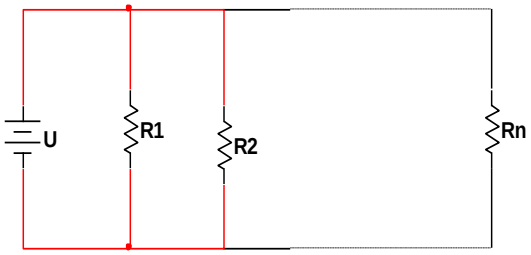
דף נוסחאות לחשמלאי שירות: תורת החשמל מכונות חשמל מתקני חשמל

יחידות	גדלים	תיאור	נוסחה
		מושגים בסיסיים בחשמל:	
$[C]$	Q	המטען החשמלי ביחידות קולון .	$\mathbf{Q = I \cdot t}$
$[A]$	I	עוצמת הזרם ביחידות אמפר .	
$[sec]$	t	פרק הזמן בו עובר הזרם בשניות.	
		המטען (הקיבול) ביחידות אמפר שעה	
$[Ah]$	Q	המטען החשמלי ביחידות אמפר שעה .	$\mathbf{Q = I \cdot t}$
$[A]$	I	הזרם ביחידות אמפר.	
$[h]$	t	פרק הזמן בו עובר הזרם בשעות.	
		ההתנגדות החשמלית בטמפרטורה קבועה T:	
$[\Omega]$	R_T	ההתנגדות בטמפרטורה נתונה T^o במעלות צלזיוס ℃.	$\boldsymbol{R_T = \frac{\rho_T \cdot l}{A}}$
$\frac{\Omega \times mm}{m}$	ρ_T	ההתנגדות הסגולית של החומר ממנו עשוי המוליך באותה טמפרטורה.	
$[m]$	l	אורך המוליך ביחידות מטר .	
$[mm^2]$	A	שטח חתך המוליך.	
		שינוי ההתנגדות בטמפרטורה (כאשר הטמפרטורה ההתחלתית היא 20^0):	
$[\Omega]$	ΔR	השינוי בהתנגדות כתוצאה משינוי הטמפרטורה.	$\boldsymbol{\Delta R = R_{20} \cdot \alpha_{20} \cdot \Delta T}$
$[\Omega]$	R_{20}	ההתנגדות בטמפרטורה 20^o צלזיוס .	
$\left[\frac{1}{^\circ C}\right]$	α_{20}	מקדם שינוי ההתנגדות בטמפרטורה 20°C	
[°C]	ΔT	הפרש הטמפרטורה.	$\mathbf{\Delta T = T_2 - T_1}$
[°C]	T_2	הטמפרטורה לאחר השינוי.	
[°C]	$\boldsymbol{T_1}$	הטמפרטורה ההתחלתית.	
		ערך ההתנגדות לאחר שינוי הטמפרטורה (כאשר ההתנגדות ההתחלתית היא *20°C*)	
		$\boldsymbol{R_T = R_{20} + R_{20} \cdot \alpha_{20} \cdot \Delta T}$	$\boldsymbol{R_T = R_{20} + \Delta R}$ $\longrightarrow\longrightarrow$
$[\Omega]$	R_T	ההתנגדות לאחר שינוי הטמפרטורה .	$\boldsymbol{R_T = R_{20} \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot \Delta T)}$
$[\Omega]$	R_{20}	ההתנגדות בטמפרטורה 20^o .	

$\left[\frac{1}{°C}\right]$	α_{20}	מקדם שינוי ההתנגדות בטמפרטורה .
[°C]	ΔT	השינוי בטמפרטורה במעלות צלזיוס .
<u>שינוי ההתנגדות בטמפרטורה: (כאשר ההתנגדות ההתחלתית שונה מ-</u> 20°C)		
[Ω]	ΔR	השינוי בהתנגדות ביחידות אום. $\Delta \boldsymbol{R} = \boldsymbol{R_{T_1}} \cdot \alpha_{T_1} \cdot \Delta T$
[Ω]	R_{T_1}	ההתנגדות בטמפרטורה T_1 צלזיוס .
$\left[\frac{1}{°C}\right]$	α_{T_1}	מקדם שינוי ההתנגדות בטמפרטורה T_1 .
[°C]	ΔT	הפרש בטמפרטורה במעלות צלזיוס . $\Delta \boldsymbol{T} = \boldsymbol{T_2} - \boldsymbol{T_1}$
[°C]	T_2	הטמפרטורה לאחר השינוי במעלות צלזיוס.
[°C]	T_1	הטמפרטורה ההתחלתית במעלות צלזיוס.
<u>אנרגיה והספק חשמלי:</u>		
$\boldsymbol{W = I^2 \cdot R \cdot t}$	$\boldsymbol{W = \frac{U^2}{R} \cdot t}$	$\boldsymbol{W = U \cdot I \cdot t}$ $\boldsymbol{W = Q \cdot U}$
[J]	W	האנרגיה החשמלית ביחידות ז'אול .
[C]	Q	המטען החשמלי ביחידות קולון .
[V]	U	מתח המעגל ביחידות וולט.
[A]	I	*הזרם במעגל ביחידות אמפר* **.**
[sec]	t	*הזמן בו נמשכת זרימת הזרם בשניות.*
[Ω]	R	*התנגדות המעגל ביחידות אום* .
<u>הספק חשמלי:</u>		
$\boldsymbol{P = I^2 \cdot R}$	$\boldsymbol{P = \frac{U^2}{R}}$	$\boldsymbol{P = U \cdot I}$ $\boldsymbol{P = \frac{W}{t}}$
[w]	P	ההספק החשמלי ביחידות וט .
[J]	W	האנרגיה החשמלית ביחידות ז'אול .
[V]	U	מתח המעגל ביחידות וולט.
[A]	I	*הזרם במעגל ביחידות אמפר* **.**
[sec]	t	*הזמן בו נמשכת זרימת הזרם בשניות.*
[Ω]	R	*התנגדות המעגל ביחידות אום* .
<u>אנרגיה חשמלית ביחידות kWh :</u>		

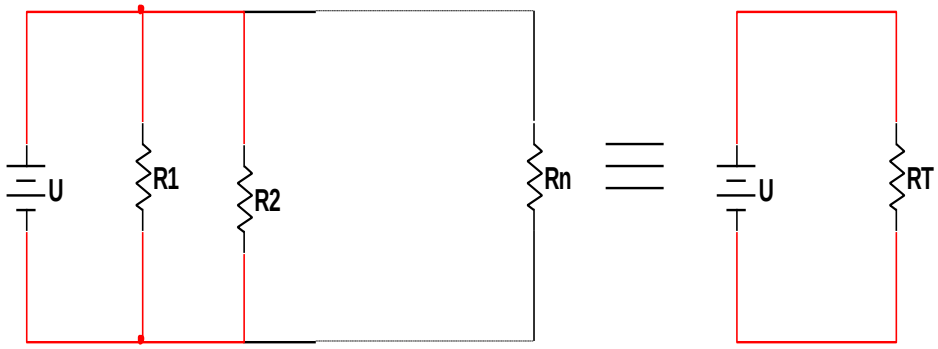
$W = P \cdot t$		$1\text{kWh} = 3.6 \times 10^6 J$
האנרגיה החשמלית ביחידות_קילוואט שעה .	W	$[kWh]$
ההספק החשמלי ביחידות קילוואט .	P	$[kW]$
הזמן בו נמשכת זרימת הזרם בשעות .	t	$[h]$
<u>מעגלים זרם ישר מקביליים:</u>		
<u>מפלי המתח על הנגדים</u>		$U_1 = U_2 = U_3 = \cdots = U_n = \text{U}$
המתח על הנגד R_1 .	U_1	$[V]$
המתח על הנגד R_2 .	U_2	$[V]$
המתח על הנגד R_n.	U_n	$[V]$
מתח המקור .	U	$[V]$
מספר הנגד במעגל.	n	
<u>זרמי הענפים</u>:		
הזרם העובר בנגד מספר n.	I_n	$[A]$
הנגד מספר n במעגל.	R_n	$[\Omega]$
מתח המקור.	U	$[V]$
<u>הזרם הכללי של מעגל מקבילי I_T</u> **החוק הראשון של קירכהוף: סכום הזרמים בצומת <u>שווה לאפס</u>.** **(סכום הזרמים הנכנסים לצומת שווה לסכום הזרמים היוצאים מהצומת)**		
הזרם הכללי במעגל.	I_T	$[A]$
הזרם העובר בנגד R_1.	I_1	$[A]$
הזרם העובר בנגד R_2.	I_2	$[A]$
הזרם העובר בנגד R_n.	I_n	$[A]$
מתח המקור.	U	$[V]$
ההתנגדות השקולה של המעגל.	R_T	$[\Omega]$



$I_n = \frac{U}{R_n}$; $I_1 = \frac{U}{R_2}$; $I_2 = \frac{U}{R_2}$ ... ...

$I_T = \frac{U}{R_T}$

$I_T = I_1 + I_2 + \cdots + In$



[Ω]	R_T	ההתנגדות השקולה של המעגל.	$\frac{1}{R_T}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\cdots+\frac{1}{R_n}$

<u>ההתנגדות השקולה של מעגל מקבילי, קטנה מההתנגדות הקטנה ביותר במעגל מקבלי</u>

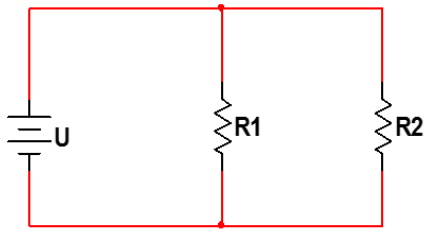
<u>מקרים מיוחדים :</u>

כאשר במעגל כל ההתנגדויות שוות:

$$R_1=R_2=\cdots=R_n=R \rightarrow\rightarrow \quad R_T=\frac{R}{n}$$

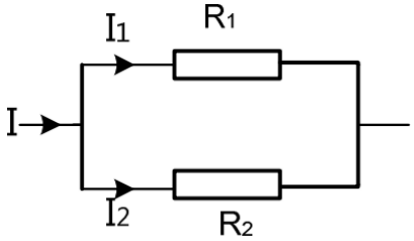
[Ω]	R_T	ההתנגדות השקולה של המעגל.
[Ω]	R	ערך הנגד הבודד.
	n	מספר הנגדים הזהים המחוברים במקביל.

כאשר במעגל יש שני נגדים במקביל :



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

מחלק זרם בין שני נגדים:



$$I_1 = I \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$I_2 = I \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

הספקים במעגל מקבילי:

$[w]$	P_n	*הספק הענף מספר n .*	$P_n = U \cdot I_n = I_n^2 \cdot R_n = \frac{U^2}{R_n}$
$[A]$	I_n	*הזרם העובר בנגד מספר n.*	
$[\Omega]$	R_n	*הנגד מספר n במעגל.*	
$[V]$	U	*מתח המקור.*	
	n	מספר הנגד במעגל.	
$[w]$	P_T	ההספק הכולל במעגל.	$P_T = \mathrm{U} \cdot I_T = I_T^2 \cdot R_T = \frac{U^2}{R_T}$
$[A]$	I_T	הזרם הכללי במעגל.	
$[\Omega]$	R_T	ההתנגדות השקולה של המעגל.	

אנרגיה חשמלית $[W]$:

האנרגיה הכללית של מעגל חשמלי כלשהו

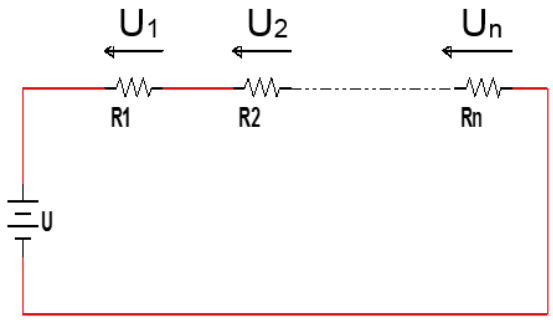
$$\mathrm{W} = P_T \cdot t = U \cdot I_T \cdot t = I_T^2 \cdot R_T \cdot t = \frac{U^2 \cdot t}{R_T}$$

האנרגיה החשמלית של צרכן במעגל חשמלי כלשהו:

$$\mathrm{W}_n = P_n \cdot t = U_n \cdot I_n \cdot t = I_n^2 \cdot R_n \cdot t = \frac{U_n^2 \cdot t}{R_n}$$

מעגלי זרם ישר טוריים:

הזרם במעגל טורי: $I_1 = I_2 = I_3 = \cdots = I_n = \mathrm{I}$



המתח על הנגד R_1 .	U_1	$[V]$
המתח על הנגד R_2 .	U_2	$[V]$
המתח על הנגד R_n.	U_n	$[V]$
מתח *המקור*.	U	$[V]$
מספר הנגד במעגל.	n	
ההתנגדות השקולה של המעגל.	R_T	$[\Omega]$
הנגד מספר n במעגל.	R_n	$[\Omega]$

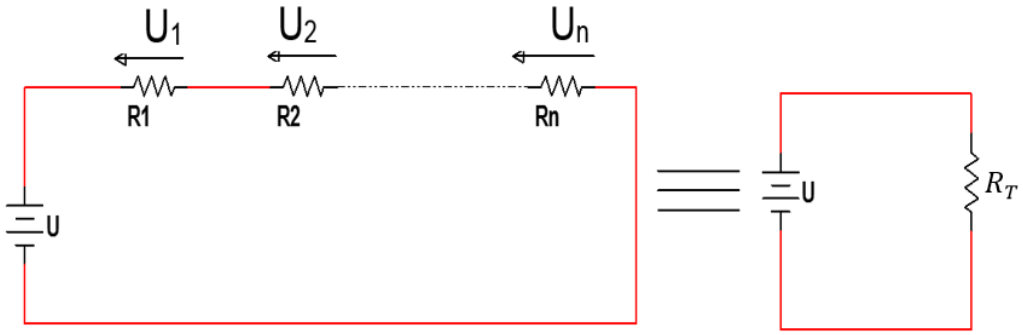
המתח הכללי של מעגל טורי U

החוק השני של קירכהוף: סכום המתחים בעניבה סגורה שווה לאפס.

(סכום מפלי המתח על הנגדים במעגל טורי שווה למתח המקור)

מתח *המקור*	U	$[V]$	$U = U_1 + U_2 + \cdots + U_n$
משוואת חלוקת המתח במעגל טורי			$U_n = \frac{U \times R_n}{R_T}$

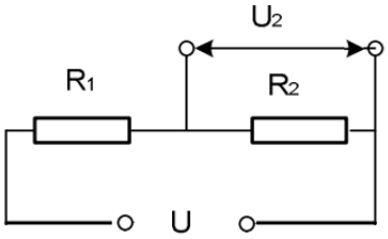
ההתנגדות השקולה של המעגל טורי.



ההתנגדות השקולה של המעגל.	R_T	$[\Omega]$	$R_T = R_1 + R_2 + \cdots + R_n$

$[A]$	I	**עוצמת הזרם במעגל טורי.**	$I = \frac{U}{R_T}$

מחלק מתח בין שני נגדים:



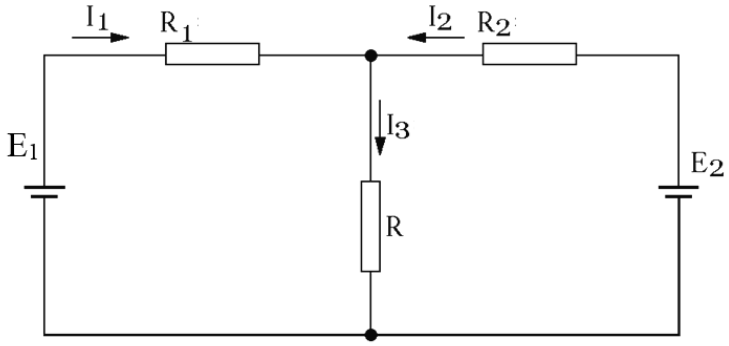
$$U_1 = U \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$U_2 = U \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

<u>אנרגיה והספק במעגלים טוריים:</u>

$[j]$	W_n	האנרגיה המתפתחת על צרכן מספר n	$W_n = U_n \cdot I \cdot t = \frac{U_n^2 \cdot t}{R_n} = I^2 \cdot R_n \cdot t$
$[w]$	P_n	ההספק של צרכן מספר n	$P_n = U_n \cdot I = \frac{U_n^2}{R_n} = I^2 \cdot R_n$
$[V]$	U_n	המתח על צרכן מס' n.	
$[A]$	I	עוצמת הזרם במעגל.	
$[\Omega]$	R_n	התנגדות הנגד מס' n.	
$[Sec]$	t	הזמן בו נמשך זרימת הזרם במעגל.	

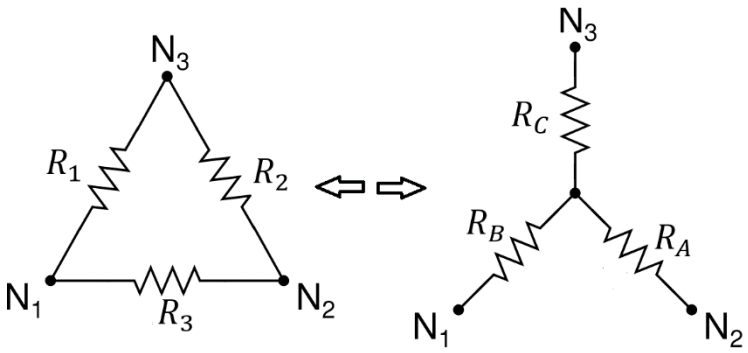
<u>פתרון רשתות בעזרת זרמי ענפים:</u>



נכתוב את חוקי קירקהוף:

$$\begin{cases} I: & I_1 + I_2 = I_3 \\ II: & I_1 \cdot R_1 + I_3 \cdot R = E_1 \\ III: & I_2 \cdot R_2 + I_3 \cdot R = E_2 \end{cases}$$

המרת כוכב משולש בזרם ישר :



המרה מכוכב למשולש:

$$R_1 = \frac{R_A.R_B + R_A.R_C + R_B.R_C}{R_A}$$

$$R_2 = \frac{R_A.R_B + R_A.R_C + R_B.R_C}{R_B}$$

$$R_3 = \frac{R_A.R_B + R_A.R_C + R_B.R_C}{R_C}$$

המרה ממשולש לכוכב :

$$R_A = \frac{R_2.R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$

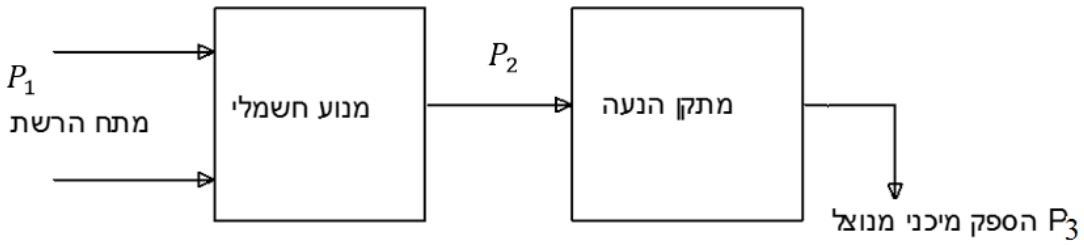
$$R_B = \frac{R_1.R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$

$$R_C = \frac{R_1.R_2}{R_1 + R_2 + R_3}$$

המרת אנרגיה חשמלית

א. **המרת אנרגיה חשמלית לאנרגיה מכנית:**

1 kg = 9.81 N



$P_1 = \frac{P_3}{\eta_T}$	ההספק החשמלי המסופק מהרשת	P_1	$[w]$
	ההספק המכני המתקבל מהמנוע.	P_2	$[w]$

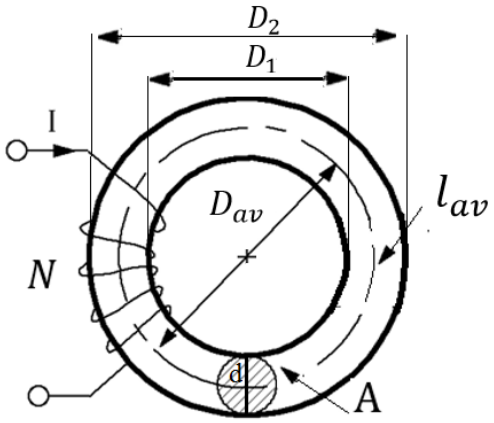
$[w]$	P_3	ההספק המכני המנוצל.	
	η_T	הנצילות השקולה של המערכת .	$\eta_T = \eta_1 \cdot \eta_2 \quad ; \quad \eta_T = \frac{P_3}{P_1}$
	η_1	נצילות המנוע החשמלי.	$\eta_1 = \frac{P_2}{P_1}$
	η_2	נצילות מתקן ההנעה.	$\eta_2 = \frac{P_3}{P_2}$
$[w]$	P_1	ההספק החשמלי המסופק מהרשת.	$P_1 = U \cdot I = \frac{U^2}{R} = I^2 \cdot R$
$[A]$	I	הזרם במעגל.	
$[V]$	U	מתח המעגל.	
$[\Omega]$	R	התנגדות המעגל.	
$[w]$	P_2	ההספק המכני המנוצל.	$P_2 = \frac{F \cdot S \cdot 9.81}{t}$
$[kgr]$	F	הכוח/ המשקל.	
$[m]$	S	המרחק במטרים.	
$[sec]$	t	הזמן בשניות.	
ב. **<u>המרת אנרגיה חשמלית לאנרגיה של חום</u>**: (חוק ז'אול)			
Cal	Q	כמות החום ביחידות קלוריה.	$Q=m \cdot c \cdot \Delta T = 0.24P \cdot t \cdot \eta$
$[gr]$	m	מסה/ משקל ביחידות גרם.	$\Delta T = T_2 - T_1$
$\left[\frac{cal}{gr \times c^0}\right]$	c	החום הסגולי של החומר.	
C^0	T_1	הטמפרטורה ההתחלתית במעלות צלזיוס.	
C^0	T_2	הטמפרטורה לאחר סיום החימום במעלות צלזיוס.	
	η	נצילות מתקן החימום.	
$[sec]$	t	הזמן בשניות.	
$[w]$	P	ההספק החשמלי של גוף החימום.	

<u>עוצמת השדה המגנטי סביב מוליך נושא זרם:</u>

$\frac{[AT]}{m}$	H	עוצמת השדה המגנטי.	$H = \frac{I}{2\pi r}$
$[A]$	I	הזרם העובר במוליך.	
$[m]$	r	המרחק מהמוליך.	

<u>המעגל המגנטי הפשוט:</u>

D_1- קוטר פנימי של ליבת הברזל.
D_2- קוטר חיצוני של ליבת הברזל.
D_{av}- קוטר ממוצע של ליבת הברזל.
d- קוטר שטח חתך של ליבת הברזל.



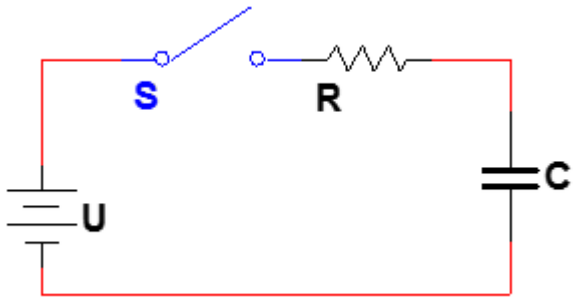
$[AT]$	M	**הכוח המגנטומניע (כמ"מ):**	$M = I \cdot N$
$\frac{[AT]}{m}$	H	עוצמת השדה המגנטי.	$H = \frac{I \cdot N}{l}$
$[m]$	l_{av}	אורך המסלול המגנטי הממוצע.	$l_{av} = \pi \cdot D_{av}$; $D_{av} = \frac{D_2 + D_1}{2}$
$[A]$	I	הזרם העובר בסליל.	
$[T]$	N	מספר כריכות הסליל.	
$\left[\frac{Wb}{m^2}\right]$	B	*צפיפות השטף המגנטי.*	$B = \mu \cdot H$
$\left[\frac{\text{Wb}}{AT \times m}\right]$	μ	החדירות (חלחלות) המגנטית המוחלטת.	$\mu = \mu_o \cdot \mu_r$
$\left[\frac{\text{Wb}}{AT \times m}\right]$	μ_o	*חדירות (חלחלות) הריק.*	$\mu_o = 4\pi 10^{-7} \left[\frac{Wb}{AT \times m}\right]$
	μ_r	*החדירות (חלחלות)* היחסית של הליבה.	
$[Wb]$	ϕ	השטף המגנטי.	$\phi = B \cdot A$
$[m^2]$	A	שטח חתך הליבה.	$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$; $d = \frac{D_2 - D_1}{2}$
$\left[\frac{AT}{Wb}\right]$	R_m	*המיאון (התנגדות מגנטית) .*	$R_m = \frac{M}{\phi}$; $R_m = \frac{l_{av}}{\mu \cdot A}$

כוחות בשדה מגנטי			
$N \cdot m$	F	הכוח בין שני מוליכים מקביליים נושאי זרם.	$F = \frac{\mu \cdot l}{2\pi r} I_1 \cdot I_2$
$\left[\frac{\text{Wb}}{AT \times m}\right]$	μ	*החדירות (חלחלות) המגנטית המוחלטת.*	
$[m]$	l	אורך המוליכים ביחידות.	
$[m]$	r	המרחק בין המוליכים.	
[A]	I_1	הזרם העובר במוליך הראשון.	
[A]	I_2	הזרם העובר במוליך השני.	
$[N]$	F	**הכוח הפועל על מוליך נושא זרם בתוך שדה מגנטי**.	$F = B \cdot I \cdot l \cdot \sin\alpha$
$\left[\frac{Wb}{m^2}\right]$	B	*צפיפות השטף המגנטי.*	
$[A]$	I	הזרם העובר במוליך.	
$[m]$	l	אורך המוליך בתוך השדה המגנטי.	
	α	הזווית בין המוליך לשטף המגנטי במעלות.	
$[N]$	F	**הכוח הפועל על מטען הנע במהירות קבועה בתוך שדה מגנטי**.	$F = B \cdot q \cdot V \cdot \sin\alpha$
$\left[\frac{Wb}{m^2}\right]$	B	*צפיפות השטף המגנטי.*	
$[C]$	q	המטען ביחידות קולון.	
$\left[\frac{m}{sec}\right]$	V	המהירות ביחידות מטר לשנייה.	
הכוח האלקטרומניע (כא"מ) המושרה בתיל הנע במהירות קבועה בתוך שדה מגנטי			
$[V]$	E	*הכא"מ המושרה במוליך.*	$E = B \cdot V \cdot l \cdot \sin\alpha$
$\left[\frac{Wb}{m^2}\right]$	B	*צפיפות השטף המגנטי.*	
$[m]$	l	אורך המוליך בתוך השדה המגנטי.	
$\left[\frac{m}{sec}\right]$	V	מהירות תנועת המוליך.	
	α	הזווית בין המוליך לשטף המגנטי במעלות.	
הכוח האלקטרומניע (כא"מ) המושרה בכריכה מלבנית המסתובבת סביב ציר בתוך שדה מגנטי.			
$[V]$	e	*הכא"מ המושרה בכריכה.*	$e = 2N \cdot B \cdot V \cdot l \cdot \sin\alpha$
$\left[\frac{Wb}{m^2}\right]$	B	*צפיפות השטף המגנטי.*	
$[m]$	l	אורך המוליך בתוך השדה המגנטי.	

$\left[\frac{m}{sec}\right]$	V	מהירות תנועת הכריכה.
	N	מספר כריכות הסליל.
	α	הזווית בין הכריכה לשטף המגנטי במעלות.
<u>הכוח האלקטרומניע (כא"מ) המושרה בסליל הנמצא בתוך שדה מגנטי משתנה:</u>		
$[V]$	E	*הכא"מ הנגדי הנוצר בסליל.* חוק פרדיי $E = N\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$ **חוק לנץ** $E = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$
$[Wb]$	$\Delta\phi$	שינויי השטף.
$[sec]$	Δt	שינויי הזמן בשניות.
$[A]$	ΔI	שינויי הזרם.

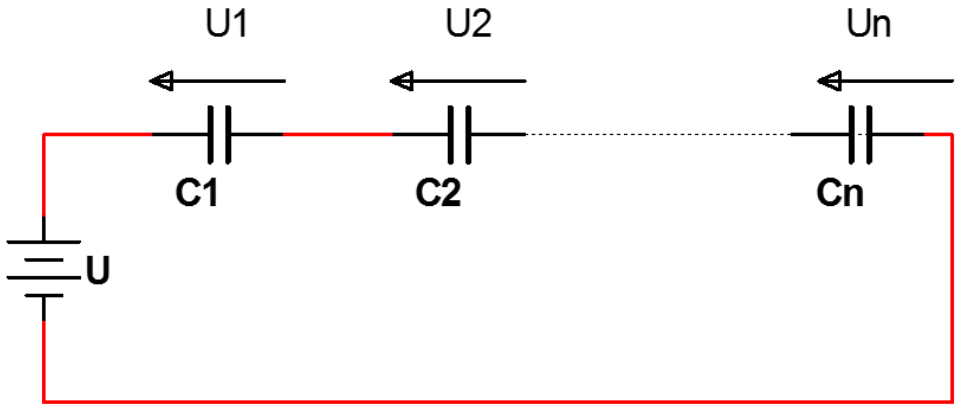
<u>תלות קיבול הקבל במידותיו וסוג האלקטרוליט</u>:		
$[F]$	C	*קיבול הקבל ביחידות פרד.* $C = \frac{\varepsilon_o \cdot \varepsilon_r \cdot A}{d}$
$[F]$	C	**<u>הקיבול של קבל לוחות</u>**. $C = \frac{\varepsilon_o \cdot \varepsilon_r \cdot A}{d} \cdot (n-1)$
$\left[\frac{F}{m}\right]$	ε_o	*הקבוע הדיאלקטרי של האוויר ביחידות פרד למטר.*
	ε_r	*הקבוע הדיאלקטרי היחסי של האלקטרוליט.*
$[m^2]$	A	*שטח לוחות הקבל ביחידות מטר ריבוע.*
$[m]$	d	*המרחק בין לוחות הקבל (עובי האלקטרוליט) ביחידות מטר.*
	n	מספר לוחות הקבל.
$\left[\frac{V}{m}\right]$	E	**<u>עוצמת השדה החשמלי</u>**: $\mathrm{E} = \frac{U}{d}$
$[V]$	U	*המתח על הקבל ביחידות וולט.*
$[m]$	d	*המרחק בין שני לוחות בקבל ביחידות מטר.*

הקבל במעגל זרם ישר



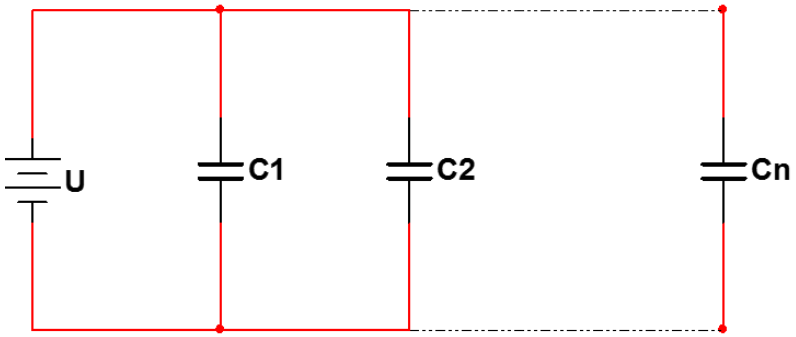
$[C]$	Q	**המטען בין לוחות הקבל.**	$Q = U \cdot C$
$[V]$	U	*המתח על הקבל ביחידות וולט.*	$\mathrm{U} = \frac{Q}{C}$
$[F]$	C	קיבול הקבל ביחידות פרד.	$\mathrm{C} = \frac{Q}{U}$
$[sec]$	τ	**קבוע הזמן של מעגל RC.**	$\tau = R \cdot C$
$[\Omega]$	R	התנגדות הנגד דרכו נטען הקבל ביחידות אום.	
$[J]$	W	**האנרגיה האגורה בקבל** :	$\mathrm{W} = \frac{Q \cdot U}{2} = \frac{C \cdot U^2}{2} = \frac{Q^2}{2 \cdot C}$

חיבור קבלים בטור (במעגל זרם ישר)



		הקיבול השקול:	$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \cdots + \frac{1}{C_n}$
		המתחים במעגל	$\mathrm{U} = U_1 + U_2 + \cdots + U_n$
		המטענים במעגל:	$Q_T = Q_1 = Q_2 = \cdots = Q_n$
$[C]$	Q_n	המטען של הקבל מס' n במעגל.	$Q_n = U_n \cdot C_n$
$[V]$	U_n	המתח על הקבל מס' n במעגל.	
$[F]$	C_n	הקיבול של הקבל מס' n במעגל ביחידות פרד.	

חיבור קבלים במקביל (במעגל זרם ישר)



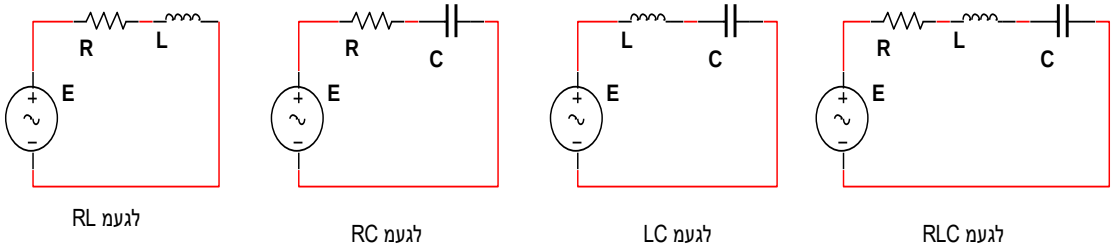
		הקיבול השקול:	$C_T = C_1 + C_2 + \cdots + C_n$
		המתחים במעגל	$U = U_1 = U_2 = \cdots = U_n$
		המטענים במעגל:	$Q_T = Q_1 + Q_2 + \cdots + Q_n$
$[C]$	Q_n	המטען של הקבל מס' n במעגל.	$Q_n = U_n \cdot C_n$
$[V]$	U_n	המתח על הקבל מס' n במעגל.	
$[F]$	C_n	הקיבול של הקבל מס' n במעגל ביחידות פרד.	

מעגלי מתח וזרם חילופין AC

$[V]$	e	*הכא"מ הרגעי המושרה בסליל.*	$e = E_m \cdot (\sin\alpha \pm \varphi)$
$[A]$	i	הזרם הרגעי.	$i = \frac{e}{R} = \frac{E_m}{R} \cdot (\sin\alpha \pm \varphi) = I_m \cdot (\sin\alpha \pm \varphi)$
$[V]$	E_m	*הכא"מ המקסימלי המושרה.*	$E_m = 2NBVL$
$[A]$	I_m	הזרם המקסימלי.	$I_m = \frac{E_m}{R}$
$\left[\frac{Wb}{m^2}\right]$	B	*צפיפות השטף המגנטי.*	
$[\Omega]$	R	התנגדות המעגל.	
$\left[\frac{m}{sec}\right]$	V	מהירות תנועת הסליל.	
$[m]$	L	אורך המוליך בתוך השדה המגנטי.	
	N	מספר כריכות הסליל.	
	φ	זווית ההקדמה/פיגור של הזרם כלפי המתח.	
	α	זווית ביחידות מעלות או ראדינים.	

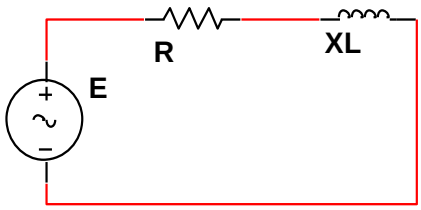
$E_{AV} = \frac{2}{\pi} \cdot E_m = 0.637 \cdot E_m$	הערך הממוצע (בפרק זמן של מחצית מחזור).	E_{AV}	$[V]$
$E = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot E_m = 0.707 \cdot E_m$	**הערך היעיל (האפקטיבי)**.	E	$[V]$
$T = \frac{1}{f}$	זמן המחזור (אורך הגל) בשניות.	T	$[sec]$
$f = \frac{1}{T}$	התדירות (מספר המחזורים בשנייה)	f	$[Hz]$
$\omega = 2\pi f$	*התדירות המעגלית (מהירות זוויתית).*	ω	$\left[\frac{rad}{sec}\right]$
$\omega t = \alpha$	זווית ביחידות רדיאנים.	ωt	$[rad]$

מעגלים טוריים בזרם חילופין



לגעם RL | לגעם RC | לגעם LC | לגעם RLC

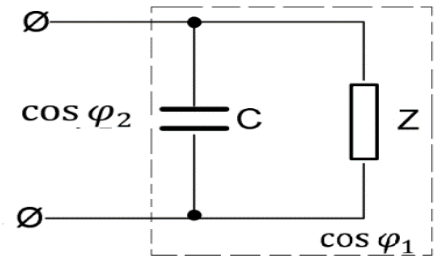
מעגל *RL טורי*:



$\boldsymbol{Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}}$	עכבת המעגל.	Z	$[\Omega]$
$\boldsymbol{X_L = 2\pi f L = \omega L}$	ההיגב ההשראי של הסליל.	X_L	$[\Omega]$
	ההתנגדות במעגל.	R	$[\Omega]$
$\boldsymbol{I = \frac{E}{Z}}$	הזרם במעגל.	I	$[A]$
$\boldsymbol{E = \sqrt{E_R^2 + E_L^2}}$	**הערך היעיל (האפקטיבי)**.- מתח המקור.	E	$[V]$

$[V]$	E_R	המתח על הנגד.	$E_R = I \cdot R$
$[V]$	E_L	המתח על הסליל.	$E_L = I \cdot X_L$
		<u>הספקים במעגל RL טורי</u>:	
$[VA]$	S	ההספק המדומה של המעגל.	$S = E \times I = I^2 \times Z = \frac{E^2}{Z}$ $S = \sqrt{P^2 + Q_L^2}$
$[w]$	P	ההספק הממשי (האקטיבי) במעגל.	$P = E \cdot I \cdot \cos\varphi = I^2 \cdot R = \frac{E_R^2}{R}$
$[°]$	φ	זווית המופע בין המתח לזרם במעגל.	
[VAR]	Q_L	**ההספק הריאקטיבי (ההספק העיוור או ההספק ההיגבי)**.	$Q_L = E \cdot I \cdot \sin\varphi = I^2 \cdot X_L = \frac{E_L^2}{X_L}$
		תדירות תהודה	
$[Hz]$	f_r	תדירות התהודה ביחידות הרץ.	$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$
$[rad/sec]$	ω_r	תדירות תהודה מעגלית ביחידות רדיאן לשנייה.	$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$

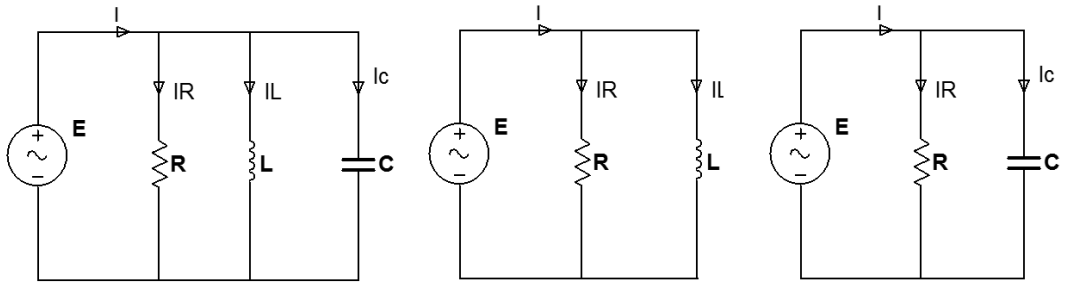
<u>שיפור מקדם ההספק ע"י חיבור קבל במקביל למעגל</u>



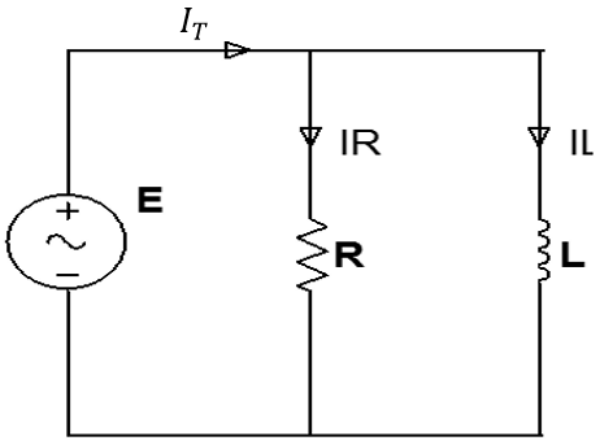
$[F]$	C	**<u>ערך הקבל הדרוש לשיפור מקדם ההספק מ-</u>** $\cos\varphi_1$ ל $\cos\varphi_2$.	$C = \frac{P \cdot (\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2)}{2\pi f \cdot E^2}$ $C = \frac{P \cdot (\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2)}{\omega E^2}$
[VAR]	Q_C	**ההספק ההיגבי של הקבל הדרוש לשיפור מקדם ההספק מ- $\cos\varphi_1$ ל $\cos\varphi_2$.**	$Q_C = P(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2)$
$[Hz]$	f	*תדירות מתח המקור ביחידות הרץ.*	
$\left[\frac{rad}{sec}\right]$	ω	התדירות המעגלית רדיאן לשנייה.	
$[°]$	φ_1	*זווית המופע לפני שיפור גורם ההספק.*	
$[°]$	φ_2	*זווית המופע אחרי שיפור גורם ההספק.*	

$[W]$	P	*ההספק הממשי של המעגל.*
$[V]$	E	מתח המקור.

<u>מעגלים מקביליים בזרם חילופין</u>



<u>מעגל RL מקבלי</u>

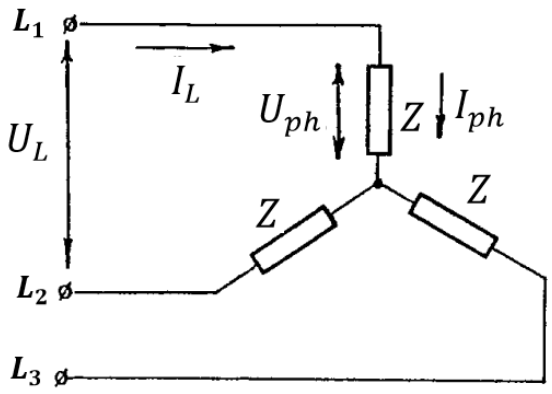


$[A]$	I_R	*הזרם העובר בנגד.*	$I_R = \frac{E}{R}$
$[A]$	I_L	*הזרם העובר בסליל.*	$I_L = \frac{E}{X_L}$
$[A]$	I_T	**הזרם הכללי במעגל .**	$I_T = \sqrt{I_R^2 + {I_L}^2}$
$[\Omega]$	Z	**עכבת העגל.**	$Z = \frac{E}{I_T}$
$[V]$	E	*מתח המקור.*	
		<u>הספקים במעגל RL מקבילי</u> :	
$[VA]$	S	ההספק המדומה של המעגל.	$S = E \cdot I_T = I_T^2 \cdot Z = \frac{E^2}{Z}$ $S = \sqrt{P^2 + {Q_L}^2}$
$[w]$	P	*ההספק הממשי הפעיל של מעגל.*	$P = E \cdot I_T \cdot \cos\varphi = I_R^2 \cdot R = \frac{E^2}{R}$

[VAR]	Q_L	ההספק העיוור של הסליל.	$Q_L = E \cdot I_T \cdot sin\,\varphi = \frac{E^2}{X_L} = I_L^2 \cdot X_L$
[VAR]	Q_L	ההספק ההיגבי של הסליל.	$Q_L = I_1^2 \cdot X_L$
[VAR]	Q_C	ההספק ההיגבי של הקבל.	$Q_L = I_1^2 \cdot X_L$
[VA]	$\lvert S_T \rvert$	הערך המוחלט של ההספק הכללי S_T.	
[A]	$\lvert \widetilde{I} \rvert$	הזרם המוחלט של הפזור I.	
[°]	φ_1	זוית המופע של ענף מספר 1.	
[°]	φ_2	זוית המופע של ענף מספר 2.	

מעגלים תלת מופעיים

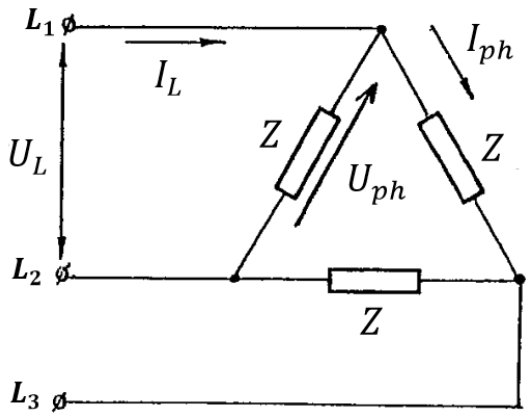
מעגל תלת מופעי (פזי) בחיבור כוכב:



$[A]$	I_{ph}	הזרם הפזי העובר בעומס Z .	$\boldsymbol{I_{ph} = I_L}$; $\boldsymbol{I_{ph} = \frac{U_{ph}}{Z}}$
$[A]$	I_L	הזרם בקו אספקה (הזרם הקווי).	
[V]	U_L	המתח השלוב, המתח בין שני קווי אספקה.	$\boldsymbol{U_L = \sqrt{3} \cdot U_{ph}}$

[V]	U_{ph}	המתח הפזי, המתח בין קו אספקה לנקודת האפס.	$\boldsymbol{U_{ph} = \frac{U_L}{\sqrt{3}}}$
[Ω]	Z	העכבה של העומס בכל פאזה.	
[VA]	S	*ההספק המדומה במעגל.*	$S = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L$
[W]	P	*ההספק הממשי במעגל.*	$P = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos\varphi$
[VAR]	Q	*ההספק העיוור (הריאקטיבי במעגל).*	$Q = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \sin\varphi$

<u>מעגל תלת מופעיים בחיבור משולש:</u>



[V]	U_L	המתח השלוב, המתח בין שני קווי אספקה.	$U_L = U_{ph}$
[V]	U_{ph}	המתח הפזי, המתח בין הדקי העומס.	
$[A]$	I_L	הזרם בקו אספקה (הזרם הקווי).	$I_L = \sqrt{3} \cdot I_{ph}$
$[A]$	I_{ph}	הזרם הפזי העובר בעומס Z .	$I_{ph} = \frac{U_{ph}}{Z}$; $I_{ph} = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$
[Ω]	$\boldsymbol{Z}$	העכבה של העומס בכל פאזה.	
[VA]	S	*ההספק המדומה במעגל.*	$S = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L$
[W]	P	*ההספק הממשי במעגל.*	$P = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos\varphi$

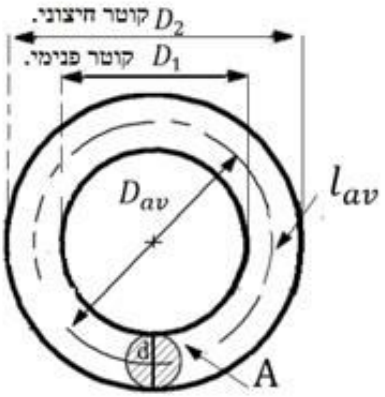
יחסים בן יחידות פיסקליות

$1K = 10^{3} \rightarrow EXP\ 3$	$1m = 10^{-3} \rightarrow EXP\ -3$
$1M = 10^{6} \rightarrow EXP\ 6$	$1\mu = 10^{-6} \rightarrow EXP\ -6$
$1G = 10^{9} \rightarrow EXP\ 9$	$1\eta = 10^{-9} \rightarrow EXP\ -9$
$1T = 10^{12} \rightarrow EXP\ 12$	$1p = 10^{-12} \rightarrow EXP\ -12$

המרת יחידות

מילימטר	$(mm) \rightarrow (m)$	מטר EXP 3	10^{-3}
מילימטר מרובע	$(mm^2) \rightarrow (m^2)$	מטר מרובע EXP 6	10^{-6}
סנטימטר	$(cm) \rightarrow (m)$	מטר EXP 2	10^{-2}
סנטימטר מרובע	$(cm^2) \rightarrow (m^2)$	מטר מרובע EXP 4	10^{-4}
מטר	$(m) \rightarrow (mm)$	מילימטר EXP 3	10^{3}
מטר מרובע	$(m^2) \rightarrow (mm^2)$	מילימטר מרובע EXP 6	10^{6}
מטר	$(m) \rightarrow (cm)$	סנטימטר EXP 2	10^{2}
מטר מרובע	$(m^2) \rightarrow (cm^2)$	סנטימטר מרובע EXP 4	10^{4}

מעגל



קוטר ממוצע.	$D_{av} = \frac{D_2 + D_1}{2}$
קוטר החתך.	$d = \frac{D_2 - D_1}{2}$
היקף ממוצע.	$l_{av} = \pi \cdot D_{av}$
שטח חתך.	$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$

צורה כללית של משוואה ריבועית: $a \cdot x^2 + b \cdot x + c = 0$

נוסחה לפתרון משוואה ריבועית: $x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a}$

מכונות חשמל

$$1[N.m] = \frac{1}{9.81}[Kg.m]$$

יחידות	גדלים	תיאור	נוסחה
שנאים חד פאזים			
$[V]$	E	כא"מ מושרה אפקטיבי.	$E = 4.44 \cdot f \cdot N \cdot \phi_{max}$
$[T]$	N	מספר כריכות.	
$[Hz]$	f	תדירות.	
			$\phi_{max} = B_{max} \cdot A$
$[V]$	E_1	כא"מ מושרה אפקטיבי בראשוני	$E_1 = 4.44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \phi_{max}$
$[V]$	E_2	כא"מ מושרה אפקטיבי בשניוני	$E_2 = 4.44 \cdot f \cdot N_2 \cdot \phi_{max}$
$[Wb]$	ϕ_{max}	השטף המגנטי המירבי בגרעין	
$\left[\frac{\text{Wb}}{m^2}\right]$	B_{max}	השראה מגנטית מירבית.	
שנאי אידיאלי			
	K	תמסורת השנאי, מקדם השנאה (transformation ratio)	$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$
$[T]$	N_1		
$[T]$	N_2		
שנאי מעשי			
	K	תמסורת השנאי, מקדם השנאה (transformation ratio)	$K = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_{1n}}{E_{2n}} = \frac{U_{1n}}{U_{2n}}$
שנאי חד-מופעי			
$[VA]$	S_n	הספק מדומה נקוב.	$S_n = U_n \cdot I_n$
$[V]$	U_{1n}	מתח נקוב בראשוני.	
$[V]$	U_{2n}	מתח נקוב בשניוני.	
$[A]$	I_{1n}	זרם נקוב בראשוני	
$[A]$	I_{2n}	זרם נקוב בשניוני.	

נצילות השנאי			
	η	נצילות השנאי בכל עומס	$\eta = \frac{P_2}{P_1}$
	η_{max}	הנצילות המקסימלית של השנאי	$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{fe} + \Delta P_{cu}}$
		$\eta_{max} = \frac{\beta_{max} \cdot S_n \cdot \cos\varphi_2}{\beta_{max} \cdot S_n \cdot \cos\varphi_2 + \Delta P_{fe} + \beta^2{}_{max} \cdot \Delta P_{cun}}$	$\eta = \frac{\beta \cdot S_n \cdot \cos\varphi_2}{\beta \cdot S_n \cdot \cos\varphi_2 + \Delta P_{fe} + \beta^2 \cdot \Delta P_{cun}}$
	β_{max}	מקדם העמסה בו הנצילות היא מקסימלית	$\beta_{max} = \sqrt{\frac{\Delta P_{fe}}{\Delta P_{cun}}}$

שנאים תלת פאזים

שנאי אידיאלי תלת פאזי:

$\Delta P_{fe} = \Delta P_{cu} = 0$

$\eta = 1$	$E_{1n} = U_{1n}$	$E_{2n} = U_{2n}$
$\eta\% = 100\%$	$P_1 = P_2$	
$K = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_{1nph}}{E_{2ph}} = \frac{U_{1ph}}{U_{2ph}} = \frac{I_{2ph}}{I_{1ph}}$		
$I_{1n} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{1n}}$		$U_{1n} = U_{1L}$
$I_{2n} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{2n}}$		$U_{2n} = U_{2L}$
$P_1 = \sqrt{3} \cdot U_{1n} \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1$		$I_{1n} = I_{1L}$

$P_2 = \sqrt{3} \cdot U_{2n} \cdot I_2 \cdot \cos\varphi_2$	$I_{2n} = I_{2L}$

שנאי מעשי תלת פאזי:

$\Delta P_{fe} \neq 0 \quad ; \quad \Delta P_{cu} \neq 0 \quad ; \quad \eta < 1$

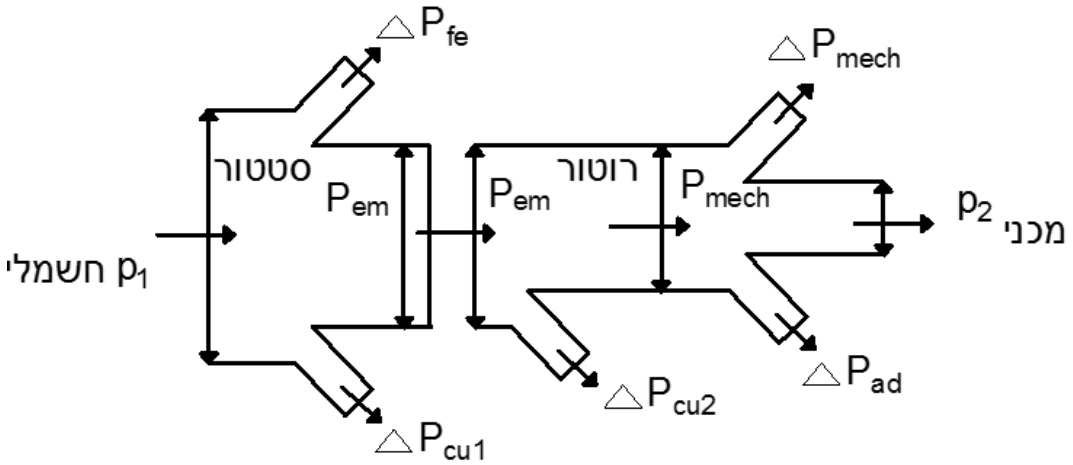
$K = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_{1ph}}{E_{2ph}} \cong \frac{U_{1nph}}{U_{2nph}}$	$P_1 \neq P_2$	
$I_{1n} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{1n}}$	$P_1 = \sqrt{3} \cdot U_{1n} \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1$	
$I_{2n} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{2n}}$	$P_2 = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_2 \cdot \cos\varphi_2$	

מנוע השראתי תלת-מופעי

$n_1 = \frac{60 f_1}{p}$	מהירות השדה המסתובב.	n_1	[rpm]
$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$	חליקה	s	
	תדירות הרשת	f_1	[Hz]
$n_2 = n_1(1 - s)$	מהירות הרוטור.	n_2	[rpm]

[A]	I_1	זרם קווי בסטטור.	$I_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot \cos\varphi_1}$

דיאגרמה אנרגטית של מנוע אסינכרוני



$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_{1L} \cdot \cos\varphi_1$$

$$P_{em} = P_1 - \Delta P_s \quad ; \quad \Delta P_s = \Delta P_{fe} + \Delta P_{cu1}$$

$$\Delta P_{fe} = P_0 - \Delta P_{cu10}$$

$$P_0 = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_{1L0} \cdot \cos\varphi_0$$

$$\Delta P_{cu1} = 3 \cdot I_{1ph}^2 \cdot R_1$$

$$\Delta P_{cu2} = 3 \cdot I_{2ph}'^2 \cdot R_2' = S \cdot P_{em}$$

$$P_{mech} = P_{em}(1 - s)$$

נצילות המנוע

$$1HP = 736W$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad ; \quad \eta\% = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \quad ; \quad \eta = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} \quad ; \quad \eta\% = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} \cdot 100$$

$\Delta P = \Delta P_{cu1} + \Delta P_{cu2} + \Delta P_{fe} + P_{mech} + \Delta P_{add}$		
נצילות	η	
נצילות באחוזים.	$\eta\%$	
הספק כניסה למנוע הספק חשמלי.	P_1	[W]
הפסדי הספק בנחושת של סלילי הסטטור.	ΔP_{cu1}	[W]
הפסדי הספק בליבת הסטטור, הפסדי הברזל..	ΔP_{fe}	[W]
הפסדי הספק כללי בסטטור.	ΔP_s	[W]
הספק חשמלי / אלקטרומגנטי העובר מהסטטור לרוטור.	P_{em}	[W]
הפסדי הספק בנחושת של סלילי הרוטור.	P_{cu2}	[W]
הספק מכני של המנוע.	P_{mech}	[W]
הפסדי הספק כללי בסטטור.	ΔP_{mech}	[W]
הספק חשמלי / אלקטרומגנטי העובר מהסטטור לרוטור.	ΔP_{add}	[W]
הספק יציאה / מכני של המנוע.	P_2	[W]

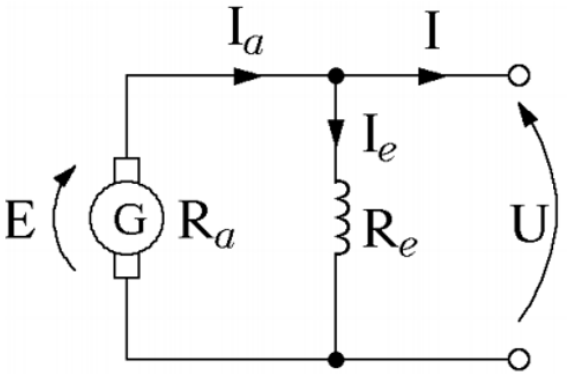
מומנטים במנוע

בעומס נומינלי $M_2 = M_n = \frac{9.55 \cdot P_2}{n_2}$	$M_0 = \Delta M_{mech} = \frac{9.55 \cdot \Delta P_{mech}}{n_2}$
$M_{em} = \frac{9.55 \cdot P_{em}}{n_1}$	$M_{em} = M_n + M_0$

מומנט מכני מיציאה של המנוע בעומס נומינלי .	M_2	[Nm]
מומנט נומינלי.	M_n	[Nm]
מומנט אלקטרומגנטי העובר מהסטטור לרוטור.	M_{em}	[Nm]
הפסדי הספק כוללים.	ΔP	[W]
מומנט חיכוך.	M_0	[Nm]
הספק נקוב ביציאה.	P_n	[W]

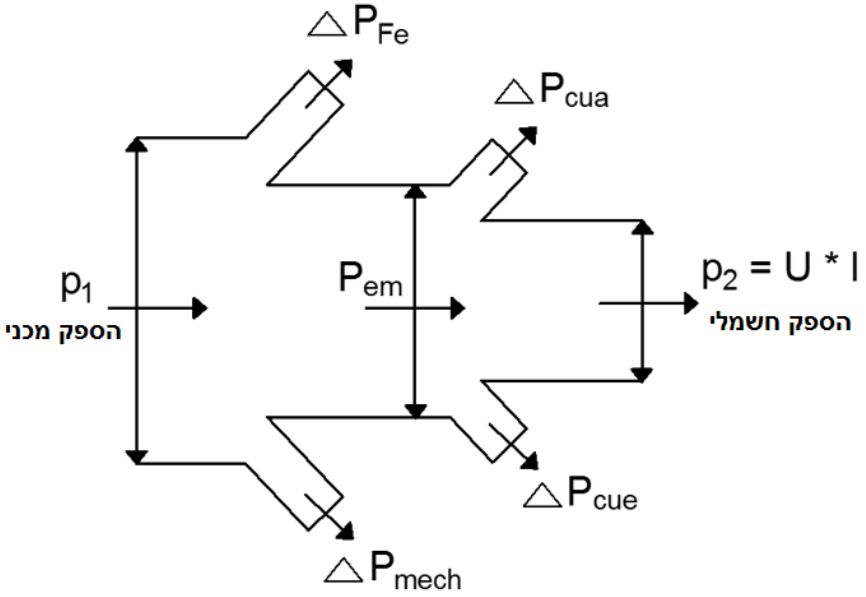
<u>מכונות לזרם ישר</u>			
$P = U \cdot I$	הספק חשמלי.	P	[V]
$P_{em} = E \cdot I_a$	הספק אלקטרומגנטי.	P_{em}	[W]
$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{9.55 \cdot P_n}{n_n}$	מומנט נקוב.	M_n	[Nm]
$M = \frac{P}{\omega} = \frac{P \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot n}$	מומנט .	M	[Nm]
	מהירות זוויתית.	ω	$\left[\frac{\text{rad}}{sec}\right]$
	מהירות זוויתית נומינלית.	ω_n	$\left[\frac{\text{rad}}{sec}\right]$

<u>גנרטור לזרם ישר</u>		
מתח על הדקי המכונה.	U	[V]
מפל מתח על המברשות.	ΔU_b	[V]
התנגדות סליל העירור.	R_e	[Ω]
התנגדות העוגן.	R_a	[Ω]
התנגדות סליל העירור הטורי.	R_{es}	[Ω]
התנגדות סליל העירור המקבילי.	R_{ep}	[Ω]
גנרטור עירור מקבילי		
$U = E - I_a \cdot R_a - \Delta U_b$		
$I_a = I + I_e$		

$I_e = \frac{U}{R_e}$	
$I = \frac{P_2}{U}$	

<u>מפה אנרגטית של גנרטור לזרם ישר.</u>

<u>1HP=736W</u>



$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} \quad ; \quad P_1 = P_2 + \Delta P \quad ; \quad P_2 = U \cdot I \; ; \quad P_{em} = E \cdot I_a$$

[W]	ΔP^*	הפסדי הספק הקבועים של הגנרטור.	$\Delta P^* = \Delta P_{fe} + \Delta P_{mech} = P_0$

[W]	ΔP_{fe}	הפסדי הספק בברזל של הגנרטור.	
[W]	ΔP_{mech}	הפסדי הספק מחיכוך של הגנרטור.	
[W]	P_{em}	הספק חשמלי/אלקטרומגנטי של הגנרטור.	$P_{em} = P_2 + \Delta P_{cu} = E \cdot I_a$
[W]	P_{cu}	הפסדי הספק בנחושת הכללים תלויים בעומס.	$\Delta P_{cu} = \Delta P_{cua} + \Delta P_{cue}$
[W]	ΔP_{cua}	הפסדי הספק בנחושת של סלילי הרוטור.	$\Delta P_{cua} = {I_a}^2 \cdot R_a$
[W]	ΔP_{cue}	הפסדי הספק בנחושת של סלילי ההסטטור.	$\Delta P_{cue} = {I_e}^2 \cdot R_e$
[W]	P_1	הספק כניסה לגנרטור הספק מכני .	$P_1 = P_{em} + \Delta P^*$
[W]	P_2	הספק היציאה/גנרטור החשמלי.	$P_2 = P_1 - \Delta P$
$\Delta P = \Delta P^* + \Delta P_{cu} = \Delta P_{fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{cu1} + \Delta P_{cu2}$			
[W]	ΔP	הפסדי הספק הכללים של הגנרטור.	

<u>נצילות הגנרטור</u>

	η	נצילות הגנרטור.	$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1}$

	$\eta\%$	נצילות הגנרטור באחוזים.	$\eta\% = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} \cdot 100$
<u>מומנטים בגנרטור</u>			
[Nm]	M_1	מומנט הכניסה לגנרטור המומנט המניע את הגנרטור.	בעומס נומינלי – $M_1 = M_n = \frac{9.55 \cdot P_1}{n_2}$
[Nm]	M_1	מומנט הכניסה לגנרטור המומנט המניע את הגנרטור.	$M_1 = M_{em} + M_0$
[Nm]	M_0	מומנט החיכוך של הגנרטור.	$M_0 = \Delta M_{mech} = \frac{9.55 \cdot \Delta P_{mech}}{n}$

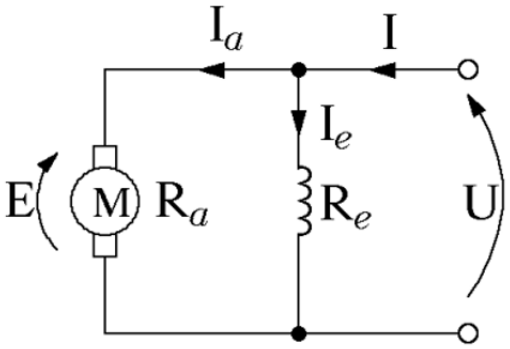
<u>מנוע לזרם ישר</u>			
[V]	U	מתח על הדקי המכונה.	
[V]	ΔU_b	מפל מתח על המברשות.	
[Ω]	R_e	התנגדות סליל העירור.	
[Ω]	R_a	התנגדות העוגן.	

$[\Omega]$	R_{es}	התנגדות סליל העירור הטורי.
$[\Omega]$	R_{ep}	התנגדות סליל העירור המקבילי.

מנוע עירור מקבילי.

- האינדקסים 1 ו- 2 מציינים את הפרמטרים בעומסים שונים.

$$E = U - I_a \cdot R_a - \Delta U_b$$



$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{E_2}{E_1}$$

$$\frac{M_{em_2}}{M_{em_1}} = \frac{I_{a_2}}{I_{a_1}} \quad ;$$

$$M_{em} = K_m \cdot \Phi \cdot I_a$$

$$I = \frac{P_1}{U} \quad ; \; I_e = \frac{U}{R_e}$$

$$I = I_a + I_e$$

$K_m = \frac{2p}{2a} \cdot \frac{N}{2\pi}$ קבוע המכונה של המומנט האלקטרומגנטי.

עבור ליפוף עניבה פשוט: $p = a$

עבור ליפוף גלי פשוט: $a = 1$

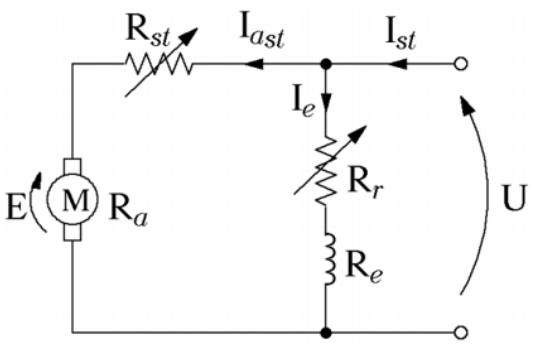
זרמי התנעה של מנוע מקבילי

בהתנעה ישירה ללא נגד התנעה

$$n_{st} = 0 \quad \Rightarrow \quad E_{st} = 0 \quad \Rightarrow \quad I_{ast} = \frac{U}{R_a}$$

אם לא צויין שקיים התנגדות R_r אז ערכו 0.

$$I_e = \frac{U}{R_e + R_r}$$



זרם בסלילי הרוטור בהתנעה ישירה.		I_{ast}	[A]
$I_{st} = I_{ast} + I_e$	הזרם של המנוע מהתנעה ישירה.	I_{st}	[A]
הכא"מ המושרה ברוטור בהתנעה.		E_{st}	[V]
מהירות המנוע בתנעה.		n_{st}	[Rpm]
התנגדות סלילי הרוטור.		R_a	[Ω]
מתח הזנה למנוע.		U	[V]

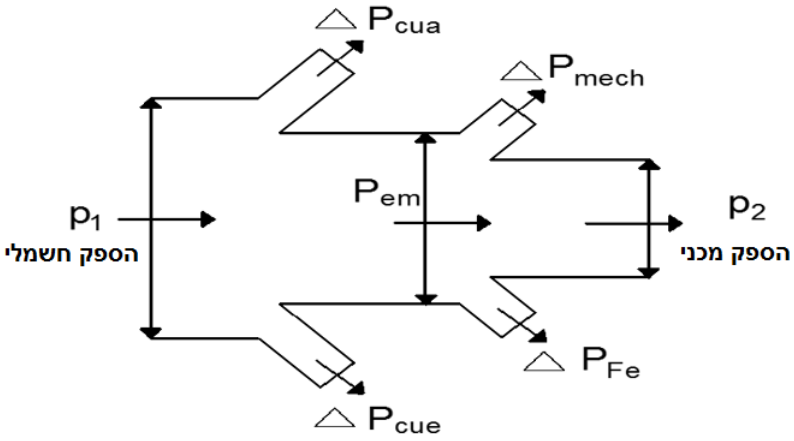
<u>התנעה לא ישירה הכוללת נגד התנעה R_{st}</u>

$$I^*_{ast} = \frac{U}{R_a + R_{st}} \quad \Leftarrow \quad E^*_{st} = 0 \quad \Leftarrow \quad n_{st} = 0$$

$R_{st} = \frac{U}{I^*_{ast}} - R_a$	התנגדות התנעה המחוברת לסלילי הרוטור בטור על מנת להקטין את זרם התנעה ברוטור ואת הזרם הכללי שצורך המנוע מהרשת בהתנעה.	R_{st}	[Ω]
$\mathrm{I}_e = \frac{U}{R_r + R_e}$	הזרם בסלילי הסטטור (סלילי השדה).	I_e	[A]
התנגדות לוויסות השדה האלקטרומגנטי המחוברת בטור לסלילי הסטטור. אם לא צויין שקיים התנגדות R_r אז ערכו 0.		R_r	[Ω]
$I^*_{st} = I^*_{ast} + I_e$	זרם המנוע בהתנעה כאשר התנעה אינה ישירה, התנגדות R_{st} מחוברת לסלילי הרוטור בטור.	I^*_{ast}	[A]
הזרם של המנוע מהתנעה לא ישירה.		$\boldsymbol{I^*_{st}}$	

מפה אנרגטית של מנוע לזרם ישר

1HP=736W



– כאשר העומס הינו נומינלי $P_2 = P_{2n}$

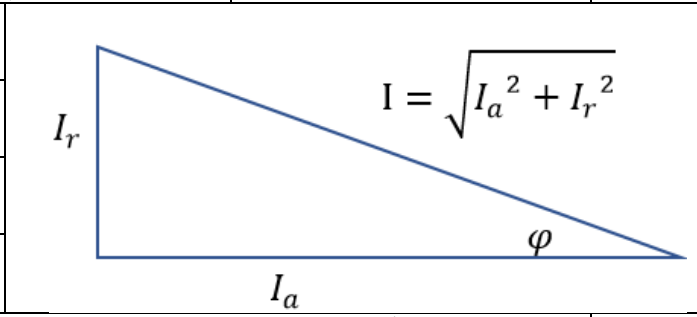
$P_1 = U \cdot I$	הספק כניסה למנוע הספק חשמלי.	P_1	[W]
$P_2 = P_{em} - \Delta P_{fe} - \Delta P_{mech}$	הספק היציאה/מכני של המנוע.	P_2	[W]
$\Delta P_{cua} = {I_a}^2 \cdot R_a$	הפסדי ההספק בנחושת של סלילי הרוטור.	ΔP_{cua}	[W]
$\Delta P_{cue} = {I_e}^2 \cdot R_e = \frac{{U_e}^2}{R_e}$	הפסדי הספק בנחושת של סלילי הסטטור.	ΔP_{cue}	[W]
$\Delta P_{cu} = \Delta P_{cua} + \Delta P_{cue}$	הפסדי ההספק כללים בנחושת תלויים בעומס.	ΔP_{cu}	[W]
$P_{em} = E \cdot I_a$ $P_{em} = P_1 - \Delta P_{cua} - \Delta P_{cue}$	הספק חשמלי/אלקטרומגנטי של המנוע.	P_{em}	[W]
$\Delta P^* = \Delta P_{fe} + \Delta P_{mech}$	הפסדי הספק הקבועים של המנוע.	ΔP^*	[W]
הפסדי ההספק בברזל של המנוע.		ΔP_{fe}	[W]
הפסדי הספק מחיכוך של המנוע.		ΔP_{mech}	[W]
הפסדים כללים של המנוע.		ΔP	[W]
$\Delta P = \Delta P_{fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{cua} + \Delta P_{cue}$			
$P_2 = P_1 - \Delta P$			

נצילות במנוע זרם ישר			
$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1}$	נצילות המנוע באחוזים	$\eta\%$	
$\eta\% = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} \cdot 100$			
מומנטים במנוע זרם ישר			
$M_2 = M_n = \frac{9.55 \cdot P_{2n}}{n}$ – בעומס נומינלי	מומנט היציאה של המנוע כאשר העומס נומינלי $M_2 = M_n$,	M_n	[Nm]
$M_0 = \Delta M_{mech} = \frac{9.55 \cdot \Delta P_{mech}}{n}$	מומנט החיכוך של המנוע.	M_0	[Nm]
$M_2 = M_{em} + \Delta M_{mech}$	מומנט היציאה של המנוע. (המומנט על ציר המנוע)	M_2	[Nm]
$M_2 = M_{em} + M_0$			

מתקני חשמל

חישוב שטח חתך אחיד ברשת לפי הפסד הספק			
רשת תלת מופעית			
צרכנים נתונים על ידי ספקים ברשת תלת מופעית			
$P = \sqrt{3}\, U_n \cdot I_{al_1}$	ההספק הכולל המסופק על ידי המקור.	P	$[W]$
$A = \frac{\rho}{\Delta P \cdot {U_n}^2} \cdot \sum_{i=1}^{n} \left({P^2}_{l_i} + {Q^2}_{li}\right) \cdot l_i$ $A = \frac{100 \cdot \rho}{\Delta P\% \cdot P \cdot {U_n}^2} \cdot \sum_{i=1}^{n} \left({P^2}_{li} + {Q^2}_{li}\right) \cdot l_i$	שטח החתך של הקו.	A	$[mm^2]$
התנגדות סגולית של החומר ממנו עשוי הקו.		ρ	$\left[\frac{\Omega mm^2}{m}\right]$
הפסדי הספק בקו ההזנה.		ΔP	$[W]$
הפסדי ההספק בקו ההזנה באחוזים ביחס להספק המושקע.		$\Delta P\%$	$[\%]$

$[V]$	$U_n = U_L$	מתח שלוב [קווי].
צרכנים נתונים על ידי זרמים ברשת תלת מופעית.		
$[mm^2]$	A	שטח החתך של הקו.
$[W]$	$P = P_{p1}$	$A = \frac{3\rho}{\Delta P} \cdot \sum_{i=1}^{n} (I_{ali}{}^2 + I_{rli}{}^2) \cdot l_i$
$[W]$	P_{p1}	$A = \frac{3 \cdot 100 \cdot \rho}{\Delta P\% \cdot P} \cdot \sum_{i=1}^{n} (I_{ali}{}^2 + I_{rli}{}^2) \cdot l_i$
		הספק הממשי בקטע הראשון.
<u>רשת חד מופעית</u>		
<u>צרכנים נתונים על ידי הספקים ברשת חד מופעית.</u>		
$P = U_n \cdot l_{al_1}$		
$A = \frac{200 \cdot \rho}{\Delta P\% \cdot P \cdot U_n{}^2} \cdot \sum_{i=1}^{n} (P_{li}{}^2 + Q_{li}{}^2) \cdot l_i$		$A = \frac{2 \cdot \rho}{\Delta P \cdot U_n{}^2} \cdot \sum_{i=1}^{n} (P_{li}{}^2 + Q_{li}{}^2) \cdot l_i$
<u>צרכנים נתונים על ידי זרמים ברשת חד מופעית.</u>		
$A = \frac{200 \cdot \rho}{\Delta P\% \cdot P} \cdot \sum_{i=1}^{n} (I_{ali}{}^2 + I_{rli}{}^2) \cdot l_i$		$A = \frac{2 \cdot \rho}{\Delta P} \cdot \sum_{i=1}^{n} (I_{ali}{}^2 + I_{rli}{}^2) \cdot l_i$

חישוב זרמים בצרכן		
בחישובי רשת:	$I_r \begin{cases} + & \text{קיבולי} \\ - & \text{השראתי} \end{cases}$	$Q_r \begin{cases} + & \text{השראתי} \\ - & \text{קיבולי} \end{cases}$
$I_a = I \cdot \cos\varphi$ $I_r = I \cdot \sin\varphi$ $\cos\varphi = \frac{I_a}{I}$ $I = \sqrt{I_a{}^2 + I_r{}^2}$		
$[A]$	I_a	זרם אקטיבי של הצרכן.
$[A]$	I	זרם של הצרכן.
	$\cos\varphi$	מקדם ההספק של הצרכן.

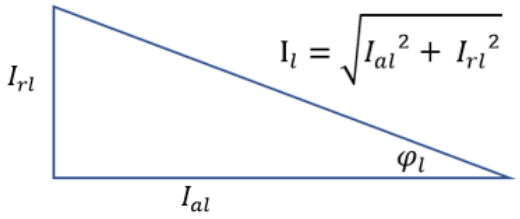
חישוב זרמים בקו/קטע

$I_{al} = I_l \cdot \cos\varphi_l$

$I_{rl} = I_l \cdot \sin\varphi_l$

$\cos\varphi_l = \frac{I_{al}}{I_l}$

$I_l = \sqrt{I_{al}^2 + I_{rl}^2}$



הזרם אקטיבי של הקו.	I_{al}	$[A]$
הזרם ריאקטיבי של הקו.	I_{rl}	$[A]$
הזרם של הקו.	I_l	$[A]$
מקדם ההספק של הקו.	$\cos\varphi_l$	

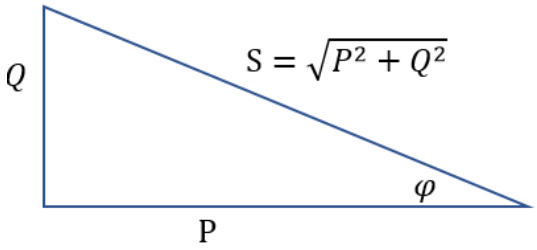
חישוב הספקים בצרכן חד פאזי

$P = S \cdot \cos\varphi = U \cdot I \cdot \cos\varphi$

$Q = S \cdot \sin\varphi = U \cdot I \cdot \sin\varphi$

$Q = P \cdot tg\ \varphi$

$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = U \cdot I$



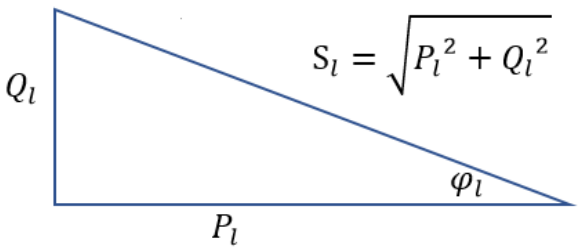
הספק חשמלי של הצרכן.	P	$[W]$
הספק ריאקטיבי של הצרכן.	Q	$[VAR]$
הספק מדומה של הצרכן.	S	$[VA]$
מקדם ההספק של הצרכן.	$\cos\varphi$	

חישוב הספקים בצרכן תלת פאזי

חישוב הספקים בצרכן תלת פאזי

$P = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos\varphi$	ההספק הממשי של הצרכן.	P	$[W]$
$Q = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \sin\varphi$	ההספק הריאקטיבי של הצרכן.	Q	$[VAR]$
$S = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L$	ההספק המדומה של הצרכן.	S	$[VA]$
	זוית המופע של הצרכן.	φ_L	$[\ ^\circ]$
	מקדם ההספק של הצרכן.	$\cos\varphi$	
	מתח שלוב בצרכן.	U_L	$[V]$
	מתח שלוב של הצרכן.	I_L	$[A]$

<u>חישוב הספקים בקו/קטע ברשת חד מופעית</u>

$P_l = S_l \cdot \cos\varphi_L = U_l \cdot I_l \cdot \cos\varphi_l$	
$Q_l = S_l \cdot \sin\varphi_l$	
$Q_l = P_l \cdot tg\ \varphi_l = U_l \cdot I_l \cdot \sin\varphi_l$	
$S_l = \sqrt{{P_l}^2 + {Q_l}^2} = U_l \cdot I_l$	

ההספק הממשי של הקו.	P_l	$[W]$

$[VAR]$	Q_l	ההספק הריאקטיבי של הקו.
$[VA]$	S_l	הספק מדומה של הקו.
$[V]$	U_l	מתח פאזי של הקו.
$[A]$	I_l	הזרם של הקו.
$[°]$	φ_l	זווית המופע של הקו.
	$\cos\varphi_l$	מקדם ההספק של הקו.

<u>חישוב הספקים בקו/קטע ברשת תלת מופעית</u>

$[W]$	P_l	הספק ממשי בקו.	$P_l = \sqrt{3} \cdot U_l \cdot I_l \cdot \cos\varphi_l$
$[VAR]$	Q_l	ההספק הריאקטיבי בקו.	$Q_l = \sqrt{3} \cdot U_l \cdot I_l \cdot \sin\varphi_l$
$[VA]$	S_l	הספק מדומה של קו.	$S_l = \sqrt{3} \cdot U_l \cdot I_l$
$[V]$	U_l	מתח שלוב של הקו.	
$[A]$	I_l	זרם שלוב של הקו.	
$[°]$	φ_l	זווית המופע של הקו.	
	$\cos\varphi_l$	מקדם ההספק של הקו.	

<u>שיפור מקדם הספק על ידי הוספת הספק היגבי</u>

$[VA]$	Q_c	ההספק ההגבי של הקבל הדרוש לשיפור מקדם ההספק.	$Q_c = P \cdot (tg\varphi_1 - tg\varphi_2)$
$[KW]$	P	הספק פעיל של המערכת.	
	φ_1	זוית המופע לפני השיפור גורם ההספק.	

	φ_2	זוית המופע לאחר שיפור גורם ההספק.		
$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$			$Q = P \cdot tg\varphi$	
ערך הקבל שיש להוסיף				
ברשת חד מופעית				
$[\mu F]$	C	קיבוליות הקבל.	$C = \frac{Q_c \cdot 10^6}{\omega \cdot {U_n}^2}$	
$[V]$	U	המתח אליו מחובר הקבל.		
$[Hz]$	f	תדירות.		
$\left[\frac{rad}{sec}\right]$	ω	תדירות זוויתית.		
<u>ברשת תלת מופעית בחיבור משולש</u>				
$[\mu F]$	$C\Delta$	קיבול הקבל לפאזה במשולש	$C\Delta = \frac{Q_c \cdot 10^6}{3 \cdot \omega \cdot {U_L}^2}$	
$[V]$	U_n	מתח נומינלי.		
$[V]$	U_L	מתח שלוב.	$I_L = \sqrt{3} I_{Ph}$	$U_{Ph} = U_L = U_n$
$[V]$	U_{Ph}	מתח מופעי.		
ברשת תלת מופעית בחיבור כוכב				
$[\mu F]$	C_Y	קיבול הקבל לפאזה בכוכב.	$C_Y = \frac{Q_c \cdot 10^6}{\omega \cdot {U_L}^2}$	
		$U_L = \sqrt{3} U_{Ph}$ $I_L = I_{Ph}$	$C_Y = 3 \cdot C_\Delta$	$U_{Ph} = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{U_n}{\sqrt{3}}$

חישוב זרם נומינלי

מנועים

חד מופעי $I_n = \frac{P_n \cdot 736}{\eta \cdot U_n \cdot \cos\varphi_n}$	זרם נומינלי של הצרכן	I_n	$[A]$
	הספק נומינלי מכני של המנוע בכוחות סוס	P_n	$[HP]$
תלת מופעי $I_n = \frac{P_n \cdot 736}{\sqrt{3} \cdot \eta \cdot U_n \cdot \cos\varphi_n}$	מתח נומינלי	U_n	$[V]$
	נצילות נומינלית	η	
	מקדם הספק נומינלי	$\cos\varphi_n$	

צרכנים אחרים

חד מופעי $I_n = \frac{P_n}{U_n \cdot \cos\varphi_n}$			
	הספק נומינלי חשמלי	P_n	$[W]$
תלת מופעי $I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos\varphi_n}$	זרם במופע של צרכן המחובר במשולש	I_{Ph_Δ}	$[A]$
	זרם במופע של צרכן המחובר בכוכב	I_{Ph_Y}	$[A]$

חישוב זרם לבחירה וכיול הגנה תרמית במנועים

$$I_{Ph_\Delta} = \frac{I_n}{\sqrt{3}} = 0.58 \cdot I_n$$

$I_{Ph_Y} = I_n$	זרם כיול הגנה תרמית	I_{nt}	$[A]$

כאשר מיקום ההגנה התרמית במופע של המנוע	כאשר מיקום ההגנה התרמית בקו של המנוע
$I_{nt} = (1 \div 1.02) \cdot I_{Ph}$	$I_{nt} = (1 \div 1.02) \cdot I_n$

חישוב זרם התנעה והגנה בפני זרם קצר (הגנה מגנטית)

במנוע שהספקו פחות מ - $4Hp$

$[A]$	I_{st}	זרם התנעה	$I_{st} = In \cdot K_{st}$
	K_{st}	מקדם התנעה בהתנעה ישירה	במנוע שהספקו יותר מ - $4Hp$
	K_{st}^*	מקדם התנעה התלוי באמצעי התנעה (פרמטר של נתוני יצרן) עבור התנעה ישירה מקובל 4-8	$I_{st} = In \cdot K_{st}^*$
	n	מקדם הקטנת זרם התנעה התלוי באמצעי התנעה (במתנע "כוכב- משולש" $n = 3$)	$K_{st}^* = \frac{K_{st}}{n}$
במנורות פלואורוסנטיות			
			$I_{st} = 1.3 \cdot In$
$[A]$	I_{nmg}	זרם נומינלי של מבטח להגנה נגד זרם קצר	$I_{nmg} = 1.25 * I_{st}$
<u>בחירת אמצעי הגנה לקו הזנה בפני זרם העמסת יתר בלבד</u>			
$[A]$	I_b	זרם העבודה הממושך המרבי.	נתיך, מא"ז מפסק אוטומטי ניתן לכוונון
$[A]$	I_n	הזרם הנקוב של המבטח או הזרם אליו הוא כוונן.	בחירת אמצעי הגנה לצרכנים, קווי הזנה ולוחות הזנה בפני זרם יתר בלבד.
$[A]$	I_2	זרם הבדיקה הגבוה.	עבור נתיך, מא"ז, מפסק אוטומטי הניתן לכוונון בהתאם לתקנה 6(א).
$[A]$	I_Z	זרם מתמיד מירבי של המוליך.	**מבטח המגן על מוליך מפני זרם העמסת יתר בלבד יתאם לכל הדרישות:**
$[A]$	I'_Z	זרם מתמיד מירבי של המוליך מתוקן.	**1.** $I_b \leq I_n \leq I'_Z$
	C	מקדם תיקון משוכלל.	**2.** $I_2 \leq 1{,}45 I'_Z$
			3. $I'_Z = C \cdot I_Z$

סוג המבטח		זרם הבדיקה הגבוה I_2	כושר העמסה הנדרש של מוליך ע"פ מתקנות החדשה.	כושר העמסה הנדרש של מוליך ע"פ התקנות הישנות.
נתיך	$10A \leq I_n \leq 25A$	$1.75\ I_n$	$I'_Z \geq 1.21 I_n$	$I'_Z \geq 1.21 I_n$
	$I_n \geq 25A$	$1.6\ I_n$	$I'_Z \geq 1.1 I_n$	$I'_Z \geq 1.1 I_n$
מפסק אוטומטי זעיר כל הערכים I_n		$1.45\ I_n$	$I'_Z \geq 1.0 I_n$	$I'_Z \geq 1.12 I_n$
מפסק אוטומטי הניתן לכוונון כל הערכים I_n		$1.3\ I_n$	$I'_Z \geq 0.89 I_n$	$I'_Z \geq 1.18 I_n$