

הצעה לפתרון מלא – חשמל ואלקטרוניקה לטכנאים

בחינת גמר • אביב תשפ"א 2021 • 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 תשפ"א 2021. בשאלון עשר שאלות, והנבחן עונה על חמש בלבד. נוסח השאלות הוא של משרד החינוך; הפתרונות נכתבו במלואם ואומתו נומרית על ידי פהד גאנם.

פהד גאנם
faheed-lab.com

פרק ראשון – תורת החשמל • שאלות 1-4

שאלה 1 – מעגל זרם ישר עם מקור זרם

נתונים: $E_1 = 50 \text{ V}$ • $E_2 = 20 \text{ V}$ • $I_S = 2 \text{ mA}$ • $R_1 = 20 \text{ k}\Omega$ • $R_2 = 4 \text{ k}\Omega$ • $R_3 = 16 \text{ k}\Omega$

מבנה המעגל: הפס התחתון משמש צומת ייחוס. בענף השמאלי יושב המקור E_1 לבדו, בלי נגד בטור, ולכן הוא קובע ישירות את מתח הצומת A. מן A יורד R_1 אל הפס התחתון, ויוצא ענף אל הצומת B דרך R_2 בטור עם E_2 – שקוטבו החיובי פונה אל B. מן B יורד R_3 אל הפס התחתון, ובמקביל מזרים אליו מקור הזרם I_S כלפי מעלה.

סעיף א – שלושת הזרמים

הצומת A ידוע מיד. המקור E_1 מחובר ישירות בין הפס התחתון לבין A, בלי שום נגד בדרך, ולכן:

$$V_A = E_1 = 50 \text{ V}$$

$$I(R_1) = \frac{V_A}{R_1} = \frac{50}{20 \text{ k}\Omega} = 2.5 \text{ mA} \text{ כלפי מטה}$$

הצומת B. נכתוב בו את חוק הזרמים. הענף המגיע מ-A מכיל את R_2 ואת E_2 , וקוטבו החיובי של E_2 פונה אל B – ולכן הפוטנציאל עולה ב-20 V בדרך:

$$\frac{V_A + 20 - V_B}{R_2} + I_S = \frac{V_B}{R_3}$$

$$\frac{70 - V_B}{4} + 2 = \frac{V_B}{16}$$

נכפול ב-16 ונפתור:

$$4(70 - V_B) + 32 = V_B \rightarrow 280 - 4V_B + 32 = V_B$$

$$5V_B = 312$$

$$V_B = 62.4 \text{ V}$$

ומכאן שני הזרמים הנותרים:

$$I(R_2) = \frac{70 - 62.4}{4} = \frac{7.6}{4} = 1.9 \text{ mA} \text{ B-ל-A מ-}$$

$$I(R_3) = \frac{62.4}{16} = 3.9 \text{ mA} \text{ כלפי מטה}$$

$$I(R_1) = 2.5 \text{ mA} ; I(R_2) = 1.9 \text{ mA} ; I(R_3) = 3.9 \text{ mA}$$

אימות בחוק הזרמים בצומת B – שני הזרמים הנכנסים אליו שווים לזרם היוצא:

$$1.9 + 2 = 3.9 \text{ mA} \checkmark$$

⚠ שימו לב ש-B יצא **גבוה** מ-A, אף על פי ש-A מוזן ממקור של 50 V. הסיבה כפולה: המקור E_2 מוסיף עוד 20 V בדרך, ומקור הזרם דוחף לתוך B עוד 2 mA – ושניהם יחד מרימים אותו מעל A.

סעיף ב – המתח בין A ל-B

$$U_{AB} = V_A - V_B = 50 - 62.4$$

$$U_{AB} = -12.4 \text{ V (הנקודה B גבוהה מ-A)}$$

סעיף ג – ההספק שמוסר המקור E_1

דרך המקור E_1 עובר כל הזרם שיוצא מן הצומת A – הזרם שיורד ב- R_1 והזרם שהולך אל B:

$$I(E_1) = I(R_1) + I(R_2) = 2.5 + 1.9 = 4.4 \text{ mA}$$

$$P(E_1) = E_1 \cdot I(E_1) = 50 \times 4.4 \cdot 10^{-3}$$

$$P(E_1) = 220 \text{ mW} = 0.22 \text{ W}$$

אימות במאזן הספקים: שלושת הנגדים בולעים יחד 382.8 mW, ובדיוק אותם 382.8 mW מוסרים שלושת המקורות – E_1 (220 mW), E_2 (38 mW) ומקור הזרם (124.8 mW) ✓

בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית – שני הצמתים, מקור הזרם ומאזן הזרמים. 🧪

גאנבם · fahed-lab.com

שאלה 2 – מעגל מעורב בזרם חילופין

נתונים: $u(t) = 60 \cdot \sin(314t + 45^\circ) \text{ V}$ • $R_1 = 10 \Omega$ • $R_2 = 6 \Omega$ • $X_C = 18 \Omega$ • $R_3 = 12 \Omega$ • $X_L = 8 \Omega$ • $R_4 = 15 \Omega$

מבנה המעגל: מן המקור יוצא ענף ראשי ובו R_1 , ובו זורם I_1 . הענף מגיע לצומת A. מ-A יורד ענף ובו R_2 ו- X_C בטור אל הצומת B, ובו זורם I_2 . מ-A יוצא ענף שני ובו X_L , R_3 ו- R_4 בטור, שנסגר אף הוא על B, ובו זורם I_3 .

הצעד שאסור לדלג עליו: הנתון הוא ביטוי רגעי, והמספר 60 הוא **המשרעת** ולא הערך היעיל. פאזור נכתב תמיד בערך היעיל, ולכן קודם מחלקים בשורש שתיים. מי שמציב 60 מקבל זרמים גדולים פי 1.41 והספק גדול פי שניים.

סעיף א1 – העכבה השקולה

$$U = \frac{60}{\sqrt{2}} \angle 45^\circ = 42.43 \angle 45^\circ \text{ V} ; \omega = 314 \rightarrow f = 50 \text{ Hz}$$

נכווץ כל ענף בנפרד:

$$Z_2 = R_2 - jX_C = 6 - j18 = 18.97 \angle -71.57^\circ \Omega$$

$$Z_3 = R_3 + R_4 + jX_L = 27 + j8 = 28.16 \angle 16.5^\circ \Omega$$

שני הענפים במקביל, והתוצאה בטור עם R_1 :

$$Z_p = \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} = \frac{18.97 \angle -71.57^\circ \times 28.16 \angle 16.5^\circ}{33 - j10} = \frac{534.2 \angle -55.07^\circ}{34.48 \angle -16.86^\circ}$$

$$Z_p = 15.5 \angle -38.2^\circ = 12.18 - j9.58 \Omega$$

$$Z_T = R_1 + Z_p = 10 + 12.18 - j9.58$$

$$Z_T = 22.18 - j9.58 \Omega = 24.16 \angle -23.37^\circ \Omega$$

סעיף א2 – אופי המעגל

החלק המדומה של העכבה השקולה שלילי, ולכן **אופי המעגל קיבולי**: הזרם הכולל מקדים את מתח המקור בזווית של 23.37° . הקבל שבענף האמצעי גובר על הסליל שבענף הימני.

סעיף ב – שלושת פאזורי הזרם

$$I_1 = \frac{U}{Z_T} = \frac{42.43 \angle 45^\circ}{24.16 \angle -23.37^\circ} = 1.76 \angle 68.37^\circ \text{ A}$$

המתח על שני הענפים המקביליים הוא המתח בין A ל-B:

$$U_{AB} = I_1 \cdot Z_p = 1.76 \angle 68.37^\circ \times 15.5 \angle -38.2^\circ = 27.21 \angle 30.17^\circ \text{ V}$$

$$I_2 = \frac{U_{AB}}{Z_2} = \frac{27.21 \angle 30.17^\circ}{18.97 \angle -71.57^\circ} = 1.43 \angle 101.74^\circ \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{U_{AB}}{Z_3} = \frac{27.21 \angle 30.17^\circ}{28.16 \angle 16.5^\circ} = 0.97 \angle 13.66^\circ \text{ A}$$

$$I_1 = 1.76 \angle 68.37^\circ \text{ A} ; I_2 = 1.43 \angle 101.74^\circ \text{ A} ; I_3 = 0.97 \angle 13.66^\circ \text{ A}$$

אימות בחוק הזרמים – החיבור נעשה בהצגה המלבנית:

$$I_2 = -0.29 + j1.40 ; I_3 = 0.94 + j0.23$$

$$I_2 + I_3 = 0.65 + j1.63 = 1.76 \angle 68.37^\circ \text{ A} \checkmark$$

סעיף ג – ההספק הפעיל של המעגל

$$P = U \cdot I_1 \cdot \cos \phi = 42.43 \times 1.76 \times \cos(23.37^\circ)$$

$$P = 68.4 \text{ W}$$

אימות ישיר – ההספק הפעיל מתפתח על שלושת הנגדים בלבד, כל אחד עם הזרם שעובר בו:

$$P = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + I_3^2 \cdot (R_3 + R_4)$$

$$P = 1.76^2 \times 10 + 1.43^2 \times 6 + 0.97^2 \times 27 = 30.8 + 12.3 + 25.3 = 68.4 \text{ W } \checkmark$$

בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית – שלושת הזרמים ואופי המעגל. 

פחד גאנבם · fahed-lab.com

שאלה 3 – עומס תלת-מופעי בחיבור כוכב, ומעבר למשולש

נתונים: $U_L = 400 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$, $Z = 16 + j12 \Omega$ בכל מופע

סעיף א – הזרם המופעי והזרם הקווי

$$|Z| = \sqrt{16^2 + 12^2} = \sqrt{400} = 20 \Omega ; \phi = \arctan \frac{12}{16} = 36.87^\circ$$

$$U_{ph} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 231 \text{ V}$$

$$I_{ph} = \frac{231}{20} = 11.55 \text{ A}$$

$$I_{ph} = I_L = 11.55 \text{ A}$$

בכוכב הזרמים שווים. כל עכבה יושבת בין קו לבין נקודת האפס, ולכן הזרם שעובר בה הוא בדיוק הזרם שבקו – והמתחים הם שנחלקים בשורש שלוש.

סעיף ב1 – שלושת ההספקים

מקדם ההספק נקבע על ידי זווית העכבה:

$$\cos \phi = \frac{R}{|Z|} = \frac{16}{20} = 0.8 \text{ מפגר – עומס השראי}$$

$$P = 3 \cdot I_{ph}^2 \cdot R = 3 \times 11.55^2 \times 16 = 6400 \text{ W}$$

$$Q = 3 \cdot I_{ph}^2 \cdot X = 3 \times 11.55^2 \times 12 = 4800 \text{ var}$$

$$S = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L = 1.732 \times 400 \times 11.55 = 8000 \text{ VA}$$

$$P = 6.4 \text{ kW} ; Q = 4.8 \text{ kvar} ; S = 8 \text{ kVA}$$

אימות: שלושת ההספקים חייבים לסגור משולש ישר-זווית, ומקדם ההספק חייב להתקבל גם מהם:

$$\sqrt{(6.4^2 + 4.8^2)} = \sqrt{(40.96 + 23.04)} = \sqrt{64} = 8 \text{ kVA} \checkmark$$

$$\frac{P}{S} = \frac{6.4}{8} = 0.8 \checkmark$$

סעיף ב2 – משולש ההספקים

הניצב האופקי הוא $P = 6.4 \text{ kW}$, הניצב האנכי הוא $Q = 4.8 \text{ kvar}$ ומצויר כלפי מעלה מפני שהעומס השראי, והיתר הוא $S = 8 \text{ kVA}$. הזווית שבין P לבין S היא 36.87° – בדיוק זווית העכבה. זהו משולש 3-4-5 מוכפל, ולכן כל שלושת הצלעות יוצאות מספרים עגולים.

סעיף ג – ההספק הממשי בחיבור משולש

בחיבור משולש כל עכבה מקבלת את המתח הקווי המלא במקום את המתח המופעי – כלומר מתח גדול פי שורש שלוש, ולכן זרם גדול פי שורש שלוש:

$$I_{ph}(\Delta) = \frac{U_L}{|Z|} = \frac{400}{20} = 20 \text{ A}$$

$$P(\Delta) = 3 \cdot 20^2 \cdot 16 = 3 \times 400 \times 16$$

$$P(\Delta) = 19200 \text{ W} = 19.2 \text{ kW}$$

– פי שלושה מן הכוכב

למה בדיוק פי שלושה: המתח על כל עכבה גדל פי שורש שלוש, ולכן ההספק על כל עכבה – שהוא פרופורציוני לריבוע המתח – גדל פי שלושה. זהו העיקרון שמאחורי מתנע כוכב-משולש: מתניעים בכוכב כדי לקבל שליש מן ההספק ושליש מזרם ההתנעה, ורק אחר כך עוברים למשולש.

בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית – משולש ההספקים, ומה קורה במעבר למשולש.

שאלה 4 – מן המתח על הענף אל מתח המקור

נתונים: $U_{AB} = 20 \angle 90^\circ \text{ V}$ • $Z_1 = 4 + j3 \Omega$ • $Z_2 = 6 - j3 \Omega$ • $Z_3 = 4 + j3 \Omega$ • $Z_4 = 10 \angle 36.9^\circ \Omega$

מבנה המעגל: מן המקור יוצא ענף ראשי ובו Z_1 , ובו זורם I_1 . הענף מגיע לצומת A. מ-A יורד ענף ובו Z_2 ו- Z_3 בטור אל הצומת B, ובו זורם I_2 . מ-A יוצא ענף שני ובו Z_4 לבדו, שנסגר אף הוא על B, ובו זורם I_3 . הנתון הוא המתח על שני הענפים המקביליים – ומשם עובדים החוצה.

סעיף א – שלושת הזרמים

תחילה נכוון את שתי העכבות שבטור. כאן מסתרת ההפתעה של השאלה:

$$Z_{23} = Z_2 + Z_3 = (6 - j3) + (4 + j3) = 10 + j0$$

החלקים המדומים ביטלו זה את זה. הקבל שב- Z_2 והסליל שב- Z_3 שווים בגודלם ומנוגדים בסימנם, ולכן הענף כולו מתנהג כנגד טהור של 10Ω . זהו תהודה בטור בתוך ענף בודד – הזרם בו יהיה **בפאזה** עם המתח עליו.

$$I_2 = \frac{U_{AB}}{Z_{23}} = \frac{20 \angle 90^\circ}{10 \angle 0^\circ} = 2 \angle 90^\circ \text{ A}$$
$$I_3 = \frac{U_{AB}}{Z_4} = \frac{20 \angle 90^\circ}{10 \angle 36.9^\circ} = 2 \angle 53.1^\circ \text{ A}$$

הזרם הכולל הוא סכומם, והחיבור נעשה בהצגה המלבנית:

$$I_2 = 0 + j2 ; I_3 = 1.2 + j1.6$$
$$I_1 = I_2 + I_3 = 1.2 + j3.6 = 3.79 \angle 71.57^\circ \text{ A}$$

$$I_1 = 3.79 \angle 71.57^\circ \text{ A} ; I_2 = 2 \angle 90^\circ \text{ A} ; I_3 = 2 \angle 53.1^\circ \text{ A}$$

סעיף ב – מתח המקור

מתח המקור הוא סכום המתח שנופל על Z_1 והמתח שעל שני הענפים המקביליים:

$$U(Z_1) = I_1 \cdot Z_1 = 3.79 \angle 71.57^\circ \times 5 \angle 36.87^\circ = 18.97 \angle 108.44^\circ \text{ V}$$

$$U(Z_1) = -6.0 + j18.0 ; U_{AB} = 0 + j20$$

$$U = (-6.0 + 0) + j(18.0 + 20) = -6.0 + j38.0$$

$$U = 38.47 \angle 98.96^\circ \text{ V}$$

סעיף ג – העכבה השקולה

$$Z_p = \frac{Z_{23} \cdot Z_4}{Z_{23} + Z_4} = \frac{10 \angle 0^\circ \times 10 \angle 36.9^\circ}{(10) + (8 + j6)} = \frac{100 \angle 36.9^\circ}{18.97 \angle 18.43^\circ} = 5.27 \angle 18.47^\circ$$

$$Z_T = Z_1 + Z_p = (4 + j3) + (5.0 + j1.67)$$

$$Z_T = 9 + j4.67 \Omega = 10.14 \angle 27.41^\circ \Omega$$

אימות: העכבה השקולה חייבת להתקבל גם מחלוקת מתח המקור בזרם הכולל –

$$\frac{U}{I_1} = \frac{38.47 \angle 98.96^\circ}{3.79 \angle 71.57^\circ} = 10.15 \angle 27.39^\circ \Omega \checkmark$$

סעיף ד – הדיאגרמה הפאזורית של הזרמים

שלושת הפאזורים יוצאים מאותה ראשית. הזרם I_2 מצויר על הציר האנכי, בזווית של 90° , ואילו I_3 נופל ממנו ב- 36.9° – בדיוק זווית העכבה Z_4 . שניהם שווים באורכם (A 2), ולכן המקבילית שהם בונים היא **מעוין**, והאלכסון שלה – הזרם הכולל I_1 – חוצה בדיוק את הזווית שביניהם ויושב על 71.57° . אורכו:

$$|I_1| = 2 \cdot 2 \cdot \cos \frac{36.9^\circ}{2} = 4 \times \cos 18.45^\circ = 3.79 \text{ A } \checkmark$$

בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית – מן המתח על הענף אל מתח המקור. 

פרק שני – אלקטרוניקה א' • שאלות 5-8

שאלה 5 – מגבר טרנזיסטורי בקיטוב קבוע

נתונים: $V_{CC} = 20\text{ V}$ • $R_B = 800\text{ k}\Omega$ • $R_C = 5\text{ k}\Omega$ • $R_L = 8\text{ k}\Omega$ • $V_{BE} = 0.7\text{ V}$ • $\beta = h_{fe} = 100$ • $h_{ie} = 1\text{ k}\Omega$

מבנה המעגל: קיטוב בנגד בסיס יחיד – R_B מוביל ישירות מן המקור אל הבסיס, R_C מוביל מן המקור אל הקולט, והפולט מוארק. הקבלים C_1 ו- C_2 זניחים בתדר העבודה ונחשבים לקצר לאות החילופין.

סעיף א – נקודת העבודה

לולאת המבוא עוברת מן המקור דרך R_B אל הבסיס ומן הפולט אל האדמה. על המפגש בסיס-פולט נופלים 0.7 V , וכל היתר נופל על R_B :

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} = \frac{20 - 0.7}{800\text{ k}\Omega} = \frac{19.3}{800\text{ k}\Omega} = 24.13\text{ }\mu\text{A}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = 100 \times 24.13\text{ }\mu\text{A} = 2.41\text{ mA}$$

בלולאת המוצא הפולט מוארק, ולכן:

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C = 20 - 2.41 \times 5 = 20 - 12.06$$

$$I_C = 2.41\text{ mA} ; V_{CE} = 7.94\text{ V}$$

בדיקת שפיות לנקודת העבודה: 7.94 V הם כ-40 אחוזים ממתח ההזנה – הטרנזיסטור נמצא באזור הפעיל, רחוק גם מן הרוויה וגם מן החיתוך. אילו יצא V_{CE} קרוב לאפס או קרוב ל- 20 V , הייתה זו הוכחה לטעות חישוב או לתכנון גרוע.

סעיף ב – מעגל תמורה לאות חילופין

במעגל התמורה מקצרים את מקור המתח הישר ואת שני הקבלים. מה שנשאר הוא:

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

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

העומס האפקטיבי $R_C \parallel R_L = 5 \parallel 8$

קיצור מקור ההזנה מוריד את הקצה העליון של R_C אל האדמה, ולכן הוא מופיע **במקביל** ל- R_L ולא בטור עמו. זו כל ההבחנה שבין המעגל הישר למעגל החילופין, והיא זו שקובעת את ההגבר.

סעיף ג – הגבר המתח

$$R_{ac} = \frac{5 \times 8}{5 + 8} = \frac{40}{13} = 3.08 \text{ k}\Omega$$

$$A_v = - \frac{\beta \cdot R_{ac}}{h_{ie}} = - \frac{100 \times 3.08}{1}$$

$$A_v = -307.7$$

סימן המינוס מציין היפוך פאזה של 180° בין המבוא למוצא – תכונה קבועה של מגבר בפולט משותף. גודל ההגבר הוא 307.7, גבוה במיוחד מפני שאין נגד פולט שיגביל אותו.

בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית – קו העומס ונקודת העבודה. 🧪

שאלה 6 – שלושה מגברי שרת אידאליים

נתונים: $V_1 = 3\text{ V}$ • $V_2 = 6\text{ V}$ • $R_1 = 2\text{ k}\Omega$ • $R_2 = 4\text{ k}\Omega$ • $R_3 = 2\text{ k}\Omega$ • $R_4 = 8\text{ k}\Omega$ • $R_5 = 2\text{ k}\Omega$ • $R_6 = 4\text{ k}\Omega$

קוטביות שני המקורות – כאן נופלים. באיור, המקור V_1 מצויר כשקוטבו החיובי מחובר לאדמה, ולכן ההדק שיוצא ממנו אל R_1 יושב על -3 V . המקור V_2 , לעומתו, מצויר עם הקוטב החיובי כלפי מעלה, ולכן הוא מזין את המגבר A_2 ב- $+6\text{ V}$. התעלמות מן ההבדל הזה הופכת את סימן התוצאה בכל השאלה.

סעיף א – שני מתחי המוצא הראשונים

המגבר A_1 – תצורה הופכת. הכניסה החיובית מוארקת, האות מגיע דרך R_1 אל הכניסה השלילית ו- R_2 הוא המשוב:

$$V_{o1} = - \frac{R_2}{R_1} \cdot V_1 = - \frac{4}{2} \times (-3) = -2 \times (-3)$$

המגבר A_2 – עוקב מתח. המוצא מחובר ישירות אל הכניסה השלילית, בלי שום נגד, והאות נכנס אל הכניסה החיובית. ההגבר של תצורה כזאת הוא בדיוק אחד:

$$V_{o2} = V_2 = 6\text{ V}$$

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

מדוע צריך את A_2 בכלל, אם הוא אינו מגביר? כדי לבודד. בלעדיו היה מחלק המתח R_6 ו- R_5 נתלה ישירות על המקור V_2 ומושך ממנו זרם, ומתח המקור היה צונח תחת העומס. עוקב המתח מציג למקור התנגדות אינסופית ולמחלק – מקור אידאלי. זהו כל תפקידו, וזו הסיבה שהוא מופיע כמעט בכל מערכת מדידה.

סעיף ב – המתח בנקודה X

R_5 ו- R_6 בונים מחלק מתח פשוט בין מוצאו של A_2 לבין האדמה. הנקודה X מחוברת לכניסת מגבר שרת, ולכן היא אינה מושכת זרם והמחלק אינו מועמס:

$$V_X = V_{o2} \cdot \frac{R_5}{R_5 + R_6} = 6 \times \frac{2}{2 + 4} = 6 \times \frac{1}{3}$$

$$V_X = 2 \text{ V}$$

סעיף ג – מתח המוצא

המגבר A_3 מקבל את V_X בכניסה החיובית ואת V_{o1} דרך R_3 בכניסה השלילית – זהו מגבר הפרש. המשוב משווה את שתי הכניסות, ולכן גם על הכניסה השלילית יושבים 2 V:

$$I(R_3) = \frac{V_{o1} - V_X}{R_3} = \frac{6 - 2}{2 \text{ k}\Omega} = 2 \text{ mA}$$

$$V_o = V_X - I(R_3) \cdot R_4 = 2 - 2 \times 8$$

$$V_o = -14 \text{ V}$$

אימות בנוסחת מגבר ההפרש, שנותנת את אותה תוצאה בשורה אחת:

$$V_o = V_X \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) - V_{o1} \cdot \frac{R_4}{R_3} = 2 \times 5 - 6 \times 4$$

$$V_o = 10 - 24 = -14 \text{ V} \checkmark$$

סעיף ד – תפקידם של A_1 ושל A_2

המגבר A_1 הוא **מגבר הופך** בהגבר 2. הוא מגדיל את האות פי שניים והופך את סימנו – ולכן המתח השלילי של 3 V יוצא ממנו כמתח חיובי של 6 V.

המגבר A_2 הוא **עוקב מתח** (מגבר בידוד) בהגבר 1. הוא אינו משנה את גודל האות כלל, ותפקידו היחיד הוא לנתק בין המקור לבין העומס שאחריו – כדי שהמחלק R_6 ו- R_5 לא יטעין את המקור V_2 .

בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית – ארבעת המתחים בשרשרת. 

שאלה 7 – משווה עם מתח ייחוס ממחלק מתח

נתונים: $V_{CC} = 10\text{ V}$ • $R_1 = 16\text{ k}\Omega$ • $R_2 = 4\text{ k}\Omega$

מבנה המעגל: מגבר השרת עובד כאן **ללא משוב כלל** – אין אף רכיב בין המוצא לבין הכניסה השלילית. זהו משווה: אות המבוא V_i מגיע אל הכניסה החיובית, ומתח הייחוס V_X , שנוצר במחלק המתח R_1 ו- R_2 , מגיע אל השלילית.

סעיף א – מתח הייחוס

הכניסה אינה מושכת זרם, ולכן המחלק אינו מועמס:

$$V_X = V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 10 \times \frac{4}{16 + 4} = 10 \times 0.2$$

$$V_X = 2\text{ V}$$

סעיף ב – אופיין המעבר

במשווה אין משוב, ולכן ההגבר הוא זה של המגבר בלולאה פתוחה – עצום. די בהפרש זעיר בין שתי הכניסות כדי שהמוצא יגיע עד קצה תחום ההזנה, ולכן המוצא יודע שני מצבים בלבד:

$$V_i > 2\text{ V} \rightarrow V_o = +10\text{ V}$$

$$V_i < 2\text{ V} \rightarrow V_o = 0\text{ V}$$

האופיין הוא מדרגה: הציר האופקי הוא V_i , הציר האנכי הוא V_o , והקפיצה מתרחשת בדיוק ב-2 V. ערכי המבוא שיש לסמן על הסרטוט הם 0 ו-2 V, וערכי המוצא הם 0 ו-10 V בלבד.

מדוע המוצא הנמוך הוא אפס ולא מינוס עשר: המעגל מוזן במקור יחיד של 10 V, והדק ההזנה השלילי מוארק. מגבר שרת אינו יכול להוציא מתח שאינו בין שני הדקי ההזנה שלו, ולכן הרוויה השלילית שלו יושבת על 0 V.

סעיף ג – תגובת המעגל לאות המשולש

אות המבוא הוא משולש העולה מאפס ל-5 V בחצי מילישנייה וחוזר לאפס בחצי מילישנייה – מחזור של 1 msec. נמצא את שני הרגעים שבהם הוא חוצה את סף ההשוואה.

בעלייה קצב השינוי הוא 5 V לכל 0.5 msec, כלומר 10 V למילישנייה:

$$V_i(t) = 10 \cdot t \rightarrow 10 \cdot t = 2 \rightarrow t = 0.2 \text{ msec}$$

בירידה האות סימטרי, ולכן הוא חוצה את אותם 2 V באותו מרחק מסוף המחזור:

$$t = 1 - 0.2 = 0.8 \text{ msec}$$

$$V_o = 10 \text{ V בין } 0.2 \text{ msec} - 0.8 \text{ msec}$$

המוצא הוא אפוא גל מלבני בין 0 ל-10 V, באותו מחזור של 1 msec, שרוחב הדופק שלו הוא 0.6 msec – מחזור פעולה של 60 אחוזים. בשני מחזורים שלמים יופיעו שני דפקים כאלה.

הרעיון שמאחורי המעגל: משווה ממיר אות אנלוגי רציף לאות ספרתי דו-מצבי. הזזת מתח הייחוס משנה את רוחב הדופק בלי לגעת באות המבוא – וזה בדיוק העיקרון של אפנון רוחב דופק, בקרת עוצמה במנועים ובתאורה.

בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית – אות המשולש, הסף, והריבוע שיוצא. 

שאלה 8 – שתי רשתות מסננות ותגובתן לדופק

נתונים: מעגל א': 2.5 msec באורך 10 V דופק • $R_2 = 2.5 \text{ k}\Omega$ • $C = 1 \mu\text{F}$ מעגל ב': $L = 0.5 \text{ H}$ • $R_1 = 200 \Omega$

סעיף א – סוג המסנן

מעגל א' – נגד בטור וסליל במקביל למוצא. בתדר אפס הסליל הוא קצר, המתח עליו אפס והמוצא מת. בתדר גבוה עכבתו גדלה ללא גבול, והאות עובר כמעט במלואו:

(HP) מעגל א' – רשת מעבירת גבוהים

מעגל ב' – קבל בטור ונגד במקביל למוצא. בתדר אפס הקבל חוסם לגמרי, ובתדר גבוה עכבתו שואפת לאפס והאות עובר:

(HP) מעגל ב' – רשת מעבירת גבוהים

 **שתי הרשתות עושות אותו דבר בשתי דרכים.** הכלל פשוט: הרכיב שמופיע במקביל למוצא הוא שקובע. אם עכבתו גדלה עם התדר – סליל – הרשת מעבירה גבוהים; אם היא קטנה עם התדר – קבל – הרשת מעבירה נמוכים. במעגל ב' הקבל יושב בטור ולא במקביל, ולכן התוצאה מתהפכת.

סעיף ב – קבוע הזמן

לכל אחת מן הרשתות נוסחה משלה, אבל התוצאה כאן זהה:

$$\tau(\text{מעגל א'}) = \frac{L}{R_1} = \frac{0.5}{200} = 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ sec} = 2.5 \text{ msec}$$

$$\tau(\text{מעגל ב'}) = R_2 \cdot C = 2.5 \cdot 10^3 \times 1 \cdot 10^{-6} = 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ sec} = 2.5 \text{ msec}$$

בשתי הרשתות $\tau = 2.5 \text{ msec}$

 **שימו לב לצורת הנוסחה.** ברשת נגד-קבל קבוע הזמן הוא **מכפלה**, וברשת נגד-סליל הוא **מנה** – הגדלת הנגד מאיטה את הקבל ומזרזת את הסליל. שתי הרשתות שבשאלה נבחרו כך שייצא בדיוק אותו קבוע זמן, ולכן תגובתן לדופק זהה לחלוטין.

סעיף ג – צורת המתחים בזמן

אות המבוא הוא מלבן: קופץ ל-10 V ברגע אפס, נשאר שם 2.5 msec וחוזר לאפס. הקבל אינו מאפשר קפיצה במתח שעליו, ולכן כל קפיצה של המבוא עוברת במלואה אל המוצא ומשם דועכת:

ודועך 10 V קופץ אל V_0 : $t = 0$ ברגע
ודועך 10 V צונח ב- V_0 : $t = 2.5 \text{ msec}$ ברגע

התוצאה היא שני חודים – חיובי בעליית הדופק ושלילי בירידתו – עם דעיכה מעריכית ביניהם. משך הדופק שווה בדיוק לקבוע זמן אחד, ולכן החוד השני קטן במקצת מן הראשון.

סעיף ד – מתח המוצא בשני רגעים

בזמן הדופק המוצא דועך מן הערך שאליו קפץ:

$$V_0(t) = 10 \cdot e^{-t/2.5} \text{ V} \text{ הזמן במילישניות}$$
$$V_0(2.5^-) = 10 \cdot e^{-1} = 10 \times 0.368$$

$$V_0(2.5 \text{ msec}) = 3.68 \text{ V} \text{ רגע לפני סוף הדופק}$$

ברגע 2.5 msec יורד המבוא ב-10 V בבת אחת, והקפיצה עוברת במלואה אל המוצא:

$$V_0(2.5^+) = 3.68 - 10 = -6.32 \text{ V}$$
$$V_0(t) = -6.32 \cdot e^{-(t-2.5)/2.5} \text{ V}$$
$$V_0(5) = -6.32 \cdot e^{-1} = -6.32 \times 0.368$$

$$V_0(5 \text{ msec}) = -2.33 \text{ V}$$

⚠ שתי מלכודות בסעיף הזה. הראשונה: להתחיל את הדעיכה השנייה מ-10 V ולא מ-6.32 V – הקבל אינו מתאפס בסוף הדופק אלא נשאר טעון. השנייה: לשכוח שברגע 2.5 msec יש למוצא שני ערכים – 3.68 V רגע לפני ו-6.32 V מתחת לאפס רגע אחרי. תשובה מלאה מציינת את שניהם.

פרד גאנם · fahed-lab.com

פרק שלישי – אנגלית טכנית • שאלות 9-10

שאלות 9-10 – אנגלית טכנית

שתי השאלות האחרונות נשענות על נספחים באנגלית: שאלה 9 היא קטע קריאה על **מוליכים** – הגדרת המונח, אילו חומרים נחשבים מוליכים טובים ומדוע, וההשוואה בין כסף לנחושת; ושאלה 10 היא **טבלה משווה בין טכנולוגיות תאורה** – יתרונות וחסרונות, נצילות אורית, זמן הדלקה ותחומי שימוש. הנבחן עונה על אחת מהן בלבד.

 **שלושה כללים שמזכים בניקוד המלא:** עונים **בעברית** ולא באנגלית; מסתמכים **רק על הכתוב בנספח** ולא על ידע כללי; ולכל סעיף מציינים את **מספרי השורות** שעליהן מבוססת התשובה. בשאלה 10 הנספח הוא טבלה ולא קטע רץ, ולכן שם מפנים אל השורה והעמודה שמהן נלקח הנתון.

מכיוון שהתשובות נגזרות ישירות מנוסח הנספחים, אין כאן פתרון מספרי לצטט. עברו על הנספח, סמנו בו את השורות הרלוונטיות לכל סעיף, וכתבו תשובה קצרה ומדויקת המפנה אליהן.