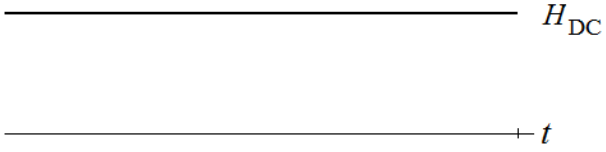
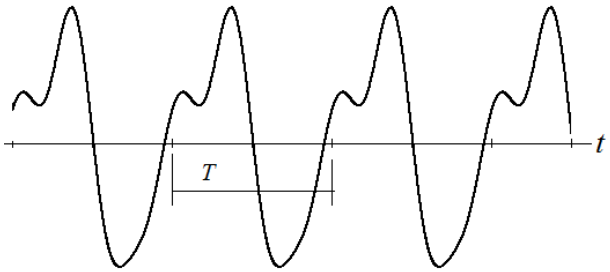
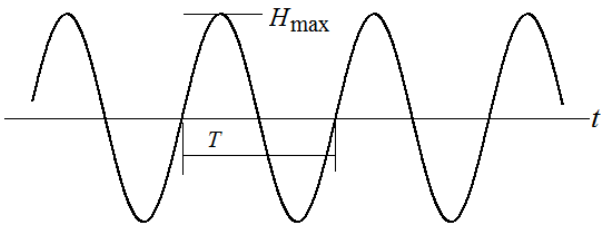
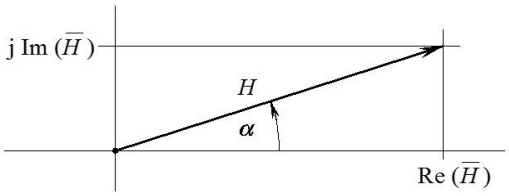
תורת החשמל

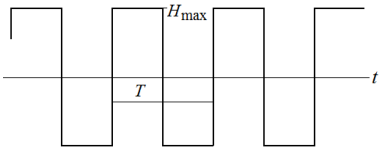
חוברת עזר

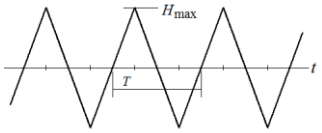
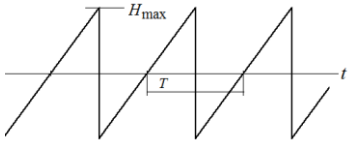
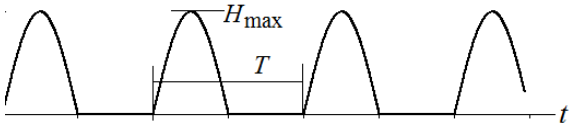
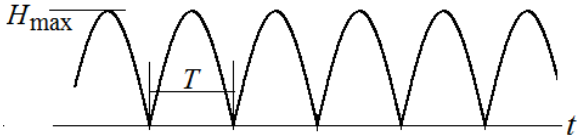
הנדסאים וטכנאים מוסמכים במגמת הנדסת חשמל – שאלון מספר 90611 ו-93611
הנדסאים וטכנאים מוסמכים במגמת הנדסת אלקטרוניקה – שאלון מספר 90711 ו-93711
הנדסאים במגמת מכשור ובקרה – שאלון מספר 92023

אותות		
$h(t)$	–	אות signal הגדרה רחבה : תופעה פיזיקלית אשר הימצאותה או חסרונה או השתנותה, צופנת בחובה מידע. הגדרה מצמצמת : אחד משני מאפייני האנרגיה שבטבע ; זרם או מתח באנרגיה חשמלית.
t	s	זמן
$h(t)=h(t+T)=h(t-T)$		אות מחזורי
T	s	אורך זמן המחזור, מחזור, תקופה. אורך הזמן המזערי שאחריו חוזר על עצמו האות המחזורי
$f=\frac{1}{T}$	Hz	תדר
$\omega=2\pi f$	rad/s	תדר זוויתי
זרם ישר (ז"י) direct current (DC)		
$h(t)=H_{DC}$	–	אות זרם-ישר
H_{DC}	–	התנופה של האות
$H_{av}=H_{DC}$	–	שיעורו הממוצע של האות הישר
$H=H_{RMS}=H_{DC}$	–	שיעורו היעיל של האות הישר
$p(t)=U_{DC}\,I_{DC}=P_{DC}$	W	הספק רגעי
$P_{av}=P_{DC}$	W	הממוצע בזמן של ההספק הרגעי ; הספק
$w(t)=P_{DC}\,t$	J	עבודה
$q(t)=I_{DC}\,t$	C	מטען חשמלי

זרם חילופים (ז״ח) alternating current (AC)		
אות זרם חילופים ; אות מחזורי שבו רכיב הזרם הישר שווה אפס או זניח.	–	$h(t)=h_{\mathrm{AC}}(t)=h_{\mathrm{AC}}(t-T)=h_{\mathrm{AC}}(t+T)$
פירוק אות זרם חילופים כלשהו, לסכום של אותות זרם חילופים סינוסואידים – טור פורייה	–	$h(t)=\sum_{n=1}^{n=\infty} c_n \sin\left(n\omega_1 t+\psi_n\right)$
מספר ההרמוניה. כפולה שלמה של התדר היסודי של האות המחזורי	–	$n \qquad n=1,2,3\ldots\infty$
התדר היסודי של האות המחזורי ; גם נקרא התדר של ההרמוניה הראשונה.	Hz	$f_1=\frac{1}{T}$
התנופה של כל אחד מרכיבי האות המחזורי	–	c_n
זווית המופע של כל אחד מרכיב האות הסינוסואידי.	rad	ψ_n
שיעורו הממוצע של אות זרם חילופים	–	$H_{\mathrm{av}}=0$
שיעורו היעיל של אות זרם חילופים : ממוצע ריבועי root mean square, RMS	–	$H_{\mathrm{RMS}}=\sqrt{\frac{1}{2}\sum_{n=1}^{n=\infty} c_n^2}=\sqrt{\frac{1}{2}\left(c_1^2+c_2^2+\ldots+c_n^2+\ldots\right.}$
עיוות הרמוני כולל total harmonic distortion של אות זרם חילופים	–	$THD=\frac{\sqrt{H_2^2+H_3^2+H_4^2+\ldots+H_n^2}}{H_1}$

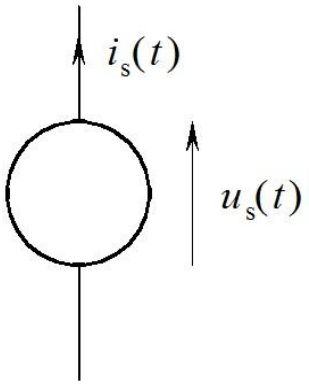
זרם חילופים סינוסואידי, זרם חילופים		
$h(t)=H_{max}\sin(\omega t+\alpha)$ $=H_{max}\sin(\omega(t+t_0))$	–	אות זרם-חילופים סינוסואידי; אות שהערך הרגעי שלו משתנה בהתאם לפונקציה סינוסואידית של הזמן.
H_{max}	–	התנופה amplitude של אות הזרם או המתח
$\alpha=\omega t_0$	rad	זווית המופע
$f=\frac{1}{T}$	Hz	תדר (אחד ויחיד)
$\omega=2\pi f=\frac{2\pi}{T}$	rad/s	תדר זוויתי
$T=\frac{2\pi}{\omega}$ $\quad h(t+T)=h(t)$	s	מחזור cycle; תקופה period.
$H_{av}=\frac{h\cdot(\cos(\omega t_1+\alpha)-\cos(\omega t_2+\alpha))}{\omega\cdot(t_2-t_1)}$	–	שיעורו הממוצע של אות סינוסואידי בפרק הזמן שבין הזמן t_1 לזמן t_2
$H_{av}=0$	–	שיעורו הממוצע של אות סינוסואידי לאורך זמן מחזור אחד שלם
		מחוג אות הזרם או המתח במישור המספרים המרוכבים
$\bar{H}=H(\cos(\alpha)+j\sin(\alpha))=H\angle\alpha$	–	מחוג phasor אות הזרם או המתח. מתאר את הגודל והמופע של האות הסינוסואידי במישור המספרים המרוכבים
$H=\frac{H_{max}}{\sqrt{2}}$	–	שיעורו היעיל של אות זרם חילופים סינוסואידי; ממוצע ריבועי של האות

אותות מחזוריים לא סינוסואידים		
$h(t)=a_0+\sum_{n=1}^{n=\infty}c_n\sin\left(n\omega_1 t+\psi_n\right)$	–	ביטוי אות מחזורי כלשהו באמצעות סכום של אותות סינוסואידים ועוד רכיב אות ישר – טור פורייה
$n \qquad n=1,2,3\ldots\infty$	–	מספר ההרמוניה. כפולה שלמה של התדר היסודי של האות המחזורי
$f_1=\frac{1}{T}$	Hz	התדר היסודי של האות המחזורי ; גם נקרא התדר של ההרמוניה הראשונה.
$a_0=H_{\text{av}}=\frac{1}{T}\int_{t_1}^{t_1+T}h(t)\,\mathrm{d}t$	–	שיעורו הממוצע של אות מחזורי ; גם נקרא רכיב הזרם הישר.
$H_{\text{RMS}}=\sqrt{\frac{1}{T}\int_{t_1}^{t_1+T}h(t)^2\,\mathrm{d}t}=\sqrt{a_0^2+\frac{1}{2}\sum_{n=1}^{n=\infty}c_n^2}$	–	שיעורו הפעיל של האות המחזורי : ממוצע ריבועי, root mean square (RMS)
c_n	–	התנופה של כל אחד מהרכיבים הסינוסואידים של האות המחזורי
ψ_n	rad	זווית המופע של כל אחד מהרכיבים הסינוסואידים של האות המחזורי.
$FF=\frac{H_{\text{RMS}}}{H_{\text{av}}}$	–	מקדם צורה form factor היחס שבין הערך הפעיל של האות לערך הממוצע שלו
$RF=\sqrt{FF^2-1}$	–	מקדם אדווה ripple factor
		אות זרם חילופים ריבועי
ω_1	rad/s	התדר הזוויתי היסודי של האות
$H_{\text{av}}=0$	–	שיעורו הממוצע של אות זרם חילופים ריבועי לאורך זמן מחזור אחד שלם
$H_{\text{RMS}}=H_{\max}$	–	שיעורו היעיל של אות זרם חילופים ריבועי ; ממוצע ריבועי של האות

		
אות זרם חילופים משולש		אות זרם חילופים שן-משור
ω_1	rad/s	התדר הזוויתי היסודי של האות
$H_{av}=0$	–	שיעורו הממוצע של אות זרם חילופים משולש או שן משור לאורך זמן מחזור אחד שלם
$H_{RMS}=\frac{H_{max}}{\sqrt{3}}$	–	שיעורו היעיל של אות זרם חילופים משולש או שן משור; ממוצע ריבועי של האות
אות זרם חילופים סינוסואידי מיושר חצי גל		
ω_1	rad/s	התדר הזוויתי היסודי של האות
$H_{av}=\frac{H_{max}}{\pi}$	–	שיעורו הממוצע של אות זרם חילופים סינוסואידי מיושר חצי גל, לאורך זמן מחזור אחד שלם
$H_{RMS}=\frac{H_{max}}{2}$	–	שיעורו היעיל של אות זרם חילופים סינוסואידי מיושר חצי גל; ממוצע ריבועי של האות
אות זרם חילופים סינוסואידי מיושר גל שלם		
ω_1	rad/s	התדר הזוויתי היסודי של האות
$H_{av}=\frac{2H_{max}}{\pi}$	–	שיעורו הממוצע של אות זרם חילופים סינוסואידי מיושר גל שלם, לאורך זמן מחזור אחד שלם
$H_{RMS}=\frac{H_{max}}{\sqrt{2}}$	–	שיעורו היעיל של אות זרם חילופים סינוסואידי מיושר גל שלם; ממוצע ריבועי של האות
אות המורכב ממספר סופי של אותות		
$h(t)=h_1(t)+h_2(t)+\ldots+h_n(t)$	–	אות המורכב n אותות
$H_{av}=H_{av,1}+H_{av,2}+\ldots+H_{av,n}$	–	שיעורו הממוצע של אות מורכב
$H_{RMS}=\sqrt{H_{RMS,1}^2+H_{RMS,2}^2+\ldots+H_{RMS,n}^2}$	–	שיעורו היעיל של אות מורכב

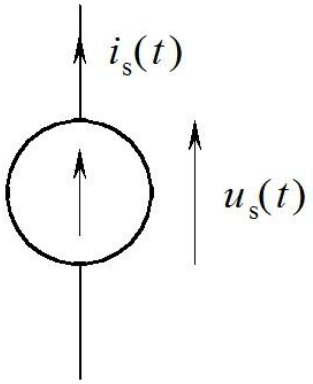
אנרגיה חשמלית

מקור מתח (מעשי) הוא מקור אנרגיה חשמלית שהמתח שבין הדקיו כמעט ואינו תלוי בזרם הזורם דרכו.
מקור מתח להלכה הוא מקור שהמתח שבין הדקיו קבוע ואינו תלוי כלל בזרם הזורם דרכו.



סמל גרפי של מקור מתח

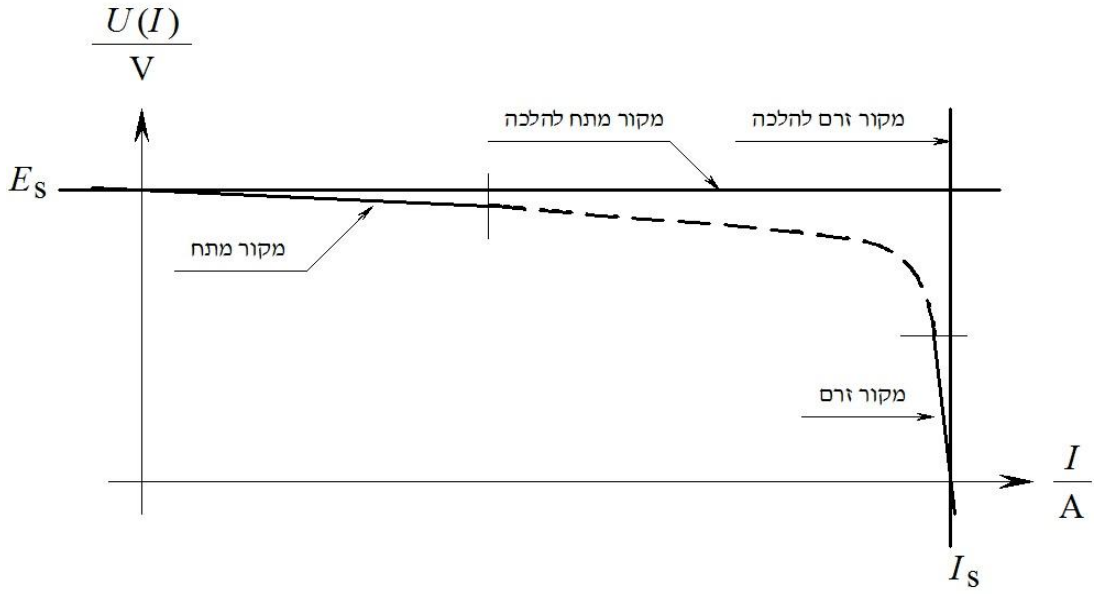
מקור זרם (מעשי) הוא מקור אנרגיה חשמלית שהזרם הזורם דרכו כמעט ואינו תלוי במתח שבין הדקיו.
מקור זרם להלכה הוא מקור שהזרם הזורם דרכו קבוע ואינו תלוי כלל במתח שבין הדקיו.

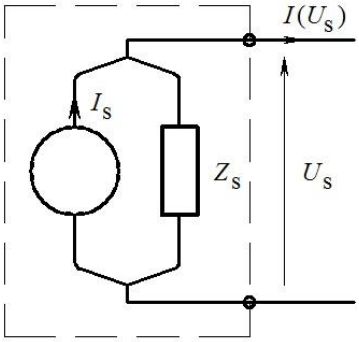
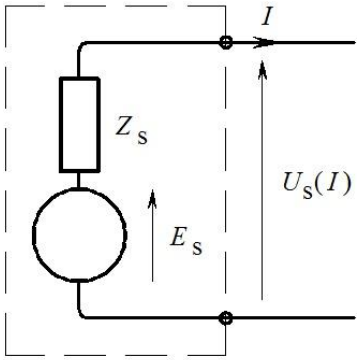
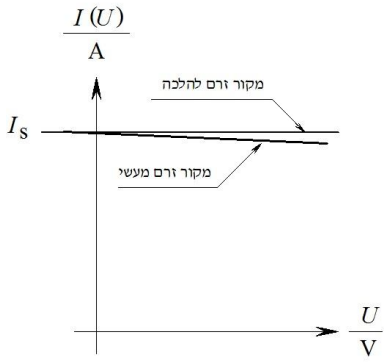
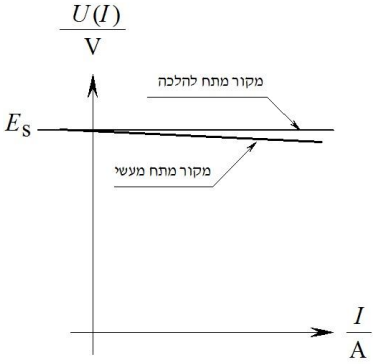


סמל גרפי של מקור זרם

t	s	זמן
$i(t)$	A	אות זרם החשמל; אחד משני האותות המאפיינים את אנרגיית החשמל
$u(t)$	V	אות מתח החשמל; אחד משני האותות המאפיינים את אנרגיית החשמל
$p(t)=u(t)i(t)$	W	הספק רגעי

אופיין חשמלי של מקור אנרגיה



מקור זרם (מעשי)	מקור מתח (מעשי)
	
אופיין חשמלי של מקור זרם	אופיין חשמלי של מקור מתח
	

במעגלי זרם-ישר

$I(U_s)=I_s-\frac{U_s}{R_s}=I_s-G_sU_s$	$U_s(I)=E_s-R_sI$

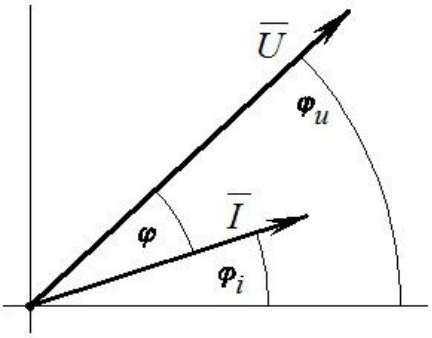
R_s	Ω	התנגדות (פנימית) של המקור
$G_s=\frac{1}{R_s}$	S	מוליכות (פנימית) של המקור

במעגלי זרם-חילופים (סינוסואידי)

$\bar{I}(\bar{U}_s)=\bar{I}_s-\frac{\bar{U}_s}{\bar{Z}_s}=\bar{I}_s-\bar{Y}_s\bar{U}_s$	$\bar{U}_s(\bar{I})=\bar{E}_s-\bar{Z}_s\bar{I}$

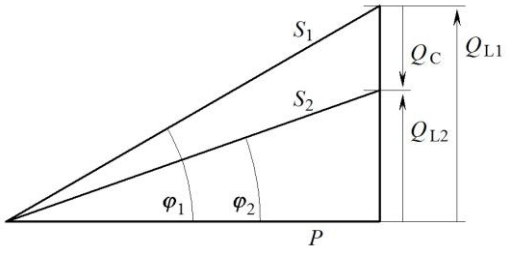
$\bar{Z}_s$	Ω	עכבה (פנימית) של המקור
$\bar{Y}_s=\frac{1}{\bar{Z}_s}$	S	מותירות (פנימית) של המקור

הספקים בזרם חילופים סינוסואידי

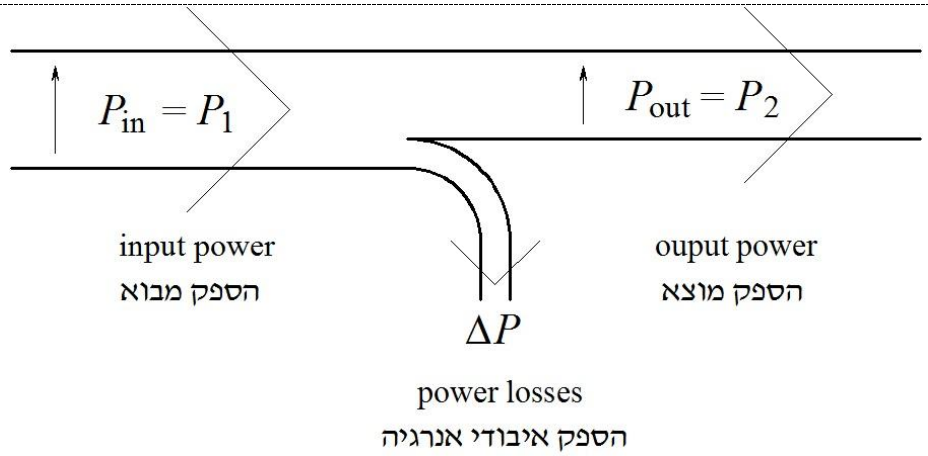
$u(t)=\sqrt{2}\,U\sin(\omega t+\varphi_u)$	V	אות מתח החילופים הסינוסואידי שבין ההדקים של התקן בעל שני הדקים.
$\bar{U}=U\angle\varphi_u$	V	מחוג המתח (voltage phasor)
$i(t)=\sqrt{2}\,I\sin(\omega t+\varphi_i)$	A	אות זרם החילופים הסינוסואידי, הזורם בהתקן בעל שני הדקים
$\bar{I}=I\angle\varphi_i$	A	מחוג הזרם (current phasor)
$\varphi=\varphi_u-\varphi_i$	rad	הפרש המופע שבין אות המתח לאות הזרם ; הזווית שבין מחוג המתח למחוג הזרם
		מחוג המתח שבין הדקי ההתקן, ומחוג הזרם הזורם דרך ההתקן. (באיור, הזרם מפגר אחר המתח ; או המתח מקדים את הזרם.)
$P=U\,I\cos\varphi=U\,I\,PF$	$\mathrm{W}=\mathrm{V}\cdot\mathrm{A}$	הספק פעיל, הספק, active power. הספק אנרגיית החשמל שאפשר להמירה לאנרגיה אחרת. מגמת זרימת האנרגיה נקבעת אך ורק על פי הסימן של ההספק הפעיל.
$Q=U\,I\sin\varphi=U\,I\sin(\arccos(PF))$	$\mathrm{VAr}=\mathrm{V}\cdot\mathrm{A}$	הספק היגבי reactive power הספק חילופי האנרגיה החשמלית והמגנטית, בתוך המערכת.
$S=U\,I=\sqrt{P^2+Q^2}$	$\mathrm{VA}=\mathrm{V}\cdot\mathrm{A}$	הספק נִדמה apparent power
$\bar{S}=\bar{U}\,\bar{I}^{*}=P+\mathrm{j}Q$	$\mathrm{VA}=\mathrm{V}\cdot\mathrm{A}$	הספק מרוכב complex power. בתחום $0<\varphi\le\frac{\pi}{2}$, להספק המרוכב אופי השראי, $Q>0\,\mathrm{VAr}$ (הזרם שבהתקן, מפגר אחרי המתח) בתחום $-\frac{\pi}{2}\le\varphi<0$ להספק המרוכב אופי קיבולי, $Q<0\,\mathrm{VAr}$ (הזרם שבהתקן, מקדים את המתח)
$\cos\varphi=PF=\frac{P}{S}$	–	מקדם הספק (power factor)

$\varphi = \arg(\bar{S})$	rad, º	כשהזווית חיובית, להספק הנִדמה אופי השראי ; וכשהזווית שלילית, להספק הנִדמה אופי קיבולי.

הספקי צריכת האנרגיה בעומס חשמלי

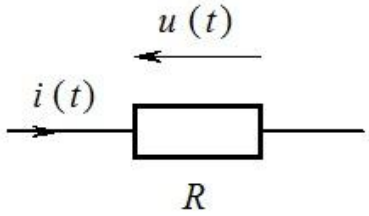
$\bar{S} = \bar{Z}\left\|\bar{I}\right\|^2 = \frac{\left\|\bar{U}\right\|^2}{\bar{Z}^*} = P + \mathrm{j}(Q_L - Q_C)$	VA = V·A	הספק מרוכב בעומס חשמלי שעכבתו ידועה
$\bar{Z} = (R + \mathrm{j}\,X) = Z\angle\phi$ $\phi = \arctan\left(\frac{X}{R}\right)$	Ω	עכבת העומס החשמלי
		משולש ההספקים בעומס חשמלי (באיור, ההספק ההיגבי ההשראי גדול מההספק ההיגבי הקיבולי)
$Q_C = P(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2)$	VAr	ההספק ההיגבי הקיבולי הדרוש כדי להגדיל את מקדם ההספק של עומס חשמלי בעל אופי השראי
$C = \frac{Q_C}{\omega\left\|U\right\|^2}$	F	קיבול הקבל הדרוש כדי להגדיל את מקדם ההספק של עומס חשמלי בעל אופי השראי

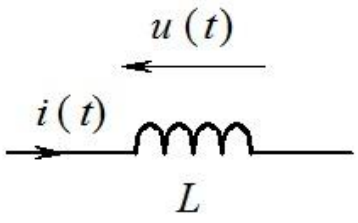
מאזן ההספקים במכשיר או בהתקן הפועל במצב מתמיד
נצילות ואיבודי האנרגיה

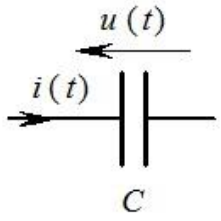


$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = 1 - \frac{\Delta P}{P_{in}}$	–	נצילות, $0 \le \eta \le 1$ ביחידות יחסיות או $0\% \le \eta \le 100\%$ באחוזים
$P_{in} = P_1$	W	ההספק (הפעיל) במבוא של המכשיר
$P_{out} = P_2$	W	ההספק (הפעיל) במוצא של המכשיר

$\Delta P = P_{\text{in}} - P_{\text{out}} = P_1 - P_2$	W	הספק כל איבודי האנרגיה במכשיר

תיאור מקובץ של תכונות חשמליות ומגנטיות		
		סמל גרפי של התנגדות (חשמלית)
R	Ω	התנגדות חשמלית
$G = \frac{1}{R}$	S	מוליכות חשמלית
הגדרת ההתנגדות (החשמלית) על פי הזרם והמתח		
$u(t) = R\,i(t)$	V	בזמן מעבר
$p(t) = u(t)\,i(t)$	W	הספק, קצב המרת אנרגיית החשמל לאנרגיית חום.
$U = R\,I$	V	בזרם-ישר
$P_R = I^2 R = \frac{U^2}{R}$	W	הספק בזרם ישר
$\bar{U} = R\,\bar{I}$	V	בזרם חילופים סינוסואידי
$\bar{Z}_R = R = R\angle 0^\circ$	Ω	עכבה של התנגדות חשמלית בזרם חילופים סינוסואידי
$P_R = \left\|\bar{I}\right\|^2 R = \frac{\left\|\bar{U}\right\|^2}{R}$	W	הספק בזרם חילופים
$\bar{S}_R = P_R + (\text{j}0\,\text{VAr})$	VA	ההספק המרוכב שבהתנגדות

		סמל גרפי של השראות (מגנטית)
L	H	השראות
הגדרת ההשראות (המגנטית) על פי הזרם והמתח		
$u(t)=L\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}i(t)$	V	בזמן מעבר
$w_{\mathrm{m}}(t)=\frac{L\left(i(t)\right)^2}{2}$	J	כמות האנרגיה האגורה בהשראות ברגע מסוים
$U=0\,\mathrm{V}$		בזרם ישר (כאילו קֶצֶר)
$W_{\mathrm{m}}=\frac{L\,I^2}{2}$	J	כמות האנרגיה האגורה בהשראות בזרם ישר
$\bar{U}=\left(\mathrm{j}\omega L\right)\bar{I}=\mathrm{j}\,X_L\,\bar{I}$	V	בזרם חילופים סינוסואידי
$X_L=\omega L$	Ω	היגב השראי
$\bar{Z}_L=+\mathrm{j}\,X_L=X_L\angle+90^{\mathrm{o}}$	Ω	עכבה של השראות (בזרם חילופים סינוסואידי)
$Q_L=\left\|\bar{I}\right\|^2X_L=\frac{\left\|\bar{U}\right\|^2}{X_L}$	VAr	הספק היגבי השראי (בזרם חילופים סינוסואידי)
$\bar{S}_L=+\mathrm{j}Q_L=Q_L\angle+90^{\mathrm{o}}$	VAr	ההספק המרוכב שבהשראות

		סמל גרפי של קיבול (חשמלי)
C	F	קיבול
הגדרת הקיבול (החשמלי) על פי הזרם והמתח		
$i(t)=C\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}u(t)$	A	בזמן מעבר
$w_{\mathrm{e}}(t)=\frac{C\left(u(t)\right)^2}{2}$	J	כמות האנרגיה האגורה בקיבול ברגע מסוים
$I=0\,\mathrm{A}$		בזרם ישר (כאילו נֶתֶק)
$W_{\mathrm{e}}=\frac{CU^2}{2}=\frac{qU}{2}=\frac{q^2}{2C}$	J	כמות האנרגיה האגורה בקיבול בזרם ישר
$q=C\,U$	C	כמות המטען החשמלי שבקיבול, בזרם ישר
$\bar{I}=(\mathrm{j}\omega C)\bar{U}=\frac{\bar{U}}{-\mathrm{j}X_C}$	A	בזרם חילופים סינוסואידי
$X_C=\frac{1}{\omega C}$	Ω	היגב קיבולי
$\bar{Z}_C=-\mathrm{j}X_C=X_C\angle-90^\circ$	Ω	עכבה של קיבול (בזרם חילופים סינוסואידי)
$Q_C=\frac{\left\lvert\bar{U}\right\rvert^2}{X_C}=\left\lvert\bar{I}\right\rvert^2X_C$	VAr	הספק היגבי קיבולי (בזרם חילופים סינוסואידי)
$\bar{S}_C=-\mathrm{j}Q_C=Q_C\angle-90^\circ$	VAr	ההספק המרוכב שבקיבול

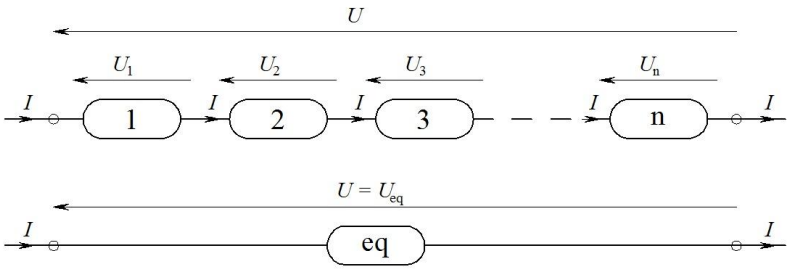
התנגדות והשראות וקיבול: תלותם בתכונות החומר, במידותיו, בצורתו ובטמפרטורה		
תלות ההתנגדות בתכונות החומר ומידותיו		
$R=\frac{\rho\, l}{A}=\frac{l}{\sigma A}$	Ω	התנגדות תַּיִל – מוליך ארוך ששטח החתך שלו קבוע
l	m	אורך התיל
A	mm^2	שטח החתך של התיל
$\rho=\frac{1}{\sigma}$	$\frac{\Omega\cdot\mathrm{mm}^2}{\mathrm{m}}$	ההתנגדות הסגולית של החומר שממנו עשוי התיל
$\sigma=\frac{1}{\rho}$	$\frac{\mathrm{S}\cdot\mathrm{m}}{\mathrm{mm}^2}$	המוליכות הסגולית של החומר שממנו עשוי התיל
תלות ההתנגדות בטמפרטורה		
$R(\Theta)=R_{\Theta_1}\left(1+\alpha_\theta\left(\Theta-\Theta_1\right)\right)$	Ω	התלות בטמפרטורה של התנגדות התיל; קירוב לפי קו ישר
α_θ	$\frac{1}{^\circ\mathrm{C}}$	קבוע הטמפרטורה של ההתנגדות
Θ_1	°C	הטמפרטורה שבה ידועים ההתנגדות R_{Θ_1} וקבוע הטמפרטורה α_θ

תלות ההשראות בתכונות המעגל המגנטי		
$L=\frac{N^2}{R_\mathrm{m}}$	H	השראות עצמית של סליל המותקן על מעגל מגנטי
N	–	מספר הכריכות שבסליל
R_m	$\frac{1}{\mathrm{H}}$	מיאון המעגל המגנטי שעליו מותקן הסליל
$M=k\sqrt{L_1 L_2}$	H	השראות הדדית שבין שני סלילים
$0\le k\le 1$	–	מקדם הצימוד ההשראי שבין שני הסלילים

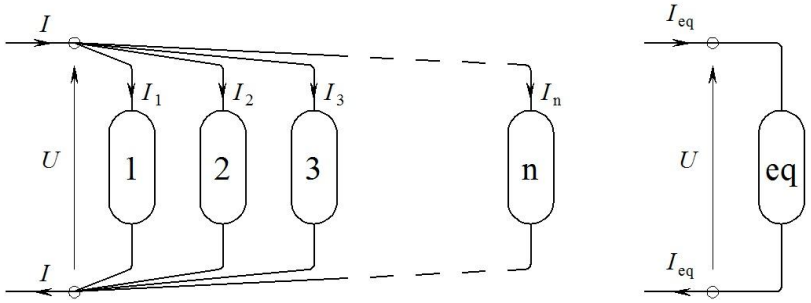
תלות הקיבול בתכונות החומר מידותיו וצורתו		
$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$	F/m	הפרמיטיביות של החומר המבודד (דִיאֶלֶקְטְרָן) שבקבל
ε_r	–	הפרמיטיביות היחסית של התווך המבודד שבקבל
ε_0	F/m	הפרמיטיביות של הריק
קבל לוחות		
$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d}$	F	הקיבול של קבל הבנוי שני לוחות המקבילים זה לזה
A	m^2	שטח פני הלוחות
d	m	עובי החומר המבודד שבין שני הלוחות
קבל כדורי		
$C = \frac{4\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r R r}{R - r}$	F	הקיבול של קבל כדורי
R	m	רדיוס הכדור החיצוני
r	m	רדיוס הכדור הפנימי
קבל גלילי		
$C = \frac{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r l}{\ln(R/r)}$	F	הקיבול של קבל גלילי
R	m	רדיוס הגליל החיצוני
r	m	רדיוס הגליל הפנימי
l	m	אורך הגליל

ערך שָׁקִיל

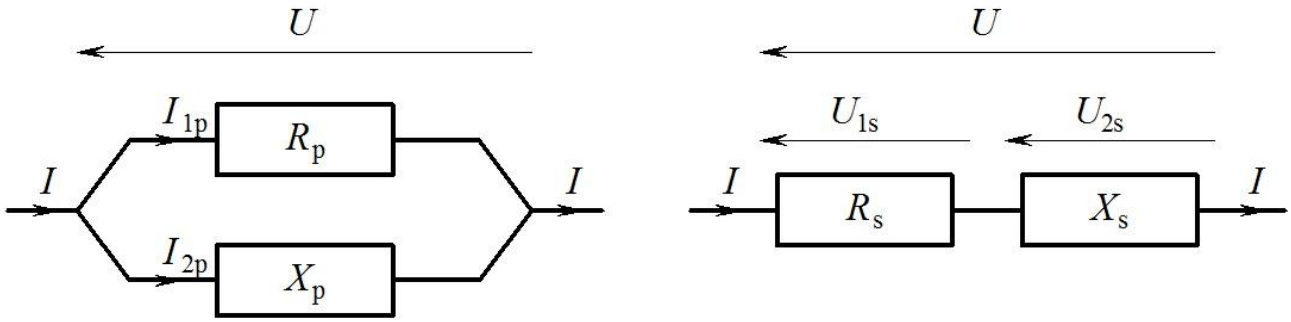
הערך של רכיב אחד השקיל לכל הרכיבים מאותו סוג, בענף הבנוי חיבור טורי של רכיבים ; זרם אחד זורם דרך הרכיבים שבענף



$u_{eq}(t)=u_1(t)+u_2(t)+u_3(t)+....+u_n(t)$	V	מתח הענף בזמן מעבר
$U_{eq}=U_1+U_2+U_3+....+U_n$	V	מתח הענף בזרם-ישר
$\overline{U}_{eq}=\overline{U}_1+\overline{U}_2+\overline{U}_3+....+\overline{U}_n$	V	מתח הענף בזרם חילופים (סינוסואידי)
$R_{eq}=R_1+R_2+R_3+....+R_n$	Ω	התנגדות
$G_{eq}=\dfrac{1}{\dfrac{1}{G_1}+\dfrac{1}{G_2}+\dfrac{1}{G_3}+....+\dfrac{1}{G_n}}$	S	מוליכות
$L_{eq}=L_1+L_2+L_3+....+L_n$	H	השראות, ללא צימוד השראי בין ההשראויות
$L_{eq}=L_1+L_2\pm 2M$	H	שתי השראויות שביניהן יש צימוד השראי. הסימן חיובי (+) כאשר הקוטביות של ההשראויות שווה ; והסימן שלילי (-) כאשר הקוטביות הפוכה.
M	H	השראות הדדית של שתי ההשראויות
$C_{eq}=\dfrac{1}{\dfrac{1}{C_1}+\dfrac{1}{C_2}+\dfrac{1}{C_3}+....+\dfrac{1}{C_n}}$	F	קיבול
$C_{eq}=\dfrac{C_1C_2}{C_1+C_2}$	F	קיבול שני קבלים המחוברים במקביל זה אל זה
$\overline{Z}_{eq}=R_{eq}+\mathrm{j}X_{eq}=\overline{Z}_1+\overline{Z}_2+\overline{Z}_3+....+\overline{Z}_n$	Ω	עכבה ; התנגדות נדמית (בזרם חילופים סינוסואידי)
$\overline{Y}_{eq}=G_{eq}+\mathrm{j}B_{eq}=\dfrac{1}{\dfrac{1}{\overline{Y}_1}+\dfrac{1}{\overline{Y}_2}+\dfrac{1}{\overline{Y}_3}+....+\dfrac{1}{\overline{Y}_n}}$	S	מתירות ; מוליכות נדמית

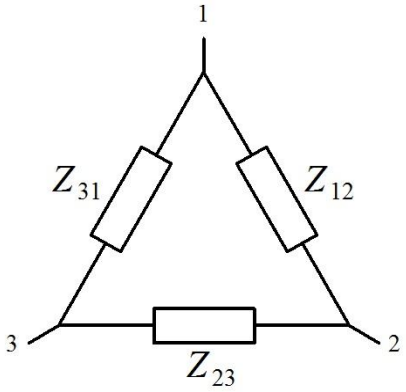
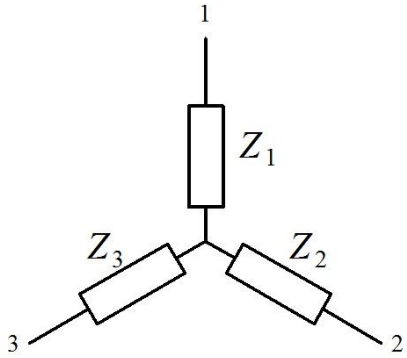
הערך השקיל לכל הרכיבים מאותו סוג בענף הבנוי חיבור מקבילי של רכיבים ; מתח אחד שורר בין הדקים של הרכיבים		
		
זרם בזמן מעבר	A	$i_{eq}(t)=i_1(t)+i_2(t)+i_3(t)+....+i_n(t)$
זרם בזרם-ישר	A	$I_{eq}=I_1+I_2+I_3+....+I_n$
זרם בזרם-חילופים (סינוסואידי)	A	$\bar{I}_{eq}=\bar{I}_1+\bar{I}_2+\bar{I}_3+....+\bar{I}_n$
מוליכות	S	$G_{eq}=G_1+G_2+G_3+....+G_n$
התנגדות	Ω	$R_{eq}=\dfrac{1}{\dfrac{1}{R_1}+\dfrac{1}{R_2}+\dfrac{1}{R_3}+....+\dfrac{1}{R_n}}$
התנגדות שתי התנגדויות המחוברות במקביל	Ω	$R_{eq}=\dfrac{R_1 R_2}{R_1+R_2}$
השראות, ללא צימוד השראי בין ההשראויות	H	$L_{eq}=\dfrac{1}{\dfrac{1}{L_1}+\dfrac{1}{L_2}+\dfrac{1}{L_3}+....+\dfrac{1}{L_n}}$
שתי השראויות שביניהן יש צימוד השראי. הסימן חיובי (+) כאשר הקוטביות של ההשראויות הפוכה זו לזו ; והסימן שלילי (-) כאשר הקוטביות שווה.	H	$L_{eq}=\dfrac{L_1L_2-M^2}{L_1+L_2\pm 2M}$
השראות הדדית של שתי ההשראויות	H	M
קיבול		$C_{eq}=C_1+C_2+C_3+....+C_n$
עכבה ; התנגדות נדמית (בזרם חילופים סינוסואידי)	Ω	$\bar{Z}_{eq}=R_{eq}+\mathrm{j}\,X_{eq}=\dfrac{1}{\dfrac{1}{\bar{Z}_1}+\dfrac{1}{\bar{Z}_2}+\dfrac{1}{\bar{Z}_3}+....+\dfrac{1}{\bar{Z}_n}}$
מתירות ; מוליכות נדמית	S	$\bar{Y}_{eq}=G_{eq}+\mathrm{j}\,B_{eq}=\bar{Y}_1+\bar{Y}_2+\bar{Y}_3+....+\bar{Y}_n$

שתי עכבות המחוברות זו אל זו בטור או במקביל



$\bar{U} = \bar{U}_{1s} + \bar{U}_{2s}$	$\bar{I} = \bar{I}_{1p} + \bar{I}_{2p}$
$\bar{Z} = R_s + \mathrm{j} X_s$	$\frac{1}{\bar{Z}} = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{\mathrm{j} X_p}$
$R_s = \frac{R_p X_p^2}{R_p^2 + X_p^2}$	$R_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{R_s}$
$X_s = \frac{X_p R_p^2}{R_p^2 + X_p^2}$	$X_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{X_s}$

שלוש עכבות המחוברות זו אל זו בכוכב או במשולש

הפיכת חיבור בכוכב לחיבור במשולש	הפיכת חיבור במשולש לחיבור בכוכב
	
$\bar{Z}_{12} = \frac{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + \bar{Z}_2\bar{Z}_3 + \bar{Z}_3\bar{Z}_1}{\bar{Z}_3}$	$\bar{Z}_1 = \frac{\bar{Z}_{31}\bar{Z}_{12}}{\bar{Z}_{12} + \bar{Z}_{23} + \bar{Z}_{31}}$
$\bar{Z}_{23} = \frac{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + \bar{Z}_2\bar{Z}_3 + \bar{Z}_3\bar{Z}_1}{\bar{Z}_1}$	$\bar{Z}_2 = \frac{\bar{Z}_{12}\bar{Z}_{23}}{\bar{Z}_{12} + \bar{Z}_{23} + \bar{Z}_{31}}$
$\bar{Z}_{31} = \frac{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + \bar{Z}_2\bar{Z}_3 + \bar{Z}_3\bar{Z}_1}{\bar{Z}_2}$	$\bar{Z}_3 = \frac{\bar{Z}_{23}\bar{Z}_{31}}{\bar{Z}_{12} + \bar{Z}_{23} + \bar{Z}_{31}}$

מערך הבנוי תאים אלקטרוכימיים השווים זה לזה בכול ומחוברים חיבור מעורב		
$E_{\text{array}} = n E_1$	V	הכוח האלקטרו-מוטורי (כא״מ) של המערך array
$r_{\text{array}} = \left(\frac{n}{m}\right) r_1$	Ω	ההתנגדות הפנימית של המערך
$Q_{\text{array}} = m Q_1$	C, Ah	כמות המטען החשמלי שבמערך התאים
E_1	V	הכוח האלקטרומוטורי (כא״מ) של תא אחד
r_1	Ω	התנגדות פנימית של תא אחד
Q_1	C, Ah	כמות המטען החשמלי שבתא אחד
n	–	מספר התאים בענף אחד, המחוברים זה לזה בטור
m	–	מספר הענפים המחוברים זה לזה במקביל

מעגלים מיוחדים ונקודות עבודה מיוחדות

מעגל חשמלי הוא מערך של רכיבים שזרם חשמלי זורם דרכם

מעגל מגנטי הוא מערך של גופים פרומגנטיים ששטף מגנטי שוטף דרכם

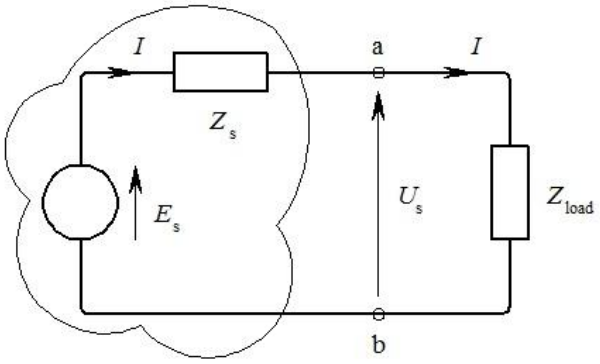
צומת היא נקודה שאליה מחוברים אחד הקצוות של שלושה ענפים לפחות.

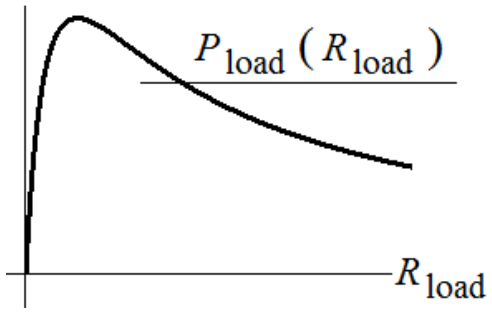
ענף מחובר בין שני צמתים סמוכים שביניהם מחובר רכיב אחד או רכיבים המחוברים ביניהם בטור.
בענף חשמלי זורם זרם חשמלי אחד בלבד, ובענף מגנטי, שטף מגנטי אחד בלבד

חוג הוא מסלול סגור של ענפים, המתחיל ומסתיים בצומת מסוים, בלי לעבור דרך אותה צומת יותר מפעם אחת ; גם נקרא **לולאה.**

$\sum I_{\text{in}} = \sum I_{\text{out}} \qquad \sum_{n=1}^{n=k} I_{\text{n}} = 0\,\text{A}$	A	סכום זרמי הענפים, הנכנסים לצומת אחת (חוק קירכהוף זרמים)
$\sum E = \sum U \qquad \sum_{m=1}^{m=l} U_{\text{m}} = 0\,\text{V}$	V	סכום מתחי הענפים בחוג אחד (חוק קירכהוף מתחים)

הספק האנרגיה המועברת לעומס החשמלי



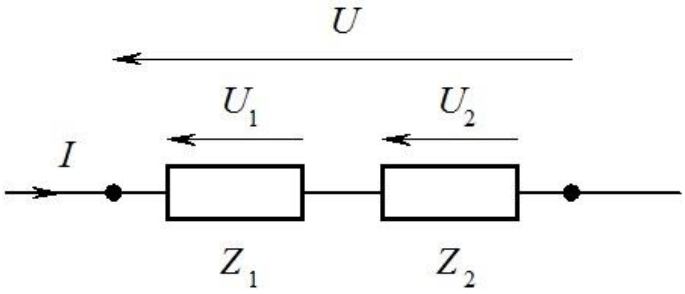


$\bar{Z}_{load} = R_{load} + j X_{load}$	Ω	עכבת העומס ; עכבת חלק המעגל המייצג את העומס החשמלי
$\bar{Z}_s = R_s + j X_s$	Ω	עכבת מקור האנרגיה (עכבת תבנין) ; העכבה שבין הדקים a ו-b כאשר מקור המתח מוחלף בקֶצֶר, ועכבת העומס אינה מחוברת.
$\bar{E}_s$	V	המתח שבין הדקים a ו-b כאשר עכבת העומס אינה מחוברת (מתח תבנין)
$P(R_{load}) = \lvert\bar{I}(R_{load})\rvert^2 R_{load} = \frac{\lvert\bar{E}_s\rvert^2 R_{load}}{(R_s + R_{load})^2 + (X_s + X_{load})^2}$	W	הספק האנרגיה המועברת לעומס החשמלי בתלות בהתנגדות העומס
$\bar{S}_{load} = P_{load} + jQ_{load} = \lvert\bar{I}\rvert^2 \bar{Z}_{load}$	VA	ההספק המרוכב שבעומס

נקודת העבודה שבה ההספק מרבי

העכבות בנקודת העבודה	ההספק בנקודת העבודה	עכבת מקור האנרגיה	עכבת העומס
זרם ישר			
$R_{load} = R_s$	$P_{max} = \frac{E_s^2}{4R_{load}}$	R_s	R_{load}
זרם חילופים			
$\bar{Z}_{load} = \bar{Z}_s^*$	$P_{max} = \frac{\lvert\bar{E}_s\rvert^2}{4R_{load}}$	$\bar{Z}_s = R_s + jX_s$	$\bar{Z}_{load} = R_{load} + jX_{load}$
$R_{load} = \sqrt{R_s^2 + X_s^2} = \lvert\bar{Z}_s\rvert$	–	$\bar{Z}_s = R_s + jX_s$	$\bar{Z}_{load} = R_{load}$
$R_{load} = \sqrt{R_s^2 + X_{load}^2}$	–	$\bar{Z}_s = R_s$	$\bar{Z}_{load} = R_{load} + jX_{load}$
$R_{load} = \lvert(X_s + X_{load})\rvert$	–	$\bar{Z}_s = jX_s$	$\bar{Z}_{load} = R_{load} + jX_{load}$

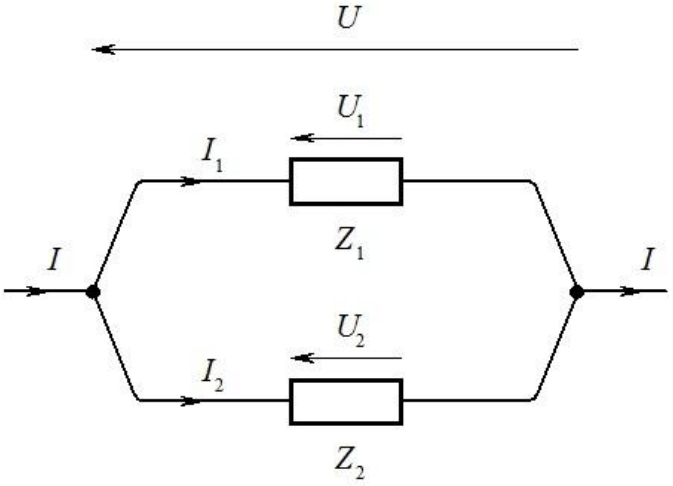
חלוקת המתח בין שתי עכבות המחוברות בטור



$$\frac{\bar{U}_1}{\bar{Z}_1} = \frac{\bar{U}_2}{\bar{Z}_2} = \bar{I}$$

$$\bar{U}_1 = \bar{U}\,\frac{\bar{Z}_1}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2}$$

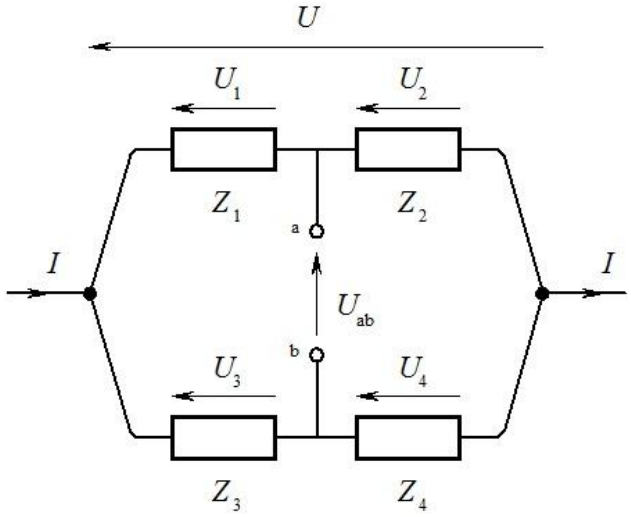
חלוקת הזרם בין שתי עכבות המחוברות במקביל



$$\bar{Z}_1\bar{I}_1 = \bar{Z}_2\bar{I}_2 = \bar{U}$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}\,\frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2}$$

ארבע עכבות המחוברת בטופולוגית גשר

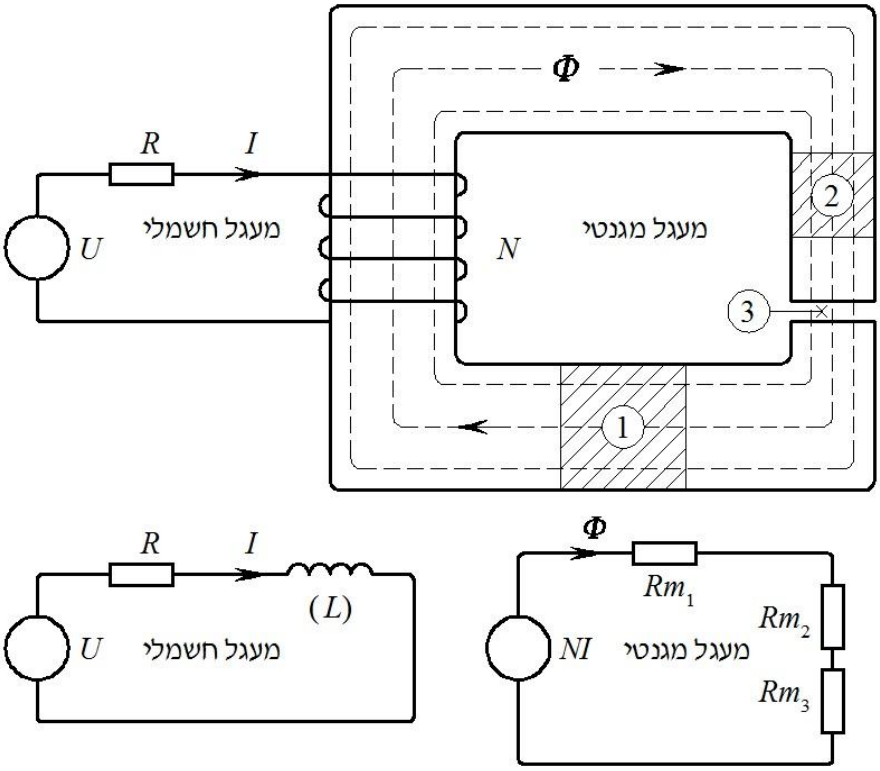


כאשר $\frac{\bar{Z}_1}{\bar{Z}_2} = \frac{\bar{Z}_3}{\bar{Z}_4}$

המתח $\bar{U}_{ab} = 0\,\mathrm{V}$

מעגל מגנטי

מעגל מגנטי שבו יש מסלול שטף אחד:



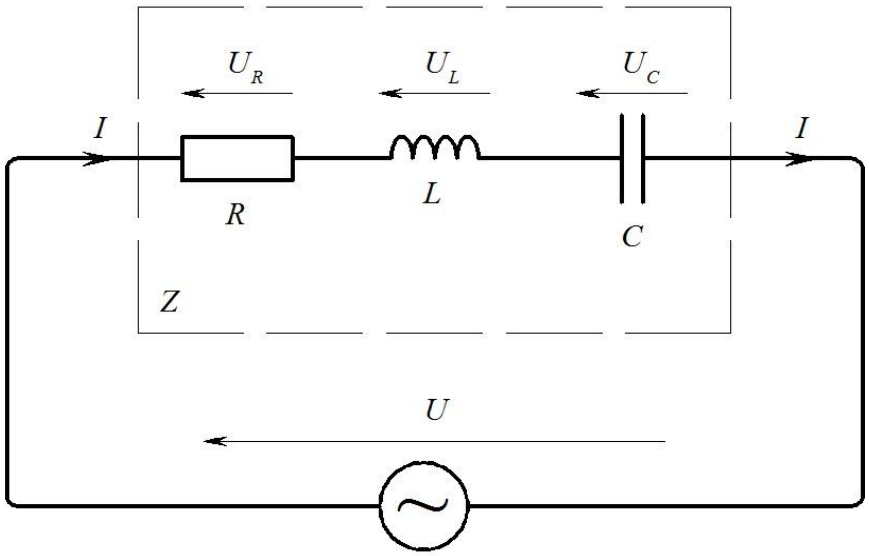
$\sum I = \sum H\,l$	A	כוח מגנטו-מוטורי (כמ"מ): סכום הזרמים החשמליים הנכנסים לשטח המוקף בקו סגור
$\sum H\,l$	A	סכום מכפלות עצמת השדה המגנטי באורך קטעי הקו הסגור
H	$\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{m}}$	עצמת השדה המגנטי
l	m	אורך קטע מהקו הסגור, שלאורכו עצמת השדה המגנטי קבועה
$\Phi = B\,A = \frac{\sum I}{R_\mathrm{m}} = \frac{NI}{R_\mathrm{m}}$	Wb	השטף המגנטי
I	A	הזרם החשמלי
$B = \mu_0 \mu_\mathrm{r} H$	$\mathrm{T} = \frac{\mathrm{Wb}}{\mathrm{m}^2}$	צפיפות השטף המגנטי; השראה מגנטית
A	m^2	שטח החתך שדרכו שוטף השטף
R_m	$\frac{1}{\mathrm{H}}$	מיאון המעגל המגנטי. (באיור לעיל $R_\mathrm{m} = R_{\mathrm{m},1} + R_{\mathrm{m},1} + R_{\mathrm{m},3}$)

$R_{\mathrm{m},i}=\frac{l_i}{\mu_0\mu_{\mathrm{r,i}}A_i}$	$\frac{1}{\mathrm{H}}$	מיאון (התנגדות מגנטית) של קטע i מהקו הסגור בתלות במידותיו הגיאומטריות ותכונותיו המגנטיות.
μ_0	$\frac{\mathrm{H}}{\mathrm{m}}$	החדירות (המגנטית) של הריק
μ_{r}	–	החדירות (המגנטית) היחסית של החומר הפרומגנטי שדרכו שוטף השטף המגנטי
$e_{\mathrm{L}}(t)=-N\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\Phi(t)$ $E_{\mathrm{L}}\cong -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$	V	הכוח האלקטרו-מוטורי (כא"מ) המושרה בסליל כתוצאה משינוי השטף המגנטי השוטף בכריכות שבו
$e_{\mathrm{L}}(t)=-L\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}i(t)$ $E_{\mathrm{L}}\cong -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$	V	הכוח האלקטרו-מוטורי (כא"מ) המושרה בסליל כתוצאה משינוי הזרם החשמלי הזורם בכריכות שבו
$e_2(t)=-M\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}i_1(t)$ $E_2\cong -M\frac{\Delta I_1}{\Delta t}$	V	הכוח האלקטרו-מוטורי (כא"מ) המושרה בסליל 2 כתוצאה משינוי הזרם החשמלי הזורם בסליל 1 כתוצאה מהצימוד המגנטי שביניהם.
N	–	מספר הכריכות שבסליל
$L=\frac{N^2}{R_{\mathrm{m}}}$	H	השראות עצמית של סליל המתואר באמצעות מעגל מגנטי
$L=\frac{N\Phi}{I}$	H	השראות עצמית של סליל על פי השטף השוטף בכריכותיו והזרם הזורם בם
$M=\frac{N_2\Phi_{21}}{I_1}=\frac{N_1\Phi_{12}}{I_2}$	H	השראות הדדית שבין שני סלילים
Φ_{21},Φ_{12}	Wb	השטף המגנטי הנובע מסליל אחד והשוטף בסליל האחר
$k=\frac{\Phi_{21}}{\Phi_{11}}=\frac{\Phi_{12}}{\Phi_{22}}\quad 0\le k\le 1$	–	מקדם הצימוד ההשראי שבין שני סלילים
$M=k\sqrt{L_1L_2}$	H	ההשראות ההדדית שבין שני סלילים, בידיעת ההשראות העצמית ומקדם הצימוד ההשראי

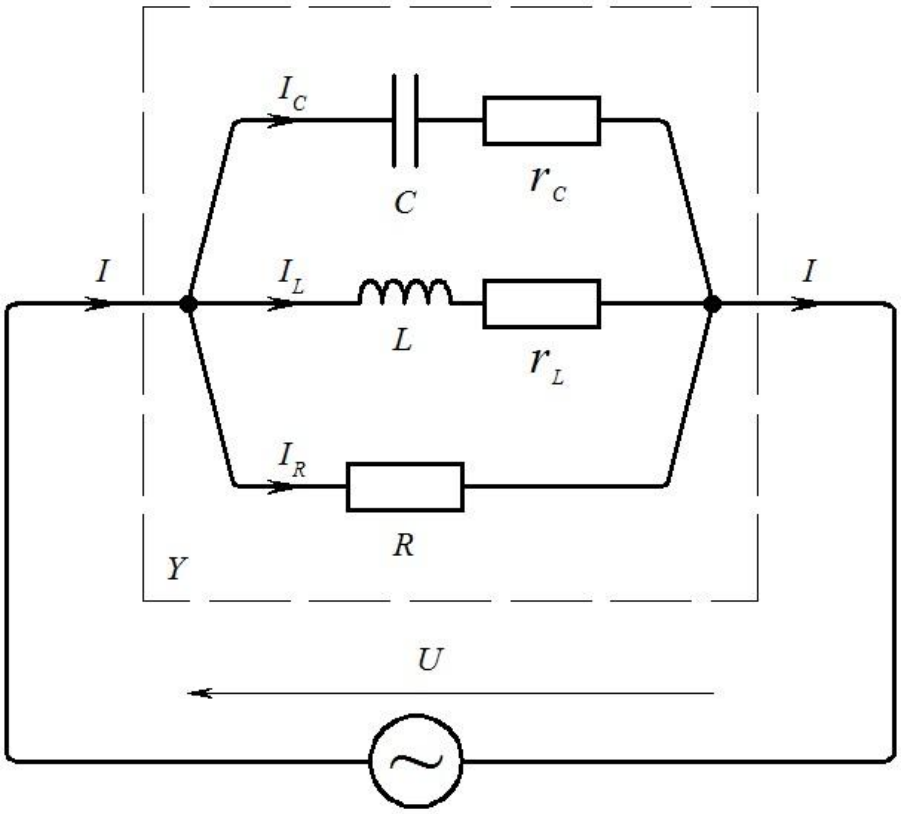
מעגלי תהודה

תדר טבעי הוא התדר שבו מערכת מתנדנדת מעצמה (כי יש בה לפחות שני אוגרי אנרגיה מסוגים השונים זה מזה). כאשר שתי תנודות שוות בתדריהן הטבעיות נאמר כי הן בתהודה.

מעגל RLC טורי:



מעגל RLC מקבילי:

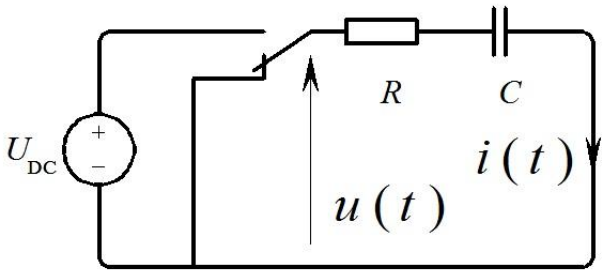


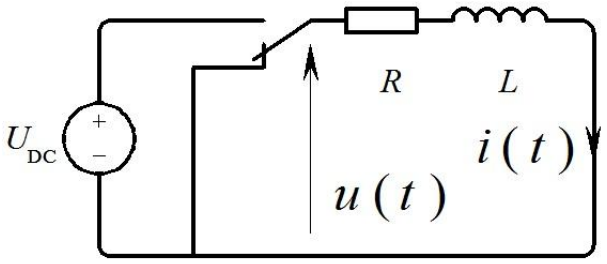
מעגל RLC טורי		
עכבת מעגל RLC טורי	Ω	$\bar{Z}(\omega)=R+\mathrm{j}\left(\omega L-\frac{1}{\omega C}\right)=R+\mathrm{j}\,X_s(\omega)$
היגב מעגל RLC טורי	Ω	$X_s(\omega)=\left(\frac{1}{\omega C}\right)\left(\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2-1\right)=(\omega L)\left(1-\left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2\right)$
התדר הזוויתי של התנודה הטבעית של אות הזרם והמתח שבמעגל RLC טורי (כאשר מקור האנרגיה מקוצר והמתח שבין הדקיו שווה אפס וולט).	$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	$\omega_0=\frac{1}{\sqrt{LC}}=\sqrt{\omega_1\omega_2}\qquad \omega_1<\omega_0<\omega_2$
התדר של מקור האנרגיה, שבו המעגל נמצא בתהודה	Hz	$f_0=\frac{\omega_0}{2\pi}$
התנגדות אופיינית של מעגל RLC טורי	Ω	$R_0=\sqrt{\frac{L}{C}}$
התדר הזוויתי של המקור שבו הספק המעגל שווה לחצי ההספק המעגל כאשר הוא פועל בתדר התהודה	$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	$\omega_{1,2}=\mp\left(\frac{R}{2L}\right)+\sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2+\omega_0^2}\qquad \omega_1<\omega_0<\omega_2$
רוחב פס התדרים band width	Hz	$\mathrm{BW}=\frac{\omega_2-\omega_1}{2\pi}=f_2-f_1=\frac{1}{2\pi}\frac{R}{L}$
מקדם האיכות quality factor בתדר התהודה	–	$Q_0=\frac{R_0}{R}=\frac{\omega_0 L}{R}=\frac{1}{\omega_0 RC}=\frac{f_0}{BW}$
יחס הזרם שבמעגל לזרם בתהודה, בתלות בתדר הזוויתי של מקור האנרגיה החשמלית	–	$\frac{\lvert\bar{I}(\omega)\rvert}{\lvert\bar{I}_{\max}\rvert}=\frac{1}{\sqrt{1+Q^2\left(\frac{\omega}{\omega_0}-\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}}$

מעגל RLC מקבילי		
המתירות של מעגל RLC מקבילי	S	$\bar{Y}(\omega)=\frac{1}{R}+\frac{1}{\left(r_C+\frac{1}{\mathrm{j}\omega C}\right)}+\frac{1}{(r_L+\mathrm{j}\omega L)}=G(\omega)+\mathrm{j}B(\omega)$
המוליכות של מעגל RLC מקבילי	S	$G(\omega)=\frac{1}{R}+\frac{r_L}{r_L^2+(\omega L)^2}+\frac{r_C}{r_C^2+\left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$
המניחות של מעגל RLC מקבילי	S	$B(\omega)=\frac{\frac{1}{\omega C}}{(r_C)^2+\left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}-\frac{\omega L}{(r_L)^2+(\omega L)^2}$
המוליכות של מעגל RLC מקבילי, בתדר התהודה	S	$G(\omega_0)=\frac{1}{R}+\frac{r_L+r_C}{R_0^2+r_L r_C}$
התנגדות אופיינית של מעגל RLC מקבילי	Ω	$R_0=\sqrt{\frac{L}{C}}$
התדר הזוויתי של התנודה הטבעית של אות הזרם והמתח שבמעגל RLC מקבילי	$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	$\omega_0=\frac{1}{\sqrt{LC}}\sqrt{\frac{R_0^2-r_L^2}{R_0^2-r_C^2}}$
התדר של מקור האנרגיה, שבו המעגל נמצא בתהודה	Hz	$f_0=\frac{\omega_0}{2\pi}$
התנאי הכללי לתהודה		$\frac{X_C}{r_C^2+X_C^2}=\frac{X_L}{r_L^2+X_L^2}$

מקרה פרטי: מעגל RLC מקבילי שבו $r_L = 0\Omega$ וגם $r_C = 0\Omega$		
$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \sqrt{\omega_1 \omega_2} \qquad \omega_1 < \omega_0 < \omega_2$	$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	התדר הזוויתי של התנודה הטבעית של אות הזרם והמתח שבמעגל RLC מקבילי (כאשר מקור האנרגיה מקוצר והמתח שבין הדקיו שווה אפס וולט).
$\omega_{1,2} = \mp\left(\frac{1}{2RC}\right) + \sqrt{\frac{1}{4R^2C^2} + \omega_0^2} \qquad \omega_1 < \omega_0 < \omega_2$	$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	התדר הזוויתי של המקור שבו הספק המעגל שווה לחצי ההספק המעגל כאשר הוא פועל בתדר התהודה
$\text{BW} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\pi} = f_2 - f_1 = \frac{1}{2\pi}\frac{1}{RC}$	Hz	רוחב פס התדרים band width
$Q_0 = \frac{R}{R_0} = \omega_0 RC = \frac{R}{\omega_0 L}$	–	מקדם האיכות quality factor בתדר התהודה
$\frac{\lvert\bar{I}(\omega)\rvert}{I_0} = \sqrt{1 + Q^2\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}$	–	יחס הזרם שבמעגל לזרם בתהודה, בתלות בתדר הזוויתי של מקור האנרגיה החשמלית
מקרה פרטי: מעגל RLC מקבילי שבו $r_C = 0\Omega$		
$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{r_L^2}{L^2}}$	$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	התדר הזוויתי של התנודה הטבעית של אות הזרם והמתח שבמעגל RLC מקבילי שבו $r_C = 0\Omega$

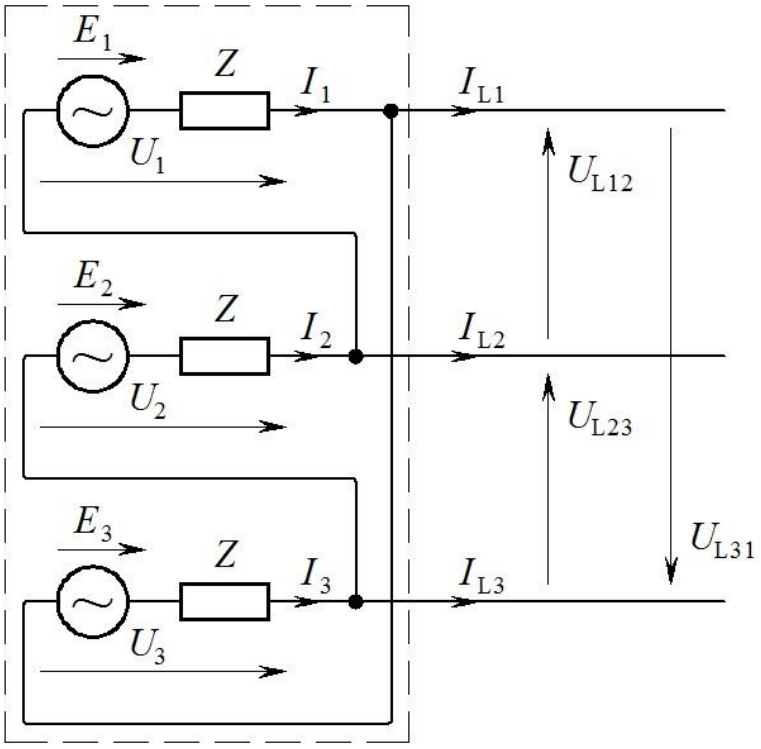
תופעות מעבר מסדר ראשון ; תגובה לאות מדרגה



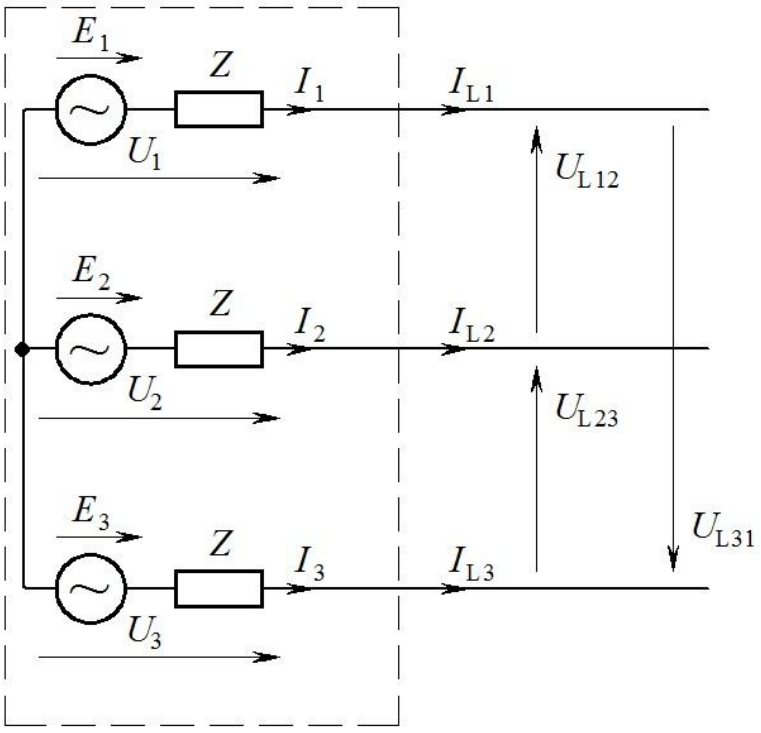


אות (זרם או מתח) בתופעת מעבר ; משוואת הדפקים		$h(t)=h_{\infty}-(h_{\infty}-h_{0+})\exp\left(\frac{-t}{\tau}\right)$
פונקציה מעריכית	–	$\exp(x)=e^{x}$
זמן	s	t
שיעור האות בסוף תופעת המעבר	–	h_{∞}
שיעור האות בתחילת תופעת המעבר	–	h_{0+}
התנגדות הענף המחובר בטור להשראות או לקיבול	Ω	R
קבוע הזמן של ענף שבו רק השראות והתנגדות ; ענף RL	s	$\tau=\frac{L}{R}$
קבוע הזמן של ענף שבו רק קיבול והתנגדות ; ענף RC	s	$\tau=RC$

מערכת תלת-מופעית



מערכת מקורות מתח תלת-מופעית המחוברת בחיבור משולש D



מערכת מקורות מתח תלת-מופעית המחוברת בחיבור כוכב Y

$$e_1(t) = \sqrt{2}\,E\sin(\omega t)$$

אות המתח של כל אחד משלושת מקורות מתח החילופים שבמקור מתח תלת-מופעי מאוזן.

$$e_2(t) = \sqrt{2}\,E\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

V

שלושת המקורות יחד, אין האחד בלי האחר, הם מקור מתח תלת-מופעי. הפרש המופע שבין המתחים הוא על פי מגמת התנועה של מחוגי השעון – הסְדרה החיובית.

$$e_3(t) = \sqrt{2}\,E\sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) = \sqrt{2}\,E\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$e_1(t) + e_2(t) + e_3(t) = 0\,\mathrm{V}$$

שיעורה היעיל של תנופת הכוח אלקטרומוטורי (כא"מ)

V E

תדר זוויתי rad/s $\omega = 2\pi f$

תדר Hz f

$$\overline{E}_1 = E\angle 0^\circ = E\left(1 + \mathrm{j}0\right)$$

$$\overline{E}_2 = E\angle -120^\circ = E\left(-0.5 - \mathrm{j}\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$$

מחוגי המתח של כל אחד משלושת מקורות מתח החילופים במקור מתח תלת-מופעי מאוזן ; מתחי הסְדרה החיובית

V

$$\overline{E}_3 = E\angle -240^\circ = E\angle = 120^\circ = E\left(-0.5 + \mathrm{j}\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$$

$$\overline{E}_1 + \overline{E}_2 + \overline{E}_3 = 0\,\mathrm{V}$$

סכום הזרמים בקו תלת-מופעי שבו שלושה מוליכים

A $\overline{I}_{\mathrm{L1}} + \overline{I}_{\mathrm{L2}} + \overline{I}_{\mathrm{L3}} = 0\,\mathrm{A}$

הזרם בכל אחד משלושת המוליכים שבקו תלת-מופעי המזין עומס חשמלי מאוזן

A $\left|\overline{I}_{\mathrm{L1}}\right| = \left|\overline{I}_{\mathrm{L2}}\right| = \left|\overline{I}_{\mathrm{L3}}\right| = \left|\overline{I}_{\mathrm{L}}\right| = I_{\mathrm{L}}$

סכום המתחים בקו תלת-מופעי

V $\overline{U}_{\mathrm{L12}} + \overline{U}_{\mathrm{L23}} + \overline{U}_{\mathrm{L31}} = 0\,\mathrm{V}$

המתח שבין מוליכי קו תלת-מופעי המזין עומס חשמלי מאוזן

V $\left|\overline{U}_{\mathrm{L12}}\right| = \left|\overline{U}_{\mathrm{L23}}\right| = \left|\overline{U}_{\mathrm{L31}}\right| = U_{\mathrm{L}}$

עומס תלת-מופעי מאוזן

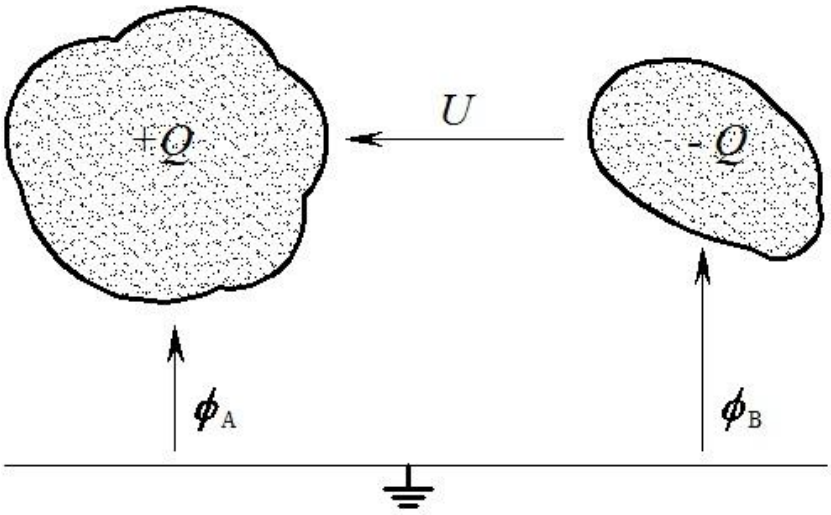
$P = \sqrt{3} U_{\mathrm{L}} I_{\mathrm{L}} \cos\varphi$	W	ההספק של עומס תלת-מופעי מאוזן
$Q = \sqrt{3} U_{\mathrm{L}} I_{\mathrm{L}} \sin\varphi$	VAr	ההספק ההיגבי של עומס תלת-מופעי מאוזן
$S = \sqrt{3} U_{\mathrm{L}} I_{\mathrm{L}}$	VA	ההספק הנִדמה של עומס תלת-מופעי מאוזן
$U_1 = U_2 = U_3 = \frac{U_{\mathrm{L}}}{\sqrt{3}}$	V	שיעור המתח גודל המתח בעומס המחובר בכוכב Y
$I_1 = I_2 = I_3 = \frac{I_{\mathrm{L}}}{\sqrt{3}}$	A	עצמת הזרם שבעכבה שבעומס תלת-מופעי מאוזן המחובר במשולש D

חשמל ומגנטיות

אלקטרוסטטיקה

חוקי האלקטרוסטטיקה מתייחסים למטענים חשמליים שאינם נעים כלל.

$F = \frac{q_1\, q_2}{4\pi\,\varepsilon_0\varepsilon_r\, r^2}$	N	הכוח הפועל בין שני מטענים חשמליים נקודתיים הכוח פועל לאורך הקו הישר המחבר את שני המטענים כוח בעל סימן שלילי (-) הוא כוח משיכה בין המטענים כוח בעל סימן חיובי (+) הוא כוח דחייה בין המטענים
q	C	כמות המטען החשמלי וסימנו (חיובי או שלילי).
$\varepsilon = \varepsilon_0\,\varepsilon_r$	$\frac{\mathrm{F}}{\mathrm{m}}$	הפרמיטיביות של התווך שבו פועל הכוח
r	m	המרחק שבין מרכזי המטענים
$E_1 = \frac{q_1}{4\pi\,\varepsilon_0\varepsilon_r\, r^2}$	$\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}}$	עצמת וקטור השדה החשמלי שיוצר מטען נקודתי אחד
r	m	המרחק מהמטען הנקודתי
$F_{12} = q_2 E_1$	N	הכוח הפועל על מטען נקודתי הנמצא בשדה החשמלי של מטען נקודתי אחר.
$D = \varepsilon\, E = \frac{q}{A}$	$\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{m}^2}$	צפיפות השטף החשמלי
A	m^2	שטח המשטח שדרכו שוטף השטף החשמלי
$\phi_e = \frac{q}{4\pi\,\varepsilon_0\varepsilon_r\, r}$	V	פוטנציאל השדה החשמלי הסטטי שיוצר מטען נקודתי, ביחס לנקודה מרוחקת, אינסוף, שם הפוטנציאל שווה אפס
$U_{AB} = \phi_A - \phi_B$	V	מתח חשמלי, הפרש הפוטנציאלים שבין שתי נקודות בשדה החשמלי
$W = q(\phi_B - \phi_A) = -qU_{AB}$	J	עבודה, כמות האנרגיה הדרושה כדי להעביר מטען חשמלי בשדה חשמלי סטטי מנקודה A לנקודה B.



מערכת שבה שני גופים הטעונים במטען חשמלי

Q	C		גודל המטען החשמלי האגור בכל אחד משני הגופים שבמערכת. סך המטען במערכת הוא $\sum Q = +Q + (-Q) = 0\,\mathrm{C}$
ϕ	V		הפוטנציאל החשמלי של הגוף הטעון
$U = \phi_A - \phi_B$	V		המתח החשמלי שבין שני הגופים
$C = \frac{Q}{U}$	F		הקיבול החשמלי של המערכת
$W_e = \frac{CU^2}{2} = \frac{QU}{2} = \frac{Q^2}{2C}$	J		כמות האנרגיה האגורה במערכת

מקרה פרטי: קבל לוחות

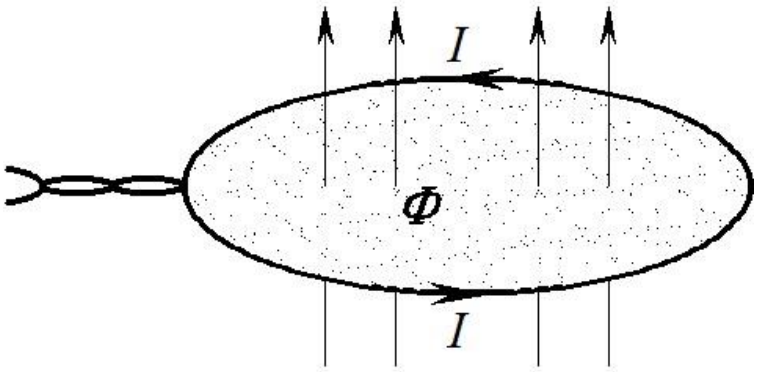
$F = \frac{\varepsilon A}{2}\left(\frac{U}{d}\right)^2$	N		כוח המשיכה הפועל בין הלוחות שבקבל לוחות
$E = \frac{U}{d}$	$\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}}$		עצמת השדה החשמלי בחומר המבודד (הדיאלקטרן) שבין לוחות הקבל
A	m^2		שטח
d	m		המרחק שבין הלוחות
U	V		המתח שבין הלוחות

אלקטרודינמיקה

חוקי האלקטרודינמיקה מתייחסים לזרמים חשמליים אשר נוכחותם יוצרת שדה מגנטי. (הם מבטאים את חוקי האלקטרוסטטיקה באמצעות זרם החשמל שלמעשה הוא תנועה של מטענים חשמליים.)

$F_l = \frac{\mu I_1 I_2}{2\pi d}$	$\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}}$	הכוח ליחידת אורך הפועל בין שני מוליכים ישרים ארוכים ומקבילים, שזרם חשמלי זורם בכל אחד מהם. כוח בעל סימן שלילי (-) משמעו כוח-דחייה בין המוליכים כוח בעל סימן חיובי (+) משמעו כוח-משיכה בין המוליכים
I	A	הזרם שבמוליך (עצמה וסימן)
$\mu = \mu_0\ \mu_\mathrm{r}$	$\frac{\mathrm{H}}{\mathrm{m}}$	החדירות של התווך שבו פועל הכוח
d	m	המרחק שבין מרכזי המוליכים
$B = \frac{\mu_0\ \mu_\mathrm{r}\ I}{2\pi r}$	T	(צפיפות) השדה המגנטי מחוץ למוליך ארוך ישר, שדה שיוצר הזרם הזורם במוליך
r	m	המרחק החישורי radial מהמוליך שדרכו זורם זרם חשמלי
$B = \mu_0\ \mu_\mathrm{r}\ H = \frac{\Phi}{A}$	$\mathrm{T} = \frac{\mathrm{Wb}}{\mathrm{m}^2}$	צפיפות השטף המגנטי ; צפיפות השדה המגנטי ; השראה מגנטית
Φ	Wb	שטף מגנטי
A	m^2	שטח המשטח שדרכו שוטף השטף המגנטי ; שטח הכריכה
$F = Bvq\sin\alpha$	N	הכוח (המגנטי) הפועל על מטען חשמלי הנע בשדה מגנטי
q	C	גודל המטען החשמלי
v	$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$	המהירות הקווית של המטען ; מהירות הקווית של המוליך

$E = Blv\sin\alpha$	V	הכוח האלקטרומוטורי (כא"מ) המושרה במוליך ישר הנע בשדה מגנטי אחיד במהירות קבועה.
$F = BlI\sin\alpha$	N	הכוח (המגנטי) הפועל על מוליך נושא זרם, הנמצא בשדה מגנטי
α	rad	הזווית שבין השדה המגנטי ובין מידת האורך של המוליך
l	m	אורך המוליך
$T = BAI\sin\alpha$	N·m	כוח מומנט הפיתול הפועל על כריכה אחת של מוליך שדרכו זורם זרם
α	rad	הזווית שבין וקטור השדה המגנטי ובין הקו הניצב לשטח הכריכה. "ניצב" – אנכי זה לזה, גודל הזווית הגיאומטרית בין שני קווים הניצבים זה לזה הוא 90°
$e(t) = \omega BA\sin(\omega t)$	V	הכוח האלקטרומוטורי (כא"מ) המושרה בכריכה הסובבת במהירות זוויתית קבועה, אשר ציר הסיבוב שלה ניצב לשדה המגנטי
ω	$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	מהירות זוויתית



כריכה אחת הנושאת זרם I והנתונה בשדה מגנטי Φ

$L = \frac{\Phi}{I}$	H	השראות (מגנטית) של כריכה אחת
$W_{\mathrm{m}} = \frac{L I^2}{2}$	J	אנרגיה מגנטית (על פי עצמת הזרם וההשראות)
$e(t) = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\Phi(t)$	V	הכוח האלקטרומוטורי (כא״מ) המושרה בכריכה אחת כתוצאה מהשינוי בזמן של השטף המגנטי.

קבועים פיזיקליים יסודיים

כמות המטען החשמלי של אלקטרון	$e = 1.602 \times 10^{-19}\,\mathrm{C}$
מסת המנוחה של אלקטרון	$m_e = 9.1066 \times 10^{-31}\,\mathrm{kg}$
הפרמיטיביות של הריק	$\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9}\ \frac{\mathrm{F}}{\mathrm{m}} \cong 8.854 \times 10^{-12}\ \frac{\mathrm{F}}{\mathrm{m}}$
החדירות המגנטית של הריק	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ \frac{\mathrm{H}}{\mathrm{m}} \cong 12.56 \times 10^{-7}\ \frac{\mathrm{H}}{\mathrm{m}}$
מהירות האור בריק	$c = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0}} = 2.99776 \times 10^8\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \cong 300\,000\ \frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}}$

תחיליות

קיצור התחילית		כינוי התחילית		ערך הכפולה
לועזית	עברית	לועזית	עברית	
T	ט	tera	טרא	10^{12}
G	ג	giga	גיגא	10^{9}
M	מג	mega	מגא	10^{6}
k	ק	kilo	קילו	10^{3}
				1
c	ס	centi	סנטי	10^{-2}
m	מ	milli	מילי	10^{-3}
μ	מק	micro	מיקרו	10^{-6}
n	נ	nano	ננו	10^{-9}
p	פ	pico	פיקו	10^{-12}

מחוון לשאלון : 90611 - "תורת החשמל" אביב 2020 מועד ב'

הערות כלליות לכל השאלות:

1. המחוון הרצ"ב מפרט את הדרישות לפתרון ואת הניקוד המלא לכל סעיף/תת סעיף (בחלוקה פנימית נוספת של תתי סעיפים היכן שקיימים).
2. ניקוד ומדדים להערכה:
   2.1 ניקוד מלא יינתן עבור פתרון/מענה מלא ונכון.
   2.2 ניקוד חלקי יינתן באופן הבא (באחוזים מהניקוד לפתרון מלא):
      2.2.1 טעות חישובית אולם הדרך ושלבי הפתרון + נוסחאות נכונים- 90% .
      2.2.2 טעות חישוב נגררת וכל היתר נכון-95%.
      2.2.3 פתרון חלקי - אחוז הניקוד יקבע בהתאם לחלקיות הפתרון.
   2.3 פתרון שגוי לחלוטין או העדר פתרון- 0%.
3. פתרון הכולל שימוש באחת (או יותר) מהשיטות לניתוח מעגלים חשמליים, זרמי חוגים, מתחי צמתים וכד' מחייב רישום המשוואות בצורה פרמטרית, לאחריה הצבת ערכים מספריים וכולל סימון הזרמים / צמתים בצירוף שרטוט מתאים. רישום לא תקני, חלקי או לא תואם לא יזכה לניקוד מלא (או לניקוד כלל) ונתון לשיקול מעריך הבחינה בהתאם לחלקיות הפתרון.

שאלה	סעיף	ניקוד	ניקוד ומדדים להערכה
1	א	07	חישוב ההספק המרבי.
	ב	08	חישוב ההתנגדות בעזרת מעגל שקול מתאים.
	ג	05	חישוב גודל מקור המתח בעזרת מעגל שקול מתאים.
2	א	04	שרטוט הדיאגרמה וסימון הזרמים תוך מתן נימוק מתאים.
	ב	04	בחירת הרכיב המתאים בהסתמך על תכונותיו החשמליות (יחס זרם-מתח)
	ג	07	חישוב ופירוט מרכיבי העכבות.
	ד	05	חישוב ושרטוט משולש הספקים תוך ציון ערכי צלעות המשולש וזוית המופע.
3	א	06	חישוב התנגדות הנגד תוך שימוש בעקרון גשר מאוזן ונוסחת התנגדות-טמפרטורה.
	ב	07	חישוב ערך הנגד בטמפרטורת העבודה וחישוב המתח U_{ab} .
	ג	05	חישוב הזרם/מתח על כל מקור ואת הספקו החשמלי.
	ד	02	נימוק מצב העבודה של כל מקור על פי כיווני מתח-זרם.
4	א	10	שרטוט מעגל מגנטי שקול, חישוב המיאונים השונים במעגל וחישוב השטף המגנטי בסליל הימני.
	ב	04	חישוב ההשראות ההדדית על פי יחסי השטפים בסלילים. שים לב - מקדם הצימוד אינו נתון ואינו שווה ל-1. פתרון המתבסס על הנחה זו הינו שגוי.
	ג	06	חישוב גודל הכא"מ המתפתח בסליל הימני בעזרת חוק פארדיי.

5	א	04	חישוב מתח ההדקים של הסוללה.
	ב	04	חישוב הזרם דרך נגד העומס R_L .
	ג	03	נימוק המתבסס על התנאי להעברת הספק מרבי $R_L \neq r_T$.
	ד	09	ציון תנאי מתח ההדקים המקסימלי עבורו התאים יפעלו כספקים וחישוב התנגדות העומס.
6	א	05	חישוב ההתנגדות המשתקפת בין הדקי הקבל וקבוע הזמן.
	ב	05	שרטוט המעגל החשמלי השקיל בתום תופעות המעבר, חישוב המתח על הקבל והמטען האגור בו.
	ג	07	חישוב המתח על הקבל.
	ד	03	הסבר מנומק מדוע הפרמטרים הקובעים את קבוע הזמן לא משתנים.
7	א	02	ציון שם המכשיר – אוסצילוסקופ / משקף תנודות.
	ב	03	חישוב התדירות על ידי מציאת זמן המחזור בעזרת הגרף.
	ג	08	פירוק אות המתח על פי עקרון הסופרפוזיציה והשפעת הרכיבים במעגל על אות הזרם. חובה לפרט את השיקולים השונים.
	ד	07	חישוב ההספק הפעיל במעגל על ידי מציאת הערך האפקטיבי של אות הזרם במעגל, והאנרגיה המתפזרת בו במשך דקה אחת.
8	א	05	חישוב תדירות התהודה של הענף הטורי והענף המקבילי תוך מתן הסבר מתאים מדוע לא יתפתח הספק בנגד העומס במצבים אלו.
	ב	10	חישוב הזרם על ידי שירטוט מעגל חשמלי המתאים לכל אחד ממצבי התהודה.
	ג	05	חישוב ההספק המדומה עבור כל אחד ממצבי התהודה.