

תוכן העניינים:

3	פרק 7
3	מעגלי זרם חילופין:
3	סרטון – חשבון עם מספרים מרוכבים:
3	הגדרת המספר המרוכב:
3	ארבע פעולות חשבון עם מספרים מרוכבים:
4	תכונות של מספרים צמודים:
4	מחזוריות של מספר מרוכב:
4	מישור גאוס והצגה פולרית:
5	ארבע פעולות חשבון עם מספרים הנתונים בהצגה פולרית:
6	תרגילים:
8	תשובות סופיות:
9	סרטון – מעגלי זרם חילופין:
9	הגדרה:
9	עכבה חשמלית:
10	תרגילים:
14	תשובות סופיות:
15	סרטון – דיאגרמה פאזורית:
15	הגדרה כללית:
16	תרגילים:
19	תשובות סופיות:
21	סרטון – הספקים במעגלי זרם חילופין:
21	הספק ממוצע:
21	הספק מרוכב:
22	גורם ההספק:
24	העברת הספק מקסימלי ותנאים לעומס ממשי טהור:
25	תרגילים:
30	תשובות סופיות:
31	סרטון – משפטי הרשת במעגלי זרם חילופין:
31	האדמיטנס:
32	חיבורי עכבות:
32	המרת עכבה טורית למקבילית:
32	המרת כוכב משולש:
33	המרת מקור מתח חילופין למקור זרם חילופין:
33	מחלק מתח ומחלק זרם:

33 גשר וינסטון :
34 חוקי קירכהוף ושיטות מתחי הצמתים וזרמי החוגים :
34 נוסחת מילמן :
34 שקולי תבנין ונורטון :
34 שיטת ההרכבה (סופרפוזיציה) :
35 תרגילים :
38 תשובות סופיות :
39 סרטון – מעגלי תהודה :
39 מעגל תהודה טורי :
40 מעגל תהודה מקבילי :
41 מעגל תהודה מקבילי מעשי :
41 מעגלי תהודה מעורבים :
42 תרגילים :
46 תשובות סופיות :

פרק 7

מעגלי זרם חילופין:

סרטון – חשבון עם מספרים מרוכבים:

הגדרת המספר המרוכב:

מספר מרוכב z בנוי באופן הבא: $z = a + bj$

כאשר a, b הם מספרים ממשיים ו- $j = \sqrt{-1}$ הנקרא מספר מדומה.

a נקרא החלק הממשי של z ויסומן: $\text{Re}\{z\} = a$

b נקרא החלק המדומה של z ויסומן: $\text{Im}\{z\} = b$.

מספר ללא חלק מדומה יקרא ממשי טהור ומספר ללא חלק ממשי יקרא מדומה טהור.

המספר הצמוד:

המספר הצמוד ל- $z = a + bj$ הוא $\bar{z} = a - bj$.

ארבע פעולות חשבון עם מספרים מרוכבים:

נתייחס לשני מספרים: $z_1 = a + bj$, $z_2 = c + dj$.

1. חיבור יתבצע ע"י חיבור החלקים הממשיים של שני המספרים וחיבור החלקים

המדומים של שני המספרים באופן הבא: $z_1 + z_2 = (a+c) + (b+d)j$.

2. חיסור יתבצע ע"י חיסור החלקים הממשיים של שני המספרים וחסור החלקים

המדומים של שני המספרים באופן הבא: $z_1 - z_2 = (a-c) + (b-d)j$.

3. כפל יתבצע ע"י פתיחת סוגריים: $z_1 \cdot z_2 = (a+bj)(c+dj) = ac - bd + (bc + ad)j$.

4. חילוק יתבצע ע"י כפל במספר הצמוד של המכנה באופן הבא:

$$\frac{z_2}{z_1} = \frac{z_2}{z_1} \cdot \frac{\bar{z}_1}{\bar{z}_1} = \frac{c+dj}{a+bj} \frac{a-bj}{a-bj} = \frac{(c+dj)(a-bj)}{a^2+b^2} = \frac{ac+bd+(ad-bc)j}{a^2+b^2} = \frac{ac+bd}{a^2+b^2} + j \frac{ad-bc}{a^2+b^2}$$

תכונות של מספרים צמודים:

1. סכום מספרים צמודים הוא ממשי טהור:

$$z + \bar{z} = a + bj + a - bj = 2a = 2\operatorname{Re}\{z\}$$
2. הפרש מספרים צמודים הוא מדומה טהור:

$$z - \bar{z} = a + bj - a + bj = 2bj = 2\operatorname{Im}\{z\}$$
3. מכפלת מספרים צמודים היא ממשית טהורה:

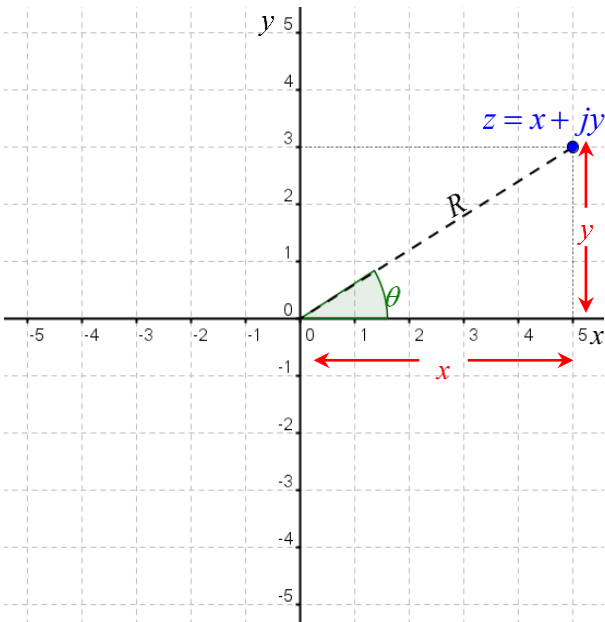
$$z \cdot \bar{z} = (a + bj)(a - bj) = a^2 + b^2$$

מחזוריות של מספר מרוכב:

ההתנהגות המחזורית של j היא: $j^0 = 1, j^1 = j, j^2 = -1, j^3 = -j$.
 באופן כללי נאמר כי עבור n מתקיים: $j^{4n} = 1, j^{4n+1} = j, j^{4n+2} = -1, j^{4n+3} = -j$.

מישור גאוס והצגה פולרית:

נציג מספר מרוכב: $z = x + jy$ במערכת צירים שבה: $x = \operatorname{Re}\{z\}, y = \operatorname{Im}\{z\}$.



נוסחאות מעבר:

מעבר מהצגה קרטזית להצגה פולרית:

$$R = \sqrt{|z|^2} = \sqrt{z \cdot \bar{z}} = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{y}{x}$$

מעבר מהצגה פולרית להצגה קרטזית:

$$x = R \cos \theta, \quad y = R \sin \theta$$

ארבע פעולות חשבון עם מספרים הנתונים בהצגה פולרית:

נרשום מספר מרוכב בכל אחת מהצורות הבאות: $z = x + yj = R \operatorname{cis} \theta = R \angle \theta$

כאשר: $\cos \theta + j \sin \theta = \operatorname{cis} \theta$.

נתייחס לשני המספרים הבאים: $z_1 = r_1 \cdot \operatorname{cis} \theta_1$, $z_2 = r_2 \cdot \operatorname{cis} \theta_2$

1. מכפלתם תחושב: $z_1 z_2 = r_1 \cdot r_2 \cdot \operatorname{cis}(\theta_1 + \theta_2) = r_1 \cdot r_2 \angle (\theta_1 + \theta_2)$

2. מנתם תחושב: $\frac{z_1}{z_2} = \frac{r_1}{r_2} \operatorname{cis}(\theta_1 - \theta_2) = \frac{r_1}{r_2} \angle (\theta_1 - \theta_2)$

3. העלאה בחזקת n תתבצע: $(z_1)^n = r_1^n \cdot \operatorname{cis}(n\theta_1) = r_1^n \angle n\theta_1$

4. הוצאת שורש מסדר n -י תתבצע: $\sqrt[n]{z_1} = z_1^{\frac{1}{n}} = r_1^{\frac{1}{n}} \cdot \operatorname{cis}\left(\frac{\theta_1}{n}\right) = r_1^{\frac{1}{n}} \angle \frac{\theta_1}{n}$

תרגילים:

(1) נתונים שני המספרים המרוכבים הבאים: $z_1 = 4 + 2j$, $z_2 = -5 + j$.

א. מצא את הגדלים הבאים: $z_1 + z_2$, $z_1 - z_2$, $z_1 \cdot z_2$.

ב. מצא את הגדלים הבאים: $3z_1 - 2j \cdot z_2$, $-4z_1 + (j-1)z_2$.

ג. כתוב את המספרים הצמודים: \bar{z}_1 , \bar{z}_2 .

ד. חשב את תוצאות החילוק הבאות: $\frac{z_1}{z_2}$, $\frac{\bar{z}_2}{z_1 + 3z_2}$, $z_1 \parallel z_2$.

ה. חשב את הגודל הבא: $z_2^2 - \bar{z}_1^2$.

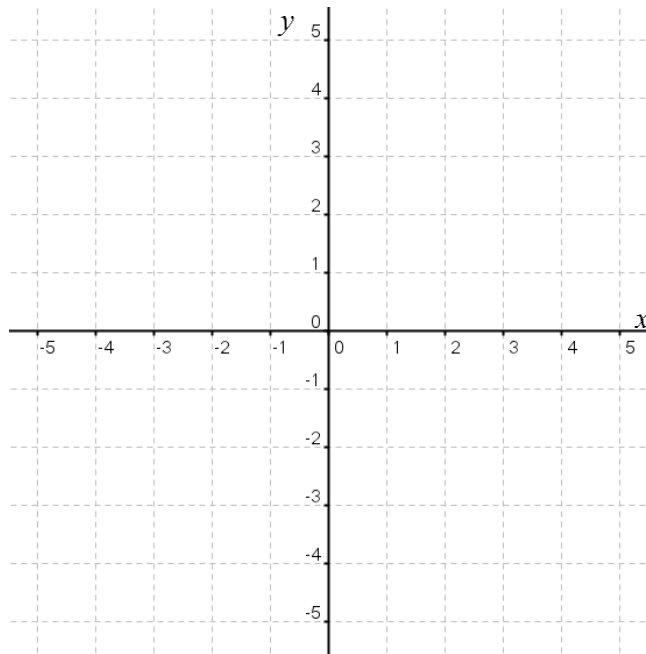
(2) פתור את המשוואה הריבועית הבאה: $z^2 + 2z + 10 = 0$ (z מרוכב).

(3) לפניך מספרים מרוכבים הנתונים בהצגה קרטזית.

$$z_1 = 3 + 4j, z_2 = -4 - j, z_3 = \frac{1}{\sqrt{2}}(j+3), z_4 = -2j$$

א. צייר אותם על מישור גאוס.

ב. מצא את הצגתם הפולרית.



(4) העבר את המספרים המרוכבים הבאים להצגתם הקרטזית:

$$z_1 = 4\text{cis}30^\circ, z_2 = 5\text{cis}(-45^\circ), z_3 = 12\text{cis}\frac{\pi}{3}, z_4 = \frac{1}{2}\text{cis}\frac{\pi}{2}, z_5 = 16\text{cis}390^\circ$$

(5) נתונים המספרים הבאים: $z_1 = 311 \angle 30^\circ$, $z_2 = 110 \angle -45^\circ$.

א. מהי תוצאת המכפלה: $z_1 \cdot z_2$?

ב. מהי תוצאת המנה: $\frac{z_1}{z_2}$?

ג. חשב את הגדלים הבאים: $(z_1)^5$, $(z_2)^8$.

ד. חשב את הגודל הבא: $\sqrt[3]{z_1} - \sqrt[3]{z_2}$.

(6) נתונים המספרים המרוכבים הבאים: $z_1 = 3 + yj$, $z_2 = 12 - 5j$, y משתנה.

א. מצא את y עבורו מתקיים: $|z_1| = |z_2|$.

ב. מצא את y עבורו מתקיים: $\arg(z_1) = \arg(z_2)$.

ג. מצא את y עבורו המכפלה $z_1 \cdot z_2$ היא מספר מרוכב עם פאזה של 45° .

ד. נתון גם: $z_3 = \frac{1}{2x} + (y^2 + 1)j$, x, y משתנים.

מצא את x, y עבורם מתקיים: $z_1 + z_2 = z_3$.

(7) נתון המספר המרוכב: $z = R \angle \theta$.

הוכח את הטענות הבאות:

א. המספר \bar{z} הוא בעל אותו הגודל וזווית הפוכה בסימן ביחס ל- z .

ב. המספר $\frac{1}{z}$ הוא בעל אותה הפאזה כמו \bar{z} .

ג. המספר z^n יהיה ממשי או מדומה טהור לכל n רק אם: $\theta = 90^\circ k$ כאשר k טבעי.

ד. המשוואה: $\frac{1}{(\bar{z})^2} \cdot z_2 = z$ נכונה רק אם: $\arg\{z_2\} = -\theta$, $|z_2| = R^3$.

(8) הראה את קיום הטענות הבאות:

א. עבור שני מספרים: $z_1 = z_2 = R + jX$ מקבלים: $z_1 \parallel z_2 = \frac{1}{2}(R + jX)$.

ב. מגדירים את המספר z_T השווה למכפלת N המספרים: $z_k = R_k \angle \theta_k$, $1 \leq k \leq N$.

הראה כי: $\theta_T = \arg(z_T) = \sum_{k=1}^N \theta_k$.

ג. נתונים N המספרים: $z_k = R_k \angle \theta_k$, $1 \leq k \leq N$.

ו- M המספרים: $y_m = r_m \angle \varphi_m$, $1 \leq m \leq M$.

מגדירים: $z_T = \frac{z_1 \cdot z_2 \cdot \dots \cdot z_N}{y_1 \cdot y_2 \cdot \dots \cdot y_M}$. הראה כי: $\theta_T = \arg(z_T) = \sum_{k=1}^N \theta_k - \sum_{m=1}^M \varphi_m$.

תשובות סופיות:

א. $z_1 + z_2 = -1 + 3j$; $z_1 - z_2 = 9 + j$; $z_1 \cdot z_2 = -22 - 6j$ (1)

ב. $3z_1 - 2jz_2 = 14 + 16j$; $-4z_1 + (j-1)z_2 = -12 - 14j$

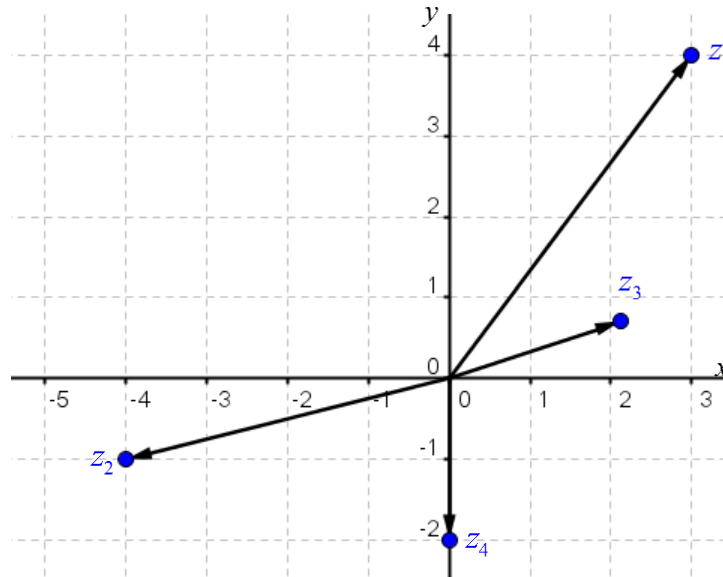
ג. $\bar{z}_1 = 4 - 2j$; $\bar{z}_2 = -5 - j$

ד. $\frac{z_1}{z_2} = -\frac{9}{13} - \frac{7}{13}j$; $\frac{\bar{z}_2}{z_1 + 3z_2} = \frac{25}{73} + \frac{18}{73}j$; $z_1 \parallel z_2 = \frac{2}{5} + 7\frac{1}{5}j$

ה. $z_2^2 - \bar{z}_1^2 = 12 + 6j$

ו. $z_{1,2} = -1 \pm 3j$ (2)

א. (3)



ב. $z_1 = 5\text{cis}53.13^\circ$; $z_2 = \sqrt{17}\text{cis}194.03^\circ$; $z_3 = \sqrt{5}\text{cis}18.43^\circ$; $z_4 = 2\text{cis}270^\circ$

ג. $z_1 = 2\sqrt{3} + 2j$, $z_2 = \frac{5}{\sqrt{2}} - \frac{5}{\sqrt{2}}j$, $z_3 = 6 + 6\sqrt{3}j$, $z_4 = \frac{1}{2}j$, $z_5 = 8\sqrt{3} + 8j$ (4)

א. $z_1 \cdot z_2 = 34210 \angle -15^\circ$ (5)

ב. $\frac{z_1}{z_2} = 2.827 \angle 75^\circ$

ג. $(z_2)^8 = 110^8$, $(z_1)^5 = 311^5 \angle 150^\circ$, ד. $\sqrt[3]{z_1} - \sqrt[3]{\bar{z}_2} = 2.044 - 0.064j$

ב. $y = -1.25$

א. $y = \pm\sqrt{160}$ (6)

ד. אין פתרונות.

ג. $y = 7\frac{2}{7}$

סרטון – מעגלי זרם חילופין:

הגדרה:

מעגל שבו קיים מקור חשמלי אחד או יותר אשר מספקים זרם או מתח סינוסים נקרא **מעגל זרם חילופין**.



הסימון של מקור מתח הוא באופן הבא:
התבנית של מקור מתח היא: $U(t) = U_m \sin(\omega t + \theta)$.



הסימון של מקור זרם הוא באופן הבא:
התבנית של מקור זרם היא: $I(t) = I_m \sin(\omega t + \theta)$.

עכבה חשמלית:

עכבה חשמלית (אימפדנס חשמלי) היא ההתנגדות הכוללת של מעגל חשמלי שבו זורם זרם חילופין. העכבה החשמלית נמדדת ביחידות של אוהם (Ω).

את העכבה מסמנים: $Z = R + jX$.

R נקרא **החלק ההתנגדתי** ומייצג את ההתנגדות האוהמית.

X נקרא **החלק הריאקטיבי (Reactive)** ומייצג את היגב העכבה (הריאקטנס - Reactance).

עכבות של נגד, קבל וסליל:

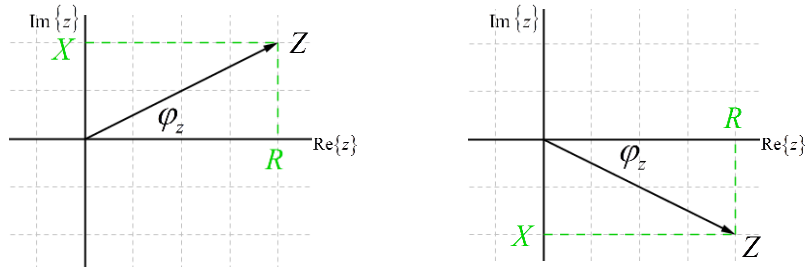
רכיב חשמלי	עכבה Z (אימפדנס)	היגב X (ריאקטנס)
נגד	R	0
קבל	$-j \frac{1}{\omega C}$	$-\frac{1}{\omega C}$
סליל	$j\omega L$	ωL

תכונות:

1. בנגד המתח והזרם הם בעלי אותה הפאזה, כלומר אין ביניהם הפרש פאזה כלל.
2. בקבל הזרם מקדים את המתח ב- 90° .
3. בסליל המתח מקדים את הזרם ב- 90° .

סרטוט עכבות (משולש עכבות) וקביעת אופי המעגל:

נתייחס לעכבה כאל מספר הנמצא במישור גאוס באופן הבא:



נסמן ב- φ_z את הזווית של העכבה ונאמר:

1. עבור: $0^\circ < \varphi_z < 90^\circ$ לעכבה (ולמעגל) יש אופי השראותי.
2. עבור: $-90^\circ < \varphi_z < 0^\circ$ לעכבה (ולמעגל) יש אופי קיבולי.

נוסחאות למציאת גודל העכבה והזווית: $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$, $\varphi_z = \tan^{-1}\left(\frac{X}{R}\right)$

תרגילים:

1) נתון מקור מתח: $U = 25 \angle 80^\circ v$ במעגל שבו הזרם השקול הוא $I = 14 \angle 15^\circ A$.
תדר מקור המתח הוא $50 Hz$.

- א. רשום את משוואות הערך הרגעי של מקור המתח והזרם במעגל.
- ב. חשב את העכבה הכללית של המעגל וציין איזה אופי יש לעכבה.

2) במעגל חשמלי שבו מקור מתח חילופין, נתון: $U_{eff} = 20v$ ו- $f = 120 Hz$.

ידוע כי לאחר $2 msec$ המתח הנמדד הוא $20v$, ז"א: $U(t = 2 msec) = 20v$.

- א. חשב את זווית המופע של מקור המתח.
- ב. חשב את הזרם בעכבה של $Z = (4 + 5j) \Omega$ המחוברת למקור המתח הנ"ל.
- ג. מהו הפרש המופע במעגל הנתון?

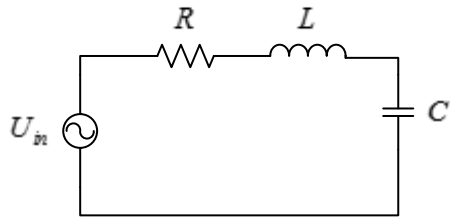
- (3)** מחברים בטור את שני מקורות המתח חילופין הבאים :
 $U_1(t) = \sqrt{800} \cdot \cos(\omega t + 32^\circ) \text{ V}$, $U_2(t) = \sqrt{1250} \cdot \cos(\omega t + 78^\circ) \text{ V}$
 המקורות מחוברים לעכבה Z ובה נמדד זרם : $I = 5 \angle 36.86^\circ \text{ A}$
 א. חשב את מקור המתח השקול.
 ב. חשב את עכבת המעגל.
- (4)** שאלה זו מתמקדת בעכבה מדומה טהורה המורכבת מסליל וקבל בלבד.
 ענה על שני הסעיפים הבאים :
 א. למקור מתח של $U = 24 \angle 45^\circ \text{ V}$ בעל תדירות 50 Hz חובר סליל.
 חשב את ערך השראות הסליל לקבלת זרם של $12 \angle -45^\circ \text{ A}$.
 ב. למקור מתח של $U = 120 \angle 32^\circ \text{ V}$ בעל תדירות 1698.51 Hz חובר קבל.
 חשב את ערך קיבול הקבל לקבלת זרם של $32 \angle 122^\circ \text{ A}$.
- (5)** קבע לגבי כל אחת מהעכבות הנתונות מאיזה רכיבים היא מורכבת וסרטט אותה במישור המרוכב. נתון כי תדר הפעולה הוא 60 Hz .
 א. $Z = (6.5 + 4j) \Omega$
 ב. $Z = (6.5 - 4j) \Omega$
 ג. $Z = -32.2j \Omega$
 ד. $Z = \sqrt{500}j \Omega$
 ה. $Z = 45 \Omega$
- (6)** במעגל בעל מקור מתח $U = 35 \angle 56^\circ \text{ V}$ ותדירות של 4 kHz נמדד זרם של $7 \angle 78^\circ \text{ A}$. חשב את העכבה השקולה של המעגל ופרט את מרכיביה.
- (7)** מחברים נגד של 12Ω בטור לקבל של $27.69 \mu\text{F}$ ומזינים אותם ע"י מקור מתח של $U = 25 \angle 0^\circ \text{ V}$. הזרם שנמדד במעגל הוא $0.962 \angle 62.477^\circ \text{ A}$. מצא את תדר המעגל.
- (8)** במעגל בעל מקור מתח $U = 50 \angle 68^\circ \text{ V}$ ותדירות של 50 Hz נמדד זרם $2 \angle 97^\circ \text{ A}$.
 א. חשב את עכבת המעגל ואת מרכיביה.
 ב. שינו את הקבל בעכבה לערך חדש של $60 \mu\text{F}$.
 לאיזה תדר יש לשנות במעגל על מנת לשמור על עוצמת הזרם הנתונה?

9) לפניך משוואות המתח והזרם הכללי שנמדדו במעגלים שונים :

A : $I(t) = 3 \sin(377t - 10^\circ) A$, $U(t) = 60 \sin(377t + 50^\circ) v$

B : $I(t) = 10 \cos(200t + 25^\circ) A$, $U(t) = 25 \cos\left(200t + \frac{\pi}{9}\right) v$

- קבע עבור כל זוג מי האות המקדים ומי האות המאחר.
- מצא את אופי המעגל בכל אחד מהמקרים.
- חשב את רכיבי העכבה הכללית של המעגל.



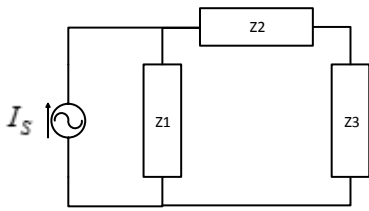
10) לפניך המעגל הבא :

- נתון : $R = 1k\Omega$, $X_L = 5k\Omega$, $X_C = -6k\Omega$
 כמו כן הזרם הוא $10 \angle 0^\circ mA$
 מצא את מתח המקור של המעגל U_{in} .

11) במעגל הבא נתון מקור זרם : $I_S(t) = \sqrt{8} \cos(400t + 30^\circ) A$

ערכי העכבות הם :

$Z_1 = (2 + 2j)\Omega$, $Z_2 = (4 - 4j)\Omega$, $Z_3 = (2 + 7j)\Omega$



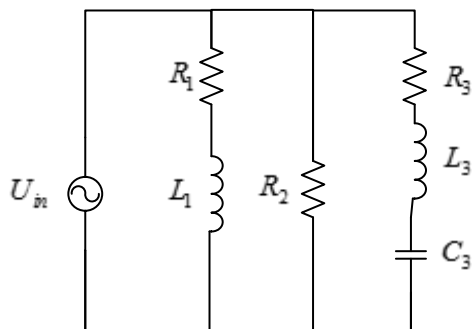
- חשב את הזרמים בכל עכבה.
- חשב את המתח על מקור הזרם.
- צמצם את המעגל לעכבה אחת ופרט את מרכיביה.

12) לפניך המעגל הבא :

נתון כי : $U_{in} = 200 \angle 0^\circ v$, $f = 50 Hz$, $R_1 = 12\Omega$

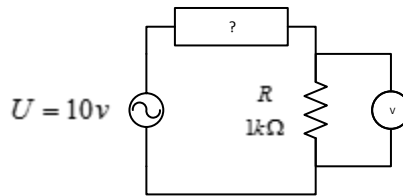
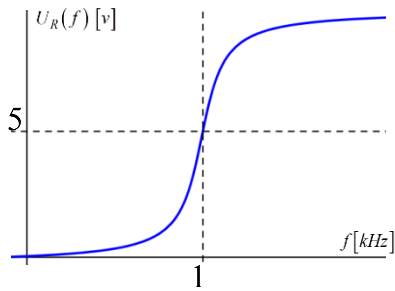
$R_2 = 40\Omega$, $R_3 = 30\Omega$, $L_1 = 51mH$

$L_3 = 95.8mH$, $C_3 = 79.5\mu F$



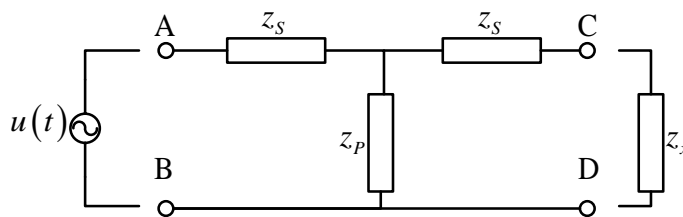
- חשב את העכבה הכללית של המעגל ואת אופי המעגל.
- חשב את הזרם השקול של המעגל.
- חשב את הזרמים בכל ענף במעגל.

13) מקור המתח שבאיור הוא מחולל-אות, המפיק מתח חילופין שעוצמתו קבועה ואת התדר שלו אפשר לשנות בתחום רחב. המלבן המסומן באיור מציין רכיב מסוים שתכונתו החשמלית יכולה להיות התנגדות, השראות או קיבול. אל הרכיב הזה חיברו נגד בטור, ואת שניהם חיברו למקור המתח כמתואר. מד המתח המחובר חיבור מקבילי להדקי הנגד הוא מד-מתח להלכה (מד מתח שהעכבה שלו גדולה מאוד ואינה משפיעה כלל על תוצאות המדידה). בגרף שלפניך מוצגות תוצאות המדידה של מד המתח כתלות בתדר מקור המתח.



- א. מה התכונה החשמלית של הרכיב שבמלבן?
 ב. מה הגודל של התכונה החשמלית?

14) באיור הסמוך נתונה רשת בה A ו-B הם הדקי המבוא, C ו-D הם הדקי המוצא. אות מתח המקור הוא: $u(t) = 50 \sin(100\pi t) \text{ v}$. לאחר שבין הדקי המוצא CD מחברים עכבה z_x מתברר שעכבת המבוא של הרשת, בין ההדקים AB, שווה אף היא ל- z_x .



- א. יש לבטא את z_x באמצעות z_p ו- z_s .
 ב. מסמנים ב- z_0 את עכבת המבוא של הרשת כאשר לא מחובר עומס כלשהו בין הדקי המוצא. מסמנים ב- z_k את עכבת המבוא של הרשת כאשר מחברים מקצר בין הדקי המוצא. יש להוכיח שניתן לבטא את z_x שחושבה בסעיף א' ע"י: $z_x = \sqrt{z_0 z_k}$.
 ג. מהם ערכי מרכיבי העכבה z_x (ההתנגדות והקיבול או ההשראות המחוברים ביניהם בטור) אם נתונים ערכי העכבות: $z_s = 20 \angle 30^\circ \Omega$, $z_p = 40 \angle -60^\circ \Omega$?

תשובות סופיות:

- (1) א. $U(t) = 25 \sin\left(100\pi t + \frac{4\pi}{9}\right) \text{V}$, $I(t) = 14 \sin\left(100\pi t + \frac{\pi}{12}\right) \text{A}$.
 ב. $Z = (0.752 + 1.613j) \Omega$, לעכבה אופי השראותי.
- (2) א. -41.4° . ב. $4.41 \angle -94.54^\circ \text{A}$. ג. 53.14° .
- (3) א. $U_T = 58.64 \angle 57.7^\circ \text{V}$. ב. $Z = (10.96 + 4.172j) \Omega$.
- (4) א. $L = 6.36 \text{mH}$. ב. $C = 24.98 \mu\text{F}$.
- (5) א. $R = 6.5 \Omega$, $L = 10.6 \text{mH}$. ב. $R = 6.5 \Omega$, $C = 633 \mu\text{F}$.
- ג. $C = 82.37 \mu\text{F}$. ד. $L = 59.3 \text{mH}$. ה. $R = 45 \Omega$.
- (6) נגד וקבל בערכים הבאים: $R = 4.639 \Omega$, $C = 21.27 \mu\text{F}$.
- (7) 250Hz .
- (8) א. $R = 21.865 \Omega$, $C = 262 \mu\text{F}$. ב. 218Hz .
- (9) א. A: U מקדים את I , B: I מקדים את U .
 ב. למעגל A אופי השראותי ולמעגל B אופי קיבולי.
 ג. A: $R = 10 \Omega$, $L = 45.94 \text{mH}$; B: $R = 2.49 \Omega$, $C = 22.94 \text{mF}$.
- (10) $U_{in} = 14.14 \angle -45^\circ \text{V}$.
- (11) א. $I_1 = 2 \angle 24.5^\circ \text{A}$, $I_2 = I_3 = 0.852 \angle 43^\circ \text{A}$. ב. $U_S = 5.65 \angle 69.5^\circ \text{V}$.
 ג. $Z_T = (1.54 + 1.27j) \Omega$, מרכיבים: $R = 1.54 \Omega$, $L = 3.2 \text{mH}$.
- (12) א. $Z_T = (9.35 + 3.29j) \Omega$ - למעגל אופי השראותי.
 ב. $I_T = 20.16 \angle -19.37^\circ \text{A}$.
 ג. $I_1 = 10 \angle -53.13^\circ \text{A}$, $I_2 = 5 \text{A}$, $I_3 = 7.06 \angle 18.33^\circ \text{A}$.
- (13) א. קבל . ב. 91.89nF .
- (14) א. $z_x = \sqrt{z_S^2 + 2z_P z_S}$. ב. הוכחה . ג. $C = 564.6 \mu\text{F}$, $R = 40.21 \Omega$.

סרטון – דיאגרמה פאזורית:

הגדרה כללית:

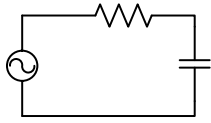
דיאגרמה פאזורית (דיאגרמת מחוגים) מתארת את הגודל והפאזה של כל אחד מהגדלים הרצויים בתוך המישור המרוכב. נסרטט דיאגרמה פאזורית תוך שימוש בקשרים שבין הזרמים והמתחים הנופלים על פני הרכיבים שהכרנו באופן הבא:

יחסים בין זרם למתח	רכיב חשמלי
הזרם והמתח באותה הפאזה	נגד
המתח מקדים את הזרם ב- 90°	סליל
הזרם מקדים את המתח ב- 90°	קבל

חיבור גדלים פאזוריים יתבצע לפי עיקרון החיבור של מספרים מרוכבים. כלומר ערך החיבור: $Y = Y_1 + Y_2$ יניב פאזור שגודלו $|Y| = \sqrt{Y_1^2 + Y_2^2}$ והפאזה

$$\text{שלו היא } \arg(Y) = \tan^{-1} \frac{Y_2}{Y_1}.$$

תרגילים:

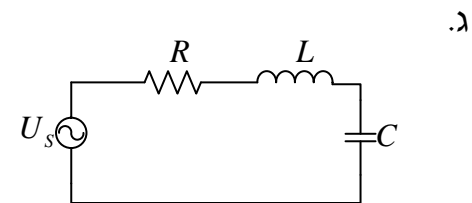
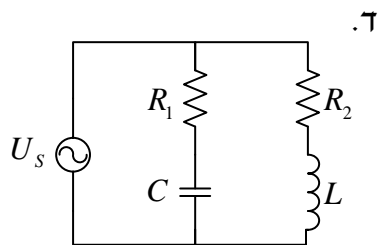
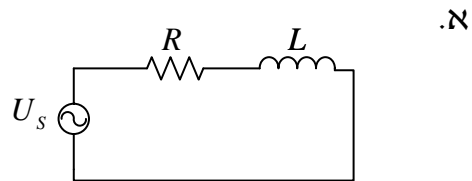
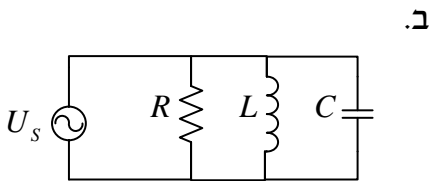


1) בשאלה זו נאמת את החישובים במעגלים פשוטים באמצעות דיאגרמה פאזורית. במעגל הבא ישנו נגד 100Ω וקבל $5\mu F$.

מקור המתח מספק מתח חילופין של $40\angle 0^\circ v$ ועובד בתדירות של $\omega = 1k \frac{\text{rad}}{\text{sec}}$.

- צייר דיאגרמה פאזורית המתארת את כל הזרמים במעגל.
- מצא את הזרם השקול במעגל והיעזר בדיאגרמה שעשית בסעיף א' למציאת הזרמים שעוברים דרך הנגד והקבל.

2) סרטט דיאגרמות פאזוריות איכותיות (ללא חישובים) לכל אחד מהמעגלים הבאים. כלול בדיאגרמות את הזרמים בכל רכיב והתייחס למתח המקור כאל מתח הייחוס.



3) נתונים המתחים הבאים הנמצאים במעגל טורי:

$$U_1(t) = 2\sqrt{2} \sin(100\pi t) v, \quad U_2(t) = 4\sqrt{2} \sin(100\pi t - 30^\circ) v$$

$$U_3(t) = 6\sqrt{2} \sin(100\pi t + 30^\circ) v$$

סרטט את שלושת אותות הכניסה בדיאגרמה פאזורית אחת.

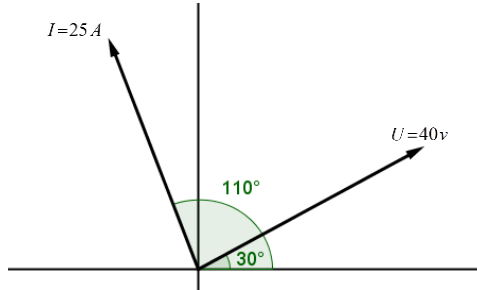
4) נתונים הזרמים הבאים:

$$I_1(t) = 5\sqrt{2} \sin(2t + 45^\circ) A, \quad I_2(t) = 5\sqrt{2} \sin(2t) A, \quad I_3(t) = I_1(t) + I_2(t)$$

א. רשום את משוואת הזרם הרגעי של $I_3(t)$.

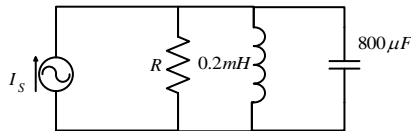
ב. סרטט את דיאגרמת הפאזורים של שלושת הזרמים הנתונים.

5) לפניך דיאגרמת פאזורים של אות מתח וזרם במעגל כלשהו. ידוע כי זמן המחזור של האותות הוא 20msec .



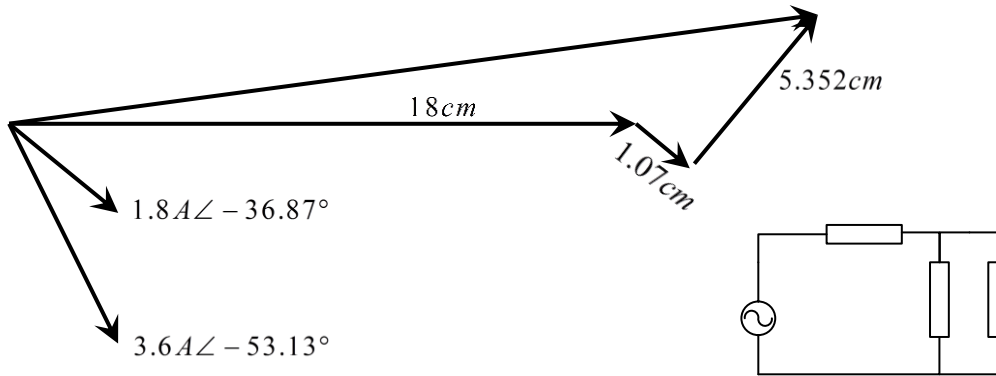
- מהי תדירות האותות ומהי התדירות הזוויתית?
- רשום את התצוגה הפולארית של כל פאזור.
- רשום את המתח והזרם כפונקציה של הזמן כאותות סינוסיים.
- מצא את הערך הרגעי של המתח והזרם לאחר 10msec .
- בהנחה שהאותות מייצגים את המתח והזרם על עכבה מסוימת, חשב את אופי העכבה ואת מרכיביה.

6) לפניך המעגל הבא:

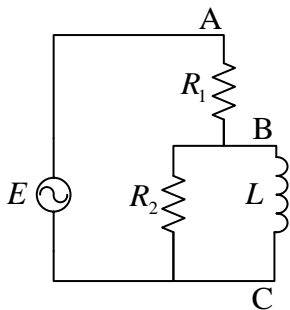


- ידוע כי מקור הזרם מספק זרם חילופין למעגל בתדירות זוויתית של $5k \frac{\text{rad}}{\text{sec}}$.
- קובעים את מתח המקור U_s להיות פאזור הייחוס (כלומר בעל זווית של 0°). מסמנים את הזרמים דרך כל רכיב ב- I_R, I_C, I_L בהתאמה. זרם המקור יסומן ב- I_s .
- היעזר בדיאגרמת זרמים של המעגל ומצא את הערך של הנגד R , עבורו זרם המקור I_s יאחר ביחס לזרם בנגד I_R ב- 45° .

7 שני מכשירים חשמליים ניזונים ממקור מתח חילופין אחד, לפי תרשים החיבורים שבאיור. העכבה שבין מקור המתח למכשירים היא עכבת מעגל הזנה. עוד נתונה דיאגרמת המחוגים של המתחים והזרמים שבמעגל ההזנה של המכשירים. הזווית של כל אחד ממחוגי הזרם של המכשירים נמדדת מהקו האופקי (הקו שמעליו כתוב 18cm). מחוגי המתחים נתונים ביחידות אורך, כאשר 1cm מייצג מתח שגודלו 10v .



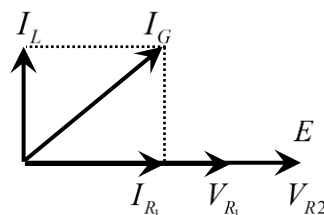
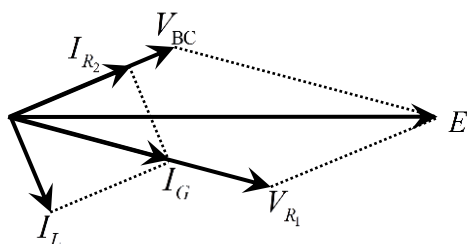
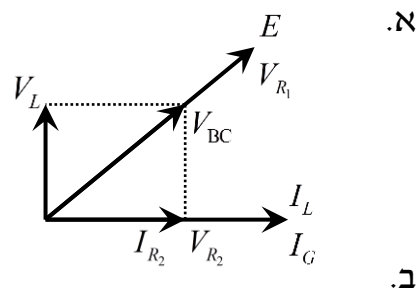
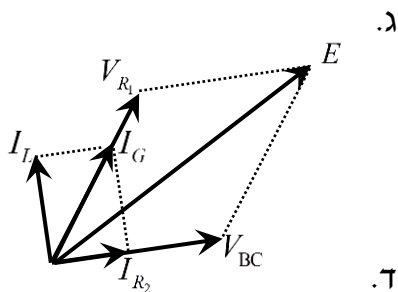
- מהו גודל המתח שבין ההדקים של שני המכשירים?
- מהו נתוני העכבה שבין מקור המתח ושני המכשירים?
- מה הגודל של מתח המקור?



8 לפניך המעגל הבא:

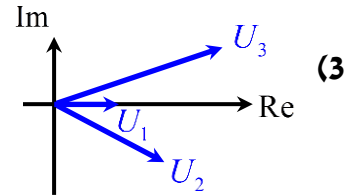
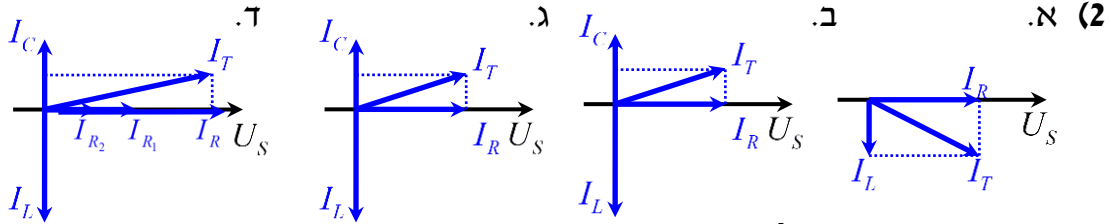
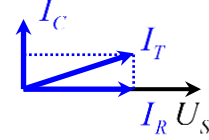
איזו מבין הדיאגרמות הבאות יכולה להתאים לתיאור הזרמים ומפלי המתח שבמעגל? נמק.

(הזרם: I_G הוא סכום הזרמים: $I_{R_2} + I_L$.)



תשובות סופיות:

1 א. $I_T = 178.8 \angle 63.43^\circ \text{mA}$, $I_R = 80 \text{mA}$, $I_C = 160 \text{mA}$. ב.



4 א. $I_3(t) = 5\sqrt{2} \sin(2t + 45^\circ) + 5\sqrt{2} \sin(2t) \text{A}$. ב.

5 א. 50Hz , $\omega = 100\pi \frac{\text{rad}}{\text{sec}}$. ב. $U = 40 \angle 30^\circ \text{V}$, $I = 25 \angle 110^\circ \text{A}$.

ג. $U(t) = 40 \sin\left(100\pi t + \frac{\pi}{6}\right) \text{V}$, $I(t) = 25 \sin\left(110\pi t + \frac{11}{18}\pi\right) \text{A}$.

ד. $U(10 \text{msec}) = -20 \text{V}$, $I(10 \text{msec}) = -23.5 \text{A}$.

ה. $Z = 1.6 \angle -80^\circ \Omega$ אופי קיבולי. $R = 0.27 \Omega$, $C = 2 \text{mF}$.

6 ערך הנגד הוא $\frac{1}{3} \Omega$.

7 א. 180V . ב. $Z = (2 + 10j) \Omega$. ג. $228.53 \angle 7.05^\circ$.

8 דיאגרמה ד. הסבר: 4.

בדיאגרמה א' הזרם I_C באותה הפאזה עם הזרם בסליל L והמתח על R_1 שווה למתח המקור, משתי טענות אלו היא נפסלת.

בדיאגרמה ב' המתח על R_2 שווה למתח המקור (גודל ופאזה) וזה לא ייתכן.

בדיאגרמה ג' סכום מפלי המתח נכון: $V_{R_1} + V_{BC} = E$ וכן סכום הזרמים כל הנגד R_2 והסליל L נכון שכן: $I_{R_2} + I_L = I_G$ אך הזרם בסליל מקדים את הזרם על הנגד וזה לא ייתכן במקרה שלנו (לשניהם אותו מפל מתח, ולכן לזרם על הנגד ביחס אליו אין הפרש פאזה ולסליל יש הפרש פאזה של 90° , כלומר הוא מפגר אחרי הזרם בנגד ב- 90° ולא מקדים אותו).

בדיאגרמה ד' מופיעים הפאזורים המתוקנים ביחס לטעות שציונה במקרה ג'.

סרטון – הספקים במעגלי זרם חילופין:

הספק ממוצע:

חישוב הספק ממוצע במובן RMS עבור מעגל זרם חילופין בעל כניסת מתח מהצורה: $U(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi)$ או כניסת זרם: $I(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ יבוצע:

$$P_{avg} = \frac{U_{RMS}^2}{R} = \frac{U_m^2}{2R}, \quad P_{avg} = I_{RMS}^2 \cdot R = \left(\frac{I_m}{\sqrt{2}}\right)^2 R = \frac{I_m^2 R}{2}$$

הספק מרוכב:

הספק אקטיבי (הספק ממשי):

סך האנרגיה ליחידת זמן שעוברת בכיוון אחד במעגל ולא חוזרת אחורנית, נקרא ההספק הממשי של המעגל או ההספק האקטיבי, יסומן ב-P וימדד ב-watt.

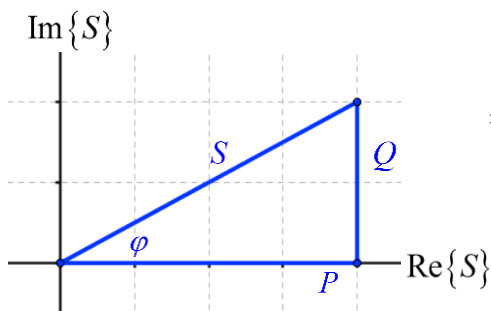
הספק ריאקטיבי (הספק עיוור):

סך האנרגיה ליחידת זמן שעוברת במעגל כתוצאה מאנרגיה האגורה ברכיבים ריאקטיביים, (קבלים וסלילים) וחוזרת חזרה למקור המתח נקרא ההספק הריאקטיבי, יסומן ב-Q ויחידותיו הן VAR (Volt-Ampere-Reactive).

הספק כולל (הספק נראה):

סך ההספק שנכנס למעגל נקרא ההספק הנראה, יסומן ב-S ויחידותיו הן VA (Volt-Ampere).

משולש הספקים:



ניתן להציג את הקשרים שבין ההספקים בצורה גיאומטרית על המישור המרוכב באופן הבא:

הצגת הספק בצורה פאזורית:

כתיבת ההספק הכולל: $S = P + jQ$, כאשר: $\varphi_s = \tan^{-1} \frac{Q}{P}$, $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$,
 וכן: $P = S \cos \varphi$, $Q = S \sin \varphi$.
 תחום הימצאות זווית ההספק הכולל: $-90^\circ \leq \varphi_s \leq 90^\circ$.

חישוב הספק כולל בצורה פאזורית:

נחשב את ההספק הכולל באופן הבא: $S = I_{eff}^* \cdot U_{eff} = |I_{eff}|^2 \cdot z = \frac{|U_{eff}|^2}{z^*}$
 ע"י שימוש בערכי המקסימום: $S = I_{eff}^* \cdot U_{eff} = \frac{I_m^*}{\sqrt{2}} \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2} I_m^* \cdot U_m$
 וכן: $S = |I_{eff}|^2 \cdot z = \frac{1}{2} |I_m|^2 \cdot z$, $S = \frac{|U_{eff}|^2}{z^*} = \frac{1}{2} \frac{|U_m|^2}{z^*}$

גורם ההספק:

הגדרה:

היחס שבין ההספק הממשי להספק הכולל נקרא **גורם ההספק**: $P.F. = \cos \varphi = \frac{P}{S}$.
 גודל זה מתאר את נצילות (ויעילות) המעגל.

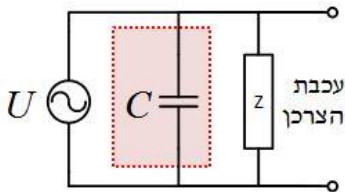
קשר בין פאזות של מתח וזרם:

מתקיים: $\varphi = \varphi_U - \varphi_I$, כאשר: φ_U - פאזת המתח ו- φ_I - פאזת הזרם.
 - עבור: $0^\circ < \varphi < 90^\circ$ המתח מקדים את הזרם ולכן מדובר באופי השראותי.
 - עבור: $-90^\circ < \varphi < 0^\circ$ הזרם מקדים את הזרם ולכן מדובר באופי קיבולי.
 - כאשר: $\varphi = 0^\circ$ המתח והזרם באותה הפאזה (מעגל התנגדותי טהור).
 - כאשר: $\varphi = \pm 90^\circ$ המתח והזרם בהפרש של 90° (מעגל קיבולי/השראותי טהור).

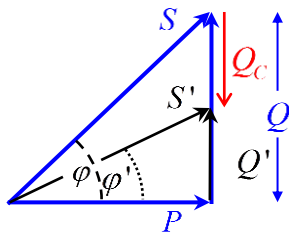
שיטת CIVIL לקביעת היחס שבין זרם ומתח במעגל:

מהות השיטה היא לתאר מי מקדים ומי מאחר (זרם ומתח) בהימצאות קבל וסליל.
מהרישא CIVIL נקבל כי בקבל (מיוצג ע"י C), הזרם (I) מקדים את המתח (V).
מהסיפא CIVIL נקבל כי בסליל (L), המתח (V) מקדים את הזרם (I).

שיפור גורם הספק:



נשפר גורם הספק $\cos \varphi_1$ ל- $\cos \varphi_2$ כאשר: $\cos \varphi_1 < \cos \varphi_2$
ע"י חיבור קבל במקביל לרשת הצרכן באופן הבא:



משולש ההספקים הכולל הוא:

הנוסחאות המרכזיות לקבל הספק הן:

$$Q_c = P(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

$$Q_c = C \cdot \omega \cdot |U|^2$$

$$C = \frac{Q_c}{\omega \cdot |U|^2} = \frac{P(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)}{\omega \cdot |U|^2}$$

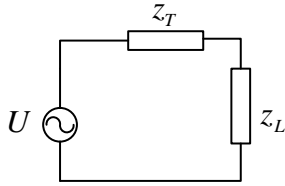
כאשר:

- φ_1 - זווית ההספק לפני השיפור.
- φ_2 - זווית ההספק אחרי השיפור.
- U - מתח המקור (המסופק לצרכן).
- Q_c - הספק ריאקטיבי של הקבל.
- P - הספק ממשי של הצרכן.
- ω - תדירות פעולת המעגל.
- C - ערך קבל ההספק.

העברת הספק מקסימלי ותנאים לעומס ממשי טהור:

עבור מעגל מהצורה להלן, התנאי להעברת הספק מירבי

לעומס הוא: $z_L = z_T^*$.



כאשר נכתוב: $z_T = R_T + jX_T$, $z_L = R_L + jX_L$ נקבל:

$$X_L = -X_T, \quad R_L = \sqrt{R_T^2 + (X_L + X_T)^2}$$

$$P_{\max} = \frac{1}{4} \frac{|U_{T(\text{eff})}|^2}{R_L} = \frac{1}{8} \frac{|U_{T(m)}|^2}{R_L}$$

ההספק המירבי הוא:

מצבים בהם לא מתקיים: $z_L = z_T^*$

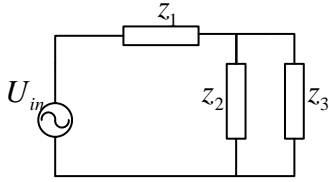
1. עקב הגבלת ערכי הרכיבים R_L ו- X_L .

במקרה זה נבחר את הערך הכי קרוב: $R_L \rightarrow \sqrt{R_T^2 + (X_L + X_T)^2}$, $X_L \rightarrow -X_T$.

2. כאשר לא ניתן לשנות כלל את הפאזה של עכבת העומס ההספק המירבי

יתקיים עבור: $|z_L| = |z_T|$. בפרט עבור עומס ממשי נקבל: $R_L = |z_T|$.

תרגילים:

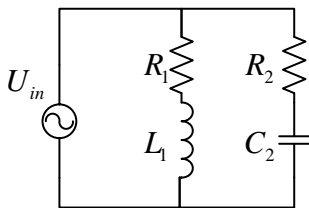


1 במעגל שלפניך נתון:

$$z_1 = (3 + 4j)\Omega, \quad z_2 = (80 + 60j)\Omega$$

$$z_3 = (30 + 40j)\Omega, \quad U_{in} = 120\angle 0^\circ \text{V}$$

- א. חשב את הזרם בכל אחת מהעכבות הני"ל.
ב. חשב וסרטט את משולש ההספקים של המעגל.



2 לפניך המעגל הבא:

$$\text{נתון: } R_1 = 2\Omega, L_1 = 9.55\text{mH}, R_2 = 3\Omega$$

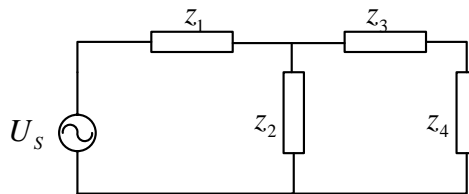
$$C_2 = 530.785\mu\text{F}$$

ידוע כי הזרם בענף ההשראותי הוא: $I_1 = 20.4\angle -56.31^\circ \text{A}$
וכי תדירות המעגל היא 50Hz .

- א. מצא את מקור המתח במעגל.
ב. חשב את שאר הזרמים במעגל.
ג. חשב וסרטט את משולש ההספקים של המעגל.

3 לפניך המעגל הבא:

$$\text{נתון: } U_S = 20\text{V}, \quad z_1 = 40\Omega, \quad z_2 = 60j\Omega, \quad z_3 = -30j\Omega, \quad z_4 = 90j\Omega$$

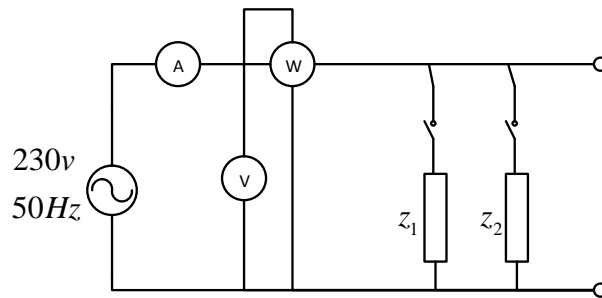


- א. מה הזרם שימדוד מד-זרם המחובר בטור למקור המתח שבאיור?
ב. מה ההספק P (ב- W) של מקור המתח?
ג. מה ההספק ההיגבי Q (ב- var) של המקור?
ד. מה הפרש המופע (במעלות חשמליות) בין המתח שבין הדקי עכבה z_4 למתח המקור?

- 4 ראינו כי את ההספק הנראה מחשבים לפי: $S = |I_{eff}|^2 z$ כאשר: $z = R + jX$.
הוכח כי ניתן לעבור מצורה זו לצורת ההצגה: $S = P + jQ$ ופרט מהם P ו- Q
במונחי R, X ו- I_m .

- 5) עומס חשמלי קבוע שהספקו $4.5kw$ מחובר למקור מתח של $230v$, $50Hz$.
 גודלו של זרם העומס הוא $21.74A$ והוא מפגר אחר אות המתח.
 א. מהו גודל זווית המופע שבין אות הזרם ובין אות המתח שבעומס?
 ב. חשב את גודל ההתנגדות ואת גודל ההיגב המחוברים זה לזה בטור בעכבה השקולה לעומס החשמלי.
 ג. חיברו עומס היגבי במקביל להדקי העומס החשמלי. עכשיו גודלו של הזרם הזורם במקור המתח הוא $20A$ והוא עדיין מפגר אחר אות המתח. חשב את גודל ההיגב ואת אופיו.

- 6) באיור הסמוך מופיע תרשים חיבורים של מעגל למדידת מאפייני צריכת האנרגיה של שני מכשירים (z_2, z_1) . מכשירי המדידה – מד זרם, מד מתח ומד הספק, הם מכשירים להלכה (אידיאליים), מכשירים שתכונותיהם אינן משפיעות על תוצאות המדידה. להלן הנתונים של המכשיר z_1 :
 $230v$; $1250vA$; גורם הספק 0.8 השראותי.

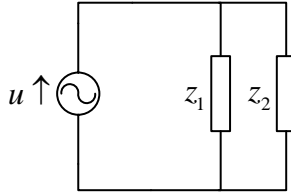


- א. כשהמצב של שני המתגים הוא המצב המתואר באיור, מהי הוריית כל אחד משלושת מכשירי המדידה?
 ב. מהי הוריית כל אחד משלושת מכשירי המדידה כאשר רק המכשיר z_1 מחובר למקור מתח החילופין?
 ג. המכשיר z_2 הוא קבל הספק: $230v$; $500 var$. מה הוריית כל אחד משלושת מכשירי המדידה כאשר שני המכשירים (z_2, z_1) מחוברים למקור המתח?
 ד. שני המכשירים מחוברים ופועלים יחד 5 שעות. כמה אנרגיה תעבור מהמקור אל המכשירים האלה בזמן זה?

7 שני מכשירי חשמל מחוברים למקור מתח חילופין כמתואר באיור.

$$z_1 = (2 + 3j)\Omega, z_2 = (3 - 6j)\Omega$$

ההספק הנדמה (הנראה) של מכשיר 1 הוא 1500VA.



- א. איך שני המכשירים האלה מחוברים זה אל זה? בטור, במקביל, במעורב, בכוכב, במשולש... חובה לנמק את התשובה בקיצור נמרץ!
- ב. מה גודלו של מתח המקור?
- ג. מה הגודל של כל אחד משלושת ההספקים שבמשולש ההספקים של המקור?
- ד. מה אופי ההספק הנדמה של מקור המתח?

8 חיברו סליל מעשי למקור זרם ישר. כשהמתח בין הדקי הסליל היה 15V,

בסליל מדדו זרם של 5A. את אותו סליל חיברו אל מקור זרם חילופין בעל תדר של 50Hz, ומדדו מתח של 65V וזרם של 13A.

- א. על סמך מדידות אלה, מדוע אי אפשר להציג את הסליל באמצעות התנגדות והשראות המחוברות זו לזו במקביל?
- ב. מה ההתנגדות וההשראות המחוברות זו לזו בטור, בענף המייצג את הסליל המעשי?
- ג. מה תהיה תוצאת מדידת זרם החילופין בסליל, אם התדר של המקור הוא 60Hz והמתח שלו הוא 75V?
- ד. הסליל הזה מחובר למקור מתח של 230V ; 50Hz. מה ההספק המרוכב $S = P + jQ$ בסליל?

9 בשאלה זו נפתח את הביטוי למציאת הקבל לשיפור גורם הספק.

- נתון משולש הספקים עם הפרמטרים S, P, Q וזווית φ . מוסיפים קבל C למערכת כך שגורם ההספק גדל מ- $\cos \varphi$ ל- $\cos \varphi'$. מתח המקור נשאר קבוע וערכו U והוא פועל בתדר קבוע שערכו f .
- א. צייר את משולש ההספקים הנוכחי והוסף עליו את הפאזורים של ההספק הריאקטיבי החדש שמתקבל ואת זווית ההספק החדשה.

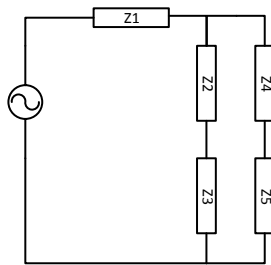
$$\Delta Q = Q - Q' = P(\tan \varphi - \tan \varphi')$$

$$C = \frac{P(\tan \varphi - \tan \varphi')}{U^2 \cdot 2\pi f}$$

10) בשאלה זו נפתח ביטוי המתאר את השיפור בנצילות המערכת עקב שיפור גורם ההספק. נניח מערכת עם עכבה $z = R + jX$ ובה S, P, Q וזווית φ . מוסיפים קבל C למערכת כך שגורם ההספק גדל מ- $\cos \varphi$ ל- $\cos \varphi'$. מתח המקור נשאר קבוע וערכו U והוא פועל בתדר קבוע שערכו f .
א. סרטט דיאגרמה פאזורית, כאשר פאזור הייחוס הוא U , וכלול את הזרמים לפני שיפור גורם ההספק (I) ואחרי השיפור (I').

ב. הראה מהדיאגרמה כי מתקיים: $\frac{I}{I'} = \frac{\cos \varphi'}{\cos \varphi}$.

ג. הוכח כי מתקיים: $\eta = \frac{\Delta P}{P} = \frac{P - P'}{P} = 1 - \left(\frac{\cos \varphi}{\cos \varphi'} \right)^2$.



11) לפניך המעגל הבא:

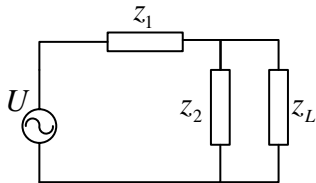
נתון: $z_1 = (2 + 3j)\Omega$, $z_2 = (3 + 4j)\Omega$, $z_3 = (2 - 2j)\Omega$

$z_4 = (12 + 10j)\Omega$, $z_5 = (15 - 2j)\Omega$

$u(t) = \sqrt{800} \cos(10,000t + 0.1\pi) \text{ v}$

א. חשב את מקדם ההספק של המעגל.

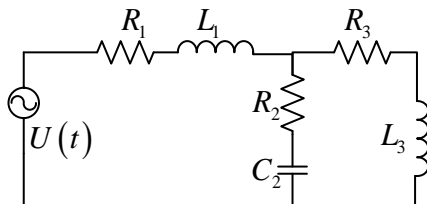
ב. מה יהיה ערכו של קבל אשר ישפר את מקדם ההספק ל-0.94?



12) במעגל שלפניך נתון: $z_1 = 25 \angle 30^\circ \Omega$, $z_2 = 73 \angle -15^\circ \Omega$.

א. חשב את העכבה z_L לקבלת הספק מקסימלי.

ב. בהנחה שהעכבה z_L היא ממשית טהורה, מה יהיה ערכה עבורו ההספק עליה יהיה מירבי?



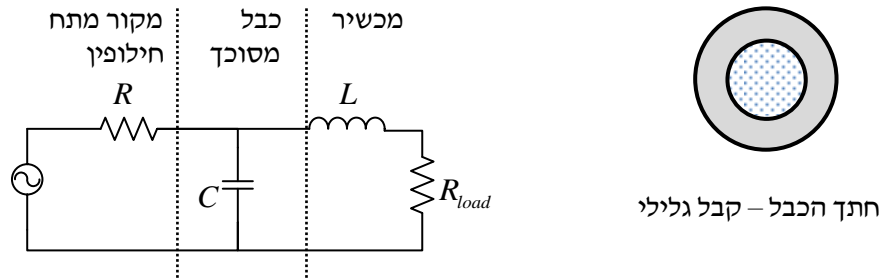
13) נתון המעגל הבא:

ידוע כי: $R_1 = 3\Omega$, $U(t) = 25\sqrt{2} \cos(600t + 30^\circ) \text{ v}$

$L_1 = 20 \text{ mH}$, $R_3 = 8\Omega$, $L_3 = 13.33 \text{ mH}$

חשב את R_2 ו- C_2 לקבלת הספק מירבי בענף שלהם.

14) מכשיר שמעגל הכניסה שלו מיוצג באמצעות התנגדות $R_{load} = 75\Omega$ והשראות של $L = 2\mu H$ המחוברות זו לזו בטור, מחובר את מקור מתח חילופין באמצעות כבל מסוכם. מתח המקור הוא $3V$, תדירותו $500kHz$ והתנגדותו $R = 75\Omega$.



מבחינת המעגל החשמלי, הכבל שקול לקבל גלילי: קוטר הגליל החיצוני של הקבל הוא $6mm$, קוטר הגליל הפנימי הוא $0.5mm$, אורכו $25m$ והפרמאביליות היחסית של חומר הבידוד שבין שני הגלילים היא $\epsilon_r = 5.2$.

- א. מה הזרם, גודל וזווית, במקור המתח?
- ב. מה ההספק המרוכב $S = P + jQ$ שבמקור המתח?
- ג. מה ההספק המכשיר P_{load} ?
- ד. האם המעגל פועל בנקודת עבודה שבה האנרגיה עוברת מהמקור אל המכשיר בהספק מירבי? חובה לסמוך את התשובה באמצעות מספרים.

תשובות סופיות:

(1) א. $I_1 = 3.1 \angle -48.425^\circ A$, $I_2 = 1.045 \angle -37.568^\circ A$, $I_3 = 2.09 \angle -53.825^\circ A$.

ב. $P = 246.849w$, $Q = 278.88 \text{ var}$, $S = 372vA$.

(2) א. $U_{in} = 73.44 \angle 0^\circ v$. ב. $I_1 = 10.95 \angle 63.43^\circ A$, $I_2 = 17.73 \angle -23.9^\circ A$.

ג. $P = 1190.35w$, $Q = 527.5 \text{ var}$, $S = 1302vA$.

(3) א. $I_T = 0.4 \angle -36.86^\circ A$. ב. $6.4w$. ג. 4.8 var . ד. $\Delta\phi = 53.13^\circ$.

(4) $P = \frac{1}{2} I_m^2 R$, $Q = \frac{1}{2} I_m^2 X$.

(5) א. $\phi = 25.846^\circ$. ב. $z = (9.521 + 4.612j)\Omega$. ג. $X_C = -43.12\Omega$.

(6) א. $W = 0w$, $A = 0A$, $V = 230v$. ב. $P = 1000w$, $A = 5.434A$, $V = 230v$.

ג. $P = 1000w$, $A = 4.48A$, $V = 230v$. ד. $E = 5kWh$.

(7) א. במקביל. ב. $73.535v$.

ג. $P = 1195w$, $Q = 527.8 \text{ var}$, $S = 1306.4vA$. ד. אופי השראותי.

(8) א. חיבור טורי. ב. $L = 12.73mH$, $R = 3\Omega$. ג. $I = 13.25A$.

ד. $S = (6348 + 8464j)vA$.

(9) שאלת הוכחה.

(10) שאלת הוכחה.

(11) א. 0.8031 . ב. $6.087\mu F$.

(12) א. $z_L = (18.68 - 6.42j)\Omega$. ב. $R_L = 19.75\Omega$.

(13) $R_2 = 3.086\Omega$, $C_2 = 315\mu F$.

(14) א. $22.3m \angle 14.38^\circ A$. ב. $P = 64.825mw$, $Q = 16.67 \text{ var}$, $S = 66.934mvA$.

ג. $P_L = 27.486mw$. ד. מכיוון שעכבת המכשיר אינה זהה לצמוד של העכבה

השקולה - $Z_T = (51 - 34.9j)\Omega$, אז המכשיר אינו מקבל את ההספק המירבי.

סרטון – משפטי הרשת במעגלי זרם חילופין:

האדמיטנס:

הגדרה:

עבור עכבה מהצורה: $z = R + jX$ נסמן את המתירות (אדמיטנס): $y = G + jB$.
 כאשר: G - המוליכות (conductance), B - סוספטנס (susceptance).

קשרים בין אימפדנס ואדמיטנס:

1. הגדרת האדמיטנס: $y = \frac{1}{z}$.

2. קשרים בין הערכים: $G = \operatorname{Re}\{y\} = \frac{R}{R^2 + X^2}$, $B = \operatorname{Im}\{y\} = \frac{-X}{R^2 + X^2}$.

3. צורה פולרית: $|y| = \frac{1}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{1}{|z|}$, $\arg\{y\} = \tan^{-1} \frac{B}{G} = -\tan^{-1} \frac{X}{R}$.

אדמיטנס של רכיבים יסודיים:

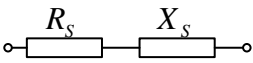
רכיב חשמלי	עכבה	התנגדות אוהמית	היגב	מתירות y (אדמיטנס)	מוליכות	סוספטנס B
נגד	R	R	0	$\frac{1}{R}$	$\frac{1}{R}$	0
קבל	$\frac{-j}{\omega C}$	0	$\frac{-1}{\omega C}$	$j\omega C$	0	ωC
סליל	$j\omega L$	0	ωL	$\frac{-j}{\omega L}$	0	$\frac{-1}{\omega L}$

חיבורי עכבות:

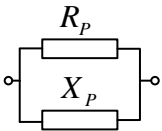
חיבור בטור: $z_{eq} = \sum_{k=1}^N z_k$, $\frac{1}{y_{eq}} = \sum_{k=1}^N \frac{1}{y_k}$

חיבור במקביל: $\frac{1}{z_{eq}} = \sum_{k=1}^N \frac{1}{z_k}$, $y_{eq} = \sum_{k=1}^N y_k$

המרת עכבה טורית למקבילית:



עכבה המורכבת מהתנגדות R_S והיגב X_S בטור: $z_S = R_S + jX_S$



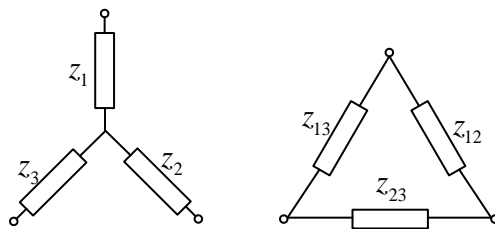
עכבה המורכבת מהתנגדות R_P והיגב X_P במקביל: $\frac{1}{z_P} = \frac{1}{R_P} \mp j \frac{1}{X_P}$

כאשר נדרוש: $z_S = z_P$ נקבל את הקשרים הבאים:

1. מחיבור טורי למקבילי: $R_P = \frac{R_S^2 + X_S^2}{R_S}$, $X_P = \frac{R_S^2 + X_S^2}{X_S}$

2. מחיבור מקבילי לטורי: $R_S = \frac{R_P X_P^2}{R_P^2 + X_P^2}$, $X_S = \frac{X_P R_P^2}{R_P^2 + X_P^2}$

המרת כוכב משולש:



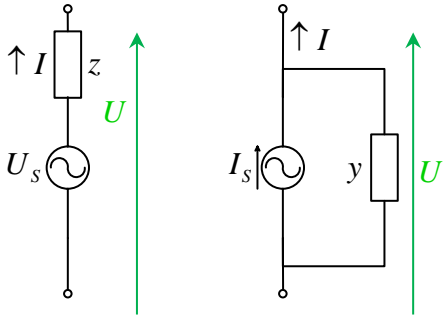
המרות מחיבור כוכב לחיבור משולש:

$$z_{12} = \frac{z_1 z_2 + z_2 z_3 + z_1 z_3}{z_3} , z_{23} = \frac{z_1 z_2 + z_2 z_3 + z_1 z_3}{z_1} , z_{13} = \frac{z_1 z_2 + z_2 z_3 + z_1 z_3}{z_2}$$

המרות מחיבור משולש לחיבור כוכב:

$$z_1 = \frac{z_{13} z_{12}}{z_{12} + z_{23} + z_{13}} , z_2 = \frac{z_{23} z_{12}}{z_{12} + z_{23} + z_{13}} , z_3 = \frac{z_{13} z_{23}}{z_{12} + z_{23} + z_{13}}$$

המרת מקור מתח חילופין למקור זרם חילופין:



החלפת מקור מתח חילופין במקור זרם חילופין:

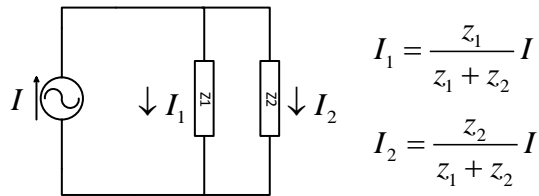
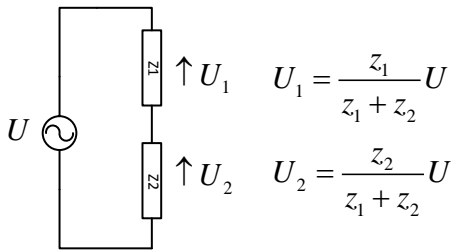
$$I_s = \frac{U_s}{z}, \quad y = \frac{1}{z}$$

החלפת מקור זרם חילופין במקור מתח חילופין:

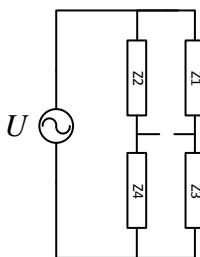
$$U_s = \frac{I_s}{y} = I_s \cdot z, \quad y = \frac{1}{z}$$

מחלק מתח ומחלק זרם:

עקרונות מחלק מתח ומחלק זרם נשארים זהים כמו במעגלי זרם ישר:



גשר וינסטון:



תאני לאיזון הגשר: $\frac{z_1}{z_2} = \frac{z_3}{z_4}$

חוקי קירכהוף ושיטות מתחי הצמתים וזרמי החוגים:

חוק הזרמים וחוק המתחים של קירכהוף נשמרים במעגלי זרם חילופין.

$$\sum_{k=1}^N I_k = 0 \quad \text{חוק הזרמים:}$$

$$\sum_{k=1}^N U_k = 0 \quad \text{חוק המתחים:}$$

שיטות מתחי הצמתים וזרמי החוגים נשארות זהות.

נוסחת מילמן:

עבור מעגל בעל שני צמתים A ו-B המורכב מ-N ענפים המחוברים במקביל זה לזה בין צמתים אלו, המתח U_{AB} ניתן לחישוב באופן הבא:

$$U_{AB} = \frac{\frac{E_1}{z_1} + \frac{E_2}{z_2} + \dots + \frac{E_N}{z_N}}{\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} + \dots + \frac{1}{z_N}} = \frac{\frac{E_1}{z_1} + \frac{E_2}{z_2} + \dots + \frac{E_N}{z_N}}{y_1 + y_2 + \dots + y_N} = \frac{\sum_{k=1}^N \frac{E_k}{z_k}}{\sum_{k=1}^N y_k} = \frac{\sum_{k=1}^N I_{SC_k}}{\sum_{k=1}^N y_k} = \frac{\text{סכום זרמי הקצר בכל ענף}}{\text{סכום המתירויות של כל ענף}}$$

כאשר E_k ו- z_k הם בהתאמה הפאזורים של המתח והעכבה של הענף ה-k ו- I_{SC_k} הוא הפאזור של זרם הקצר של הענף ה-k. לעניין קוטביות, אנו נבחר איזו צומת תהיה A ואיזו צומת תהיה B ונקבע כיוון זרם אחד לכל הענפים.

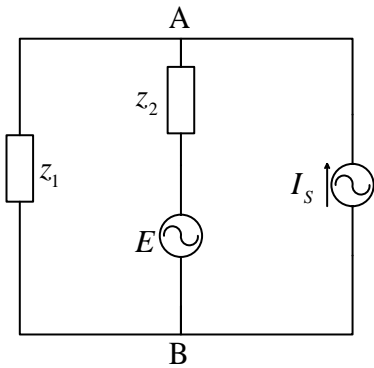
שקולי תבנין ונורטון:

טכניקות המציאה של שקולי תבנין ונורטון נשארות זהות במעגלי זרם חילופין.

שיטת ההרכבה (סופרפוזיציה):

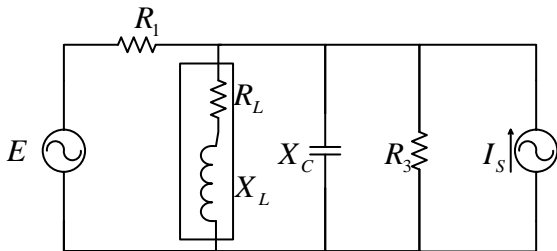
שיטת ההרכבה נשארת זהה במעגלי זרם חילופין.

תרגילים:



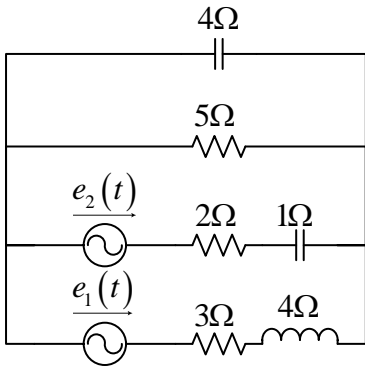
1) לפניך המעגל הבא ובו נתון: $z_1 = (3 - 8j)\Omega$
 $E = 15\angle 30^\circ v$, $I_s = 5\angle 0^\circ A$, $z_2 = (2 - 6j)\Omega$

- חשב את המתח שבין הנקודות A ו-B.
- חשב את ההספקים (פעיל, היגבי ומדומה) של מקור המתח וציין באיזה מצב הוא פועל.
- חשב את ההספקים (פעיל, היגבי ומדומה) של מקור הזרם וציין באיזה מצב הוא פועל.
- חשב את ההספקים (פעיל, היגבי ומדומה) של העכבה z_2 .



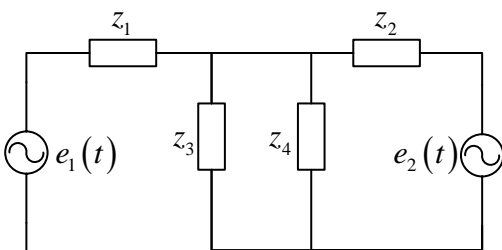
2) לפניך המעגל הבא:
 נתון: $E = 50\angle 0^\circ v$, $I_s = 2\angle 0^\circ A$, $X_C = -2\Omega$
 $X_L = 2\Omega$, $R_1 = R_L = R_3 = 10\Omega$

- חשב את זרם העומס.
- חשב את ההספק הממשי, הכולל ואת גורם ההספק בעומס.
- חשב את הזרם הנצרך ממקור המתח ואת ההספק הכולל שהוא מספק.
- חשב את ההספק הממשי שמספק מקור הזרם.



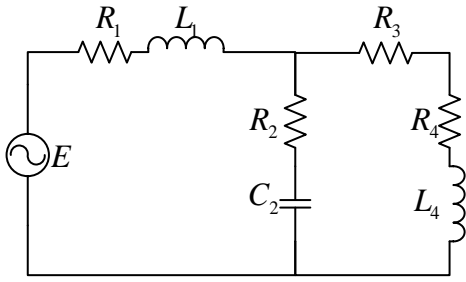
3) נתון המעגל שבאיור.
 מתחי המקורות הם: $e_1(t) = 100\sqrt{2} \sin(628t) v$
 ו- $e_2(t) = 60\sqrt{2} \sin(628t + 30^\circ) v$

- מהו הערך האפקטיבי של המתח על הקבל שהגיבו 4Ω ?
- רשום את הביטויים של הזרמים המסופקים ע"י המקורות כתלות בזמן.



4) לפניך המעגל הבא:
 נתון: $e_1(t) = 12\sqrt{2} \sin(\omega t + 30^\circ) v$
 $e_2(t) = 24\sqrt{2} \sin(\omega t) v$, $z_1 = (4 + 6j)\Omega$
 $z_2 = (4 - 6j)\Omega$, $z_3 = 5j\Omega$, $z_4 = (8 + 8j)\Omega$

- חשב את המתח על העכבה z_3 .
- חשב את הזרם דרך העכבה z_3 .



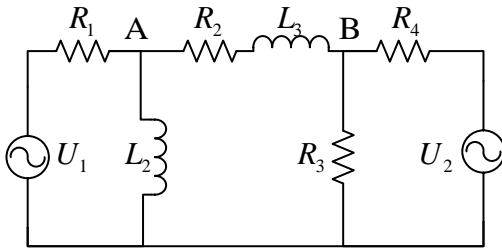
5) לפניך המעגל הבא :

נתון : $E = 48\angle 0^\circ \text{v}$, $R_1 = 3\Omega$, $X_{L_1} = 4\Omega$

$R_2 = 3\Omega$, $X_{C_2} = -4\Omega$, $R_3 = 4\Omega$

$R_4 = \frac{23}{6}\Omega$, $X_{L_4} = 4\Omega$

חשב לפי תבנית את הזרם בנגד R_4 .



6) לפניך המעגל הבא :

ידוע כי : $R_1 = 5\Omega$, $R_2 = 2\Omega$, $R_3 = 6\Omega$

$R_4 = 4\Omega$, $X_2 = 5\Omega$, $X_3 = 3\Omega$

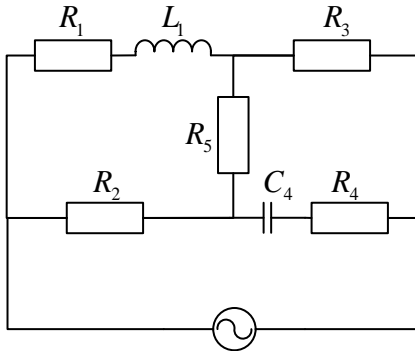
$U_1 = 30\angle 0^\circ \text{v}$

ערך מקור המתח U_2 אינו ידוע.

א. חשב את U_2 עבורו הזרם דרך

הנקודות A ו-B יתאפס.

ב. חשב את הזרם דרך AB אם $U_2 = 30\angle 0^\circ \text{v}$.



7) לפניך המעגל הבא :

נתון : $R_2 = R_3 = R_5 = 100\Omega$

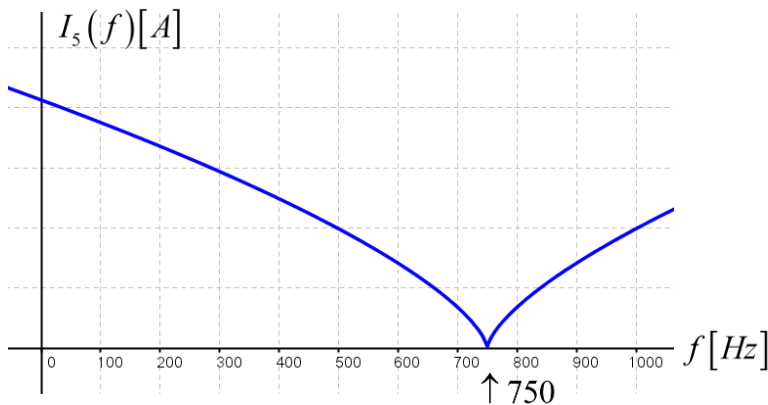
$L_1 = 100\text{mH}$, $C_4 = 22\mu\text{F}$

ערכי הנגדים R_1 ו- R_4 אינם ידועים.

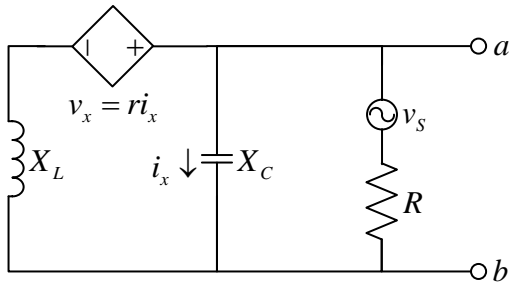
בגרף הבא מתואר הזרם העובר דרך

הנגד R_5 כתלות בתדר ההזנה של המעגל

(של מקור המתח) f .



מצא את ערכי הנגדים R_1 ו- R_4 .



8 במעגל שלפניך נתון :

$$v_s(t) = 50\sqrt{2} \sin\left(50\pi t - \frac{\pi}{3}\right) [v]$$

$$R = 8\Omega, r = 2\Omega, X_C = -10j\Omega$$

$$X_L = 15j\Omega$$

א. מצא את ההתנגדות השקולה

המשתקפת מבעד לצמתים \$a\$ ו-\$b\$.

ב. מצא ביטוי לזרם העובר דרך עכבת עומס $Z_L = 10 - 2j [\Omega]$.

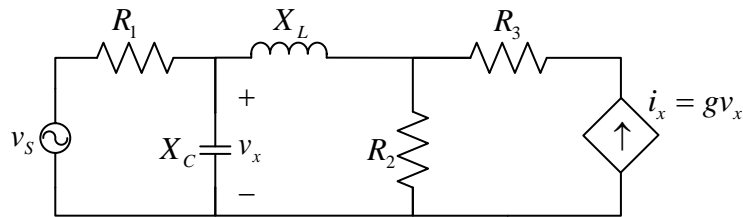
ג. מצא את העכבה Z_L עבורה ההספק דרכה יהיה מירבי ומצא את ההספק זה.

ד. סרטט דיאגרמה פאזורית של ההספים מהסעיף הקודם.

9 במעגל שלפניך נתון: $v_s(t) = 50\sqrt{2} \sin\left(60\pi t + \frac{\pi}{4}\right) [v]$, $i_x = g \cdot v_x$,

$$X_L = 5j\Omega, X_C = -4j\Omega, R_1 = 2\Omega, R_2 = 4\Omega, R_3 = 8\Omega, g = 0.1S$$

מצא את החלקים הממשי והמדומה של ההספק שמספק מקור הזרם התלוי.



תשובות סופיות:

(1) א. $U_{AB} = 18.48 \angle -43.48^\circ \text{V}$ ב. $S_E = 47.85 \text{VA}$, $P_E = -32.45 \text{W}$, $Q_E = -35.16 \text{var}$

מקור המתח פועל כצרכן גם מבחינת ההספק הפעיל וגם מבחינת ההספק ההיגבי.

ג. $S_I = 92.4 \text{VA}$, $P_I = 67 \text{W}$, $Q_I = -65.3 \text{var}$. מקור הזרם פועל בספק מבחינת ההספק

הפעיל וכצרכן מבחינת ההספק ההיגבי. ד. $S_{z_3} = 64.35 \text{VA}$, $P_{z_3} = 20.35 \text{W}$, $Q_{z_3} = -61 \text{var}$

(2) א. $I = 1.21 \angle -69.6^\circ \text{A}$ ב. $S_L = 14.93 \text{VA}$, $P_L = 14.64 \text{W}$, $P.F. = 0.98$

ג. $S_E = 223.5 \text{VA}$, $I_E = 4.47 \angle 13.64^\circ \text{A}$. ד. $P_I = 13 \text{W}$

(3) א. 35.47V

ב. $I_1(t) = 13.02\sqrt{2} \sin(628t - 48.5^\circ) \text{A}$, $I_2(t) = 17.47\sqrt{2} \sin(628t + 90.9^\circ) \text{A}$

(4) א. $U_{z_3} = 11.48 \angle 81.8^\circ \text{V}$ ב. $I_{z_3} = 2.29 \angle -8.2^\circ \text{A}$

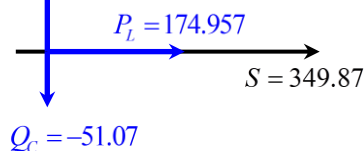
(5) $I = 3.16 \angle -71.56^\circ \text{A}$

(6) א. $U_2 = 35.33 \angle 45^\circ \text{V}$ ב. $I = 1.73 \angle 62.7^\circ \text{A}$

(7) $R_1 = 516.25 \Omega$, $R_4 = 10.32 \Omega$

(8) א. $z_{TH} = 8.58 \angle -16.62^\circ \Omega$ ב. $i = 4.04 \angle -63.04^\circ \text{A}$

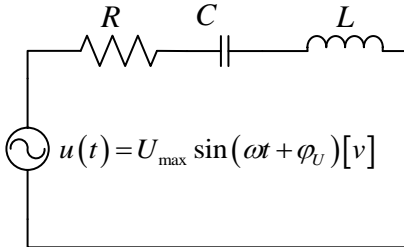
ג. $S = 349.87 \angle 0^\circ \text{VA}$, $z_L = 8.58 \angle 16.62^\circ \Omega$. ד. $Q_L = 51.07$



(9) $S = 522.214 - 106.58j = 532.98 \angle -11.53^\circ \text{VA}$

סרטון – מעגלי תהודה:

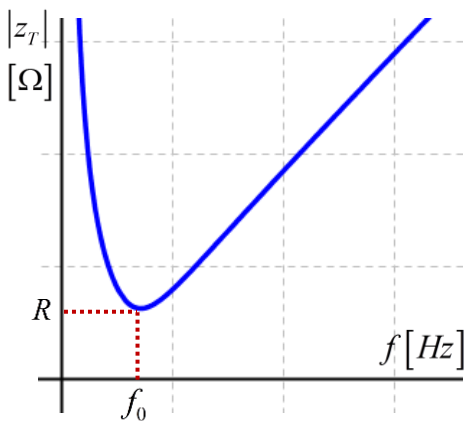
מעגל תהודה טורי:



1. מעגל תהודה טורי מורכב מרכיב קיבולי ורכיב השראותי המחוברים בטור כמתואר באיור הסמוך.

2. העכבה השקולה היא: $z_T = R + j(X_L + X_C) = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$

כאשר נאפס את החלק המדומה נקבל את תדר התהודה: $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

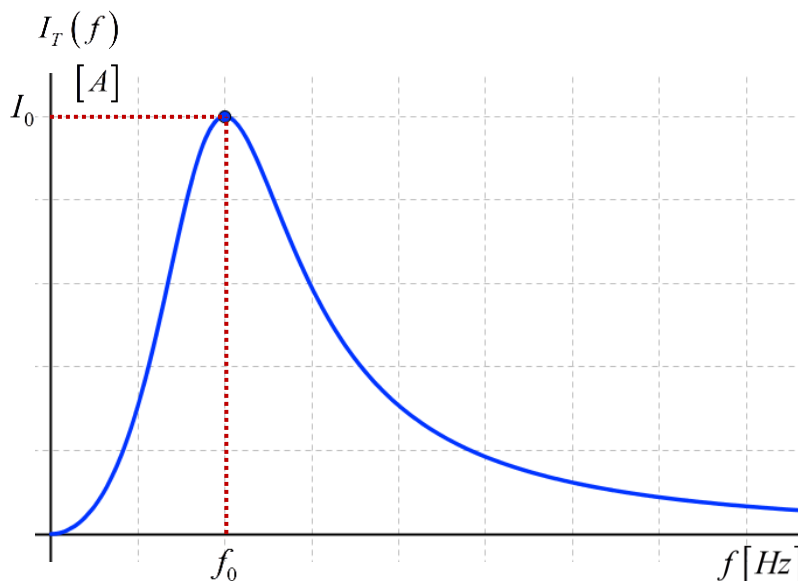


3. עבור תדר התהודה, עכבת המעגל היא ממשית ומקבלת את הערך הקטן ביותר.

בגרף בסמוך ניתן לראות

כי מתקיים: $z_T(f_0) = R$

4. בתדר התהודה הזרם במעגל הוא הגדול ביותר וערכו: $I_0 = \frac{U_s}{R}$

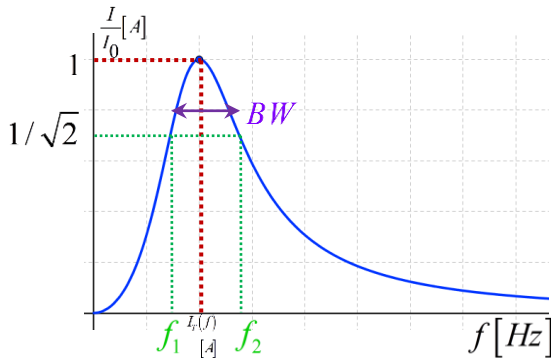


5. סכום המתחים על הרכיבים הקיבוליים וההשראותיים בתדר התהודה הוא אפס. מכאן שמו 'תהודה של מתחים'. רכיבים אלו מהווים קצר במעגל.

6. גורם האיכות: $Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_X}{U} = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R} = \frac{1}{\omega_0 RC} = \frac{L}{\omega_0 R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$

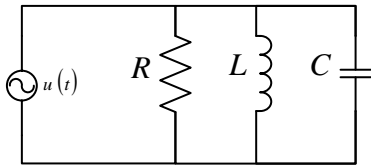
7. תדרי מחצית ההספק הם: $\omega_1 = -\frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 + \omega_0^2}$, $\omega_2 = +\frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 + \omega_0^2}$

מתקיים: $f_0 = \sqrt{f_1 \cdot f_2}$



8. רוחב הסרט: $BW = f_2 - f_1 = \frac{1}{2\pi} \frac{R}{L} [Hz]$

מעגל תהודה מקבילי:



1. מעגל תהודה מקבילי מורכב מרכיב קיבולי ורכיב השראותי המחוברים במקביל כמתואר באיור הסמוך.

2. העכבה השקולה היא: $z_T = R \parallel z_C \parallel z_L = R \parallel \frac{1}{j\omega C} \parallel j\omega L = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)}$

כאשר נאפס את החלק המדומה נקבל את תדר התהודה: $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

3. עבור תדר התהודה, עכבת המעגל היא ממשית ומקבלת את הערך הגדול ביותר. מתקיים: $z_T(f_0) = R$

4. בתדר התהודה הזרם במעגל הוא הקטן ביותר וערכו: $I_0 = \frac{U_s}{R}$

5. סכום הזרמים על הרכיבים הקיבוליים וההשראותיים בתדר התהודה הוא אפס. מכאן שמו 'תהודה של זרמים'. רכיבים אלו מהווים נתק במעגל.

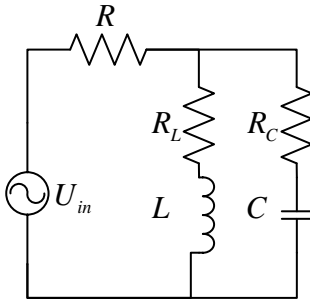
6. גורם האיכות: $Q = \frac{R}{R_0} = \omega_0 RC = \frac{R}{\omega_0 L}$

7. תדרי מחצית ההספק הם: $\omega_1 = -\frac{1}{2RC} + \sqrt{\frac{1}{4R^2C^2} + \omega_0^2}$, $\omega_2 = +\frac{1}{2RC} + \sqrt{\frac{1}{4R^2C^2} + \omega_0^2}$

מתקיים: $f_0 = \sqrt{f_1 \cdot f_2}$

8. רוחב הסרט: $BW = f_2 - f_1 = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{RC} [Hz]$

מעגל תהודה מקבילי מעשי:



מעגלים רבים מכילים סליל בטור לנגד וקבל בטור לנגד כמתואר באיור הבא. זו היא הצורה המעשית של מעגלי תהודה מקבילים מכיוון שגם לסליל וגם לקבל יש התנגדות אוהמית כלשהי.

תדר התהודה במקרה זה יחושב לפי: $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{R_0^2 - R_L^2}{R_0^2 - R_C^2}}$

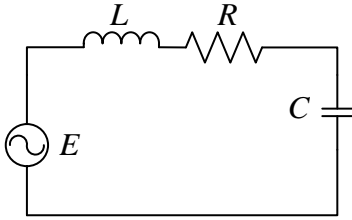
התנאי לתהודה בין שתי עכבות המחוברות במקביל, אחת קיבולית והשנייה השראותית הוא:

$$\frac{X_L}{R_L^2 + X_L^2} = \frac{X_C}{R_C^2 + X_C^2}$$

מעגלי תהודה מעורבים:

עיקרון הפתירה של מעגלי תהודה מעורבים מסתמך על התכונות של מעגל תהודה טורי ומעגל תהודה מקבילי. יש לחלק את המעגל ולהתייחס לכל חלק לפי תכונות התהודה הטורית והמקבילית.

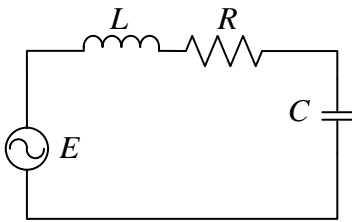
תרגילים:



1) לפניך המעגל הבא:

נתון: $E(t) = 10\sqrt{2} \cos(3000t) \text{ v}$, $R = 3\Omega$, $L = 3\text{mH}$.

- חשב את ערכו של הקבל לקבלת זרם מירבי.
- מהו ההספק המירבי של המעגל?
- חשב את רוחב הפס של המעגל.
- מהו מקדם הטיב של המעגל?



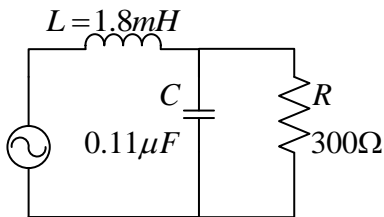
2) במעגל הנתון תדר התהודה הוא 2.5kHz .

ידוע כי: $R = 3\Omega$, $C = 6.37\mu\text{F}$.

- חשב את הסליל לקבל תהודה.
- חשב את תדירויות מחצית ההספק.

3) במעגל תהודה טורי בעל נגד, קבל וסליל, מתח המקור הוא: $U(t) = 8\sqrt{2} \sin(314k \cdot t) \text{ v}$.

הזרם במעגל הוא: $I(t) = 2\sqrt{2} \sin(314k \cdot t) \text{ mA}$ ומקדם הטיב הוא 5.65.
חשב את ערכם של רכיבי המעגל.



4) באיור שלפניך מתוארים נגד עומס,

קבל וסליל המחוברים למחולל זרם חילופין.

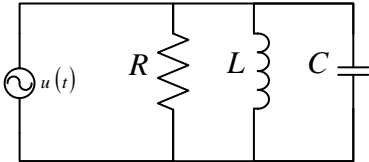
- תדר אות מתח החילופין שמפיק המחולל הוא 11.311kHz . האם המעגל נמצא בתהודה?
- כאשר מחולל האות מפיק מתח שהתדר שלו הוא 0Hz , האם המעגל נמצא בתהודה?

5) מקור מתח מפתח הספק של 2w כאשר הוא מזין ענף חשמלי הכולל נגד של 10Ω ,

סליל וקבל – כולם מחוברים בטור. תדר המקור זהה לתדר התהודה של המעגל.
לענף חשמלי אחר, הכולל נגד בן 20Ω , סליל וקבל – כולם מחוברים בטור, תדר תהודה זהה לזה של המעגל הראשון. הוחלט לחבר את שני ענפי המעגלים, האחד בטור עם השני.

- מהו תדר התהודה של המעגל החדש הכולל את כל ששת הרכיבים המחוברים ביניהם בטור? הוכח את תשובתך באמצעות פיתוח מתמטי.
- מהו ההספק של מקור המתח כאשר המעגל שבסעיף א' נמצא במצב תהודה?
- האם תדר התהודה של המעגל שבסעיף א' יגדל או יקטן אם אחד משני הקבלים יתקצר? נמק את תשובתך.

ד. נסמן ב- BW_1 ו- BW_2 את רוחבי הסרט של שני המעגלים המקוריים בהתאמה. הבע באמצעות BW_1 ו- BW_2 את רוחב הסרט של המעגל שתואר בסעיף א'.



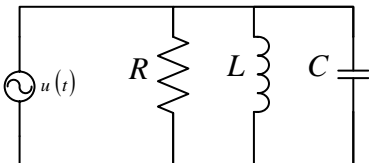
6 לפניך המעגל הבא:

נתון: $R = 50\Omega$, $C = 0.1\mu F$.

תדר התהודה של המעגל הוא $f_0 = 15.915kHz$.

- מצא את השראות הסליל.
- חשב את גורם האיכות של המעגל.
- מצא תדרים עבורם עכבת המעגל השקולה קטנה פי 2 מערכה בתהודה.
- סרטט גרף של עכבת המעגל כתלות בתדר וסמן בו את תדר התהודה ואת התדרים שמצאת בסעיף הקודם.

7 בשאלה זו נוכיח כי הזרם במעגל תהודה מקבילי במצב תהודה הוא הקטן ביותר.



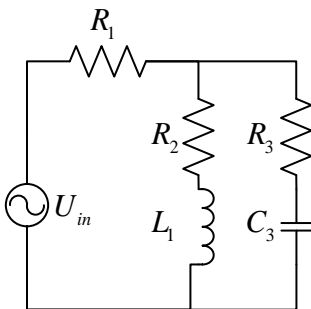
לפניך מעגל התהודה המקבילי הבא:

נתונים ערכי כל רכיבי המעגל: R , L ו- C .

מקור המתח מספק מתח חילופין

לפי: $u(t) = U_{\max} \sin(\omega t) [v]$

- כתוב את $|z_T|$ כתלות ב- ω , R , L , C .
- כתוב את $|I_T|$ כתלות ב- ω , R , L , C , U_{\max} .
- סרטט סקיצה של $|I_T|$ כתלות ב- f .



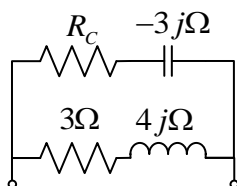
8 לפניך המעגל הבא:

נתון: $U_{in}(t) = \sqrt{200} \sin(2000t + 30^\circ) v$

$R_1 = 10\Omega$, $R_2 = 12\Omega$, $R_3 = 7\Omega$

$L_1 = 2mH$, $C_3 = 166\frac{2}{3}\mu F$

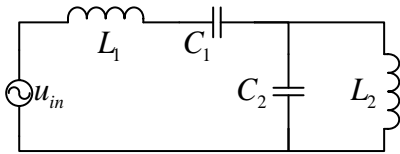
- חשב את הזרם הכללי במעגל עבור מתח הכניסה הנתון.
- חשב לאיזה תדירות יש לכוון את מקור המתח לקבלת תהודה.



9 במעגל שלפניך, חשב את ערך הנגד R_C עבור תהודה.

10) קבל אידיאלי וסליל מעשי מחוברים למקור $C = 0.1 \mu F$, $R = 50 \Omega$ מתח חילופין. השראות הסליל היא $L = 0.8 H$.

- א. כאשר הקבל והסליל מחוברים בטור ותדירות המקור היא $1.5 kHz$ המעגל נמצא במצב תהודה ומקדם הטיב שלו הוא 10. מהם התנגדות הסליל וקיבול הקבל?
 ב. מחברים את אותו הקבל ואת אותו הסליל במקביל. מה צריכה להיות עכשיו תדירות המקור כדי לקבל תהודה במעגל?

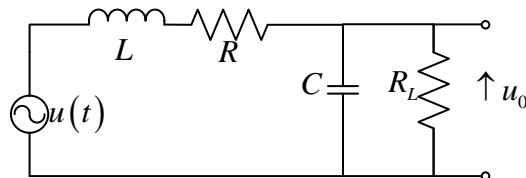


11) במעגל הנתון מקור המתח הינו בעל תדירות הניתנת לשינוי. נתון: $C_1 = 2.2 \mu F$, $L_1 = 3 \mu H$.
 $C_2 = 2.2 \mu F$, $L_2 = 8 \mu H$

- א. באיזו תדירות זוויתית צריכת הזרם תהיה מזערית?
 ב. מה היחס בין מתח המקור למתח על L_2 בזמן צריכת זרם מינימלית?

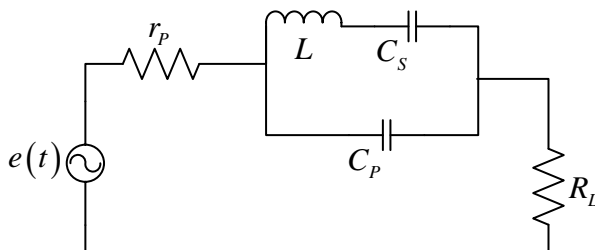
12) מקור המתח שבאיור מפיק מתח: $u(t) = 10 \cos(\omega t) v$.

- ערכי רכיבי המעגל הם: $R = 10 \Omega$, $L = 5 mH$, $C = 0.5 \mu F$, $R_L = 500 \Omega$.
 חשב את התדירות הזוויתית של תהודה ω_0 ואת מתח התהודה $u_0(\omega_0)$.



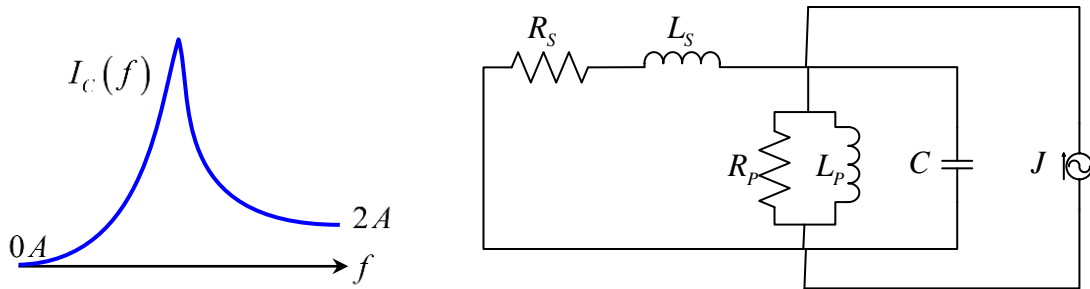
13) במעגל הבא נתון $e(t) = \sqrt{8} \sin(2\pi ft) v$.

f - תדירות משתנה, $C_s = 0.4 \mu F$, $r_p = R_L = 8 \Omega$.



- א. חשב מהו ערכו של L כדי שבתדר של $3 kHz$ ההספק בעומס יהיה מירבי.
 ב. חשב מהו ערכו של C_p כדי שבתדר של $4 kHz$ ההספק בעומס יהיה מינימלי.
 ג. חשב מה ההספק בעומס בתדר $3 kHz$.

14 שני עומסים השראתיים, קבל ומקור זרם חילופין מחוברים זה לזה לפי תרשים החיבורים שבאיור. עוצמת הזרם של מקור זרם החילופין קבועה ואפשר לשנות את התדירות שלו. מדדו את הזרם $I_C(f)$ שעובר דרך הקבל כתלות בתדר מקור הזרם J . תוצאות המדידה מוצגות בגרף שבאיור.



נתון: $R_S = 75m\Omega$, $L_S = 90\mu H$, $R_P = 10\Omega$, $L_P = 8mH$.

- מה עוצמת הזרם של מקור זרם החילופין?
לא תתקבל תשובה מספרית ללא נימוק קצר ולעניין.
- הזרם שעובר דרך הקבל מגיע לשיאו כשתדר מקור זרם החילופין הוא $550Hz$. מה קיבול הקבל?
- מה היא העוצמה המרבית של הזרם העובר דרך הקבל?

תשובות סופיות:

(1) א. $37\mu F$. ב. $P = 33\frac{1}{3}w$. ג. $BW = 159Hz$. ד. $Q = 3$.

(2) א. $L = 0.637mH$. ב. $f_1 = 2153Hz$, $f_2 = 2902Hz$.

(3) $R = 4k\Omega$, $L = 71.5mH$, $C = 140pF$.

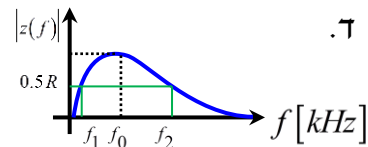
(4) א. אין תהודה כי לעכבה יש חלק מדומה: $z = (46.151 + 19.686j)\Omega$.

ב. אין תהודה כי מדובר במתח DC.

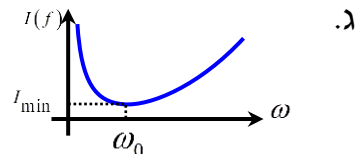
(5) א. אותו התדר: $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}}$. ב. $P = \frac{2}{3}w$.

ג. התדר יקטן. $BW = \frac{3 \cdot BW_1 \cdot BW_2}{2 \cdot BW_1 + BW_2}$. ד.

(6) א. $L = 1mH$. ב. $Q = 0.5$. ג. $1.72kHz$, $59.37kHz$.



(7) א. $|z_T| = \frac{\omega RL}{\sqrt{(R(\omega^2 LC - 1))^2 + (\omega L)^2}}$. ב. $|I_T| = \frac{U_{max} \sqrt{(R(\omega^2 LC - 1))^2 + (\omega L)^2}}{\omega RL}$.



(8) א. $I_T = 0.665 \angle 32.61^\circ A$. ב. $f = 520.6Hz$.

(9) 3.12Ω .

(10) א. $C = 14.07nF$, $R_L = 754\Omega$. ב. $f_0 = 1492.5Hz$.

(11) א. $\omega = 238,365 \frac{rad}{sec}$. ב. 1 .

(12) א. $\omega_0 = 19596 \frac{rad}{sec}$. ב. $u_{0max} = 33.33v$.

(13) א. $L = 7mH$. ב. $C_p = 0.52\mu F$. ג. $P = 0.125w$.

(14) א. $2A$. עבור תדר אינסופי שני הענפים עם הסלילים מתפקדים כנתק ולכן כל

הזרם עובר דרך הקבל. מכאן שזה הוא ערכו לפי הגרף.

ב. $C = 10.467\mu F$. ג. $I_{max} = 23mA$.