# הצעה לפתרון מלא – חשמל ואלקטרוניקה לטכנאים

בחינת גמר • אביב תשע"ח 2018 • 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"ח 2018. 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

## שאלה 1 – הרכבה, שני מקורות זרם ומאזן הספקים

**נתונים:** $U = 20\ V$ • $R_1 = 10\ k\Omega$ • $R_2 = 2\ k\Omega$ • $R_3 = 18\ k\Omega$ • מקורות זרם 10 mA ו־5 mA

💡 **מבנה המעגל:** שני צמתים בלבד – $V_x$ ו־$V_y$ – מעל פס אדמה. מקור המתח U יושב בין $V_x$ לאדמה **בלי נגד בטור**, ומן $V_x$ יורד $R_1$ לאדמה. בין שני הצמתים יושב $R_2$, ומעליו ענף שני ובו מקור הזרם 10 mA המזרים מן $V_x$ אל $V_y$. מן $V_y$ יורד $R_3$ לאדמה (הזרם $I_o$), ומימין מזרים מקור של 5 mA מן האדמה אל $V_y$.

### סעיף א – הזרם $I_o$ בשיטת ההרכבה

בשיטת ההרכבה מפעילים כל מקור לבדו ומנטרלים את האחרים: מקור מתח מוחלף בקצר, ומקור זרם – בניתוק.

**תרומה ראשונה – רק מקור המתח.** שני מקורות הזרם מנותקים, ולכן הענף העליון והענף הימני נעלמים. נשארת שרשרת אחת: $R_2$ בטור עם $R_3$ על פני 20 V ($R_1$ מקביל למקור ואינו משפיע על הזרם הזה):

$$I_o' = \frac{U}{R_2 + R_3} = \frac{20}{2k + 18k} = \frac{20}{20k} = 1\ mA$$

**תרומה שנייה – רק מקור ה־10 mA.** מקור המתח מקוצר, ולכן $V_x$ יורד לאפס ו־$R_1$ מקוצר יחד איתו. עשרת המיליאמפרים נכנסים לצומת $V_y$ ומתחלקים בין שני נגדים שיושבים עתה במקביל – $R_3$ לאדמה, ו־$R_2$ אל הצומת המקוצר:

$$I_o'' = 10 \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_3} = 10 \times \frac{2}{20} = 1\ mA$$

**תרומה שלישית – רק מקור ה־5 mA.** אותו מעגל בדיוק, ורק הזרם קטן במחצית:

$$I_o''' = 5 \times \frac{2}{20} = 0.5\ mA$$

$$I_o = 1 + 1 + 0.5$$

fahed-lab.com · פרופ' נאשם

$$I_o = 2.5\ mA$$

💡 **שימו לב לתרומה השנייה והשלישית.** בשתיהן שני הנגדים חולקים את הזרם ביחס **הפוך** להתנגדותם, ולכן דווקא $R_2$ הקטן הוא שקובע כמה עובר ב-$R_3$ הגדול. חלוקת זרם היא תמיד ביחס הפוך – זו הטעות הנפוצה ביותר בסעיף מסוג זה.

## סעיף ב – הפוטנציאלים בצמתים

הצומת $V_x$ מחובר אל מקור המתח האידאלי ישירות, בלי אף נגד בדרך, ולכן מתחו ידוע מיד:

$$V_x = U = 20\ V$$

את $V_y$ נקבל מן הזרם שכבר חושב, שכן כל $I_o$ עובר ב-$R_3$ אל האדמה:

$$V_y = I_o \cdot R_3 = 2.5 \cdot 10^{-3} \times 18 \cdot 10^{3}$$

$$V_x = 20\ V \cdot V_y = 45\ V$$

אימות בחוק הזרמים בצומת $V_y$: נכנסים 10 mA ועוד 5 mA מן המקורות, ויוצאים 12.5 mA דרך $R_2$ (מ-$V_y$ אל $V_x$, מפני ש-$V_y$ גבוה יותר) ועוד 2.5 mA דרך $R_3$ – סך הכול 15 mA לכל צד ✓

## סעיף ג – ההספק הכולל הנמסר למעגל

הספק נמסר על ידי רכיב שהזרם יוצא ממנו בקוטב החיובי. נבדוק את שלושת המקורות אחד-אחד.

**מקור ה-10 mA** – המתח על הדקיו הוא הפרש הפוטנציאלים בין קצותיו, והוא דוחף את הזרם אל הצומת **הגבוה** יותר:

$$P_{10} = 10\ mA \times (V_y - V_x) = 10 \times 25 = 250\ mW$$

**מקור ה-5 mA** – הוא מזרים כלפי מעלה אל צומת שמתחו 45 V:

$$P_5 = 5\ mA \times V_y = 5 \times 45 = 225\ mW$$

fahed-lab.com · פתרון בעברית

**ההספק הנמסר למעגל = 250 + 225 = 475 mW**

⚠️ **ומה עם מקור המתח? הוא אינו מוסר הספק – הוא בולע אותו.** נכתוב את חוק הזרמים בצומת $V_x$: יוצאים ממנו 2 mA דרך $R_1$ ועוד 10 mA אל מקור הזרם, ונכנסים אליו 12.5 mA דרך $R_2$. הסכום כבר סגור, ולכן מן המקור זורם **פנימה** חצי מיליאמפר. הזרם נכנס אל הקוטב החיובי, וזהו בדיוק מצב של צרכן.

נבלעים במקור $P_U = 20 \times 0.5\ mA = 10\ mW$

## סעיף ד – הוכחת מאזן ההספקים

נחשב את ההספק המתפתח על כל נגד ונסכום:

$$P(R_1) = \frac{20^2}{10k} = 40\ mW$$

$$P(R_2) = \frac{25^2}{2k} = 312.5\ mW$$

$$P(R_3) = \frac{45^2}{18k} = 112.5\ mW$$

$$\text{נצרך} = 40 + 312.5 + 112.5 + 10 = 475\ mW$$

$$\text{נמסר} = 250 + 225 = 475\ mW$$

**✓ שני הצדדים שווים – מאזן ההספקים מתקיים**

💡 **המסקנה החינוכית:** מקור מתח אינו חייב למסור הספק. כאן שני מקורות הזרם דוחפים את הצומת $V_y$ אל 45 V – הרבה מעל העשרים של המקור – ולכן זרם קטן נדחף חזרה אל תוך המקור. במאזן ההספקים מקור כזה נספר בצד **הנצרך**, בדיוק כמו נגד. זה מה שקורה בסוללה בזמן טעינה.

🧪 בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית – שלושת המקורות ומאזן ההספקים.

fahed-lab.com · פרופ' פאהד נאנם

## שאלה 2 – מקור זרם תלוי

**נתונים:** $I_S = 9\ A$ • $R_1 = 12\ \Omega$ • $R_2 = 5\ \Omega$ • $R_3 = 10\ \Omega$ • מקור תלוי $3I$

💡 **מבנה המעגל:** מקור זרם בלתי-תלוי של $9\ A$ מזרים כלפי מעלה, עובר דרך $R_1$ ומגיע אל הצומת A. מן הצומת יורדים לפס התחתון שלושה ענפים מקביליים: $R_2$ (ובו הזרם $I$), $R_3$, ומקור זרם **תלוי** שעוצמתו $3I$ ומזרים כלפי מטה.

⚠️ **המקור התלוי אינו נתון – הוא נעלם.** אי אפשר להציב את ערכו כמספר, מפני שהוא נשען על הזרם $I$ שאותו עדיין לא יודעים. הדרך היחידה היא לכתוב את חוק הזרמים בצומת ולהשאיר את $I$ כנעלם, ולזכור שגם $I$ עצמו הוא $V_A$ חלקי $R_2$.

### סעיף א – חוק הזרמים בצומת A

נכנס לצומת זרם אחד, ויוצאים ממנו שלושה:

$$I_S = I + \frac{V_A}{R_3} + 3I$$

ומכיוון ש-$I = \frac{V_A}{R_2}$:

$$9 = \frac{V_A}{5} + \frac{V_A}{10} + \frac{3V_A}{5}$$

נכפול את שני האגפים בעשר ונאסוף:

$$90 = 2V_A + V_A + 6V_A = 9V_A$$

$$\boxed{V_A = 10\ V \cdot I = 2\ A \cdot 3I = 6\ A}$$

💡 **שאלת בדיקה קטנה:** היכן נכנס $R_1$ לחשבון? בשום מקום. הוא יושב **בטור עם מקור זרם אידאלי**, וזרמו של מקור כזה נקבע מראש – תשעה אמפרים, יהיה $R_1$ אשר יהיה. לכן $V_A$ ייצא $10\ V$ גם אם $R_1$ ישתנה למאה אוהם. את $R_1$ נצטרך רק בסעיף הבא, כשנשאל מהו המתח **על המקור עצמו**.

fahed-lab.com · פרופ' פאהד

### סעיף ב – המתח על מקור הזרם הבלתי-תלוי

נטפס מן הפס התחתון אל הצומת A דרך המקור ודרך $R_1$. המתח שעל המקור הוא ההפרש בין מתח A לבין המפל שעל $R_1$:

$$U_S = V_A + I_S \cdot R_1 = 10 + 9 \times 12 = 10 + 108$$

$$U_S = 118\ V$$

ההספק שהמקור מוסר: $9 \times 118 = 1062\ W$. רובו המכריע – 972 W – נבלע ב-$R_1$ עצמו, וזו דוגמה יפה לכך שנגד בטור עם מקור זרם הוא בזבזן גדול.

### סעיף ג – המתח על מקור הזרם התלוי

המקור התלוי מחובר ישירות בין הצומת A לבין הפס התחתון, ולכן המתח על הדקיו הוא פשוט מתח הצומת:

$$U_{dep} = V_A = 10\ V$$

הזרם בו הוא 6 A והוא זורם כלפי מטה – כלומר נכנס מן הקוטב החיובי – ולכן המקור התלוי **בולע** הספק:

$$P_{dep} = 10 \times 6 = 60\ W \text{ נבלעים}$$

### אימות – מאזן ההספקים

$$P(R_1) = 9^2 \times 12 = 972\ W$$

$$P(R_2) = 2^2 \times 5 = 20\ W \cdot P(R_3) = \frac{10^2}{10} = 10\ W$$

$$972 + 20 + 10 + 60 = 1062\ W = P_S$$

**✓ המאזן נסגר בדיוק**

🧪 בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית – המקור התלוי שגדל עם הזרם שהוא מייצר.

fahed-lab.com פהד נאנם

## שאלה 3 – ארבעה ענפים מקביליים ומתירויות

**נתונים:** $V_i(t) = 120\cdot\sin(600t + 30°)$ V • $R_1 = 10\ \Omega$ • $L_1 = 10$ mH • $C = 140\ \mu$F • $R_2 = 6\ \Omega$ • $L_2 = 15$ mH

💡 **מבנה המעגל:** ארבעה ענפים מקביליים על פני אותו מקור – $R_1$ בטור עם $L_1$ (הזרם $I_1$), קבל לבדו, $R_2$ לבדו, וסליל $L_2$ לבדו. מבנה מקבילי טהור הוא בדיוק המקרה שבו כדאי לעבוד ב**מתירויות** ולא בעכבות: מתירויות מקבילות פשוט נסכמות.

⚠️ **המספר 120 הוא משרעת, לא ערך יעיל.** כל חישובי הזרמים וההספקים נעשים בערכים יעילים, ולכן קודם כול מחלקים בשורש שתיים: $U = 84.85\angle 30°$ V.

### סעיף א1 – המתירות של כל ענף

נחשב תחילה את הריאקטנסים בתדר הזוויתי 600 רדיאן לשנייה:

$$X_{L1} = \omega\cdot L_1 = 600 \times 0.01 = 6\ \Omega$$

$$X_{L2} = \omega\cdot L_2 = 600 \times 0.015 = 9\ \Omega$$

$$X_C = \frac{1}{\omega\cdot C} = \frac{1}{600 \times 140 \cdot 10^{-6}} = 11.9\ \Omega$$

ועכשיו המתירות של כל ענף – ההופכי של העכבה:

$$\overline{Y}_1 = \frac{1}{10 + j6} = \frac{10 - j6}{136} = 73.5 - j44.1\ \text{mS}$$

$$\overline{Y}_C = j\omega\cdot C = +j84\ \text{mS}$$

$$\overline{Y}_{R2} = \frac{1}{6} = 166.7\ \text{mS}$$

$$\overline{Y}_{L2} = \frac{1}{j9} = -j111.1\ \text{mS}$$

💡 **שני סימנים שכדאי לקבע בזיכרון:** מתירות של קבל היא **חיובית** מדומה, ומתירות של סליל היא **שלילית** מדומה – הפוך בדיוק מן העכבות. הסיבה פשוטה: היפוך של $+j$ נותן $-j$.

faned-lab.com · פנד-לאב

## סעיף א2 – המתירות השקולה

במקבילי מסכמים מתירויות, ותו לא:

$$\bar{Y} = (73.5 + 166.7) + j(-44.1 + 84 - 111.1)$$

$$\bar{Y} = 240.2 - j71.2\ mS = 250.5\angle -16.52°\ mS$$

$$\bar{Y} = 250.5\angle -16.52°\ mS \cdot \bar{Z} = 3.99\angle 16.52°\ \Omega$$

הסימן השלילי בחלק המדומה של המתירות מעיד על מעגל **השראתי** – הסליל $L_2$ גובר על הקבל – ולכן הזרם הכולל מפגר אחרי המתח.

## סעיף ב1 – הזרם בכל ענף

במעגל מקבילי המתח משותף לכולם, ולכן די להכפיל אותו בכל מתירות:

$$I_1 = U \cdot \bar{Y}_1 = 84.85\angle 30° \times 85.75\angle -30.96°\ mS = 7.28\angle -0.96°\ A$$

$$I_C = 84.85\angle 30° \times 84\angle 90°\ mS = 7.13\angle 120°\ A$$

$$I_{R2} = 84.85\angle 30° \times 166.7\angle 0°\ mS = 14.14\angle 30°\ A$$

$$I_{L2} = 84.85\angle 30° \times 111.1\angle -90°\ mS = 9.43\angle -60°\ A$$

$$I = U \cdot \bar{Y} = 84.85\angle 30° \times 250.5\angle -16.52°\ mS$$

$$I = 21.26\angle 13.48°\ A$$

אימות בחוק הזרמים: סכום ארבעת הזרמים בצורה מלבנית הוא $20.67 + j4.96$, שגודלו $21.26\ A$ וזוויתו $13.48°$ – בדיוק הזרם הכולל ✓

## סעיף ב2 – הדיאגרמה הפאזורית

נצייר את U כפאזור ייחוס בזווית $30°$, וסביבו את ארבעת הזרמים:

**$I_{R2}$** – במופע אחד עם המתח, בדיוק $30°$, והארוך מבין ארבעת ענפי המשנה.

**$I_C$** – מקדים את המתח ב-$90°$ ומצביע אל $120°$.

fahed-lab.com פתר באים

**$I_{L2}$** – מפגר אחרי המתח ב-90° ומצביע אל −60°, הפוך בדיוק ל-$I_C$.

**$I_1$** – מפגר אחרי המתח בכ-31° בלבד, מפני שבענף שלו יש נגד גדול לצד סליל קטן.

סכום הווקטורים נותן את $I$, המפגר אחרי המתח ב-16.5° – הזווית של העכבה השקולה.

## סעיף ג – מה יקרה ל-$I_1$ בתדר 300 רדיאן לשנייה

**הזרם $I_1$ יגדל**

**הנימוק.** הענף הראשון הוא נגד וסליל בטור. הנגד אינו תלוי בתדר, אבל ריאקטנס הסליל **יורד** כשהתדר יורד:

$$X_{L1}(300) = 300 \times 0.01 = 3\ \Omega$$

$$|\bar{Z}_1| = \sqrt{(10^2 + 3^2)} = 10.44\ \Omega \text{ במקום } 11.66\ \Omega$$

$$I_1 = \frac{84.85}{10.44} = 8.13\ A \text{ במקום } 7.28\ A$$

💡 **למה מותר לענות בלי לחשב מחדש את כל המעגל:** הענפים מקביליים, ולכן המתח על כל אחד מהם הוא מתח המקור – ללא תלות בשאר הענפים. שינוי בתדר משנה את הריאקטנסים של כולם, אבל הזרם בענף מסוים נקבע אך ורק מן העכבה של **אותו** ענף. זו התכונה שהופכת מעגל מקבילי לנוח כל כך לניתוח.

💉 בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית – ארבעה פאזורים והסכום שלהם.

fahed-lab.com · מתד נאנם

## שאלה 4 – שלושה צרכנים תלת-מופעיים ותיקון כופל ההספק

**נתונים:** $U_n = 400\ V$ (כוכב) • $f = 50\ Hz$ • $\bar{Z}_1 = 8 + j6\ \Omega$ (כוכב) • $\bar{Z}_2 = 10 + j10\ \Omega$ (משולש) • $\bar{Z}_3 = -j12\ \Omega$

💡 **מבנה המערכת:** שלושה צרכנים מחוברים במקביל אל אותה רשת. צרכן 1 וצרכן 3 מחוברים ב**כוכב** – שלוש עכבות שקצה אחד שלהן משותף – וצרכן 2 מחובר ב**משולש**. המתח הנקוב 400 V הוא מתח **קווי**, ולכן מתח המופע הוא 400 חלקי שורש שלוש.

### סעיף א – הזרמים

$$U_{ph} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230.9\ V$$

**צרכן 1** – כוכב, ולכן על כל עכבה יושב מתח מופע והזרם בה הוא זרם הקו:

$$|\bar{Z}_1| = \sqrt{(8^2 + 6^2)} = 10\ \Omega\ \angle 36.87°$$

$$I_1 = \frac{230.9}{10\angle 36.87°} = 23.09\angle -36.87°\ A$$

**צרכן 2** – משולש. נמיר אותו לכוכב שקול על ידי חלוקה בשלוש, וכך נשווה את שלושת הצרכנים באותה שפה:

$$\bar{Z}_{2Y} = \frac{10 + j10}{3} = 3.33 + j3.33 = 4.714\angle 45°\ \Omega$$

$$I_2 = \frac{230.9}{4.714\angle 45°} = 48.99\angle -45°\ A$$

**צרכן 3** – קבל טהור בכוכב. הזרם בקבל **מקדים** את המתח ברבע מחזור:

$$I_3 = \frac{230.9}{12\angle -90°} = 19.25\angle +90°\ A$$

הזרם הכולל הוא הסכום הווקטורי של השלושה. נפרק כל אחד לרכיביו:

faned-lab.com · פתר נאנם

$I_1 = 18.48 - j13.86 \cdot I_2 = 34.64 - j34.64 \cdot I_3 = 0 + j19.25$

$I = 53.12 - j29.25$

$$I = 60.64\angle{-28.84^\circ}\ A$$

⚠️ **שימו לב לזרם הקבל.** אף שגודלו 19.25 A, הוא כמעט אינו מגדיל את הזרם הכולל — אלא **מקטין** אותו, מפני שהוא הפוך בכיוונו לרכיב המדומה של שני הצרכנים האחרים. בלי צרכן 3 היה הזרם הכולל יוצא 73.5 A במקום 60.6 A. זה כל הרעיון של תיקון כופל ההספק.

## סעיף ב1 — ההספקים

במערכת מאוזנת ההספק הוא פי שלושה מן ההספק המופעי:

$P = 3 \cdot U_{ph} \cdot I \cdot \cos\phi = 3 \times 230.9 \times 53.12$

$Q = 3 \cdot U_{ph} \cdot I \cdot \sin\phi = 3 \times 230.9 \times 29.25$

$$P = 36.8\ kW \cdot Q = 20.27\ kvar \cdot S = 42.01\ kVA$$

אימות לפי צרכנים — כל אחד לחוד ואז סכימה:

| צרכן | הספק פעיל | הספק היגבי |
|---|---|---|
| צרכן 1 (כוכב) | 12.8 kW | +9.6 kvar |
| צרכן 2 (משולש) | 24.0 kW | +24.0 kvar |
| צרכן 3 (קבל) | 0 | −13.33 kvar |
| **סך הכול** | **36.8 kW** | **+20.27 kvar** |

שתי הדרכים נותנות אותו דבר בדיוק ✓

## סעיף ב2 — משולש ההספקים

על הציר האופקי מסמנים את ההספק הפעיל 36.8 kW, ומקצהו כלפי מעלה את ההספק ההיגבי 20.27 kvar. היתר המחבר את הראשית אל קצה הסימון הוא ההספק המדומה 42.01 kVA, והזווית שבינו לבין הציר האופקי היא 28.84°,

fahed-lab.com · פהד גאנם

שהקוסינוס שלה – כופל ההספק – הוא 0.876 מפגר.

### סעיף ג – הקיבול שיביא את המקור למסור הספק ממשי בלבד

המקור ימסור הספק ממשי בלבד כאשר ההספק ההיגבי הכולל יתאפס. הקבל של צרכן 3 צריך אפוא לספוג את כל ההיגביות של שני האחרים:

$$Q_3 = -(9.6 + 24) = -33.6 \text{ kvar} \quad \text{במקום} \quad -13.33 \text{ kvar}$$

מכאן הריאקטנס הדרוש, ומן הריאקטנס – הקיבול:

$$X_C = \frac{3 \cdot U_{ph}^2}{Q_3} = \frac{3 \times 230.9^2}{33\,600} = 4.76\ \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{314.16 \times 4.76}$$

$$\mathbf{C = 668\ \mu F \quad \text{במקום} \quad 265\ \mu F}$$

💡 **מה בעצם נדרש כאן:** להגדיל את הקבל הקיים פי שניים וחצי. אז יירד הזרם הכולל מ-60.6 A ל-53.1 A – 12 אחוזים פחות – בלי לשנות ולו וואט אחד של הספק שימושי. זו הסיבה שחברת החשמל מחייבת מפעלים על כופל הספק נמוך: הזרם העודף מחמם את הקווים ואינו מייצר דבר.

🧪 בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית – שלושת הצרכנים והקבל המתקן.

fahed-lab.com · פתח גאנם

## שאלה 5 – זיהוי רכיב ההצתה מתוך צורות הגלים

**נתונים:** $R_L = 100\ \Omega$ • $V_i = 230$ V יעיל • 20 msec מחזור • דופקים ב-2.5, 12.5, 22.5, 32.5 msec

💡 **מבנה המעגל:** מקור חילופין, עומס $R_L$ ורכיב הצתה בטור. יחידת בקרה מזינה את שער הרכיב דרך $R_G$ בדופקים קצרים, וצורות הגלים של המבוא, של דופקי ההצתה ושל מתח העומס נתונות באיור.

### סעיף א – SCR או TRIAC

נקרא את שלושת הגרפים זה מול זה. המחזור הוא 20 msec, ולכן חצי מחזור הוא 10 msec והתדר 50 הרץ.

**דופקי ההצתה** מגיעים כל 10 msec – כלומר **בשני חצאי המחזור**, גם בחיובי וגם בשלילי, כל אחד 2.5 msec אחרי תחילת חצי המחזור שלו. במעלות זו זווית הצתה של 45°.

**מתח העומס**, לעומת זאת, מופיע רק בחצאי המחזור **החיוביים** – בין 2.5 ל-10 msec ובין 22.5 ל-30 msec. בחצאי המחזור השליליים העומס מת לגמרי, אף שהוא קיבל שם דופק הצתה.

**רכיב ההצתה הוא SCR (טיריסטור)**

⚠️ **זהו לב השאלה.** טריאק מוליך לשני הכיוונים, ולכן דופק בחצי המחזור השלילי היה מפעיל אותו והעומס היה מקבל גם את החלק השלילי. טיריסטור מוליך מן האנודה אל הקתודה בלבד; בחצי המחזור השלילי האנודה שלילית והוא חסום, והדופקים ב-12.5 וב-32.5 הם **דופקי סרק**. הבקרה משדרת אותם מפני שהיא בנויה לשמש גם לטריאק – הרכיב הוא שקובע מה ייצא.

### סעיף ב – צורת המתח על רכיב ההצתה

הלולאה היחידה במעגל נותנת את $V_{AB}$ ישירות:

$$V_{AB}(t) = V_i(t) - V_{RL}(t)$$

**בין 0 ל-2.5 msec** – הרכיב עדיין חסום, אין זרם, ואין מפל על העומס. כל מתח המקור נופל על הרכיב, והגרף עולה עם הסינוס עד לערך הרגעי שבזווית 45°, שהוא כ-230 V.

**בין 2.5 ל-10 msec** – הרכיב מוליך, מתנהג כמו קצר, והמתח עליו צונח לאפס.

fahedLab.com פתרונות

**בין 10 ל-20 msec** – חצי המחזור השלילי. הרכיב חסום ובולם את כל המתח ההפוך, ולכן הגרף מעתיק את כל חצי הגל השלילי במלואו, עד שיא של 325 V–.

> 💡 **שתי בדיקות שכדאי לעשות לגרף לפני שמגישים:** ראשית, בכל רגע חייבים שני הגרפים – מתח העומס ומתח הרכיב – להסתכם בדיוק במתח המקור. שנית, לרכיב חסום מגיע כל המתח, ולרכיב מוליך אפס; אין מצב ביניים. השטח השלילי בגרף הוא זה שקובע את דירוג מתח החסימה ההפוך של הטיריסטור.

## סעיף ג – ההספק המתפתח על העומס

בבקרת חצי גל בזווית α הערך היעיל של מתח העומס הוא:

$$V_L = V_i \cdot \sqrt{\left(\frac{\pi - \alpha + \frac{1}{2}\cdot\sin 2\alpha}{2\pi}\right)}$$

$$\text{עבור } \alpha = 45°: \quad \frac{2.356 + 0.5}{6.283} = 0.4546$$

$$V_L = 230 \times \sqrt{0.4546} = 230 \times 0.674 = 155.1 \text{ V}$$

$$P = \frac{V_L^2}{R_L} = \frac{155.1^2}{100} = \frac{24\ 047}{100}$$

$$\boxed{P(R_L) = 240.5 \text{ W}}$$

אימות מן הנוסחאון: היחס בין מתח העומס למתח הרשת יוצא 0.674 – וזה בדיוק הערך שקוראים בגרף "בקרת הספק עבור חצי מחזור" מעל הזווית 45° ✓

> 💡 **נקודת ייחוס:** בלי בקרה כלל – כלומר בזווית הצתה אפס – היה היחס יוצא 0.707 וההספק 264.5 W. חצי גל מוסר לכל היותר מחצית מן ההספק, ובקרת הזווית מקצצת ממנו הלאה. אילו היה כאן טריאק, היה ההספק מוכפל ל-481 W.

> 🧪 בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית – איך מזהים SCR מטריאק בעין.

fahed-lab.com · פהד גאנם

## שאלה 6 – שני משווים כמד-מפלס בשתי דרגות

**נתונים:** $V = 12\ V$ • $R_1 = R_2 = R_3 = 5\ k\Omega$ • $R = 2\ k\Omega$ • $V_{LED} = 1.5\ V$

💡 **מבנה המעגל:** מחלק מתח בן שלושה נגדים שווים בין 12 V לאדמה מייצר שתי נקודות ייחוס – $V_y$ העליונה ו-$V_x$ התחתונה. מתח המבוא $V_i$ מגיע אל הכניסה **הלא-הופכת** של שני המגברים, וכל נקודת ייחוס מגיעה אל הכניסה ההופכת של אחד מהם. במוצא של כל מגבר יושבים נגד 2 kΩ ונורית LED אל האדמה.

⚠️ **שני המגברים כאן פועלים בלולאה פתוחה – אין להם משוב.** מגבר שרת בלי משוב אינו מגבר אלא **משווה**: מוצאו נדחק אל אחד מקצות המתח לפי סימן ההפרש בכניסותיו. כאן ההזנה היא 12 V ואדמה, ולכן המוצא הוא 12 V או אפס – ולעולם לא ביניהם.

### סעיף א – מתחי הייחוס

שלושת הנגדים שווים ואינם מועמסים (לכניסות מגבר שרת אידאלי לא נכנס זרם), ולכן 12 V מתחלקים לשלושה חלקים שווים של 4 V:

$$V_y = 12 \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + R_3} = 12 \times \frac{10}{15} = 8\ V$$

$$V_x = 12 \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} = 12 \times \frac{5}{15} = 4\ V$$

$$\mathbf{V_x = 4\ V \cdot V_y = 8\ V}$$

### סעיף ב – מצב הנוריות בשלושת המתחים

בשני המגברים $V_i$ מגיע אל הכניסה החיובית, ולכן הכלל אחיד: הנורית נדלקת כאשר המבוא **עולה מעל** מתח הייחוס של אותו מגבר.

fahed-lab.com · פתרונות

| $V_i$ | $A_1$ (ייחוס 4 V) | $LED_1$ | $A_2$ (ייחוס 8 V) | $LED_2$ |
|---|---|---|---|---|
| 3 V | מוצא 0 ← 3 < 4 | כבויה | מוצא 0 ← 3 < 8 | כבויה |
| 6 V | מוצא 12 V ← 6 > 4 | **דולקת** | מוצא 0 ← 6 < 8 | כבויה |
| 9 V | מוצא 12 V ← 9 > 4 | **דולקת** | מוצא 12 V ← 9 > 8 | **דולקת** |

💡 **מה בעצם בנוי כאן:** מד-מפלס בשתי דרגות — אפס נוריות מתחת ל-4 V, נורית אחת בין 4 ל-8 V, ושתיים מעל 8 V. זהו הגרעין של כל תצוגת עמודות (bargraph) במגבר קול או במד מתח לרכב: מוסיפים עוד משווים ועוד נקודות במחלק, ומקבלים עוד דרגות.

## סעיף ג — הזרם דרך $LED_1$ כשהיא דולקת

כשהמוצא גבוה הוא נמצא ב-12 V, על הנורית נופלים 1.5 V, וכל השאר נופל על הנגד:

$$I = \frac{V_{out} - V_{LED}}{R} = \frac{12 - 1.5}{2\ k\Omega} = \frac{10.5}{2000}$$

$$\mathbf{I = 5.25\ mA}$$

זהו זרם טיפוסי לנורית חיווי — בהיר דיו לעין, ורחוק מן הגבול המרבי שהוא כ-20 mA.

🧪 בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית — שתי הדרגות של מד-המפלס.

fahed-lab.com · מעבדת פחד

# שאלה 7 – מגבר לא-הופך ומגבר הפרש בשרשרת

**נתונים:** $V_1 = 1\,V \cdot V_2 = 4\,V \cdot R_1 = 1\,k\Omega \cdot R_2 = 2\,k\Omega \cdot R_3 = R_5 = 2\,k\Omega \cdot R_4 = R_6 = 4\,k\Omega$

💡 **מבנה המעגל:** שני מעגלים בשרשרת. במעגל 1 מגיע $V_1$ אל הכניסה הלא-הופכת של $A_1$, $R_1$ מחבר את הכניסה ההופכת לאדמה ו-$R_2$ סוגר משוב מן המוצא. מוצאו $V_{o1}$ נכנס דרך $R_3$ אל הכניסה ההופכת של $A_2$, ובמקביל מגיע $V_2$ דרך $R_5$ אל הכניסה הלא-הופכת של $A_2$ עם $R_6$ לאדמה; $R_4$ סוגר את המשוב.

## סעיף א – תפקידו של כל מעגל

**מעגל 1 – מגבר לא-הופך.** האות נכנס אל הכניסה החיובית, המשוב שלילי, ולכן ההגבר חיובי וגדול מאחד. בנוסף העכבה הנראית מן המבוא היא עצומה, ולכן המעגל גם **מבודד** את המקור $V_1$ ואינו מעמיס אותו.

**מעגל 2 – מגבר הפרש.** הוא מקבל שני אותות ומגיב רק על **ההפרש** ביניהם, ובאותה הזדמנות מגביר אותו. אות משותף שיופיע בשניהם – רעש רשת, למשל – יבוטל.

## סעיף ב1 – מתח המוצא של מעגל 1

$$V_{o1} = V_1 \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = 1 \times \left(1 + \frac{2}{1}\right)$$

$$\mathbf{V_{o1} = 3\ V}$$

## סעיף ב2 – מתח המוצא של מעגל 2

במגבר הפרש מחשבים תחילה את מתח הכניסה החיובית, שהוא מחלק מתח פשוט:

$$V_+ = V_2 \cdot \frac{R_6}{R_5 + R_6} = 4 \times \frac{4}{6} = 2.67\ V$$

ומכאן, לפי עקרון הקצר המדומה ובעזרת ההרכבה:

$$V_o = V_+ \cdot \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) - V_{o1} \cdot \frac{R_4}{R_3}$$

$$V_o = 2.67 \times 3 - 3 \times 2 = 8 - 6$$

fahed-lab.com · פתח נאש

$$V_o = 2\ V$$

⚠️ **קיצור דרך שמותר רק בתנאי אחד.** כאשר יחס נגדי המשוב $R_4 : R_3$ שווה ליחס נגדי המחלק $R_5 : R_6$ — וכאן שניהם 2 — קורס המגבר לנוסחה הפשוטה "היחס כפול הפרש שני המבואות", ומיד מתקבל $4 - 3) \times 2 = 2$. אם היחסים אינם שווים, המעגל אינו מגבר הפרש אמיתי, הוא מגיב גם על האות המשותף, וחייבים לחזור לחישוב המלא בשני שלבים.

## סעיף ג – ערכי $R_4$ ו-$R_6$ שיביאו את המוצא ל-4 V

נשמור על תנאי מגבר ההפרש – כלומר נשנה את שני הנגדים יחד, כדי ששני היחסים יישארו זהים. אז המוצא הוא פשוט היחס כפול ההפרש:

$$V_o = k \cdot (V_2 - V_{o1}) = k \times (4 - 3) = k$$

דרוש $V_o = 4\ V \rightarrow k = 4 \rightarrow R_4 = 4 \cdot R_3$

$$R_4 = R_6 = 8\ k\Omega$$

בדיקה: המתח בכניסה החיובית יהיה עתה $4 \times 8 \div 10 = 3.2\ V$, וההגבר 5, ולכן המוצא הוא $3.2 \times 5 - 3 \times 4 = 16 - 12 = 4\ V$ ✓

💡 **מדוע ההפרש כה קטן:** ההפרש בין שני אותות המבוא הוא וולט אחד בלבד, ולכן כל תוספת ליחס הנגדים מתורגמת ישירות לוולטים במוצא. במעגלי מדידה אמיתיים – גשר של מתמר לחץ, למשל – ההפרש הוא מיליוולטים בודדים, והיחס מגיע למאות.

🧪 בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית – שתי הקומות והמוצא המשותף.

fahed-lab.com · מעגלים

## שאלה 8 – רשת גוזרת ותגובתה לדופק

**נתונים:** 2 msec ל- 1 בין 5 V דופק • $R = 10\ k\Omega$ • $C = 0.1\ \mu F$

💡 **מבנה המעגל:** קבל בטור עם המבוא, ונגד במקביל למוצא. בתדר אפס הקבל חוסם והמוצא אפס, ובתדר גבוה עכבתו שואפת לאפס והאות עובר במלואו – זוהי רשת **מעבירת גבוהים**, ובמישור הזמן היא מעגל **גוזר**.

⚠️ **הכלל שממנו נגזר כל הפתרון:** מתח על קבל אינו יכול לקפוץ, אבל **המוצא כאן אינו מתח הקבל** – הוא מתח הנגד. לכן כל קפיצה של המבוא עוברת אל המוצא **במלואה ומיד**, ומשם היא דועכת. אם בגרף שלכם המוצא אינו קופץ – הפכתם בטעות בין הרכיבים.

### סעיף א – צורת מתח המוצא

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

**עד 1 msec** – המבוא אפס והמעגל במנוחה, ולכן המוצא אפס.

**ברגע 1 msec** – המבוא קופץ ב-5 V, והקפיצה עוברת כולה אל הנגד. המוצא זינק ל-5 V+ ומיד מתחיל לדעוך אל האפס בקבוע זמן של מילישנייה אחת.

**ברגע 2 msec** – חלפו בדיוק שני קבועי זמן, והמוצא הספיק לרדת ל-1.84 V. עכשיו המבוא צונח ב-5 V, וגם הצניחה הזאת עוברת מיד: המוצא קופץ מ-1.84 אל 1.84 פחות 5, כלומר אל 3.16 V–.

**אחרי 2 msec** – המוצא דועך מן הערך השלילי חזרה אל האפס, שוב בקבוע זמן של מילישנייה.

### סעיף ב1 – מתח המוצא ברגע 1.5 msec

חלף חצי קבוע זמן מאז הקפיצה:

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

$$V_o(1.5) = 5 \cdot e^{-0.5} = 5 \times 0.6065$$

$$\boxed{V_o(1.5\ msec) = 3.03\ V}$$

### סעיף ב2 – מתח המוצא ברגע 2.5 msec

fahed-lab.com · פתר גאנם

נחשב תחילה את הערך שממנו מתחילה הדעיכה השנייה:

$$V_o(2^-) = 5 \cdot e^{-1} = 1.84\ V$$

$$V_o(2+) = 1.84 - 5 = -3.16\ V$$

ומכאן דעיכה של חצי קבוע זמן נוסף:

$$V_o(2.5) = -3.16 \times e^{-0.5} = -3.16 \times 0.6065$$

$$\mathbf{V_o(2.5\ msec) = -1.92\ V}$$

💡 **מדוע הקפיצה השלילית קטנה מן החיובית:** הקפיצה עצמה זהה — חמישה וולט בשני המקרים — אבל היא נוספת אל ערך שכבר לא היה אפס. הקבל "זוכר" במתחו את מה שנטען במשך הדופק, וזיכרון זה הוא שמסיט את המוצא כלפי מטה. אילו היה הדופק ארוך פי חמישה, היה המוצא מספיק לרדת לאפס והקפיצה השלילית היתה מגיעה ל-5 V– מלאים.

### סעיף ג — המתח על הקבל ברגע 1.5 msec

שני הרכיבים בטור, ולכן המתחים עליהם מסתכמים תמיד למתח המבוא:

$$V_C = V_{in} - V_o = 5 - 3.03$$

$$\mathbf{V_C(1.5\ msec) = 1.97\ V}$$

ואכן — הקבל נטען ברציפות מאפס לעבר 5 V, וברגע 1.5 msec הוא עבר קצת פחות מ-40 אחוזים מן הדרך, כמצופה אחרי חצי קבוע זמן ✓

🧪 בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית — שתי הקפיצות של הרשת הגוזרת.

fahed-lab.com · פהד גאנם

## שאלות 9–10 – אנגלית טכנית

שתי השאלות האחרונות נשענות על קטעי קריאה באנגלית: שאלה 9 עוסקת ב**ציוד מיתוג במתח נמוך** – חמשת תפקידיו העיקריים, שלוש הדרישות מציוד מבודד מלא, בדיקת המצב הפתוח של המגעים והזרם הזליגה המותר בין מגעים פתוחים בכל מופע; ושאלה 10 ב**קצרים במערכות חשמל** – ארבע סיבות להיווצרותם, התופעות האלקטרודינמיות הנוצרות ברגע הקצר, שלוש הפעולות ההכרחיות לניתוק מיידי, והסיבות להתאמת ההגנה לעומס יתר. 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 "חמש" או "ארבע" סיבות דורש בדיוק את המספר הזה של פריטים נפרדים; רשימה חלקית מקבלת ניקוד חלקי, וכפילות מנוסחת אחרת אינה נחשבת פריט נוסף.

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 פהד