הצעה לפתרון מלא – חשמל ואלקטרוניקה לטכנאים

בחינת גמר • אביב תשע"ו 2016 • 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"ו 2016. 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 – גשר עם שני מקורות בשיטת זרמי החוגים

נתונים: $E_1 = 4\ V \cdot E_2 = 2\ V \cdot R_1 = 2\ \Omega \cdot R_2 = 3\ \Omega \cdot R_3 = 2\ \Omega \cdot R_4 = 6\ \Omega \cdot R_5 = 1\ \Omega$

💡 **מבנה המעגל:** מעוין ובו ארבע פינות – עליונה T, שמאלית L, ימנית R ותחתונה B. הצלעות הן R_1 (בין T ל-L), R_2 (בין T ל-R), R_3 (בין L ל-B) ו-R_4 (בין R ל-B). באלכסון האנכי, מן T אל B, יושבים E_2 ו-R_5 בטור. המקור E_1 סוגר מלמטה בין הפינה השמאלית לימנית, בלי אף נגד בטור.

⚠️ **קוטביות משני המקורות, ישר מן האיור:** ב-E_2 הפלטה הארוכה פונה כלפי מטה – ולכן בירידה מן T אל B הפוטנציאל **עולה** בשני וולט. ב-E_1 הפלטה הארוכה פונה שמאלה, ולכן הפינה השמאלית גבוהה מן הימנית בארבעה וולט בדיוק. טעות בקריאה כאן הופכת את סימני כל התשובות.

סעיף א – שלושת חוגי הזרם

במעגל שלושה חלונות, ולכן שלושה זרמי חוגים. נגדיר את שלושתם **בכיוון השעון**:

I_a – במשולש השמאלי B–L–T, העובר דרך R_1, R_3 והאלכסון האמצעי.

I_b – במשולש הימני B–R–T, העובר דרך R_2, R_4 והאלכסון האמצעי.

I_c – בחלון התחתון, העובר דרך R_3, R_4 ומקור המתח E_1.

נכתוב חוק מתחים בכל חוג. הרכיבים המשותפים נושאים את **הפרש** שני זרמי החוגים:

חוג a: $5 \cdot I_a - I_b - 2 \cdot I_c = 2$

חוג b: $-I_a + 10 \cdot I_b - 6 \cdot I_c = -2$

חוג c: $-2 \cdot I_a - 6 \cdot I_b + 8 \cdot I_c = 4$

פתרון המערכת נותן:

$I_a = 1.027\ A \cdot I_b = 0.649\ A \cdot I_c = 1.243\ A$

הזרם ב-R_1 שייך לחוג a בלבד, והזרם ב-R_5 הוא הפרש שני החוגים שחולקים את האלכסון:

פהד גאנם · fahed-lab.com

$$I(R_1) = I_a = 1.027\ A$$

$$I(R_5) = I_a - I_b = 1.027 - 0.649$$

$I(R_1) = 1.03\ A$ מ-L אל T · $I(R_5) = 0.38\ A$ מ-T אל B

אימות בשיטה שנייה – מתחי הצמתים

מקור המתח E_1 יושב לבדו בענף שלו, בלי נגד, ולכן הוא **מקבע** את הפרש הפוטנציאלים בין שתי הפינות הצדדיות. נאריק את הפינה הימנית, ומיד ידוע שהשמאלית נמצאת על 4 V. נותרו שני נעלמים בלבד:

$$11 \cdot V_T - 6 \cdot V_B = 0$$

$$5 \cdot V_B - 3 \cdot V_T = 12$$

$$V_T = 1.95\ V \cdot V_B = 3.57\ V$$

$$I(R_1) = \frac{4 - 1.95}{2} = 1.03\ A$$

$$I(R_5) = \frac{V_T + 2 - V_B}{R_5} = 1.95 + 2 - 3.57 = 0.38\ A$$

✓ שתי השיטות נותנות בדיוק אותן תוצאות

💡 **מתי כדאי כל שיטה:** כאן שיטת החוגים דורשת שלוש משוואות ושיטת הצמתים רק שתיים – מפני שמקור מתח שיושב לבדו בענף מבטל נעלם שלם בשיטת הצמתים. הכלל המעשי: ספרו חלונות מול צמתים לפני שמתחילים, ובחרו את המספר הקטן. השאלה אמנם מבקשת חוגים, אבל השיטה השנייה היא בדיקה מצוינת.

סעיף ב – ההספק הכולל שמוסרים שני המקורות

המקור E_1 נושא את זרם החוג התחתון בלבד, ו**המקור E_2** נושא את זרם האלכסון:

fahed-lab.com · פחד גאנם

$$P(E_1) = 4 \times 1.243 = 4.97 \text{ W}$$

$$P(E_2) = 2 \times 0.378 = 0.76 \text{ W}$$

סך ההספק הנמסר = 5.73 W

אימות מן הצד השני – סכום ההספקים בחמשת הנגדים:

הספק	זרם	נגד
2.11 W	1.027 A	$R_1 = 2\ \Omega$
1.26 W	0.649 A	$R_2 = 3\ \Omega$
0.09 W	0.216 A	$R_3 = 2\ \Omega$
2.12 W	0.595 A	$R_4 = 6\ \Omega$
0.14 W	0.378 A	$R_5 = 1\ \Omega$
5.73 W		**סך הכול**

✓ המאזן נסגר

🧪 בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית – שלושת החוגים וההספק שמוסרים המקורות.

פרופ' נאדם · fahed-lab.com

שאלה 2 – מעגל חילופין שנתון בו זרם ענף

נתונים: $f = 100\ \text{Hz} \cdot \bar{I}_2 = 5\angle 45°\ \text{A} \cdot R_1 = 2\ \Omega \cdot L_1 = 8\ \text{mH} \cdot R_2 = 4\ \Omega \cdot C_2 = 160\ \mu\text{F} \cdot L_2 = 20\ \text{mH} \cdot C_3 = 100\ \mu\text{F}$

💡 **מבנה המעגל:** מן המקור יוצא ענף ראשי ובו R_1 ו-L_1 בטור (הזרם I_1), והוא מגיע אל הצומת Q. מן Q יוצא ענף ימני ובו R_2, C_2 ו-L_2 בטור (הזרם I_2), ויורד ענף ובו הקבל C_3 (הזרם I_3). שני הענפים נסגרים על הצומת E שבפס התחתון.

⚠️ **הנתון כאן אינו מתח המקור אלא זרם באחד הענפים.** לכן הכיוון הפוך מן הרגיל: מתחילים מן הענף הידוע, מחשבים ממנו את המתח על הצומת, ומן המתח יורדים אל הענף השני. רק בסוף מטפסים חזרה אל המקור. מי שינסה להתחיל מן המקור ייתקע מיד.

סעיף א – הזרם בקבל C_3

נחשב תחילה את כל הריאקטנסים בתדר 100 הרץ:

$$X_{L1} = 2\pi \cdot 100 \times 0.008 = 5.03\ \Omega$$

$$X_{L2} = 2\pi \cdot 100 \times 0.020 = 12.57\ \Omega$$

$$X_{C2} = \frac{1}{2\pi \cdot 100 \times 160 \cdot 10^{-6}} = 9.95\ \Omega$$

$$X_{C3} = \frac{1}{2\pi \cdot 100 \times 100 \cdot 10^{-6}} = 15.92\ \Omega$$

בענף הימני מתקזזים הקבל והסליל חלקית, והשארית השראתית:

$$\bar{Z}_2 = 4 + j(12.57 - 9.95) = 4 + j2.62 = 4.78\angle 33.22°\ \Omega$$

המתח על הצומת Q ביחס ל-E הוא הזרם הידוע כפול העכבה שלו:

$$\bar{U}_{QE} = 5\angle 45° \times 4.78\angle 33.22°$$

$$\bar{U}_{QE} = 23.91\angle 78.22°\ \text{V}$$

fahed-lab.com · פרופ' פאהד

ואותו מתח בדיוק יושב על הקבל C_3:

$$\bar{I}_3 = \frac{23.91\angle 78.22^\circ}{15.92\angle -90^\circ}$$

$$\bar{I}_3 = 1.50\angle 168.22^\circ \text{ A} = -1.47 + j0.31 \text{ A}$$

💡 **בדיקת שפיות לזווית:** זרם בקבל חייב להקדים את המתח שעליו בדיוק ב-90°. המתח יושב על 78.22°, והזרם יצא 168.22° — הפרש של 90 מעלות בדיוק ✓ בדיקה בת שנייה אחת שמצילה מטעויות סימן.

סעיף ב — העכבה הכוללת ואופי המעגל

תחילה הזרם הראשי, כסכום וקטורי של שני זרמי הענפים:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2 + \bar{I}_3 = (3.54 + j3.54) + (-1.47 + j0.31)$$

$$\bar{I}_1 = 2.07 + j3.84 = 4.36\angle 61.74^\circ \text{ A}$$

שני הענפים במקביל, ובטור להם הענף הראשי:

$$\bar{Z}_p = \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} = 5.26 + j1.55 = 5.48\angle 16.47^\circ \ \Omega$$

$$\bar{Z} = (2 + j5.03) + (5.26 + j1.55) = 7.26 + j6.58$$

$$\bar{Z} = 9.80\angle 42.21^\circ \ \Omega \quad \text{— המעגל השראתי}$$

הזווית חיובית והחלק המדומה חיובי, ולכן המעגל **השראתי** והזרם הכולל מפגר אחרי המתח בכ-42°. מעניין לשים לב שדווקא הענף המקבילי יצא השראתי אף שיש בו קבל טהור, מפני שהענף הימני חזק ממנו.

סעיף ג — מתח המקור

$$\bar{U} = \bar{I}_1 \cdot \bar{Z} = 4.36\angle 61.74^\circ \times 9.80\angle 42.21^\circ$$

$$\bar{U} = 42.73\angle 103.95^\circ \text{ V}$$

fahed-lab.com · מעבדת פהד

בדיקה בדרך שנייה: המתח על הענף הראשי הוא 5.41 × 4.36 = 23.6 V בזווית 130°, ובחיבור וקטורי עם 23.91∠78.22° מתקבל בדיוק אותו פאזור ✓

💉 בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית — מן הזרם הידוע אל מתח המקור.

פרופ' גאנם · fahed-lab.com

שאלה 3 – עכבה בטור ושני ענפים מקביליים

נתונים: $\bar{U}_1 = 10\angle 0°$ V • $\bar{Z}_1 = 3 + j2\ \Omega$ • $\bar{Z}_2 = 10 + j8\ \Omega$ • $\bar{Z}_3 = 9 - j6\ \Omega$

מבנה המעגל: מן המקור יוצא ענף ראשי ובו Z_1 בין הנקודות A ל-B, ובו זורם I_1. מן B יוצאים שני ענפים מקביליים אל C – Z_2 (הזרם I_2) ו-Z_3 (הזרם I_3) – והמעגל נסגר בחזרה אל המקור. הנתון הוא המתח על Z_1 בלבד.

סעיף א – שלושת הזרמים

הזרם הראשי נובע ישירות מן הנתון:

$$\bar{Z}_1 = 3 + j2 = 3.61\angle 33.69°\ \Omega$$

$$\bar{I}_1 = \frac{10\angle 0°}{3.61\angle 33.69°} = 2.77\angle -33.69°\ \text{A}$$

עכשיו העכבה המקבילית, וממנה המתח על הצומת:

$$\bar{Z}_p = \frac{(10 + j8)(9 - j6)}{19 + j2} = \frac{138.5\angle 4.97°}{19.10\angle 6.01°} = 7.25\angle -1.04°\ \Omega$$

$$\bar{U}_{BC} = 2.77\angle -33.69° \times 7.25\angle -1.04° = 20.11\angle -34.73°\ \text{V}$$

$$\bar{I}_2 = \frac{20.11\angle -34.73°}{12.81\angle 38.66°} = 1.57\angle -73.39°\ \text{A}$$

$$\bar{I}_3 = \frac{20.11\angle -34.73°}{10.82\angle -33.69°} = 1.86\angle -1.04°\ \text{A}$$

$$\mathbf{I_1 = 2.77\angle -33.69°\ A \cdot I_2 = 1.57\angle -73.39°\ A \cdot I_3 = 1.86\angle -1.04°\ A}$$

אימות: סכום שני זרמי הענפים הוא $2.31 - j1.54$, שגודלו 2.77 A וזוויתו $-33.69°$ – בדיוק הזרם הראשי ✓

סעיף ב – ההספק המדומה של Z_3

fahed-lab.com · פתר גאנם

ההספק המדומה הוא מכפלת המתח בזרם בערכיהם המוחלטים:

$$S_3 = U_{BC} \cdot I_3 = 20.11 \times 1.86$$

$$\mathbf{S_3 = 37.4\ VA = 31.1 - j20.7\ (P_3 = 31.1\ W \cdot Q_3 = -20.7\ var)}$$

הסימן השלילי של ההספק ההיגבי הוא חתימתו של הענף הקיבולי – הוא **מחזיר** אנרגייה היגבית לרשת במקום לצרוך אותה.

סעיף ג – מתח המקור

שני המתחים בטור, ולכן מחברים אותם וקטורית:

$$\bar{U} = \bar{U}_1 + \bar{U}_{BC} = 10\angle 0° + 20.11\angle -34.73°$$

$$\bar{U} = (10 + 16.53) - j11.46 = 26.53 - j11.46$$

$$\mathbf{\bar{U} = 28.90\angle -23.36°\ V}$$

⚠️ **סכום גדלים 20.11 + 10 היה נותן 30.11 V – וזו טעות.** המתקבל בפועל הוא 28.90 V, כי שני הפאזורים אינם באותו מופע. בזרם חילופין מחברים **וקטורים** ולא מספרים; ההפרש כאן הוא רק ארבעה אחוזים מפני שהזווית ביניהם קטנה, אבל בזוויות גדולות הוא יכול להגיע לעשרות אחוזים ואף לאפס.

סעיף ד – משולש ההספקים

$$S = U \cdot I_1 = 28.90 \times 2.77 = 80.1\ VA$$

$$\phi = -23.36° - (-33.69°) = 10.33°$$

$$P = 80.1 \times \cos 10.33° = 78.8\ W \cdot Q = 80.1 \times \sin 10.33° = 14.4\ var$$

$$\mathbf{P = 78.8\ W \cdot Q = 14.4\ var \cdot S = 80.1\ VA}$$

במשולש: הצלע האופקית 78.8 W, האנכית 14.4 var כלפי מעלה, והיתר 80.1 VA בזווית 10.33°. כופל ההספק יוצא 0.984 מפגר – קרוב מאוד לאחד, מפני שהענף הקיבולי מקזז כמעט את כל ההיגביות של שני האחרים.

jahed-lab.com · פתרונות

אימות: סכום ההספקים בשלוש העכבות הוא 78.8 W = 9 × 1.86² + 10 × 1.57² + 3 × 2.77² בדיוק ✓

🧹 בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית — שלושת הזרמים ומשולש ההספקים.

fahed-lab.com · פהד גאנם

שאלה 4 – משולש וכוכב על אותה רשת

נתונים: $\overline{Z}_2 = 5\ \Omega$ • $\overline{Z}_1 = 12\angle 35°\ \Omega$ (משולש) • $U_{AB} = 440\angle 0°\ V$ (כוכב) • עכבת הקו זניחה

💡 **מבנה המערכת:** שני עומסים סימטריים מוזנים מאותם שלושה קווים. עומס 1 מחובר ב**משולש** – כל עכבה בין שני קווים – ועומס 2 מחובר ב**כוכב**, שלוש עכבות שקצה אחד שלהן משותף. הנתון 440 V הוא מתח **קווי**, ומתח המופע נגזר ממנו.

⚠️ **שימו לב לזווית של מתח המופע.** נתון המתח **הקווי** U_{AB} בזווית אפס. מתח המופע אינו רק קטן פי שורש שלוש – הוא גם **מפגר אחריו ב-30°**. שכחת ההסטה הזאת אינה משנה את גודלי הזרמים ולא את ההספקים, אבל היא הופכת את כל הזוויות לשגויות.

סעיף א – הזרם בקו A

$$\overline{V}_A = \frac{440}{\sqrt{3}} \angle -30° = 254.03\angle -30°\ V$$

נמיר את המשולש לכוכב שקול בחלוקה בשלוש, וכך יעמדו שני העומסים באותה שפה:

$$\overline{Z}_{1Y} = \frac{12\angle 35°}{3} = 4\angle 35°\ \Omega$$

שני העומסים מקבילים על אותו מתח מופע, ולכן זרם הקו הוא סכום שני הזרמים:

$$\overline{I}_A = \frac{254.03\angle -30°}{4\angle 35°} + \frac{254.03\angle -30°}{5\angle 0°}$$

$$\overline{I}_A = 63.51\angle -65° + 50.81\angle -30°$$

$$\boxed{\overline{I}_A = 109.09\angle -49.51°\ A}$$

סעיף ב – שלושת ההספקים

נחשב כל עומס בנפרד ואז נסכום – כך גם מתקבלת בדיקה עצמית:

fahed-lab.com · פתרונות

עומס	זרם	הספק פעיל	הספק היגבי
משולש — 1	בכל עכבה 36.67 A	39.65 kW	+27.76 kvar
כוכב — 2	בכל עכבה 50.81 A	38.72 kW	0
סך הכול	בקו 109.09 A	**78.37 kW**	**+27.76 kvar**

$$S = \sqrt{(78.37^2 + 27.76^2)}$$

P = 78.4 kW · Q = 27.8 kvar · S = 83.1 kVA

אימות ישיר מזרם הקו: 109.09 × 254.03 × 3 = 83.1 kVA, ובכפל בקוסינוס הזווית שבין המתח לזרם (19.51°) מתקבלים 78.4 kW ✓

💡 **מדוע העומס בכוכב מוסר פחות אף שעכבתו קטנה יותר.** חמישה אוהם בכוכב נראים מן הרשת כמו חמישה-עשר אוהם במשולש, ואילו שנים-עשר אוהם במשולש נראים כמו ארבעה בכוכב. תמיד תרגמו את שני החיבורים לאותה שפה לפני שמשווים — אחרת ההשוואה מטעה פי שלושה.

סעיף ג — משולש ההספקים

על הציר האופקי 78.4 kW, כלפי מעלה 27.8 kvar (המערכת השראתית — עומס 1 הוא היחיד שתורם היגביות), והיתר 83.1 kVA בזווית 19.51°. כופל ההספק הוא 0.943 מפגר.

🧪 בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית — שני העומסים על אותה רשת.

fahed-lab.com פחד מעבדת

שאלה 5 – טרנזיסטור כמתג לממסר ודיודת המשך

נתונים: $V_{BE} = 0.7\ V$ • $\beta = 120$ • זרם התרה 40 mA • זרם תפיסה 60 mA • סליל הממסר: $r = 100\ \Omega$, $L = 100\ mH$ • $V_{CC} = 12\ V$ • $V_{CEsat} = 0$

💡 **מבנה המעגל:** סליל הממסר יושב בין הזנת 12 V לבין הקולט של הטרנזיסטור, והפולט מוארק. הדיודה D מחוברת **במקביל לסליל**, בכיוון החוסם ביחס להזנה. אל הבסיס מגיע נגד R_B דרך המפסק S, ישירות מן ההזנה.

סעיף א – תפקידה של הדיודה

דיודת המשך – היא מגינה על הטרנזיסטור ברגע הניתוק

סליל אינו מאפשר לזרמו להשתנות בקפיצה. כשהטרנזיסטור נחסם, הזרם שזרם בסליל מנסה להיפסק בבת אחת, והסליל מייצר מתח המתנגד לשינוי:

$$V_L = L \cdot \frac{di}{dt}$$

אילולא הדיודה היה המתח הזה מגיע למאות ואף אלפי וולט על הקולט – הרבה מעל מתח הפריצה של הטרנזיסטור – והיה הורס אותו במכה אחת. הדיודה, שהיתה חסומה כל זמן ההולכה, נעשית מוליכה ברגע היפוך המתח ומספקת לזרם הסליל מסלול סגור, ובו הוא דועך בשקט ובבטחה.

⚠️ **מכאן גם שמותיה השונים:** דיודת המשך, דיודת גלגול חופשי (freewheeling) או דיודת חסימה. היא מופיעה בכל מקום שבו מתג אלקטרוני מפעיל עומס השראתי – ממסר, סולנואיד, שסתום, מנוע. שאלת מבחן קלאסית היא "מה יקרה אם נסיר אותה", והתשובה היא: הטרנזיסטור נשרף בניתוק הראשון.

סעיף ב – הערך המרבי של נגד הבסיס

הממסר **נתפס** כשזרם הסליל מגיע ל-60 mA. זהו התנאי המינימלי, ומכאן נגזר זרם הבסיס המינימלי:

faheed-lab.com · פתרונות

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{60\ mA}{120} = 0.5\ mA$$

בלולאת הבסיס יושבים מתח ההזנה, הנגד ומפל הבסיס-פולט:

$$R_{Bmax} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_B} = \frac{12 - 0.7}{0.5\ mA} = \frac{11.3}{0.0005}$$

$$\mathbf{R_{Bmax} = 22.6\ k\Omega}$$

בדיקה שהטרנזיסטור אכן מסוגל לכך: עם 60 mA בסליל נופלים עליו 100 Ω × 60 mA = 6 V, ולכן נשארים על הקולט-פולט עוד 6 V — הטרנזיסטור פועל באזור הפעיל, וההגבר β אכן תקף שם.

💡 **מה שמהנדס יעשה בפועל — ולמה זה לא הנשאל כאן.** בתכנון אמיתי אין מסתפקים בסף התפיסה אלא דוחפים את הטרנזיסטור עד **רוויה**: אז נופלים על הסליל כל שנים-עשר הוולט, הזרם מגיע ל-120 mA, ודרושים 1 mA בבסיס — כלומר R_B של 11.3 kΩ, מחצית מן החישוב שלמעלה. הרוויה נותנת מרווח ביטחון מפני שינויי טמפרטורה, ירידת מתח ההזנה ופיזור ערכי β בין רכיב לרכיב. השאלה כאן מבקשת במפורש את הערך **המרבי שיבטיח הפעלה**, ולכן התשובה היא 22.6 kΩ — אבל דעו שנגד קטן יותר הוא בחירה טובה יותר.

ולמה חשוב זרם ההתרה שנתון בשאלה? מפני שהוא נמוך מזרם התפיסה: הממסר **נתפס** ב-60 mA אבל **משתחרר** רק כשהזרם יורד מתחת ל-40 mA. פער זה הוא **היסטרזיס** מכוון, והוא מונע מן המגעים לרטוט סביב נקודת המעבר.

🧪 בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית — שני קווים אדומים — התפיסה והרוויה.

fahed-lab.com · פרד נאנס

שאלה 6 – מגבר הופך, עוקב ומגבר הפרש בשרשרת

נתונים: $V_1 = 4\ V$ • $V_2 = 1\ V$ • $R_1 = 1\ k\Omega$ • $R_2 = 2\ k\Omega$ • $R_a = R_b = R_c = R_d = 2\ k\Omega$ • הזנה $\pm 12\ V$

💡 **מבנה המעגל:** המקור V_2 נכנס דרך R_1 אל הכניסה ההופכת של המגבר הראשון, שכניסתו החיובית מוארקת ו-R_2 סוגר את משובו – מגבר הופך. המקור V_1 מגיע אל מגבר שני שמוצאו מחובר ישירות לכניסה ההופכת שלו – עוקב מתח. שני המוצאים מגיעים אל המגבר השלישי: V_{o2} דרך R_a אל הכניסה ההופכת עם משוב R_b, ו-V_{o1} דרך R_c אל החיובית עם R_d לאדמה.

סעיף א – מוצאי שני המגברים הראשונים

$$V_{o2} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_2 = -\frac{2}{1} \times 1$$

עוקב מתח, הגבר אחד $V_{o1} = V_1 = 4\ V$

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

סעיף ב – מתח המוצא

המגבר השלישי הוא מגבר הפרש. נחשב תחילה את מתח כניסתו החיובית:

$$V_+ = V_{o1} \cdot \frac{R_d}{R_c + R_d} = 4 \times \frac{2}{4} = 2\ V$$

ומכאן, בהרכבה:

$$V_{out} = V_+ \cdot \left(1 + \frac{R_b}{R_a}\right) - V_{o2} \cdot \frac{R_b}{R_a}$$

$$V_{out} = 2 \times 2 - (-2) \times 1 = 4 + 2$$

$$\mathbf{V_{out} = 6\ V}$$

fahed-lab.com · פתרונות

ארבעת הנגדים סביב המגבר השלישי שווים, ולכן הוא מגבר הפרש בהגבר אחד, והמוצא הוא פשוט ההפרש (2−) − 4 V = 6 V. שימו לב שהמינוס הכפול **הוסיף** שני וולט במקום לגרוע.

סעיף ג – ערכו של V_1 שייתן מוצא של 10 V

V_2 אינו משתנה, ולכן V_{o2} נשאר 2− V. במגבר הפרש בהגבר אחד:

$$V_{out} = V_{o1} - V_{o2} = V_1 + 2 = 10$$

$$\mathbf{V_1 = 8\ V}$$

⚠️ **בדקו תמיד שהמוצא נשאר בתוך תחום ההזנה.** ההזנה כאן היא ±12 V, ולכן 10 V עדיין אפשריים – אך בקושי. במגבר שרת אמיתי המוצא מגיע לכל היותר לוולט או שניים מתחת להזנה, ולכן 10 V הם כבר קרוב לגבול; אילו היו מבקשים 13 V, התשובה הנכונה היתה "אי אפשר – המגבר ייכנס לרוויה".

🧪 בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית – שלוש קומות ומגבר הפרש בסוף.

fahed-lab.com · פרופ׳ פאהד

שאלה 7 – בקרת הספק בטיריסטור לפי השהיית זמן

נתונים: $R_L = 100\ \Omega$ מנקודת האפס • $V_i = 220\ V$ יעיל • $f = 50\ Hz$ • $\Delta t = 4\ msec$

💡 **מבנה המעגל:** טיריסטור בטור עם העומס על רשת החילופין. יחידת בקרה שולחת אל השער דופק קצר בהשהיה קבועה Δt אחרי כל חצייה של מתח הרשת. הטיריסטור מוליך מן האנודה אל הקתודה בלבד.

סעיף א – ההספק על העומס

תחילה נתרגם את ההשהיה לזווית. מחזור שלם הוא 20 msec והוא 360°, ולכן חצי מחזור הוא 10 msec והוא 180°:

$$\alpha = \frac{\Delta t}{10} \times 180° = \frac{4}{10} \times 180°$$

$$\alpha = 72°$$

ובבקרת חצי גל הערך היעיל הוא:

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

$$\frac{1.885 + 0.294}{6.283} = 0.3468 \rightarrow \sqrt{0.3468} = 0.589$$

$$V_L = 220 \times 0.589 = 129.6\ V$$

$$P = \frac{129.6^2}{100}$$

$$\boxed{P(R_L) = 167.8\ W}$$

סעיף ב – זווית ההצתה להספק של 100 W

נעבוד אחורה – מן ההספק אל המתח, ומן המתח אל היחס:

fahed-lab.com · פרופ' נאנם

$$V_L = \sqrt{(P \cdot R_L)} = \sqrt{(100 \times 100)} = 100\ V$$

$$\frac{V_L}{V_i} = \frac{100}{220} = 0.455$$

נכנסים עם היחס אל גרף בקרת ההספק שבנוסחאון וקוראים ממנו את הזווית:

$\alpha \approx 98°$ שהם $5.4\ msec$

בדיקה חוזרת בנוסחה: עבור $98°$ מתקבלים $100.0\ V$ ולכן $100.0\ W$ בדיוק ✓

💡 **שימו לב מה קרה בין שני הסעיפים.** הזווית גדלה מ-$72°$ ל-$98°$ – עלייה של 26 מעלות בלבד – וההספק צנח מ-$168\ W$ ל-$100\ W$, כלומר ב-40 אחוזים. הסיבה: סביב $90°$ נמצא שיא הגל, ושם כל מעלה של השהיה מקצצת את פרוסת השטח הגדולה ביותר. בקצוות, לעומת זאת, אותה מעלה כמעט אינה משנה דבר. זו הסיבה שעקומת הבקרה תלולה באמצע ושטוחה בקצוות.

סעיף ג – צורות הגלים

המתח על הטיריסטור, V_{Ak}. בין החצייה לרגע ההצתה הרכיב חסום ונושא את כל מתח הרשת; מרגע ההצתה ועד החצייה הבאה הוא מוליך ומתחו אפס. בכל חצי המחזור השלילי הוא חסום לגמרי ומעתיק את הגל השלילי במלואו, עד שיא של $-311\ V$.

המתח על העומס, V_{RL}. המשלים המדויק: אפס עד ההצתה, פרוסת סינוס מן ההצתה עד החצייה, ואפס מוחלט לאורך כל חצי המחזור השלילי.

⚠️ **גם כאן יש דופקי סרק.** יחידת הבקרה שולחת דופק אחרי **כל** חצייה – כלומר גם באמצע חצי המחזור השלילי. שם האנודה שלילית ביחס לקתודה, והטיריסטור חסום בכל מקרה; הדופק אינו עושה דבר. רק דופקי חצי המחזור החיובי פועלים, וזו הסיבה שהעומס מקבל חצי גל בלבד.

🧪 בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית – מן ההשהיה אל ההספק, ובחזרה.

fahed-lab.com · פתח

שאלה 8 – רשת גוזרת ודופק באורך שני קבועי זמן

נתונים: C = 1 µF • R = 1 kΩ • דופק 5 V בין 0 ל- 2 msec

💡 **מבנה המעגל:** קבל בטור עם המבוא ונגד במקביל למוצא – רשת **מעבירת גבוהים**, ובמישור הזמן מעגל **גוזר**. המוצא נמדד על הנגד, ולכן הוא פרופורציוני לזרם ולא למטען.

⚠️ **הכלל שממנו נגזר הכול:** מתח הקבל אינו יכול לקפוץ, ולכן כל קפיצה של המבוא עוברת **במלואה ומיד** אל הנגד. הגרף במוצא חייב להתחיל בקפיצה אנכית – ואם ציירתם עלייה רכה, בניתם רשת מאנכת.

סעיף א – צורת מתח המוצא

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

ברגע 0 – המבוא קופץ ב-5 V, וכל הקפיצה עוברת אל הנגד. המוצא מזנק ל-5 V+ ומתחיל לדעוך.

עד 2 msec – דעיכה מעריכית בקבוע זמן של מילישנייה. משך הדופק הוא בדיוק **שני קבועי זמן**, ולכן בסופו נשארו רק 13.5 אחוזים מן הקפיצה – 0.68 V.

ברגע 2 msec – המבוא צונח ב-5 V, וגם הצניחה עוברת מיד: המוצא קופץ מ-0.68 אל 5 – 0.68, כלומר אל 4.32– V, ומשם דוער אל האפס.

סעיף ב – מתח המוצא ברגע 1 msec

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

$$V_{out}(1) = 5 \cdot e^{-1} = 5 \times 0.368$$

$$\boxed{V_{out}(1 \text{ msec}) = 1.84 \text{ V}}$$

סעיף ג – מתח המוצא ברגע 3 msec

נמצא תחילה את גובה הקפיצה השלילית ברגע 2 msec:

fahed-lab.com · פתרון מאגם

$$V_{out}(2^-) = 5 \cdot e^{-2} = 0.68\ V$$

$$V_{out}(2+) = 0.68 - 5 = -4.32\ V$$

ומשם דעיכה של קבוע זמן שלם:

$$V_{out}(3) = -4.32 \times e^{-1} = -4.32 \times 0.368$$

$$\mathbf{V_{out}(3\ msec) = -1.59\ V}$$

💡 **ההבדל בין שתי הקפיצות מספר את כל הסיפור.** הקפיצה הראשונה היתה 5 V מלאים והשנייה 4.32 V בלבד – כי הקבל הספיק להיטען ל-4.32 V במשך הדופק. ככל שהדופק ארוך יותר ביחס לקבוע הזמן, כך הקפיצה השלילית מתקרבת ל-5 V–, וצורת המוצא נעשית לזוג "קוצים" חדים. זהו בדיוק העיקרון שבו מפיקים דופק סנכרון מגל מרובע.

🧪 בגרסת האתר יש כאן סימולציה אינטראקטיבית – דופק באורך שני קבועי זמן בדיוק.

fahed-lab.com · פרופ' פהד

פרק שלישי – אנגלית טכנית • שאלות 9–10

שאלות 9–10 – אנגלית טכנית

שתי השאלות האחרונות נשענות על קטעי קריאה באנגלית: שאלה 9 עוסקת ב**מדידות חשמליות** – שלוש סיבות לחשיבותן, כיצד נוצרות שגיאות מדידה אקראיות, ומהי שגיאה אבסולוטית; ושאלה 10 ב**מוליך האפס ומוליך ההגנה** – תפקידו של מוליך האפס במתקן חשמלי, באילו תנאים אין צורך בהגנה מפני זרם יתר ובאמצעי ניתוק ברשתות מסוג TT או TN, ובאילו תנאים אין צורך בכך ברשתות מסוג IT. 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.

שאלה 10 של מועד זה מזכירה שלושה סוגי רשתות הארקה, ובקטע מפורטים התנאים לכל אחד מהם בנפרד. הקפידו לענות על התנאים של הרשת **שהסעיף שואל עליה** ולא לערבב ביניהן – זו הטעות הנפוצה בסעיף מסוג זה. מכיוון שהתשובות נגזרות ישירות מנוסח הקטע, אין כאן פתרון מספרי לצטט: סמנו את השורות הרלוונטיות וכתבו תשובה קצרה ומדויקת המפנה אליהן.

fahed-lab.com - פרוד נאנם