

תורת החשמל

להנדסאים ולטכנאים – הנדסת חשמל

הנחיות לבחינה

- א. משך הבחינה : ארבע שעות.
- ב. מבנה השאלון ומפתח הערכה : בשאלון זה 8 שאלות. יש לענות על 5 שאלות. ערך כל שאלה 20 נקודות.
- ג. חומר עזר מותר לשימוש : סה"כ: 100 נקודות.
- ד. הוראות מיוחדות :
- מחשבון. (אין להשתמש במחשב כף יד או במחשבון עם תקשורת חיצונית).
 - חוברת עזר מקורית בתורת החשמל שבהוצאת מה"ט : חוברת נקייה, שאין בה לא הערות או תוספות כלשהן, בין בכתב יד בין מודפסות.
 - אין להעביר חומר עזר, ספרים ומחשבוניס בין הנבחנים.
 - יש לקרוא בעיון את ההנחיות בדף השער ואת כל שאלות הבחינה, ולוודא שהן מובנות.
 - יש להשאיר את העמוד הראשון במחברת הבחינה ריק. בסיום המבחן יש לרשום בעמוד זה את מספרי התשובות לבדיקה. התשובות ייבדקו לפי סדר כתיבתן בעמוד זה. לא ייבדקו תשובות עודפות.
 - יש לכתוב את התשובות בעט בלבד, בכתב יד ברור.
 - יש להתחיל כל תשובה בעמוד חדש ולציין את מספר השאלה ואת הסעיף. אין צורך להעתיק את השאלה עצמה.
 - טיוטה יש לכתוב במחברת הבחינה בלבד. יש לרשום את המילה "טיוטה" בראש העמוד ולהעביר קו על הכתוב כדי שלא ייבדק.
 - אין לאחד סעיפים! לכל סעיף שבשאלה יש לתת תשובה נפרדת.
 - תשובה מלאה לסעיף שאלה הכרוך בחישובים היא תשובה שבה מוצג הביטוי המתמטי שלפיו ייעשה החישוב, הערכים המוצגים בביטוי, ותוצאת החישוב מוצגת באמצעות מספר ויחידות.
 - כל מספר המוצג בביטוי מתמטי חייב להיות תוצאה של חישוב קודם או נתון המופיע בגוף השאלה.
 - אין השימוש במחשבון פוטר מהצורך להציג את הצבת הערכים בביטוי המתמטי.
 - תשובה שאינה מנומקת או שאין דרך הפתרון מוצגת בה לא תזכה בניקוד כלל.
 - אם להערכתכם חסר נתון או קיים נתון שגוי בשאלה, עליכם לציין זאת במפורש במחברת הבחינה, ולבחור ערך מתאים שיאפשר לכם להמשיך בפתרון השאלה. חובה להסביר ולנמק את הבחירה.

חל איסור מוחלט להוציא שאלון או מחברת בחינה מחדר הבחינה!

בהצלחה!

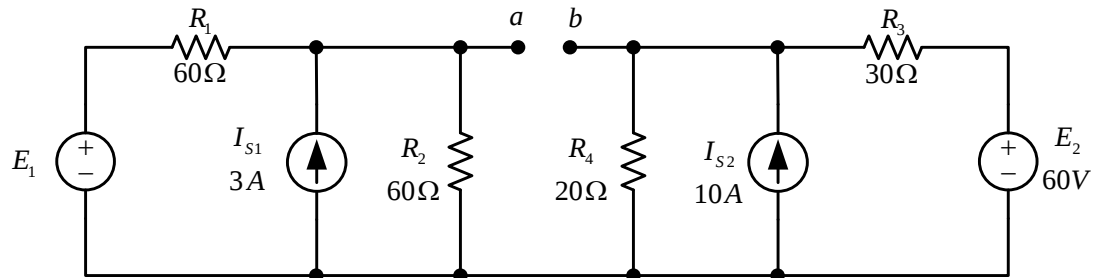
שאלות 8-1

ענו על 5 מתוך 8 השאלות, ערך כל שאלה – 20 נקודות.

שאלה 1

המעגל החשמלי המוצג באיור לשאלה 1 כולל מקורות מתח ומקורות זרם אידיאליים.

נתון שהפוטנציאל בנקודה a גדול מהפוטנציאל בנקודה b ב- 56 V ($V_{ab} = 56\text{ V}$).



איור לשאלה 1

(10 נק') א. חשבו את מתח המקור E_1 .

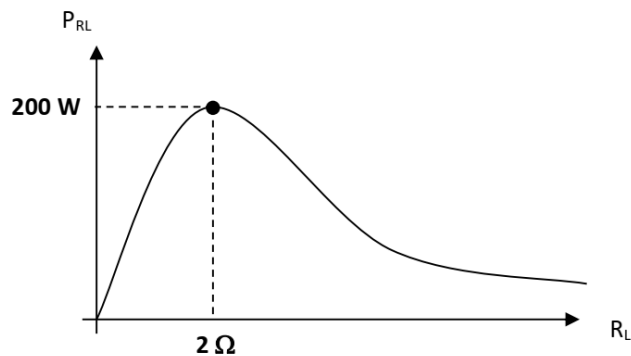
(10 נק') ב. בין הנקודות a ו- b חובר נגד עומס $R_L = 20\Omega$.

חשבו את ההספק המתפתח במקור המתח E_2 וציינו מהו מצב פעולתו (ספק אנרגיה או צרכן אנרגיה).

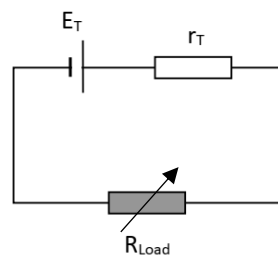
שאלה 2

סוללה מורכבת מתאי מתח זהים.

הכא"מ של כל תא הוא $E=2.5\text{ V}$, ההתנגדות הפנימית של כל תא היא $r=0.5\ \Omega$ והקיבול הוא $Q=500\text{ mAh}$. חיברו נגד עומס משתנה לסוללה כמוצג באיור א' לשאלה 2 ומדדו את ההספק המתפתח בו עבור ערכי התנגדות שונים. ההספק המתפתח בעומס בתלות ערך התנגדותו מוצג בגרף באיור ב' לשאלה 2.



איור ב' לשאלה 2



איור א' לשאלה 2

6 נק') א. חשבו את כא"מ הסוללה E_T ואת ההתנגדות הפנימית שלה r_T , אם ידוע שהמעגל עובד בנקודת העבודה שמסומנת בגרף.

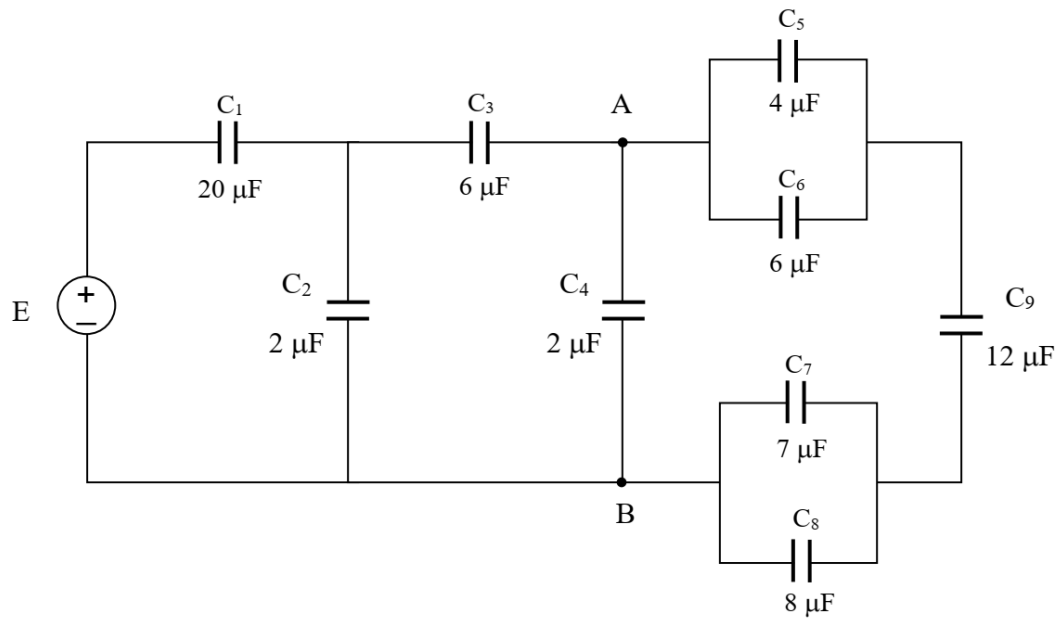
6 נק') ב. כיצד מחוברים התאים בסוללה (כמה תאים מחוברים בטור וכמה ענפים מחוברים במקביל)?

4 נק') ג. כמה אנרגיה, ביחידות [Wh], מספקת הסוללה במשך 10 דקות?

4 נק') ד. כמה זמן (בדקות), תספק הסוללה אנרגיה לעומס?

שאלה 3

באיור לשאלה 3 מוצג מעגל חשמלי:



איור לשאלה 3

נתון שהמתח בין הצמתים A-B הוא $U_{AB} = 60 \text{ V}$.

(12 נק') א. חשבו את גודלו של מקור המתח E.

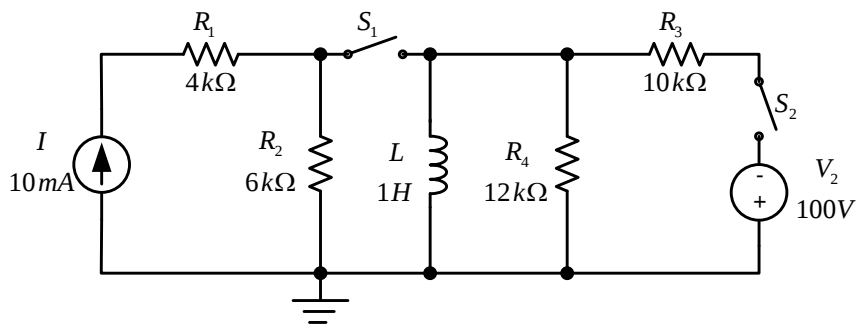
(5 נק') ב. חשבו את האנרגיה האגורה בקבלים C_1 ו- C_2 ואת האנרגיה האגורה במעגל כולו.

(3 נק') ג. מקצרים את הקבל C_2 (הקבל הופך לקו קצר).

כמה אנרגיה אגורה בקבל C_1 במצב זה, בתום כל תופעות המעבר?

שאלה 4

באיור לשאלה 4 מוצג מעגל חשמלי:



איור לשאלה 4

בזמן $t = 0^-$ כל המפסקים פתוחים.

(6 נק') א. מפסק S_1 נסגר בזמן $t=0$. חשבו את:

1. המתח ההתחלתי על הדקי הסליל $V_L(0^+)$.
2. הזרם שעובר דרך הסליל במצב המתמיד.

(7 נק') ב. לאחר גמר תופעות המעבר שלאחר סגירת מפסק S_1 מפסק S_2 נסגר. חשבו את:

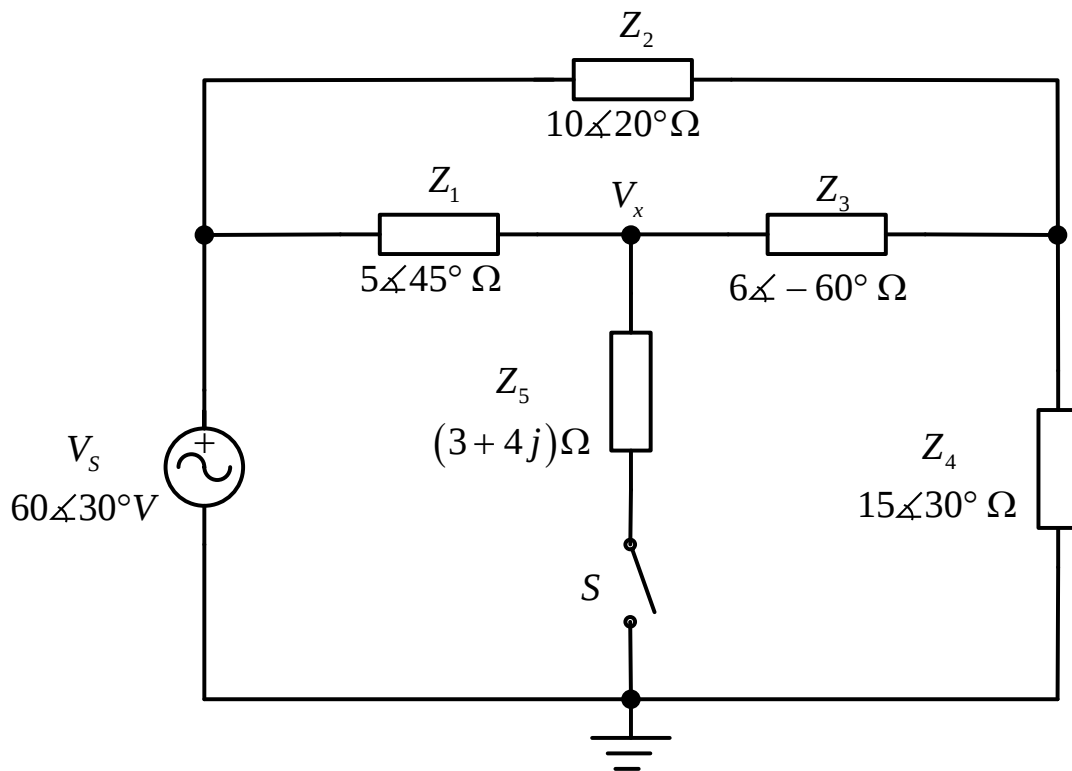
1. המתח ההתחלתי על הדקי הסליל.
2. הזרם שעובר דרך הסליל במצב המתמיד.

(7 נק') ג. לאחר סיום כל תופעות המעבר שלאחר סגירת מפסק S_2 המפסק S_1 נפתח. חשבו את:

1. המתח ההתחלתי על הדקי הסליל.
2. הזרם שעובר דרך הסליל במצב המתמיד.

שאלה 5

באיור לשאלה 5 מוצג מעגל חשמלי:



איור לשאלה 5

המפסק S פתוח.

(8 נק') א. חשבו את המתח V_x ביחס לאדמה.

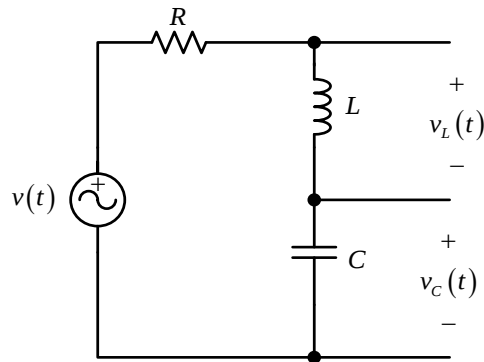
המפסק S סגור.

(7 נק') ב. חשבו את הזרם הזורם דרך העכבה Z_5 .

(5 נק') ג. חשבו את ההספקים – הממשי, ההיגבי והנדמה – המתפתחים בעכבה Z_1 .

שאלה 6

באיור לשאלה 6 מוצג מעגל חשמלי:



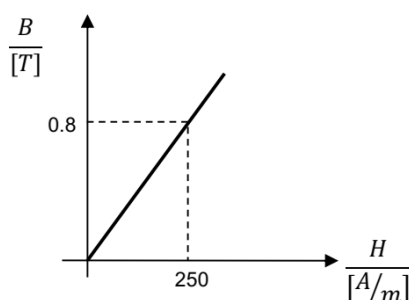
איור לשאלה 6

- המעגל מוזן ממקור מתח $v(t)$ בעל תדר משתנה ומשרעת (אמפליטודה) קבועה.
 כאשר התדירות של המקור היא 0 Hz , המתח הנמדד על הדקי הקבל הוא 200 V .
 בתדר התהודה $f_0 = 500\text{ Hz}$ המתח הנמדד על הסליל הוא 200 V והזרם הזורם במעגל הוא 5 A .
 (5 נק') א. חשבו את הערך האפקטיבי (יעיל) של מתח המקור.
 (15 נק') ב. חשבו את ערכי הרכיבים במעגל.

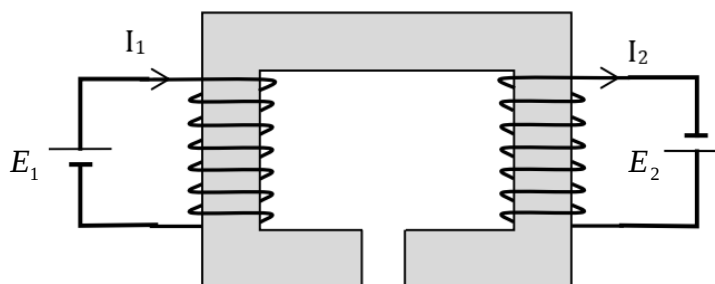
שאלה 7

באיור א' לשאלה 7 מוצגים שני סלילים הכרוכים על אותו גרעין פרומגנטי. בגרעין קיים חריץ אוויר. האורך הממוצע של מסלול השטף בגרעין הוא 240 mm ושטח החתך של הגרעין הוא 1.2 cm^2 . אורך חריץ האוויר הוא $g = 0.6 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

בסליל 1 יש 400 כריכות והתנגדותו 10Ω . הסליל מחובר למתח ישר DC שגודלו 5 V. בסליל 2 יש 500 כריכות והוא בנוי ממוליך נחושת שאורכו 100 m ושטח החתך שלו הוא 0.3 mm^2 . ההתנגדות הסגולית של נחושת: $\rho = 0.018 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$. סליל 2 מוזן ממתח של 12 V. באיור ב' לשאלה 7 נתון עקום המגנט של החומר הפרומגנטי של הליבה.



איור ב' לשאלה 7



איור א' לשאלה 7

(2 נק') א. מהי החלחלות היחסית μ_r של החומר הפרומגנטי?

(2 נק') ב. סרטטו רשת חשמלית אנלוגית למעגל המגנטי וקבעו את קוטביות הכוח המגנטו-מוטורי שנוצר בכל אחד מהסלילים.

(8 נק') ג. מהו גודל השטף בליבה ומה כיוונו?

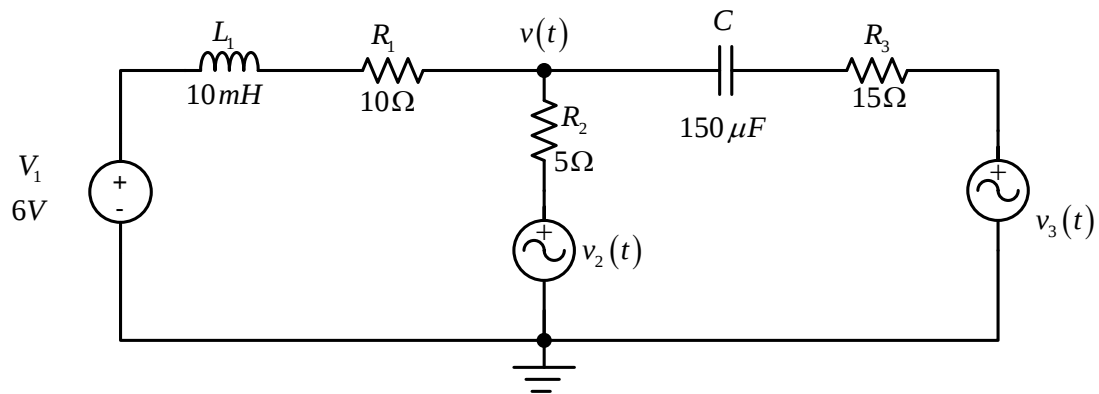
(4 נק') ד. מהי ההשראות ההדדית בין הסלילים? נתון שמקדם הצימוד מלא $K=1$.

(4 נק') ה. אחד הסלילים חובר למתח חילופין של 60 V, בתדירות של 100 Hz ובזווית מופע אפס.

הסליל השני בריקס (נתק בין הדקיו) חשבו את שיעור הזרם הזורם דרך הסליל המחובר למקור המתח (גודל וזווית).

שאלה 8

באיור לשאלה 8 מוצג מעגל חשמלי:



איור לשאלה 8

אותות המבוא הם: $v_2(t) = 12 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(1000 \cdot t + 50^\circ) V$

$$v_3(t) = 6 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2000 \cdot t + 120^\circ) V$$

(14 נק') א. כתבו את הביטוי למתח $v(t)$ ביחס לאדמה.

(6 נק') ב. חשבו את הערך היעיל של המתח V_{rms} .

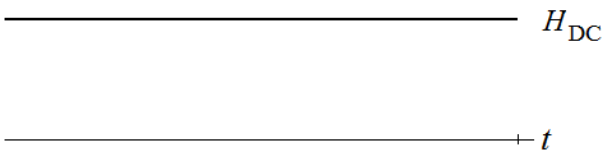
בהצלחה!

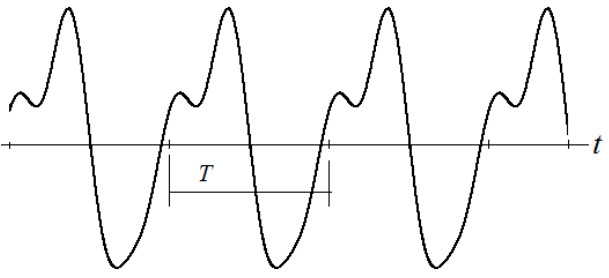
© כל הזכויות שמורות למה"ט

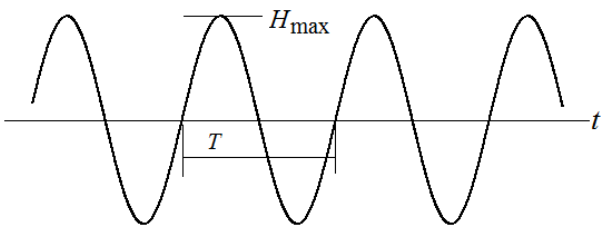
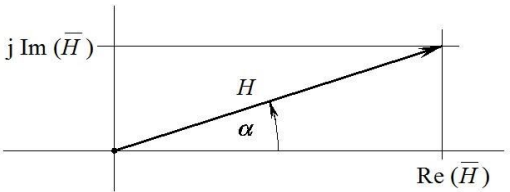
תורת החשמל

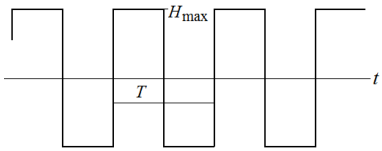
חוברת עזר

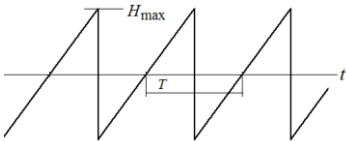
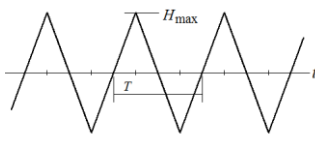
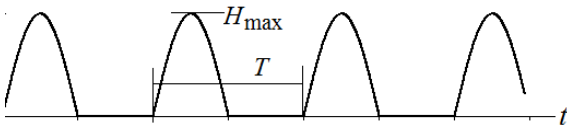
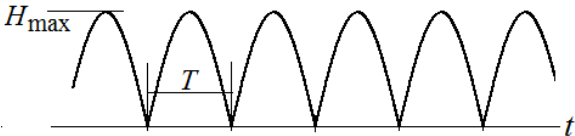
הנדסאים וטכנאים מוסמכים במגמת הנדסת חשמל – שאלון מספר 90611 ו-93611
הנדסאים וטכנאים מוסמכים במגמת הנדסת אלקטרוניקה – שאלון מספר 90711 ו-93711
הנדסאים במגמת מכשור ובקרה – שאלון מספר 92023

אותות		
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.	–	$h(t)$
זמן	s	t
אות מחזורי		$h(t) = h(t + T) = h(t - T)$
אורך זמן המחזור, מחזור, תקופה. אורך הזמן המזערי שאחריו חוזר על עצמו האות המחזורי	s	T
תדר	Hz	$f = \frac{1}{T}$
תדר זוויתי	rad/s	$\omega = 2\pi f$
		זרם ישר (ז"י) direct current (DC)
אות זרם-ישר	–	$h(t) = H_{DC}$
התנופה של האות	–	H_{DC}
שיעורו הממוצע של האות הישר	–	$H_{av} = H_{DC}$
שיעורו היעיל של האות הישר	–	$H = H_{RMS} = H_{DC}$
הספק רגעי	W	$p(t) = U_{DC} I_{DC} = P_{DC}$
הממוצע בזמן של ההספק הרגעי; הספק	W	$P_{av} = P_{DC}$
עבודה	J	$w(t) = P_{DC} t$
מטען חשמלי	C	$q(t) = I_{DC} t$

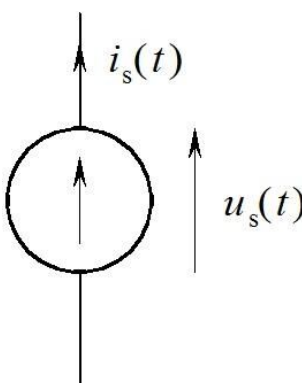
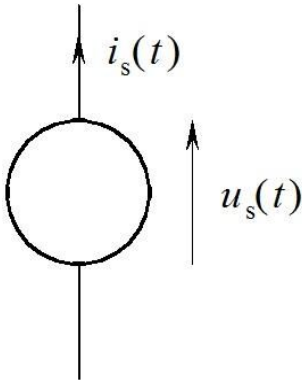
	זרם חילופים (ז"ח) alternating current (AC)	
אות זרם חילופים; אות מחזורי שבו רכיב הזרם הישר שווה אפס או זניח.	–	$h(t) = h_{AC}(t) = h_{AC}(t - T) = h_{AC}(t + T)$
פירוק אות זרם חילופים כלשהו, לסכום של אותות זרם חילופים סינוסואידים – טור פורייה	–	$h(t) = \sum_{n=1}^{n=\infty} c_n \sin(n\omega_1 t + \psi_n)$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

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

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

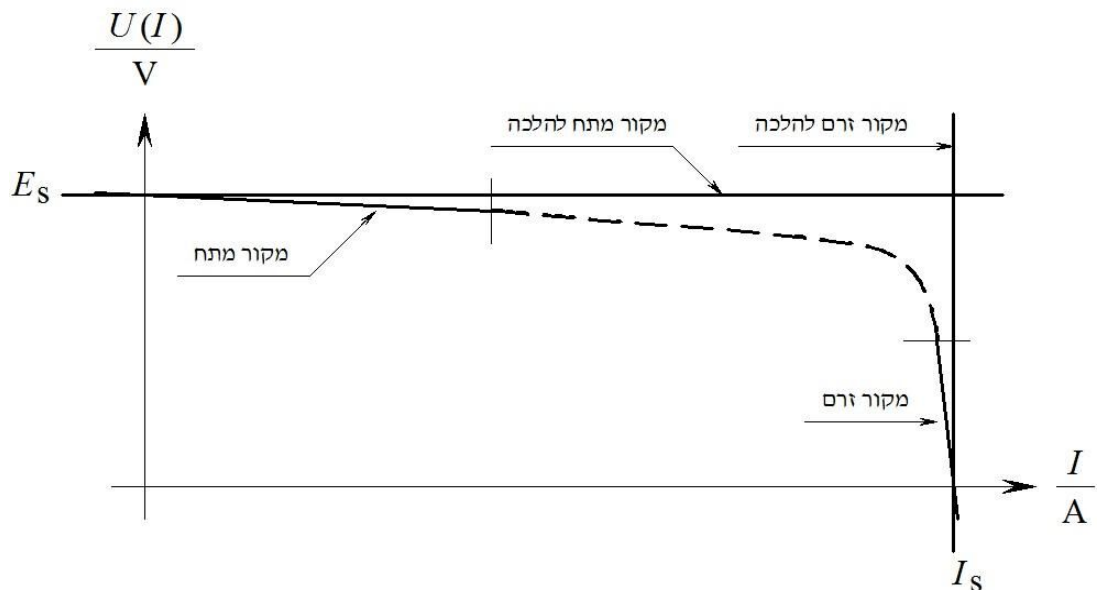
		
אות זרם חילופים שן-משור		אות זרם חילופים משולש
התדר הזוויתי היסודי של האות	rad/s	ω_1
שיעורו הממוצע של אות זרם חילופים משולש או שן משור לאורך זמן מחזור אחד שלם	–	$H_{av} = 0$
שיעורו היעיל של אות זרם חילופים משולש או שן משור; ממוצע ריבועי של האות	–	$H_{RMS} = \frac{H_{max}}{\sqrt{3}}$
		אות זרם חילופים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

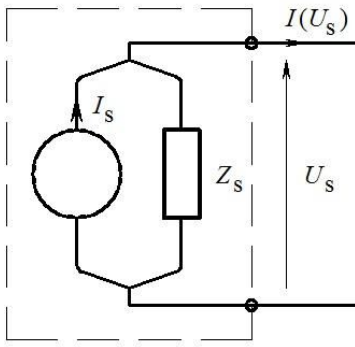
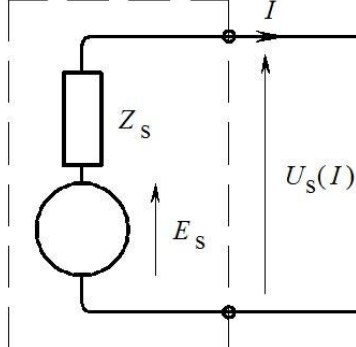
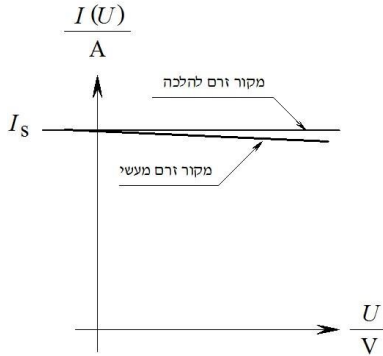
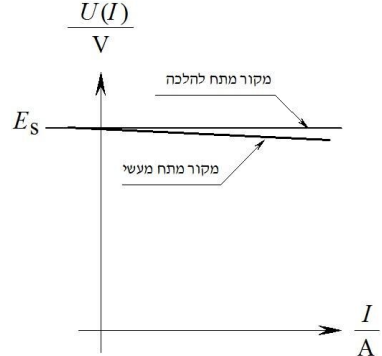
אנרגיה חשמלית

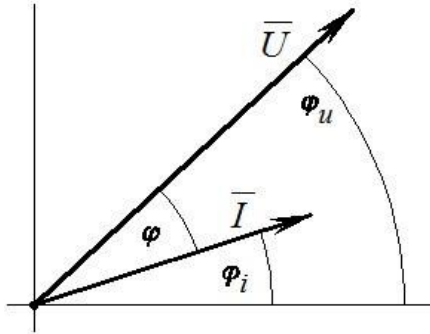
מקור זרם (מעשי) הוא מקור אנרגיה חשמלית שהזרם הזורם דרכו כמעט ואינו תלוי במתח שבין הדקיו. מקור זרם להלכה הוא מקור שהזרם הזורם דרכו קבוע ואינו תלוי כלל במתח שבין הדקיו.	מקור מתח (מעשי) הוא מקור אנרגיה חשמלית שהמתח שבין הדקיו כמעט ואינו תלוי בזרם הזורם דרכו. מקור מתח להלכה הוא מקור שהמתח שבין הדקיו קבוע ואינו תלוי כלל בזרם הזורם דרכו.
 סמל גרפי של מקור זרם	 סמל גרפי של מקור מתח

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

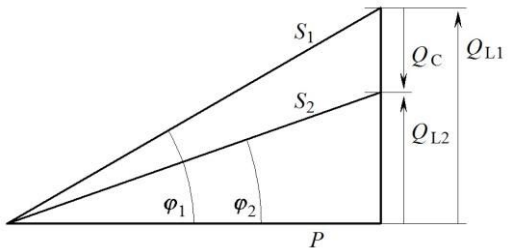
אופיין חשמלי של מקור אנרגיה

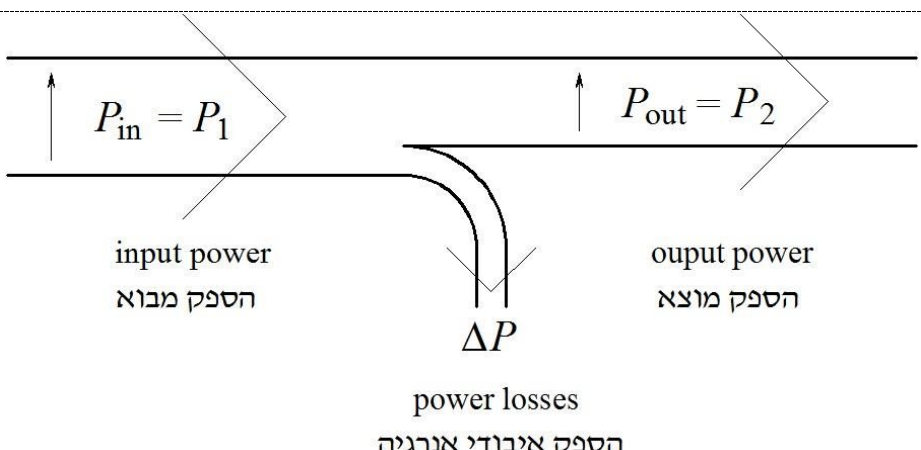


מקור זרם (מעשי)		מקור מתח (מעשי)	
			
אופיין חשמלי של מקור זרם		אופיין חשמלי של מקור מתח	
			
במעגלי זרם-ישר			
$I(U_s) = I_s - \frac{U_s}{R_s} = I_s - G_s U_s$		$U_s(I) = E_s - R_s I$	
R_s	Ω	התנגדות (פנימית) של המקור	
$G_s = \frac{1}{R_s}$	S	מוליכות (פנימית) של המקור	
במעגלי זרם-חילופים (סינוסואידי)			
$\bar{I}(\bar{U}_s) = \bar{I}_s - \frac{\bar{U}_s}{\bar{Z}_s} = \bar{I}_s - \bar{Y}_s \bar{U}_s$		$\bar{U}_s(\bar{I}) = \bar{E}_s - \bar{Z}_s \bar{I}$	
$\bar{Z}_s$	Ω	עכבה (פנימית) של המקור	
$\bar{Y}_s = \frac{1}{\bar{Z}_s}$	S	מותירות (פנימית) של המקור	

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

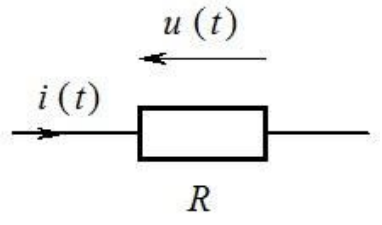
כשהזווית חיובית, להספק הנדמה אופי השראי; וכשהזווית שלילית, להספק הנדמה אופי קיבולי.	rad, °	$\varphi = \arg(\bar{S})$
--	--------	---------------------------

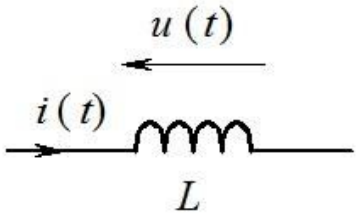
הספקי צריכת האנרגיה בעומס חשמלי		
הספק מרוכב בעומס חשמלי שעכבתו ידועה	$VA = V \cdot A$	$\bar{S} = \bar{Z} \bar{I} ^2 = \frac{ \bar{U} ^2}{\bar{Z}^*} = P + j(Q_L - Q_C)$
עכבת העומס החשמלי	Ω	$\bar{Z} = (R + jX) = Z \angle \phi$ $\phi = \arctan\left(\frac{X}{R}\right)$
משולש ההספקים בעומס חשמלי (באיור,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

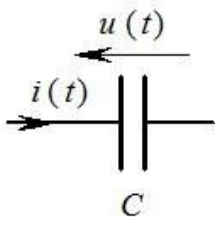
מאזן ההספקים במכשיר או בהתקן הפועל במצב מתמיד נצילות ואיבודי האנרגיה		
		
נצילות, $0 \leq \eta \leq 1$ ביחידות יחסיות או $0\% \leq \eta \leq 100\%$ באחוזים	—	$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = 1 - \frac{\Delta P}{P_{in}}$
ההספק (הפעיל) במבוא של המכשיר	W	$P_{in} = P_1$
ההספק (הפעיל) במוצא של המכשיר	W	$P_{out} = P_2$

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

תיאור מקובץ של תכונות חשמליות ומגנטיות

סמל גרפי של התנגדות (חשמלית)		
התנגדות חשמלית	Ω	R
מוליכות חשמלית	S	$G = \frac{1}{R}$
הגדרת ההתנגדות (החשמלית) על פי הזרם והמתח		
בזמן מעבר	V	$u(t) = Ri(t)$
הספק, קצב המרת אנרגיית החשמל לאנרגיית חום.	W	$p(t) = u(t)i(t)$
בזרם-ישר	V	$U = RI$
הספק בזרם ישר	W	$P_R = I^2 R = \frac{U^2}{R}$
בזרם חילופים סינוסואידי	V	$\bar{U} = R\bar{I}$
עכבה של התנגדות חשמלית בזרם חילופים סינוסואידי	Ω	$\bar{Z}_R = R = R\angle 0^\circ$
הספק בזרם חילופים	W	$P_R = \bar{I} ^2 R = \frac{ \bar{U} ^2}{R}$
ההספק המרוכב שבהתנגדות	VA	$\bar{S}_R = P_R + (j0 VAr)$

סמל גרפי של השראות (מגנטית)		
השראות	H	L
הגדרת ההשראות (המגנטית) על פי הזרם והמתח		
בזמן מעבר	V	$u(t) = L \frac{d}{dt} i(t)$
כמות האנרגיה האגורה בהשראות ברגע מסוים	J	$w_m(t) = \frac{L(i(t))^2}{2}$
זרם ישר (כאילו קָצָר)		$U = 0V$
כמות האנרגיה האגורה בהשראות בזרם ישר	J	$W_m = \frac{LI^2}{2}$
זרם חילופים סינוסואידי	V	$\bar{U} = (j\omega L)\bar{I} = jX_L \bar{I}$
היגב השראי	Ω	$X_L = \omega L$
עכבה של השראות (זרם חילופים סינוסואידי)	Ω	$\bar{Z}_L = +jX_L = X_L \angle +90^\circ$
הספק היגבי השראי (זרם חילופים סינוסואידי)	VAr	$Q_L = \bar{I} ^2 X_L = \frac{ \bar{U} ^2}{X_L}$
ההספק המרוכב שבהשראות	VAr	$\bar{S}_L = +jQ_L = Q_L \angle +90^\circ$

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

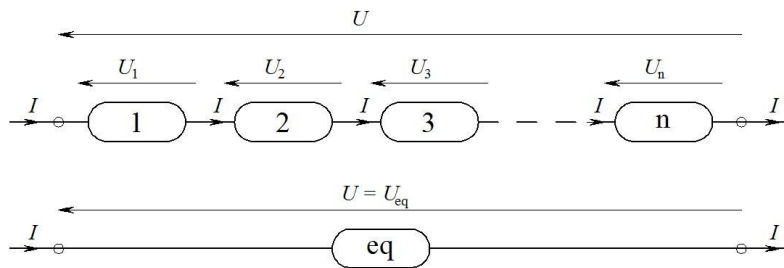
התנגדות והשראות וקיבול: תלותם בתכונות החומר, במידותיו, בצורתו ובטמפרטורה		
תלות ההתנגדות בתכונות החומר ומידותיו		
התנגדות תיל – מוליך ארוך ששטח החתך שלו קבוע	Ω	$R = \frac{\rho l}{A} = \frac{l}{\sigma A}$
אורך התיל	m	l
שטח החתך של התיל	mm^2	A
ההתנגדות הסגולית של החומר שממנו עשוי התיל	$\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$	$\rho = \frac{1}{\sigma}$
המוליכות הסגולית של החומר שממנו עשוי התיל	$\frac{\text{S} \cdot \text{m}}{\text{mm}^2}$	$\sigma = \frac{1}{\rho}$
תלות ההתנגדות בטמפרטורה		
התלות בטמפרטורה של התנגדות התיל; קירוב לפי קו ישר	Ω	$R(\theta) = R_{\theta_1} (1 + \alpha_{\theta} (\theta - \theta_1))$
קבוע הטמפרטורה של ההתנגדות	$\frac{1}{^{\circ}\text{C}}$	α_{θ}
הטמפרטורה שבה ידועים ההתנגדות R_{θ_1} וקבוע הטמפרטורה α_{θ}	$^{\circ}\text{C}$	θ_1

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

תלות הקיבול בתכונות החומר מידותיו וצורתו		
הפרמיטיביות של החומר המבודד (דיאלקטרי) שבקבל	F/m	$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$
הפרמיטיביות היחסית של התווך המבודד שבקבל	–	ϵ_r
הפרמיטיביות של הריק	F/m	ϵ_0
קבל לוחות		
הקיבול של קבל הבנוי שני לוחות המקבילים זה לזה	F	$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d}$
שטח פני הלוחות	m ²	A
עובי החומר המבודד שבין שני הלוחות	m	d
קבל כדורי		
הקיבול של קבל כדורי	F	$C = \frac{4\pi \epsilon_0 \epsilon_r R r}{R-r}$
רדיוס הכדור החיצוני	m	R
רדיוס הכדור הפנימי	m	r
קבל גלילי		
הקיבול של קבל גלילי	F	$C = \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r l}{\ln(R/r)}$
רדיוס הגליל החיצוני	m	R
רדיוס הגליל הפנימי	m	r
אורך הגליל	m	l

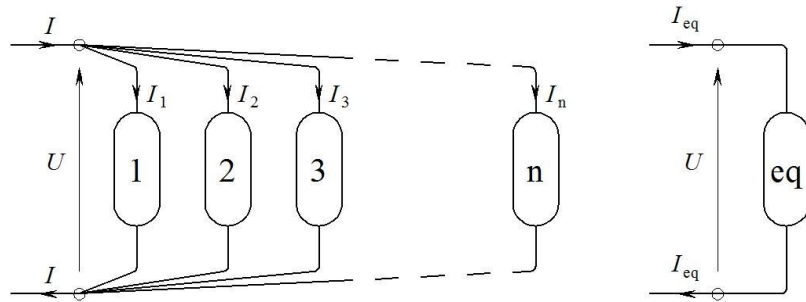
ערך שקיל

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

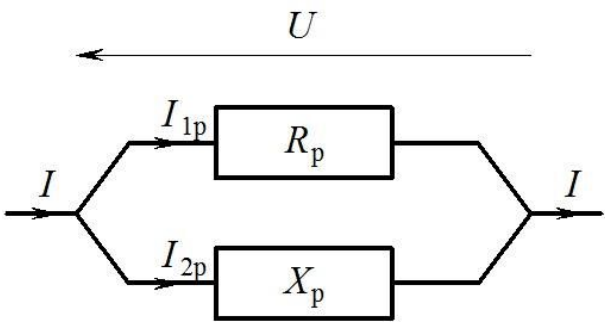
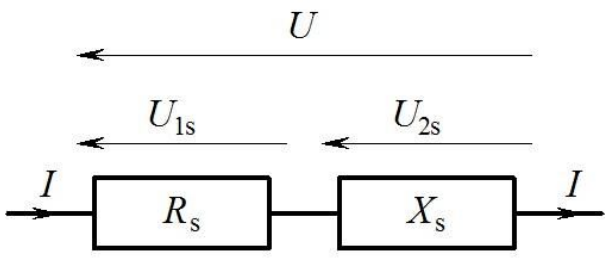


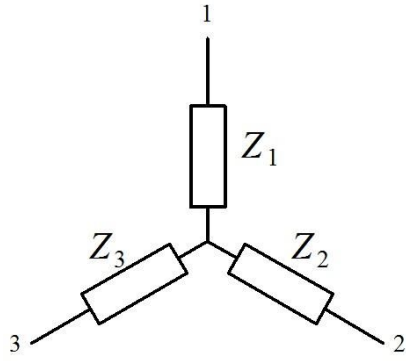
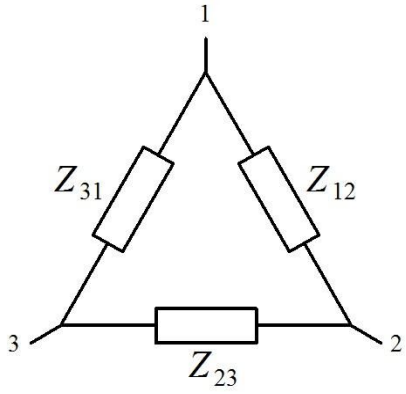
מתח הענף בזמן מעבר	V	$u_{eq}(t) = u_1(t) + u_2(t) + u_3(t) + \dots + u_n(t)$
מתח הענף בזרם-ישר	V	$U_{eq} = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n$
מתח הענף בזרם חילופים (סינוסואידי)	V	$\bar{U}_{eq} = \bar{U}_1 + \bar{U}_2 + \bar{U}_3 + \dots + \bar{U}_n$
התנגדות	Ω	$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$
מוליכות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

הערך השקיל לכל הרכיבים מאותו סוג בענף הבנוי חיבור מקבילי של רכיבים; מתח אחד שורר בין הדקים של הרכיבים



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

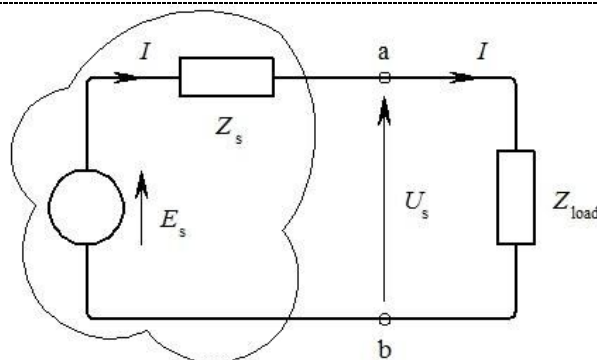
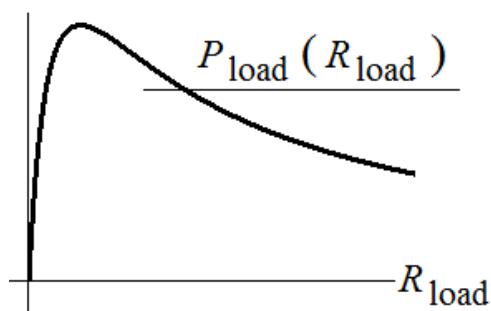
שתי עכבות המחוברות זו אל זו בטור או במקביל	
	
$\bar{I} = \bar{I}_{1p} + \bar{I}_{2p}$	$\bar{U} = \bar{U}_{1s} + \bar{U}_{2s}$
$\frac{1}{\bar{Z}} = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{jX_p}$	$\bar{Z} = R_s + jX_s$
$R_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{R_s}$	$R_s = \frac{R_p X_p^2}{R_p^2 + X_p^2}$
$X_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{X_s}$	$X_s = \frac{X_p R_p^2}{R_p^2 + X_p^2}$

שלוש עכבות המחוברות זו אל זו בכוכב או במשולש	
הפיכת חיבור במשולש לחיבור בכוכב	הפיכת חיבור בכוכב למשולש
	
$\bar{Z}_1 = \frac{\bar{Z}_{31}\bar{Z}_{12}}{\bar{Z}_{12} + \bar{Z}_{23} + \bar{Z}_{31}}$	$\bar{Z}_{12} = \frac{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + \bar{Z}_2\bar{Z}_3 + \bar{Z}_3\bar{Z}_1}{\bar{Z}_3}$
$\bar{Z}_2 = \frac{\bar{Z}_{12}\bar{Z}_{23}}{\bar{Z}_{12} + \bar{Z}_{23} + \bar{Z}_{31}}$	$\bar{Z}_{23} = \frac{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + \bar{Z}_2\bar{Z}_3 + \bar{Z}_3\bar{Z}_1}{\bar{Z}_1}$
$\bar{Z}_3 = \frac{\bar{Z}_{23}\bar{Z}_{31}}{\bar{Z}_{12} + \bar{Z}_{23} + \bar{Z}_{31}}$	$\bar{Z}_{31} = \frac{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + \bar{Z}_2\bar{Z}_3 + \bar{Z}_3\bar{Z}_1}{\bar{Z}_2}$

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

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

הספק האנרגיה המועברת לעומס החשמלי

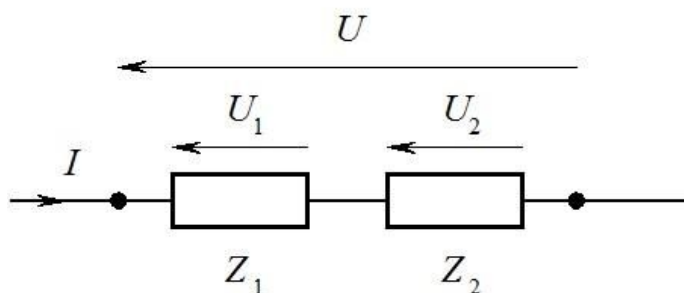


עכבת העומס; עכבת חלק המעגל המייצג את העומס החשמלי	Ω	$\bar{Z}_{\text{load}} = R_{\text{load}} + jX_{\text{load}}$
עכבת מקור האנרגיה (עכבת תבנית); העכבה שבין הדקים a ו-b כאשר מקור המתח מוחלף בקצר, ועכבת העומס אינה מחוברת.	Ω	$\bar{Z}_s = R_s + jX_s$
המתח שבין הדקים a ו-b כאשר עכבת העומס אינה מחוברת (מתח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

נקודת העבודה שבה ההספק מרבי

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

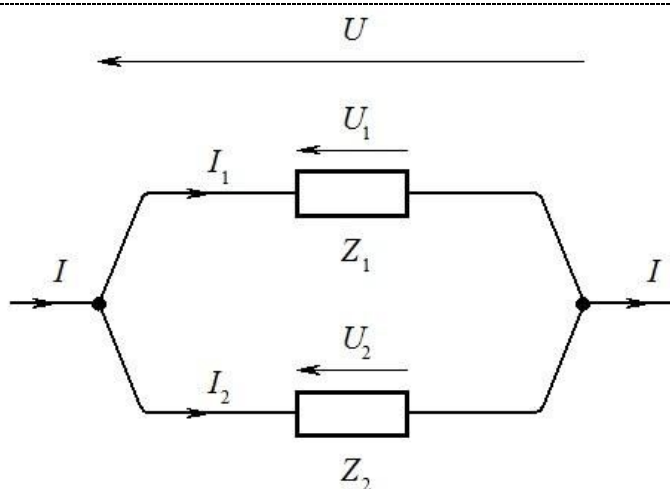
חלוקת המתח בין שתי עכבות המחוברות בטור



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

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

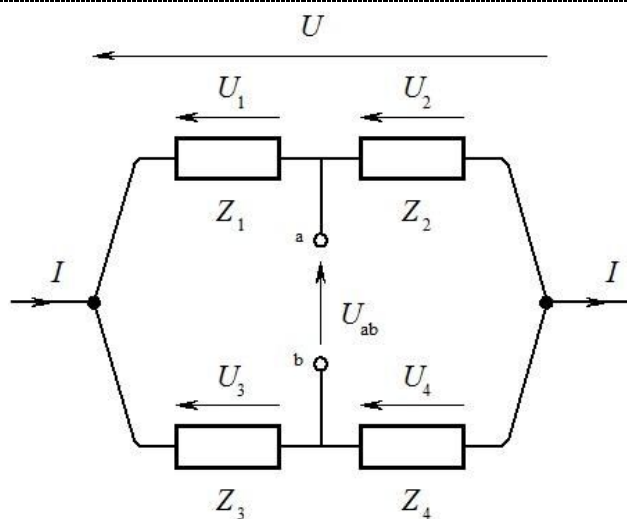
חלוקת הזרם בין שתי עכבות המחוברות במקביל



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

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

ארבע עכבות המחוברת בטופולוגית גשר



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

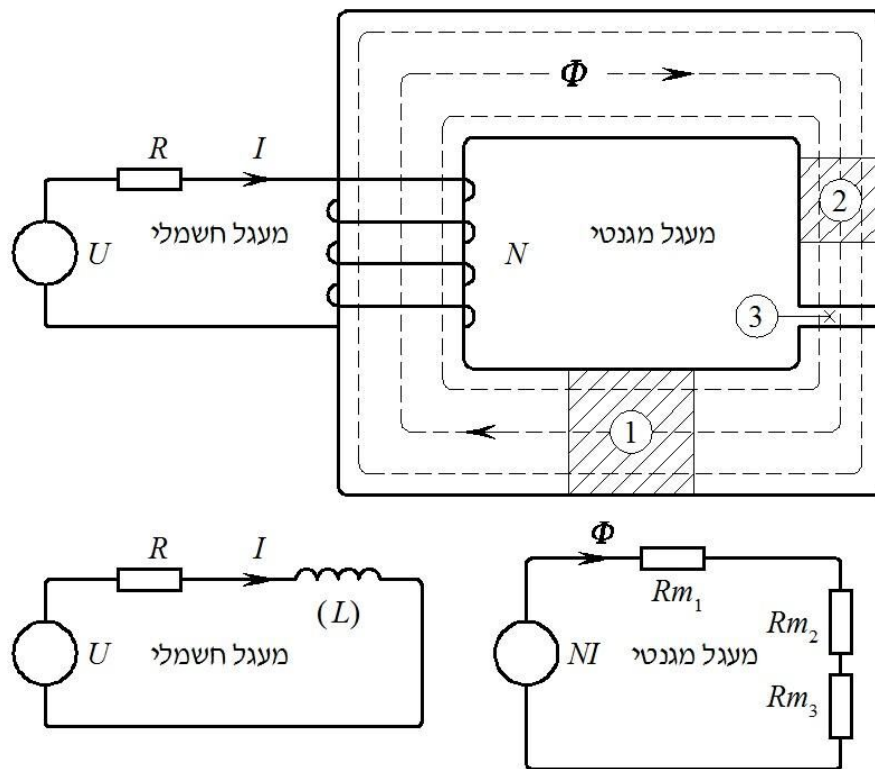
כאשר

$$\bar{U}_{ab} = 0V$$

המתח

מעגל מגנטי

מעגל מגנטי שבו יש מסלול שטף אחד:



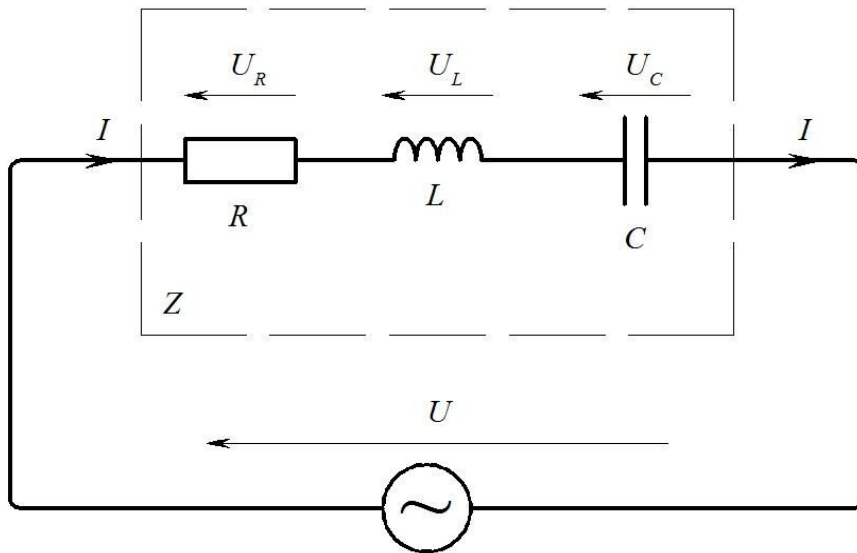
כוח מגנטו-מוטורי (כמ"מ): סכום הזרמים החשמליים הנכנסים לשטח המוקף בקו סגור	A	$\sum I = \sum H l$
סכום מכפלות עצמת השדה המגנטי באורך קטעי הקו הסגור	A	$\sum H l$
עצמת השדה המגנטי	$\frac{A}{m}$	H
אורך קטע מהקו הסגור, שלאורכו עצמת השדה המגנטי קבועה	m	l
השטף המגנטי	Wb	$\Phi = B A = \frac{\sum I}{R_m} = \frac{NI}{R_m}$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

מיאון (התנגדות מגנטית) של קטע i מהקו הסגור בתלות במידותיו הגיאומטריות ותכונותיו המגנטיות.	$\frac{1}{H}$	$R_{m,i} = \frac{l_i}{\mu_0 \mu_{r,i} A_i}$
החדירות (המגנטית) של הריק	$\frac{H}{m}$	μ_0
החדירות (המגנטית) היחסית של החומר הפרומגנטי שדרכו שוטף השטף המגנטי	—	μ_r
הכוח האלקטרו-מוטורי (כא"מ) המושרה בסליל כתוצאה משינוי השטף המגנטי השוטף בכריכות שבו	V	$e_L(t) = -N \frac{d}{dt} \Phi(t)$ $E_L \cong -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$
הכוח האלקטרו-מוטורי (כא"מ) המושרה בסליל כתוצאה משינוי הזרם החשמלי הזורם בכריכות שבו	V	$e_L(t) = -L \frac{d}{dt} i(t)$ $E_L \cong -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$
הכוח האלקטרו-מוטורי (כא"מ) המושרה בסליל 2 כתוצאה משינוי הזרם החשמלי הזורם בסליל 1 כתוצאה מהצימוד המגנטי שביניהם.	V	$e_2(t) = -M \frac{d}{dt} i_1(t)$ $E_2 \cong -M \frac{\Delta I_1}{\Delta t}$
מספר הכריכות שבסליל	—	N
השראות עצמית של סליל המתואר באמצעות מעגל מגנטי	H	$L = \frac{N^2}{R_m}$
השראות עצמית של סליל על פי השטף השוטף בכריכותיו והזרם הזורם בו	H	$L = \frac{N \Phi}{I}$
השראות הדדית שבין שני סלילים	H	$M = \frac{N_2 \Phi_{21}}{I_1} = \frac{N_1 \Phi_{12}}{I_2}$
השטף המגנטי הנובע מסליל אחד והשוטף בסליל האחר	Wb	Φ_{21}, Φ_{12}
מקדם הצימוד ההשראי שבין שני סלילים	—	$k = \frac{\Phi_{21}}{\Phi_{11}} = \frac{\Phi_{12}}{\Phi_{22}} \quad 0 \leq k \leq 1$
ההשראות ההדדית שבין שני סלילים, בידיעת ההשראות העצמית ומקדם הצימוד ההשראי	H	$M = k \sqrt{L_1 L_2}$

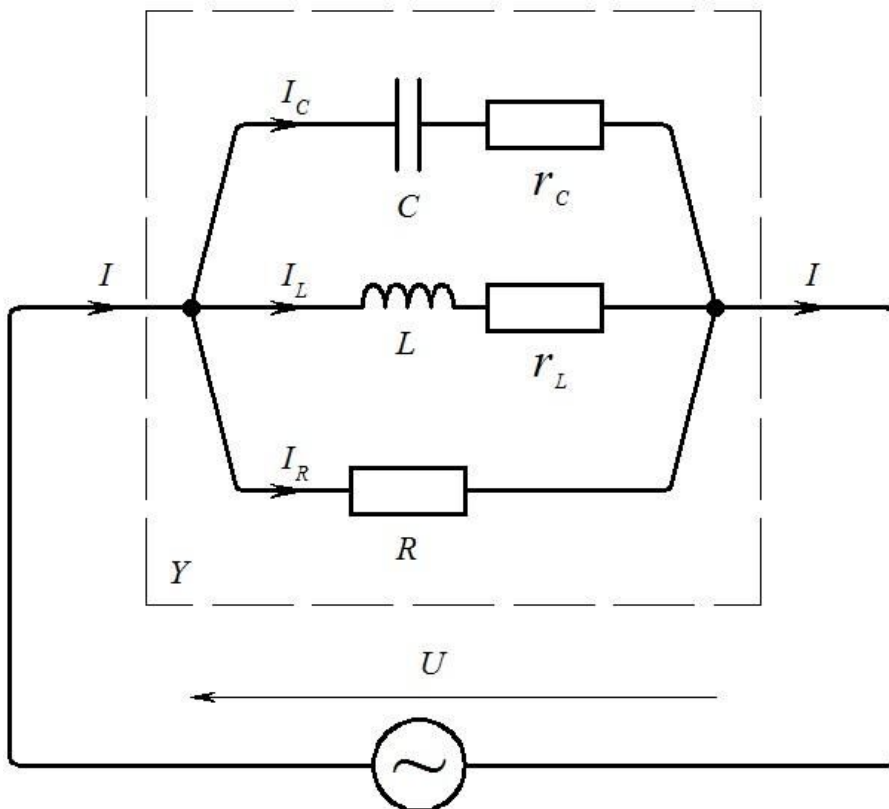
מעגלי תהודה

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 :

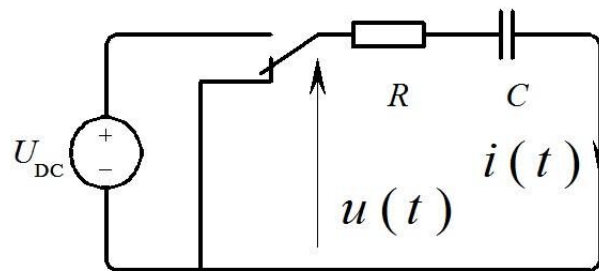
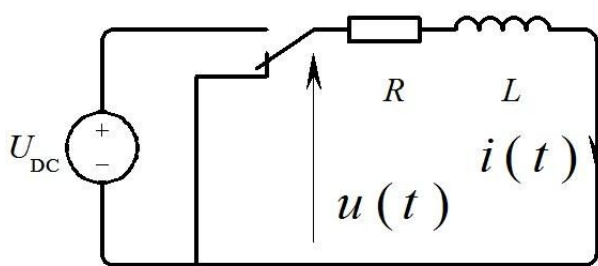


מעגל RLC טורי		
עכבת מעגל RLC טורי	Ω	$\bar{Z}(\omega) = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) = R + j X_s(\omega)$
היגב מעגל RLC טורי	Ω	$X_s(\omega) = \left(\frac{1}{\omega C} \right) \left(\left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 - 1 \right) = (\omega L) \left(1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega} \right)^2 \right)$
התדר הזוויתי של התנודה הטבעית של אות הזרם והמתח שבמעגל RLC טורי (כאשר מקור האנרגיה מקוצר והמתח שבין הדקיו שווה אפס וולט).	$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \sqrt{\omega_1 \omega_2} \quad \omega_1 < \omega_0 < \omega_2$
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	$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	$\omega_{1,2} = \mp \left(\frac{R}{2L} \right) + \sqrt{\left(\frac{R}{2L} \right)^2 + \omega_0^2} \quad \omega_1 < \omega_0 < \omega_2$
רוחב פס התדרים band width	Hz	$BW = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\pi} = f_2 - f_1 = \frac{1}{2\pi} \frac{R}{L}$
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	–	$\frac{ \bar{I}(\omega) }{ \bar{I}_{\max} } = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}}$

מעגל RLC מקבילי		
המתירות של מעגל RLC מקבילי	S	$\bar{Y}(\omega) = \frac{1}{R} + \frac{1}{\left(r_c + \frac{1}{j\omega C}\right)} + \frac{1}{(r_L + j\omega L)} = G(\omega) + jB(\omega)$
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		$\frac{X_C}{r_C^2 + X_C^2} = \frac{X_L}{r_L^2 + X_L^2}$

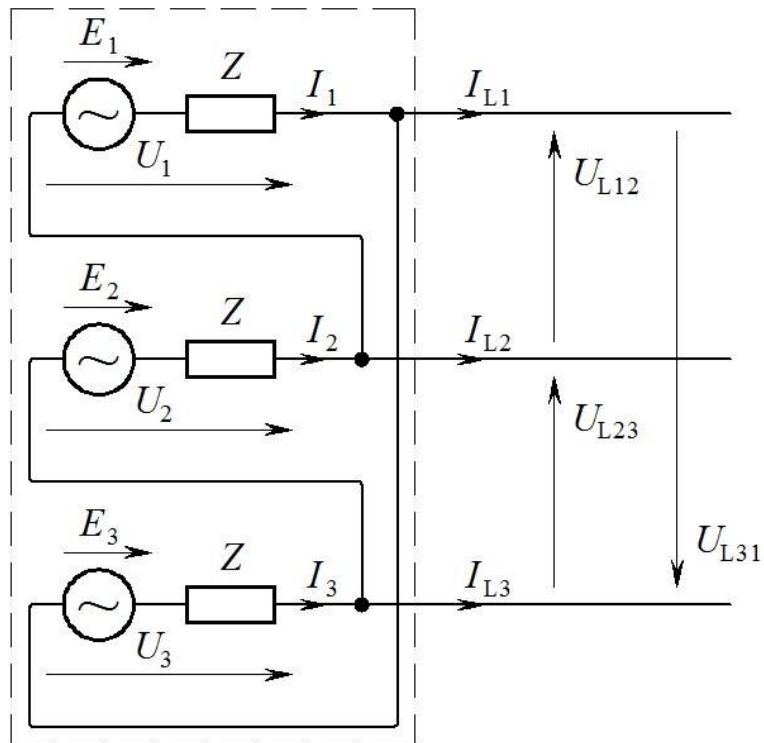
מקרה פרטי: מעגל RLC מקבילי שבו $r_L = 0\Omega$ וגם $r_C = 0\Omega$		
התדר הזוויתי של התנודה הטבעית של אות הזרם והמתח שבמעגל RLC מקבילי (כאשר מקור האנרגיה מקוצר והמתח שבין הדקיו שווה אפס וולט).	$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \sqrt{\omega_1 \omega_2} \quad \omega_1 < \omega_0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

תופעות מעבר מסדר ראשון ; תגובה לאות מדרגה

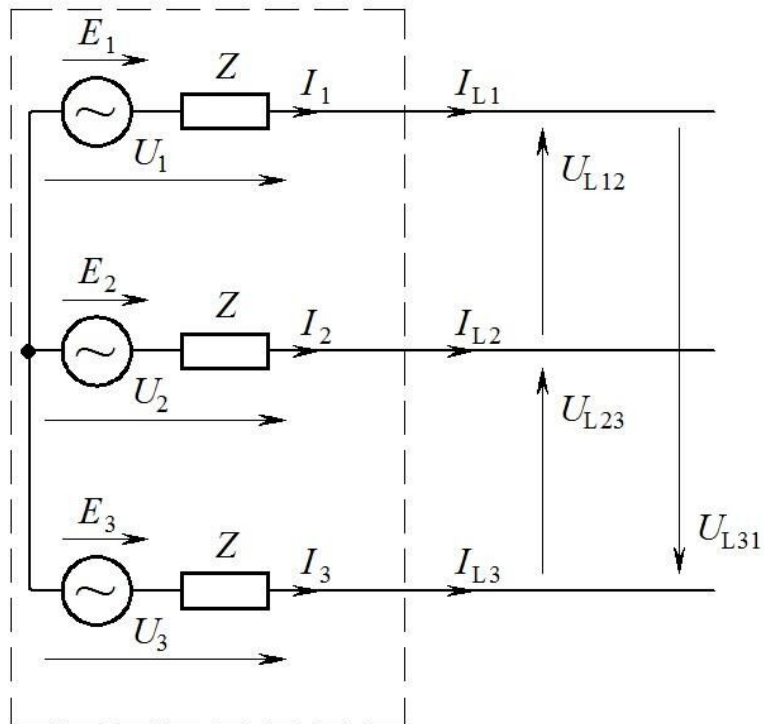


אות (זרם או מתח) בתופעת מעבר ; משוואת הדפקים		$h(t) = h_{\infty} - (h_{\infty} - h_{0+}) \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right)$
פונקציה מעריכית	—	$\exp(x) = e^x$
זמן	s	t
שיעור האות בסוף תופעת המעבר	—	h_{∞}
שיעור האות בתחילת תופעת המעבר	—	h_{0+}
התנגדות הענף המחובר בטור להשראות או לקיבול	Ω	R
קבוע הזמן של ענף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

אות המתח של כל אחד משלושת מקורות מתח החילופים שבמקור מתח תלת-מופעי מאוזן.		$e_1(t) = \sqrt{2} E \sin(\omega t)$
שלושת המקורות יחד, אין האחד בלי האחר, הם מקור מתח תלת-מופעי. הפרש המופע שבין המתחים הוא על פי מגמת התנועה של מחוגי השעון – הסדרה החיובית.	V	$e_2(t) = \sqrt{2} E \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$
		$e_3(t) = \sqrt{2} E \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) = \sqrt{2} E \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$
		$e_1(t) + e_2(t) + e_3(t) = 0 \text{ V}$
שיעורה היעיל של תנופת הכוח אלקטרומוטורי (כא"מ)	V	E
תדר זוויתי	rad/s	$\omega = 2\pi f$
תדר	Hz	f
		$\bar{E}_1 = E \angle 0^\circ = E(1 + j0)$
מחוגי המתח של כל אחד משלושת מקורות מתח החילופים במקור מתח תלת-מופעי מאוזן; מתחי הסדרה החיובית	V	$\bar{E}_2 = E \angle -120^\circ = E \left(-0.5 - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$
		$\bar{E}_3 = E \angle -240^\circ = E \angle 120^\circ = E \left(-0.5 + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$
		$\bar{E}_1 + \bar{E}_2 + \bar{E}_3 = 0 \text{ V}$
סכום הזרמים בקו תלת-מופעי שבו שלושה מוליכים	A	$\bar{I}_{L1} + \bar{I}_{L2} + \bar{I}_{L3} = 0 \text{ A}$
הזרם בכל אחד משלושת המוליכים שבקו תלת-מופעי המזין עומס חשמלי מאוזן	A	$ \bar{I}_{L1} = \bar{I}_{L2} = \bar{I}_{L3} = \bar{I}_L = I_L$
סכום המתחים בקו תלת-מופעי	V	$\bar{U}_{L12} + \bar{U}_{L23} + \bar{U}_{L31} = 0 \text{ V}$
המתח שבין מוליכי קו תלת-מופעי המזין עומס חשמלי מאוזן	V	$ \bar{U}_{L12} = \bar{U}_{L23} = \bar{U}_{L31} = U_L$

עומס תלת-מופעי מאוזן

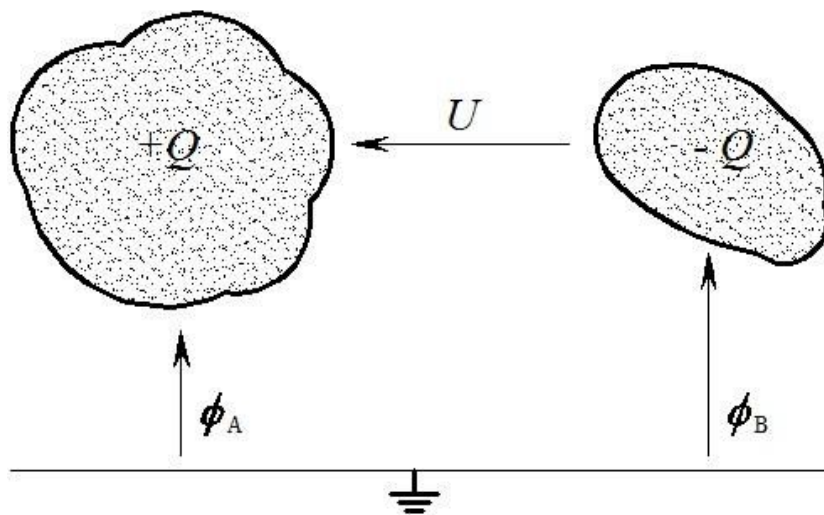
ההספק של עומס תלת-מופעי מאוזן	W	$P = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi$
ההספק ההיגבי של עומס תלת-מופעי מאוזן	VAr	$Q = \sqrt{3} U_L I_L \sin \varphi$
ההספק הנדמה של עומס תלת-מופעי מאוזן	VA	$S = \sqrt{3} U_L I_L$
שיעור המתח גודל המתח בעומס המחובר בכוכב Y	V	$U_1 = U_2 = U_3 = \frac{U_L}{\sqrt{3}}$
עצמת הזרם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

חשמל ומגנטיות

אלקטרוסטטיקה

חוקי האלקטרוסטטיקה מתייחסים למטענים חשמליים שאינם נעים כלל.

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	N	$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi \epsilon_0 \epsilon_r r^2}$
כמות המטען החשמלי וסימנו (חיובי או שלילי).	C	q
הפרמיטיביות של התווך שבו פועל הכוח	$\frac{F}{m}$	$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$
המרחק שבין מרכזי המטענים	m	r
עצמת וקטור השדה החשמלי שיוצר מטען נקודתי אחד	$\frac{V}{m}$	$E_1 = \frac{q_1}{4\pi \epsilon_0 \epsilon_r r^2}$
המרחק מהמטען הנקודתי	m	r
הכוח הפועל על מטען נקודתי הנמצא בשדה החשמלי של מטען נקודתי אחר.	N	$F_{12} = q_2 E_1$
צפיפות השטף החשמלי	$\frac{C}{m^2}$	$D = \epsilon E = \frac{q}{A}$
שטח המשטח שדרכו שוטף השטף החשמלי	m ²	A
פוטנציאל השדה החשמלי הסטטי שיוצר מטען נקודתי, ביחס לנקודה מרוחקת, אינסוף, שם הפוטנציאל שווה אפס	V	$\phi_e = \frac{q}{4\pi \epsilon_0 \epsilon_r r}$
מתח חשמלי, הפרש הפוטנציאלים שבין שתי נקודות בשדה החשמלי	V	$U_{AB} = \phi_A - \phi_B$
עבודה, כמות האנרגיה הדרושה כדי להעביר מטען חשמלי בשדה חשמלי סטטי מנקודה A לנקודה B.	J	$W = q(\phi_B - \phi_A) = -qU_{AB}$



מערכת שבה שני גופים הטעונים במטען חשמלי

גודל המטען החשמלי האגור בכל אחד משני הגופים שבמערכת.

סך המטען במערכת הוא $\sum Q = +Q + (-Q) = 0 \text{ C}$

הפוטנציאל החשמלי של הגוף הטעון

המתח החשמלי שבין שני הגופים

הקיבול החשמלי של המערכת

כמות האנרגיה האגורה במערכת

C Q

V ϕ

V $U = \phi_A - \phi_B$

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

J $W_e = \frac{CU^2}{2} = \frac{QU}{2} = \frac{Q^2}{2C}$

מקרה פרטי: קבל לוחות

כוח המשיכה הפועל בין הלוחות שבקבל לוחות

N $F = \frac{\epsilon A}{2} \left(\frac{U}{d} \right)^2$

עצמת השדה החשמלי בחומר המבודד (הדיאלקטרן) שבין לוחות הקבל

$\frac{\text{V}}{\text{m}}$ $E = \frac{U}{d}$

שטח m^2 A

המרחק שבין הלוחות m d

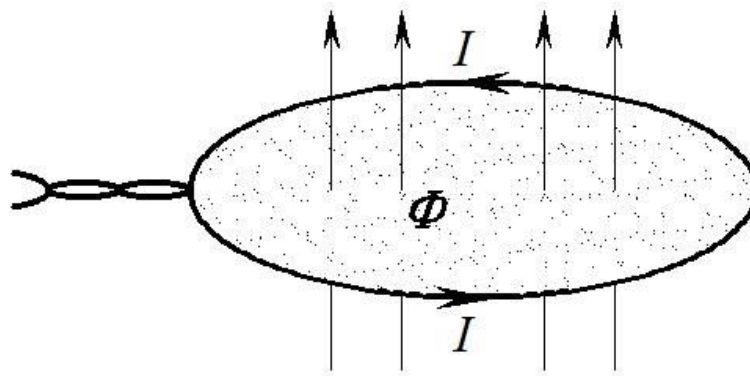
המתח שבין הלוחות V U

אלקטרו דינמיקה

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

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	$\frac{N}{m}$	$F_l = \frac{\mu I_1 I_2}{2\pi d}$
הזרם שבמוליך (עצמה וסימן)	A	I
החדירות של התווך שבו פועל הכוח	$\frac{H}{m}$	$\mu = \mu_0 \mu_r$
המרחק שבין מרכזי המוליכים	m	d
(צפיפות) השדה המגנטי מחוץ למוליך ארוך ישר, שדה שיוצר הזרם הזורם במוליך	T	$B = \frac{\mu_0 \mu_r I}{2\pi r}$
המרחק החישורי radial מהמוליך שדרכו זורם זרם חשמלי	m	r
צפיפות השטף המגנטי; צפיפות השדה המגנטי; השראה מגנטית	$T = \frac{Wb}{m^2}$	$B = \mu_0 \mu_r H = \frac{\Phi}{A}$
שטף מגנטי	Wb	Φ
שטח המשטח שדרכו שוטף השטף המגנטי; שטח הכריכה	m^2	A
הכוח (המגנטי) הפועל על מטען חשמלי הנע בשדה מגנטי	N	$F = Bvq \sin \alpha$
גודל המטען החשמלי	C	q
המהירות הקווית של המטען; מהירות הקווית של המוליך	$\frac{m}{s}$	v

הכוח האלקטרומוטורי (כא"מ) המושרה במוליך ישר הנע בשדה מגנטי אחיד במהירות קבועה.	V	$E = Blv \sin \alpha$
הכוח (המגנטי) הפועל על מוליך נושא זרם, הנמצא בשדה מגנטי	N	$F = B l I \sin \alpha$
הזווית שבין השדה המגנטי ובין מידת האורך של המוליך	rad	α
אורך המוליך	m	l
כוח מומנט הפיתול הפועל על כריכה אחת של מוליך שדרכו זרם	N·m	$T = B A I \sin \alpha$
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°	rad	α
הכוח האלקטרומוטורי (כא"מ) המושרה בכריכה הסובבת במהירות זוויתית קבועה, אשר ציר הסיבוב שלה ניצב לשדה המגנטי	V	$e(t) = \omega B A \sin(\omega t)$
מהירות זוויתית	$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	ω



כריכה אחת הנושאת זרם I והנתונה בשדה מגנטי Φ

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

קבועים פיזיקליים יסודיים

כמות המטען החשמלי של אלקטרון	$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
מסת המנוחה של אלקטרון	$m_e = 9.1066 \times 10^{-31} \text{ kg}$
הפרמיטיביות של הריק	$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \frac{\text{F}}{\text{m}} \cong 8.854 \times 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}$
החדירות המגנטית של הריק	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \cong 12.56 \times 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}$
מהירות האור בריק	$c = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}} = 2.99776 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cong 300\,000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$

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}

דחוף!

לכבוד
המכללות ובתי הספר
להכשרת הנדסאים וטכנאים

הנדון: הבהרה לבחינת גמר ממלכתית

9:30	שעת העברה בדוא"ל:		תאריך בחינה: 27.7.2022
		הנדסת חשמל	מגמה:
		תורת החשמל	שם הבחינה:
		90611,90711,93611,93711 92023	סמל הבחינה

שאלה 7, סעיף ה'

במקום "אחד הסלילים", צריך להיות כתוב "סליל 1".

בברכה,
מחלקת בחינות

(01/07) 01-3-07