega]$

אנרגיה חשמלית

$$\boxed{W=Q\cdot U=U\cdot I\cdot t=\frac{U^2}{R}\cdot t}$$

W – האנרגיה החשמלית $[J]$

Q – המטען החשמלי $[C]$

U - מתח המעגל $[V]$

I - הזרם במעגל $[A]$

R - התנגדות המעגל $[\Omega]$

t - הזמן בו נמשכת זרימת הזרם $[sec]$

הספק חשמלי

$$\boxed{P=\frac{W}{t}=I\cdot U=\frac{U^2}{R}=I^2\cdot R}$$

P - הספק $[W]$

t - הזמן בו נמשכת זרימת הזרם $[sec]$

R - מסמן את ההתנגדות החשמלית ביחידות אום $[\Omega]$

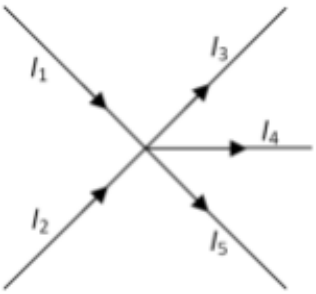
U - מתח המעגל $[V]$

3. מעגלי זרם ישר

חוק הזרמים של קירכהוף Kirchhoff's Current Law (KCL)

חוק הצומת וקובע כי סכום הזרמים הנכנסים לצומת שווה לסכום הזרמים היוצאים ממנה.

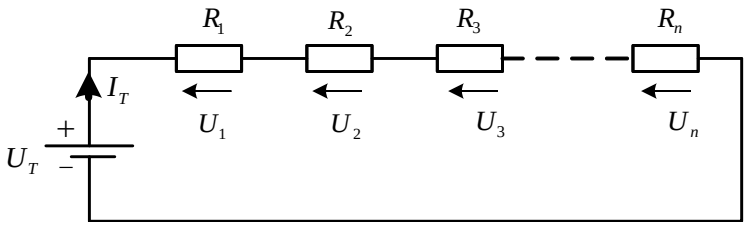
צומת היא נקודה שאליה מחוברים אחד הקצוות של שלושה ענפים לפחות.



$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5$$

חיבור טורי

מעגל טורי הוא מעגל חשמלי שבו הנגדים מחוברים אחד אחרי השני, בנקודת חיבור אחת. הזרם במעגל זה שווה בין כל רכיבי המעגל.



חוק המתחים של קירכהוף: סכום מפלי המתח על כל אחד מהנגדים שווה למתח המקור.

$$U_T = U_1 + U_2 + U_3 + ... + U_n$$

ההתנגדות שקולה

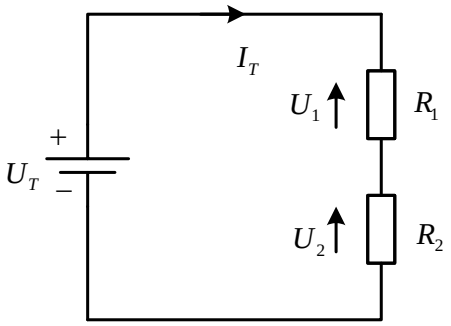
$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + ... + R_n$$

כאשר הנגדים הם בעלי התנגדות זהה

$$R_T = n \cdot R$$

n - מספר נגדים המחוברים בטור.

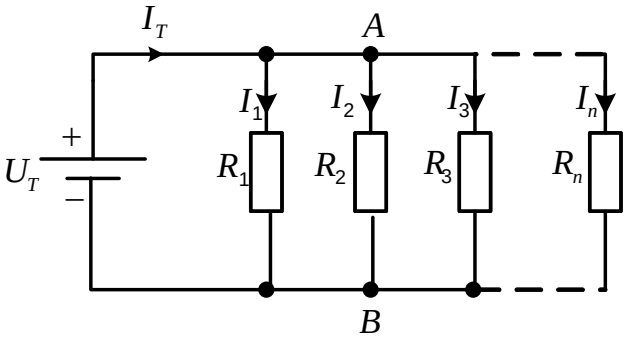
מחלק מתח שני נגדים בטור



$U_2 = U_T \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$	$U_1 = U_T \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$

חיבור מקבילי

רכיבים חשמליים מחוברים זה לזה בשני נקודות חיבור, מתח זהה שורר בין הדקי הרכיבים.



חוק הזרמים של קירכהוף (חוק הצומת): סכום הזרמים בצומת שווה לאפס.
סכום הזרמים הנכנס לצומת שווה לסכום הזרמים שיוצא מהצומת.

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 + ... I_n$$

התנגדות שקולה

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + ... \frac{1}{R_n}}$$

ההתנגדות השקולה של שני נגדים במקביל

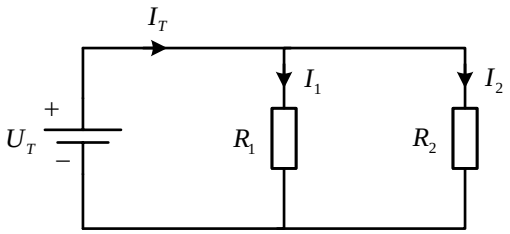
$$R_T = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

חיבור מקבילי של נגדים זהים

$$R_T = \frac{R}{n}$$

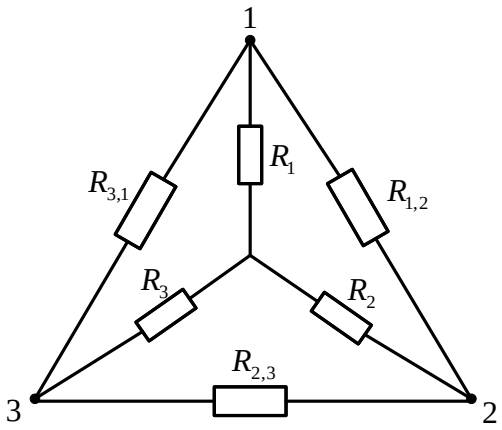
n - מספר נגדים המחוברים בטור.

מחלק זרם



$I_1 = I_T \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$	$I_2 = I_T \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$

המרת כוכב משולש



$$R_{1,2} = \frac{R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3}{R_3}$$

$$R_{2,3} = \frac{R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3}{R_1}$$

$$R_{1,3} = \frac{R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3}{R_2}$$

המרת משולש כוכב

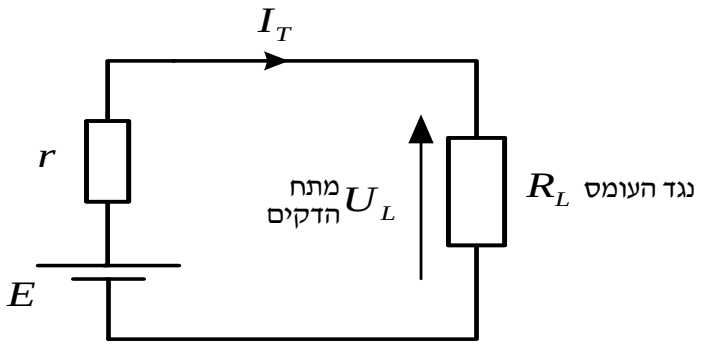
$$R_1 = \frac{R_{3,1} \cdot R_{1,2}}{R_{1,2} + R_{2,3} + R_{3,1}}$$

$$R_2 = \frac{R_{1,2} \cdot R_{2,3}}{R_{1,2} + R_{2,3} + R_{3,1}}$$

$$R_3 = \frac{R_{2,3} \cdot R_{3,1}}{R_{1,2} + R_{2,3} + R_{3,1}}$$

חיבור תאים ומקורות מתח

מתח ההדקים של סוללה ממנה לא צורכים זרם נקרא כוח אלקטרו מניע (כא"מ), והוא מבטא את העבודה המושקעת להעברת המטען מההדק השלילי לחיובי בתוך מקור המתח. כוח האלקטרו מניע מסומן באות E.



לפי חוק המתחים של קירכהוף:

$$E = \Delta U_r + U_L = I \cdot r + I \cdot R_L$$

ΔU_r: מפל המתח על ההתנגדות הפנימית

U_L: מפל מתח על הצרכן

הזרם במעגל:

$$\boxed{I = \frac{E}{r + R_L}}$$

I - הזרם החשמלי ביחידות אמפר $[A]$

E - כא"מ- כוח אלקטרומניע $[V]$.

U_L- מתח הדקים, המתח בין הדקי מקור המתח כאשר זורם דרכו זרם $[V]$.

r - התנגדות פנימית של מקור המתח $[\Omega]$.

הספקים במעגל

הספק שמייצרת הסוללה

$$\boxed{P_T = I_T \cdot E_T = P_r + P_{R_L}}$$

הספק שמתבזבז בסוללה

$$\boxed{P_r = I_T{}^2 \cdot r_T}$$

הספק שנצרך ע"י הצרכן

$$\boxed{P_{R_L} = I_T{}^2 \cdot R_L = \frac{U^2}{R_L} = U \cdot I}$$

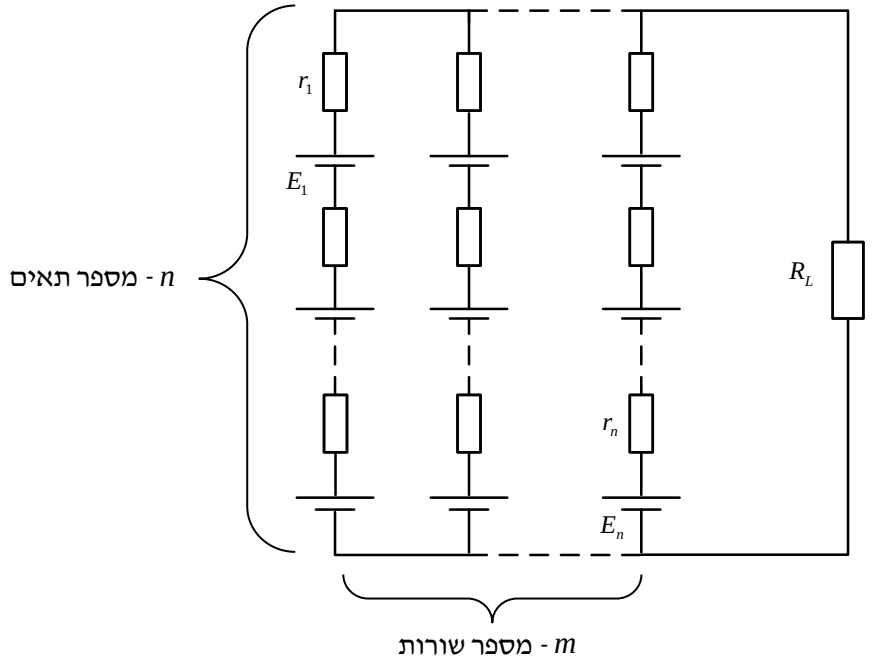
קיבול של תא חשמלי

$$Q = I \cdot t$$

Q - קיבול הסוללה (נמדד באמפר שעה) Ah
I - זרם הסוללה (נמדד באמפר) A
t - זמן פעולת הסוללה (נמדד בשעות) h

חיבור תאים במעורב

כאשר אנו מעוניינים בסוללה בעלת כוח אלקטרו מניע שקול, גבוהה מזו של תא בודד, ובעלת יכולת לספק זרם בעל עוצמה גבוהה מזו של תא בודד, עלינו להשתמש בסוללה בה מחוברים התאים בחיבור מעורב.



הכא"מ שקול

$$E_T = n \cdot E_1$$

התנגדות פנימית שקולה

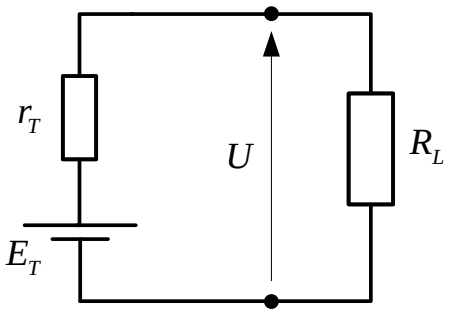
$$r_T = \frac{r_1 \cdot n}{m}$$

n - מספר תאים בכל שורה
m - מס' שורות/ענפים

הקיבול השקול

$$Q_T = Q_1 \cdot m$$

<u>הזרם במעגל השקול</u>



$$I_T = \frac{E_T}{r_T + R_L} = \frac{n \cdot E_1}{\frac{n \cdot r_1}{m} + R_L}$$

נצילות

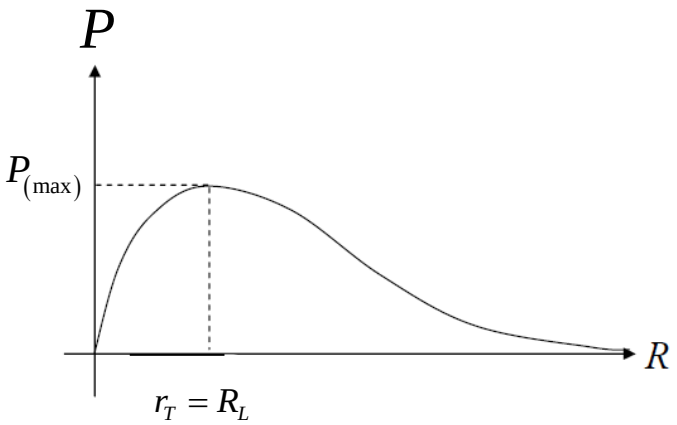
$$\boxed{\eta_{\%} = \frac{P_{RL}}{P_T} \cdot 100}$$

<u>התנאי לקבלת הספק מקסימלי</u>

התנאי לקבלת הספק מקסימלי הוא שההתנגדות הפנימית השקולה של הסוללה תהיה **<u>שווה</u>** להתנגדות העומס.

$$\boxed{r_T = R_L} \qquad \boxed{\frac{n \cdot r_1}{m} = R_L}$$

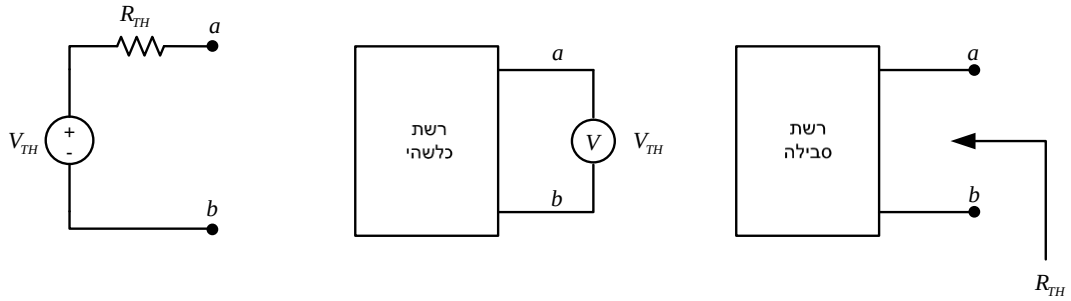
הגרף שלהלן, מציג את תלות ההספק בהתנגדות



בסידור הסוללה לקבלת הספק מקסימלי $r_T = R_L$, הנצילות במעגל תהיה שווה ל- 50% שכן:

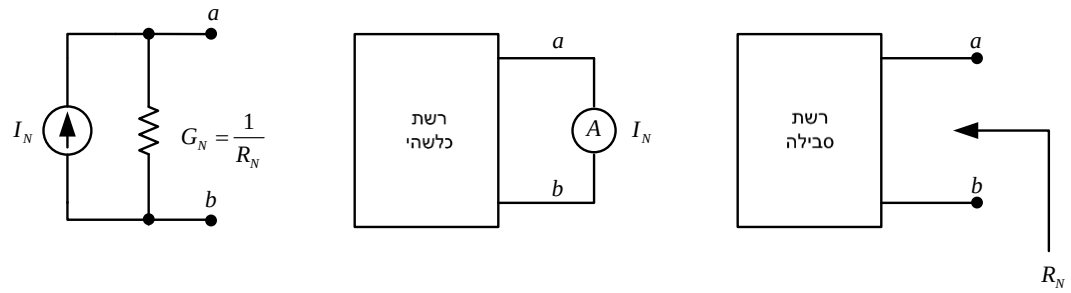
$$\eta_{\%} = \frac{P_{RL}}{P_T} \cdot 100$$

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.

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

הקשר בין מעגל תבנין ומעגל נורטון

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

4. מגנטיות ואלקטרומגנטיות

כוח מגנטו מניע

$$F_m = N \cdot I$$

F_m - כוח מגנטו מניע $[AT]$

I - הזרם העובר בסליל $[A]$

N - מספר כריכות הסליל $[T]$

צפיפות השטף המגנטי (ההשראה המגנטית)

$$B = \frac{\phi}{A}$$

B - צפיפות השטף המגנטי $\left[\frac{Wb}{m^2}\right]$

ϕ - השטף המגנטי $[Wb]$

A - שטח חתך $[m^2]$

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r H$$

H - עוצמת השדה המגנטי $\left[\frac{AT}{m}\right]$

μ_0 - *חדירות (חלחלות) הריק ביחידות* $\left[\frac{H}{m}\right]$

μ_r - *החדירות (חלחלות)* היחסית של הליבה.

עוצמת השדה המגנטי סביב מוליך נושא זרם

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

I - הזרם העובר במוליך $[A]$

r - המרחק מהמוליך $[m]$

H - עוצמת השדה המגנטי במרחק r מהמולך $\left[\frac{A}{m}\right]$

החדירות (חלחלות) המגנטית היחסית μ_r

לחומרים שונים יש חלחלות מגנטית שונה. חלחלות היא תכונת המוליכות המגנטית של החומר ומהווה מדד למידת הקלות או הקושי בו קווי השדה המגנטי מחלחלים בתוכו ועוברים דרכו. ניתן להציג את ה"מגנוט" של חומרים שונים באמצעות החדירות היחסית.

$$\boxed{\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}}$$

μ - *החדירות (חלחלות) המגנטית המוחלטת ביחידות* $\left[\frac{H}{m}\right]$

μ_0 - *חדירות (חלחלות) הריק ביחידות* $\left[\frac{H}{m}\right]$

μ_r - *החדירות (חלחלות)* היחסית של הליבה.

$\left[\frac{H}{m}\right]$ $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ - *בקירוב טוב. ניתן להשתמש בערך זה גם כמידת החדירות של האוויר*

עוצמת השדה המגנטי במרכז הסליל

כאשר מחברים את הסליל למקור מתח, עם החיבור מתחיל לזרום זרם ונוצר שדה מגנטי בתוך הסליל.

$$\boxed{H = \frac{I \cdot N}{l}}$$

I - הזרם העובר בסליל ביחידות אמפר $[A]$

N - מספר כריכות הסליל $[T]$

l - אורך הסליל ביחידות מטר $[m]$

H - עוצמת השדה המגנטי ביחידות אמפר כריכה למטר $\left[\frac{AT}{m}\right]$

השראות עצמית של הסליל על פי השטף והזרם

$$\boxed{L = \frac{N \cdot \phi}{I}}$$

I - הזרם העובר בסליל ביחידות אמפר $[A]$

N - מספר כריכות הסליל $[T]$

ϕ - השטף המגנטי $[Wb]$

הכא"מ המושרה בסליל כתוצאה משינוי השטף המגנטי בכריכות שבו

$$\boxed{E = -N\frac{d\phi}{dt}}$$

הכא"מ המושרה בסליל כתוצאה משינוי הזרם החשמלי הזורם בכריכות

$$\boxed{E = -L\frac{di}{dt}}$$

חדירות של חומר μ

$$\boxed{\mu = \frac{B}{H}}$$

B - צפיפות השטף המגנטי $\left[\frac{Wb}{m^2}\right]$

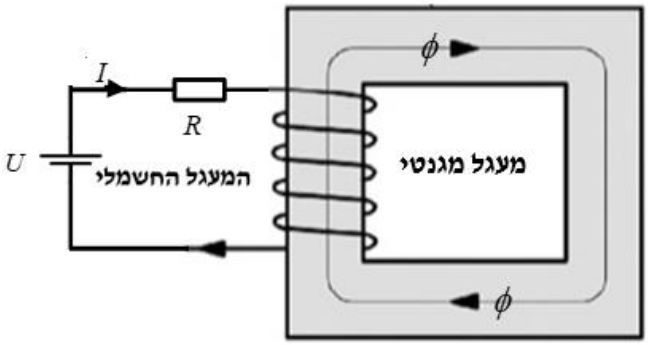
H - עוצמת השדה המגנטי $\left[\frac{AT}{m}\right]$

μ - החדירות (חלחלות) המגנטית המוחלטת ביחידות $\left[\frac{H}{m}\right]$

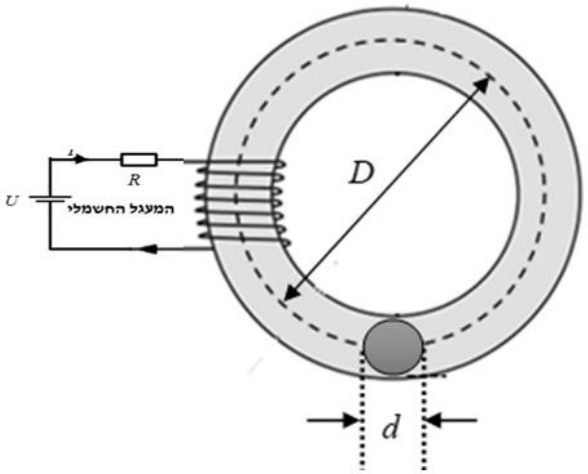
המעגל המגנטי

כאשר זורם זרם במעגל החשמלי, נוצר שדה מגנטי על ידי הסליל המלופף על המעגל המגנטי.
השדה המגנטי מורכב מקווי שדה המכונים שטף מגנטי. התחום בו עובר השטף המגנטי קרוי מעגל המגנטי.

מעגל מגנטי בצורת מלבנית



מעגל מגנטי בצורת טבעת



האורך הממוצע של טבעת

$$\boxed{\ell = \pi \cdot D}$$

ℓ – אורך המסלול המגנטי הממוצע ביחידות מטר $[m]$

D - הקוטר הממוצע של הטבעת $[m]$

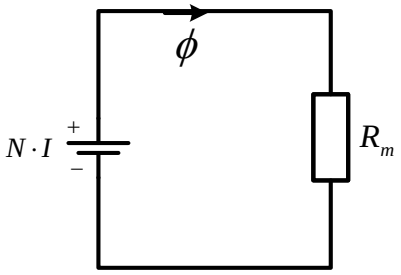
שטח החתך של הטבעת

$$\boxed{A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}}$$

A- שטח החתך של המעגל המגנטי ביחידות מטר רבוע $[m^2]$

d - הקוטר הממוצע של **שטח החתך** $[m]$

מעגל מגנטי אנלוגי



מיאון (התנגדות מגנטית)

$$R_m = \frac{M}{\phi} = \frac{\ell}{\mu \cdot A}$$

R_m - המיאון (התנגדות מגנטית) $\left[\frac{1}{H}\right]$

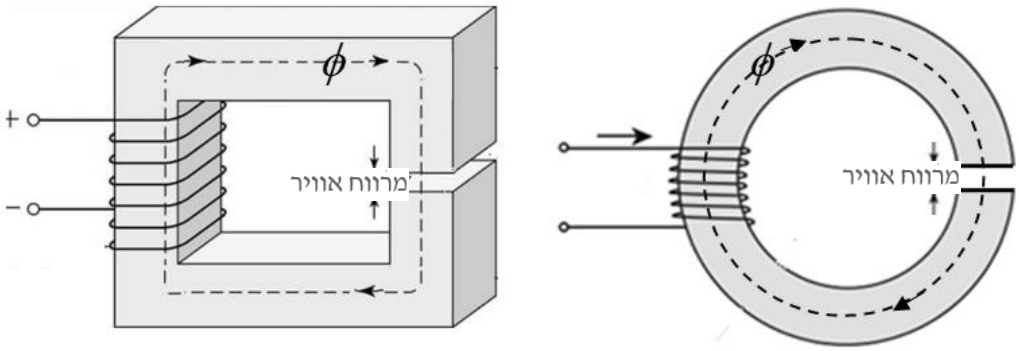
ℓ – אורך המסלול המגנטי הממוצע ביחידות מטר $[m]$

μ – החדירות (חלחלות) המגנטית המוחלטת ביחידות $\left[\frac{H}{m}\right]$

A – שטח החתך של המעגל המגנטי ביחידות מטר רבוע $\left[m^2\right]$

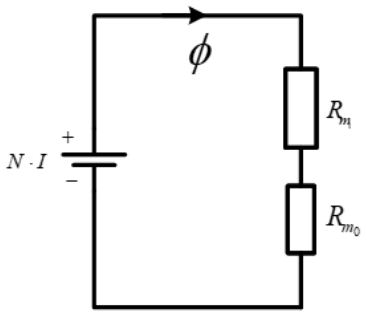
<u>מעגל מגנטי טורי עם ליבה וחריץ אוויר</u>

קווי השדה המגנטי הם קווים סגורים, ולכן יעברו הקווים גם דרך מרווח אוויר. השטף שיעבור דרך החומרים הפרומגנטיים במעגל, יעבור גם דרך מרווח האוויר.



המיאון השקול של מעגל טורי, שווה לסכום המיאונים של הקטעים המרכיבים את המעגל המגנטי השטף המגנטי במעגל הטורי

מעגל מגנטי אנלוגי



שטף מגנטי

$$\boxed{\phi = \frac{F_m}{R_{m_T}} = \frac{N \cdot I}{R_{m_T}}}$$

חוק אמפר

$$\boxed{\sum N \cdot I = \sum H \cdot \ell}$$

I - הזרם העובר בסליל ביחידות אמפר $[A]$

N – מספר כריכות הסליל $[T]$

l – אורך קטע מהמעגל הסגור, שלאורכו עצמת השדה המגנטי קבועה ביחידות מטר $[m]$

H- עוצמת השדה המגנטי ביחידות אמפר כריכה $\frac{[AT]}{m}$

לדוגמה:

$$N \cdot I = H_1 \cdot \ell_1 + H_2 \cdot \ell_2$$

המיאון השקול של מעגל טורי, שווה לסכום המיאונים של הקטעים המרכיבים את המעגל המגנטי.

$$\boxed{R_{m_T} = \frac{\ell_1}{\mu_0 \cdot \mu_{r1} \cdot \mathrm{A}_1} + \frac{\ell_2}{\mu_0 \cdot \mu_{r2} \cdot \mathrm{A}_2}}$$

השטף המגנטי במעגל הטורי:

$$\boxed{\phi = \frac{F_m}{R_{m_T}} = \frac{N \cdot I}{R_{m_T}}}$$

השראות עצמית של סליל המותקן על מעגל מגנטי

במעגל מגנטי השראות הסליל המלופף על הגרעין המרכזי תלויה במספר הכריכות ובהתנגדות המגנטית של המעגל.

$$\boxed{L=\frac{N^2}{Rm_T}}$$

L- השראות עצמית של הסליל ביחידות הנרי $[H]$

N – מספר כריכות הסליל $[T]$

R_m - *המיאון (התנגדות מגנטית) ביחידות אמפר כריכה לובר* $\left[\frac{1}{H}\right]$

האנרגיה המגנטית האגורה בסליל

$$\boxed{W_L=\frac{I^2\cdot L}{2}}$$

השראות הדדית שבין שני סלילים

$$\boxed{M=K\cdot\sqrt{L_1\cdot L_2}}$$

M - השראות הדדית בין שני סלילים $[H]$

K - מקדם צימוד השראי בין שני סלילים.

L_1 - השראות הסליל הראשון $[H]$

L_2 - השראות הסליל השני $[H]$

מקדם הצימוד ההשראי (K) שבין שני סלילים

מקדם צימוד יכול לקבל את הערכים הבאים $0<K<1$

כאשר $K=1$ - המשמעות היא, השטף המיוצר על ידי סליל אחד עובר כולו דרך הסליל השני (צימוד אידיאלי).

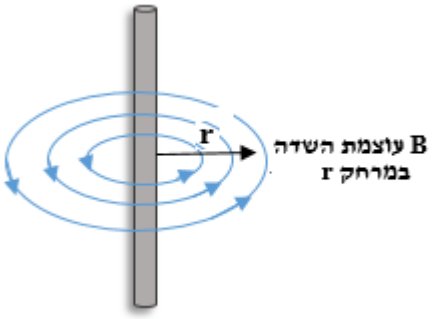
כאשר $K=0$ - השטף המיוצר על ידי סליל אחד אינו מקושר כלל לסליל השני ולכן הסלילים אמורים להיות מבודדים מבחינה מגנטית.

5. אלקטרודינמיקה

חוקי אלקטרודינמיקה מתייחסים לזרמים חשמליים אשר נוכחותם יוצרת שדה מגנטי.

שדה מגנטי סביב תיל ישר ארוך מאוד שנושא זרם חשמלי

התיל נושא הזרם, המטענים שנעים בתיל יוצרים שדה מגנטי. קווי השדה הם מעגלים, שמרכזם בציר התיל וצפיפותם הולכת ופוחתת עם התרחקות מהתיל.



$$\boxed{B=\frac{\mu_0\cdot\mu_r\cdot I}{2\pi\cdot r}}$$

B - צפיפות השדה המגנטי מחוץ למוליך (T).

r - המרחק מתיל אינסופי שדרכו זורם זרם (m).

I - הזרם במוליך $[A]$.

μ_0 - חדירות (חלחלות) הריק ביחידות $\left[4\pi\cdot10^{-7}\ \frac{H}{m}\right]$.

μ_r - החדירות (חלחלות) היחסית של הליבה.

כאשר המוליך נמצא באוויר, ניתן להניח $\mu_r=1$

חישוב הכוח ליחדת אורך בין שני מולכים מקביליים נושאי זרם

כאשר שני מוליכים ישרים ארוכים והמקבילים זה לזה **(אינסופיים)**, הכוח שהם מרגישים אינסופי. ולכן, במקרה זה נחשב את הכוח ליחידת אורך.

$$\boxed{\frac{F}{\ell}=\frac{\mu_0\cdot\mu_r\cdot I_1\cdot I_2}{2\pi\cdot d}\left[\frac{N}{m}\right]}$$

F - *הכוח הפועל בין שני תיילים* $[N]$

μ_0 - חדירות (חלחלות) הריק ביחידות $\left[4\pi\cdot10^{-7}\ \frac{H}{m}\right]$.

μ_r - החדירות (חלחלות) היחסית של האויר 1 .

ℓ - אורך המוליכים ביחידות מטר $[m]$

d - המרחק בין המוליכים ביחידות מטר $[m]$

I_1 - הזרם העובר במוליך הראשון *ביחידות אמפר* $[A]$

הכוח בין שני מולכים מקבילים נושאי זרם

$$\boxed{F = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \ell}{2\pi \cdot d}[N]}$$

הכוח האלקטרומניע (כא"מ) מושרה

כאשר מניעים מוליך בתוך שדה מגנטי בניצב לקווי הכוח המגנטי, יופיע בין קצוות המוליך כוח אלקטרו-מניע, ואם המוליך מהווה חלק ממעגל חשמלי סגור, יזרום בו זרם. פעולה זו קרויה השראה אלקטרומגנטית והכא"מ המתעורר בין קצוות המוליך נקרא כא"מ מושרה.

הכא"מ המושרה במוליך, הנע במהירות קבועה בתוך שדה מגנטי:

$$\boxed{E = B \cdot V \cdot \ell \cdot \sin\alpha}$$

B - צפיפות השטף המגנטי $\left[\frac{Wb}{m^2}\right]$

E - כא"מ מושרה במוליך $[V]$

ℓ - אורך המוליך בתוך השדה המגנטי $[m]$

V - מהירות תנועת המוליך $\left[\frac{m}{s}\right]$

α - הזווית בין כיוון תנועת המוליך לשטף המגנטי $[^\circ]$

חוק פרדיי

התנאי ליצירת מתח מושרה במעגל חשמלי הוא שינוי בשטף המגנטי במרחב בו נמצא המוליך. ערך הכא"מ המושרה שיוצר את הזרם המושרה פרופורציונלי לקצב השינוי של השטף המגנטי, ובמשך הזמן בו משתנה השטף המגנטי.

$$\boxed{E = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = -\frac{\phi_2 - \phi_1}{t_2 - t_2}}$$

E - כא"מ מושרה במוליך $[V]$

$\Delta\phi$ - שינוי השטף המגנטי $[Wb]$

Δt - הזמן בו שינוי השטף מתקיים $[\sec]$

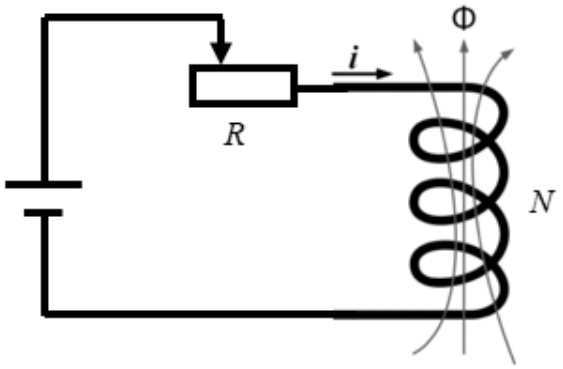
חוק לנץ

חוק לנץ הוא חוק הקובע את כיוון המתח המושרה, ומכאן גם את קוטביות הכא"מ המושרה.
חוק לנץ קובע שכוח אלקטרו-מניע מושרה יתנגד לסיבת היווצרותו, כלומר "ישאף" להקטין את עצמו.
הסימן מינוס מציין את העובדה שכיוון המתח המושרה מתנגד בפעולתו המגנטית לסיבת היווצרו.

$$E = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

השראות עצמית

אם נתבונן על סליל מוליך בו זורם זרם חשמלי, נראה כי הזרם החשמלי הזורם בסליל יוצר שדה מגנטי. בזכות המבנה, קווי השדה המגנטי שבתוך הסליל מתרכזים ומצטופפים ויוצרים יחד שדה מגנטי משמעותי בחלל הפנימי, הכלוא על ידי הסליל. לכן מחוץ לסליל השדה המגנטי חלש מאוד.



$$L = \frac{\mu_r \cdot \mu_0 n^2 A}{\ell}$$

n - מספר הכריכות

A - שטח חתך של כל אחת מהכריכות $[m]$

ℓ - אורך הסליל $[m]$

L - השראות הסליל $[H]$

הכוח הפועל על מטען הנע במהירות קבועה בתוך שדה מגנטי

מוליך נושא זרם הנמצא בשדה מגנטי, "מרגיש" כוח מגנטי כתוצאה מתנועה של מטענים (אלקטרונים) הנעים **בתוכו.** כוח זה הפועל על המוליך יגרום לתנועתו.

$$\boxed{F = BI\ell \sin\alpha}$$

F - *הכוח הפועל על מוליך נושא זרם* $[N]$

B - *צפיפות השטף* המגנטי $\left[\frac{Wb}{m^2}\right]$

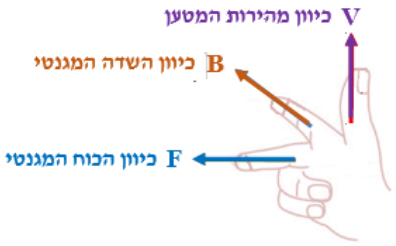
I - עוצמת הזרם דרך הכריכה $[A]$

ℓ - אורך המוליך בתוך השדה המגנטי $[m]$

α - הזווית בין המוליך לשטף המגנטי $[\alpha^\circ]$

קביעת כיוון הכוח על מטען חשמלי

למציאת כיוון הכוח המגנטי, הפועל על מטען הנע בשדה מגנטי, ניתן להשתמש בכלל היד הימנית השני.



חישוב מומנט הסיבוב

בכריכה הנמצאת בשדה מגנטי וזורם דרכה זרם, פועל מומנט סיבובי

$$\boxed{M = BIA \cdot \cos\alpha}$$

M - מומנט הסיבוב הפועל על הכריכה $[Nm]$

I - עוצמת הזרם דרך הכריכה $[A]$

A - שטח הכריכה $[m^2]$

B - עוצמת השדה המגנטי $\left[\frac{Wb}{m^2}\right]$

α - הזווית בין מישור הכריכה לבין קווי השדה המגנטי $[^\circ]$

6. אלקטרוסטטיקה

גודל שדה חשמלי סביב מטען נקודתי

$$E = k\frac{q}{r^2}$$

E - שדה חשמלי

q - המטען החשמלי c

r - המרחק מהמטען m^2

$$k = 9\cdot 10^9 \frac{N\cdot m^2}{C^2}$$

קיבול

$$C = \frac{Q}{U}$$

Q - המטען החשמלי c

U - המתח בין הדקי הקבל V

C - קיבוליות הקבל F

האנרגיה האגורה בקבל

$$W = \frac{C\cdot U^2}{2} = \frac{Q\cdot U}{2} = \frac{Q^2}{2\cdot C}$$

W - האנרגיה האגורה בקבל J (ג'אול)

Q - המטען החשמלי c (קולון)

C - קיבוליות הקבל F (פרד)

קבל לוחות

$$C = \frac{\varepsilon_0\cdot\varepsilon_r\cdot A(n-1)}{d}$$

A – שטח הלוחות (m^2)

d – המרחק בין הלוחות (m)

n – מספר הלוחות בקבל

ε_r – המקדם הדיאלקטרי היחסי של החומר בין לוחות הקבל

ε_0 – הקבוע הדיאלקטרי בריק: $8.854\cdot 10^{-12}\ \frac{F}{m}$.

קבל כדורי

$$C = \frac{4\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot R \cdot r}{R - r}$$

R - רדיוס הכדור החיצוני (m)

r - רדיוס הכדור הפנימי (m)

ε_0 - קבוע דיאלקטרי של חלל ריק $8.85 \cdot 10^{-12}$

ε_r - מקדם דיאלקטרי היחסי של החומר בין לוחות הקבל

קבל גלילי

$$C = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \ell}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)}$$

ℓ – אורך הגליל (m)

R – רדיוס הגליל החיצוני (m)

r – רדיוס הגליל הפנימי (m)

עוצמת השדה החשמלי בקבל לוחות

$$E = \frac{U}{d}$$

הקיבול השקול של קבלים בטור

$$C_T = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + ... + \frac{1}{C_n}}$$

הקיבול השקול של שני קבלים בטור

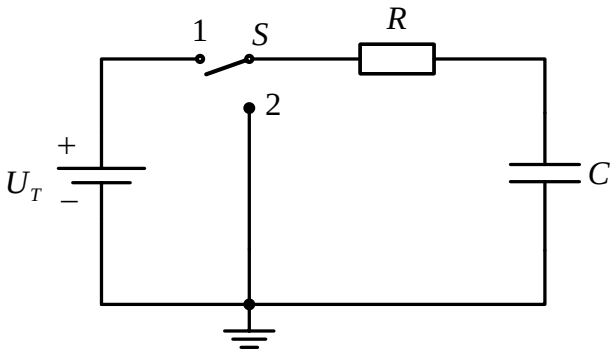
$$C_T = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

הקיבול השקול של קבלים במקביל

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + ... + C_n$$

7. תופעות מעבר מסדר ראשון – תגובה לאות מדרגה

טעינה ופריקה של קבל



משוואת הדפקים היסודית:

$$U_{C(t)} = U_{C(\infty)} - \left(U_{C(\infty)} - U_{C(0)}\right) \cdot e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)}$$

קבוע הזמן:

$$\tau = R \cdot C$$

$U_{(t)}$ - מתח המעגל בתלות הזמן.

$U_{C(\infty)}$ - המתח הסופי של הקבל.

$U_{C(0)}$ - המתח ההתחלתי של הקבל.

τ - קבוע הזמן של המעגל (קובע את קצב טעינת הקבל).

ברגע סגירת המפסק (מפסק במצב 1), הקבל מהווה **קצר**, מפל המתח על הקבל שווה 0.

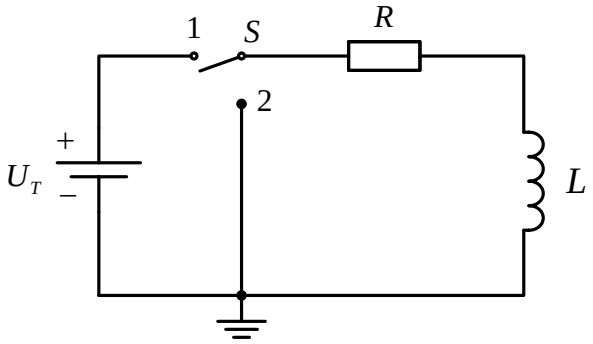
$V_{C(0)} = 0V$	$I_{C(0)} = \mathrm{Im}\,ax$

בסיום תופעות המעבר, הקבל מהווה **נתק**, מפל המתח עליו הוא **מתח המקור**.

$U_{C(\infty)} = U_T$	$I_{C(\infty)} = 0A$

טעינה ופריקה של סליל

עם סגירת המפסק (מצב 1), מתחיל לזרום זרם במעגל. עוצמת הזרם גדלה עד שמגיעה לערכה המרבי, בסיום תופעת המעבר.
במצב 2, הזרם בסליל מתפרק דרך הנגד.



ברגע סגירת המפסק (מצב 1), הסליל מהווה **נתק**, מפל המתח על הסליל שווה למתח המקור.

$U_{L(0)} = U_T$	$I_{L(0)} = 0A$

בסיום תופעות המעבר הסליל מהווה **קצר**, מפל המתח במצב זה הוא $0V$ והזרם דרכו מקסימלי.

$U_{L(\infty)} = 0V$	$I_{L\max(\infty)} = \frac{U}{R}$

<u>חישוב זרם הסליל</u>:

$$I_{(t)} = I_{L(\infty)} - \left(I_{L(\infty)} - I_{L(0)}\right) \cdot e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)}$$

קבוע זמן

$$\tau = \frac{L}{R}$$

$I_{(t)}$ - זרם המעגל בתלות הזמן.

$I_{L(\infty)}$ - הזרם הסופי של הסליל.

$I_{L(0)}$ - הזרם ההתחלתי של הסליל.

τ - קבוע הזמן של המעגל.

8. אותות

זמן מחזור

$$\boxed{T = \frac{1}{f}}$$

T - זמן מחזור $(\sec)$

f - תדר (Hz)

תדר

$$\boxed{f = \frac{1}{T}}$$

תדירות זוויתית

$$\boxed{\omega = 2\pi \cdot f}$$

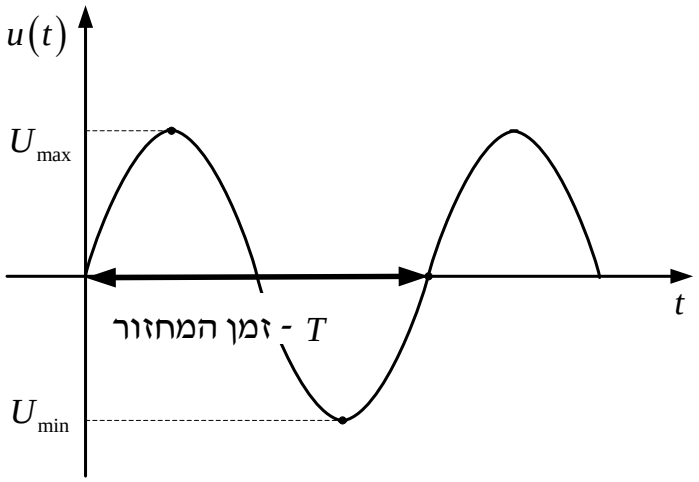
ω - המהירות הזוויתית $\left[{}^{rad}\!/_{\sec}\right]$.

f - תדר (Hz)

ערך שיא לשיא

$$\boxed{U_{ptp} = U_{\max} - U_{\min}}$$

<u>תיאור אות מתח חילופין סימטרי</u>



$$\boxed{u(t)=U_{max}\sin(\omega t+\varphi)}$$

$u(t)$ - הערך הרגעי של האות $[V]$

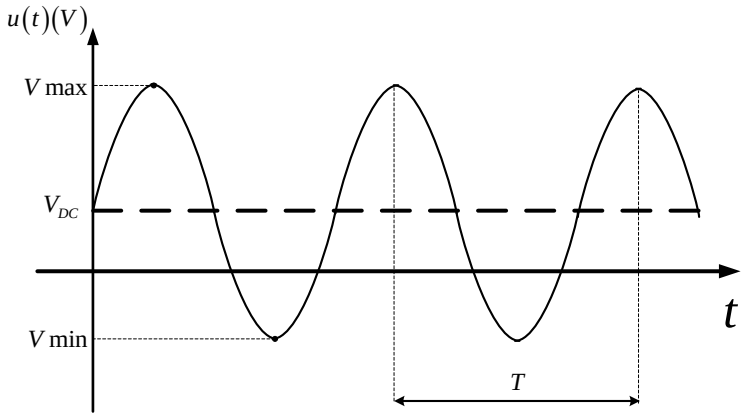
U_{max} - הערך המקסימאלי של האות $[V]$

ω - תדירות זוויתית $[rad/sec]$

f - תדירות האות $[Hz]$

φ - זווית המופע

<u>תיאור אות מתח חילופין לא סימטרי סביב ציר הזמן</u>



$$\boxed{u(t)=U_{DC}+U_{\max}\sin(\omega t+\varphi)}$$

$u(t)$ - הערך הרגעי של האות $[V]$

U_{DC} - ערך המתח הישר של האות $[V]$

$U_{\max}$ - הערך המקסימלי של האות $[V]$

ω - התדירות הזוויתית $\left[{}^{rad}/_{\sec}\right]$

φ - זווית המופע

<u>הפרש מופע</u>

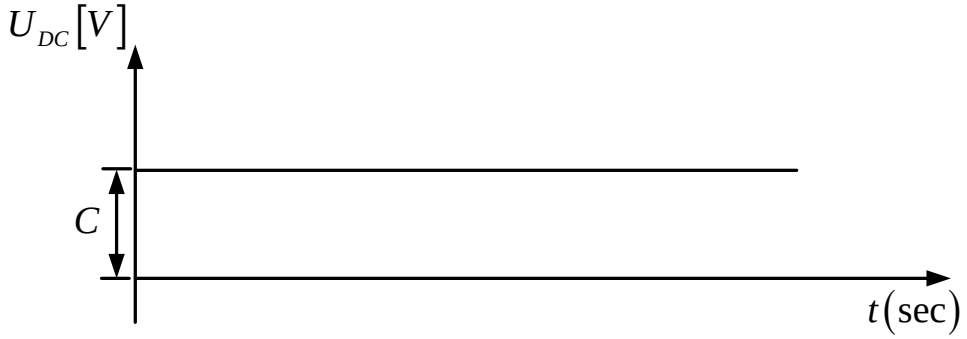
$$\boxed{\Delta\varphi=\frac{360^\circ}{T}\cdot\Delta t}$$

$\Delta\varphi$ - הפרש מופע (במעלות)

T - זמן מחזור $[\sec]$

Δt - משך הזמן המותאם להפרש מופע $[\sec]$

מתח ישר *DC*



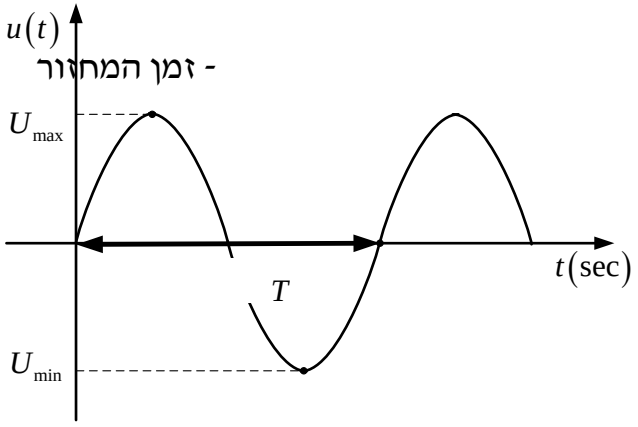
הערך הממוצע של אות מתח ישר

$$U_{av} = C$$

הערך האפקטיבי של אות מתח ישר

$$U_{eff} = C$$

חישוב הערך הממוצע והיעיל (אפקטיבי)



הערך הממוצע של אות סינוס - סימטרי

$$U_{av} = \frac{1}{T}\int_0^T u\sin(\omega t)\,dt = 0V$$

הערך האפקטיבי של אות סינוס - סימטרי

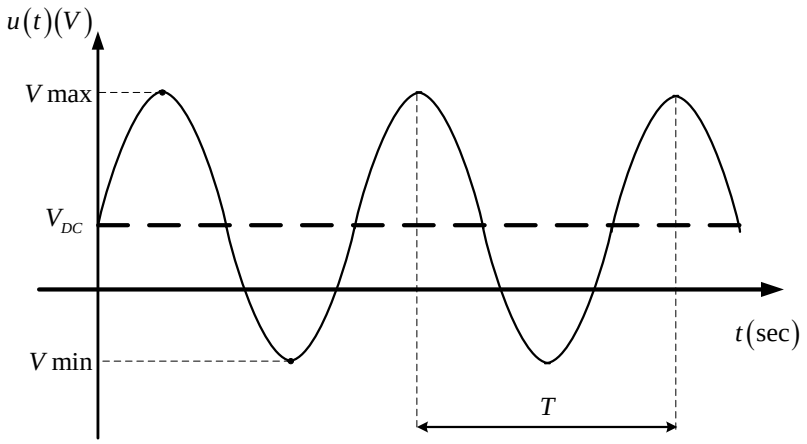
$$U_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T \left(U\sin(\omega t)\right)^2 dt} = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}}$$

ההספק הממוצע שצורך נגד R

$$P_{av} = \frac{1}{T}\int_0^T P(t) = R \cdot {I_{eff}}^2 = \frac{{U_{eff}}^2}{R} = U_{eff} \cdot I_{eff}$$

אות המורכב מ- AC עם Offset DC

תיאור אות מתח חילופין לא סימטרי סביב ציר הזמן



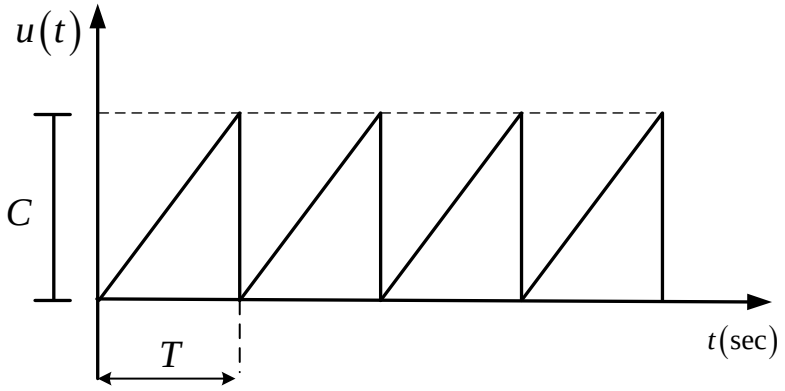
הערך היעיל של המתח המורכב משני האותות:

$$U_{eff_{(T)}} = \sqrt{U_{eff(AC)}^2 + U_{(DC)}^2}$$

הערך הממוצע של אות המתח מורכב משני האותות:

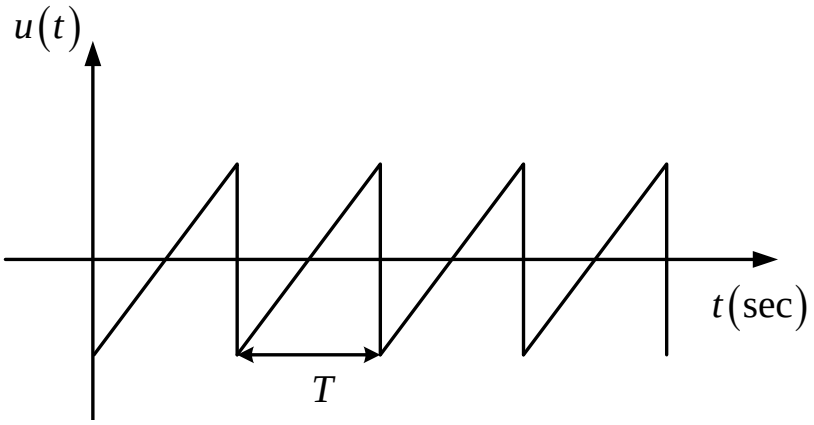
$$U_{av_{(T)}} = U_{av(DC)} + U_{av(AC)}$$

אות עם שיפוע קבוע - שן מסור



$$U_{av} = \frac{1}{2} \cdot C \qquad U_{eff} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot C$$

אות שן מסור מחזורי סימטרי



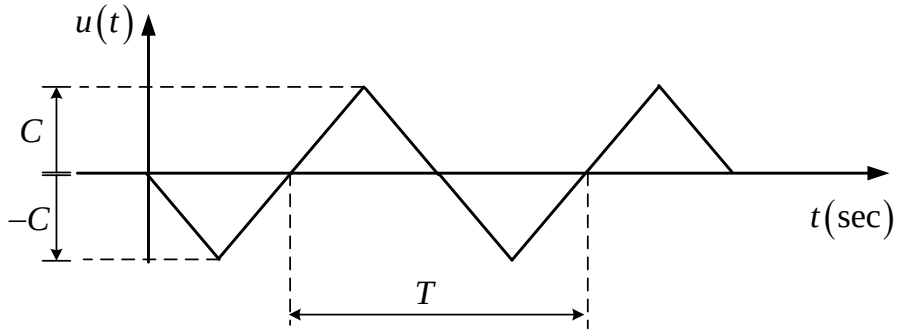
הערך הממוצע של אות שן מסור סימטרי:

$$U_{av} = 0$$

הערך האפקטיבי של אות שן מסור סימטרי:

$$U_{eff} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot C$$

אות משולש מחזורי סימטרי



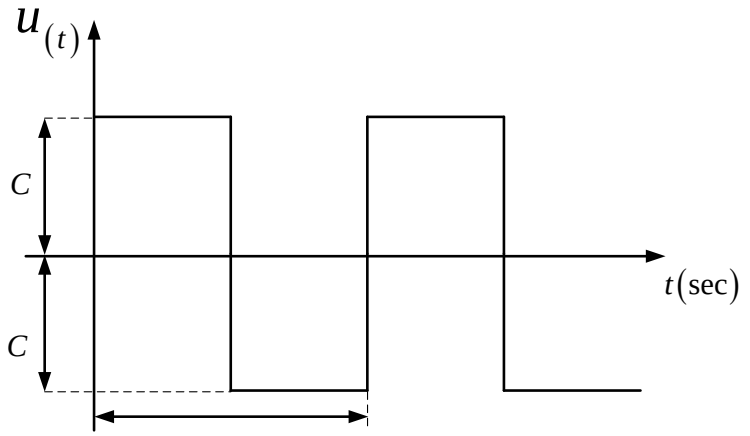
הערך הממוצע של אות משולש סימטרי:

$$\boxed{U_{av}=0}$$

הערך האפקטיבי של אות משולש סימטרי:

$$\boxed{U_{eff}=\frac{1}{\sqrt{3}}\cdot C}$$

אות ריבועי מחזורי סימטרי



T- זמן מחזור

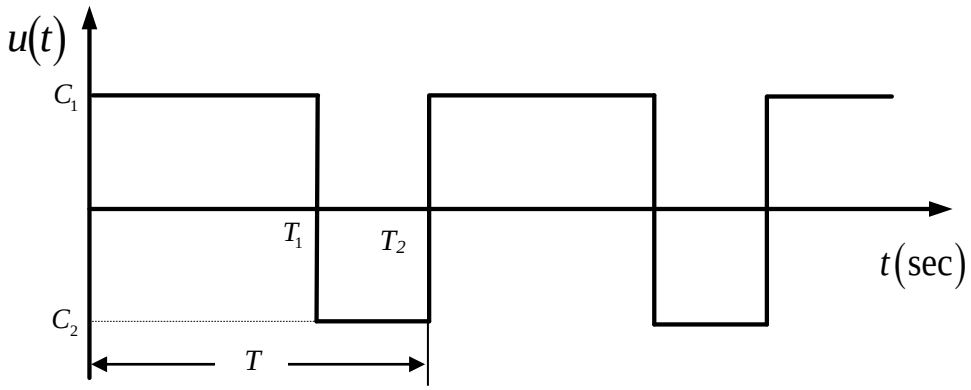
הערך הממוצע של אות ריבועי-סימטרי

$$\boxed{U_{av}=0}$$

הערך האפקטיבי של אות ריבועי-סימטרי

$$\boxed{U_{eff}=C}$$

אות ריבועי מחזורי אסימטרי

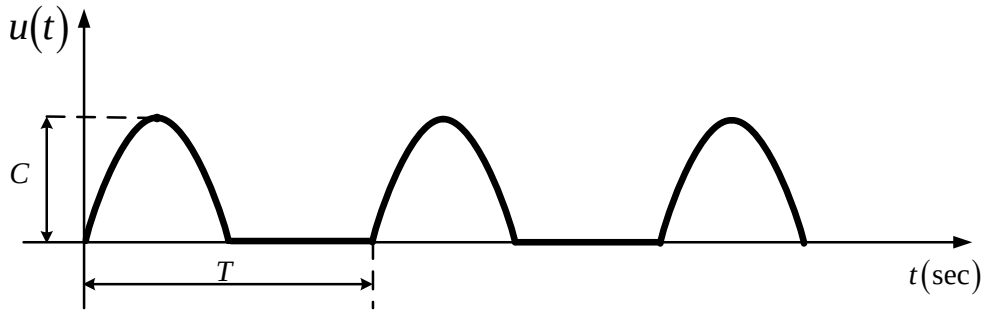


$$U_{av} = \frac{1}{T}\int_{0}^{T_1} C_1 dt + \frac{1}{T}\int_{T_1}^{T_2} (-C_2)\,dt$$

$$U_{AV} = \frac{C_1 \cdot T_1 + (-C_2 \cdot T_2)}{T}$$

$$U^2{}_{eff} = \frac{1}{T}\int_{0}^{T_1} C_1{}^2 dt + \frac{1}{T}\int_{T_1}^{T_2} (-C_2)^2\,dt$$

אות סינוס מיושר חצי גל



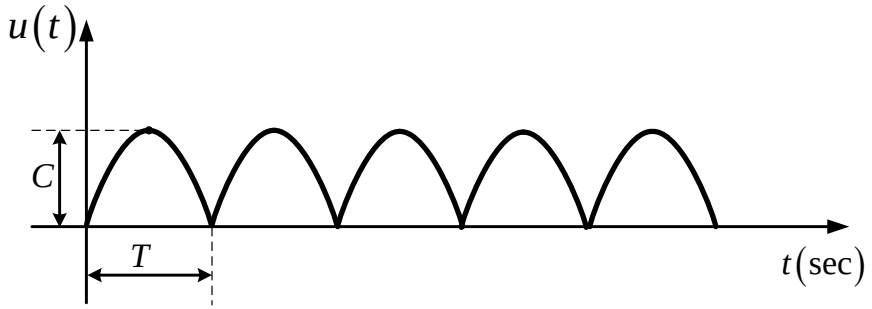
הערך היעיל של האות

$$U_{eff} = \frac{1}{2} \cdot C$$

הערך הממוצע של האות

$$\boxed{U_{av} = \frac{1}{\pi} \cdot C}$$

<u>אות סינוס מיושר גל</u>



הערך היעיל של האות

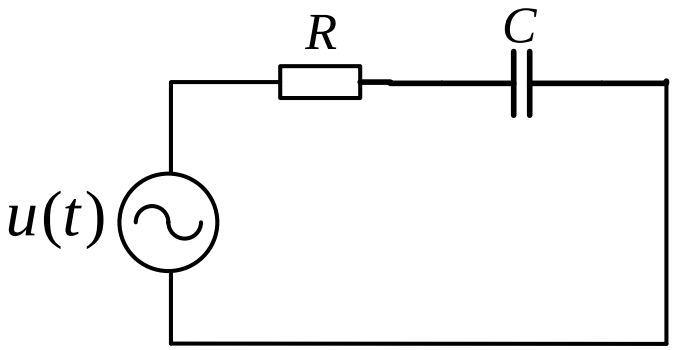
$$\boxed{U_{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot C}$$

הערך הממוצע של האות

$$\boxed{U_{av} = \frac{2}{\pi} \cdot C}$$

9. מעגלי זרם חילופין

מעגל טורי הכולל נגד וקבל



היגב קיבולי

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

עכבת הקבל

$$Z = -jX_C = X_C \angle -90^\circ$$

עכבה במעגל טורי הכולל נגד וקבל

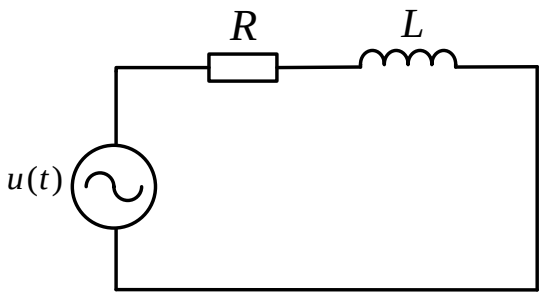
$$Z = R - jX_C = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

$$\varphi = \tan^{-1}\left(-\frac{X_C}{R}\right)$$

R - מייצג את הרכיב ההתנגדותי של העכבה $[\Omega]$

X_C - מייצג את הרכיב ההיגבי של העכבה $[\Omega]$

מעגל טורי הכולל נגד וסליל



היגב השראי

$$X_L = \omega \cdot L = 2\pi \cdot f \cdot L$$

עכבת הסליל

$$Z = jX_L = X_L \angle 90^\circ$$

עכבה במעגל טורי הכולל נגד וסליל

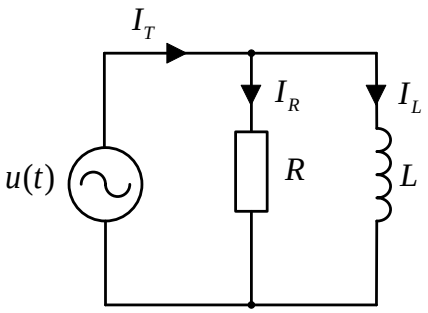
$$Z = R + jX_L = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$\varphi = \tan^{-1} \cdot \left(\frac{X_L}{R} \right)$$

R - מייצג את הרכיב ההתנגדותי של העכבה $[\Omega]$.

X_L - מייצג את הרכיב ההיגבי של העכבה $[\Omega]$.

<u>מעגל מקבילי הכולל נגד וסליל</u>



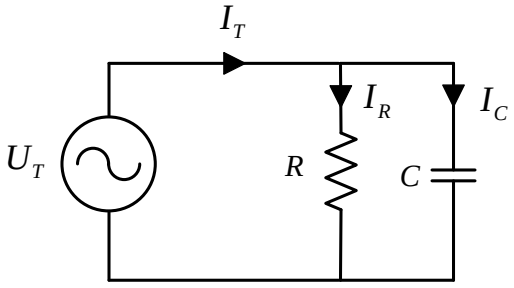
עכבה במעגל מקבילי הכולל נגד וסליל

$$Z_T = \frac{Z_R \cdot Z_L}{Z_R + Z_L} = \frac{R \cdot jX_L}{R + jX_L}$$

המתירות במעגל מקבילי הכולל נגד וסליל

$$Y_T = \frac{1}{Z_T}$$

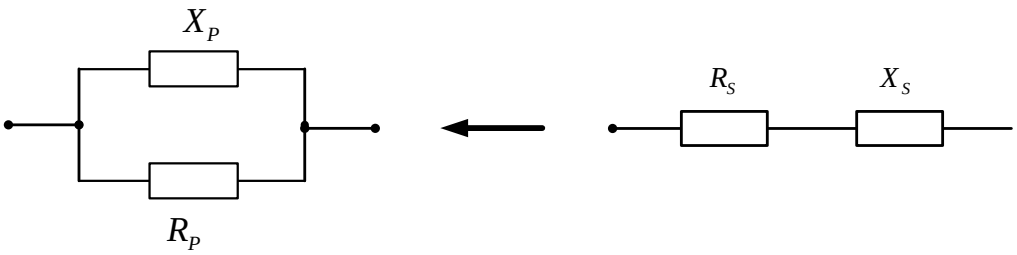
<u>מעגל מקבילי הכולל נגד וקבל</u>



עכבה במעגל מקבילי הכולל נגד וקבל

$$Z_T = \frac{Z_R \cdot Z_C}{Z_R + Z_C} = \frac{R \cdot \left(-jX_C\right)}{R - jX_C}$$

המרת חיבור טורי למקבילי

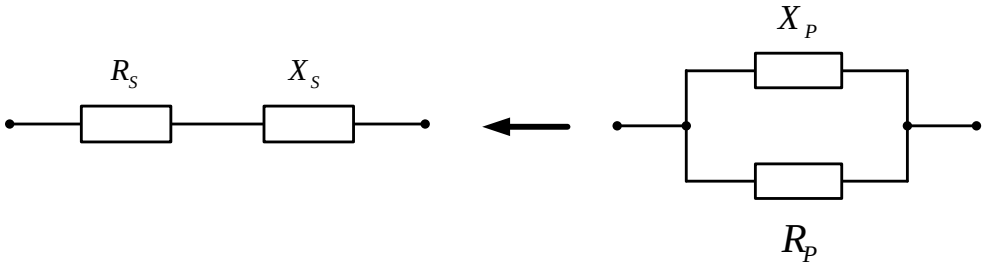


מעבר מחיבור טורי לחיבור מקבילי לפי הנוסחאות:

$$R_P = \frac{R_S^{\,2} + X_S^{\,2}}{R_S}$$

$$X_P = \frac{R_S^{\,2} + X_S^{\,2}}{X_S}$$

המרת חיבור מקבילי לטורי



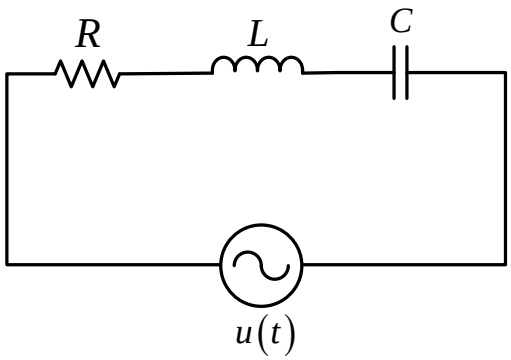
מעבר מחיבור מקבילי לחיבור טורי בעזרת הנוסחאות:

$$R_S = \frac{R_P \cdot X_P^{\,2}}{R_P^{\,2} + X_P^{\,2}}$$

$$X_S = \frac{X_P \cdot R_P^{\,2}}{R_P^{\,2} + X_P^{\,2}}$$

10. הספקים בזרם חילופין סינוסואידי

מעגל טורי הכולל נגד, סליל וקבל



העכבה השקולה של מעגל טורי

$$Z = R + j\left(X_L - X_C\right)$$

בחישוב הספקים חובה להשתמש בערכים אפקטיביים בלבד של הזרם והמתח

ההספק הפעיל (Active power) - (P)

ההספק נמדד ביחידות וואט (W).

ההספק הפעיל של המעגל מתפתח על הנגד (הנגד ממיר אנרגיה חשמלית לאנרגיה של חום).

$$P = \frac{\left|\overline{U_{R\,eff}}\right|^2}{R} \qquad P = \left|\overline{I_{eff}}\right|^2 \cdot R \qquad P = I_{eff} \cdot U_{eff} \cdot \cos\varphi$$

ההספק ההיגבי (Reactive Power) - (Q)

ההספק ההיגבי נמדד ביחידות וולט אמפר ראקטיבי (VAr).

ההספק ההיגבי הוא הספק הנאגר במשרן ומוחזר למקור.

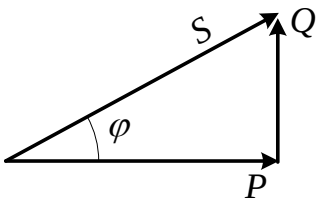
$$Q = \frac{\left|\overline{U_{L\,eff}}\right|^2}{X_L} \qquad Q = \left|\overline{I_{eff}}\right|^2 \cdot X_L \qquad Q = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \sin\varphi$$

ההספק המדומה (Apparent Power) - (S)

ההספק המדומה נמדד ביחידות וולט אמפר (*VA*).

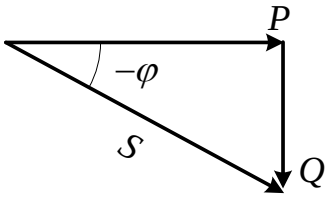
$$\boxed{S = U_{eff} \cdot I_{eff}^{*} = P + jQ} \qquad \boxed{\overline{S} = \frac{\left|\overline{U_{eff}}\right|^2}{Z^{*}}} \qquad \boxed{\overline{S} = \left|\overline{I_{eff}}\right|^2 \cdot \overline{Z}}$$

מעגל RLC טורי, כאשר המעגל בעל **אופי השראי** $X_L > X_C$



משולש ההספקים במעגל בעל אופי השראי

מעגל RLC טורי, כאשר המעגל בעל **אופי קיבולי** $X_L < X_C$



משולש ההספקים במעגל בעל אופי קיבולי

<u>שיפור גורם ההספק</u>

$$\boxed{C = \frac{P}{\omega \cdot U^2}\left(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2\right)}$$

C - קיבול (F)

P - הספק פעיל (W)

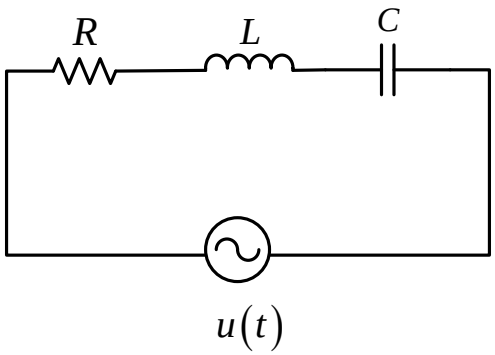
U - המתח (V)

φ_1 - זווית המופע לפני השיפור

φ_2 - זווית המופע אחרי השיפור

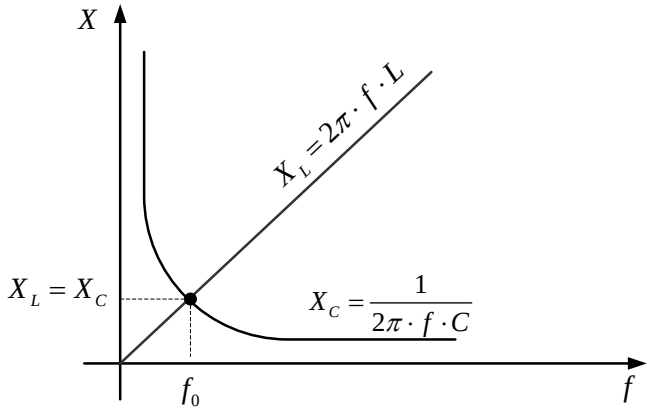
11. מעגלי תהודה

מעגל תהודה טורי



העכבה השקולה של מעגל טורי

$$Z = R + j\left(X_L - X_C\right)$$



תדירות הזוויתית בתהודה

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$

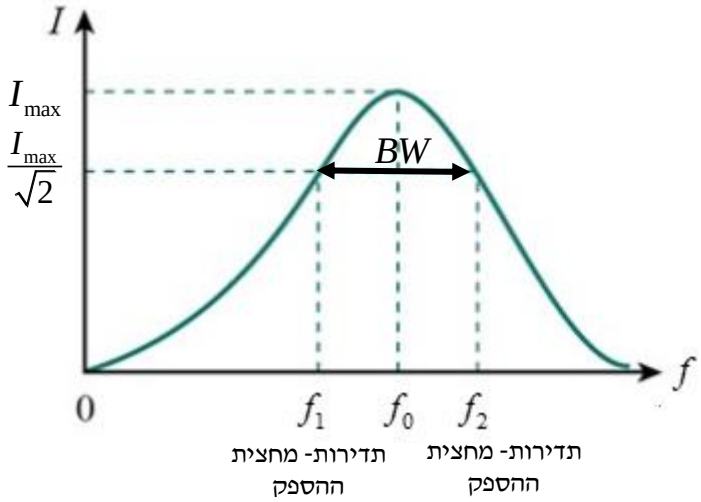
ω_0 - התדירות הזוויתית בתהודה $\left[{}^{rad}/_{\sec}\right]$

תדירות התהודה

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

f_0 - תדירות התהודה $\left[Hz\right]$

רוחב הפס



$$\boxed{BW = f_1 - f_2}$$

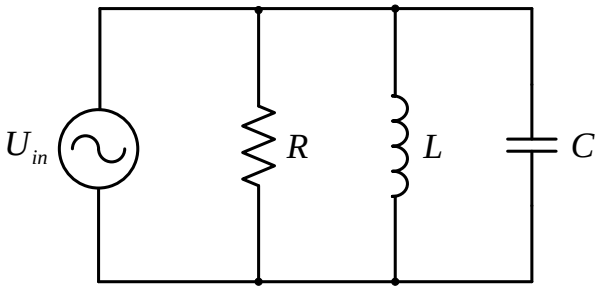
$$\boxed{BW = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\pi} = f_2 - f_1 = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{R}{L}}$$

גורם הטיב

$$\boxed{Q_0 = \frac{\omega_0 \cdot L}{R} = \frac{1}{\omega_0 RC} = \frac{1}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}}$$

מעגלי תהודה מקבילים

בדומה למעגל תהודה טורי, במעגל RLC מקבילי, ניתן לשנות את תדר המעגל, וע"י כך להגיע למצב שבו החלק המדומה של **המתירות** מתאפס.



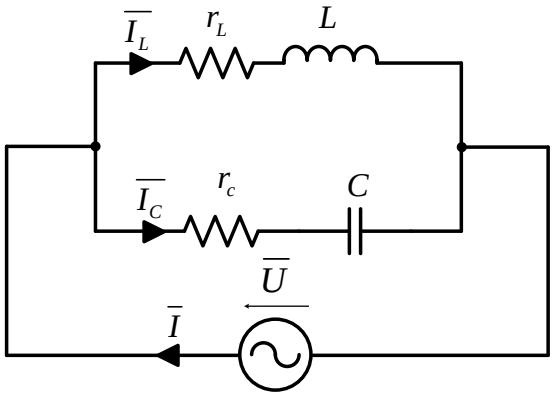
התדירות הזוויתית בתהודה:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$

תדר התהודה:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

מעגלי תהודה מקבילים מעשיים



התנאי הכללי לתהודה

$$\frac{X_L}{r_L^2 + X_L^2} = \frac{X_C}{r_c^2 + X_C^2}$$

תדר התהודה הזוויתי

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \cdot \sqrt{\frac{R_0^{\,2} - r_L^{\,2}}{R_0^{\,2} - r_C^{\,2}}}$$

תדר התהודה הזוויתי כאשר $r_C = 0$ **(קבל טהור)**

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C} - \frac{r_L^{\,2}}{L^2}}$$

מקרה פרטי: כאשר $r_L = r_c = 0\Omega$

תדר התהודה הזוויתי

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$

גורם הטיב

$$Q = \frac{R}{R_0} = \omega_0 RC = \frac{R}{\omega_0 L}$$

רוחב הסרט

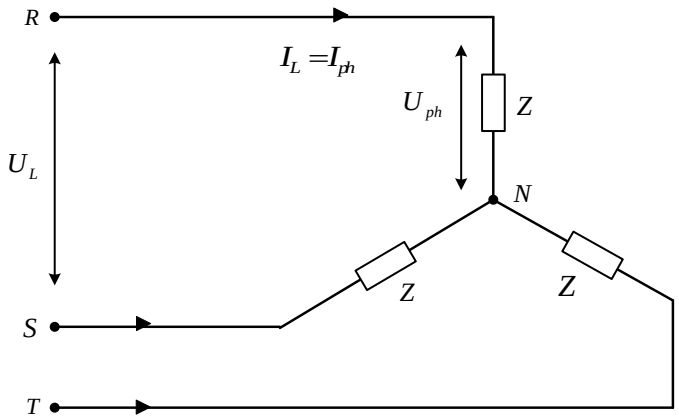
$$BW = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\pi} = f_2 - f_1 = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{RC}$$

התנגדות אופיינית

$$R_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

12. רשתות תלת פאזיות

מעגל תלת מופעי (פזי) מאוזן בחיבור כוכב



זרמים בחיבור כוכב

$$I_L = I_{ph}$$

$$I_{ph} = \frac{U_{ph}}{Z}$$

I_{ph} - הזרם הפזי העובר בעומס Z ביחידות אמפר $[A]$

I_L - הזרם הקווי העובר בקו האספקה ביחידות אמפר $[A]$

מתחים בחיבור כוכב

$$U_L = U_{ph} \cdot \sqrt{3}$$

U_L - מתח שלוב קווי , המתח בין שני המוליכים בקווי ההזנה, ביחידות וולט .

U_{ph} - מתח מופעי , מתח בין המוליך המופעי בקו ההזנה למוליך האפס ביחידות וולט .

הספק תלת מופעי

$$S = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L$$

$$P = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos\varphi$$

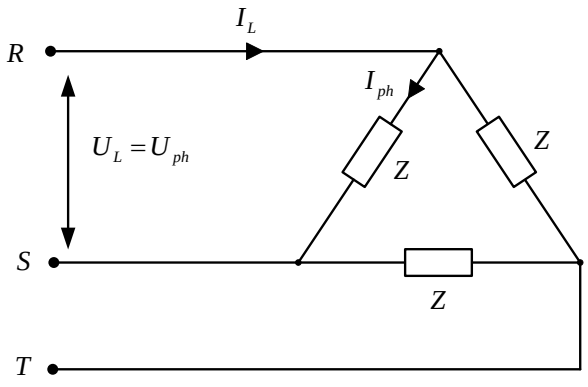
$$Q = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \sin\varphi$$

S - *ההספק המדומה במעגל ביחידות* [VA]

P - *ההספק הממשי במעגל ביחידות* [W]

Q - *ההספק העיוור (הריאקטיבי) במעגל ביחידות* [Var]

מעגל תלת מופעי (פזי) מאוזן בחיבור משולש



זרמים בחיבור משולש

$$\boxed{I_L = \sqrt{3} \cdot I_{ph}}$$

$$\boxed{I_{ph} = \frac{U_{ph}}{Z}}$$

I_{ph} - הזרם הפזי העובר בעומס Z ביחידות אמפר $[A]$

I_L - הזרם הקווי העובר בקו האספקה ביחידות אמפר $[A]$

מתחים בחיבור משולש

$$\boxed{U_L = U_{ph}}$$

U_L - מתח שלוב קווי , המתח בין שני המוליכים בקווי ההזנה, ביחידות וולט .

U_{ph} - מתח מופעי – מתח בין המוליך המופעי בקו ההזנה למוליך האפס ביחידות וולט .

הספק תלת מופעי

$$\boxed{S = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L}$$

$$\boxed{P = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos\varphi}$$

$$\boxed{Q = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \sin\varphi}$$

S - *ההספק המדומה במעגל ביחידות* [VA]

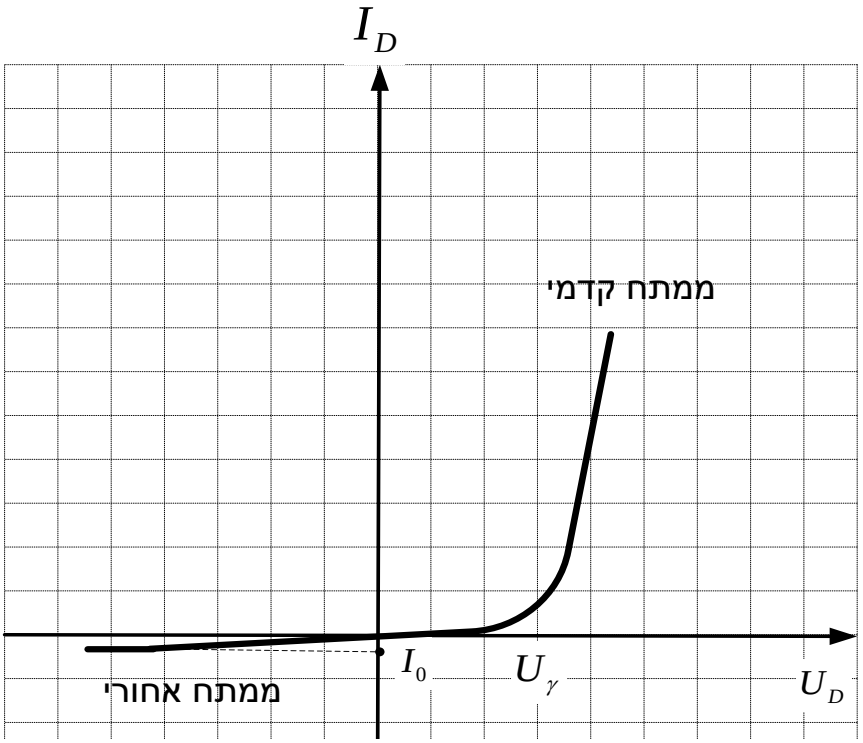
P - *ההספק הממשי במעגל ביחידות* [W]

Q - *ההספק העיוור (הריאקטיבי) במעגל ביחידות* [Var]

מבוא לאלקטרוניקה

13. <u>דיודות</u>

אופיין דיודה מעשית



המשוואה המתארת את אופיין הדיודה

$$I_D = I_0 \cdot \left(e^{\frac{U_D}{\eta \cdot U_T}} - 1 \right)$$

$$U_D = \eta \cdot U_T \cdot Ln \cdot \left(\frac{I_D}{I_0} + 1 \right)$$

I_0 - זרם זליגה/הזרם האחורי (בעל תלות חזקה בטמפרטורה).

U_T -קבוע התלוי בטמפרטורה (בטמפרטורת החדר גודלו $26mA$)

η - בקירוב **אחד** עבור גרמניום **ושתיים** עבור דיודת סיליקון.

U_D - המתח על פני הדיודה בין האנודה לקטודה.

I_D - הזרם דרך הדיודה.

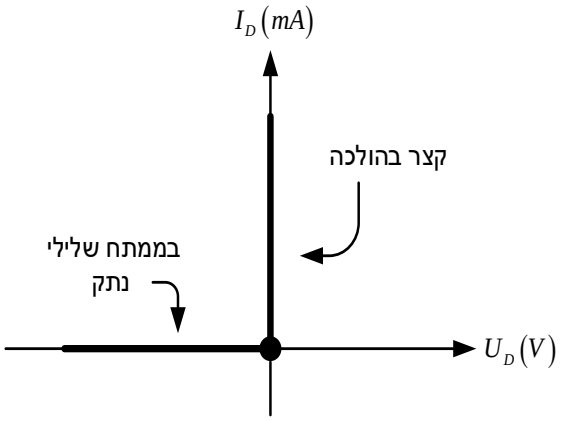
מודלים מקורבים של דיודה

קיימים מספר מודלים מקורבים לדיודה מעשית

1. מודל הדיודה האידיאלית.
2. מודל הסוללה (מפל מתח קבוע).
3. מודל הסוללה והנגד.

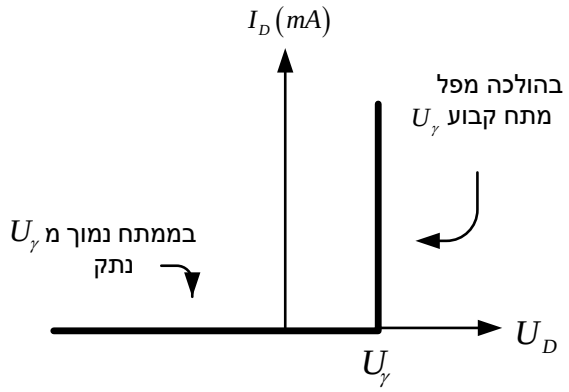
1. מודל הדיודה האידיאלית

במודל זה נניח שבממתח חיובי הדיודה מהווה קצר ובממתח שלילי הדיודה מהווה נתק.



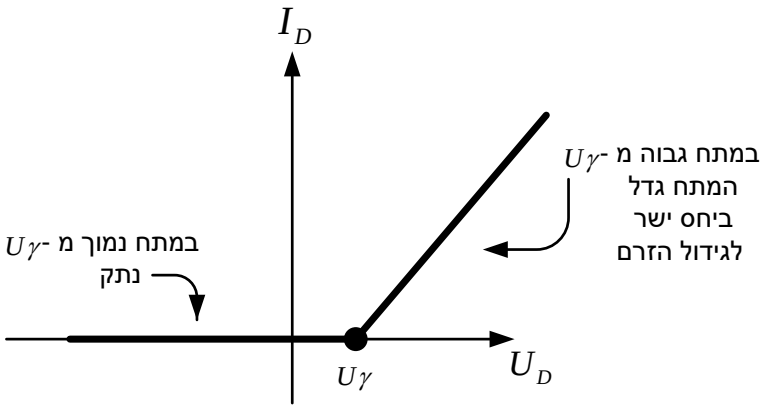
2. מודל הסוללה (מפל המתח הקבוע)

במודל זה נניח שבממתח חיובי הגדול ממתח ההולכה של הדיודה U_γ, הדיודה שומרת על מפל מתח קבוע U_γ ובממתח הקטן ממתח ההולכה של הדיודה U_γ הדיודה מהווה נתק.



3. <u>מודל הסוללה והנגד</u>

במודל זה נניח שבממתח חיובי הגדול ממתח ההולכה של הדיודה U_γ. המתח גדל ביחס ישר לזרם ובממתח הקטן ממתח ההולכה של הדיודה U_γ הדיודה מהווה נתק.



14. טרנזיסטורים

זרם הקולקטור

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

זרם האמיטר

$$I_E = I_B + I_C$$

$$I_E = (\beta + 1) \cdot I_B$$

מקדמי ההגברה של הטרנזיסטור

β - הגבר הזרם של הטרנזיסטור

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

α - מוגדר כיחס שבין זרם הקולקטור לזרם האמיטר.

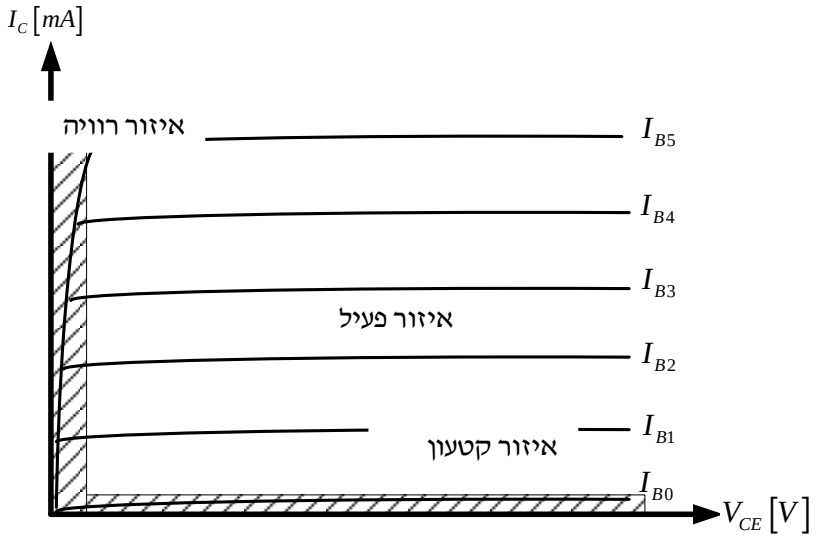
$$\alpha = \frac{I_C}{I_E}$$

הקשרים בין מקדמי ההגברה של הטרנזיסטור

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$$

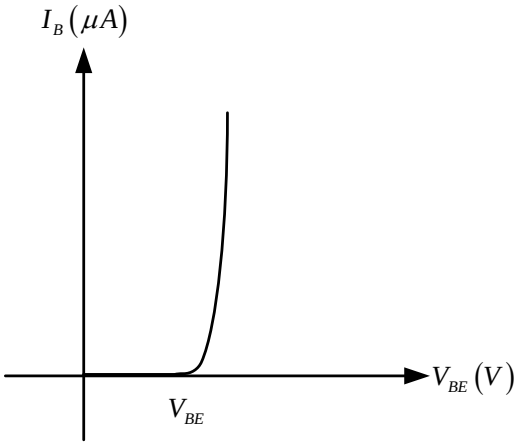
$$\alpha = \frac{\beta}{1+\beta}$$

אופיין המוצא של טרנזיסטור



אופיין מבוא של טרנזיסטור

תלות בין I_B ל- V_{BE}



השפעת הטמפרטורה על זרם הזליגה I_{CBO}

$$I_C = I_B \cdot \beta + I_{CB_O} \cdot (\beta + 1)$$

$$I_{CB_O(T_2)} = I_{CB_O(T_1)} \cdot 2^{\left(\frac{T_2 - T_1}{10}\right)}$$

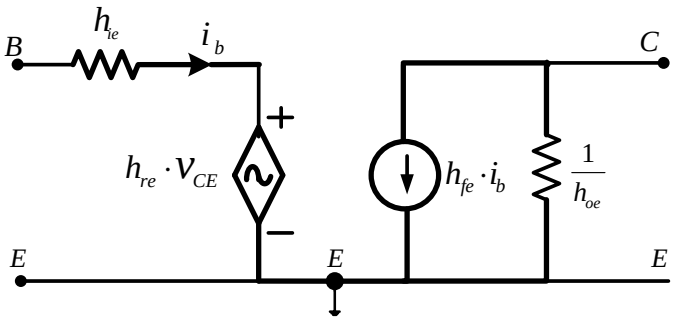
I_B - זרם הבסיס

β - מקדם הגברה של הטרנזיסטור

I_{CBO} - זרם הזליגה בין הקולקטור לבסיס כאשר הפולט מנותק

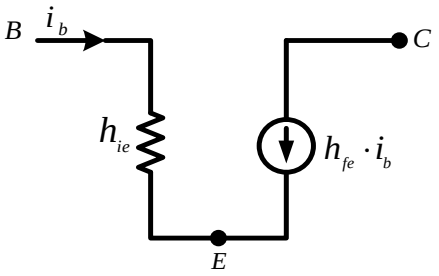
סכמת התמורה של הטרנזיסטור

מעגל תמורה h פרמטרי אשר מהווה ניתוח מקורב לפעולת הטרנזיסטור.



בתדרים נמוכים ניתן להציב $h_{re} = h_{oe} = 0$

סכמת התמורה של הטרנזיסטור:



התנגדות המבוא של הטרנזיסטור R_{in}

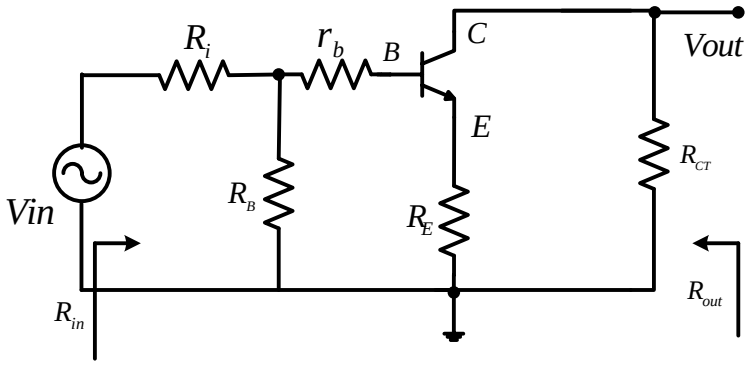
$$\boxed{R_{in} = h_{ie} + \left(h_{fe} + 1\right) \cdot R_E}$$

טרנזיסטור בחיבור אמיטר (פולט) משותף - C.E

זיהוי צורת החיבור:

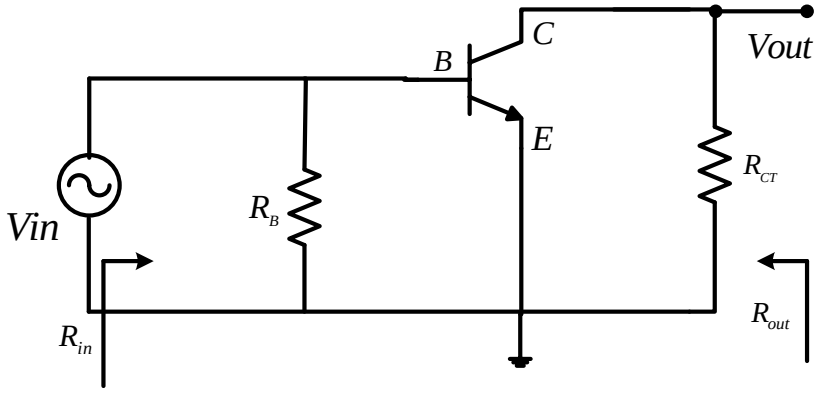
- מתח הכניסה מחובר לבסיס.
- מתח המוצא נמדד בקולקטור.

מעגל התמורה לזרם חילופין



R_i R_E ,, r_b - שווים לאפס (לא קיימים).

המעגל המתקבל (לאחר צמצום הנגדים):



הגבר המתח:

$$A_V = \frac{-hfe \cdot R_B \cdot R_{CT}}{\left(R_i + R_B\right) \cdot \left[R_i \,||\, R_B + h_{ie} + r_b + R_E\left(h_{fe}+1\right)\right]}$$

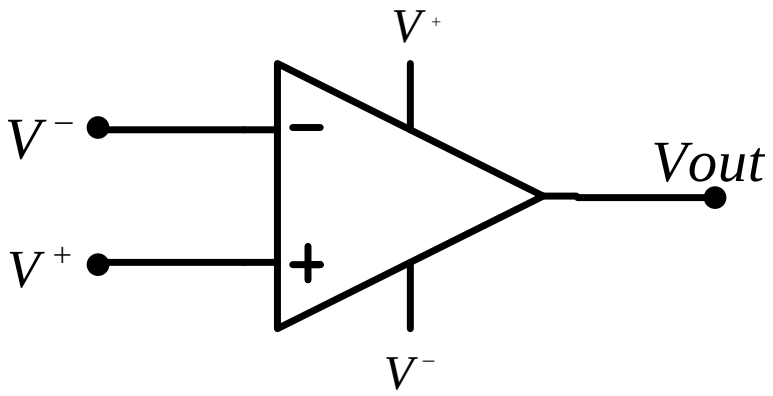
כאשר R_i R_E ,, r_b - שווים לאפס

$$\boxed{A_V = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-i_b \cdot h_{fe} \cdot R_{CT}}{i_b \cdot h_{ie}} = \frac{-\cdot h_{fe} \cdot R_{CT}}{h_{ie}}}$$

15. <u>מגברי שרת</u>

<u>מגבר שרת כמשווה (בחוג פתוח)</u>

המגבר משמש כמשווה בין שני מתחי הכניסה V^+ ו- V^-.



- כאשר המתח ברגל **החיובית** $V^- < V^+$ מתח המוצא יהיה שווה בקירוב למתח ההזנה החיובית $Vout = V^+$.
- כאשר המתח ברגל **השלילית** $V^+ < V^-$ מתח המוצא יהיה שווה בקירוב למתח ההזנה השלילי $Vout = V^-$.

<u>במגבר שרת אידאלי</u>

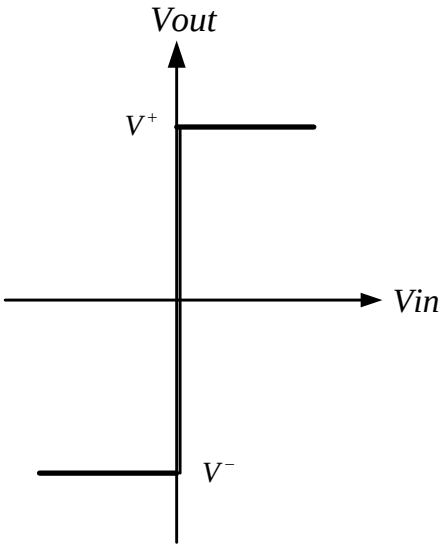
- הגבר = אינסוף
- התגדות מבוא $Rin=^{\infty}$
- התגדות מוצא Rout=0
- $V^+=V^-$

<u>במגבר שרת מעשי</u>

- הגבר = גדול מאוד 10^4-10^6
- התגדות מבוא גדולה – מאות MΩ
- התגדות מוצא קטנה – עשרות Ω
- $V^+=V^-$

אופיין מעבר של מגבר שרת אידיאלי

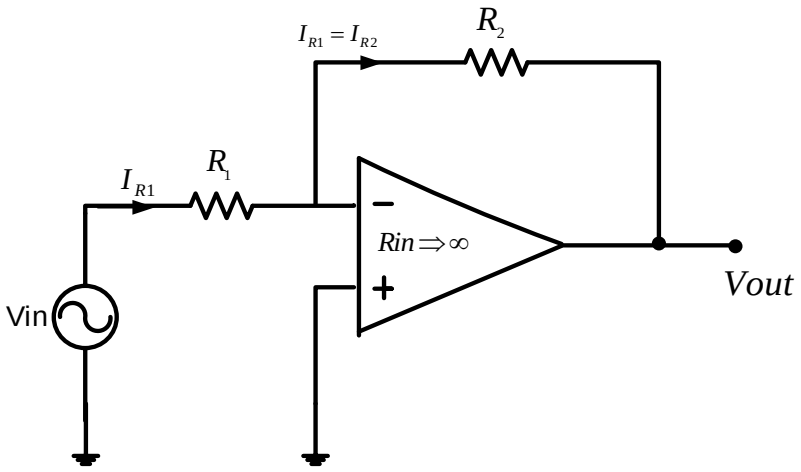
תרשים גרפי המתאר את מתח המוצא בתלות במתח המבוא ההפרשי.



מאחר שלמגבר שרת אידיאלי הגבר אינסופי, שיפוע הגרף המייצג את ההגבר, אף הוא אינסופי (קו ניצב).

לרוב, מקורות המתח של המגבר אינם מצוינים, אך יש תמיד לזכור כי טווח ההגברה אינו בלתי מוגבל.

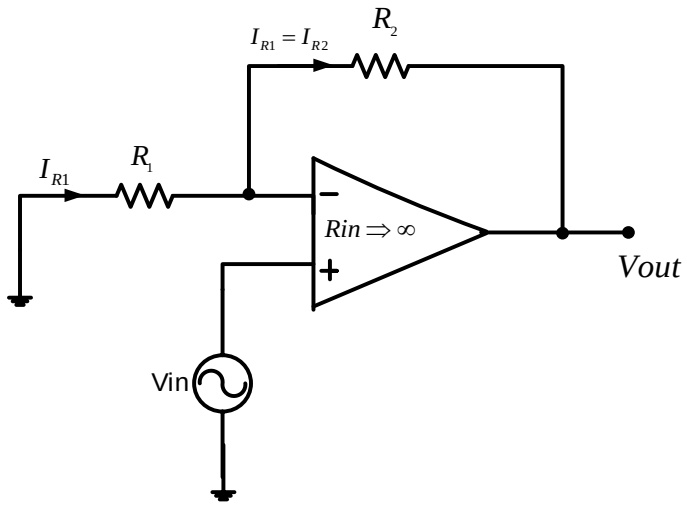
מגבר שרת הופך מופע



הגבר המתח:

$$A_V = \frac{Vout}{Vin} = -\frac{R_2}{R_1}$$

מגבר שרת שומר מופע



הגבר המתח:

$$A_V = \frac{Vout}{Vin} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$