# הצעה לפתרון מלא – חשמל ואלקטרוניקה לטכנאים

בחינת גמר • אביב תשע"ז 2017 • שאלון 733001 • שאלות 1–10

✦ בנוי על ידי פהד גאנם ✦

💡 **על המסמך:** הצעה לפתרון מלא לשאלון 733001 – חשמל ואלקטרוניקה לטכנאים, מגמת הנדסת חשמל, בקרה ואנרגייה (כיתה י"ג), אביב תשע"ז 2017. בשאלון עשר שאלות, והנבחן עונה על חמש בלבד – שתיים לפחות מן הפרק הראשון. נוסח השאלות הוא של משרד החינוך; הפתרונות נכתבו במלואם ואומתו נומרית על ידי פהד גאנם.

fahed-lab.com · פהד גאנם

# פרק ראשון – תורת החשמל • שאלות 1–4

## שאלה 1 – שיטת מתחי הצמתים עם חמישה מקורות

**נתונים:** $E_1 = 8\ V$ • $E_2 = 15\ V$ • $E_3 = 10\ V$ • $I_4 = 3\ A$ • $I_5 = 4\ A$ • $R_1 = 2\ \Omega$ • $R_2 = 4\ \Omega$ • $R_3 = 5\ \Omega$ • $R_4 = 2.5\ \Omega$ • $R_5 = 4\ \Omega$

💡 **מבנה המעגל:** הפס התחתון C מוארק ומתחו אפס. שני צמתים לא-ידועים בלבד: A ו-B. מן A יורדים אל הפס התחתון שלושה ענפים – $E_1$ בטור עם $R_1$, מקור הזרם $I_4$ שמזרים 3 A כלפי מעלה, והנגד $R_2$. בין A ל-B יושבים $R_3$ ו-$E_2$ בטור. מן B יורדים $R_4$ בטור עם $E_3$, הנגד $R_5$, ומקור הזרם $I_5$ שמושך 4 A כלפי מטה.

⚠️ **לפני שכותבים ולו משוואה אחת – קוראים את קוטביות שלושת המקורות מן האיור.** $E_1$ מסומן במפורש: הקוטב החיובי למעלה. ב-$E_2$ הפלטה הארוכה והדקה (החיובית) פונה אל B. ב-$E_3$ הפלטה הארוכה פונה כלפי מטה, אל האדמה – ולכן הצומת שבין $R_4$ ל-$E_3$ יושב על 10 V–, ולא על 10+.

### סעיף א – מערכת המשוואות

בכל צומת נכתוב: סכום הזרמים היוצאים בנגדים שווה לסכום הזרמים הנכנסים מן המקורות.

**הצומת A.** בענף השמאלי יורדים מ-A דרך $E_1$ מן הקוטב החיובי אל השלילי – ירידה של 8 V – ורק אחריו יושב $R_1$. בענף האמצעי, בדרך מ-A אל B נכנסים ל-$E_2$ מן הצד השלילי ויוצאים בחיובי, ולכן הפוטנציאל **עולה** ב-15 V:

$$\frac{V_A - 8}{R_1} + \frac{V_A}{R_2} + \frac{V_A + 15 - V_B}{R_3} = I_4$$

**הצומת B.** הזרם שנכנס אליו מן הענף האמצעי מתחלק בין $R_4$ (שמתחת לו יושב מקור על 10 V–), הנגד $R_5$ ומקור הזרם $I_5$ המושך 4 A:

$$\frac{V_A + 15 - V_B}{R_3} = \frac{V_B + 10}{R_4} + \frac{V_B}{R_5} + I_5$$

### סעיף ב – פתרון המערכת

נציב את הערכים ונכפול כל משוואה בעשרים כדי להיפטר מן המכנים:

פרד גאוים · fared-lab.com

$$19\cdot V_A - 4\cdot V_B = 80$$

$$4\cdot V_A - 17\cdot V_B = 100$$

מן המשוואה הראשונה מבודדים את $V_A$ ומציבים בשנייה:

$$V_A = \frac{80 + 4\cdot V_B}{19}$$

$$4 \cdot \frac{80 + 4\cdot V_B}{19} - 17\cdot V_B = 100 \rightarrow -307\cdot V_B = 1580$$

$$\mathbf{V_A = 3.13\ V \cdot V_B = -5.15\ V}$$

💡 **מתח שלילי אינו שגיאה.** הצומת B יצא מתחת לפוטנציאל האדמה, וזה הגיוני: מקור הזרם $I_5$ מושך ממנו ארבעה אמפרים כלפי מטה, ומקור $E_3$ מחזיק את הצומת שמתחת ל-$R_4$ על 10 V–. הסימן המינוס אומר רק שהחץ שבחרנו מלכתחילה מצביע לכיוון ההפוך.

## סעיף ג – הזרם דרך $R_3$ וכיוונו

$$I(R_3) = \frac{V_A + 15 - V_B}{R_3} = \frac{3.13 + 15 + 5.15}{5} = \frac{23.27}{5}$$

$$\mathbf{I(R_3) = 4.65\ A \text{ בכיוון מ-A ל-B}}$$

הסימן יצא חיובי, ולכן הזרם זורם בכיוון שהנחנו – מ-A ל-B. שימו לב שהמקור $E_2$ הוא שדוחף אותו: הוא מוסיף חמישה-עשר וולט לטובת המעבר, ובלעדיו היה הזרם זורם דווקא מ-B ל-A.

## אימות – מאזן ההספקים

נחשב את זרמי כל הענפים ונבדוק ששני הצדדים שווים:

fahed-lab.com · פרופ' נאנס

| ענף | זרם | הספק |
|---|---|---|
| $E_1$ ו-$R_1$ | 2.44 A ← כלפי מעלה | $R_1$: 11.87 W • $E_1$ 19.49 W מוסר |
| $R_2$ | 0.78 A | 2.44 W |
| $R_3$ ו-$E_2$ | 4.65 A ← מ-A ל-B | $R_3$: 108.33 W • $E_2$ 69.82 W מוסר |
| $R_4$ ו-$E_3$ | 1.94 A ← כלפי מטה | $R_4$: 9.42 W • $E_3$ 19.41 W מוסר |
| $R_5$ | 1.29 A ← כלפי מעלה | 6.62 W |
| $I_4$ ו-$I_5$ | 4 A ו-3 A | 9.38 W מוסרים ו-20.59 W |

```
סך הנצרך בנגדים = 138.69 W

סך הנמסר מחמשת המקורות = 138.69 W
```

**✓ המאזן נסגר בדיוק**

🧹 בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית – שני הצמתים, חמשת המקורות והמאזן.

פתד גאנם · fahed-lab.com

## שאלה 2 – מעגל מגנטי, שני סלילים וחריץ אוויר

**נתונים:** $40 \times 50$ cm • חתך ריבועי 2.5 cm • $L_1$: 900 כריכות, 30 Ω • $L_2$: 400 כריכות, 20 Ω • $U = 400$ V • $\mu_r = 800$

💡 **מבנה המעגל המגנטי:** ליבה מלבנית סגורה מחומר פרומגנטי. על הזרוע הימנית מלופף $L_1$ ועל השמאלית $L_2$, ושניהם מחוברים **במקביל** אל אותו מקור מתח ישר של 400 V. חתך הליבה ריבועי, וצלעו 2.5 ס"מ.

### סעיף א – המיאון המגנטי

**שטח החתך:** ריבוע שצלעו 2.5 ס"מ:

$$A = (2.5 \cdot 10^{-2})^2 = 6.25 \cdot 10^{-4}\ \text{m}^2$$

**אורך הקו האמצעי:** המידות שבאיור הן חיצוניות, והשדה המגנטי מתפתח לאורך **אמצע** החומר. בכל צלע מקצרים אפוא חצי עובי מכל קצה – כלומר עובי שלם, 2.5 ס"מ:

$$l = 2 \cdot (40 - 2.5) + 2 \cdot (50 - 2.5) = 75 + 95 = 170\ \text{cm}$$

**המיאון** הוא היחס בין אורך הדרך לבין המוליכות המגנטית של החומר בחתכו:

$$R_m = \frac{l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A} = \frac{1.7}{4\pi \cdot 10^{-7} \times 800 \times 6.25 \cdot 10^{-4}}$$

$$R_m = \frac{1.7}{6.283 \cdot 10^{-7}}$$

$$\boxed{R_m = 2.71 \cdot 10^{6}\ \text{A}^{-}\text{כריכות לוובר}}$$

💡 **ההקבלה שכדאי להחזיק בראש:** המיאון המגנטי הוא "ההתנגדות" של המעגל המגנטי, הכא"מ המגנטי הוא "המתח", והשטף הוא "הזרם". גם הנוסחה זהה בצורתה לנוסחת ההתנגדות – אורך חלקי מוליכות כפול שטח. כל מה שלמדתם על מעגלי זרם עובד כאן מילה במילה.

### סעיף ב – השטף בליבה וכיוונו

שני הסלילים מחוברים במקביל אל אותו מקור, ולכן זרמו של כל אחד נקבע מהתנגדותו שלו בלבד:

fahed-lab.com · פרופ׳ נאדם

$$I_1 = \frac{400}{30} = 13.33\ A \rightarrow F_1 = N_1 \cdot I_1 = 900 \times 13.33 = 12\ 000\ A\text{-כריכות}$$

$$I_2 = \frac{400}{20} = 20\ A \rightarrow F_2 = N_2 \cdot I_2 = 400 \times 20 = 8\ 000\ A\text{-כריכות}$$

**ועכשיו השאלה המכריעה: האם שני הכא"מים מחזקים זה את זה או מבטלים?** את זה קוראים מכיוון הליפוף שבאיור, ולא מן המספרים. בשני הסלילים מגיע החוט מן המקור אל ההדק **הפנימי** — זה שפונה אל חלון הליבה — ומשם הוא נכרך כלפי החוץ; שני הליפופים מצוירים כתמונת ראי זה של זה.

נפעיל את כלל יד ימין על כל סליל בנפרד: ב-$L_1$ שעל הזרוע הימנית השטף עולה כלפי מעלה, וב-$L_2$ שעל הזרוע השמאלית הוא יורד כלפי מטה. בליבה סגורה זו **אותה סיבוב** בדיוק — למעלה מימין, שמאלה בגג, למטה משמאל וימינה ברצפה. שני הסלילים דוחפים את השטף באותו מסלול:

$$F = F_1 + F_2 = 12\ 000 + 8\ 000 = 20\ 000\ A\text{-כריכות}$$

$$\Phi = \frac{F}{R_m} = \frac{20\ 000}{2.71 \cdot 10^6}$$

**בכיוון נגד כיוון השעון $\Phi = 7.39\ mWb$**

⚠️ **בדקו תמיד את כיוון הליפוף לפני שמחברים.** אילו היו שני הסלילים מלופפים באותו כיוון מרחבי — כלומר אילו שניהם היו דוחפים את השטף כלפי מעלה בזרוע שלהם — הם היו **מתנגדים** זה לזה, הכא"מ השקול היה ההפרש 12 000 − 8 000 = 4 000 ובלבד, והשטף היה יוצא 1.48 mWb בכיוון שמכתיב $L_1$ החזק יותר. אותה שאלה בדיוק, פי חמישה הבדל בתשובה. בציור מגנטי — הכיוון הוא חצי מן הפתרון.

💡 **בדיקת מציאות:** צפיפות השטף כאן היא Φ חלקי A, כלומר כ-11.8 טסלה. שום ברזל אינו מגיע לערך כזה — הוא רווי כבר סביב 1.8 עד 2 טסלה, ואז המחדירות היחסית צונחת ואינה 800. השאלה מניחה מחדירות קבועה מתוך בחירה, כדי לבדוק את החישוב ולא את המציאות; בתכנון אמיתי היו מגדילים את החתך או מקטינים את הכא"מ.

## סעיף ג — המיאון אחרי חריצת חריץ אוויר

חריץ באורך 1.5 מ"מ מוסיף למעגל "נגד" בטור. באוויר אין מחדירות יחסית, ולכן חלקו במכנה קטן פי 800:

tahed-lab.com · מתח נאנם

$$R_g = \frac{l_g}{\mu_0 \cdot A} = \frac{1.5 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7} \times 6.25 \cdot 10^{-4}} = 1.91 \cdot 10^6$$

$$R_{Fe} = \frac{1.7 - 0.0015}{6.283 \cdot 10^{-7}} = 2.70 \cdot 10^6$$

$$R_{tot} = 2.70 \cdot 10^6 + 1.91 \cdot 10^6$$

$$\mathbf{R_{tot} = 4.61 \cdot 10^6}$$

⚠️ **מילימטר וחצי של אוויר כמעט הכפיל את המיאון של מטר ושבעים של ברזל.** יחס האורכים הוא אחד למעל אלף, אבל יחס המחדירויות הוא 800 לטובת הברזל — ולכן החריץ הזעיר תופס 41 אחוזים מכלל המיאון. זו הסיבה שבמנועים ובשנאים נלחמים על כל עשירית מילימטר של מרווח אוויר.

## סעיף ד — מתח המקור שישמר את השטף המקורי

השטף נשאר אותו שטף, והמיאון גדל — ולכן דרוש כא"מ גדול יותר באותו יחס:

$$F_{new} = \Phi \cdot R_{tot} = 7.39 \cdot 10^{-3} \times 4.61 \cdot 10^6 = 34\,100 \text{ כריכות}\cdot\text{A}$$

שני הסלילים ניזונים מאותו מקור, ולכן הכא"מ הכולל פרופורציוני למתח:

$$F = U \cdot \left( \frac{N_1}{R_1} + \frac{N_2}{R_2} \right) = U \cdot (30 + 20) = 50 \cdot U$$

$$U_{new} = \frac{34\,100}{50}$$

$$\mathbf{U_{new} = 682 \text{ V}}$$

בדיקה: המתח גדל ביחס 682 ל-400, כלומר פי 1.705 — בדיוק היחס שבין המיאון החדש למיאון הישן ✓ ומכיוון שהיחס הזה אינו תלוי בשאלה אם הסלילים מחזקים או מבטלים זה את זה, התשובה לסעיף זה יוצאת 682 V בכל מקרה.

fahed-lab.com · פרופ' פאהד

💉 בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית – החריץ שגונב מחצית מן המיאון.

fahed-lab.com · פהד גאנם

## שאלה 3 – שני מקורות חילופין ומכשיר מדידה ביניהם

**נתונים:** $\bar{U}_1 = 12\angle 0°\ V \cdot \bar{U}_2 = 30\angle 0°\ V \cdot f = 100\ Hz \cdot R_1 = 2\ \Omega \cdot L = 0.01\ H \cdot R_2 = 4\ \Omega \cdot C = 1 \cdot 10^{-4}\ F$

💡 **מבנה המעגל:** הפס התחתון מוארק. מקור $U_1$ מחבר אותו ישירות אל הנקודה A, ומקור $U_2$ מחבר אותו ישירות אל הנקודה B. בין A ל-B יושבים אמפרמטר ו-$R_2$. מן A יורד ענף ובו L בטור עם $R_1$, ומן B יורד קבל.

⚠️ **שני מקורות אידאליים בלי נגד בטור – וכל הפתרון כבר בידכם.** מקור כזה מקבע את מתח הצומת שאליו הוא מחובר, ולכן $V_A = 12\angle 0°$ ו-$V_B = 30\angle 0°$ **מיד**, בלי משוואה אחת. כל שנותר הוא חוק אוהם על כל ענף בנפרד. אין כאן מערכת משוואות ואין צורך בשיטת החוגים.

### סעיף א – קריאת האמפרמטר

האמפרמטר יושב בענף שבין A ל-B, ובענף הזה יש רק את $R_2$. שני המתחים באותו מופע, ולכן ההפרש ביניהם ממשי לחלוטין:

$$I = \frac{U_1 - U_2}{R_2} = \frac{12 - 30}{4} = \frac{-18}{4} = -4.5\ A$$

**האמפרמטר יראה $4.5\ A$**

הסימן השלילי אומר רק שהזרם זורם בכיוון ההפוך להנחה – מ-B אל A, כלומר מן המקור החזק אל החלש. מכשיר מדידה מראה גודל, ולכן הקריאה היא 4.5 אמפר.

### סעיף ב1 – הזרם בסליל

הענף הזה תלוי אך ורק ב-$U_1$, מפני שקצהו האחר מוארק:

$$X_L = 2\pi \cdot f \cdot L = 2\pi \times 100 \times 0.01 = 6.28\ \Omega$$

$$\bar{Z}_L = 2 + j6.28 = 6.59\angle 72.34°\ \Omega$$

$$\bar{I}_L = \frac{12\angle 0°}{6.59\angle 72.34°}$$

fahed-lab.com · פתרון מלא

$$\bar{I}_L = 1.82\angle{-72.34^\circ}\ A = 0.55 - j1.73\ A$$

### סעיף ב2 – הזרם בקבל

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{628.3 \times 10^{-4}} = 15.92\ \Omega$$

$$\bar{I}_C = \frac{30\angle 0^\circ}{15.92\angle{-90^\circ}}$$

$$\bar{I}_C = 1.88\angle{+90^\circ}\ A = 0 + j1.88\ A$$

💡 **שני הזרמים כמעט זהים בגודלם ומנוגדים כמעט לחלוטין בזוויתם** – האחד מפגר ב-72°, השני מקדים ב-90°. לכן ההיגביות שלהם כמעט מבטלות זו את זו, וזה מה שיקבע את סימן ההספק ההיגבי בסעיף הבא.

### סעיף ג – משולש ההספקים של המעגל

ההספק הפעיל מתפתח בשני הנגדים בלבד:

$$P = I^2 \cdot R_2 + I_L^2 \cdot R_1 = 4.5^2 \times 4 + 1.82^2 \times 2 = 81 + 6.6$$

וההספק ההיגבי הוא ההפרש בין תרומת הסליל לתרומת הקבל:

$$Q = I_L^2 \cdot X_L - I_C^2 \cdot X_C = 20.8 - 56.5$$

$$P = 87.6\ W \cdot Q = -35.7\ var \cdot S = 94.6\ VA$$

במשולש: הצלע האופקית 87.6 W, הצלע האנכית 35.7 var **כלפי מטה** (המעגל קיבולי בסך הכול), והיתר 94.6 VA בזווית −22.2°.

⚠️ **המקור החלש עובד כצרכן.** אם תחשבו את ההספק של כל מקור בנפרד תגלו ש-$U_2$ מוסר 135 W ואילו $U_1$ **בולע** 47.4 W – כי הזרם באמפרמטר נכנס אליו מן הצד החיובי. בדיוק כך נטענת סוללה מדוללת מסוללה מלאה המחוברת אליה במקביל, וההפרש נשרף בנגד שביניהן. ההפרש 87.6 = 47.4 - 135 וואט – בדיוק ההספק שבשני הנגדים ✓

fahed-lab.com · פהד גאנם

💉 בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית – משולש ההספקים של שני המקורות.

fahed-lab.com · פהד גאנם

# שאלה 4 — סליל בטור ושני ענפים מקביליים

**נתונים:** $\overline{U} = 120\angle 0°$ V • $X_{L1} = 5\ \Omega$ • $R_1 = 3\ \Omega$ • $X_C = 4\ \Omega$ • $R_2 = 8\ \Omega$ • $X_{L2} = 6\ \Omega$

💡 **מבנה המעגל:** מן המקור יוצא ענף ראשי ובו הסליל $X_{L1}$, ובו זורם $I_1$. הענף מגיע לצומת שממנו יורדים שני ענפים מקביליים: הראשון $R_1$ בטור עם $X_C$ (הזרם $I_2$), והשני $R_2$ בטור עם $X_{L2}$ (הזרם $I_3$).

## סעיף א — העכבה השקולה

$$\overline{Z}_2 = 3 - j4 = 5\angle -53.13°\ \Omega$$

$$\overline{Z}_3 = 8 + j6 = 10\angle 36.87°\ \Omega$$

שני הענפים במקביל — מכפלה חלקי סכום:

$$\overline{Z}_p = \frac{5\angle -53.13° \times 10\angle 36.87°}{(3 + 8) + j(-4 + 6)} = \frac{50\angle -16.26°}{11 + j2}$$

$$\overline{Z}_p = \frac{50\angle -16.26°}{11.18\angle 10.30°} = 4.47\angle -26.57° = 4 - j2\ \Omega$$

ולבסוף מוסיפים בטור את הסליל הראשי:

$$\overline{Z} = j5 + (4 - j2) = 4 + j3$$

$$\overline{Z} = 5\angle 36.87°\ \Omega$$

💡 **שימו לב לצירוף היפה.** העכבה המקבילית יצאה **קיבולית** (4 – j2), והסליל שבטור לא רק ביטל את הקיבוליות אלא הפך את המעגל כולו להשראתי — 4 + j3, המשולש הפיתגורי הקלאסי שגודלו 5 בדיוק. הצירוף 3-4-5 חוזר כאן שלוש פעמים: בכל ענף ובעכבה הכוללת.

## סעיף ב — הזרמים

fahed-lab.com · פהד גאנם

$$\bar{I}_1 = \frac{120\angle 0^\circ}{5\angle 36.87^\circ} = 24\angle -36.87^\circ \text{ A}$$

המתח על הצומת המקבילי הוא הזרם הראשי כפול העכבה המקבילית:

$$\bar{U}_p = 24\angle -36.87^\circ \times 4.47\angle -26.57^\circ = 107.3\angle -63.43^\circ \text{ V}$$

$$\bar{I}_2 = \frac{107.3\angle -63.43^\circ}{5\angle -53.13^\circ} = 21.47\angle -10.30^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_3 = \frac{107.3\angle -63.43^\circ}{10\angle 36.87^\circ} = 10.73\angle -100.30^\circ \text{ A}$$

**$I_1 = 24\angle -36.87^\circ$ A · $I_2 = 21.47\angle -10.30^\circ$ A · $I_3 = 10.73\angle -100.30^\circ$ A**

אימות בחוק הזרמים: סכום שני זרמי הענפים הוא $14.4j - 19.2$, שגודלו 24 A וזוויתו $-36.87^\circ$ — בדיוק הזרם הראשי ✓

### סעיף ג — הדיאגרמה הווקטורית

מציבים את מתח המקור על הציר האופקי בזווית אפס. הזרם הראשי $I_1$ מפגר אחריו ב-$36.87^\circ$. שני זרמי הענפים יוצאים מקצה הווקטור המשותף: $I_2$ קרוב לאופק (מפגר רק ב-$10.3^\circ$, כי הענף שלו כמעט מקזז את עצמו), ו-$I_3$ צונח כמעט אנכית כלפי מטה (מפגר ב-$100.3^\circ$, כלומר הוא כבר מעבר לניצב). סכומם הווקטורי סוגר בדיוק על $I_1$.

### סעיף ד1 — ההספקים

$$P = U \cdot I_1 \cdot \cos\phi = 120 \times 24 \times \cos 36.87^\circ = 2880 \times 0.8$$

$$Q = U \cdot I_1 \cdot \sin\phi = 2880 \times 0.6$$

**$P = 2304$ W · $Q = 1728$ var · $S = 2880$ VA**

אימות מן הצד השני: בנגדים מתפתחים $21.47^2 \times 3 = 1383$ W ועוד $10.73^2 \times 8 = 921$ W, וסכומם 2304 W בדיוק ✓

### סעיף ד2 — משולש ההספקים

על הציר האופקי 2304 W, כלפי מעלה 1728 var (המעגל השראתי), והיתר 2880 VA בזווית $36.87^\circ$. כופל ההספק הוא 0.8 מפגר — היחס 3-4-5 שוב, הפעם בוואטים.

fahed-lab.com פהד גאנם

💉 בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית – שלושת הזרמים סביב מתח המקור.

fahed-lab.com · פהד גאנם

## שאלה 5 – חיישן אור, משווה ונורית

**נתונים:** $V$ 6 הזנת המגבר • $V$ 4 הזנת המחלק • $R_1 = R_2 = 10\ k\Omega$ • $R_4 = 50\ k\Omega$ • $V_{LED} = 1.5\ V$

💡 **מבנה המעגל:** מחלק מתח מ-4 V דרך $R_1$ ו-$R_2$ יוצר את מתח הייחוס בנקודה B, והוא מגיע אל הכניסה **ההופכת**. בענף השני מוזן חיישן האור LDR מ-4 V, ומתחת לו $R_4$ אל האדמה; הנקודה A שביניהם מגיעה אל הכניסה **הלא-הופכת**. המגבר עובד בלולאה פתוחה – כלומר כמשווה – ומוצאו מזין נורית דרך $R_3$.

### סעיף א – המתח בנקודה B

$$V_B = 4 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 4 \times \frac{10}{20}$$

$$\boxed{V_B = 2\ V}$$

### סעיף ב – באיזו עוצמת הארה נדלקת הנורית

הנורית נדלקת כשהמוצא גבוה, כלומר כאשר הכניסה הלא-הופכת עולה מעל ההופכת:

$$V_A > V_B = 2\ V$$

מתח הנקודה A נקבע ממחלק המתח שבין החיישן ל-$R_4$:

$$V_A = 4 \cdot \frac{R_4}{R_{LDR} + R_4} > 2$$

$$4 \times 50k > 2 \cdot (R_{LDR} + 50k) \rightarrow 200k > 2 \cdot R_{LDR} + 100k$$

$$\boxed{R_{LDR} < 50\ k\Omega}$$

fahed-lab.com · פרופ׳ פאהד

עכשיו נכנסים עם הערך הזה אל האופיין שבאיור ב'. הגרף יורד – ככל שההארה חזקה יותר כך התנגדות החיישן קטנה – ובנקודה שבה ההתנגדות היא 50 kΩ קוראים על הציר האופקי:

**ומעלה E = 2000 lx**

💡 **שימו לב לכיוון אי-השוויון.** התנאי על ההתנגדות הוא "קטן מ-50 kΩ", אבל התנאי על ההארה מתהפך ל"גדול מ-2000 lx" – מפני שהאופיין יורד. זו הטעות הנפוצה ביותר בשאלות חיישנים: מעתיקים את סימן אי-השוויון במקום להפוך אותו. שני ערכי בדיקה מן הגרף מספיקים כדי לוודא: ב-10 000 lx ההתנגדות היא 10 kΩ – בהחלט מתחת ל-50 – והנורית אכן דולקת.

## סעיף ג – ערכו של $R_3$

כשהמוצא גבוה הוא מגיע למתח ההזנה של המגבר, 6 V. על הנורית נופלים 1.5 V, וכל השאר על הנגד:

$$R_3 = \frac{6 - 1.5}{10\ \text{mA}} = \frac{4.5}{0.01}$$

**$R_3 = 450\ \Omega$**

בפועל היו בוחרים 470 Ω – הערך התקני הקרוב מסדרת E12 – והזרם היה יורד ל-9.6 mA, הבדל שאינו נראה לעין.

🧪 בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית – סף המשווה מול התנגדות ה-LDR.

fahed-lab.com · מת' פאנם

# שאלה 6 – בקרת הספק בטריאק בזווית 60°

**נתונים:** $R_L = 200\ \Omega$ • $V_{RMS} = 230\ V$ • $f = 50\ Hz$ • דופקי הצתה 3.33 msec אחרי כל חצייה

💡 **מבנה המעגל:** טריאק בטור עם העומס על רשת החילופין. יחידת בקרה מזינה את השער דרך הנגד R, וצורות הגלים של מתח הרשת ושל דופקי ההצתה נתונות באיור ב'. סמל הרכיב באיור – שני משולשים מנוגדים – הוא סמל הטריאק, המוליך **לשני הכיוונים**.

## סעיף א – צורות הגלים

**המתח על הרכיב, $V_{AB}$.** בכל חצי מחזור הרכיב חסום עד רגע ההצתה ומוליך אחריו. לכן הגרף מעתיק את מתח הרשת בקטע שלפני ההצתה, ומיד אחריה צונח לאפס עד החצייה הבאה. גם בחצי המחזור השלילי אותו דבר בדיוק, רק במראה.

**המתח על העומס, $V_{RL}$.** הוא המשלים המדויק: אפס עד רגע ההצתה, ומשם הוא מעתיק את מתח הרשת עד החצייה. מתקבלות "פרוסות" בשני חצאי המחזור – חלק חיובי וחלק שלילי – וזה מה שמבדיל טריאק מטיריסטור.

💡 **בדיקה שאסור לוותר עליה:** בכל רגע נתון חייב סכום שני הגרפים לתת בדיוק את מתח הרשת. אם ציירתם קטע שבו שניהם אפס, או שניהם נושאים מתח – יש טעות.

## סעיף ב – זווית ההצתה

מחזור שלם הוא 20 msec והוא מייצג 360°, ולכן כל מילישנייה שווה 18°:

$$\alpha = \frac{3.33}{10} \times 180^\circ$$

$$\boxed{\alpha = 60^\circ}$$

## סעיף ג – המתח היעיל על העומס

בבקרת **גל מלא** מקבל העומס שתי פרוסות בכל מחזור, ולכן במכנה עומד π ולא 2π:

fahed-lab.com · פתרונות

$$V_{RMS}(R_L) = V \cdot \sqrt{\left(\frac{\pi - \alpha + \frac{1}{2}\cdot\sin 2\alpha}{\pi}\right)}$$

עבור $\alpha = 60° = \frac{\pi}{3}$: $\frac{2.094 + 0.433}{3.1416} = 0.8045$

$V = 230 \times \sqrt{0.8045} = 230 \times 0.897$

$$\mathbf{V_{RMS}(R_L) = 206.3\ V}$$

## סעיף ד – ההספק על העומס

$$P = \frac{V_{RMS}^2}{R_L} = \frac{206.3^2}{200} = \frac{42\ 560}{200}$$

$$\mathbf{P(R_L) = 212.8\ W}$$

💡 **נקודת ייחוס:** בלי בקרה כלל היה העומס מקבל $230^2 \div 200 = 264.5$ W. זווית של 60° הורידה את ההספק רק ב-20 אחוזים – מפני שהיא חותכת דווקא את תחילת הגל, שם המתח הרגעי עדיין נמוך. לעומת זאת זווית של 90°, החותכת בשיא, כבר מורידה למחצית. זו הסיבה שעקומת הבקרה תלולה באמצע ושטוחה בקצוות, ושבקרת עומס עדינה עובדת סביב 90°.

🧪 בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית – צורת הגל בזווית שישים מעלות.

פתרונות · fahed-lab.com

## שאלה 7 – שלושה מגברי שרת בשרשרת

**נתונים:** $V_1 = 1\,V \cdot V_2 = 2\,V \cdot R_1 = 1\,k\Omega \cdot R_2 = 3\,k\Omega \cdot R_3 = 2\,k\Omega \cdot R_4 = 1\,k\Omega \cdot R_f = 2\,k\Omega$

💡 **מבנה המעגל:** $A_1$ מקבל את $V_1$ בכניסה הלא-הופכת, $R_1$ מוליך את הכניסה ההופכת אל האדמה ו-$R_2$ סוגר משוב. $A_2$ מקבל את $V_2$ בכניסה הלא-הופכת, ומוצאו מחובר **ישירות** בחזרה אל הכניסה ההופכת. שני המוצאים מגיעים דרך $R_3$ ו-$R_4$ אל הכניסה ההופכת של $A_3$, שכניסתו הלא-הופכת מוארקת ו-$R_f$ סוגר את משובו.

### סעיף א – תפקידו של כל מגבר

**$A_1$ – מגבר לא-הופך.** האות נכנס אל הכניסה החיובית, ולכן ההגבר חיובי וגדול מאחד. הוא מגביר את $V_1$ ואינו מעמיס את מקורו.

**$A_2$ – עוקב מתח.** המשוב מלא, בלי נגדים כלל, ולכן ההגבר הוא אחד בדיוק. תפקידו אינו להגביר אלא **לבודד**: הוא מציג למקור $V_2$ עכבה כמעט אינסופית, ומספק למעגל שאחריו מקור בעל עכבה כמעט אפסית.

**$A_3$ – מגבר מסכם הופך.** הוא אוסף את שני האותות דרך שני נגדי כניסה שונים, נותן לכל אחד משקל משלו לפי היחס בין נגד המשוב לנגד הכניסה שלו, וסוכם אותם בסימן הפוך.

### סעיף ב – מתחי המוצא של שני המגברים הראשונים

$$V_{o1} = V_1 \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = 1 \times (1 + 3)$$

$$V_{o2} = V_2 = 2\ V$$

$$\boxed{V_{o1} = 4\ V \cdot V_{o2} = 2\ V}$$

⚠️ **מדוע העוקב אינו מיותר.** אילו היה $V_2$ מחובר ישירות ל-$R_4$, היה זרם המבוא של המגבר המסכם נמשך מן המקור עצמו, וכל התנגדות פנימית שלו היתה מחלקת מתח ומקלקלת את התוצאה. העוקב מנתק בין שני העולמות: המקור אינו מרגיש דבר, והמסכם מקבל בדיוק 2 V. זהו התפקיד הקלאסי של מגבר בהגבר אחד, ובמבחן מבקשים בדיוק את ההסבר הזה.

### סעיף ג – מתח המוצא

במגבר מסכם הופך כל אות מקבל את היחס שבין נגד המשוב לנגד הכניסה שלו, והסכום מתהפך בסימן:

fahed-lab.com · פהד נאבם

$$V_o = -\left( \frac{R_f}{R_3} \cdot V_{o1} + \frac{R_f}{R_4} \cdot V_{o2} \right)$$

$$V_o = -\left( \frac{2}{2} \times 4 + \frac{2}{1} \times 2 \right) = -(4 + 4)$$

$$\mathbf{V_o = -8\ V}$$

💡 **שתי דרכים שונות לאותו משקל.** שני האותות תרמו למוצא בדיוק ארבעה וולט כל אחד – אבל מסיבות הפוכות: הראשון הוא אות גדול (4 V) שקיבל הגבר 1, והשני אות קטן (2 V) שקיבל הגבר 2. במגבר מסכם אפשר לתת לכל ערוץ משקל משלו פשוט על ידי בחירת נגד הכניסה שלו, וזה בדיוק מה שהופך אותו לרכיב היסוד של מערבל קול ושל ממיר דיגיטלי-אנלוגי.

🧪 בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית – שלושת המגברים והמסכם שבסוף.

fahed-lab.com · פתרונות

## שאלה 8 – רשת מאנכת ותגובתה לדופק

**נתונים:** R = 10 kΩ • C = 0.1 μF • דופק 5 V בין 0 ל-1 msec

💡 **מבנה המעגל:** נגד בטור עם המבוא, וקבל במקביל למוצא. בתדר אפס הקבל חוסם, כל האות נופל עליו והמוצא שווה למבוא; בתדר גבוה עכבתו שואפת לאפס והיא מקצרת את המוצא. זוהי רשת **מעבירת נמוכים**, ובמישור הזמן – מעגל **מאנך**.

⚠️ **המוצא כאן הוא מתח הקבל, ולכן הוא לעולם אינו קופץ.** מטען אינו יכול להופיע ברגע אחד, ולכן הגרף חייב לצאת רציף לגמרי – שתי עקומות מעריכיות המתחברות זו לזו בלי אף קפיצה אנכית. אם ציירתם קפיצה, בניתם בטעות רשת גוזרת.

### סעיף א – צורת מתח המוצא

$$\tau = R \cdot C = 10 \cdot 10^{3} \times 0.1 \cdot 10^{-6} = 1 \text{ msec}$$

**בין 0 ל-1 msec** – המבוא הוא 5 V והקבל נטען לעברם. משך הדופק הוא בדיוק **קבוע זמן אחד**, ולכן הקבל מספיק להגיע ל-63 אחוזים בלבד ולא ל-5 V מלאים.

**אחרי 1 msec** – המבוא חוזר לאפס, והקבל מתפרק דרך הנגד מן הערך שאליו הגיע, שוב בקבוע זמן של מילישנייה.

### סעיף ב1 – מתח המוצא ברגע 0.5 msec

$$V_{out}(t) = 5 \cdot (1 - e^{-t/\tau})$$

$$V_{out}(0.5) = 5 \cdot (1 - e^{-0.5}) = 5 \times 0.3935$$

$$\boxed{V_{out}(0.5 \text{ msec}) = 1.97 \text{ V}}$$

### סעיף ב2 – מתח המוצא ברגע 1.5 msec

תחילה נמצא את הערך שאליו הגיע הקבל בסוף הדופק, שממנו מתחילה הפריקה:

faheg-lab.com · פתרונות

$$V_{out}(1) = 5 \cdot (1 - e^{-1}) = 5 \times 0.632 = 3.16\ V$$

$$V_{out}(t) = 3.16 \cdot e^{-(t-1)/\tau}$$

$$V_{out}(1.5) = 3.16 \times 0.6065$$

$$\mathbf{V_{out}(1.5\ msec) = 1.92\ V}$$

### סעיף ג – המתח על הנגד ברגע 0.5 msec

הנגד והקבל בטור, ולכן שני המתחים מסתכמים תמיד למתח המבוא:

$$V_R = V_{in} - V_{out} = 5 - 1.97$$

$$\mathbf{V_R(0.5\ msec) = 3.03\ V}$$

### סעיף ד – מה יקרה אם יקטינו מאוד את שני הרכיבים

קבוע הזמן הוא מכפלת השניים, ולכן הקטנת שניהם מקטינה אותו פי כמה וכמה:

**המוצא יעקוב אחרי המבוא כמעט במדויק – דופק מרובע כמעט**

כשקבוע הזמן קטן בהרבה ממשך הדופק, הקבל מספיק להיטען כמעט מיד עם עליית המבוא ולהתרוקן כמעט מיד עם ירידתו. הגרף שיתקבל הוא מלבן שפינותיו מעוגלות מעט בלבד, וככל שיקטינו יותר כך יתקרב לצורת המבוא.

💡 **וזו בדיוק המשמעות בתדר:** הקטנת קבוע הזמן מעלה את תדר החיתוך של הרשת. הדופק המרובע בנוי מהרמוניות רבות, וכאשר תדר החיתוך עולה מעליהן – כולן עוברות, והצורה נשמרת. רשת מעבירת נמוכים "מעגלת פינות" רק כשתדר החיתוך שלה נמוך מספיק כדי לחסום את ההרמוניות הגבוהות.

🧪 בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית – הטעינה וההמשך אחרי הדופק.

fahed-lab.com - פרד גאנם

## שאלות 9–10 – אנגלית טכנית

שתי השאלות האחרונות נשענות על קטעי קריאה באנגלית: שאלה 9 עוסקת ב**תאים פוטו-וולטאיים** – יתרונות השדות הסולריים, במה תלוי ההספק המופק מן התאים, המרכיבים העיקריים של תחנה פוטו-וולטאית, ואיזה אחוז מן האנרגייה הסולרית נשמר כאנרגייה חשמלית; ושאלה 10 ב**בקר מתוכנת** – מרכיבי יחידת העיבוד המרכזית, עקרון פעולתה, הגדרת זמן הסריקה ובמה הוא תלוי, ותכונות הבקר המתוכנת ויתרונותיהן. הנבחן עונה על אחת מהן בלבד.

💡 **שלושה כללים שמזכים בניקוד המלא:** עונים **בעברית** ולא באנגלית; מסתמכים **רק על הכתוב בקטע** ולא על ידע כללי; ולכל סעיף מציינים את **מספרי השורות** שעליהן מבוססת התשובה – סעיף בלי מספרי שורות מאבד ניקוד גם אם תוכנו נכון.

שימו לב שסעיף המבקש הגדרה – למשל "הגדר את זמן הסריקה" – דורש משפט הגדרה שלם ואחריו הגורמים שבהם הוא תלוי, ולא רק ציון של מספר. מכיוון שהתשובות נגזרות ישירות מנוסח הקטעים, אין כאן פתרון מספרי לצטט: עברו על הקטע, סמנו בו את השורות הרלוונטיות לכל סעיף, וכתבו תשובה קצרה ומדויקת המפנה אליהן.

fahed-lab.com · מעבדת פאהד