

## תוכן העניינים:

2	..... יסודות המעגל החשמלי
2	..... הגדרות יסודיות במעגלים חשמליים :
2	..... סיכום כללי :
11	..... שאלות :
14	..... תשובות סופיות :

### שימו לב!

החוברת מחולקת לנושאים כפי שמוצגים באתר GOOL. כל נושא פותח בסיכום תיאורטי קצר ולאחריו דוגמאות – אלו נידונים בהרחבה בסרטוני התיאוריה שבאתר GOOL. לאחר מכן ישנו מגוון תרגילים ברמה עולה בכל אחד מהנושאים – כולם נפתרים באריכות ובפירוט בסרטוני השאלות שבאתר.

## פרק 3

# יסודות המעגל החשמלי

## הגדרות יסודיות במעגלים חשמליים:

**סיכום כללי:**

**מעגל מקובץ:**

מעגל מקובץ הוא מעגל המורכב מרכיבים מקובצים. רכיב מקובץ הינו רכיב שאורכו הפיזי,  $L_c$ , קטן משמעותית מאורך הגל של האות

החשמלי המתאים לתדר חשמלי  $\omega$  העובר במעגל:  $\lambda = \frac{c}{f} = 2\pi \frac{c}{\omega} \gg L_c$ .

הגדרה מכיוון אחר:

נסמן את פרק הזמן שלוקח לגל מישורי לעבור התקן באורך  $L_c$  ב- $\tau_c$  ונקבל:  $\tau_c = \frac{L_c}{c} \ll \frac{1}{f} = T$ .

**יסודות המעגל החשמלי:**

מעגל חשמלי כללי מורכב מ-4 מרכיבים עיקריים:

- מקור – מספק אנרגיה חשמלית למעגל (סוללה / גנרטור).
- צרכן/עומס – מנצל את האנרגיה החשמלית.
- תמסורת – רשת המכוונת את האנרגיה מהמקור לעומס/ים.
- בקרה – אפשרות לשלוט על פעולת/ות המעגל (בין באופן ידני בין באופן אוטומטי).

**הזרם החשמלי:**

זרם חשמלי מוגדר בתור כמות המטען  $Q$  שעובר דרך חתך  $A$  בפרק זמן  $t$ .

כלומר:  $i(t) = \frac{dQ}{dt}$ . יחידות:  $\left[ \frac{C}{sec} \right] = [A]$  →  $i = \frac{dQ}{dt}$ , כלומר:  $[i] = A$ .

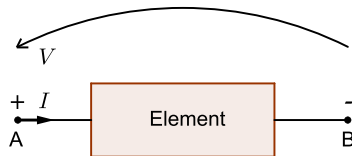
### המתח החשמלי:

המתח החשמלי בתור הפרש פוטנציאלים בין שתי נקודות במרחב:  $v_{12} = v_1 - v_2$ .  
(מתח חיובי מקיים:  $v_1 > v_2$  ומתח שלילי מקיים:  $v_1 < v_2$ ).

$$\text{יחידות הפוטנציאל החשמלי: } [v] = \left[ \frac{E_p}{q} \right] = \left[ \frac{J}{C} \right] = [V]$$

### כיווני ייחוס:

ניתן לאפיין כל רכיב חשמלי ע"י המתח החשמלי הנופל על הדקיו והזרם החשמלי העובר דרכו. על מנת לנתח מעגלים שונים, נפתח במוסכמות שילוו אותנו לאורך הקורס עבור כיווני הגדלים באופן הבא:



### סוגי חיבורים וסכימה של מתחים וזרמים על אלמנטים חשמליים:

נוכל לחבר אלמנטים חשמליים במספר אופנים.

בפרט, עבור אלמנטים בעלי שני הדקים נגדיר שתי צורות חיבור:

- חיבור אלמנטים בטור - בו הדק אחד של אלמנט מחובר לשני.
- חיבור אלמנטים במקביל - בו שני ההדקים של האלמנטים מחוברים יחדיו.

### חוק אוהם (Ohm's law):

הקשר שבין אות מתח ואות הזרם הקיימים על פני רכיב מסוים ניתן לתיאור פשוט

$$\text{ע"י חוק אוהם באופן הבא: } V = IR \quad ; \quad I = \frac{V}{R}$$

הגודל  $R$  מתאר את ההתנגדות של רכיב מסוים.

$$\text{יחידות התנגדות הן אוהם (Ohm): } \Omega \text{ ומקיימות: } [\Omega] = \left[ \frac{V}{A} \right] \rightarrow \text{Ohm} = \frac{\text{Volt}}{\text{Ampere}}$$

**הערה:**

ניתן גם להסתכל על מוליכות חשמלית במקום על התנגדות חשמלית.

מוליכות חשמלית מוגדרת בתור:  $G = \frac{I}{V}$  ויחידותיה:

$$\text{Ohm}^{-1} = \text{Simens} = \text{Mho} = \frac{\text{Ampere}}{\text{Volt}} \rightarrow [S] = [\mathcal{U}] = \left[ \frac{\text{A}}{\text{V}} \right]$$

המוליכות החשמלית מוגדרת בתור הנטייה של רכיב לאפשר זרימה של מטענים.

מתקיים:  $R \cdot G = 1$ .

**הנגד כרכיב חשמלי:**

רכיב המורכב מסגסוגת של חומרים מוליכים ומבודדים באופן כזה שניתן לשלוט על מידת ההתנגדות שלו.

**❖ דוגמאות - חישובים יסודיים באמצעות חוק אוהם:**

נגד נמצא בין שתי נקודות הפוטנציאל החשמלי הבאות:  $V_1 = 15\text{V}$  ו-  $V_2 = 27\text{V}$  וזורם בו זרם של  $2\text{mA}$ . מה היא התנגדותו?

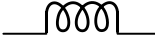

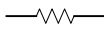
נגד מוחזק בקצהו האחד בפוטנציאל של  $20\text{V}$  וזורם בו זרם של  $2\text{A}$ . ידוע כי התנגדותו היא  $15\Omega$ . באיזה פוטנציאל מוחזק הנגד בקצהו השני?

**רכיבים חשמליים:**

נחלק את הרכיבים החשמליים לשני סוגים: רכיבים פאסיביים ורכיבים אקטיביים.

- רכיבים פאסיביים הם כאלו שצורכים אנרגיה (כמו נגד) או אוגרים אותה (כמו קבל וסליל).
- רכיבים אקטיביים מספקים אנרגיה למעגל החשמלי. אלו הם בעיקר מקורות אנרגיה, מגברים וכו'.

**רכיבים חשמליים פאסיביים ואידיאליים:**

סליל	קבל	נגד	
$\Phi = L \cdot I$	$Q = C \cdot V$	$V = IR$	משוואה
			סמל חשמלי

**תכונות של רכיבים פאסיביים:**

רכיבים פאסיביים מכילים שתי תכונות מרכזיות:

- ליניאריות.
- תלות בזמן.

**ליניאריות:**

עבור רכיב ליניארי, הקשר שבין המתח וזרם  $V(t) = f(I(t))$  מוגדר לכל  $V$  ולכל  $I$ .  
עבור רכיב לא ליניארי, ניתן לאפיין את הקשר  $V(t) = f(I(t))$  באופן שונה עבור תחומי מתחים וזרמים שונים.

**תלות בזמן:**

רכיב התלוי בזמן הוא כזה שערכיו ישתנו בתלות בזמן, (למשל התנגדותו של נגד, קיבולו של קבל וכו') בעוד שרכיב שאינו תלוי בזמן יתואר ע"י ערכים קבועים של אותות המתח והזרם דרכו בכל זמן.

**❖ דוגמאות:**

(1) נגד ליניארי וקבוע בזמן:  $V(t) = R \cdot I(t)$

(2) נגד ליניארי התלוי בזמן:  $V(t) = R(t) \cdot I(t)$

א.  $R(t) = R_0 + R \cdot f(t)$  כאשר:  $f(t) = \sin^2(\omega t)$

ב.  $R(t) = R_1 \cdot \sin(\omega t) + R_2 \cdot \cos(\omega t)$

ג.  $R(t) = R_0 \cdot \exp\{-t / \tau\}$

3 נגד לא ליניארי (וקבוע בזמן):

$$.R = \begin{cases} R_1 & I > 0 \\ R_2 & I < 0 \end{cases} .א$$

$$.R = \begin{cases} \frac{I}{I_0} \cdot R_0 & 0 < I < I_0 \\ R_0 \exp \left\{ - \left( \frac{I}{I_0} \right)^2 \right\} & I > I_0 \end{cases} .ב$$

ג. נגד לא ליניארי יכול גם להינתן ע"י תיאור גרפי של האופיין שלו.

4 הדיודה המעשית:  $I = I_0 \left( \exp \left\{ \frac{V}{v_{TH}} \right\} - 1 \right)$  כאשר:  $v_{TH} = 26 \text{ mV}$ ,  $I_0 \approx 10^{-12} \text{ A}$

התנגדות הדיודה ניתנת לחישוב לפי:  $r_D = \frac{dV}{dI} = \left( \frac{dI}{dV} \right)^{-1} = \frac{v_{TH}}{I_0} e^{-\frac{V}{v_{TH}}}$

**קשר בין מתח וזרם ברכיבים ריאקטיביים:**

קשר דיפרנציאלי	קשר אינטגרלי	
$I = C \frac{dV_C}{dt}$	$V_C(t) = V_C(0) + \frac{1}{C} \int_0^t I_C(t') dt'$	קבל
$V_L = L \frac{dI}{dt}$	$I_L(t) = I_L(0) + \frac{1}{L} \int_0^t V_L(t') dt'$	סליל

**הספקים של רכיבים פאסיביים:**

ההספק (Power) מוגדר בתור השינוי הזמני של האנרגיה:  $P = \frac{dW}{dt} = \frac{dW}{dQ} \frac{dQ}{dt} = V \cdot I$

עבור אותות זמניים  $I(t)$  ו- $V(t)$  נגדיר את ההספק הרגעי:  $P(t) = V(t) \cdot I(t)$

יחידות הספק:  $[P] = [V][I] = \text{Volt} \cdot \text{Ampere} = \text{Watt}$

מכיוון אחר אפשר גם להגדיר:  $[P] = \frac{[W]}{[T]} = \frac{\text{Joule}}{\text{sec}} = \text{Watt}$

**ביטויים עבור ההספק והאנרגיה ברכיבים פאסיביים:**

אנרגיה	הספק	נגד
$W_R(t) = P_R(t) \cdot t$	$P_R(t) = I_R^2(t) \cdot R$	נגד
$W_C(t) = \frac{1}{2} C V_C^2(t)$	$P_C(t) = \frac{d}{dt} W_C(t) = \frac{1}{2} C V_C(t) \frac{dV_C}{dt}$	קבל
$W_L(t) = \frac{1}{2} L I_L^2(t)$	$P_L(t) = \frac{d}{dt} W(t) = L I_L(t) \frac{dI_L}{dt}$	סליל

**הערות:**

(1) אם בזמן  $t = 0$  ידוע כי היה על הקבל מתח מסוים אז:  $W_C(t) = \frac{1}{2} C (V_C^2(t) - V_C^2(0))$   
מכיוון ש-  $V_C(0) \neq 0V$ .

(2) אם בזמן  $t = 0$  ידוע כי היה על הקבל מתח מסוים אז:  $W_L(t) = \frac{1}{2} L (I_L^2(t) - I_L^2(0))$   
מכיוון ש-  $I_L(0) \neq 0A$ .

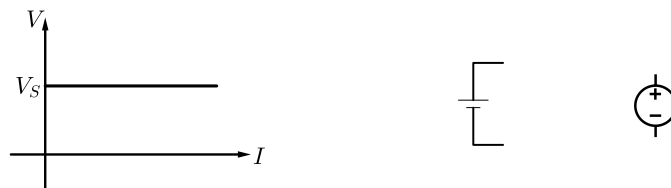
**מקורות אנרגיה:**

מקורות אנרגיה הם רכיבים אשר מספקים אנרגיה חשמלית/מגנטית למעגל.  
ניתן לחלק את מקורות האנרגיה לשני סוגים:

- מקורות בלתי תלויים.
- מקורות תלויים.

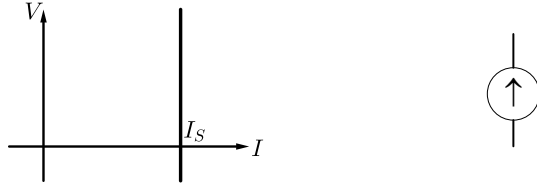
**(1) מקור מתח בלתי תלוי אידיאלי:**

רכיב חשמלי המספק מתח חשמלי נתון וקבוע למעגל ללא תלות בזרם העובר דרכו.  
להלן הסמל החשמלי והאופיין החשמלי:



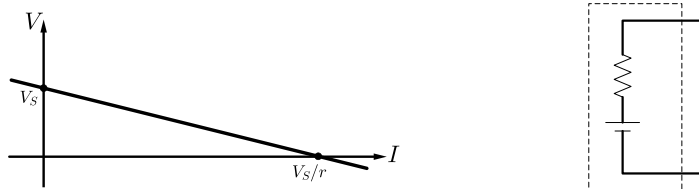
**(2) מקור זרם בלתי תלוי אידיאלי:**

רכיב חשמלי המספק זרם חשמלי נתון וקבוע למעגל ללא תלות במתח הנופל עליו. להלן הסמל החשמלי והאופיין החשמלי:



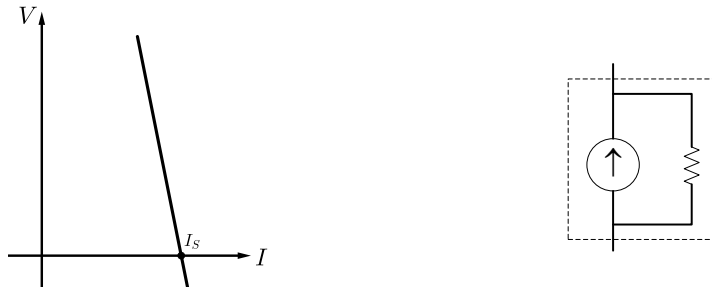
**(3) מקור מתח בלתי תלוי מעשי:**

מקור מתח מעשי מורכב מחומרים כימיים אשר מתחממים ומהווים התנגדות פנימית של הרכיב. נסמן את ההתנגדות הפנימית ב- $r$  ונקבל את הסכמה החשמלית והאופיין הבאים:



**(4) מקור זרם בלתי תלוי מעשי:**

בדומה למקור מתח, גם מקור זרם מעשי מורכב מחומרים כימיים אשר מהווים התנגדות פנימית של הרכיב. נסמן את ההתנגדות הפנימית ב- $r$  ונקבל את הסכמה החשמלית והאופיין הבאים:



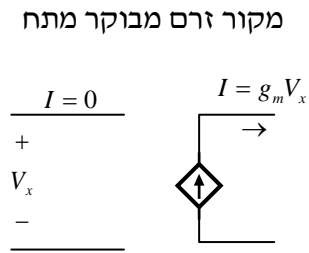
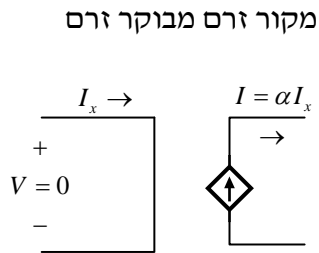
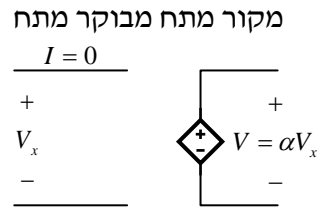
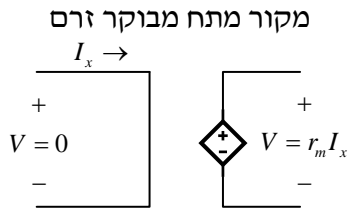
**מקורות תלויים (מבוקרים):**

מקורות תלויים הינם מקורות אנרגיה אשר המתח או הזרם המסופק על-ידם תלוי בערכי מתח וזרם ממקום אחר במעגל. הסמלים החשמליים של מקורות אלו הם:





ישנם 4 סוגים של מקורות תלויים:



הגדרות במעגלים חשמליים – טופולוגיות של מעגל:

מונח	הגדרה
צומת	נקודת מפגש בין שלושה אלמנטים חשמליים שונים או יותר
ענף	קטע המחבר בין שני צמתים ומכיל אלמנט חשמלי אחד לפחות
לולאה	מסלול סגור היוצא ומסתיים באותה הנקודה

הערה:

צומת הכולל מפגש של שני אלמנטים חשמליים נקרא 'צומת מנוון'. ברוב המקרים, לא נייחס חשיבות לצומת שכזה ולא נספור אותו במניין הצמתים שבמעגל מסוים.

חוקי קירכהוף:

(1) חוק הזרמים של קירכהוף (KCL - Kirchhoff Current Law):

סכום הזרמים הנכנסים וצומת ויוצאים ממנה שווה לאפס:

$$\sum_{n=1}^N i_n = 0 \Rightarrow \sum i_{in} = \sum i_{out}$$

(2) חוק המתחים של קירכהוף (KVL - Kirchhoff Voltage Law):

סכום המתחים על פני לולאה סגורה שווה לאפס:

$$\sum_{n=1}^N v_n = 0$$

### הספקים חשמליים של מקורות אנרגיה:

כאשר עוסקים בהספקים ממקורות אנרגיה נגדיר:

ספק – מקור אנרגיה שנותן אנרגיה למעגל (מתקבל הספק חיובי).

צרכן – מקור אנרגיה שצורך/לוקח אנרגיה מהמעגל (מתקבל הספק שלילי).

- אם הזרם הולך עם כיוון המתח (חצים באותו כיוון) אז הספק המקור יחושב כגודל חיובי והמקור הוא ספק.
- אם הזרם הולך נגד כיוון המתח (ראש בראש) אז הספק המקור יחושב כגודל שלילי והמקור הוא צרכן.

### הספקים ונצילות במעגל:

במעגלים חשמליים עם נגדים בלבד, נוכל לנסח את הכלל באופן הבא (מאזן הספקים):

$$\sum P (\text{נגדים}) = \sum P (\text{מקורות})$$

נצילות מוגדרת בתור היחס שבין האנרגיה המנוצלת במערכת,  $E_{\text{Consumer}}$ ,

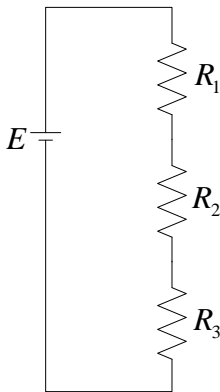
לבין האנרגיה המושקעת בה,  $E_{\text{Total}}$  כך:  $\eta = \frac{E_{\text{Consumer}}}{E_{\text{Total}}}$ .

בפועל, נחשב נצילות ברוב המקרים ע"י יחס ההספקים במעגל (הספק הצרכן ביחס

להספק המקורות):  $\eta = \frac{P_{\text{Load}}}{P_{\text{Sources}}}$ . הנצילות היא גודל שברי חסר יחידות.

### ❖ דוגמא - מבנה מעגל חשמלי יסודי וסימונים:

במעגל שלפניך נתון:  $E = 12V$ ,  $R_1 = 3\Omega$ ,  $R_2 = 4\Omega$ ,  $R_3 = 5\Omega$



א. מצא את הזרם במעגל.

ב. מצא את ערכי הפוטנציאל החשמלי בין כל הנגדים ואת המתח על פני  $R_2$ .

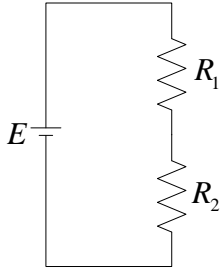
ג. מה הוא הספק הכניסה למעגל?

ד. מה הם ההספקים המתפזרים על כל נגד?

ה. מה היא נצילות המעגל בהנחה שהנגד  $R_2$  הוא העומס?

שאלות:

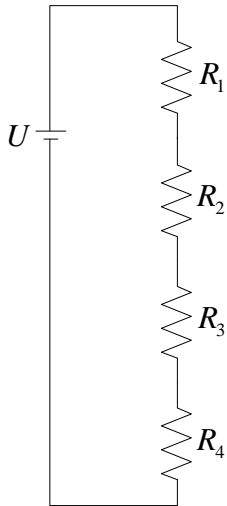
(1) לפניך המעגל הבא :



נתון:  $R_1 = 3k\Omega$ ,  $R_2 = 4k\Omega$ ,  $E = 7V$ .

- א. מהי ההתנגדות השקולה של המעגל?
- ב. מצא את הזרם במעגל.
- ג. חשב את מפל המתח שעל פני כל נגד.
- ד. מה הוא ההספק של כל נגד?
- ה. בהנחה שהנגד  $R_1$  הוא העומס במעגל, מהי נצילות המעגל?

(2) לפניך המעגל הבא :



נתון:  $R_1 = R$ ,  $R_2 = 2R$ ,  $R_3 = 4R$ ,  $R_4 = 9R$ .

הזרם במעגל הוא 2A.

- א. הבע באמצעות  $R$  את הגדלים הבאים:
  - i. ההתנגדות השקולה של המעגל.
  - ii. המתח של מקור המתח.
  - iii. מפל המתח שעל פני כל נגד במעגל.
- ב. הראה כי נצילות המעגל כאשר הנגד  $R_3$  הוא העומס היא 25%.
- ג. מצא את  $R$  אם ידוע כי מאזן ההספק הוא 160kW.

(3) עומס חשמלי מחובר למקור אנרגיה של זרם ישר.

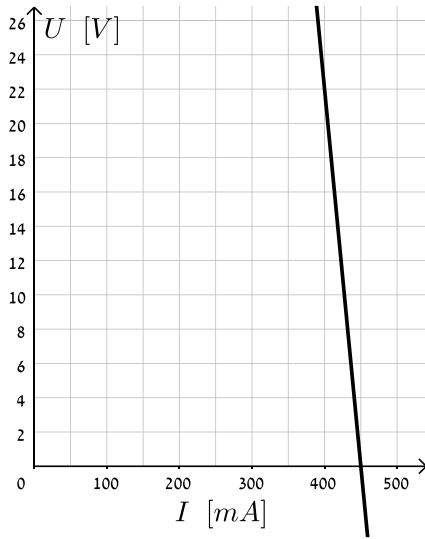
קו העבודה של העומס החשמלי

וקו העבודה של מקור האנרגיה מופיעים

בסרטוט הבא :

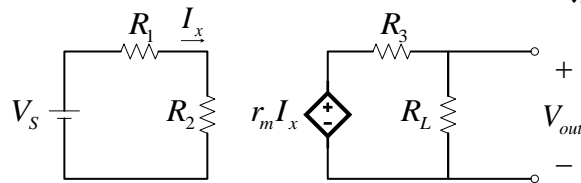


- א. מה התנגדות העומס בנקודת העבודה המשותפת למקור ולעומס?
- ב. מה הספק העומס בנקודת העבודה הזאת?
- ג. מה ההתנגדות הפנימית של מקור האנרגיה בנקודת העבודה הזאת?
- ד. מהי נצילות העברת האנרגיה מהמקור לעומס?

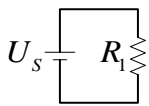


- 4) לפי גרף של מקור זרם מעשי:
- מה היא ההתנגדות הפנימית של מקור הזרם?
  - מה הזרם המקסימלי שיכול המקור לספק?
  - איזה מתח יהיה על מקור הזרם כאשר יספק זרם של  $0.2A$ ?

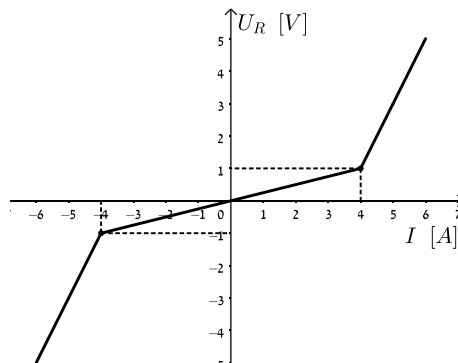
5) לפי המעגל הבא.



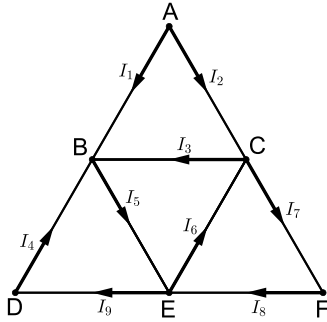
- הבע את מתח המוצא  $V_{out}$  באמצעות הגדלים שבסכמה החשמלית.
- המעגל משמש כחוצץ מתח, כלומר, מתח המוצא צריך להיות שווה למתח הכניסה אך ללא אפשרות של מעבר זרם בין שני חלקי המעגל. מצא תנאי על  $r_m$  אשר יבטיח זאת.



- 6) נתון המעגל הבא ובו:  $U_S = 12V$  ו-  $R_1 = [\cos(\pi t) + 2] \Omega$ .
- מצא ביטוי אנליטי עבור הזרם במעגל.
  - מצא ביטוי אנליטי עבור הזרם במעגל אם כעת הנגד  $R_1$  מקיים את האופיין הבא:



- ג. מצא ביטוי אנליטי עבור הזרם במעגל אם כעת הנגד מתנהג עפ"י האופיין שמתואר בסעיף ב' ומקור המתח הוא:  $U_s = 12 \sin(\pi t)$  V. האם ניתן להגדיר את הזרם במעגל בכל זמן? נמק. מצא את  $U_0$  בביטוי  $U_s = U_0 \sin(\pi t)$  V עבורו הזרם יהיה מוגדר לכל זמן.



7) נתון המעגל הבא בו בכל ענף יש אלמנט חשמלי כלשהו.

כיווני הזרמים בכל ענף מסומנים ב-  $I_1$  עד  $I_9$ .

א. נתון:  $I_1 = 3A$ ,  $I_3 = 8A$ ,  $I_5 = 6A$ .

מצא את שאר הזרמים.

במידה וחסרים נתונים ציין מה הם.

ב. ללא קשר לסעיף הקודם, כעת נתון:

$U_1 = 7V$ ,  $U_3 = 4V$ ,  $U_5 = 5V$ ,  $U_9 = -2V$

מצא את שאר המתחים.

שים לב – כיווני המתחים הם בהתאם לכיווני הזרמים

(ראש חץ המתח יימצא בתחילת חץ הזרם).

במידה וחסרים נתונים ציין מה הם.

**תשובות סופיות:**

- (1) א.  $R_T = 7\text{k}\Omega$       ב.  $1\text{mA}$       ג.  $U_{R_1} = 3\text{V}, U_{R_2} = 4\text{V}$       ד.  $P_{R_1} = 3\text{W}, P_{R_2} = 4\text{W}$       ה.  $42.82\%$
- (2) א. i.  $16R$       ii.  $32R$       iii.  $U_{R_1} = 2R, U_{R_2} = 4R, U_{R_3} = 8R, U_{R_4} = 18R$       ג.  $R = 2.5\text{k}\Omega$
- (3) א.  $3.25\Omega$       ב.  $208\text{W}$       ג.  $0.25\Omega$       ד.  $92.8\%$
- (4) א.  $440\Omega$       ב.  $450\text{mA}$       ג.  $110\text{V}$
- (5) א.  $V_{out} = \frac{R_L}{R_3 + R_L} \frac{r_m}{R_1 + R_2} V_s$       ב.  $r_m = \frac{(R_3 + R_L)(R_1 + R_2)}{R_L}$
- (6) א.  $I = \frac{12}{\cos(\pi t) + 2} [\text{A}]$       ב.  $I = 6\text{A}$
- ג. נקבל:  $I = \begin{cases} 48 \sin(\pi t) & -0.026 + k < t < 0.026 + k \\ 6 \sin(\pi t) & 0.232 + k < t < 0.767 + k \\ \text{Undefined} & \text{else} \end{cases}, k \in \mathbb{Z}$
- יש לדרוש  $0 < U_0 < 1$  ואז נקבל:  $I = 4U_0 \sin(\pi t)$
- (7) א.  $I_2 = -3\text{A}, I_4 = -5\text{A}, I_6 = I_7 + 11, I_8 = I_7, I_9 = -5\text{A}$       ב.  $U_2 = U_4 = -3\text{V}, U_6 = -9\text{V}, U_7 + U_8 = 9\text{V}$
- יש לקבל את אחד מהזרמים  $I_6, I_7$  או  $I_8$  מאחר והם תלויים.
- יש לקבל את אחד מהמתחים  $U_7, U_8$  כדי שיהיה פתרון יחיד.