

דימה בודנסקי

מכונות חשמל

והינע חשמלי

תיאוריה

+

פתרונות מבחני מה"ט למגמת חשמל

(הנדסאים וטכנאים)

2013-2020



הוצאת שורש (אלי מיטב) - 052-2671210

email: [elmtv@017.net.il](mailto:elmtv@017.net.il)

web: <http://www.shoresh1.co.il>



כל הזכויות שמורות למחבר ולמוציא לאור

אין לצלם או לסרוק מאוסף זה ללא אישור מהמוציא לאור  
צילום או סריקה מאוסף זה ללא אישור הינו עבירה על החוק

(וזה גם לא הוגן)

חשמל הינו משאב אנרגיה שאין לו ערך ואין תחליף. מגוון טכנולוגיות היצור, אפשרויות העברה וטרנספורמציה, שיטות המרת האנרגיה לכל סוג אחר – אלה הם המאפיינים העקריים, שעל-פיהם ובגללם תפס החשמל מקום כה חשוב בסקלת הערכים שלנו.

רבים עוסקים בענף החשמל, אך צורך בחשמלאים מקצועיים אף פעם לא נגמר ולא יגמר. תחומי התכנון, הפיתוח, היצור, הביצוע והפיקוח דורשים מומחים חדשים, ולכן – נכון עושה זה שבוחר ללמוד חשמל כמקצוע.

"מכונות חשמל והינע חשמלי" הינו אחד המקצועות הבסיסיים בלימודי הנדסאי חשמל.

#### עקרי הדברים במקצוע זה הם:

- סוגי מכונות החשמל.
- משטרי עבודה של מכונות החשמל.
- שיטות ניתוח חישובי.
- חישובי הפסדים ונצילות.
- בחירת סוג והספק מנועים בהתאם לתנאי העבודה.

ברצוני להביע את תודתי לעמיתי איגור דיקר על העזרה בפתרונות השאלות.

תודה מיוחדת למר יוסף לוריא על העזרה בכתיבת הפרק "הינע חשמלי" ופתרונות השאלות.

אני מאחל לכל המשתמש בספר זה הצלחה בלימודים וביישום הידע הנרכש בהמשך הדרך, בבניית הקרירה במקצוע החשמל!

בכבוד רב,

דימה בודנסקי

ירושלים

# תוכן

1	שנאי	1.
3	עקרונות והגדרות בסיסיים	1.1
8	הפסדים ונצילות	1.2
15	מפל המתח על שנאי	1.3
28	מעגלי תמורה	1.4
34	מספר קבוצת החיבורים	1.5
40	חיבור שנאים לעבודה מקבילית	1.6
46	שנאים מיוחדים	1.7
51	מכונת השראה	2.
53	מבנה ועקרון הפעולה	2.1
56	מאזן ההספקים והנצילות	2.2
60	המומנט הסיבובי	2.3
63	האופיין המכני	2.4
71	התנעה וויסות המהירות	2.5
81	מעגלי התמורה	2.6
89	מנוע השראה חד-מופעי	2.7
91	מכונה סינכרונית	3.
92	מבנה ותחומי שימוש	3.1
93	גנרטור סינכרוני – מעגל תמורה ודיאגרמה פאזורית	3.2
96	חיבור גנרטורים סינכרוניים במקביל	3.3
98	ויסות המתח בגנרטור סינכרוני	3.4
104	מאזן ההספקים של גנרטור סינכרוני	3.5
106	יציבות ואופיין זוויתי של גנרטור סינכרוני	3.6
110	ויסות הספק אקטיבי והספק ריאקטיבי ואופייני "V"	3.7
112	מנוע סינכרוני – מעגל תמורה ונוסחת כא"מ	3.8
114	ויסות ההספק הריאקטיבי של מנוע סינכרוני	3.9
122	מאזן ההספקים, יציבות ואופייני "V" של מנוע סינכרוני	3.10
126	התנעת מנוע סינכרוני	3.11
127	מכונות סינכרוניות מיוחדות - סקירה	3.12
131	מכונה לזרם ישר	4.
132	מבנה ועקרון הפעולה	4.1
134	כא"מ במכונה לזרם ישר	4.2
137	גנרטור בעירור זר (נפרד)	4.3
144	גנרטור בעירור עצמי (מקבילי)	4.4
149	גנרטור בעירור מעורב	4.5
152	מאזן ההספקים ונצילות בגנרטור	4.6
154	מנוע בעירור זר ובעירור מקבילי	4.7
159	מאזן ההספקים ונצילות במנוע	4.8
161	המומנט הסיבובי במנוע	4.9
169	מנוע בעירור טורי	4.10

## פרק 1. שנאי

172	4.11 מנוע בעירור מעורב
176	4.12 המנוע האוניברסלי
177	5. הינע חשמלי – פרקים נבחרים
177	5.1 התנעת ובלימת מנוע לזרם ישר
190	5.2 התנעת מנוע AC ע"י מתנע נגדים
194	5.3 בחירת הספק מנוע לפי היציבות התרמית
205	פתרונות המבחנים מקורות



## פרק 1. שנאי

## נוסחאות

מס'	פרמטר	יח'	נוסחה
1	זרם נקוב	A	$I_{1n} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \times U_{n1}} ; I_{2n} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \times U_{n2}}$
2	הספק בעומס	VA	$S = \beta S_n$
3	נצילות	–	$\eta = \frac{\beta S_n \cos \varphi_2}{\beta S_n \cos \varphi_2 + \Delta P_{Fe} + \beta^2 \Delta P_{Cu_n}}$
4	מקדם העמסה בנצילות מירבית	–	$\beta_{\eta_{\max}} = \sqrt{\frac{\Delta P_{Fe}}{\Delta P_{Cu_n}}}$
5	נצילות מירבית	–	$\eta_{\max} = \frac{\beta_{\eta_{\max}} S_n \cos \varphi_2}{\beta_{\eta_{\max}} S_n \cos \varphi_2 + 2 \times \Delta P_{Fe}}$
6	הפסדי ברזל (הספק בריקם)	W	$P_0 = \Delta P_{Fe} = \sqrt{3} I_0 U_{1n} \cos \varphi_0$
7	הפסדי נחושת נומינליים (הספק בקצר)	W	$P_{kn} = \Delta P_{Cu_n} = \sqrt{3} I_{1n} U_k \cos \varphi_k$
8	מפל מתח על שנאי "+" בעומס השראי, "-" בעומס קיבולי	%	$\Delta U \% = \beta (U_R \% \cos \varphi_2 \pm U_X \% \sin \varphi_2)$
9	רכיב אקטיבי של מתח קצר	%	$U_R \% = \frac{\Delta P_{Cu_n}}{S_n} \times 100\%$
10	רכיב ריאקטיבי של מתח קצר	%	$U_X \% = \sqrt{(U_k \%)^2 - (U_R \%)^2}$
11	מתח משני במתח ראשוני נקוב	V	$U_2 = U_{2n} \left( 1 - \frac{\Delta U \%}{100\%} \right)$
12	מתח ראשוני לקבלת מתח משני נקוב	V	$U_1 = U_{1n} \left( 1 + \frac{\Delta U \%}{100\%} \right)$
13	כא"מ מושרה בסליל	V	$E = 4.44 N f \Phi_{\max}$

$B = \frac{\Phi}{A}$	$\frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$	צפיפות שטף בגרעין	14
$k = \frac{U_{1\text{phn}}}{U_{2\text{phn}}} = \frac{N_1}{N_2}$	–	יחס מספרי הכריכות	15
$\beta_k = \frac{I_k}{I_{1n}}$	–	מקדם העמסה של ניסוי בקצר	16
$U_{kn} \% = \frac{U_k \%}{\beta_k}$	%	מתח קצר נקוב לפי מתח קצר של ניסוי לא נקוב	17
$\Delta P_{\text{Cu n}} = \frac{P_k}{\beta_k^2}$	W	הפסדי נחושת נומינליים לפי הפסדי קצר של ניסוי לא נקוב	18
$U_k \% = \frac{U_k(\text{V})}{U_n} \times 100\%$	%	מתח קצר באחוזים	19
$U'_2 = U_2 k$	V	מתח משני המשוקף לצד הראשוני	20
$E'_2 = E_2 k$	V	כא"מ משני המשוקף לצד הראשוני	21
$R'_2 = R_2 k^2$	$\Omega$	התנגדות סליל משני משוקפת	22
$X'_2 = X_2 k^2$	$\Omega$	היגב סליל משני משוקף	23
$I'_2 = \frac{I_2}{k}$	A	זרם משני המשוקף לצד הראשוני	24
$\Delta P_{\text{Cu n}(1,2)} = 3 I_{\text{phn}(1,2)}^2 R_{\text{ph}(1,2)}$	W	הפסדי נחושת של כל צד לפי התנגדות הסלילים הפאזיים	25
$\Delta P_{\text{cu n}} = 3 I_{1\text{phn}}^2 R_k$	W	הפסדי נחושת לפי התנגדות הקצר	26
$R_k = R_1 + R'_2 = R_1 + k^2 R_2$	$\Omega$	התנגדות קצר	27
$\frac{\beta_1}{\beta_2} = \frac{U_{k2} \%}{U_{k1} \%}$	–	יחס מקדמי העמסה בעבודה מקבילית	28
$\beta_i = \frac{S_T}{U_{ki} \left( \frac{S_{n1}}{U_{k1} \%} + \frac{S_{n2}}{U_{k2} \%} + \dots \right)}$	–	מקדם ההעמסה של שנאי מס' i בעבודה מקבילית בעומס המשותף $S_T$	29

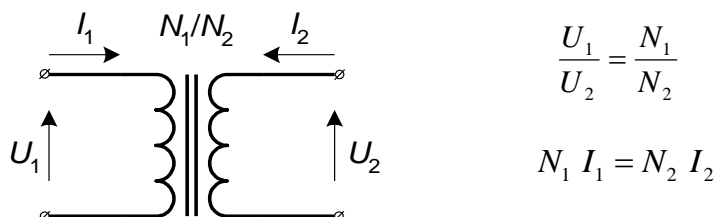


## 1.1 עקרונות והגדרות בסיסיים

שנאי הספק הוא החלק החשוב ביותר של מערכות הספק, תפקידו להמיר אנרגיה חשמלית בעלת מתח מסוים לאנרגיה חשמלית במתח אחר. כמו בכל מכונה חשמלית, המרת האנרגיה בשנאי מתרחשת באמצעות שטף מגנטי.

לשנאי חד-פאזי שני סלילים: הסליל הראשוני מחובר למקור מתח, אל הסליל המשני מחובר צרכן. שני הסלילים מלוכפים על ליבת ברזל משותפת.

הדגם של "שנאי אידיאלי" יעזור לנו ללמוד יחסים בסיסיים בין פרמטרים של האנרגיה החשמלית. המתחים, הזרמים ומספרי הכריכות של הסלילים, קשורים לפי היחסים הבאים:

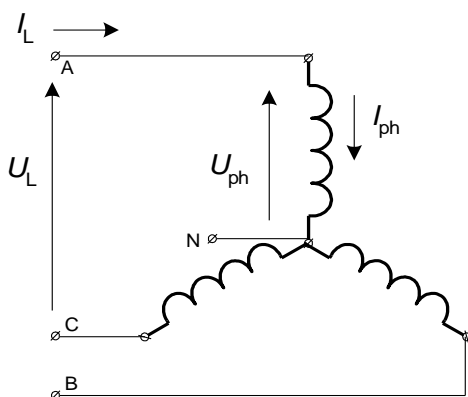


שנאי אידיאלי לא צורך, לא מייצר ולא אוגר אנרגיה והספקו בכניסה שווה להספקו ביציאה:

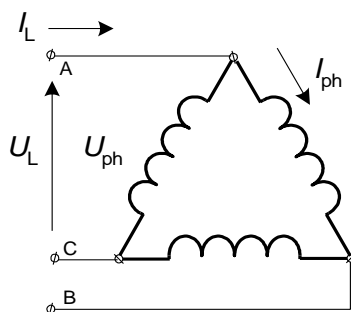
$$S_1 = S_2 \quad ; \quad U_1 I_1 = U_2 I_2$$

## שנאי תלת-פאזי

באופן עקרוני, שנאי תלת-פאזי מהווה שלושה שנאים חד-פאזיים. את הסלילים בכל צידי השנאי ניתן לחבר באחת משתי דרכים: בין שתי פאזות (משולש,  $\Delta$ ) או בין פאזה לאפס (כוכב,  $Y$ ), כך נקבל 4 קומבינציות:  $Y/y$ ,  $Y/d$ ,  $\Delta/d$ ,  $\Delta/y$ . ברישום צורת החיבורים מסמנים באות גדולה את הסליל הראשוני ובאות קטנה את הסליל המשני.



"כוכב"



"משולש"

עלינו להבדיל בין הערכים הקווים והפאזיים של המתחים והזרמים: המתח והזרם של הרשת נקראים מתח קווי  $U_L$  וזרם קווי  $I_L$ . המתח והזרם של הסליל נקראים מתח פאזי  $U_{ph}$  וזרם פאזי  $I_{ph}$ . אפשר לראות שבחיבור משולש כל סליל מחובר בין שני מוליכי הרשת, מכאן שבחיבור זה:  $U_{ph} = U_L$ .

בחיבור משולש, במקרה של עומס סימטרי:  $I_L = \sqrt{3} I_{ph}$ .  
 לעומת זאת, בחיבור כוכב המתח על כל סליל:  $U_{ph} = U_L / \sqrt{3}$ .  
 בחיבור כוכב מוליכי הקו וסלילי השנאי מחוברים בטור, לכן:  $I_L = I_{ph}$ .

## הערכים הנקובים של השנאי:

1. **הספק נקוב  $S_n$  (VA):** ההספק שעבורו תוכנן השנאי. זהו העומס המקסימלי שמותר לחבר לצד המשני של השנאי לזמן ממושך.

2. **מתח ראשוני נקוב  $U_{1n}$  (V):** מתח שעבורו תוכנן הצד הראשוני. אסור לחבר שנאי למתח גדול מזה. למתח ראשוני נקוב של שנאי תלת-פאזי נחשב הערך הקווי של המתח הראשוני  $U_{L1}$ .  
 מצד שני, חיבור שנאי למתח קטן מהנקוב הינו מותר, אך לא רצוי: זה גורם להקטנת השטף המגנטי בליבה.  
 3. **מתח משני נקוב  $U_{2n}$  (V):** מתח בין הדקי סליל משני פתוח (ללא צרכן), כאשר אל הצד הראשוני מחובר המתח הראשוני הנקוב. למתח משני נקוב של שנאי תלת-פאזי נחשב הערך הקווי של המתח המשני  $U_{L2}$ .

4. **מקדם השנאה נקוב  $k$ :** יחס בין מתחים נקובים - הראשוני והמשני.

$$k = \frac{U_{n1}}{U_{n2}} = \frac{N_1}{N_2}$$

ראינו שבשנאי חד-פאזי יחס זה שווה ליחס מספרי הכריכות:

לעומת זאת, בשנאי תלת-פאזי מקדם ההשנאה הנו היחס בין המתחים הקווים:  
 $k = \frac{U_{L1}}{U_{L2}}$  וכדי לקשור את זה עם יחס מספרי הכריכות, יש להתחשב ביחסים בין המתחים הקווים והפאזיים בכל צורת חיבור הסלילים:

$$k_{Y/Y} = \frac{U_{L1}}{U_{L2}} = \frac{\sqrt{3} U_{ph1}}{\sqrt{3} U_{ph2}} = \frac{N_1}{N_2} ; k_{Y/d} = \frac{U_{L1}}{U_{L2}} = \frac{\sqrt{3} U_{ph1}}{U_{ph2}} = \frac{\sqrt{3} N_1}{N_2}$$

$$k_{D/Y} = \frac{U_{L1}}{U_{L2}} = \frac{U_{ph1}}{\sqrt{3} U_{ph2}} = \frac{N_1}{\sqrt{3} N_2} ; k_{D/d} = \frac{U_{L1}}{U_{L2}} = \frac{U_{ph1}}{U_{ph2}} = \frac{N_1}{N_2}$$

5. **זרמים נקובים**  $I_{1n}, I_{2n} \text{ (A)}$ : זרמים מתמידים מרביים של הצד הראשוני והמשני (ערכים קווים בשנאי תלת-פאזי):

$$I_{2n} = \frac{S_n}{U_{2n}} ; \quad I_{1n} = \frac{S_n}{U_{1n}} \quad \text{בשנאי חד-פאזי:}$$

$$I_{2n} = \frac{S_n}{\sqrt{3} U_{2n}} ; \quad I_{1n} = \frac{S_n}{\sqrt{3} U_{1n}} \quad \text{בשנאי תלת-פאזי:}$$

## שאלה 1

לשנאי חד-פאזי בעל הספק נקוב 10 kVA ומתחים נקובים 660/110 V, חובר עומס שהספקו 6 kW ומקדם הספק 0.8.

חשב את: א. הזרמים הנקובים של השנאי.  
ב. הזרם הראשוני בעומס הנתון.

## פתרון סעיף א

$$I_{1n} = \frac{10000}{660} = 15.2 \text{ A} ; \quad I_{2n} = \frac{10000}{110} = 90.9 \text{ A} \quad \text{הזרמים הנקובים (1):}$$

## פתרון סעיף ב

$$P_1 = P_2 \quad \text{ניתן להניח כי השנאי הינו אידיאלי ואז:}$$

$$I_1 = \frac{P_1}{U_{1n} \cos \varphi} = \frac{6000}{660 \times 0.8} = 11.4 \text{ A} \quad \text{הזרם הראשוני:}$$

## שאלה 2

שנאי תלת-מופעי בעל הנתונים הבאים:  $U_n = 22/0.4 \text{ kV}$ ,  $S_n = 630 \text{ kVA}$ .  
צורת החיבורים: D/y.

חשב את: א. הזרמים הנקובים.  
ב. מקדם ההשנאה ויחס מספרי הכריכות.

## פתרון סעיף א

$$I_{1n} = \frac{630 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 22 \times 10^3} = 16.5 \text{ A} ; \quad I_{2n} = \frac{630 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 0.4 \times 10^3} = 909 \text{ A}$$

## פתרון סעיף ב

$$\frac{U_{1n}}{U_{2n}} = \frac{22}{0.4} = 55 ; \quad \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{ph1}}{U_{ph2}} = \frac{U_{L1}}{U_{L2} / \sqrt{3}} = 55 \times \sqrt{3} = 95.3$$

שאלה 3

נתון שנאי תלת-פאזי בעל מתחים נקובים  $22/0.4 \text{ kV}$  וצורת החיבורים  $D/y$ . הצד הראשוני מחובר למתח נקוב, אל הצד המשני מחובר עומס סימטרי:  $\cos\varphi=0.8$ ,  $P=200\text{kW}$ .

חשב את הזרם הראשוני.

$$I_1 = 6.56 \text{ A} \quad \text{זיכרון}$$

שאלה 4

יחס מספרי הכריכות בשנאי תלת-מופעי הוא:  $N_1 / N_2 = 3.6$ .  
חשב את מקדם ההשנאה, כאשר חיבורי השנאי הם: א.  $Y/y$ , ב.  $D/y$ , ג.  $Y/d$ .

$$\text{זיכרון} \quad \text{א. } k = 3.6 \quad \text{ב. } k = 2.08 \quad \text{ג. } k = 6.24$$

דיאגרמות פאזוריות של שנאי חד-פאזי

ננסה להבין את עקרונות השנאי באמצעות דיאגרמות פאזוריות של שנאי אידיאלי ושל שנאי מעשי בריקם ובעומס:

שנאי אידיאלי בריקם

נתבונן בסליל הראשוני של שנאי אידיאלי: הוא מחובר למקור מתח חילופין  $U_1$ , ושטף משתנה בגרעין משרה בו כא"מ  $E_1$ . השנאי ללא עומס אינו צורך זרם מהרשת. אפשר לרשום משוואה בהתאם לחוק קירכהוף למתחים:  $U_1 + E_1 = 0$ , מכאן:  $U_1 = -E_1$

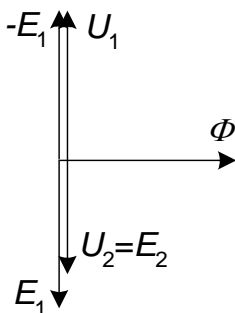
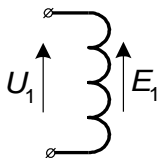
(סימן "–" לפני הכא"מ מצביע על כוונה הנגדי למתח).

בסליל המשני משרה השטף כא"מ  $E_2$ . בתנאי שכווני הליפופים של שני הסלילים זהים, כוונה של הכא"מ  $E_2$  זהה לכוונה של  $E_1$  וגודלו תלוי, לפי (13), ביחס מספרי הכריכות:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

בין הדקיו הפתוחים של הסליל המשני יתקבל מתח  $U_2$  השווה לכא"מ:  $U_2 = E_2$

$$\text{מכאן יחס המתחים:} \quad \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$



## שנאי אידיאלי בעומס

לאחר חיבור צרכן אל הסליל המשני של השנאי האידיאלי יתקבל זרם  $I_2$  בסליל המשני. זווית המופע של זרם זה  $\varphi_2$  תלויה באופי ובמקדם הספק הצרכן.

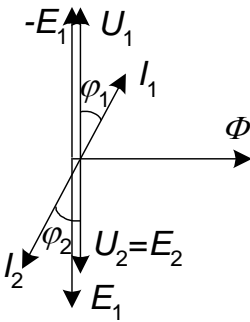
כדי לקזז את השפעתו של הזרם  $I_2$  על השטף בגרעין, ימשוך הסליל הראשוני מהרשת זרם  $I_1$ , כך שיתקיים השוויון:

$$N_1 I_1 = -N_2 I_2$$

מכאן יחס הזרמים:

$$\frac{I_1}{I_2} = -\frac{N_2}{N_1}$$

מאחר ולשנאי האידיאלי אין צריכה עצמית, זווית המופע של הזרם  $I_1$ :  $\varphi_1 = \varphi_2$



## שנאי מעשי בריקם

שנאי מעשי ללא עומס צורך מהרשת זרם ריקם  $I_0$ . נפרט את התופעה בתת-פרק הבא. בסליל המשני הפתוח אין זרם.

## שנאי מעשי בעומס

סלילי השנאי המעשי מאופיינים על ידי העכבות  $Z$ :

$$Z_2 = R_2 + jX_2 \quad ; \quad Z_1 = R_1 + jX_1$$

הזרמים בסלילי השנאי גורמים למפלי מתח על עכבות הסלילים:

$$I_1 Z_1 = I_1 R_1 + jI_1 X_1$$

$$-I_2 Z_2 = -I_2 R_2 - jI_2 X_2$$

עבור הסליל המשני אפשר לרשום:

$$\bar{U}_2 = \bar{E}_2 - \bar{I}_2 \bar{Z}_2$$

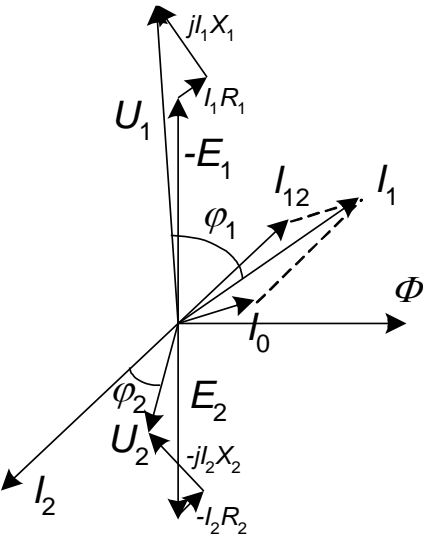
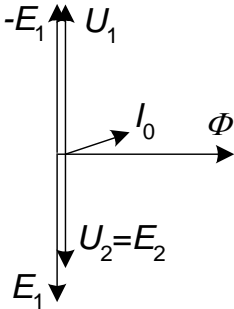
זה אומר שהמתח המשני שונה מהכא"מ גם בגודל וגם בזווית. זווית המופע בין הזרם למתח המשני היא  $\varphi_2$ .

הזרם הראשוני  $I_1$  מורכב למעשה משני זרמים: זרם העומס  $I_{12}$  ה"מתורגם" לצד הראשוני לפי יחס מספרי הכריכות, וזרם הריקם  $I_0$ . התוצאה היא שהיחס בין הזרמים הראשוני והמשני שונה מיחס מספרי הכריכות.

עבור הסליל הראשוני נרשום:  $\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 - \bar{I}_1 \bar{Z}_1$

גם במקרה זה אין שוויון בין המתח לכא"מ.

בשלב זה נסכם שתופעות מפלי המתח בסלילים וצריכת הזרם בריקם גורמות לשינוי ביחסים בין המתחים, בין הזרמים ובמקדם ההספק  $\cos \varphi$ .



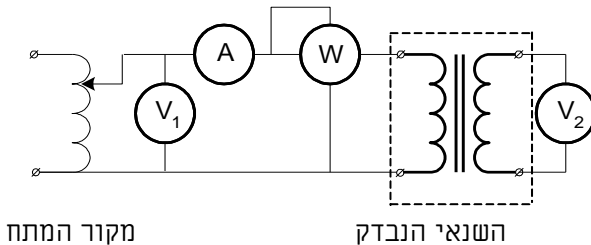
## 1.2 הפסדים ונצילות

הפסדי ההספק וזרם המגנוט הם הגורמים להבדלים העקרוניים בין הדגם של השנאי האידיאלי לבין השנאי המעשי.

במכונות חשמל ישנם שלושה סוגים עיקריים של בזבז אנרגיה: הפסדים חשמליים בסלילים, הפסדים מגנטיים בברזל והפסדים מכניים בחלקים מסתובבים. הפסדים נוספים: הפסדי רעש, אוורור וכ' - אינם משמעותיים. ללא תלות בסוגו, כל הפסד הספק מוצא ביטוי בהתחממות חלקי המכונה.

מאחר ובשנאי אין חלקים מסתובבים, נציין שני סוגי הפסדים: הפסדים חשמליים בסלילים (הפסדי נחושת)  $\Delta P_{Cu}$  והפסדים מגנטיים בגרעין (הפסדי ברזל)  $\Delta P_{Fe}$ . הערכים של הפסדי נחושת והפסדי ברזל דרושים לחישוב נצילות השנאי במשטרי עבודה שונים ולתכנון מערכת הקירור. נתונים אלו רשומים בחומר הטכני המצורף לשנאי ומוטבעים על לוחית הזיהוי.

## ניסוי ריקם



בניסוי ריקם מחברים את הצד הראשוני של השנאי למתח הראשוני הנקוב, כאשר הצד המשני מנותק מהעומס.

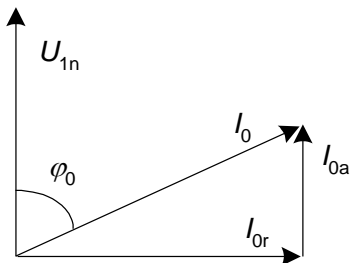
במצב כזה הספק היציאה שווה לאפס, וכל הספק שהוא צורך זהו הספק ההפסדים. בעבודה בריקם הזרם בסלילי השנאי מינימלי וניתן להזניח את הפסדי הסלילים, לכן ההפסדים בריקם הם הפסדי הברזל  $\Delta P_{Fe}$ .

## תצוגות מכשירי המדידה בניסוי בריקם:

1.  $V_1$ : מתח ראשוני נקוב  $U_{1n}$ .
2.  $V_2$ : מתח משני נקוב  $U_{2n}$ .
3.  $A$ : זרם ריקם  $I_0$ .
4.  $W$ : הפסדי ברזל  $\Delta P_{Fe} = P_0$ .

הפסדי ברזל קיימים כתוצאה ממגנוט משתנה של ליבת הברזל על ידי שטף חילופין, והם מורכבים מהפסדי היסטריזיס והפסדי זרמי מערבולת. כדי להפחית אותם, משתמשים בפלדות בעלות תכונות מגנטיות משופרות, ומרכיבים את הליבה מפחיות מבודדות דקות, כך שתהיה התנגדות גבוהה למסלול של זרמי המערבולת.

הספק הפסדי הברזל, הנצרך על ידי השנאי, גורם לצריכת זרם גם כשאין עומס. לזרם אקטיבי זה אפשר לקרוא "רכיב אקטיבי של זרם בריקם"  $I_{0a}$ .



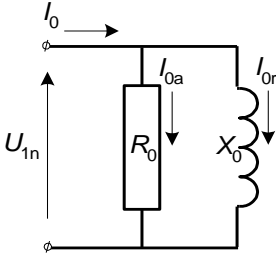
**זרם מגנוט** הנו זרם הנצרך על ידי השנאי על מנת ליצור שטף מגנטי בגרעין הברזל. מאחר ולזרם זה אופי השראי טהור, אנו נקרא לו "רכיב ריאקטיבי של זרם בריקם"  $I_{0r}$ .

עקב רווית הברזל, צורתו של זרם המגנוט אינה סינוסואידלית, ובשטף השנאי מופיעות הרמוניות (אותות סינוסואידיים בעלי תדרים שהם כפולות של תדר הרשת), הגורמות לעיוות הרמוני גם במתחי השנאי. חיבור במשולש של אחד מסלילי השנאי התלת-מופעי מנטרל את השפעתה של ההרמוניה השלישית שהיא משמעותית ביותר.

## 1.2 הפסדים ונצילות

למרות כל התופעות המורכבות הללו, אפשר להתייחס בקירוב מסוים לשנאי בריקם כאל מעגל פשוט. בדיאגרמה הפאזורית אנו רואים את שני הזרמים: האקטיבי והריאקטיבי ואת סכומם, שהוא זרם הריקם. מכאן, ניתן להציג את השנאי בריקם על ידי מעגל תמורה מקבילי המורכב משני רכיבים: התנגדות  $R_0$  והיגב  $X_0$ , אשר את ערכיהם אפשר לחשב על-פי התוצאות של הניסוי בריקם.

### שאלה 5



נתון שנאי חד-פאזי 230/125 V. תדירות: 50 הרץ, מס' הכריכות בסליל הראשוני - 175.

בניסוי בריקם נתקבל:  $I_0 = 5A$ ,  $\cos\phi_0 = 0.28$

חשב את: א. הפסדי הברזל.

ב. זרם המגנט.

ג. השטף המגנטי בליבת השנאי.

### פתרון סעיף א

נחשב את הפסדי הברזל:  $\Delta P_{Fe} = I_0 U_{in} \cos\phi_0 = 5 \times 230 \times 0.28 = 322 \text{ W}$

### פתרון סעיף ב

לפי הדיאגרמה הפאזורית:  $I_{or} = I_0 \sin\phi_0 = 5 \times 0.96 = 4.8 \text{ A}$

### פתרון סעיף ג

נחלק את השטף מנוסחת הכא"מ עבור הסליל הראשוני:  $E_1 = 4.44 \times N_1 f \Phi_{max}$

ניתן להניח כי הכא"מ הראשוני בריקם (בזרם מינימלי) שווה למתח:  $E_1 = U_{in}$

$$\Phi_{max} = \frac{U_{in}}{4.44 \times N_1 f} = \frac{230}{4.44 \times 50 \times 175} = 5.92 \text{ mWb}$$

מכאן:  $\Phi_{max} = 5.92 \text{ mWb}$

### שאלה 6

נתון שנאי חד-פאזי, בעל מתח ראשוני נקוב: 240 V. רכיבי מעגל התמורה בריקם:  $R_0 = 1.6 \text{ k}\Omega$ ,  $X_0 = 2 \text{ k}\Omega$ .

חשב את: א. ההספק ומקדם ההספק של השנאי בריקם.

ב. זרם המגנט, זרם הריקם והרכיב האקטיבי של הזרם בריקם.

### פתרון סעיף א, ב

$$P_0 = \frac{U_{in}^2}{R_0} = \frac{240^2}{1600} = 36 \text{ W}$$

נחשב את ההספק בריקם:  $P_0 = 36 \text{ W}$

הרכיבים של זרם הריקם:

$$I_{0a} = \frac{U_{in}}{R_0} = \frac{240}{1600} = 0.15 \text{ A} \quad ; \quad I_{or} = \frac{U_{in}}{X_0} = \frac{240}{2000} = 0.12 \text{ A}$$

$$I_0 = I_{0a} - jI_{0r} = 0.15 - j0.12 = 0.192 \angle -38.7^\circ \text{ A} \quad \text{הזרם בריקם:}$$

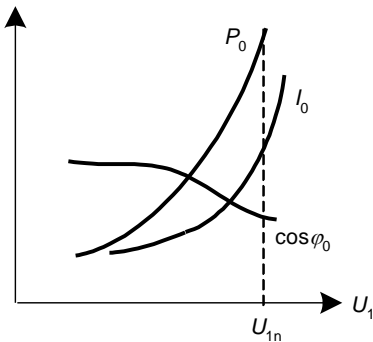
$$\cos 38.7^\circ = 0.781 \quad \text{ומקדם ההספק:}$$

## שאלה 7

בניסוי בריקם של שנאי חד-פאזי 250/120 V הראה מד ההספק 150 W ומד הזרם 1.25 A. חשב את גורם ההספק של השנאי בריקם ואת זרם המגנט של השנאי.

$$\cos \varphi_0 = 0.48 \quad ; \quad I_{0r} = 1.1 \text{ A} \quad \text{🔑}$$

## שינוי מתח ותדירות של ניסוי בריקם

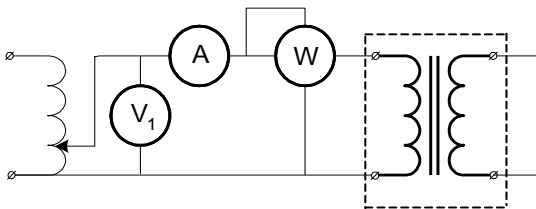


ניסוי שנאי בריקם חייב להתבצע במתח ותדירות נקובים. אם הניסוי נעשה בתנאים שונים מהתנאים הנקובים, תוצאותיו משתנות. בקירוב מסוים, הפסדי הברזל של השנאי פרופורציונליים למתח הזינה ביחס ריבועי:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Fe n} \left( \frac{U_{ph}}{U_{ph n}} \right)^2$$

תלות זרם הריקם בשינויי המתח מורכבת יותר, עקב רווית הברזל.

## ניסוי בקצר



מקור המתח

השנאי הנבדק

**בניסוי בקצר** מחברים את הצד הראשוני של השנאי אל מקור מתח, כאשר הצד המשני מקוצר. מתח המקור חייב להיות קטן מהמתח הראשוני הנקוב של השנאי עקב זרמים גבוהים בסלילי השנאי המקוצר.

**מתח קצר  $U_k$**  זהו מתח שיש לחבר אל הסליל הראשוני של השנאי המקוצר על מנת שזרם בו זרם נקוב. מתח קצר זה פרמטר חשוב המוטבע על לוחית זיהוי השנאי. מתח קצר נמדד באחוזים מהמתח הראשוני הנקוב ונמצא בתחום (4÷12%).

תצוגות מכשירי המדידה בניסוי בקצר:

1.  $V_1$ : מתח קצר  $U_k$ .
2.  $A$ : זרם קצר:  $I_k = I_{ln}$ .
3.  $W$ : הפסדי נחושת נקובים:  $P_k = \Delta P_{Cu n}$ .

(נציין, כי חיבור שנאי למתח קטן מהנקוב, מגדיל את מתח הקצר:  $U'_k = U_k \frac{U_n}{U'}$ )





## שאלה 6 (מנוע AC)

## פתרון סעיף א

לזרם ביקס  $I_0$  2 מרכיבים: המרכיב האקטיבי המבטא את הפדי הברזל בסלילי הסטטור, והמרכיב הריאקטיבי, אשר נצרך לשם יצירת השדה המגנטי.

## פתרון סעיף ב

$$Z_0 = \frac{R_0 \times jX_0}{R_0 + jX_0} = \frac{122 \times j20}{122 + j20} = 19.7^{\angle 81^\circ} \Omega \quad : Z_0 \text{ חישוב העכבה}$$

$$Z_T = (R_1 + jX_1) + \left( \left( \frac{R'_2}{s} + jX'_2 \right) // jZ_0 \right) \quad \text{חישוב עכבה שקולה של מעגל התמורה לפי:}$$

כאשר ערך החליקה הוא:  $s=0.02$ :

$$Z_T = (0.15 + j0.852) + \frac{\left( \left( \frac{0.154}{0.02} + j1.066 \right) \times 19.7^{\angle 81^\circ} \right)}{\left( \left( \frac{0.154}{0.02} + j1.066 \right) + 19.7^{\angle 81^\circ} \right)} = 7.42^{\angle 39^\circ} (\Omega)$$

$$I_1 = \frac{U_{ph}}{Z_T} = \frac{400 / \sqrt{3}}{7.42} = 31.13^{\angle -39^\circ} \text{ A} \quad \text{חישוב הזרם:}$$

כאשר ערך החליקה הוא:  $s=0.06$ :

$$Z_T = (0.15 + j0.852) + \frac{\left( \left( \frac{0.154}{0.06} + j1.066 \right) \times 19.7^{\angle 81^\circ} \right)}{\left( \left( \frac{0.154}{0.06} + j1.066 \right) + 19.7^{\angle 81^\circ} \right)} = 2.57^{\angle 29^\circ} (\Omega)$$

$$I_1 = \frac{U_{ph}}{Z_T} = \frac{400 / \sqrt{3}}{2.57} = 89.8^{\angle -30^\circ} \text{ A} \quad \text{חישוב הזרם:}$$

$$\Delta I = 89.8 - 31.13 = 58.7 \text{ A} \quad \text{לפי כך, שינוי הזרם:}$$

$$\Delta I = \frac{58.7}{89.8} \times 100 = 65\% \quad \text{ובאחוזים, ביחס לזרם הגבוה, בחליקה  $s=0.06$ :$$

## פתרון סעיף ג

$$I_0 = \frac{U_0}{Z_0} = \frac{U_{ph} - I_1 Z_1}{Z_0} \quad \text{חישוב זרם  $I_0$  לפי:}$$

כאשר ערך החליקה הוא:  $s=0.02$ :

$$I_0 = \frac{U_{ph} - I_1 Z_1}{Z_0} = \frac{231 - 31.13^{\angle -39^\circ} \times (0.15 + j0.852)}{19.7^{\angle 81^\circ}} = 10.7 \text{ A}$$

כאשר ערך החליקה הוא:  $s=0.06$ :

$$I_0 = \frac{U_{ph} - I_1 Z_1}{Z_0} = \frac{231 - 89.8 \angle -30^\circ \times (0.15 + j0.852)}{19.7 \angle 81^\circ} = 9.7 \text{ A}$$

לפי כך, שינוי הזרם:  $\Delta I = 10.7 - 9.7 = 1.0 \text{ A}$

ובאחוזים, ביחס לזרם הגבוה, בחליקה  $s=0.02$ :  $\Delta I = \frac{1.0}{10.7} \times 100 = 9\%$

הסבר: זרם ריקם אינו תלוי בעומס, אך תלוי במתח הזנה. למרות שמתח ההזנה הנו קבוע, המתח על ענף המגנוט מושפע ממתח על סלילי הסטטור ובגלל זה זרם ריקם במנוע עמוס הנו קטן מזרם ריקם במנוע ללא עומס.

## שאלה 7 (שנאי)

### פתרון סעיף א

השנאי בעל חיבורים D/y (משולש-כוכב)

### פתרון סעיף ב

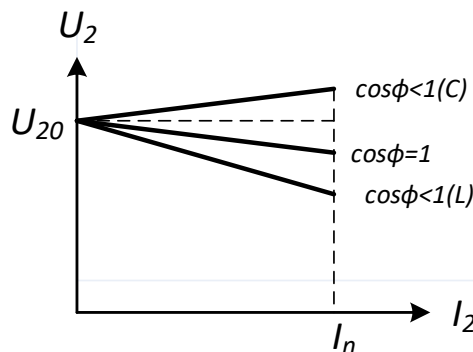
נתון מתח מופעי משני:  $U_{2ph} = 230 \text{ V}$ , חיבור הסלילים בכוכב.

לפי כך, המתח הקוי:  $U_{2L} = \sqrt{3} U_{2ph} = \sqrt{3} \times 230 = 398 \text{ V}$

מתח המופע הראשוני:  $U_{1ph} = \frac{N_1}{N_2} \times U_{2ph} = 5 \times 230 = 1150 \text{ V}$

סלילי הצד הראשוני מחוברים במשולש. לפי כך:  $U_{1L} = U_{1ph} = 1150 \text{ V}$

### פתרון סעיף ג



## שאלה 8 (שנאי)

## פתרון סעיף א

$$I_{1n} = \frac{S_n}{U_{1n}} = \frac{15000}{1200} = 12.5 \text{ A} \quad \text{חישוב הזרם הראשוני הנקוב:}$$

$$U_k = 5.4\% (U_{1n}) = \frac{5.4 \times 1200}{100} = 64.8 \text{ V} \quad \text{חישוב מתח הקצר:}$$

$$Z_k = \frac{U_k}{I_{1n}} = \frac{64.8}{12.5} = 5.184 \Omega \quad \text{חישוב עכבת המעגל הטורי:}$$

(בניסוי בקצר השפעה של המעגל המקבילי היא זניחה)

$$R_k = \frac{P_k}{I_{1n}^2} = \frac{620}{12.5^2} = 3.968 \Omega \quad \text{חישוב התנגדות הקצר:}$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{5.184^2 - 3.968^2} = 3.336 \Omega \quad \text{חישוב היגב הקצר:}$$

$$I_{2n} = \frac{S_n}{U_{2n}} = \frac{15000}{440} = 34.1 \text{ A} \quad \text{חישוב הזרם המשני הנקוב:}$$

$$I_0 = 3\% (I_{2n}) = \frac{3 \times 34.1}{100} = 1.023 \text{ A} \quad \text{חישוב זרם הריקס:}$$

(בניסוי בריקס השפעה של המעגל הטורי היא זניחה)

$$Z_0 = \frac{U_0}{I_0} = \frac{440}{1.023} = 430.2 \Omega \quad \text{חישוב עכבת המעגל המקבילי:}$$

$$R_0 = \frac{U_{2n}^2}{P_0} = \frac{440^2}{54} = 3585 \Omega \quad \text{חישוב התנגדות הריקס:}$$

$$I_{0a} = \frac{U_{2n}}{R_0} = \frac{440}{3585} = 0.123 \text{ A} \quad \text{חישוב הזרם האקטיבי:}$$

$$I_{0r} = \sqrt{I_0^2 - I_{0a}^2} = \sqrt{1.023^2 - 0.123^2} = 1.016 \text{ A} \quad \text{חישוב הזרם הריאקטיבי:}$$

$$X_0 = \frac{U_0}{I_{0r}} = \frac{440}{1.016} = 433.2 \Omega \quad \text{חישוב היגב הריקס:}$$

## פתרון סעיף ב

$$I_2' = \frac{I_2}{k} = \frac{20}{1200/440} = 7.33^{\angle -37^\circ} \text{ A} \quad I_2' \quad \text{חישוב הזרם}$$

$$\varphi_0 = 83^\circ \Leftarrow ; \text{tg} \varphi_0 = \frac{I_{0r}}{I_{0a}} = \frac{1.016}{0.123} = 8.26 \quad I_0 \quad \text{חישוב זווית מופע של}$$

$$I_1 = I_2' + I_0 = 7.33^{\angle -37^\circ} + 1.023^{\angle -83^\circ} = 8.07^{\angle -42^\circ} \text{ A} \quad I_1 \quad \text{חישוב הזרם}$$

## פתרון סעיף ג

חישוב ירידת המתח על המעגל הטורי:

$$I_2' \times (R_k + jX_k) = 7.33^{\angle -37^\circ} \times (3.968 + j3.336) = 38^{\angle 3^\circ} \text{ V}$$

חישוב המתח על פני העומס:

$$U_2 = U_1 - I_2' \times (R_k + jX_k) = 1200^{\angle 0^\circ} - 38^{\angle 3^\circ} = 1162 \text{ V}$$

-----

## שאלה 9 (מכונות חשמל)

A: מכונה סינכרונית (טבעות החלקה לחיבור סליל העירור למקור מתח DC)

B: מנוע השראה (רוטור מקוצר, ללא חיבור למקור מתח חיצוני)

C: מכונת DC (מברשות, קומוטטור, סלילי רוטור)

-----

## מבחן קיץ – 2020 מועד א'

### שאלה 1 (הינע חשמלי)

#### פתרון סעיף א

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T_M(\omega) - T_{LD}(\omega)}{J_\Sigma}$$

המשוואה הדיפרנציאלית של מהירות המנוע היא:  
 כאשר:  $T_M$  - המומנט הצירי שהמנוע מפתח.  
 $T_{LD}$  - המומנט של העומס המכני.  
 $J_\Sigma$  - מומנט האינרציה של המנוע + העומס המכני.

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T_M(\omega)}{J_M} \quad \text{לכן: } J_\Sigma = J_M \quad \text{וגם } T_{LD} = 0$$

$$T_M(\omega) = \frac{K_M}{R_a} \cdot V_M - \frac{K_M^2}{R_a} \cdot \omega(t) \quad \text{לפי השאלה:}$$

$$T_M(\omega) = \frac{K_M}{0.8} \cdot 100 - \frac{K_M^2}{0.8} \cdot \omega(t) \quad \text{לכן:}$$

$$T_M(\omega) = \frac{K_M}{0.8} \cdot 100 - \frac{K_M^2}{0.8} \cdot \omega(t)$$

$$T_M(\omega) = 125K_M - 1.25K_M^2 \cdot \omega(t)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T_M(\omega)}{J_M} = \frac{125K_M - 1.25K_M^2 \cdot \omega(t)}{2} \quad \text{לכן:}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = 62.5K_M - 0.625K_M^2 \cdot \omega(t)$$

$$\frac{d\omega}{dt} + 0.625K_M^2 \cdot \omega(t) = 62.5K_M$$

$$\frac{d\omega}{dt} + \frac{1}{\tau} \cdot \omega = \frac{\omega(\infty)}{\tau} \quad \text{המשוואה הדיפרנציאלית הכללית היא:}$$

$$\frac{d\omega}{dt} + \frac{1}{\tau} \cdot \omega = \frac{83.7758}{\tau}$$

$$\omega(\infty) = \frac{2\pi n(\infty)}{60} = \frac{2\pi 800}{60} = 83.7758 \frac{\text{rad}}{\text{sec}} \quad \text{בגלל ש:}$$

$$\frac{1}{\tau} = 0.625 K_M^2 \Rightarrow 0.625 K_M^2 \cdot \tau = 1 \Rightarrow 62.5 K_M^2 \cdot \tau = 100 \quad \text{נקבל:}$$

$$\frac{83.7758}{\tau} = 62.5 K_M \Rightarrow 62.5 K_M \cdot \tau = 83.7758$$

$$K_M = 1.19366$$

$$\tau = \frac{83.7758}{62.5 \times 1.19366} \quad \text{קבוע זמן ההתנעה:}$$

$$\tau = 1.123 \text{sec}$$

$$\omega(t) = \omega(\infty) \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad \text{הביטוי להשתנות מהירות המנוע כפונקציה של הזמן:}$$

$$\omega(t) = 83.7758 \left( 1 - e^{-\frac{t}{1.123}} \right)$$

$$\omega(t) = 83.7758 (1 - e^{-0.89t})$$

המהירות הזוויתית כפונקציה של הזמן:  
המהירות בסל"ד כפונקציה של הזמן:

$$n(t) = 800 (1 - e^{-0.89t})$$

### פתרון סעיף ב

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T_M(\omega) - T_{LD}(\omega)}{J_\Sigma} \quad \text{המשוואה הדיפרנציאלית של מהירות המנוע היא:}$$

כאשר:  $T_M$  - המומנט הצירי שהמנוע מפתח.  
 $T_{LD}$  - המומנט של העומס המכני.  
 $J_\Sigma$  - מומנט האינרציה של המנוע + העומס המכני.

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T_M(\omega) - 20}{2 + 6} = \frac{T_M(\omega) - 20}{8} \quad \text{לכן:}$$

$$T_M(\omega) = 125 K_M - 1.25 K_M^2 \cdot \omega(t)$$

בסעיף א' קיבלנו:

$$T_M(\omega) = 125 \times 1.19366 - 1.25 \times 1.19366^2 \cdot \omega$$

$$K_M = 1.19366$$

$$T_M(\omega) = 149.2 - 1.781\omega$$

לכן:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T_M(\omega) - 20}{8} = \frac{149.2 - 1.781\omega - 20}{8} \quad \text{לכן:}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = 18.65 - 2.5 - 0.223\omega$$

$$\frac{d\omega}{dt} + 0.223\omega = 16.15$$

$$\frac{d\omega}{dt} + \frac{1}{\tau} \cdot \omega = \frac{\omega(\infty)}{\tau} \quad \text{המשוואה הדיפרנציאלית הכללית היא:}$$

$$\frac{1}{\tau} = 0.223 \quad \text{נקבל:}$$

$$\tau = 4.484 \text{ sec} \quad \text{קבוע זמן ההתנעה:}$$

$$\frac{\omega(\infty)}{\tau} = 16.15 \Rightarrow \omega(\infty) = 16.15 \times 4.484$$

$$\omega(\infty) = 72.42 \frac{\text{rad}}{\text{sec}}$$

$$n(\infty) = 72.42 \times \frac{60}{2\pi}$$

$$n(\infty) = 691.56 \text{ rpm}$$

$$\omega(t) = \omega(\infty) - (\omega(\infty) - \omega(0))e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{לפי משוואת הדפקים:}$$

$$\omega(0) = \omega(\infty)_{\text{התנעה}} = 83.7758 \frac{\text{rad}}{\text{sec}} \quad \text{אבל:}$$

לכן הביטוי להשתנות המהירות הזוויתית של המנוע כפונקציה של הזמן הוא:

$$\omega(t) = 72.42 - (72.42 - 83.7758)e^{-\frac{t}{4.484}}$$

$$\omega(t) = 72.42 + 11.356 \times e^{-\frac{t}{4.484}}$$

$$\omega(t) = 72.42 + 11.356 \times e^{-0.223t} \quad \text{המהירות הזוויתית כפונקציה של הזמן:}$$

חישוב הביטוי להשתנות מהירות המנוע כפונקציה של הזמן:

$$11.356 \frac{\text{rad}}{\text{sec}} \Rightarrow 11.356 \times \frac{60}{2\pi} = 108.44 \text{ rpm}$$

$$n(t) = 691.56 + 108.44 \times e^{-0.223t} \quad \text{והמהירות בסל"ד כפונקציה של הזמן היא:}$$



## שאלה 2 (שנאי)

### פתרון סעיף א

נניח ווקטור המתח הראשוני כווקטור היחוס.

$$I_{\text{in}} = I'_{2n} = \frac{S_n}{U_{\text{in}}} = \frac{4000}{460} = 8.7 \text{ A} \quad \text{חישוב הזרם:}$$

חישוב ירידת המתח על רכיבי מעגל התמורה במקדם הספק 1:

$$\overline{\Delta U} = \bar{I}_{\text{in}} \bar{Z}_{\text{TR}} = 8.7^{\angle 0^\circ} \times ((0.62 + 0.56) + j(1.35 + 1.22)) = 24.6^{\angle 65^\circ} \text{ V}$$

חישוב המתח על פני העומס (הערך המיוחס):



$$U_2' = \bar{U}_{in} - \bar{\Delta U} = \bar{I}_{in} \bar{Z}_{TR} = 460 - 24.6^{\angle 65^\circ} = 450^{\angle -3^\circ} \text{ V}$$

$$U_2 = U_2' \frac{U_{in}}{U_{2n}} = 450 \times \frac{460}{230} = 225 \text{ V}$$

חישוב המתח על פני העומס:

חישוב ירידת המתח על רכיבי מעגל התמורה במדמס הספק 0.7:

$$\bar{\Delta U} = \bar{I}_{in} \bar{Z}_{TR} = 8.7^{\angle -46^\circ} \times ((0.62 + 0.56) + j(1.35 + 1.22)) = 24.6^{\angle 19^\circ} \text{ V}$$

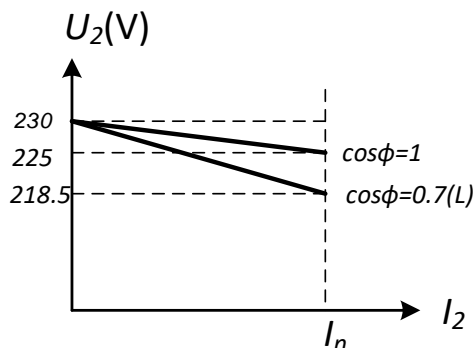
חישוב המתח על פני העומס (הערך המיוחס):

$$U_2' = \bar{U}_{in} - \bar{\Delta U} = \bar{I}_{in} \bar{Z}_{TR} = 460 - 24.6^{\angle 19^\circ} = 437^{\angle -1^\circ} \text{ V}$$

$$U_2 = U_2' \frac{U_{in}}{U_{2n}} = 437 \times \frac{460}{230} = 218.5 \text{ V}$$

חישוב המתח על פני העומס:

פתרון סעיף ב



פתרון סעיף ג

1. הגבלת זרם קצר במעגל המכשיר
2. יצירת שיטת הגנה בפני חישמול "הפרד מגן" שבו לא נוצר מתח מגע במקרה תקלה בבידוד.

פתרון סעיף ד

שנאים בעלי קבוצות חיבורים שונות, באופן כללי, לא יכולים לעבוד במקביל, אך לפעמים זה אפשרי, תלוי בקבוצות החיבורים.

שנאים בעלי ערכי מתח קצר שונים יכולים לעבוד במקביל. אך כמה שההפרש הוא גדול יותר, קטן העומס המשותף המותר לשנאים הללו.

-----

**שאלה 3 (מכונה סינכרונית)**

פתרון סעיף א

$$(\bar{U}_{ph} = U_L = 400 \text{ V } I_{ph} = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \frac{800}{\sqrt{3}} = 462 \text{ A})$$

חישוב הערכים הפאזיים:

חישוב הכא"מ ב-2 המקרים לפי:  $\bar{E} = \bar{U}_{ph} + I_{ph} (R_a + jX_s)$

$$\bar{E} = 400^{\angle 0^\circ} + 462 \times (0.015 + j0.1) = 409.5^{\angle 6.5^\circ} \text{ V} : \cos \varphi = 1 \quad 1.$$

$$\bar{E} = 400^{\angle 45.6^\circ} + 462 \times (0.015 + j0.1) = 438.7^{\angle 49.2^\circ} \text{ V} : \cos \varphi = 0.7 \quad 2.$$

לפי האופיין המצורף לשאלה, זרם העירור הנדרש בשני המקרים, נע בין הערכים (3.5–4.0) A (בערך).

#### פתרון סעיף ב

חישוב הספק היציאה ב-2 המקרים לפי:  $P_2 = \sqrt{3}UI \cos \varphi$

$$P_2 = \sqrt{3} \times 400 \times 800 \times 1 = 554.3 \text{ kW} : \cos \varphi = 1 \quad 3.$$

$$P_2 = \sqrt{3} \times 400 \times 800 \times 0.7 = 388.0 \text{ kW} : \cos \varphi = 0.7 \quad 4.$$

חישוב הפסדי נחושת:  $\Delta P_{Cu} = 3I_{ph}^2 R_a = 3 \times 462^2 \times 0.015 = 9.6 \text{ kW}$

חישוב הנצילות ב-2 המקרים לפי:  $\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P}$

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{554.3}{554.3 + 9.6 + 56} = 0.894 : \cos \varphi = 1 \quad 5.$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{388}{388 + 9.6 + 56} = 0.855 : \cos \varphi = 0.7 \quad 6.$$

#### פתרון סעיף א

$$n = \frac{60f}{p} = \frac{60 \times 50}{2} = 1500 \text{ min}^{-1}$$

המהירות הסינכרונית:

#### שאלה 4 (מנוע השראה)

#### פתרון סעיף א

מהירות ציר מנוע השראה תלויה במהירות השדה המסתובב:  $n = n_1(1-s)$ , כאשר

מהירות השדה המסתובב  $n = \frac{60f}{p}$  תלויה בתדר רשת זרם חילופין, ביחס ישיר.

המאפיינים המכניים שבאזור ב', שייכים למהירויות שונות של ציר המנוע, ולכן, ע"מ לקבל אותם, יש לשנות בהתאם את תדר הרשת, באמצעות הממיר ומעגל הבקרה.

#### פתרון סעיף ב

$$M = \frac{9.55P}{n} = \frac{9.55 \times 3200}{950} = 32.17 \text{ Nm}$$

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{1000 - 950}{1000} = 0.05$$

$$P_{mech} = P_2 + \Delta P_{mech} = 3200 + 190 = 3390 \text{ W}$$

$$P_{em} = \frac{P_{mech}}{1-s} = \frac{3390}{1-0.05} = 3568 \text{ W} \quad \text{חישוב ההספק האלמ"ג:}$$

$$M_{em} = \frac{9.55 P_{em}}{n_1} = \frac{9.55 \times 3568}{1000} = 34.08 \text{ Nm} \quad \text{חישוב המומנט האלמ"ג:}$$

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{3200}{0.82} = 3902 \text{ W} \quad \text{חישוב הספק הצריכה:}$$

$$I_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} U_{ln} \cos \varphi} = \frac{3902}{\sqrt{3} \times 400 \times 0.7} = 8.05 \text{ A} \quad \text{חישוב זרם המנוע:}$$

$$I_{ph} = I_L = 8.05 \text{ A} \quad \text{זרם המופע בחיבור הסלילים בכוכב:}$$

$$\Delta P_{Cu1} = 3 I_{Lph}^2 R_1 = 3 \times 8.05^2 \times 0.6 = 116 \text{ W} \quad \text{חישוב הפסדי נחושת בסטטור:}$$

חישוב ההפסדים המגנטיים (ברזל):

$$\Delta P_{Fe} = P_1 - P_{em} - \Delta P_{Cu1} = 3902 - 3568 - 116 = 218 \text{ W}$$

## שאלה 5 (מנוע השראה)

### פתרון סעיף א

נוסחת חישוב ההחלקה הקריטית דרך מאפייני מעגל התמורה היא:

$$s_k = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_{20}')^2}}$$

ולאחר הוספת נגד התנעה במעגל הרוטור, הנוסחה נראית כך:

$$s_k = \frac{(R_2 + R_{st})'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_{20}')^2}}$$

מזה ניתן להסיק, כי הוספת נגד במעגל הרוטור מגדילה את ערך החליקה הקריטית,

כך שבמקרה הקיצוני, בערך מסויים של נגד ההתנעה  $R_{st \max} = R_2 \left( \frac{1}{s_k} - 1 \right)$ , החליקה

הקריטית המתקבלת היא:  $s_k = 1$ , וזה אומר שלמנוע מומנט מירבי במצב  $n=0$ , זאת אומרת, בהתנעה.

### פתרון סעיף ב

בגלל הליפופי הרוטור וטבעות ההחלקה, מנוע בעל רוטור מלופף הוא מורכב יותר, כבד יותר, בעל מימדים גדולים יותר, ועקב כל זה – יקר יותר גם בייצור, וגם בתחזוקה.

### פתרון סעיף ג

ליצירת השטף המגנטי במכונה.

## שאלה 6 (מנוע DC)

### פתרון סעיף א

$$M_n = \frac{9.55 P_n}{n} = \frac{9.55 \times 2700}{1000} = 25.8 \text{ Nm} \quad \text{חישוב המומנט הנומינלי של המנוע:}$$

$$M_{TR} = \frac{9.55 P_n}{n_{TR}} = \frac{9.55 \times 2700}{200} = 129 \text{ Nm} \quad \text{חישוב המומנט המרבי של המסוע:}$$

### פתרון סעיף ב

$$M_{em} = k_m \Phi I_a \quad \text{הנוסחה עבור מומנט המנוע:}$$

$$k_m \Phi = \frac{M_{em}}{I_a} = \frac{25.8}{I_a} \quad \text{נחלץ את } k_m \Phi \text{ ונציב את הערכים הידועים:}$$

$$U = E + I_a R_a = k_m \Phi \omega + I_a R_a \quad \text{הנוסחה עבור מתח מנוע:}$$

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi \times 1000}{60} = 104.7 \text{ rad/s} \quad \text{חישוב המהירות הזוויתית:}$$

$$250 = 104.7 k_m \Phi + 1.2 I_a \quad \text{נציב את הערכים:}$$

$$250 = 104.7 \times \frac{25.8}{I_a} + 1.2 I_a \quad : k_m \Phi = \frac{25.8}{I_a} \quad \text{נציב את הערך}$$

$$1.2 I_a^2 - 250 I_a + 2701 = 0 \quad \text{נפשט:}$$

$$I_{a1} = 197 \text{ A} ; I_{a2} = 11.4 \text{ A} \quad \text{נפתור משוואה ריבועית:}$$

ולפי ההספק והמתח המנוע  $P = 2700 \text{ W}$ ,  $U = 250 \text{ V}$ , השורש השני הגיוני:

$$I_{an} = 11.4 \text{ A}$$

### פתרון סעיף ג

$$E_0 = U = 250 \text{ V} \quad \text{בהזנת מומנט הרייקם, } I_a = 0 \text{ ו } I_a = 0:$$

$$E_n = U - I_{an} R_a = 250 - 11.4 \times 1.2 = 236.3 \text{ V} \quad \text{חישוב הכא"מ בעומס נומינלי:}$$

$$n_0 = n_n \frac{E_0}{E_n} = 1000 \times \frac{250}{236.3} = 1058 \text{ rpm} \quad \text{חישוב המהירות בריקם לחס הכא"מ:}$$

$$n_{TR} = 1058 \times 0.2 = 212 \text{ rpm} \quad \text{חישוב מהירות המסוע בריקם לפי } TR=0.2:$$

### פתרון סעיף ד

הורדת מתח הזנה, ללא הקטנת מומנט העומס על הציר, תגרום לעליית הזרם ביחס הפוך. בגלל שהמנוע כבר עובד בעומס המרבי, צריכת הזרם שלו תעלה מעל הערך הנומינלי, ובגלל זה המנוע הנתון לא מתאים ויש להחליף אותו למנוע גדול יותר.

-----

## שאלה 7 (מנוע DC)

## פתרון סעיף א

חישוב הכא"מ במתח 240V וזרם 10A:  $E_1 = U_1 - I_{a1}R_a = 240 - 10 \times 1.2 = 228 \text{ V}$

המהירות הזוויתית ב-2000rpm:  $\omega_1 = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi \times 2000}{60} = 209.4 \text{ rad/s}$

$$k_m \Phi = \frac{E}{\omega} = \frac{228}{209.4} = 1.0886$$

חישוב המומנט במהירות 2000rpm וזרם 10A:

$$T_2 = k_m \Phi I_a = 1.0886 \times 10 = 10.886 \text{ Nm}$$

חישוב המומנט במהירות 1000rpm וזרם 8A:

$$T_1 = k_m \Phi I_a = 1.0886 \times 8 = 8.709 \text{ Nm}$$

## מציאת המשתנה:

$$n_2 - n_1 = 2000 - 1000 = 1000; \quad T_2 - T_1 = 10.886 - 8.709 = 2.177$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta n} = \frac{2.177}{1000} = 2.177 \times 10^{-3}$$

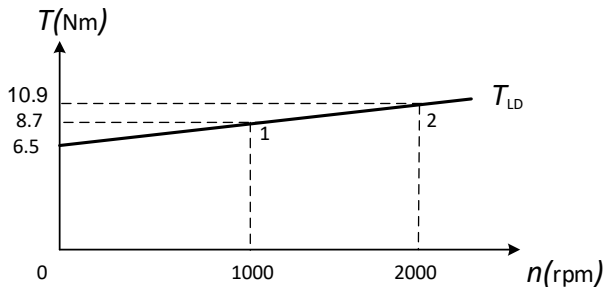
מציאת הקבוע: מצאנו, כי בגלל היחס הליניארי, עם כל 1000 rpm המומנט משתנה

בערך של  $\Delta T = 2.177 \text{ Nm}$

לפי כך, במהירות  $n=0$  המומנט הוא:  $T_0 = T_1 - \Delta T = 8.709 - 2.177 = 6.532 \text{ Nm}$

$$T_{LD}(n) = 6.532 + 2.177 \times 10^{-3} n$$

## פתרון סעיף ב



## פתרון סעיף ג

חישוב הכא"מ במהירות 1000rpm:  $\omega_2 = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi \times 1000}{60} = 104.7 \text{ rad/s}$

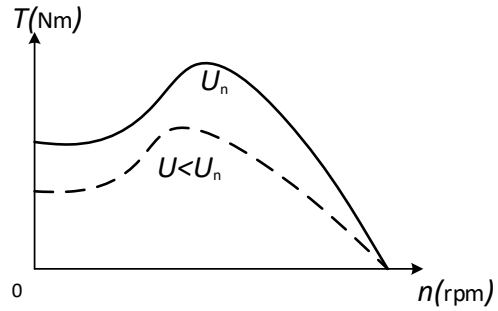
$$E_2 = k_m \Phi \omega_2 = 1.0886 \times 104.7 = 114 \text{ V}$$

חישוב המתח בזרם 8A:

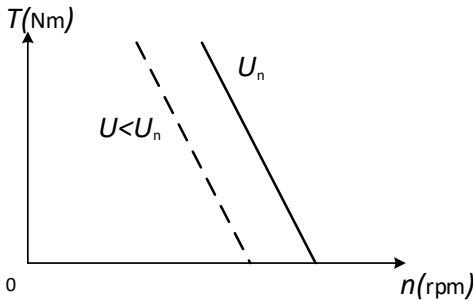
$$U_2 = E_2 + I_{a2}R_a = 114 + 8 \times 1.2 = 123.6 \text{ V}$$

## שאלה 8 (מנוע)

### פתרון סעיף א



### פתרון סעיף ב



### פתרון סעיף ג

המתח המופע המשוני בחיבור הסליל המשוני במשולש:  $U_{ph2} = U_{L2} = 400 \text{ V}$   
 המתח המופע הראשוני, לפי יחס מספרי הכריכות:

$$U_{ph1} = \frac{N_1}{N_2} U_{ph2} = \frac{800}{500} \times 400 = 640 \text{ V}$$

המתח השלוב הראשוני בחיבור הסליל הראשוני בכוכב:

$$U_{L1} = \sqrt{3} U_{ph1} = \sqrt{3} \times 640 = 1108 \text{ V}$$

חישוב ההספק הנדמה של המנוע:  $S_M = \sqrt{3} UI = \sqrt{3} \times 400 \times 32 = 22.17 \text{ kVA}$

זהו ההספק הנדרש מהשנאי:  $S_{TR} = S_M = 22.17 \text{ kVA}$

חישוב הזרם הראשוני:  $I_1 = \frac{S_{TR}}{\sqrt{3} U_1} = \frac{22.17 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 1108} = 11.55 \text{ A}$

## שאלה 9 (מכונה סינכרונית)

### פתרון סעיף א

רואים, כי ווקטור הזרם מפגר אחרי ווקטור המתח.

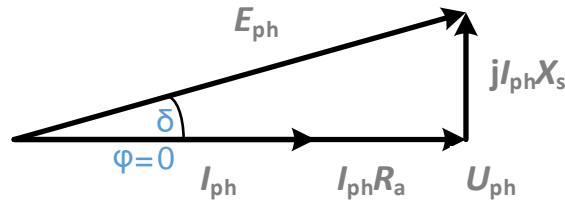
### פתרון סעיף ב

הכ"א שנוצר בסלילי הסטטור של גנרטור סינכרוני, תלוי במהירות סיבוב הרוטור (התדירות), מספר כריכות בסלילי הסטטור, והשטף המגנטי הנוצר ע"י סליל העירור, לפי הנוסחה:

$$E = 4.44 N f \Phi_{\max}$$

מצד שני, השטף תלוי בזרם העירור  $I_f$ , מספר כריכות בסליל העירור, ובפרמטרים של המעגל המגנטי.

פתרון סעיף ג



**שאלה 10 (שנאי)**

פתרון סעיף א

חישוב הרכיב האקטיבי והרכיב הריאקטיבי של זרם הריקם:

$$I_{0a} = \frac{U_1}{R_0} = \frac{2300}{106000} = 0.0217 \text{ A} ; I_{0r} = \frac{U_1}{X_0} = \frac{2300}{11000} = 0.2091 \text{ A}$$

חישוב הזרם בריקם  $I_0 = I_{0a} - jI_{0r} = 0.0217 - j0.2091 = 0.210 \angle -84^\circ \text{ (A)}$

חישוב העכבה של המעגל המגנטי:  $Z_0 = \frac{U_1}{I_0} = \frac{2300}{0.210 \angle -84^\circ} = 1095 \angle 84^\circ (\Omega)$

ומקדם ההספק:  $\cos 84^\circ = 0.1045$

פתרון סעיף ב

חישוב עכבת העומס:  $Z_{LD} = 2.8 + j1.5 = 3.176 \angle 28^\circ (\Omega)$

ומקדם ההספק:  $\cos 28^\circ = 0.881$

פתרון סעיף ג, ד

חישוב  $Z_2' = Z_{LD} k^2 = 3.176 \angle 28^\circ \times \left( \frac{2300}{230} \right)^2 = 317.6 \angle 28^\circ \Omega$

חישוב  $(Z_{eq} + Z_2') = 317.6 \angle 28^\circ + (4.45 + j6.45) = 324.6 \angle 28.6^\circ \Omega$

חישוב העכבה השקולה של השנאי בעומס:

$$Z_T = (Z_0) // (Z_{eq} + Z_2') = \frac{1095 \angle 84^\circ \times 324.6 \angle 28.6^\circ}{1095 \angle 84^\circ + 324.6 \angle 28.6^\circ} = 272.6 \angle 40.4^\circ \Omega$$

חישוב הזרם הנצרך:  $I_1 = \frac{U_{ph}}{Z_T} = \frac{2300}{272 \angle 40.4^\circ} = 8.46 \angle -40.4^\circ \text{ A}$

מקדם ההספק בכניסה:  $(\cos \phi_1 = 0.762)$



## מקורות

1. דפני י. מכוונות חשמל. כתבי-יד
2. ד"ר אלמקיס ד. המרת אנרגיה. המרכז לטכנולוגיה חינוכית. 1989
3. Токарев Б.Ф. Электрические машины: Москва. Энергоатомиздат: 1989
4. MIT Open course Electrical Engineering and Computer Science
5. קוסטנקו מ. פיזטרובסקי ל.: מכוונות חשמל. אורט ישראל, 1975
6. ד"ר אלכסנדרוביץ' א. הנע חשמלי. ההוצאה לאור לסטודנטים בטכניון. 1972
7. אוסטר ב. יסודות ההנע החשמלי. אורט ישראל. 1989
8. Москаленко В.В. Электрический привод. Москва. ИНФРА-М, 2015
9. Bill Drury. The Control Techniques drives and controls handbook: 2001