

הצעה לפתרון מלא – חשמל ואלקטרוניקה לטכנאים

בחינת גמר • אביב תשע"ט 2019 • 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"ט 2019. 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.

פהד גאנם · fahed-lab.com

פרק ראשון – תורת החשמל • שאלות 4-1

שאלה 1 – שלושה מקורות מתח ומקור זרם

נתונים: $E_1 = 6\text{ V}$ • $E_2 = 12\text{ V}$ • $E_3 = 8\text{ V}$ • $I_S = 2\text{ A}$ • $R_1 = 10\ \Omega$ • $R_2 = 12\ \Omega$ • $R_3 = 6\ \Omega$

מבנה המעגל: הנקודה C מוארכת. על הקו האמצעי יושבים שלושה צמתים – A, B ו-C – ובין A ל-B יושב המקור E_2 **לבדו**, ובין B ל-C יושב E_3 **לבדו**. מן A יוצא ענף עליון ובו מפסק, R_1 ו- E_1 עד C. מן B יורד R_2 אל הפס התחתון D, ומן C יורד R_3 אל אותו פס. מקור הזרם מזרים 2 A מן הפס התחתון אל A.

המפתח לכל השאלה: שני מקורות המתח שעל הקו האמצעי יושבים **בלי נגד בטור**. מקור מתח אידאלי מקבע את הפרש הפוטנציאלים בין קצותיו ללא תלות בזרם – ולכן מתחי הצמתים A ו-B ידועים מיד, בלי אף משוואה. הקוטב החיובי של שלושת המקורות מסומן באיור **לצד שמאל**.

סעיף א – המתח בין A ל-C

נתחיל מן הצומת המוארק ונטפס שמאלה. במעבר מ-B ל-C יוצאים מן הקוטב החיובי של E_3 , ולכן הפוטנציאל יורד ב-8 V:

$$V_B - 8 = V_C = 0 \rightarrow V_B = 8\text{ V}$$

ובאותו אופן, במעבר מ-A ל-B יורד הפוטנציאל ב-12 V:

$$V_A - 12 = V_B = 8 \rightarrow V_A = 20\text{ V}$$

$$U_{AC} = 20\text{ V}$$

סעיף ב – הזרם דרך R_1

נלך מ-A אל C דרך הענף העליון: מפל על R_1 , ואחריו ירידה של 6 V על המקור E_1 – שגם קוטבו החיובי פונה שמאלה:

$$V_A - I(R_1) \cdot R_1 - E_1 = V_C$$

$$20 - 10 \cdot I(R_1) - 6 = 0 \rightarrow 10 \cdot I(R_1) = 14$$

$$I(R_1) = 1.4 \text{ A} \quad \text{מ-A ל-C}$$

סעיף ג – ההספק המתפתח על R_2

כדי למצוא את הזרם ב- R_2 דרוש מתח הפס התחתון. נכתוב בו את חוק הזרמים: שני הנגדים מזרימים אליו, ומקור הזרם מוציא ממנו 2 A:

$$\frac{V_B - V_D}{R_2} + \frac{V_C - V_D}{R_3} = I_S$$

$$\frac{8 - V_D}{12} + \frac{0 - V_D}{6} = 2$$

$$12: 8 - V_D - 2V_D = 24 \rightarrow 3V_D = -16$$

$$V_D = -5.33 \text{ V}$$

$$I(R_2) = \frac{8 - (-5.33)}{12} = \frac{13.33}{12} = 1.11 \text{ A}$$

$$P(R_2) = I^2 \cdot R_2 = 1.11^2 \times 12 = 1.235 \times 12$$

$$P(R_2) = 14.8 \text{ W}$$

אימות בחוק הזרמים: הזרם דרך R_3 הוא 0.89 A, וסכום שני הזרמים הוא $1.11 + 0.89 = 2 \text{ A}$ בדיוק מה שמקור הזרם מושר ✓

סעיף ד – האם הזרם ב- R_2 ישתנה כשהמפסק ייפתח

לא – הזרם ב- R_2 נשאר 1.11 A בדיוק

הנימוק. הזרם ב- R_2 נקבע על ידי שני מתחים בלבד: מתח הצומת B ומתח הפס התחתון D. נבדוק מה קורה לכל אחד מהם כשהמפסק נפתח:

הצומת B – מתחו נקבע כולו על ידי המקור E_3 ביחס לאדמה, והמקור הזה אינו נוגע כלל בענף העליון. V 8 לפני ו-8 V אחרי.

הפס D – המשוואה שממנה חושב מתחו מכילה רק את R_2 , את R_3 ואת מקור הזרם. הענף העליון אינו מופיע בה כלל, ולכן גם היא לא זזה.

מה כן משתנה: לפני פתיחת המפסק התחלקו שני האמפרים של מקור הזרם בין הענף העליון לבין המקור E_2 ; 

אחריה כל שני האמפרים זורמים דרך E_2 . הזרם בענף העליון יורד מ-1.4 A לאפס – אבל אף אחד מן **המתחים** במעגל אינו זז, ולכן שאר הזרמים נשארים כשהיו. זו התכונה המיוחדת של מקורות אידאליים בלי נגד בטור.

בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית – שלושת המקורות, הצומת D ומקור הזרם. 

faheed-lab.com . מאגזין

שאלה 2 – גשר מדידה, הספק מרבי ואיזון

נתונים: $E = 40 \text{ V}$ • $R_1 = 20 \Omega$ • $R_2 = 30 \Omega$ • $R_3 = 40 \Omega$ • $R_4 = 50 \Omega$

מבנה המעגל: זהו גשר וויטסטון. שני מחלקי מתח מוזנים במקביל מאותו מקור: העליון הוא R_1 ו- R_3 עם הנקודה A ביניהם, והתחתון הוא R_2 ו- R_4 עם הנקודה B ביניהם. בין A ל-B יושבים R_L ומפסק – האלכסון של הגשר.

סעיף א – המתח בין A ל-B כשהמפסק פתוח

כשהמפסק פתוח אין זרם באלכסון, ולכן כל מחלק עובד לבדו ואינו מועמס:

$$V_A = E \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_3} = 40 \times \frac{20}{60} = 13.33 \text{ V}$$

$$V_B = E \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_4} = 40 \times \frac{30}{80} = 15 \text{ V}$$

$$U_{AB} = V_A - V_B = 13.33 - 15$$

$$U_{AB} = -1.67 \text{ V (הנקודה B גבוהה מ-A)}$$

סעיף ב1 – ערך הנגד R_L להספק מרבי

לפי משפט ההספק המרבי, עומס מקבל הספק מרבי כאשר התנגדותו שווה להתנגדות הפנימית של המקור השקול. נמצא את התנגדות תבנין הנראית מן ההדקים A ו-B, כשמקור המתח מקוצר: בקיצור המקור נמתחים שני הפינים החיצוניים זה על זה. אז R_1 מופיע במקביל ל- R_3 , R_2 במקביל ל- R_4 , ושתי הקבוצות בטור:

$$R_{th} = (R_1 \parallel R_3) + (R_2 \parallel R_4) = \frac{20 \times 40}{60} + \frac{30 \times 50}{80}$$

$$R_{th} = 13.33 + 18.75$$

$$R_L = R_{th} = 32.08 \, \Omega$$

סעיף ב2 – ההספק המרבי

מתח תבנין הוא המתח שמדדנו בסעיף א' כשהמפסק היה פתוח. בהתאמה מלאה נופלת מחציתו על העומס:

$$P_{max} = \frac{U_{th}^2}{4 \cdot R_{th}} = \frac{1.67^2}{4 \times 32.08} = \frac{2.78}{128.3}$$

$$P_{max} = 21.6 \, \text{mW}$$

מדוע ההספק כה זעום: הגשר כמעט מאוזן – הפרש המתחים באלכסון הוא פחות משני וולט, בעוד שהמקור מספק 40 V. גשר מדידה בנוי בדיוק כך: הוא אינו נועד למסור הספק אלא **למדוד** סטייה קטנה מאיזון, וככל שהוא מדויק יותר כך ההספק באלכסון קטן יותר.

סעיף ג – ערך R_2 שיאפס את הזרם באלכסון

הזרם באלכסון מתאפס כאשר שתי הנקודות נמצאות באותו פוטנציאל – כלומר כששני המחלקים מחלקים באותו יחס. זהו **תנאי איזון הגשר**:

$$\frac{R_1}{R_1 + R_3} = \frac{R_2}{R_2 + R_4} \rightarrow \frac{20}{60} = \frac{R_2}{R_2 + 50}$$

$$R_2 + 50 = 3R_2 \rightarrow 2R_2 = 50$$

$$R_2 = 25 \, \Omega$$

בדיקה: עם $R_2 = 25 \, \Omega$ מתקבל $V_B = 40 \times 25 \div 75 = 13.33 \, \text{V}$ – בדיוק כמו V_A , והאלכסון מת $\checkmark$

התנאי בצורתו המוכרת: אפשר לכתוב את אותו תנאי גם כמכפלת אלכסונים: מכפלת R_1 ב- R_4 שווה למכפלת R_2 ב- R_3 . כאן שתי המכפלות יוצאות 1000 $\checkmark$ זו הצורה שכדאי לזכור, מפני שהיא אינה תלויה כלל במתח המקור ולא בהתנגדות האלכסון – וזה מה שהופך את הגשר לכלי מדידה מדויק.

פהד גאנבם · fahed-lab.com

שאלה 3 – שני ענפים מקביליים ניצבים זה לזה

נתונים: $V(t) = 45 \cdot \sin(314t + 60^\circ) \text{ V}$ • $R_1 = 2 \Omega$ • $R_3 = 4 \Omega$ • $X_L = 16 \Omega$ • $R_2 = 16 \Omega$ • $X_C = 4 \Omega$

מבנה המעגל: מן המקור יוצא ענף ראשי ובו R_1 , ובו זורם i_1 . הענף מגיע לצומת. משם יורד ענף ובו R_3 ו- X_L בטור (הזרם i_2), ויוצא ענף שני ובו R_2 ו- X_C בטור (הזרם i_3). שניהם נסגרים על הפס התחתון.

המספר 45 הוא משרעת, לא ערך יעיל. פאזור נכתב תמיד בערך היעיל, ולכן קודם מחלקים בשורש שתיים: $U = 31.82 \angle 60^\circ \text{ V}$

סעיף א – העכבה השקולה

$$Z_2 = R_3 + jX_L = 4 + j16 = 16.49 \angle 75.96^\circ \Omega$$

$$Z_3 = R_2 - jX_C = 16 - j4 = 16.49 \angle -14.04^\circ \Omega$$

שימו לב למה שקרה כאן. לשתי העכבות בדיוק אותו גודל – 16.49Ω – והזוויות שלהן רחוקות זו מזו בדיוק ב- 90° . שני הענפים **ניצבים** זה לזה במישור המרוכב, ומכאן ואילך כל התוצאות ייצאו עגולות להפליא.

$$Z_p = \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} = \frac{16.49 \angle 75.96^\circ \times 16.49 \angle -14.04^\circ}{(4 + 16) + j(16 - 4)} = \frac{272 \angle 61.92^\circ}{20 + j12}$$

$$Z_p = \frac{272 \angle 61.92^\circ}{23.32 \angle 30.96^\circ} = 11.66 \angle 30.96^\circ = 10 + j6 \Omega$$

$$Z_T = R_1 + Z_p = 2 + 10 + j6$$

$$Z_T = 12 + j6 \Omega = 13.42 \angle 26.57^\circ \Omega$$

סעיף ב – שלושת פאזורי הזרם

$$i_1 = \frac{U}{Z_T} = \frac{31.82 \angle 60^\circ}{13.42 \angle 26.57^\circ} = 2.37 \angle 33.43^\circ \text{ A}$$

המתח על שני הענפים המקביליים הוא המכפלה של הזרם הכולל בעכבה המקבילית:

$$U_p = i_1 \cdot Z_p = 2.37 \angle 33.43^\circ \times 11.66 \angle 30.96^\circ = 27.66 \angle 64.4^\circ \text{ V}$$

$$i_2 = \frac{27.66 \angle 64.4^\circ}{16.49 \angle 75.96^\circ} = 1.68 \angle -11.57^\circ \text{ A}$$

$$i_3 = \frac{27.66 \angle 64.4^\circ}{16.49 \angle -14.04^\circ} = 1.68 \angle 78.43^\circ \text{ A}$$

$$i_1 = 2.37 \angle 33.43^\circ \text{ A} ; i_2 = 1.68 \angle -11.57^\circ \text{ A} ; i_3 = 1.68 \angle 78.43^\circ \text{ A}$$

שני זרמי הענפים יצאו שווים בגודלם וניצבים זה לזה – תוצאה ישירה של שתי העכבות השוות והניצבות. אימות בחוק הזרמים:

$$i_2 = 1.64 - j0.34 ; i_3 = 0.34 + j1.64$$

$$i_2 + i_3 = 1.98 + j1.31 = 2.37 \angle 33.43^\circ \text{ A} \checkmark$$

סעיף ג1 – שלושת ההספקים

$$S = U \cdot i_1 = 31.82 \times 2.37 = 75.47 \text{ VA}$$

$$P = S \cdot \cos \phi = 75.47 \times \cos(26.57^\circ) = 67.5 \text{ W}$$

$$Q = S \cdot \sin \phi = 75.47 \times \sin(26.57^\circ) = 33.75 \text{ var}$$

$$P = 67.5 \text{ W} ; Q = 33.75 \text{ var} ; S = 75.47 \text{ VA}$$

אימות ישיר – ההספק הפעיל מתפתח על שלושת הנגדים בלבד:

$$P = i_1^2 \cdot R_1 + i_2^2 \cdot R_3 + i_3^2 \cdot R_2 = 2.37^2 \times 2 + 1.68^2 \times 4 + 1.68^2 \times 16$$

$$P = 11.25 + 11.25 + 45 = 67.5 \text{ W} \checkmark$$

סעיף ג2 – משולש ההספקים

הניצב האופקי הוא $w = 67.5$, הניצב האנכי הוא $var = 33.75$ ו Q ומצויר כלפי מעלה מפני שהמעגל השראי, והיתר הוא $VA = 75.47$. הזווית שביניהם היא 26.57° – בדיוק זווית העכבה השקולה. מכיוון ש- Q הוא בדיוק מחצית מ- P , המשולש הזה הוא 1-2- $\sqrt{5}$.

בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית – שני זרמים שווים בגודלם וניצבים זה לזה. 

פרד גאנם · fahed-lab.com

שאלה 4 – שני עומסים תלת-מופעיים במקביל

נתונים: $U_L = 400 \text{ V}$ • $f = 50 \text{ Hz}$ • $Z_1 = 4 \Omega$ במשולש • $Z_2 = 6 + j9 \Omega$ בכוכב

מבנה המעגל: שני צרכנים תלת-מופעיים סימטריים תלויים על אותה רשת. הראשון, Z_1 , מחובר במשולש – שלוש עכבות המחוברות בין הקווים. השני, Z_2 , מחובר בכוכב – שלוש עכבות היוצאות מן הקווים אל נקודה משותפת.

סעיף א1 – הזרמים הקווים של כל צרכן

נבחר את המתח המופעי של הקו R כציר הייחוס:

$$U_{ph} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 231 \angle 0^\circ \text{ V}$$

הצרכן במשולש. הדרך הנוחה ביותר היא להמיר אותו לכוכב שקול, שבו כל עכבה קטנה פי שלושה – ואז שני הצרכנים מדוברים באותה שפה:

$$Z_1(Y) = \frac{Z_1}{3} = \frac{4}{3} = 1.33 \Omega$$

$$I_1 = \frac{231 \angle 0^\circ}{1.33} = 173.2 \angle 0^\circ \text{ A}$$

הזווית אפס מפני ש- Z_1 נגד טהור, ולכן הזרם בו בפאזה עם המתח.

הצרכן בכוכב. כאן העכבה כבר נתונה למופע:

$$|Z_2| = \sqrt{6^2 + 9^2} = \sqrt{117} = 10.82 \Omega ; \phi = \arctan \frac{9}{6} = 56.31^\circ$$

$$I_2 = \frac{231 \angle 0^\circ}{10.82 \angle 56.31^\circ} = 21.35 \angle -56.31^\circ \text{ A}$$

$$I_1 = 173.2 \angle 0^\circ \text{ A} ; I_2 = 21.35 \angle -56.31^\circ \text{ A}$$

סעיף א2 – הזרם בקו ההזנה

הקו מזין את שני הצרכנים, ולכן הזרם בו הוא הסכום הווקטורי של שני הזרמים. החיבור בהצגה מלבנית:

$$I_1 = 173.2 + j0 ; I_2 = 11.84 - j17.76$$

$$I_R = 185.05 - j17.76$$

$$|I_R| = \sqrt{(185.05^2 + 17.76^2)} = 185.9 \text{ A} ; \phi = -5.48^\circ$$

$$I_R = 185.9 \angle -5.48^\circ \text{ A}$$

⚠ סכום שני הזרמים בערכם המספרי הוא A 194.5, אבל הזרם בפועל הוא A 185.9 בלבד. הפרש של כמעט תשעה אמפרים נעלם – מפני שזרמי חילופין מתחברים **וקטורית** ולא אריתמטית. חיבור פשוט של גדלים הוא הטעות הנפוצה ביותר בשאלה כזאת.

סעיף ב – שלושת ההספקים של המקור

נחשב כל צרכן בנפרד ונסכם. ההספק הפעיל והריאקטיבי מתחברים כל אחד בנפרד – **אלה כן מתחברים אריתמטית:**

$$P_1 = 3 \cdot \frac{U_L^2}{Z_1} = 3 \times \frac{160000}{4} = 120000 \text{ W} ; Q_1 = 0$$

$$P_2 = 3 \cdot I_2^2 \cdot 6 = 3 \times 455.8 \times 6 = 8205 \text{ W}$$

$$Q_2 = 3 \cdot I_2^2 \cdot 9 = 3 \times 455.8 \times 9 = 12308 \text{ var}$$

$$P = 120000 + 8205 = 128205 \text{ W}$$

$$Q = 0 + 12308 = 12308 \text{ var}$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(1.644 \cdot 10^{10} + 1.515 \cdot 10^8)}$$

$$P = 128.2 \text{ kW} ; Q = 12.31 \text{ kvar} ; S = 128.8 \text{ kVA}$$

אימות בנוסחה הקווית, שאינה עוברת דרך הצרכנים כלל:

$$S = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_R = 1.732 \times 400 \times 185.9 = 128800 \text{ VA } \checkmark$$

סעיף ג – מה יקרה אם Z_1 תהפוך לקיבולית

הזרם בקו יקטן – מ-185.9 A ל-155.9 A

הנימוק. הצרכן בכוכב הוא השראותי, וזרמו נושא רכיב מדומה **שלילי** של -17.76 A . כל עוד Z_1 נגד טהור אין לה רכיב מדומה כלל, והרכיב השלילי הזה נשאר בזרם הקו. אם Z_1 תהפוך לקיבולית טהורה, זרמה יהיה $173.2 \angle +90^\circ \text{ A}$ – רכיב מדומה חיובי גדול – והוא **יבלע** את הרכיב השלילי של הכוכב ויוסיף עליו:

$$I_R = (0 + 11.84) + j(173.2 - 17.76) = 11.84 + j155.44$$

$$|I_R| = 155.9 \text{ A} \text{ במקום } 185.9 \text{ A}$$

זהו בדיוק העיקרון של תיקון מקדם ההספק – הוספת קיבול מקבילי לעומס השראותי מקטינה את זרם הקו בלי לגעת בהספק הפעיל. כאן ההשפעה קיצונית מפני שהקיבול ענק, ולכן הזרם עבר את נקודת המינימום והתחיל לגדול שוב לכיוון הקיבולי. בתיקון מקדם ההספק אמיתי בוחרים את הקיבול כך שיעצר בדיוק בתחתית.

בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית – שני הצרכנים והזרם בקו ההזנה.

פרק שני – אלקטרוניקה א' • שאלות 5-8

שאלה 5 – בקרת הספק בטריאק בזווית 90°

נתונים: $f = 50 \text{ Hz}$ • יעיל $V_{in} = 220 \text{ V}$ • $R_L = 60 \Omega$

מבנה המעגל: טריאק בטור עם העומס על רשת החילופין, ומערכת בקרה מזינה את השער. הטריאק מוליך בשני כיווני הזרם, ולכן מערכת הבקרה שולחת דופק בכל חצי מחזור – וזוהי בקרת **גל שלם**.

סעיף א – זווית ההצתה וצורות הגלים

מן הגרפים עולה שדופקי ההצתה מגיעים ברגעים 5, 15, 25 ו-35 מילישניות – כלומר בדיוק בשיאי הגל. מחזור שלם ברשת של 50 הרץ נמשך 20 msec וחצי מחזור נמשך 10 msec, שהם 180° :

$$\alpha = \frac{5}{10} \times 180^\circ = 90^\circ$$

המתח על העומס הוא אפס מתחילת כל חצי מחזור ועד השיא, ומן השיא ואילך הוא עוקב אחרי מתח הרשת עד חציית האפס. התוצאה: הרבע הראשון של כל חצי גל נמחק, והרבע השני נשאר – בשני הכיוונים.

המתח על הטריאק הוא ההשלמה המדויקת: הוא נושא את מלוא מתח הרשת ברבע הראשון ונופל לאפס ברבע השני. סכום שני המתחים בכל רגע שווה תמיד למתח הרשת.

סעיף ב – המתח היעיל על העומס

נשתמש בנוסחת בקרת הגל השלם בעומס אומי. בזווית של 90° הסינוס של הזווית הכפולה מתאפס, והנוסחה מתקצרת מאוד:

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

$$\alpha = 90^\circ = \frac{\pi}{2} ; \sin 180^\circ = 0$$

$$V_L = 220 \cdot \sqrt{\left(\frac{\pi - \pi/2}{\pi} \right)} = 220 \cdot \sqrt{\frac{1}{2}} = 220 \times 0.707$$

$$V_L = 155.6 \text{ V}$$

💡 **תוצאה שכדאי לזכור:** הצתה בשיא הגל מותירה בדיוק **מחצית** מן ההספק. המתח יורד לפי שורש שתיים – 70.7 אחוזים – וההספק, שתלוי בריבוע המתח, יורד למחצית מדויקת. זו נקודת האמצע של כל בקרת הספק, וממנה נוח לאמוד כל זווית אחרת.

סעיף ג – ההספק על העומס

$$P(R_L) = \frac{V_L^2}{R_L} = \frac{155.6^2}{60} = \frac{24200}{60}$$

$$P(R_L) = 403.3 \text{ W}$$

בדיקה: ללא בקרה כלל היה העומס צורך $220^2 \div 60 = 806.7 \text{ W}$ – בדיוק פי שניים, כפי שציפינו ✓

🔧 בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית – צורת הגל בזווית תשעים מעלות.

שאלה 6 – שלושה מגברי שרת בשלושה תפקידים

נתונים: $4 \text{ k}\Omega = 3$ משוב מגבר • $2 \text{ k}\Omega = 2$ משוב מגבר • $2 \text{ k}\Omega = R_3$ • $2 \text{ k}\Omega = R_2$ • $1 \text{ k}\Omega = R_1$ • $3 \text{ V} = V_2 = V_1$

מבנה המעגל: המעגל מחולק באיור לשלוש מסגרות מקווקוות. מסגרת I מכילה מגבר יחיד בלי אף נגד, מסגרת II מכילה מגבר עם נגד מבוא ונגד משוב, ומסגרת III מקבלת שני אותות דרך שני נגדים אל אותה כניסה.

סעיף א – תפקידו של כל מעגל

מעגל I – עוקב מתח (מגבר בידוד). המוצא מחובר ישירות אל הכניסה השלילית, בלי שום נגד, והאות נכנס אל החיובית. ההגבר הוא בדיוק אחד. תפקידו אינו להגביר אלא **לבודד**: הוא מציג למקור התנגדות אינסופית ולשלב הבא מקור אידאלי, ומונע מן השלב הבא להעמיס על המקור.

מעגל II – מגבר הופך. הכניסה החיובית מוארקת, האות מגיע דרך R_1 אל השלילית ונגד המשוב סוגר את הלולאה. הוא מגדיל את האות פי שניים והופך את סימנו.

מעגל III – מגבר מסכם הופך. שני אותות נכנסים דרך שני נגדים אל אותה כניסה שלילית, שהיא אדמה מדומה. כל אות מזרים זרם עצמאי, וסכום הזרמים עובר דרך נגד המשוב – ולכן המוצא הוא סכום משוקלל של שני האותות, בסימן הפוך.

סעיף ב – שלושת מתחי המוצא

– עוקב מתח $V_{o1} = V_1 = 3 \text{ V}$

$$V_{o2} = -\frac{2}{R_1} \cdot V_2 = -\frac{2}{1} \times 3 = -6 \text{ V}$$

במגבר המסכם, שני הנגדים שווים ($2 \text{ k}\Omega$) ונגד המשוב כפול מהם ($4 \text{ k}\Omega$):

$$V_o = -4 \cdot \left(\frac{V_{o1}}{2} + \frac{V_{o2}}{2} \right) = -4 \cdot \left(\frac{3}{2} + \frac{-6}{2} \right)$$

$$V_o = -4 \times (1.5 - 3) = -4 \times (-1.5)$$

$$V_{o1} = 3 \text{ V} ; V_{o2} = -6 \text{ V} ; V_o = +6 \text{ V}$$

מה המעגל כולו עושה: מכיוון ששני נגדי המבוא שווים, המגבר המסכם למעשה מחשב את הסכום של שני האותות ומכפיל אותו בשניים, בסימן הפוך. וכיוון שהשלב השני כבר הפך את V_2 , התוצאה הכוללת היא הפרש מוגבר בין שני מתחי המקור – מערכת שתפקידה למדוד הפרש בין שני חיישנים.

סעיף ג – הזרם בנגד המשוב של מעגל III

הערה על סימון הנגדים: באיור מסומן R_4 פעמיים – גם נגד המשוב של מעגל II ($2 \text{ k}\Omega$) וגם נגד המשוב של מעגל III ($4 \text{ k}\Omega$). זו אי-דיוק בשאלון. הפתרון שלהלן מתייחס לנגד המשוב של מעגל III, שהוא הרלוונטי לשרשרת; הזרם בנגד המשוב של מעגל II הוא 3 mA .

הכניסה השלילית של המגבר המסכם היא אדמה מדומה. נחשב את שני זרמי המבוא ואת סכומם:

$$I(R_2) = \frac{V_{o1} - 0}{2 \text{ k}\Omega} = \frac{3}{2 \text{ k}\Omega} = 1.5 \text{ mA} \text{ אל הצומת}$$

$$I(R_3) = \frac{V_{o2} - 0}{2 \text{ k}\Omega} = \frac{-6}{2 \text{ k}\Omega} = -3 \text{ mA} \text{ מן הצומת}$$

$$\Sigma I = 1.5 - 3 = -1.5 \text{ mA}$$

הכניסה עצמה אינה בולעת זרם, ולכן החוסר הזה חייב להגיע מנגד המשוב:

$$I = 1.5 \text{ mA} \text{ – מן המוצא אל הכניסה השלילית}$$

אימות ישיר דרך נגד המשוב עצמו:

$$I = \frac{V_o - 0}{4 \text{ k}\Omega} = \frac{6}{4 \text{ k}\Omega} = 1.5 \text{ mA} \checkmark$$

בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית – שלושה תפקידים בשרשרת אחת.

שאלה 7 – מגבר טרנזיסטורי והגבר בדציבלים

נתונים: $V_{CC} = 15 \text{ V}$ • $R_B = 640 \text{ k}\Omega$ • $R_C = 4 \text{ k}\Omega$ • $R_L = 4 \text{ k}\Omega$ • $V_{BE} = 0.6 \text{ V}$ • $\beta = h_{fe} = 100$ • $h_{ie} = 1 \text{ k}\Omega$

סעיף א – נקודת העבודה

לולאת המבוא: על המפגש בסיס-פולט נופלים 0.6 V וכל היתר על R_B :

$$I_B = \frac{15 - 0.6}{640 \text{ k}\Omega} = \frac{14.4}{640 \text{ k}\Omega} = 22.5 \text{ }\mu\text{A}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = 100 \times 22.5 \text{ }\mu\text{A} = 2.25 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C = 15 - 2.25 \times 4 = 15 - 9$$

$$I_C = 2.25 \text{ mA} ; V_{CE} = 6 \text{ V}$$

בדיקת שפיות: נקודת העבודה יושבת על 6 V מתוך $15 - 40$ אחוזים מתחום ההזנה, רחוק גם מן הרוויה וגם מן החיתוך. זו נקודת עבודה בריאה למגבר אותות קטנים. 💡

סעיף ב – מעגל תמורה לאות חילופין

במעגל התמורה מקצרים את מקור ההזנה ואת שני הקבלים. מה שנשאר:

בין הבסיס לפולט $h_{ie} = 1 \text{ k}\Omega$

מקור זרם מבוקר בקולט $\beta \cdot i_b = 100 \cdot i_b$

העומס האפקטיבי $R_C \parallel R_L = 4 \parallel 4$

קיצור מקור ההזנה מוריד את הקצה העליון של R_C אל האדמה, ולכן הוא מופיע במקביל ל- R_L . שני הנגדים שווים, ולכן העומס האפקטיבי הוא בדיוק מחצית:

$$R_{ac} = \frac{4 \times 4}{8} = 2 \text{ k}\Omega$$

סעיף ג – הגבר המתח

$$A_v = - \frac{\beta \cdot R_{ac}}{h_{ie}} = - \frac{100 \times 2}{1}$$

$$A_v = -200$$

סימן המינוס מצייין היפוך פאזה של 180° בין המבוא למוצא – תכונה קבועה של מגבר בפולט משותף.

סעיף ד – ההגבר בדציבלים

בהמרה לדציבלים לוקחים את **גודל** ההגבר בלבד; הסימן אינו עובר לסולם הלוגריתמי:

$$A_v[\text{dB}] = 20 \cdot \log(|A_v|) = 20 \cdot \log(200)$$

$$\log 200 = 2.301 \rightarrow 20 \times 2.301$$

$$A_v = 46 \text{ dB}$$

שתי נקודות ייחוס שמקצרות כל חישוב דציבלים: הכפלה פי עשרה היא 20 dB, והכפלה פי שניים היא 6 dB. מכאן 200 הוא 100 כפול 2, כלומר $40 + 6 = 46 \text{ dB}$ – בלי מחשבון.

בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית – קו העומס וההגבר בדציבלים.

שאלה 8 – רשת מעבירת נמוכים ותגובתה לדופק

נתונים: $R = 1\text{ k}\Omega$ • $C = 0.05\text{ }\mu\text{F}$ • דופק 6 V בין 50 ל- $150\text{ }\mu\text{sec}$

מבנה המעגל: נגד בטור וקבל במקביל למוצא. בתדר אפס הקבל חוסם והאות עובר במלואו, ובתדר גבוה עכבתו שואפת לאפס והוא מקצר את המוצא – זוהי רשת מעבירת נמוכים. במישור הזמן היא נקראת מעגל מאגר, והמוצא הוא מתח הקבל, שאינו יכול לקפוץ.

סעיף א – צורת מתח המוצא

$$\tau = R \cdot C = 1 \cdot 10^3 \times 0.05 \cdot 10^{-6} = 50\text{ }\mu\text{sec}$$

עד $50\text{ }\mu\text{sec}$ המבוא אפס והקבל ריק, ולכן המוצא אפס.

בין 50 ל- $150\text{ }\mu\text{sec}$ המבוא הוא 6 V והקבל נטען לעברם בעקומה מעריכית. משך הדופק הוא $100\text{ }\mu\text{sec}$, שהם בדיוק שני קבועי זמן – ולכן הקבל מספיק להגיע לכ-86 אחוזים ולא לגמרי אל 6 V .

אחרי $150\text{ }\mu\text{sec}$ המבוא חוזר לאפס, והקבל מתפרק דרך הנגד מן הערך שאליו הגיע.

ההבדל מרשת מעבירת גבוהים: כאן המוצא אינו קופץ אף פעם – מתח על קבל משתנה תמיד ברציפות. הגרף הוא שתי עקומות מעריכיות רציפות, בלי אף קפיצה אנכית, וזה מה שמבדיל אותו מיד מגרף של מעגל גוזר.

סעיף ב1 – מתח המוצא ברגע $150\text{ }\mu\text{sec}$

$$V_{\text{out}}(t) = 6 \cdot (1 - e^{-(t-50)/50})\text{ V}$$

$$V_{\text{out}}(150) = 6 \cdot (1 - e^{-2}) = 6 \times (1 - 0.135)$$

$$V_{\text{out}}(150\text{ }\mu\text{sec}) = 5.19\text{ V}$$

סעיף ב2 – מתח המוצא ברגע $250\text{ }\mu\text{sec}$

מרגע $150\text{ }\mu\text{sec}$ מתחיל הקבל להתפרק מן הערך 5.19 V לעבר האפס, וחלפו עוד $100\text{ }\mu\text{sec}$ – שוב שני קבועי זמן:

$$V_{out}(t) = 5.19 \cdot e^{-(t-150)/50} \text{ V}$$

$$V_{out}(250) = 5.19 \cdot e^{-2} = 5.19 \times 0.135$$

$$V_{out}(250 \mu\text{sec}) = 0.70 \text{ V}$$

סעיף ג1 – מעגל שקול עם סליל

כדי לקבל אותו מוצא בדיוק ברשת נגד-סליל צריך שהרכיב שמופיע **במקביל למוצא** יתנהג כמו קבל – כלומר שעכבתו תקטן עם התדר. ברשת נגד-סליל התפקידים מתהפכים:

סליל בטור עם המבוא, ונגד במקביל למוצא

בתדר אפס הסליל הוא קצר והאות עובר במלואו אל הנגד; בתדר גבוה עכבתו גדלה והוא חוסם. זו בדיוק ההתנהגות של רשת מעבירת נמוכים, והמוצא נמדד על הנגד.

סעיף ג2 – ערך הנגד

שתי הרשתות ייתנו אותו גרף בדיוק אם ורק אם קבוע הזמן שלהן זהה. ברשת נגד-סליל קבוע הזמן הוא **מנה** ולא מכפלה:

$$\tau = \frac{L}{R} = 50 \mu\text{sec} \rightarrow R = \frac{L}{\tau} = \frac{0.5}{50 \cdot 10^{-6}}$$

$$R = 10 \text{ k}\Omega$$

שימו לב לכיוון ההשפעה ההפוך. ברשת נגד-קבל הגדלת הנגד **מאיטה** את התהליך, וברשת נגד-סליל היא **מזרזת** אותו. זו הסיבה שהנגד כאן יצא גדול פי עשרה מן המקורי – כדי לפצות על סליל גדול מאוד יחסית.

בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית – הטעינה בזמן הדופק והפריקה אחריו.

פרק שלישי – אנגלית טכנית • שאלות 9-10

שאלות 9-10 – אנגלית טכנית

שתי השאלות האחרונות נשענות על קטעי קריאה באנגלית: שאלה 9 עוסקת ב**בידוד חשמלי** – כיצד מגנים על עובדים ברשת חיה, מדוע נגרמות תקלות בידוד, אילו סיכונים הן יוצרות ומה חווה אדם שהתחשמל; ושאלה 10 ב**מדידה וניטור ברשת החשמל** – תרומתן לאחזקה, מה המערכת צריכה להבטיח, כיצד היא תורמת לרציפות האספקה ואילו גורמים חיצוניים פוגעים בה. הנבחן עונה על אחת מהן בלבד.

 **שלושה כללים שמזכים בביקוד 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 ביקוד גם אם תוכנו נכון.

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.