

א. נוסחאון במערכות הספק

לכיתה י"ג

ב. נוסחאון במכוונות חשמל והינע

לכיתה י"ג

מערכות הספק ומכוונות חשמל והינע ט'

למתמחים במערכות הספק פיקוד ובקרה במגמת הנדסת חשמל בקרה ואנרגיה

(כיתה י"ג)

הוראות לנבחן

א. משך הבחינה: ארבע שעות.

ב. מבנה השאלון ומפתח ההערכה: בשאלון זה תשע שאלות. יש להשיב על ארבע שאלות בלבד. לכל שאלה – 25 נקודות, סך-הכול – 100 נקודות. שים לב: עליך לענות על שאלה אחת לפחות מן הפרק הראשון ועל שאלה אחת לפחות מן הפרק השני.

ג. חומר עזר מותר לשימוש: מחשבון.

ד. הוראות מיוחדות:

- ענה על מספר השאלות הנדרש בשאלון. המעריך יקרא ויעריך את מספר השאלות הנדרש בלבד, לפי סדר כתיבתן במחברתך, ולא יתייחס לתשובות נוספות.
- התחל כל תשובה לשאלה חדשה בעמוד חדש.
- רשום את כל תשובותיך אך ורק בעט.
- הקפד לנסח את תשובותיך כהלכה ולסרטט את תרשימיך בבהירות.
- כתוב את תשובותיך בכתב-יד ברור, כדי לאפשר הערכה נאותה של תשובותיך.
- אם לדעתך חסרים נתונים הדרושים לפתרון שאלה, אתה רשאי להוסיף אותם, בתנאי שתנמק מדוע הוספת אותם.
- בכתיבת פתרונות חישוביים, קבלת מֶרֶב הנקודות מותנית בהשלמת כל המהלכים שלהלן, בסדר שבו הם רשומים:

- * רישום הנוסחה המתאימה.
- * הצבה של כל הערכים ביחידות המתאימות.
- * חישוב (אפשר באמצעות מחשבון).
- * רישום התוצאה המתקבלת, יחד עם יחידות המידה המתאימות.
- * ליווי הפתרון החישובי בהסבר קצר.

בשאלון זה 10 עמודים ו-38 עמודי נספחים.

ההנחיות בשאלון זה מנוסחות בלשון זכר, אך מכוונות לנבחנות ולנבחנים כאחד.

בהצלחה!

השאלות

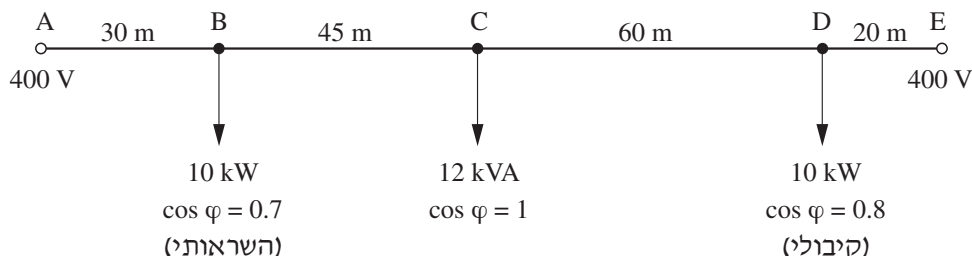
ענה על ארבע מבין השאלות 1–9. עליך לענות על שאלה אחת לפחות מן הפרק הראשון ועל שאלה אחת לפחות מן הפרק השני.

פרק ראשון: מערכות הספק א'

ענה על שאלה אחת לפחות מבין השאלות 1–4 (לכל שאלה – 25 נקודות).

שאלה 1

באיור לשאלה 1 מתוארת רשת תלת-מופעית $400 \text{ V} / 50 \text{ Hz}$, המוזנת בשני מתחים שווים. מוליכי הרשת עשויים מנחושת $\left[\gamma = 57 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} \right]$, וההיגב ההשראותי שלהם ליחידת אורך הוא $X_0 = 0.35 \cdot 10^{-3} \Omega / \text{m}$.

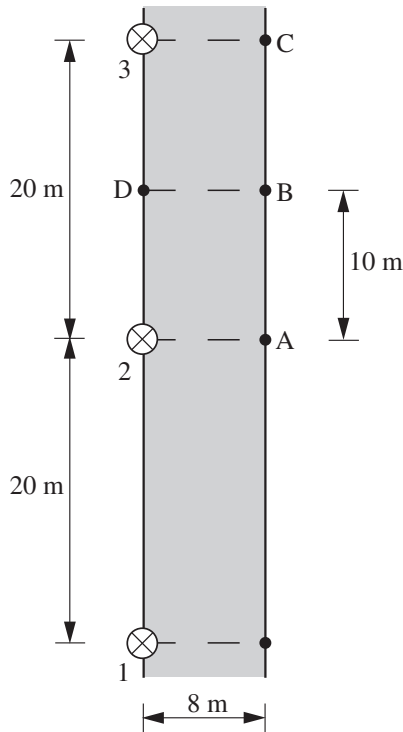


איור לשאלה 1

- חשב את הזרם בכל אחד מקטעי הרשת. רשום את תשובתך בהצגה מרוכבת (קומפלקסית).
- חשב את שטח־החתך האחיד של מוליכי הרשת, הנדרש כדי שמפל המתח המרבי ברשת יהיה 3%.
- קבע את שטח־החתך התקני (המסחרי) של המוליכים, וחשב את המתח המזערי ברשת עבור שטח־החתך שקבעת.

שאלה 2

באיור לשאלה 2 נתון קטע של רחוב שרוחבו 8 m, המואר על-ידי שלושה עמודי תאורה, המסומנים בספרות 1+3. בכל עמוד מותקן גוף תאורה יחיד, הכולל נורת נתרן אחת שהספקה 150 W. גובה כל עמוד הוא 7 m.



איור לשאלה 2

א. חשב את:

1. עוצמת ההארה המרבית (E_{\max}) של עמוד תאורה יחיד (ללא השפעת עמודי תאורה אחרים).
2. עוצמת ההארה בנקודה A.
3. עוצמת ההארה בנקודה B.

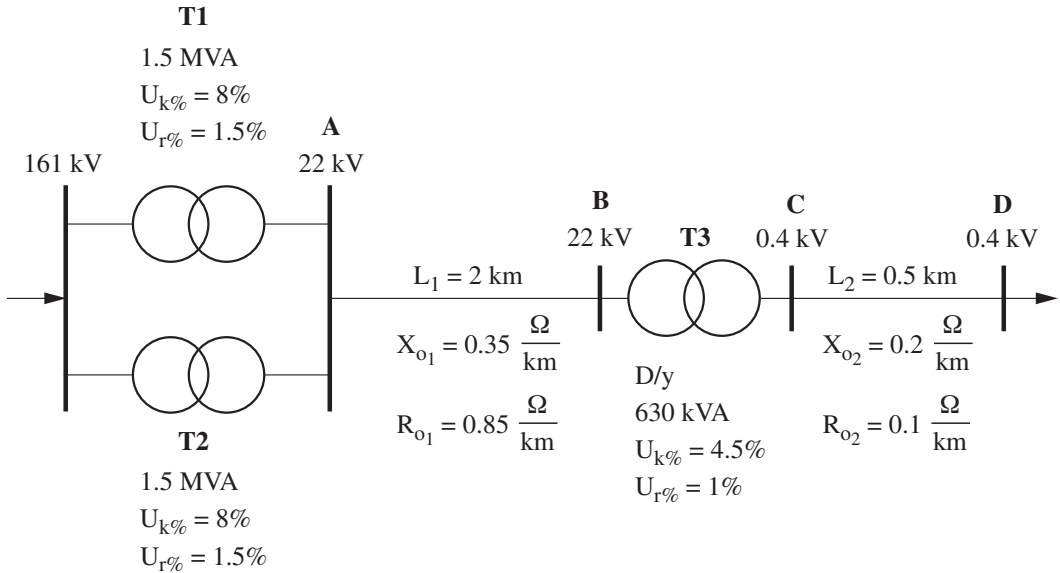
הערה: התבסס בחישוביך על הדיאגרמה הפולארית (עקום I) הנתונה בנוסחאון.

- ב. קבע, ללא חישובים נוספים, באיזו מבין הנקודות המצוינות באיור (A, B, C, D) תתקבל עוצמת ההארה המזערית (המינימלית). נמק את קביעתך.

המשך בעמוד 4

שאלה 3

באיור לשאלה 3 נתונה רשת תלת-מופעית.



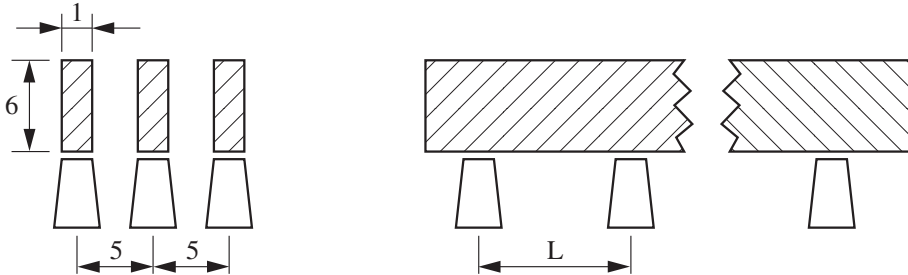
איור לשאלה 3

- חשב את זרם הקצר התלת-מופעני בפס-הצבירה A .
- חשב את זרם הקצר התלת-מופעני בפס-הצבירה D .
- חשב את זרם הקצר בסלילי השנאי T3 , כאשר הקצר מתרחש בפס-הצבירה D .

שאלה 4

- לוח חשמל ראשי 400 V / 50 Hz של מפעל מוזן באמצעות קו הזנה שאורכו 150 m .
- הקו כולל שני כבלים, $2 \times (4 \times 150 \text{ mm}^2)$, ומוליכיו עשויים מנחושת $\left[\gamma = 57 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} \right]$.
- ההיגב ההשראותי ליחידת אורך של כבל יחיד הוא $X_0 = 0.07 \Omega / \text{km}$.

באיור לשאלה 4 נתון חתך של פסי-הצבירה שבלוח הראשי, העשויים מנחושת. כל המידות באיור נתונות בס"מ.



איור לשאלה 4

להלן הנתונים של פסי-הצבירה:

מאמץ כפיפה מרבי – $\sigma_{\max} = 2500 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$

משקל סגולי של נחושת – $g = 8.9 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3}$

מקדם האלסטיות – $E = 1.1 \cdot 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$

- א. חשב את זרם הקצר התלת-מופעי בפס-צבירה.
- ב. חשב את הכוח F הפועל על פס-צבירה שאורכו 1 m.
- ג. קבע את האורך המרבי של פס-צבירה בין שני מבדדים (L), הנדרש כדי להבטיח עמידה בפני כוחות אלקטרו-דינמיים.
- ד. הראה שאין סכנת תהודה מכנית של פסי-הצבירה, כאשר האורך של פס-צבירה בין שני מבדדים הוא זה שחישבת בסעיף ג'.

פרק שני: המרת אנרגיה והינע א'

ענה על שאלה אחת לפחות מבין השאלות 5–7 (לכל שאלה – 25 נקודות).

שאלה 5

נתוניו הנקובים של מנוע השראה תלת־מופעי בעל רוטור מלופף, שסלילי הסטטור בו מחוברים בחיבור משולש, הם:

$$15 \text{ kW} \quad , \quad 400 \text{ V} \quad , \quad 50 \text{ Hz} \quad , \quad 30 \text{ A} \quad , \quad 1470 \text{ r.p.m.}$$

התנגדות סלילי הסטטור למופע היא: $R_1 = 0.35 \Omega$

התנגדות סלילי הרוטור למופע היא: $R_2 = 0.2 \Omega$

כמו כן נתון:

$$s_k = 0.2 \quad , \quad \Delta P_{\text{mech}} = 160 \text{ W} \quad , \quad \Delta P_{\text{Fe}} = 410 \text{ W}$$

הערה: הזנח בחישוביך את הפסדי ההספק הנוספים.

א. עבור העמסה במומנט נקוב, חשב את:

1. נצילות המנוע
2. המומנט המרבי של המנוע
3. ערכו של הנגד שיש להוסיף לכל סליל ברוטור, על־מנת שמהירות הסיבוב של המנוע תרד ל־1350 r.p.m. .

ב. סרטט במערכת צירים אחת גרף עקרוני של האופיין המכני הטבעי $M = f(n)$ (ללא נגד ברוטור) וגרף עקרוני של האופיין המכני כאשר מחובר נגד לרוטור. סמן בסרטוטך את מסלול המעבר ממצב עבודה בתנאים נקובים למצב העבודה כאשר נוסף נגד לרוטור.

שאלה 6

נתוניו הנקובים של מנוע לזרם ישר בעירור מקבילי הם:

$$P_n = 9.6 \text{ kW} , U_n = 220 \text{ V} , I_n = 51 \text{ A} , I_e = 1 \text{ A} , n_n = 2000 \text{ r.p.m.} , R_a = 0.22 \Omega$$

- א. חשב את המומנט הנקוב ואת איבודי המומנט בריקם.
- ב. זרם העוגן עולה ל-60 A עקב הגדלת העומס. חשב את מהירות הסיבוב ואת המומנט של המנוע.
- ג. סרטט אופיין מכני עקרוני של המנוע הנתון: $n = f(M)$, וסמן עליו את נקודת העבודה בעומס נקוב באות N ואת נקודת העבודה בריקם באות O.

שאלה 7

נתוניו הנקובים של שנאי תלת-מופעי הם:

$$1000 \text{ kVA} , 22 / 0.4 \text{ kV} , Y / y$$

בניסוי קצר בזרם נקוב התקבלו התוצאות הבאות:

$$P_k = 9 \text{ kW} , U_k = 4.5 \%$$

בניסוי ריקם במתח נקוב נמדדו הפסדי ריקם של 2.4 kW .

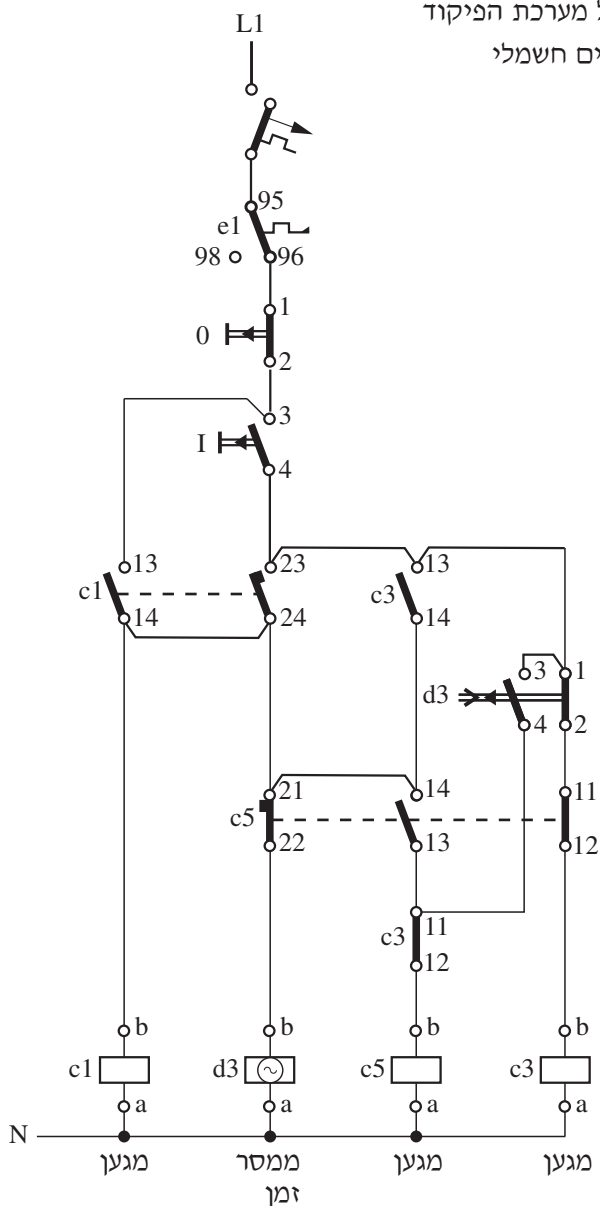
- א. חשב את הנצילות המרבית של השנאי, כאשר הוא מועמס בעומס בעל מקדם הספק של 0.8 .
- ב. השנאי מועמס בעומס השראותי תלת-מופעי של 750 kW בעל מקדם הספק של 0.85 . חשב את המתח השניוני (U_2) כאשר השנאי מוזן במתח נקוב.
- ג. חשב מה צריך להיות ערכו של המתח בצד הראשוני על-מנת שהמתח בצד השניוני יהיה מתח נקוב, כאשר העומס הוא זה המתואר בסעיף ב'.

פרק שלישי: מערכות פיקוד ממוחשבות ובקרים בני-תכנות

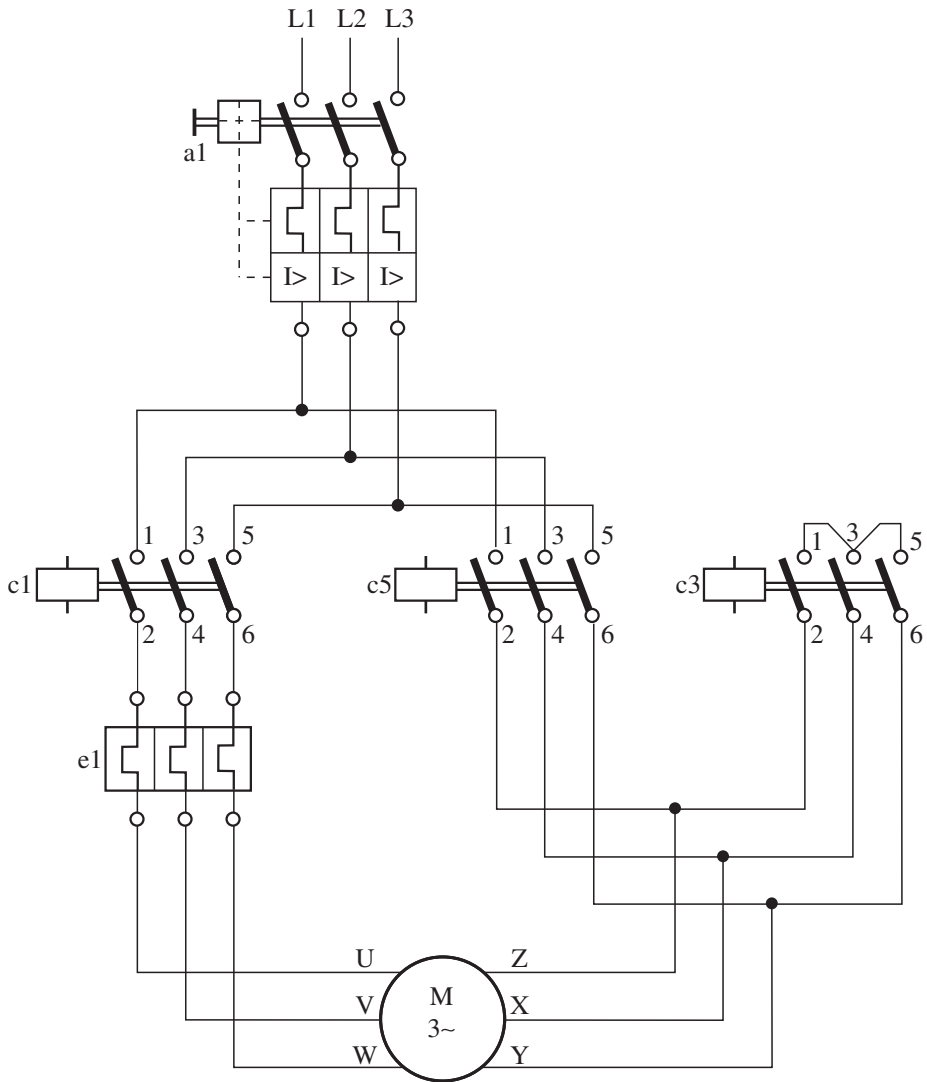
(לכל שאלה – 25 נקודות).

שאלה 8

באיור א' לשאלה 8 נתון תרשים חשמלי של מערכת הפיקוד להתנעת מנוע, ובאיור ב' לשאלה נתון תרשים חשמלי של מערכת הכוח להתנעת המנוע.



איור א' לשאלה 8



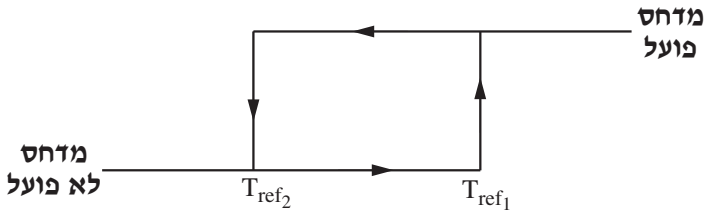
איור ב' לשאלה 8

- א. הסבר את תפקידה של המערכת החשמלית המתוארת באיורים א' ו-ב'.
- ב. הסבר את תפקידו של כל אחד ממגעי הרכיבים שלהלן במערכת הפיקוד:
c3 / 13-14 , c1 / 13-14 , d3 / 3-4 , c5 / 11-12
- ג. תאר באמצעות דיאגרמת סולם תכנית פיקוד להפעלת המנוע. על תכנית הפיקוד להתאים לפעולת הפיקוד של המערכת המתוארת באיור א', הנשלטת על-ידי בקר בריתכנות.

שאלה 9

מערכת לבקרת מיזוג אוויר, הנשלטת על-ידי בקר בר־תכנות, כוללת לוח הפעלה וחיווי שמרכיביו הם: מפסק ראשי (b1) ונוריות סימון (L1 ו-L2).

המדחס של מערכת המיזוג פועל כמתואר באיור לשאלה 9:



איור לשאלה 9

כלומר:

$$\left. \begin{array}{l} \text{המדחס מתחיל לפעול כאשר} \\ \text{המדחס מפסיק לפעול כאשר} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{כאשר נתון: } T_{ref1} > T_{ref2} \\ \begin{array}{l} Temp \geq T_{ref1} \\ Temp \leq T_{ref2} \end{array} \end{array}$$

(Temp – טמפרטורת החדר ; T_{ref1} , T_{ref2} – טמפרטורות ייחוס)

טמפרטורת החדר (Temp) נמדדת באמצעות חיישן טמפרטורה, הנדגם על-ידי הבקר בר־התכנות, וערכה נרשם באוגר.

הפעולות שלהלן מבוצעות על-ידי מערכת הפיקוד, לפי הסדר הבא:

1. המפסק הראשי b1 נסגר, ומערכת המיזוג מתחילה לפעול.
2. נורית סימון ירוקה L1 מהבהבת (שנייה אחת דולקת ושנייה אחת כבויה) כאשר המדחס של מערכת המיזוג פועל.
3. נורית סימון אדומה L2 דולקת כאשר המדחס של מערכת המיזוג אינו פועל.

א. הגדר את המבואות ואת המוצאים של הבקר.

ב. תאר באמצעות דיאגרמת סולם את תכנית הפיקוד להפעלת המערכת.

בהצלחה!

אין להעביר את הנוסחאון
לנבחן אחר

מקור נוסף בקרת נבחן

נוסחאון במערכות הספק לכיתה י"ג

(16 עמודים)

1. מפלי מתח

מתח ישר

ΔU [V]	-	מפל מתח מרבי
γ [m/ Ω mm ²]	-	מוליכות סגולית של המוליכים
A [mm ²]	-	שטח חתך של המוליכים
I_k [A]	-	זרם בקטע k
L_k [m]	-	אורך של קטע k
ΔP [W]	-	הפסדי הספק מרביים

$$\Delta U = \frac{2}{\gamma A} \sum_{k=1}^{k=n} (I_k L_k)$$
$$\Delta P = \frac{2}{\gamma A} \sum_{k=1}^{k=n} (I_k^2 L_k)$$

מתח חילופין חד-מופעי

ΔU [V]	-	מפל מתח מרבי
ΔU_a [V]	-	מפל מתח מרבי ממשי
ΔU_r [V]	-	מפל מתח מרבי היגבי
X_o [Ω /m]	-	היגב הקו ליחידת אורך עבור מוליך אחד
I_k [A]	-	זרם בקטע k
L_k [m]	-	אורך של קטע k
φ_k	-	הזווית בין מתח לזרם בקטע k
γ [m/ Ω mm ²]	-	מוליכות סגולית של המוליכים
A [mm ²]	-	שטח חתך של המוליכים
ΔP [W]	-	הפסדי הספק מרביים
I_a [A]	-	זרם ממשי בקטע k
I_r [A]	-	זרם היגבי בקטע k

$$\Delta U = \Delta U_a + \Delta U_r$$
$$\Delta U_r = 2 X_o \sum_{k=1}^{k=n} I_k L_k \sin \varphi_k$$
$$\Delta U_a = \frac{2}{\gamma A} \sum_{k=1}^{k=n} (I_k L_k \cos \varphi_k)$$
$$\Delta P = \frac{2}{\gamma A} \sum_{k=1}^{k=n} (I_k^2 L_k) = \frac{2}{\gamma A} \sum_{k=1}^{k=n} (I_a^2 + I_r^2)_k \cdot L_k$$
$$I_a = I \cos \varphi$$
$$I_r = I \sin \varphi$$
$$I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2}$$
$$\bar{I} = I_a + j I_r = I \angle \varphi_k$$

מתח חילופין תלת-מופעי

מפל מתח מרבי	-	ΔU	[V]
מפל מתח מרבי ממשי	-	ΔU_a	[V]
מפל מתח מרבי היגבי	-	ΔU_r	[V]
היגב הקו ליחידת אורך עבור מוליך אחד	-	X_o	$[\Omega/m]$
זרם בקטע k	-	I_k	[A]
אורך של קטע k	-	L_k	[m]
הזווית בין מתח לזרם בקטע k	-	φ_k	
מוליכות סגולית של המוליכים	-	γ	$[m/\Omega mm^2]$
שטח חתך של המוליכים	-	A	$[mm^2]$
הפסדי הספק מרביים	-	ΔP	[W]
זרם ממשי בקטע k	-	I_a	[A]
זרם היגבי בקטע k	-	I_r	[A]

$\Delta U = \Delta U_a + \Delta U_r$
$\Delta U_r = \sqrt{3} X_o \sum_{k=1}^{k=n} (I_k L_k \sin \varphi_k)$
$\Delta U_a = \frac{\sqrt{3}}{\gamma A} \sum_{k=1}^{k=n} (I_k L_k \cos \varphi_k)$
$\Delta P = \frac{3}{\gamma A} \sum_{k=1}^{k=n} (I_k^2 L_k) =$ $= \frac{3}{\gamma A} \sum_{k=1}^{k=n} (I_a^2 + I_r^2)_k \cdot L_k$
$I_a = I \cos \varphi$
$I_r = I \sin \varphi$
$I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2}$
$\bar{I} = I_a + j I_r = I / \varphi_k$

המוליכות הסגולית	-	γ	$[m/\Omega mm^2]$
המשקל הסגולי	-	g	$[g/cm^3]$

חומרים		
חומר	נחשת	
35	57	γ
2.7	8.9	g

2. התחממות של מוליכים וכבלים

$$I'_{T1} = I_{T1} \sqrt{\frac{T_2 - T'_1}{T_2 - T_1}}$$

טמפרטורת הסביבה
בטבלת ההעמסה

- T_1 [°C]

טמפרטורת הסביבה
האמיתית

- T'_1 [°C]

הטמפרטורה המרבית
המותרת

- T_2 [°C]

הזרם המותר למוליך
בטמפרטורת הסביבה על-פי
הטבלה

- I_{T1} [A]

הזרם המותר למוליך
בטמפרטורת הסביבה
האמיתית

- I'_{T1} [A]

מקדם תיקון לעבודה
מחזורית (זמן המחזור עד
10 דקות)

- c

הזרם המותר בעבודה
קבועה

- I_n [A]

הזרם המותר בעבודה
מחזורית

- I [A]

זמן עבודה

- t_w [min]

זמן המחזור

- t [min]

$$I = c \cdot I_n$$

$$c = \frac{0.875}{\sqrt{\frac{t}{t_w}}}$$

2.1 כבלים מותקנים בתעלה רחבה, על מגש מחורר או צמודים לקיר – בידוד 90°C במעגל תלת-מופעי

מוליכים מנחושת		מוליכים מאלומיניום	
זרם מתמיד מרבי I_z (אמפר)	חתך S (ממ"ר)	זרם מתמיד מרבי I_z (אמפר)	חתך S (ממ"ר)
		20	1.5
		28	2.5
		36	4
36	6	41	6
50	10	66	10
68	16	88	16
92	25	118	25
113	35	145	35
137	50	175	50
174	70	223	70
211	95	270	95
244	120	313	120

טמפרטורה אופפת של הסביבה: 35°C

2.1.1 מקדם תיקון עבור טמפרטורה אופפת שונה של הסביבה

טמפרטורה אופפת של הסביבה ($^{\circ}\text{C}$)									
55	50	45	40	35	30	25	20	15	10
0.80	0.85	0.90	0.95	1.00	1.04	1.09	1.13	1.17	1.21

2.1.2 מקדם תיקון עבור התקנת כבלים רב-גידיים ללא רווח ביניהם

(1) התקנה בשכבה אחת:

מספר הכבלים	2	3	4	6	9
המקדם	0.80	0.73	0.70	0.68	0.66

(2) התקנה בשכבות אחדות או במקובץ:

מספר הכבלים	2	3	4	5	6	8	10	12
המקדם	0.80	0.70	0.65	0.60	0.57	0.52	0.48	0.45

**2.2 כבלים טמונים במישרין באדמה עם כיסוי מגן – בידוד 90°C
כבל רב-גידי במעגל תלת-מופעי**

מוליכים מאלומיניום		מוליכים מנחושת	
זרם מתמיד I_z (אמפר)	חתך S (ממ"ר)	זרם מתמיד מרבי I_z (אמפר)	חתך S (ממ"ר)
		28	1.5
		36	2.5
		44	4
43	6	56	6
59	10	76	10
76	16	97	16
94	25	124	25
115	35	148	35
138	50	179	50
171	70	220	70
206	95	265	95
235	120	303	120
263	150	339	150
298	185	382	185
345	240	442	240

טמפרטורה אופפת של האדמה: 30°C

2.2.1 מקדם תיקון עבור טמפרטורה אופפת שונה של האדמה

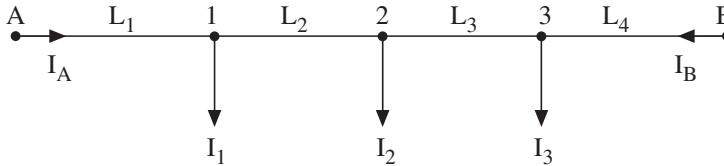
טמפרטורה אופפת של האדמה ($^{\circ}\text{C}$)									
55	50	45	40	35	30	25	20	15	10
0.77	0.82	0.87	0.91	0.96	1.00	1.04	1.08	1.12	1.15

2.2.2 מקדם תיקון עבור התקנת כבלים אחדים באדמה

מספר המעגלים			אופן התקנת המעגלים
4	3	2	
0.59	0.66	0.78	
0.67	0.72	0.83	מעגלים צמודים
			מעגלים שהמרחק המזערי בין המעטים שלהם 7 ס"מ

3. חישובים ברשתות

רשת בעלת זינה משני כיוונים במתחים זהים, ושטח חתך אחיד של המוליכים



$$I_A = \frac{I_1(L_2 + L_3 + L_4) + I_2(L_3 + L_4) + I_3 \cdot L_4}{L_1 + L_2 + L_3 + L_4}$$

$$I_B = \frac{I_1 \cdot L_1 + I_2(L_1 + L_2) + I_3(L_1 + L_2 + L_3)}{L_1 + L_2 + L_3 + L_4}$$

רשת בעלת זינה משני כיוונים במתחים שונים בעלי מופעים זהים, ושטח חתך אחיד

של המוליכים

מומנט ההשוואה	-	M	[Am]	$M = \frac{\Delta U \cdot \gamma \cdot A}{2}$	זרם ישר או זרם
הפרש המתחים בין שני מקורות המתח	-	ΔU	[V]		חילופין חד-מופעי:
מוליכות סגולית	-	γ	[m/Ωmm ²]	$M = \frac{\Delta U \cdot \gamma \cdot A}{\sqrt{3}}$	זרם חילופין
שטח חתך של מוליכי הרשת	-	A	[mm ²]		תלת-מופעי:

$$I_A = \frac{I_1(L_2 + L_3 + L_4) + I_2(L_3 + L_4) + I_3 L_4 \pm M}{L_1 + L_2 + L_3 + L_4}$$

$$I_B = \frac{I_1 L_1 + I_2(L_1 + L_2) + I_3(L_1 + L_2 + L_3) \pm M}{L_1 + L_2 + L_3 + L_4}$$

4. שיפור מקדם ההספק

ההספק ההיגבי של סוללת הקבלים התלת-מופעיים הנדרשת לשיפור מקדם ההספק	-	Q_c	[kVAr]
הספק אקטיבי הנצרך מהרשת	-	P	[kW]
הזווית לפני השיפור	-	φ_1	[°]
הזווית אחרי השיפור	-	φ_2	[°]
קיבול הקבל הנדרש	-	C	[μF]
ההספק ההיגבי של הקבל במופע אחד	-	Q_{c1}	[kVAr]
המתח על-פני הקבל הנדרש	-	U_c	[V]
התדר הזוויתי של הרשת	-	ω	[rad/sec]
תדר הרשת	-	f	[Hz]

$Q_c = P(\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2)$
$Q_{c1} = \frac{Q_c}{3}$
$C = \frac{Q_{c1} \cdot 10^9}{U_c^2 \omega}$
$\omega = 2\pi f$

הערה: מקדם ההספק הנדרש על-ידי חברת החשמל הוא: 0.92.

התנגדות נגד הפריקה	-	R	[Ω]
קיבול הקבל	-	C	[F]
המתח בתחילת הפריקה	-	U_o	[V]
המתח על-פני הקבל כעבור זמן t	-	U_c	[V]
זמן הפריקה	-	t	[sec]

$$R = \frac{t}{C \cdot \ln \frac{U_o}{U_c}}$$

5. זרמי הקצר

זרם קצר תלת-מופעי סימטרי	-	I_k	[A]
עכבת מעגל הקצר (מהמקור למקום הקצר) למופע אחד	-	Z	[Ω]
הספק מדומה של שנאי	-	S_T	[VA]
הספק מדומה של גנרטור	-	S_G	[VA]
היגב של גנרטור למופע אחד	-	X_G	[Ω]
היגב מערכת אספקה במתח גבוה	-	X_S	[Ω]
הספק הקצר של המערכת	-	S_k	[VA]
התנגדות של שנאי למופע אחד	-	R_T	[Ω]
היגב של שנאי למופע אחד	-	X_T	[Ω]
סכום ההתנגדויות במעגל הקצר למופע אחד	-	ΣR	[Ω]
סכום ההיגבים במעגל הקצר למופע אחד	-	ΣX	[Ω]
המתח שבו התרחש הקצר	-	U	[V]
מתח הקצר באחוזים	-	$U_{k\%}$	[%]
הרכיב הממשי של מתח הקצר באחוזים	-	$U_{r\%}$	[%]
הרכיב ההיגבי של מתח הקצר באחוזים	-	$U_{x\%}$	[%]
התנגדות הקו ליחידת אורך	-	R_o	[Ω/km]
התנגדות הקו	-	R_L	[Ω]
היגב הקו ליחידת אורך	-	X_o	[Ω/km]
היגב הקו	-	X_L	[Ω]
אורך הקו	-	L	[km]
המתח המופעי שבו נתונים ההתנגדות R_1 וההיגב X_1	-	U_{1ph}	[V]
המתח השלוב שבו נתונים ההתנגדות R_1 וההיגב X_1	-	U_{1L}	[V]
המתח המופעי שאליו רוצים לשקף את ההתנגדות R_1 וההיגב X_1	-	U_{2ph}	[V]
המתח השלוב שאליו רוצים לשקף את ההתנגדות R_1 וההיגב X_1	-	U_{2L}	[V]
ההתנגדות R_1 וההיגב X_1 אשר הועברו למתח U_2	-	R'_1, X'_1	[Ω]
מקדם ההמרה	-	K	

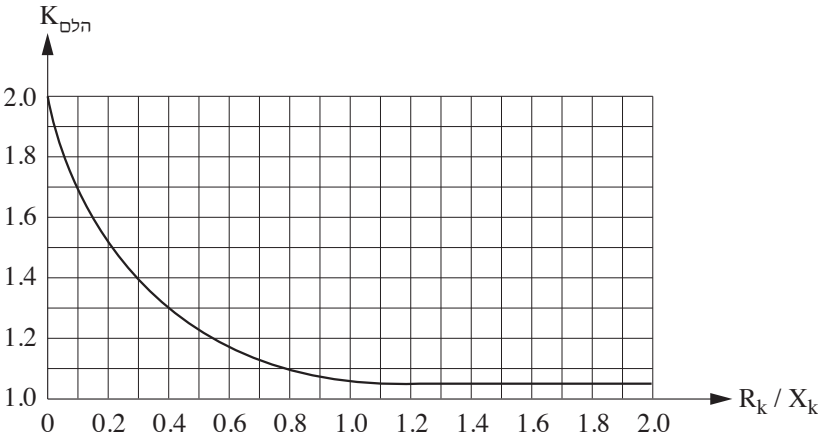
$I_k = \frac{1.1 \cdot U}{\sqrt{3} Z}$
$X_G = \frac{U_{x\%} U^2}{100 S_G}$
$X_S = \frac{U^2}{S_k}$
$R_T = \frac{U_{r\%} U^2}{100 S_T}$
$X_T = \frac{U_{x\%} U^2}{100 S_T}$
$U_{k\%} = \sqrt{U_{r\%}^2 + U_{x\%}^2}$
$Z = \sqrt{(\Sigma X)^2 + (\Sigma R)^2}$
$R_L = R_o \cdot L$
$X_L = X_o \cdot L$
$R'_1 = R_1 \cdot K^2$
$X'_1 = X_1 \cdot K^2$
$K = \frac{U_{2ph}}{U_{1ph}} = \frac{U_{2L}}{U_{1L}}$

5.1 נוסחאות לחישוב זרם קצר תלת-מופעי זרם הלם

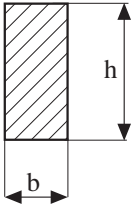
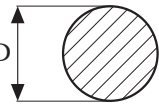
רכיב מחזורי של זרם קצר	i_k	[A]	$i = i_k + i_a$
רכיב זרם ישר (רכיב אקספוננציאלי)	i_a	[A]	$i_k = \sqrt{2} I_k \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k)$
זווית המתח ברגע הופעת הקצר ($t = 0$)	α	[rad]	$i_a = -\sqrt{2} I_k \sin(\alpha - \varphi_k) e^{-\frac{t}{\sigma}}$
זווית המופע של עכבת הקצר	φ_k	[rad]	$\sigma = \frac{L}{R}$
קבוע זמן של מעגל הקצר	σ	[sec]	$I_{\text{הלם}} = \sqrt{2} \cdot I_k \cdot K_{\text{הלם}}$
ערך השיא של זרם הקצר	$I_{\text{הלם}}$	[A]	
מקדם ההלם	$K_{\text{הלם}}$		

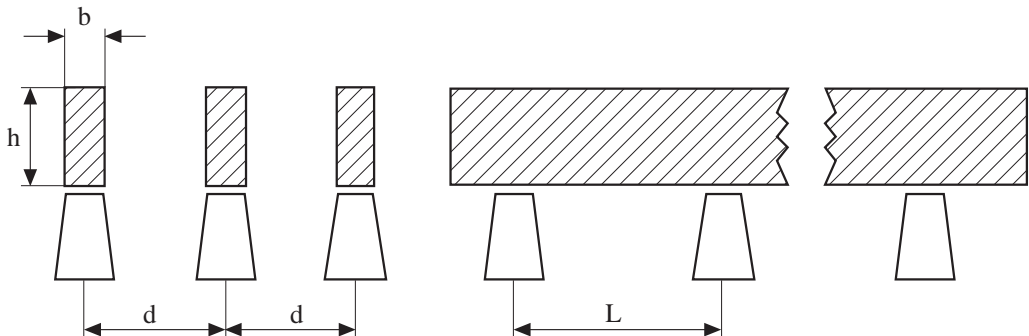
5.2 ערכי מקדם ההלם

0	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	≥ 1.2	R_k / X_k
2	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.2	1.1	1.1	1.08	1.06	1.04	$K_{\text{הלם}}$



6. פסי הצבירה

הכוח הפועל על פס באורך 1m	-	F [kg/m]	$F = 1.76 \frac{I_{\text{הלם}}^2}{d}$			
ערך השיא של זרם הקצר	-	$I_{\text{הלם}}$ [kA]	$P = F \frac{L}{100}$			
המרחק בין המרכזים של פסי הצבירה	-	d [cm]	$\sigma = \frac{P \cdot L}{12W}$			
מאמץ הכפיפה	-	σ [kg/cm ²]	$f = \frac{112}{L^2} \sqrt{\frac{E \cdot J}{G}}$			
הכוח הפועל על הפס בקטע בין שני מבדים	-	P [kg]				
אורך הפס בין שני מבדים	-	L [cm]				
מומנט ההתנגדות (מודול החתך)	-	W [cm ³]				
מקדם האלסטיות	-	E [kg/cm ²]	חתך	J	W	G
מומנט ההתמדה (אינרציה)	-	J [cm ⁴]		$\frac{b^3 h}{12}$	$\frac{b^2 h}{6}$	$b \cdot h \cdot g$
המשקל של פס באורך 1 cm	-	G [kg]				
תדירות התהודה העצמית	-	f [Hz]				
רוחב הפס	-	b [cm]		$0.05 D^4$	$0.1 D^3$	$\frac{\pi D^2}{4} \cdot g$
גובה הפס	-	h [cm]				
קוטר הפס	-	D [cm]				
המשקל הסגולי	-	g [kg/cm ³]				



נתונים של מוליכי Al – Fe שזורים וגלויים בטמפרטורת סביבה 20 °C

I	D _m [cm]									R ₀	קוטר	שטח חתך
	56	100	200	300	400	500	600	700	1000			
	X ₀ [Ω/km]											
[A]										[Ω/km]	[mm]	[mm ²]
90	0.351	0.386	0.429	0.455	0.473	0.487	0.498	0.508	0.530	1.875	5.4	16/2.5
125	0.336	0.371	0.415	0.440	0.458	0.472	0.484	0.493	0.515	1.205	6.8	25/4
145	0.325	0.361	0.404	0.429	0.447	0.461	0.473	0.482	0.505	0.837	8.1	35/6
170	0.315	0.350	0.393	0.419	0.437	0.451	0.462	0.472	0.494	0.594	9.6	50/8
235	0.303	0.338	0.381	0.407	0.425	0.439	0.450	0.460	0.482	0.434	11.6	70/12
290	0.294	0.329	0.372	0.398	0.416	0.430	0.441	0.451	0.473	0.319	13.4	95/15
345	0.284	0.319	0.362	0.388	0.406	0.420	0.431	0.441	0.463	0.234	15.7	120/21
355	0.282	0.318	0.361	0.386	0.404	0.418	0.430	0.439	0.462	0.233	16.1	125/29
400	0.278	0.313	0.356	0.382	0.400	0.414	0.425	0.435	0.457	0.194	17.3	150/25
440	0.272	0.308	0.351	0.376	0.394	0.408	0.420	0.429	0.452	0.169	18.9	170/40
455	0.271	0.307	0.350	0.375	0.393	0.407	0.419	0.428	0.451	0.156	19.2	185/32
490	0.267	0.302	0.346	0.371	0.389	0.403	0.415	0.424	0.446	0.137	20.5	210/36
505	0.266	0.301	0.344	0.370	0.388	0.402	0.413	0.423	0.445	0.137	21.0	210/50
530	0.263	0.299	0.342	0.368	0.386	0.400	0.411	0.421	0.443	0.121	21.7	240/40
615	0.257	0.292	0.335	0.361	0.379	0.393	0.404	0.414	0.436	0.097	24.2	300/50
630	0.251	0.286	0.330	0.355	0.373	0.387	0.398	0.408	0.430	0.095	26.6	310/100
680	0.247	0.283	0.326	0.351	0.369	0.383	0.395	0.404	0.427	0.085	28.1	340/110

נתונים של מוליכי חמרון ונחושת שזורים וגלויים בטמפרטורת סביבה 20 °C

Al		Cu		D _m [cm]									קוטר	שטח חתך
I	R ₀	I	R ₀	56	100	200	300	400	500	600	700	1000		
[A]	[Ω/km]	[A]	[Ω/km]	X ₀ [Ω/km]										
—	—	70	1.786	0.368	0.403	0.446	0.472	0.490	0.504	0.515	0.525	0.547	4.1	10
92	1.805	115	1.123	0.354	0.389	0.433	0.458	0.476	0.490	0.502	0.511	0.533	5.1	16
121	1.185	151	0.738	0.341	0.376	0.420	0.445	0.463	0.477	0.488	0.498	0.520	6.3	25
149	0.845	174	0.525	0.330	0.365	0.409	0.434	0.452	0.466	0.477	0.487	0.509	7.5	35
187	0.587	234	0.364	0.319	0.354	0.397	0.423	0.441	0.455	0.466	0.476	0.498	9.0	50
226	0.435	282	0.271	0.309	0.344	0.388	0.413	0.431	0.445	0.456	0.466	0.488	10.5	70
282	0.309	357	0.192	0.298	0.333	0.377	0.402	0.420	0.434	0.445	0.455	0.477	12.5	95
329	0.245	411	0.153	0.291	0.326	0.370	0.395	0.413	0.427	0.438	0.448	0.470	14.0	120
382	0.196	477	0.122	0.283	0.319	0.362	0.387	0.405	0.419	0.431	0.440	0.463	15.8	150
435	0.158	544	0.098	0.277	0.312	0.356	0.381	0.399	0.413	0.424	0.434	0.456	17.5	185
502	0.126	630	0.078	0.270	0.305	0.349	0.374	0.392	0.406	0.417	0.427	0.449	19.6	240
513	0.118	641	0.074	0.268	0.303	0.346	0.372	0.390	0.404	0.415	0.425	0.447	20.3	240
598	0.096	747	0.060	0.261	0.297	0.340	0.365	0.383	0.397	0.409	0.418	0.441	22.5	300

צפיפות הזרם החד-שנייתית ב-[A/mm²]

טמפרטורת המוליך לפני הקצר [°C]	טמפרטורה גבולית Cu – [°C]				טמפרטורה גבולית Al – [°C]			
	130	150	170	200	130	150	170	200
5	144	153	161	173	96	102	108	114
10	141	150	158	170	94	100	106	113
15	137	146	155	167	91	98	104	111
20	133	143	152	164	89	95	102	109
25	130	140	149	161	87	93	99	107
30	126	136	145	158	84	91	97	105
35	122	135	142	155	82	89	95	103
40	118	129	139	152	80	87	93	102
45	114	125	135	149	77	85	91	100
50	110	122	132	146	75	82	89	97
55	106	118	129	143	72	80	87	95
60	103	115	126	140	69	77	85	93
65	—	111	122	137	67	75	82	91
70	—	108	119	134	64	72	80	89
75	—	104	116	131	61	70	78	87
80	—	110	112	128	58	67	76	85
85	—	96	109	125	55	65	73	83
90	—	92	105	122	51	62	71	81
95	—	88	102	119	48	59	68	79
100	—	84	98	115	44	56	65	75

7. הגנה נגד התחשמלות בשיטת האיפוס

עכבת לולאת תקלה למתקנים בעלי מתח נומינלי של 230 V לאדמה, המוגנים על-ידי

נתיכים בעלי אופיין g_L או מפסקים אוטומטיים זעירים בעלי אופיין מדגם B

זרם-קצר מזערי I _k [A]	עכבה מרבית Z _l [Ω]	זרם נקוב I _n [A]
26	8.85	6
47	4.89	10
72	3.19	16
90	2.55	20
120	1.91	25
164	1.40	32
183	1.25	35
205	1.12	40
250	0.92	50
360	0.63	63
450	0.51	80
580	0.39	100

8. תאורה

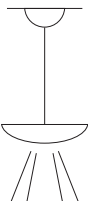
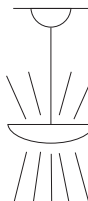



שטף אור ונצילות של מקורות אור שונים

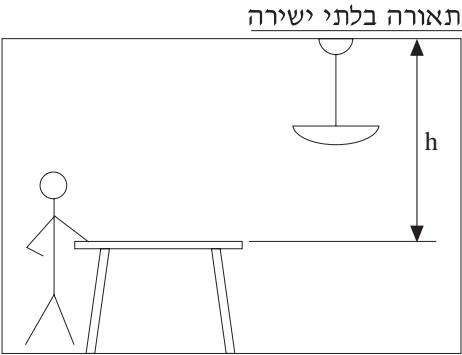
<u>נצילות [lm/W]</u>	<u>שטף אור [lm]</u>	<u>נורות להט (220V)</u>
9.2	230	25 W
10.7	430	40 W
12.2	730	60 W
13.8	1380	100 W
15.7	3140	200 W
16.7	5000	300 W
16.8	8400	500 W
<u>נורות להט (עם תוספת יוד)</u>		
22.0	22000	1000 W
<u>נורות פלורסנטיות</u>		
57	2950	40 W לבן בהיר
46	2300	כנ"ל לבן אוניברסלי
38	1900	כנ"ל לבן חמים
61	4750	65 W לבן בהיר
46	3600	כנ"ל לבן אוניברסלי
40	3150	כנ"ל לבן חמים
<u>נורות כספית (לחץ גבוה)</u>		
39	3400	80 W
41	5600	125 W
45	12000	250 W
49	21000	400 W
<u>נורות תערובת (כספית + להט)</u>		
18	2900	160 W
21	5200	250 W
25	12500	500 W
<u>נורות נתרן</u>		
72	4400	40 W
91	7400	60 W
90	12500	100 W
108	20500	150 W
125	30000	200 W

1. הערות: בנוורות פריקה – ההספק נתון עבור הנורה בלבד.

2. הנצילות מחושבת גם על-פי ההפסדים בציוד העזר.

חישוב תאורה כללית

 0% 80	 10% 70	 45% 35	 70% 10	 80% 0
תאורה ישירה	תאורה כמעט ישירה	תאורה שווה	תאורה בלתי ישירה ברובה	תאורה בלתי ישירה



$$R_K = \frac{2a + b}{6h'}$$

מקדם האולם - R_K

רוחב האולם - a [m]

אורך האולם - b [m]

המרחק האנכי בין התקרה ומשטח העבודה - h [m]

המרחק האנכי של גוף התאורה ממשטח העבודה - h' [m]

שטף האור הנדרש - ϕ [lm]

עוצמת המאור הנדרשת - E [lx]

שטח האולם - A [m²]

מקדם ההפחתה - k

נצילות התאורה - η [%]

$$R_K = \frac{2a + b}{4h}$$

$$\phi = \frac{E \cdot A \cdot 100}{k \cdot \eta}$$

מקדמי הפחתה k

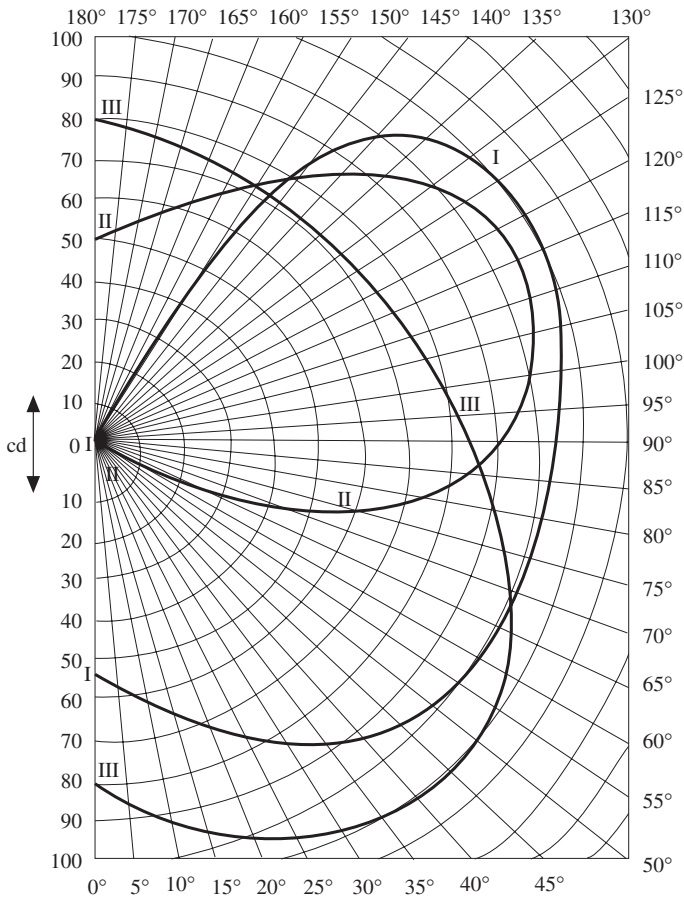
סוג גופי התאורה		סוג התאורה		תאורת ליבון		תאורת כספית		תאורה פלורסנטית	
מרב		מועט		מרב		מועט		מרב	
0.55	0.75	0.6	0.8	0.6	0.85	0.6	0.8	0.55	0.75
0.37	0.7	0.4	0.7	0.4	0.75	0.4	0.7	0.37	0.7
0.3	0.6	0.35	0.65	0.35	0.7	0.35	0.65	0.3	0.6

גופים לתאורה ישירה
גופים לתאורה שווה
גופים לתאורה בלתי ישירה

נצילות התאורה η

30		50			75			← (%) החזרה מהתקרה ← (%) החזרה מהקירות	R _K	סוג גוף התאורה
10	30	10	30	50	10	30	50			
31	34	31	34	38	31	34	39		0.6	א
40	42	41	43	46	42	44	47		0.8	
45	47	46	47	50	47	48	51		1.0	
51	52	52	53	56	52	55	58		1.5	
55	57	58	58	60	57	59	61		2.0	
61	62	62	63	66	62	65	68		3.0	
64	66	65	67	69	67	69	71		5.0	
23	25	23	26	32	23	27	32		0.6	ב
30	34	30	34	39	31	35	40		0.8	
35	36	35	39	43	36	39	44		1.0	
42	45	42	46	50	43	47	52		1.5	
46	50	47	51	55	48	52	57		2.0	
53	56	54	57	62	54	59	65		3.0	
60	61	60	63	67	62	66	71		5.0	
17	18	18	19	21	19	21	24		0.6	ג
21	22	23	24	26	26	27	30		0.8	
24	25	25	27	29	29	30	32		1.0	
27	28	29	31	32	33	35	38		1.5	
29	31	32	34	35	36	38	40		2.0	
32	33	35	37	39	40	42	45		3.0	
34	35	38	39	41	44	46	48		5.0	
7	8	9	11	14	12	14	18		0.6	ד
9	10	13	15	17	17	19	22		0.8	
11	12	15	17	20	19	22	26		1.0	
14	15	19	21	24	25	28	32		1.5	
15	17	24	24	27	29	32	35		2.0	
19	20	27	28	31	35	38	42		3.0	
22	23	31	33	36	42	44	48		5.0	
3	4	6	8	9	10	11	15		0.6	ה
4	6	9	10	12	13	15	19		0.8	
5	7	10	12	14	16	19	22		1.0	
8	9	14	16	19	21	24	28		1.5	
10	11	17	18	21	25	28	32		2.0	
12	13	21	22	25	31	34	38		3.0	
15	16	25	27	29	38	41	43		5.0	

דיאגרמה פולארית של מקור אור בעל שטף של 1000 lm



צפיפות ההארה לכל I_α [cd]

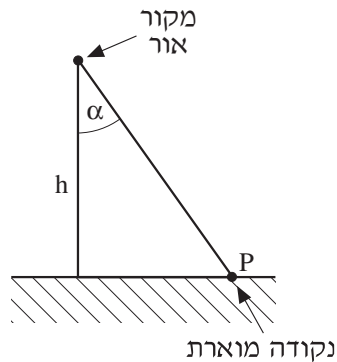
α מכיוון 1000 lm

עוצמת ההארה לכל E_α [lx]

α מכיוון 1000 lm

גובה מעל משטח h [m]

ההארה



$$E_\alpha = \frac{I_\alpha}{h^2} \cos^3 \alpha$$

בהצלחה!

אין להעביר את הנוסחאון
לנבחן אחר

מקום לנחשת נבחן

נוסחאון במכונות חשמל והינע לכיתה י"ג

(22 עמודים)

1. מבוא למערכות תלת-מופעיות

כוכב סימטרי

$$I_L = I_{ph}$$

$$U_{ph} = \frac{U_L}{\sqrt{3}}$$

I_L [A] - זרם קווי

I_{ph} [A] - זרם מופעי

U_L [V] - מתח שלוב (קווי)

U_{ph} [V] - מתח מופעי

משולש סימטרי

$$U_L = U_{ph}$$

$$I_{ph} = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$$

הספק תלת-מופע

$$S = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L$$

S [VA] - הספק מדומה תלת-מופע

P [W] - הספק פעיל תלת-מופע

Q [VAr] - הספק היגבי תלת-מופע

$$Q = S \cdot \sin \varphi$$

$$P = S \cdot \cos \varphi$$

חישוב זרמים:

$$I_L = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_L}$$

$$I_{ph} = \frac{S}{3 \cdot U_{ph}}$$

2. שנאים

2.1 מתח מושרה בסליל

- E_1 [V] כא"מ מושרה בסליל הראשוני
- E_2 [V] כא"מ מושרה בסליל השניוני
- Φ_{\max} [Wb] שטף מרבי בגרעין
- N_1 מספר הכריכות בסליל הראשוני
- N_2 מספר הכריכות בסליל השניוני
- f [Hz] תדירות
- B_{\max} [Wb / m²] השראה מגנטית מרבית
- A [m²] שטח החתך של הגרעין

$$E_1 = 4.44 f \Phi_{\max} N_1$$

$$E_2 = 4.44 f \Phi_{\max} N_2$$

$$\Phi_{\max} = B_{\max} A$$

שנאי חד-מופעי:

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}$$

- a יחס השנאה
- U_1 [V] מתח בסליל הראשוני
- U_2 [V] מתח בסליל השניוני
- I_1 [A] זרם בסליל הראשוני
- I_2 [A] זרם בסליל השניוני

שנאי תלת-מופעי:

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{1ph}}{U_{2ph}} \approx \frac{I_{2ph}}{I_{1ph}}$$

2.2 ניסוי קצר

יחס השנאה	-	a	$R_2' = R_2 a^2$
התנגדות הסליל השניוני	-	R_2 [Ω]	$X_2' = X_2 a^2$
התנגדות הסליל השניוני משוקפת לראשוני	-	R_2' [Ω]	$R_k = R_1 + R_2'$
היגב השראותי של הסליל השניוני	-	X_2 [Ω]	$X_k = X_1 + X_2'$
היגב השראותי של הסליל השניוני משוקף לראשוני	-	X_2' [Ω]	$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}$
התנגדות הקצר	-	R_k [Ω]	$R_k = Z_k \cdot \cos \varphi_k$
היגב הקצר של השנאי	-	X_k [Ω]	$X_k = Z_k \cdot \sin \varphi_k$
עכבת הקצר של השנאי	-	Z_k [Ω]	$U_{k\%} = \frac{U_k}{U_n} \cdot 100$
מתח הקצר של השנאי	-	U_k [V]	
זרם הקצר של השנאי	-	I_k [A]	
מתח הקצר, באחוזים מהמתח הנקוב	-	$U_{k\%}$	

2.3 פעולת השנאי בקצר ובריקם

שנאי חד-מופעי בקצר:

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k}$$

$$P_k = I_k^2 \cdot R_k$$

$$P_k = U_k I_k \cos \varphi_k$$

$$\Delta U_{R\%} = \frac{I_n R_k}{U_n} \cdot 100$$

$$\Delta U_{X\%} = \frac{I_n X_k}{U_n} \cdot 100$$

שנאי תלת-מופעי בקצר:

$$Z_k = \frac{U_{kph}}{I_{kph}}$$

$$P_k = 3 \cdot I_{kph}^2 \cdot R_k$$

$$P_k = \sqrt{3} \cdot U_k I_k \cos \varphi_k$$

$$\Delta U_{R\%} = \frac{I_{nph} \cdot R_k}{U_{nph}} \cdot 100$$

$$\Delta U_{X\%} = \frac{I_{phn} \cdot X_k}{U_{nph}} \cdot 100$$

הספק - P_k [W]
הקצר

זרם הקצר - I_k [A]

התנגדות - R_k [Ω]
הקצר

היגב - X_k [Ω]
הקצר

עכבת - Z_k [Ω]
הקצר

מפל מתח - $\Delta U_{R\%} / \Delta U_{X\%}$
היגבי / התנגדתי באחוזים

שנאי חד-מופעי בריקם:

$$I_{o\%} = \frac{I_o}{I_n} \cdot 100$$

$$I_{Fe} = \frac{P_o}{U_n}$$

$$I_\mu = \sqrt{I_o^2 - I_{Fe}^2}$$

$$R_{Fe} = \frac{U_n}{I_{Fe}}$$

$$X_\mu = \frac{U_n}{I_\mu}$$

$$P_o = U_n \cdot I_o \cdot \cos \varphi_o$$

שנאי תלת-מופעי בריקם:

$$I_{o\%} = \frac{I_{oph}}{I_{nph}} \cdot 100 = \frac{I_o}{I_n} \cdot 100$$

$$I_{Feph} = \frac{P_o}{3 \cdot U_{nph}}$$

$$I_{\mu ph} = \sqrt{I_{oph}^2 - I_{Feph}^2}$$

$$R_{Fe} = \frac{U_{nph}}{I_{Feph}}$$

$$X_\mu = \frac{U_{nph}}{I_{\mu ph}}$$

$$P_o = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_o \cdot \cos \varphi_o$$

זרם ריקם - $I_{o\%}$
באחוזים

זרם ריקם - I_o [A]

זרם - I_{Fe} [A]
הפסדי ברזל

זרם - I_μ [A]
המגנט

התנגדות - R_{Fe} [Ω]
מותאמת

להפסדי ברזל

היגב - X_μ [Ω]
המגנט

הספק - P_o [W]
בריקם

2.4 מפלי מתח ומתחי עבודה

$$\beta = \frac{S}{S_n}$$

מפל מתח באחוזים - $\Delta U_{\%}$

מפל מתח התנגדותי
באחוזים - $\Delta U_{R\%}$

$$\Delta U_{\%} = \beta (\Delta U_{R\%} \cos \varphi_2 \pm \Delta U_{X\%} \sin \varphi_2)$$

מפל מתח היגבי באחוזים - $\Delta U_{X\%}$

גורם הספק של העומס - $\cos \varphi_2$

$$\Delta U_{R\%} = \frac{\Delta P_{Cu_n}}{S_n} \cdot 100$$

מקדם העמסה של השנאי - β

הספק מדומה של העומס - S_2 [VA]

$$\Delta U_{X\%} = \sqrt{(U_{k\%})^2 - (\Delta U_{R\%})^2}$$

הספק נקוב של השנאי - S_n [VA]

מתח שניוני נקוב - U_{2n} [V]

$$U_2 = U_{2n} \left(1 - \frac{\Delta U_{\%}}{100} \right)$$

מתח שניוני - U_2 [V]

מתח ראשוני נקוב - U_{1n} [V]

$$U_1 = U_{1n} \left(1 + \frac{\Delta U_{\%}}{100} \right)$$

מתח ראשוני - U_1 [V]

נצילות השנאי - η

גורם העמסה המותאם
לנצילות מרבית - $\beta_{\eta_{\max}}$

2.5 נצילות השנאי

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe}}$$

הפסדי ברזל - ΔP_{Fe} [W]

הפסדי נחושת נקובים - ΔP_{Cu_n} [W]

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_n \cos \varphi_2}{\beta S_n \cos \varphi_2 + \beta^2 \Delta P_{Cu_n} + \Delta P_{Fe}}$$

התנאי לקבלת נצילות מרבית:

$$\beta_{\eta_{\max}} = \sqrt{\frac{\Delta P_{Fe}}{\Delta P_{Cu_n}}}$$

2.6 עבודת שנאים במקביל

בהפעלת שני שנאים במקביל:

$$\frac{S_I}{S_{II}} = \frac{S_{n_I} \cdot U_{K\%II}}{S_{n_{II}} \cdot U_{K\%I}}$$

$$\frac{S_I}{S_{II}} = \frac{Z_{k_{II}}}{Z_{k_I}}$$

$$S_I + S_{II} = S_L$$

S_I - הספק מדומה בפועל של
שנאי (1)

S_{II} - הספק מדומה בפועל של
שנאי (2)

S_m - הספק מדומה בפועל של
שנאי (m)

S_L - הספק מדומה של הצרכן

S_T - הספק מדומה של העומס

$S_{T_{max}}$ - הספק מדומה של העומס
(המרבי המותר)

S_{n_I} - הספק מדומה נקוב של
שנאי (1)

$S_{n_{II}}$ - הספק מדומה נקוב של
שנאי (2)

Z_{k_I} - עכבת קצר של שנאי (1)

$Z_{k_{II}}$ - עכבת קצר של שנאי (2)

$U_{K\%I}$ - מתח קצר באחוזים של
שנאי (1)

$U_{K\%II}$ - מתח קצר באחוזים של
שנאי (2)

$U_{K\%m}$ - מתח קצר באחוזים של
שנאי (m)

$U_{K\%min}$ - מתח קצר באחוזים,
הנמוך ביותר מבין
מתחי הקצר של שנאים
הפועלים יחד במקביל

m - שנאי כלשהו מבין השנאים

n - מספר השנאים

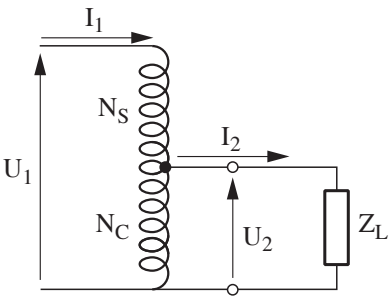
בהפעלת מספר שנאים במקביל:

$$S_m = \frac{S_T}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{S_{n_i}}{U_{K\%i}} \right)} \cdot \frac{S_{n_m}}{U_{K\%m}}$$

$$S_{T_{max}} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{S_{n_i}}{U_{K\%i}} \right) \cdot U_{K\%min}$$

2.7 שְנאֵי עֲצִמִי

- מספר הכריכות בחלק N_S [T] – הלא משותף של הסליל
- מספר הכריכות בחלק N_C [T] – המשותף של הסליל
- תדירות f [Hz] –
- שטף מגנטי מרבי Φ_{max} [Wb] –
- כוח אלקטרו־מניע E [V] –
- מתח U [V] –
- זרם I [A] –
- יחס השנאה a –
- הזרם בחלק המשותף I_C [A] – של הסליל



$$E_S = 4.44 \cdot N_S \cdot f \cdot \Phi_{max}$$

$$E_C = 4.44 \cdot N_C \cdot f \cdot \Phi_{max}$$

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_S + \vec{E}_C$$

$$\vec{E}_2 = \vec{E}_C$$

$$a = \frac{U_1}{U_2} = \left| \frac{E_1}{E_2} \right| = \frac{N_S + N_C}{N_C}$$

$$\left| \frac{I_1}{I_2} \right| = \frac{U_2}{U_1}$$

$$\vec{I}_C = \vec{I}_2 + \vec{I}_1$$

$$I_C \approx I_2 - I_1$$

3. מכונה לזרם ישר

3.1 כוח אלקטרו-מניע

כא"מ מושרה ברוטור	-	E	[V]	$E = K_e \cdot \Phi \cdot n$
מספר מוליכים ברוטור	-	Z		
מספר זוגות קטבים	-	p		$K_e = \frac{Z \cdot p}{60 \cdot a}$
מהירות סיבוב	-	n	[r.p.m]	
מספר זוגות ענפים	-	a		
מקבילים ברוטור				
שטף	-	Φ	[Wb]	
מקדם הכא"מ	-	K_e		

כוח אלקטרו-מניע (כא"מ)	-	E	[V]	במחולל לזרם ישר:
המתח בין הדקי המחולל / המתח המסופק למנוע	-	U	[V]	(עירור מקבילי) $E = U + I_a \cdot R_a + \Delta U_b$
התנגדות העוון	-	R_a	[Ω]	(עירור זר) $E = U + I \cdot R_a + \Delta U_b$
התנגדות סליל העירור הטורי	-	R_{es}	[Ω]	(עירור טורי) $E = U + I(R_a + R_{es}) - \Delta U_b$
מפל המתח על המברשות	-	ΔU_b	[V]	במנוע לזרם ישר:
הזרם בעוון	-	I_a	[A]	(עירור מקבילי) $E = U - I_a \cdot R_a - \Delta U_b$
זרם הצרכן במחולל / זרם המקור במנוע	-	I	[A]	(עירור זר) $E = U - I \cdot R_a - \Delta U_b$
				(עירור טורי) $E = U - I(R_a + R_{es}) - \Delta U_b$

3.2 זרמים במחולל

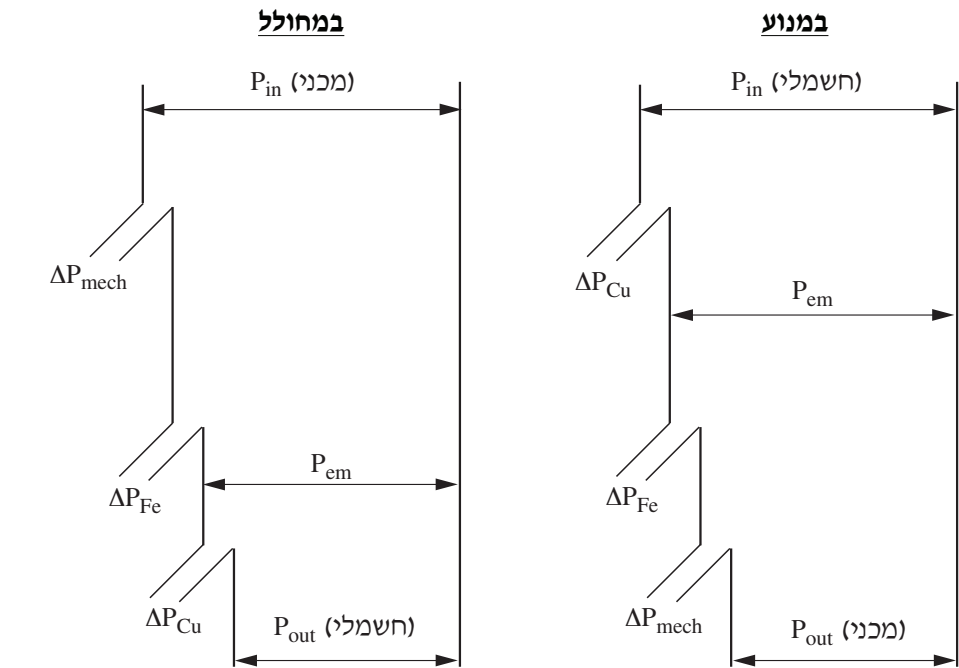
[A] I - הזרם המסופק לצרכן על-ידי המחולל	$I = I_a$	$I_e = \frac{U_e}{R_e}$	עירור זר
	$I = I_a - I_e$	$I_e = \frac{U}{R_e}$	עירור מקבילי
	$I = I_a = I_e$		עירור טורי

3.3 זרמים במנוע

[A] I - הזרם הנצרך על-ידי המנוע	$I = I_a$	$I_e = \frac{U_e}{R_e}$	עירור זר
[A] I _a - הזרם בעוגן (ברוטור)	$I = I_a + I_e$	$I_e = \frac{U}{R_e}$	עירור מקבילי
[A] I _e - הזרם בסליל העירור	$I = I_a = I_e$		עירור טורי
[V] U _e - מתח העירור			
[Ω] R _e - התנגדות סליל העירור			
[A] I _{a_{st}} - זרם ההתנעה בעוגן	$I_{a_{st}} = \frac{U}{R_a + R_{st}}$		
[Ω] R _{st} - התנגדות המתנע			

3.4 הספקים והפסדי הספק

הספק אלקטרו מגנטי	P_{em}	[W]	$P_{em} = E \cdot I_a$
הפסדי נחושת	ΔP_{Cu}	[W]	$\Delta P_{Cu_a} = I_a^2 \cdot R_a$
הפסדי נחושת בעוגן (רוטור)	ΔP_{Cu_a}	[W]	$\Delta P_{Cu_e} = I_e^2 \cdot R_e$
הפסדי נחושת בסליל העירור	ΔP_{Cu_e}	[W]	
הפסדי הספק	ΔP	[W]	$\Delta P = \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech}$
הפסדי ברזל	ΔP_{Fe}	[W]	
הפסדי הספק מכני	ΔP_{mech}	[W]	$P_{חשמלי} = U \cdot I$
הספק מבוא	P_{in}	[W]	
הספק מוצא	P_{out}	[W]	$P_{מכני} = M \cdot \omega$
הספק חשמלי	$P_{חשמלי}$	[W]	
הספק מכני	$P_{מכני}$	[W]	



3.5 מומנטים

מומנט נקוב	-	M_n	$[N \cdot m]$
הספק נקוב	-	P_n	$[W]$
מהירות זוויתית נקובה	-	ω_n	$\left[\frac{rad}{sec} \right]$
מהירות סיבוב נקובה	-	n_n	$[r.p.m]$
מקדם המומנט	-	K_m	
מספר מוליכים ברוטור	-	Z	
מספר זוגות קטבים	-	p	
מספר זוגות ענפים	-	a	
מקבילים בעוגן			
מומנט אלקטרומגנטי	-	M_{em}	$[N \cdot m]$
שטף מגנטי	-	Φ	$[Wb]$
זרם העוגן	-	I_a	$[A]$
איבודי מומנט בריקם	-	ΔM_0	$[N \cdot m]$

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = 9.55 \frac{P_n}{n_n}$$

$$\omega_n = \frac{2\pi n_n}{60}$$

$$M_{em} = K_m \cdot \Phi \cdot I_a$$

$$K_m = \frac{Z \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot a}$$

$$\frac{K_e}{K_m} = \frac{2\pi}{60} = 0.1047$$

$$\Delta M_0 = M_{em_n} - M_n$$

3.6 מהירות במנוע

א. במנוע לזרם ישר בעירור מקבילי

מקדם הכא"מ	-	K_e	$n_o = \frac{U}{K_e \Phi}$
שטף מגנטי	-	Φ [Wb]	
מהירות המנוע	-	n [r.p.m]	$n = n_o - \Delta n$
מהירות המנוע בריקם	-	n_o [r.p.m]	
זרם בעוגן	-	I_a [A]	$n = \frac{U - I_a (R_a + R_x)}{K_e \Phi}$
זרם כללי (הנצרך מהמקור)	-	I [A]	
זרם העירור	-	I_e [A]	$n = \frac{U}{K_e \Phi} - M_{em} \frac{R_a + R_x}{K_e \Phi \cdot K_m \Phi}$
מומנט אלקטרומגנטי	-	M_{em} [N · m]	
מתח	-	U [V]	$n = \frac{U}{K_e \Phi} - M_{em} \frac{R_a + R_x}{9.55 \cdot (K_e \Phi)^2}$
התנגדות העוגן	-	R_a [Ω]	
התנגדות סליל העירור	-	R_e [Ω]	
התנגדות נוספת במעגל העוגן	-	R_x [Ω]	

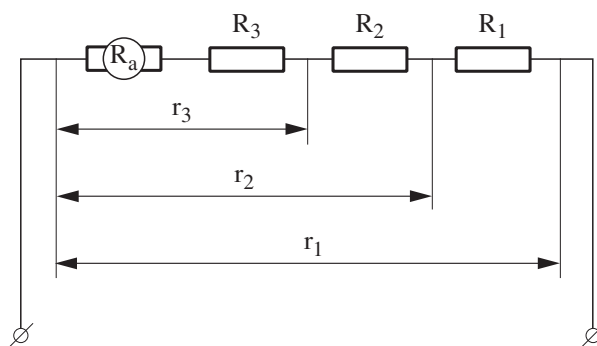
ב. במנוע לזרם ישר בעירור טורי

$$n = \frac{U - I (R_a + R_e + R_x)}{K_e \Phi}$$

3.7 תכנון מתנע דרגתי למנוע לזרם ישר בעירור מקבילי

מספר דרגות	-	m	$m = \frac{\ln \frac{r_1}{R_a}}{\ln \lambda}$
התנגדות מרבית של מעגל העוגן ברגע ההתנעה ($n = 0, E = 0$)	-	$r_1 \quad [\Omega]$	$r_1 = \frac{U}{I_{a \max}}$
התנגדות הרוטור	-	$R_a \quad [\Omega]$	$\lambda = \frac{I_{a \max}}{I_{a \min}}$
זרם התנעה מרבי בעוגן	-	$I_{a \max} \quad [A]$	$r_n = \frac{r_1}{\lambda^{n-1}}$
זרם מזערי בעוגן	-	$I_{a \min} \quad [A]$	$r_2 = \frac{r_1}{\lambda}$
התנגדות הדרגה ה- n	-	$R_n \quad [\Omega]$	$R_n = r_n - r_{n+1}$
התנגדות כוללת עד הדרגה ה- n	-	$r_n \quad [\Omega]$	$n_i = \frac{U - I_{a \min} \cdot r_i}{K_e \Phi}$
מהירות המנוע שבה נדרש לקצר את הנגד R_i , כאשר הזרם בעוגן הוא מזערי ($I_{a \min}$)	-	n_i	

מתנע בעל שלוש דרגות



4. מנוע השראתי תלת-מופעי

4.1 חישוב זרמים

(בהזנחת זרם ריקם)

זרם נקוב קווי	-	I_{In}	[A]
הספק נקוב המופק על-ידי המנוע	-	P_n	[W]
גורם הספק	-	$\cos \varphi$	
נצילות	-	η	
זרם מופעי בסטטור	-	I_{ph1}	[A]
זרם מופעי ברוטור, המשוקף לסטטור	-	I_{ph2}	[A]
התנגדות סליל אחד בסטטור	-	R_1	[Ω]
התנגדות סליל אחד בעוגן	-	R_2	[Ω]
התנגדות סליל העוגן המשוקף לסטטור	-	R'_2	[Ω]
היגב מופעי ברוטור ניח	-	$X_{2(0)}$	[Ω]
ההיגב הכולל של המנוע	-	X_T	[Ω]
יחס תמסורת בין ערכים מופעיים	-	a_{ph}	
מספר כריכות בסליל	-	N	
מקדם ליפוף של הסליל	-	K_N	
גורם החליקה	-	s	
כא"מ מופעי מושרה ברוטור ניח ופתוח	-	$E_{ph2(0)}$	[V]

$$I_{In} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi \cdot \eta}$$

$$I_{ph1} \approx I'_{ph2} = \frac{U_{lph}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_T^2}}$$

$$I_{ph2} = \frac{E_{ph2(0)}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{2(0)}^2}}$$

$$I_{ph2} \approx I_{ph1} \cdot a_{ph}$$

$$a_{ph} = \frac{N_1 \cdot K_{N1}}{N_2 \cdot K_{N2}} = \frac{U_{ph1}}{E_{ph2(0)}} \approx \frac{I_{ph2}}{I_{ph1}}$$

$$X_T = X_1 + X'_{2(0)}$$

$$X'_{2(0)} = X_{2(0)} \cdot a_{ph}^2$$

$$R'_2 = R_2 \cdot a_{ph}^2$$

4.2 חישוב פאזורי של זרמים

$$\vec{I}_{ph1} = \vec{I}'_{ph2} + \vec{I}_{ph0}$$

$$\vec{I}_{ph2} = \frac{\vec{U}_{1ph}}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right) + jX_T}$$

4.3 זרם התנעה

(בהזנחת זרם ריקם)

זרם פאזורי מופעי - $I_{ph1(st)}$ [A]

בסטטור, בהתנעה

זרם פאזורי מופעי - $I'_{ph2(st)}$ [A]

ברוטור, משוקף

לסטטור, בהתנעה

$$I'_{ph2(st)} \approx I_{ph1(st)} = \frac{U_{ph1}}{\sqrt{\left(R_1 + R'_2 \right)^2 + X_T^2}}$$

4.4 מהירות וגורם החליקה

מהירות סינכרונית - n_s [r.p.m]

תדירות הרשת - f_1 [Hz]

מס' זוגות קטבים - p

תדירות הזרם ברוטור - f_2 [Hz]

גורם החליקה - s

מהירות קריטית - n_k [r.p.m]

היחס בין המומנט המרבי למומנט הנקוב של המנוע - λ_{max}

מומנט מרבי (קריטי) - M_k [N · m]

מומנט נקוב - M_n [N · m]

גורם החליקה במומנט קריטי - s_k

גורם החליקה במומנט נקוב - s_n

המשך בעמוד 16

$$n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p}$$

$$f_2 = f_1 \cdot s$$

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

$$\lambda_{max} = \frac{M_k}{M_n} = \left(\frac{s_k + s_n}{s_n + s_k} \right) \cdot \frac{1}{2}$$

$$s_k = s_n \left[\lambda_{max} \pm \sqrt{\lambda_{max}^2 - 1} \right]$$

$$s_k = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_T^2}} \approx \frac{R'_2}{X_T}$$

4.5 הספקים ואיבודי הספק

הספק (ממשי) מושקע	-	P_{in}	[W]
הספק המופק על-ידי המנוע	-	P_n	[W]
הספק אלקטרומגנטי	-	P_{em}	[W]
הספק מכני	-	P_{mech}	[W]
איבודי נחושת בסטטור	-	ΔP_{Cu_1}	[W]
איבודי נחושת ברוטור	-	ΔP_{Cu_2}	[W]
איבודי ברזל בסטטור	-	ΔP_{Fe}	[W]
איבודי חיכוך ואיורור	-	ΔP_{mech}	[W]
איבודים נוספים	-	ΔP_{add}	[W]
הספק המנוע בריקם	-	P_o	[W]
גורם החליקה	-	s	

$$\Delta P_{Cu_1} = 3 \cdot I_{1ph}^2 \cdot R_1$$

$$\Delta P_{Cu_2} = 3 \cdot I_{2ph}^2 \cdot R_2 = 3 \cdot I_{2ph}^2 \cdot R'_2$$

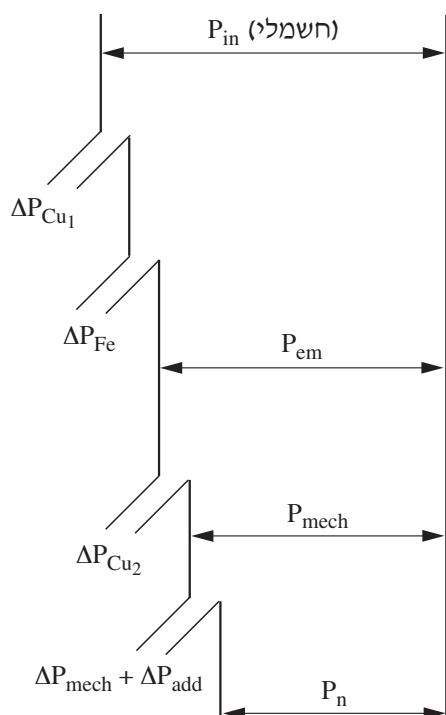
$$\Delta P_{Cu_2} = P_{em} \cdot s = P_{mech} \cdot \left(\frac{s}{1-s} \right)$$

$$P_{em} = \frac{P_{mech}}{1-s}$$

$$P_o \equiv \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech}$$

$$\Delta P_{סטור} \equiv \Delta P_{Cu_1} + \Delta P_{Fe}$$

$$\Delta P_{רוטור} \equiv \Delta P_{Cu_2} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{add}$$



4.6 מומנטים

המהירות הזוויתית של הרוטור	ω_n	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$	$\omega_n = \frac{2\pi \cdot n_n}{60}$
המהירות הזוויתית של השדה המסתובב	ω_s	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$	$\omega_s = \frac{2\pi \cdot n_s}{60}$
מהירות סיבוב (סינכרונית) של השדה	n_n	[r.p.m]	$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = 9.55 \cdot \frac{P_n}{n_n}$
הספק נקוב המופק על-ידי המנוע	P_n	[W]	$M_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_s} = 9.55 \frac{P_{em}}{n_s}$
הספק אלקטרומגנטי	P_{em}	[W]	
מומנט אלקטרומגנטי בהתנעה	$M_{em, start}$	[N · m]	$M_{em} = \frac{3 \cdot 9.55 \cdot U_{ph}^2 \cdot \frac{R'_2}{s}}{n_s \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + X_T^2 \right]}$
מומנט אלקטרומגנטי	M_{em}	[N · m]	
מומנט מרבי (קריטי)	M_k	[N · m]	$M_{em, start} = \frac{3 \cdot 9.55 \cdot U_{ph}^2 \cdot R'_2}{n_s \left[\left(R_1 + R'_2 \right)^2 + X_T^2 \right]}$
גורם החליקה	s		$M_k \cong \frac{3 \cdot 9.55 \cdot U_{ph}^2}{2 \cdot n_s \cdot X_T}$
גורם החליקה במומנט קריטי	s_k		$M = \frac{2 \cdot M_k}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}}$
			$\frac{M_I}{M_{II}} = \left(\frac{U_I}{U_{II}} \right)^2$
			$\frac{M_{start}(\Delta)}{M_{start}(Y)} = 3$

4.7 נגד נוסף במעגל הרוטור

כאשר המנוע מועמס במומנט נקוב:

$$R_x = R_2 \left(\frac{s_x}{s_n} - 1 \right)$$

כאשר המנוע מועמס במומנט כלשהו M_x :

$$R_x = R_2 \left(\frac{M_n \cdot s_x}{M_x \cdot s_n} - 1 \right)$$

- R_x [Ω] – התנגדות נגד טורי נוסף לסליל הרוטור
- R_2 [Ω] – התנגדות סליל הרוטור
- s_n – חליקה נקובה
- s_x – חליקה מותאמת למהירות n_x

4.8 תכנון מתנע הדרגתי למנוע השראתי בעל רוטור מלופף

- λ – היחס בין מומנט מרבי למומנט נקוב
- m – מספר דרגות התנעה
- r_1 [Ω / ph] – התנגדות מרבית של מעגל הרוטור ברגע ההתנעה
- R_2 [Ω / ph] – התנגדות מעגל הרוטור לפאזה
- M_{max} [N · m] – מומנט מרבי בהתנעה
- M_n [N · m] – מומנט נומינלי
- r_n [Ω / ph] – התנגדות כוללת עד הדרגה ה- n
- R_n [Ω / ph] – התנגדות הדרגה n

$$r_1 = R_2 \cdot \frac{M_n}{M_{max} \cdot s_n}$$

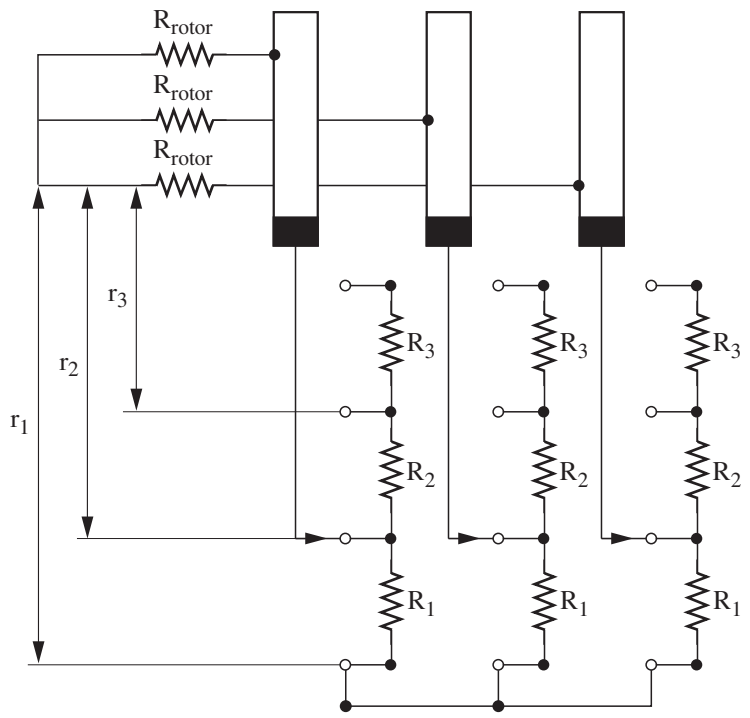
$$\lambda = \frac{M_{max}}{M_n}$$

$$m = \frac{\ln \frac{r_1}{R_2}}{\ln \lambda}$$

$$r_2 = \frac{r_1}{\lambda}$$

$$r_n = \frac{r_1}{\lambda^{n-1}}$$

$$R_n = r_n - r_{n+1}$$



5. כוחות ומומנטים במערכות הינע

5.1 תנועה קווית

כוח מניע	-	F	$[N]$
כוח דינמי	-	F_d	$[N]$
כוח נגדי	-	F_s	$[N]$
מסת הגוף	-	m	$[kgf \cdot s^2 / m], [kg]$
מהירות	-	v	$[m / s]$
תאוצה	-	a	$[m / s^2]$

$$F = F_s + F_d$$

$$F_d = m \frac{dv}{dt} = ma$$

5.2 תנועה סיבובית

מומנט סיבובי	-	M	$[N \cdot m]$
מומנט סטטי (נגדי)	-	M_s	$[N \cdot m]$
מומנט דינמי	-	M_d	$[N \cdot m]$
מומנט התמדה (אינרציה)	-	J	$[kgf \cdot m \cdot s^2]$
תאוצה זוויתית	-	$\frac{d\omega}{dt}$	$\left[\frac{rad}{sec} \right]$
מומנט תנופה	-	GD^2	$[kgf \cdot m^2]$
מהירות סיבוב	-	n	$[r.p.m]$

$$M = M_s + M_d$$

$$M_d = J \frac{d\omega}{dt}$$

$$M - M_s = \frac{GD^2}{38.2} \frac{dn}{dt}$$

$$GD^2 = 4gJ$$

6. העברת מומנטים

תנועה סיבובית

העברת מומנט סטטי:

- מומנט סטטי (נגדי) של המנגנון – $M_{sm} \text{ [kgf} \cdot \text{m]}$
- מומנט סטטי (נגדי) המועבר לציר המנוע – $M_s \text{ [kgf} \cdot \text{m]}$
- מהירות סיבוב ציר המנוע – $n \text{ [r.p.m]}$
- מהירות סיבוב ציר המנגנון – $n_m \text{ [r.p.m]}$
- נצילות התמסורת – η

$$M_s = \frac{M_{sm}}{K \cdot \eta} \text{ מומנט על ציר מנוע}$$

$$K = \frac{n}{n_m} \text{ תמסורת גלגלי השיניים}$$

$$M_s = M_{sm} \cdot \frac{1}{K_1 K_2 \dots K_i \eta_1 \eta_2 \dots \eta_i} \text{ עבור תמסורת של } i \text{ גלגלי שיניים}$$

העברת מומנטי תנופה לציר המנוע:

- מומנט תנופה של המנוע – $GD_N^2 \text{ [kgf} \cdot \text{m}^2]$
- מומנט תנופה של גלגל התמסורת ה- i או העומס הנגדי ה- i – $GD_i^2 \text{ [kgf} \cdot \text{m}^2]$
- מהירות סיבוב ציר המנוע – $n \text{ [r.p.m]}$
- מהירות סיבוב הציר המשני של התמסורת או של העומס הנגדי – $n_i \text{ [r.p.m]}$

$$GD^2 = GD_N^2 + \sum_{i=1}^m GD_i^2 \frac{1}{K_i^2}$$

$$K_i = \frac{n}{n_i}$$

$$1 \text{ kgf} = 9.81 \text{ N}$$

העברת מסות ומומנטים מתנועה קווית לתנועה סיבובית

העברת כוח סטטי למומנט סיבובי על ציר המנוע:

המומנט הסטטי המועבר – M_s [N · m]

לציר המנוע

$$M_s = 9.55 \frac{F_{sm} \cdot v}{n \cdot \eta}$$

הכוח הנגדי של העומס – F_{sm} [N]

(או של המטען)

$$v = \frac{\pi D n}{60}$$

המהירות הקווית – v [m / s]

של המטען

מהירות הסיבוב – n [r.p.m]

של ציר המנוע

נצילות התמסורת – η

קוטר התוף – D [m]

העברת מסות למומנט תנופה:

משקל הגוף – G [kgf]

$$GD^2 = 365 \cdot G \cdot \left(\frac{v}{n} \right)^2$$

זמן התנועה וזמן עצירה

(בהנחה שהמומנט הדינמי ו- GD^2 קבועים)

מומנט תנופה – GD^2 [kgf · m²]

בהתנועה:

$$t = \frac{GD^2}{38.2} \frac{n_2 - n_1}{M - M_s}$$

מהירות סיבוב התחלתית – n_1 [r.p.m]

מהירות סיבוב סופית – n_2 [r.p.m]

מומנט סיבובי – M [N · m]

מומנט סטטי (נגדי) – M_s [N · m]

$$t = \frac{GD^2}{38.2} \frac{n_1 - n_2}{M + M_s}$$

בבלימה:

בהצלחה!