מדינת ישראל
משרד החינוך

סוג הבחינה:	גמר לבתי־ספר לטכנאים ולהנדסאים
מועד הבחינה:	אביב תש"ע, 2010
סמל השאלון:	733911
נספחים:	א. נוסחאון במערכות הספק לכיתה י"ג
	ב. נוסחאון במכונות חשמל והינע לכיתה י"ג

מערכות הספק ומכונות 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:

1. ענה על מספר השאלות הנדרש בשאלון. המעריך יקרא ויעריך את מספר השאלות הנדרש בלבד, לפי סדר כתיבתן במחברתך, ולא יתייחס לתשובות נוספות.
2. התחל כל תשובה לשאלה חדשה בעמוד חדש.
3. רשום את כל תשובותיך **אך ורק בעט.**
4. הקפד לנסח את תשובותיך כהלכה ולסרטט את תרשימיך בבהירות.
5. כתוב את תשובותיך בכתב־יד ברור, כדי לאפשר הערכה נאותה של תשובותיך.
6. אם לדעתך חסרים נתונים הדרושים לפתרון שאלה, אתה רשאי להוסיף אותם, בתנאי שתנמק מדוע הוספת אותם.
7. בכתיבת פתרונות חישוביים, קבלת מֵרַב 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 9 עמודים ו־38 עמודי נספחים.

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

בהצלחה!

השאלות

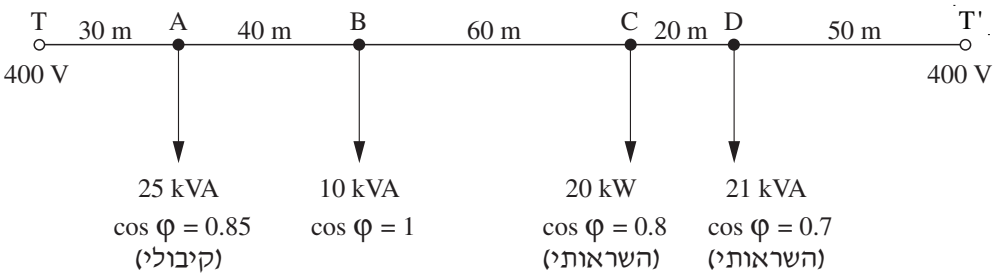
ענה על <u>ארבע</u> מבין השאלות 1–9. עליך לענות על <u>שאלה אחת לפחות</u> מן הפרק הראשון ועל <u>שאלה אחת לפחות</u> מן הפרק השני.

<u>פרק ראשון: מערכות הספק א'</u>

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

שאלה 1

באיור לשאלה 1 נתונה רשת תלת־מופעית, המוזנת במתח של 400 V בשני קצותיה.
מוליכי הרשת עשויים מנחושת $\left(\gamma = 57\,\frac{\text{m}}{\Omega\cdot\text{mm}^2}\right)$, וההיגב ההשראותי של הקווים הוא $X_o = 0.3\,\Omega/\text{km}$.



איור לשאלה 1

א. חשב את הזרם בכל אחד מקטעי הרשת.

ב. חשב את שטח־החתך האחיד של מוליכי הרשת, הנדרש כדי שמפל המתח המרבי ברשת לא יעלה על 3% .

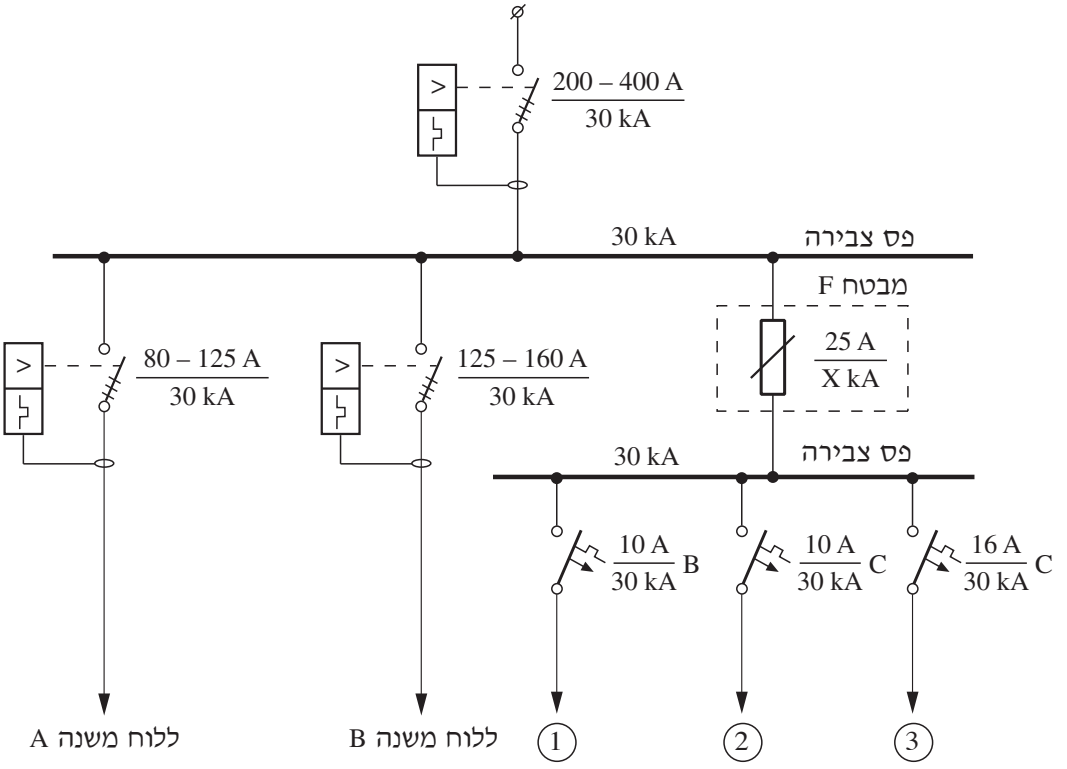
ג. קבע את שטח־החתך התקני (המסחרי) של מוליכי הרשת, וחשב את המתח בנקודה B .

המשך בעמוד 3

שאלה 2

א. ציין שלוש מטרות, שעבורן יש לחשב את זרם הקצר התלת־מופעי בפסי־צבירה של לוחות חשמל.

ב. באיור לשאלה 2 נתון תרשים חד־קווי של לוח חשמל ראשי במפעל.



איור לשאלה 2

1. הסבר מה תפקידו של המבטח F .
2. קבע את כושר הניתוק המזערי הנדרש למבטח F .

ג.
1. באיזו רשת הזנה (רשת TN–C–S , רשת TN–S) קיים מוליך PEN ?
2. מה תפקידו של מוליך PEN ?

המשך בעמוד 4

שאלה 3

לוח־חשמל ראשי במפעל תעשייתי מזין שלושה לוחות־משנה: A , B , C . לוחות־המשנה מזינים צרכנים תלת־מופעיים במתח 400 V / 50 Hz . להלן נתוני הצרכנים:

שם הלוח	סוג הצרכן בלוח	מספר הצרכנים	הספק הצרכן	מקדם ההספק	הנצילות
A	מנוע אסינכרוני	15	10 kW	0.84 (השראותי)	78%
B	תנור	3	15 kW		
C	מנוע סינכרוני	2	3 kW	0.9 (קיבולי)	82%

א. חשב את הזרם הנצרך על־ידי המפעל.

ב. על־מנת לשפר את מקדם ההספק של המפעל, הוחלט להחליף שני מנועים אסינכרוניים בלוח A בשני מנועים סינכרוניים (שנתוניהם זהים למנועים המוזנים מלוח C).
חשב את מקדם ההספק של המפעל לאחר השינוי הזה.

ג. 1. על־מנת לשפר את מקדם ההספק של המפעל ל־0.92 ניתן להתקין סוללות קבלים בקיזוז קבוצתי. קבע באיזה לוח יש להתקין את סוללות הקבלים. נמק את קביעתך.

2. מתקינים בלוח הראשי סוללת קבלים בקיזוז מרכזי לקבלת מקדם הספק כולל של 0.92.
מה תהיה ההשפעה של קיזוז מרכזי על הגורמים שלהלן בהשוואה לקיזוז הקבוצתי שתואר בסעיף ג'1?

I. גודל סוללת הקבלים

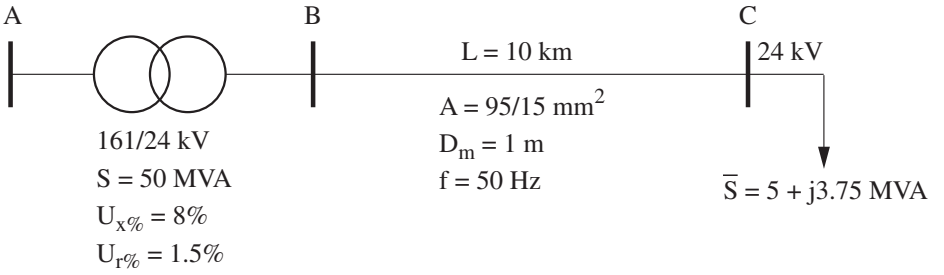
II. זרם ההזנה ללוח הראשי

III. זרמי ההזנה ללוחות המשניים

המשך בעמוד 5

שאלה 4

באיור לשאלה 4 נתונה רשת עילית. מוליכי הרשת עשויים מחמרן־פלדה.



איור לשאלה 4

א. חשב את זרם הקצר התלת־מופעי בפסי־הצבירה C .

ב. חשב את זרם ההלם בפסי־הצבירה C .

ג. חשב את הערך של רכיב הזרם המחזורי של זרם הקצר במופע R , כעבור 8 msec מרגע הופעת הקצר. נתון שזווית־המתח במופע R ברגע הופעת הקצר היא 90° .

<u>פרק שני: המרת אנרגיה והינע א'</u>

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

שאלה 5

נתוניו הנקובים של שנאי תלת־מופעי הם: 630 kVA , 12.6 / 0.4 kV , D/y – 11

בניסוי קצר, בהזנה מצד המתח הגבוה, נמדדו התוצאות: $U_k = 400\ V$, $I_k = 28.87\ A$, $\cos\varphi_k = 0.5$.

בניסוי ריקם, בהזנה מצד המתח הגבוה, נמדדו התוצאות: $U_o = 12.6\ kV$, $I_o = 1\ A$, $\cos\varphi_o = 0.35$.

א. חשב את מתח הקצר הנקוב באחוזים ואת זרם הריקם באחוזים.

ב. חשב את המתח בצד השניוני של השנאי, כאשר הוא מוזן במתח נקוב ומועמס בהספק של 500 kW בעל מקדם הספק השראותי של 0.85 .

ג. נתון כי בשנאי התלת־מופעי מתקיים יחס הליפופים: $\frac{N_1}{N_2} = 7$.

חשב את יחס המתחים השלובים בשנאי, כאשר סלילי השנאי מחוברים בחיבור:

1) Y/y 2) D/d 3) D/y 4) Y/d

המשך בעמוד 6

שאלה 6

מנוע לזרם ישר בעירור מקבילי מוזן במתח 240 V . כשהמנוע פועל ללא עומס מכני על הציר, מהירותו היא 1000 rpm והוא צורך מרשת החשמל זרם של 5 A .

התנגדות סליל העוגן היא 0.5 Ω , והתנגדות סליל העירור – 240 Ω .

הזנח בחישוביך את מפל המתח על הפחמים ואת תגובת העוגן.
הנח כי אופיין המגנוט של המכונה הוא ליניארי.

חשב את:

א. מהירות המנוע כאשר הוא צורך מהרשת זרם של 25 A .

ב. נצילות המנוע כאשר הוא צורך מהרשת זרם של 25 A .

ג. ערכו של הנגד הנוסף שיש לחבר בטור לסליל העירור, על מנת שמהירות המנוע תהיה 1050 rpm בזרם־עוגן של 27A .

שאלה 7

מנוע השראה תלת־מופעי בעל רוטור כלוב מוזן במתח 400 V / 50 Hz . סלילי הסטטור מחוברים בחיבור כוכב. בסטטור שני זוגות קטבים. ההתנגדות של סלילי הסטטור היא 0.75 Ω / ph .

הפסדי הברזל הם 150 W , וההפסדים המכניים הם 130 W .

בעבודה נקובה צורך המנוע זרם של 18 A במקדם־הספק של 0.9 ובנצילות של 89.1% .

בניסוי קצר (רוטור בלום) נמדד זרם של 5 A במתח קווי של 18 V .

א. בתנאי עבודה נקובה, חשב את:

1. ההספק על ציר המנוע
2. מהירות הסיבוב של המנוע
3. המומנט המכני על ציר המנוע

ב. חשב את הזרם שהמנוע צורך מהרשת בהתנעה ישירה.

ג. ציין שלוש דרכים להורדת זרם ההתנעה של המנוע הנתון.

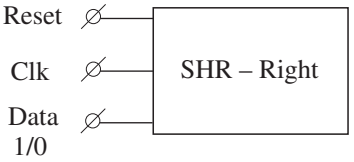
המשך בעמוד 7

פרק שלישי: מערכות פיקוד ממוחשבות ובקרים בני־תכנות

(לכל שאלה – 25 נקודות).

שאלה 8

א. באיור לשאלה 8 מתואר מודול אוגר הזזה לימין (SHR–Right) בבקר בר־תכנות. הסבר את תפקידו של כל אחד מהדקי המודול.



איור לשאלה 8

ב. שני צרכנים, Q_1 ו־Q_2 , מפוקדים באמצעות בקר בר־תכנות.
בטבלה שלהלן נתון מצבו של כל צרכן עבור כל פעולת דופק שעון (Clk) ('1' – פעיל, '0' – לא פעיל). בדופק השעון החמישי המערכת מתאפסת: $Q_1 = Q_2 = '0'$.

Clk	Q_1	Q_2
1	'1'	'0'
2	'0'	'1'
3	'0'	'1'
4	'1'	'0'
5	'0'	'0'

תאר באמצעות דיאגרמת־סולם את תכנית הפיקוד של הבקר להפעלת שני הצרכנים.
התכנית תכלול:

- לחצן־הפעלה b1 ולחצן־הפסקה b2 .
- אוגר הזזה לימין המתבסס על מודול שעון Clk חד־שנייתי, שיתואר על־ידי מגע N.O. ויסומן MClk .

המשך בעמוד 8

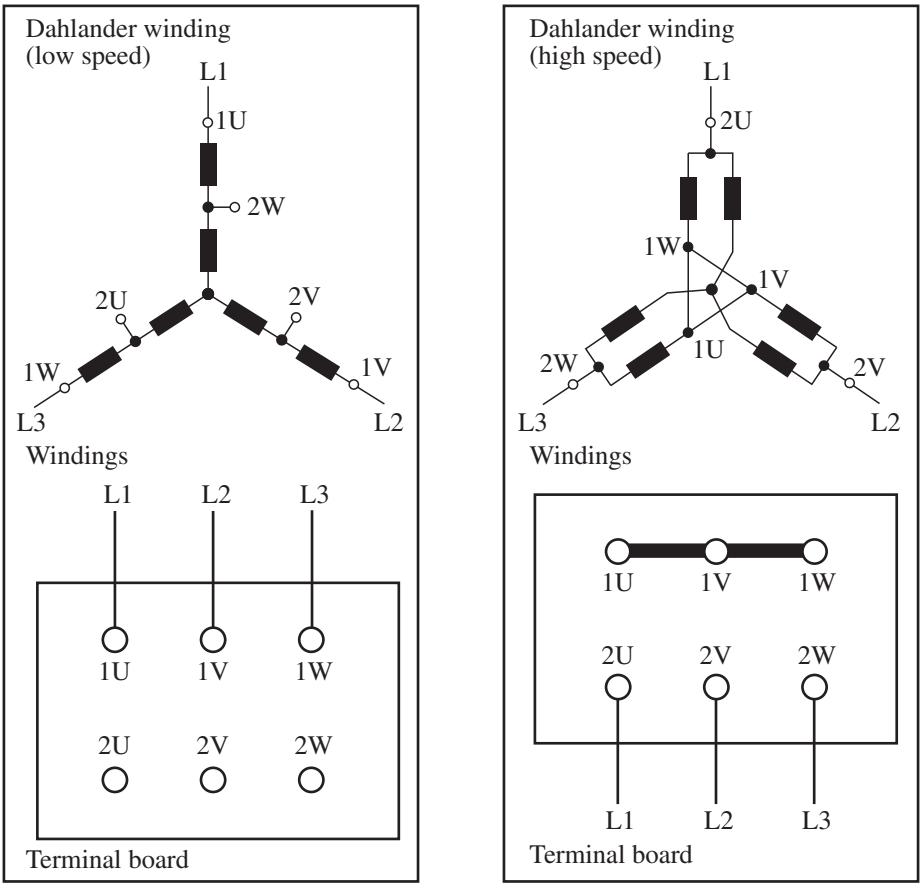
שאלה 9

באיור א' לשאלה 9 נתון תרשים חיבורים עקרוני של סלילי מנוע דלנדר (Dahlander) . באיור ב' לשאלה נתון תרשים־פיקוד להפעלת המנוע.

א. תאר את פעולת מרכיבי מערכת הפיקוד כאשר לוחצים על לחצן I (לחצן הפעלת מהירות נמוכה).

ב. האם ניתן להעביר את המנוע ממהירות נמוכה למהירות גבוהה מבלי לעצור את פעולתו? נמק את תשובתך.

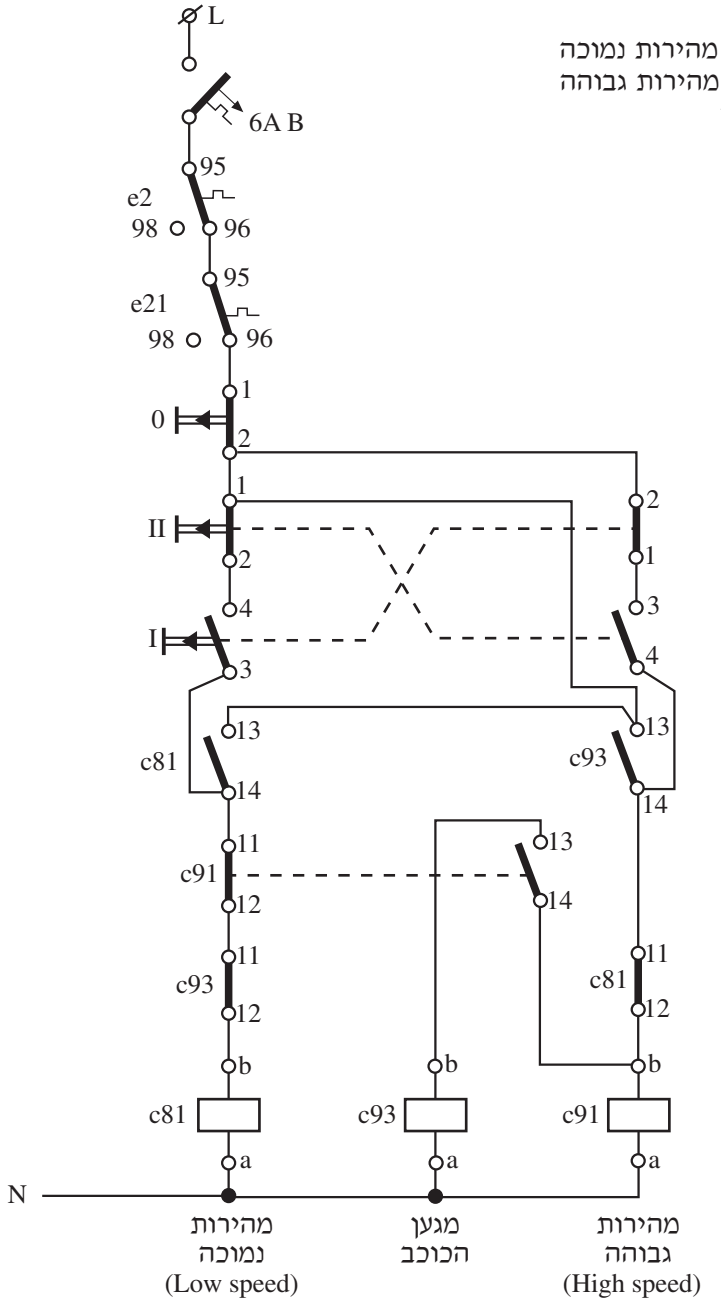
ג. סרטט תרשים־כוח מפורט להפעלת המנוע הזה. בסרטוטך, כלול את ההגנות התרמיות e2 ו־e21 ואת הגנות זרם־הקצר.



איור א' לשאלה 9

המשך בעמוד 9

מקרא:
I – לחצן הפעלת מהירות נמוכה
II – לחצן הפעלת מהירות גבוהה
0 – לחצן הפסקה



איור ב' לשאלה 9

בהצלחה!

זכות היוצרים שמורה למדינת ישראל.
אין להעתיק או לפרסם אלא ברשות משרד החינוך.

מדינת ישראל
משרד החינוך

סוג הבחינה: גמר לבתי־ספר לטכנאים ולהנדסאים
מועד הבחינה: אביב תש"ע, 2010
נספח לשאלון: 733911

אין להעביר את הנוסחאון לנבחן אחר

מקום למדבקת נבחן

נוסחאון במערכות הספק לכיתה י"ג

(16 עמודים)

1. מפלי מתח

מתח ישר

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

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

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

מתח חילופין חד־מופעי

$$\Delta U = \Delta U_a + \Delta U_r$$

$$\Delta U_r = 2\ X_o \sum_{k=1}^{k=n} I_k\ L_k \sin\varphi_k$$

$$\Delta U_a = \frac{2}{\gamma A}\sum_{k=1}^{k=n}\left(I_k\ L_k \cos\varphi_k\right)$$

$$\Delta P = \frac{2}{\gamma A}\sum_{k=1}^{k=n}\left(I_k^2\ L_k\right) = \frac{2}{\gamma A}\sum_{k=1}^{k=n}\left(I_a^2 + I_r^2\right)_k \cdot L_k$$

$$I_a = I\cos\varphi$$
$$I_r = I\sin\varphi$$

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2}$$
$$\bar{I} = I_a + jI_r = I\angle\varphi_k$$

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	[Ω/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/Ωmm^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]

המשך בעמוד 2

מתח חילופין תלת־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/Ωmm^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

$$\Delta U = \Delta U_a + \Delta U_r$$

$$\Delta U_r = \sqrt{3}\, X_o \sum_{k=1}^{k=n} \left(I_k\, L_k \sin\varphi_k \right)$$

$$\Delta U_a = \frac{\sqrt{3}}{\gamma A} \sum_{k=1}^{k=n} \left(I_k\, L_k \cos\varphi_k \right)$$

$$\Delta P = \frac{3}{\gamma A} \sum_{k=1}^{k=n} \left(I_k^2\, L_k \right) = \frac{3}{\gamma A} \sum_{k=1}^{k=n} \left(I_a^2 + I_r^2 \right)_k \cdot L_k$$

$$I_a = I \cos\varphi$$

$$I_r = I \sin\varphi$$

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2}$$

$$\overline{I} = I_a + j\, I_r = I \angle \varphi_k$$

γ	[m/Ωmm^2]	–	המוליכות הסגולית
g	[g/cm^3]	–	המשקל הסגולי

חומרים		
	נחושת	חמרן
γ	57	35
g	8.9	2.7

המשך בעמוד 3

2. התחממות של מוליכים וכבלים

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

T_1	[°C]	–	טמפרטורת הסביבה בטבלת ההעמסה
T'_1	[°C]	–	טמפרטורת הסביבה האמיתית
T_2	[°C]	–	הטמפרטורה המרבית המותרת
I_{T1}	[A]	–	הזרם המותר למוליך בטמפרטורת הסביבה על־פי הטבלה
I'_{T1}	[A]	–	הזרם המותר למוליך בטמפרטורת הסביבה האמיתית
c		–	מקדם תיקון לעבודה מחזורית (זמן המחזור עד 10 דקות)
I_n	[A]	–	הזרם המותר בעבודה קבועה
I	[A]	–	הזרם המותר בעבודה מחזורית
t_w	[min]	–	זמן עבודה
t	[min]	–	זמן המחזור

$$I = c \cdot I_n$$

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

המשך בעמוד 4

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

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

טמפרטורה אופפת: 35°C

2.1.1. מקדם תיקון עבור טמפרטורה אופפת שונה של הסביבה

טמפרטורה אופפת של הסביבה (°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

המשך בעמוד 5

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

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

טמפרטורה אופפת של האדמה: 30°C

2.2.1 מקדם תיקון עבור טמפרטורה אופפת שונה של האדמה

טמפרטורה אופפת של האדמה (°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

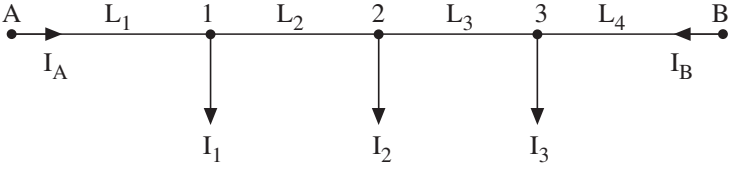
2.2.2 מקדם תיקון עבור התקנת כבלים אחדים באדמה

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

המשך בעמוד 6

3. חישובים ברשתות

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



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

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

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

זרם ישר או זרם חילופין חד־מופעי:	$M=\frac{\Delta U\cdot\gamma\cdot A}{2}$
זרם חילופין תלת־מופעי:	$M=\frac{\Delta U\cdot\gamma\cdot A}{\sqrt{3}}$

מומנט ההשוואה	M	[Am]	–
הפרש המתחים בין שני מקורות המתח	ΔU	[V]	–
מוליכות סגולית	γ	[m/Ωmm²]	–
שטח חתך של מוליכי הרשת	A	[mm²]	–

$$I_A = \frac{I_1\left(L_2+L_3+L_4\right)+I_2\left(L_3+L_4\right)+I_3L_4\pm M}{L_1+L_2+L_3+L_4}$$

$$I_B = \frac{I_1L_1+I_2\left(L_1+L_2\right)+I_3\left(L_1+L_2+L_3\right)\pm M}{L_1+L_2+L_3+L_4}$$

המשך בעמוד 7

4. שיפור מקדם ההספק

$$Q_c = P\left(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2\right)$$

$$Q_{c1} = \frac{Q_c}{3}$$

$$C = \frac{Q_{c1}\cdot 10^9}{U_c^2\,\omega}$$

$$\omega = 2\pi f$$

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

<u>הערה</u>: מקדם ההספק הנדרש על־ידי חברת החשמל הוא: 0.92 .

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

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

המשך בעמוד 8

5. זרמי הקצר

זרם קצר תלת־מופעי סימטרי	I_k	[A]	$I_K = \frac{1.1 \cdot U}{\sqrt{3}\, Z}$
עכבת מעגל הקצר (מהמקור למקום הקצר) למופע אחד	Z	[Ω]	
הספק מדומה של שנאי	S_T	[VA]	$X_G = \frac{U_{x\%} U^2}{100\, S_G}$
הספק מדומה של גנרטור	S_G	[VA]	
היגב של גנרטור למופע אחד	X_G	[Ω]	
היגב מערכת אספקה במתח גבוה	X_S	[Ω]	$X_S = \frac{U^2}{S_k}$
הספק הקצר של המערכת	S_k	[VA]	
התנגדות של שנאי למופע אחד	R_T	[Ω]	$R_T = \frac{U_{r\%} U^2}{100\, S_T}$
היגב של שנאי למופע אחד	X_T	[Ω]	
סכום ההתנגדויות במעגל הקצר למופע אחד	ΣR	[Ω]	$X_T = \frac{U_{x\%} U^2}{100\, S_T}$
סכום ההיגבים במעגל הקצר למופע אחד	ΣX	[Ω]	
המתח שבו התרחש הקצר	U	[V]	$U_{k\%} = \sqrt{U^2_{r\%} + U^2_{x\%}}$
מתח הקצר באחוזים	$U_{k\%}$	[%]	
הרכיב הממשי של מתח הקצר באחוזים	$U_{r\%}$	[%]	$Z = \sqrt{(\Sigma X)^2 + (\Sigma R)^2}$
הרכיב ההיגבי של מתח הקצר באחוזים	$U_{x\%}$	[%]	
התנגדות הקו ליחידת אורך	R_o	[Ω/km]	$R_L = R_o \cdot L$
התנגדות הקו	R_L	[Ω]	$X_L = X_o \cdot L$
היגב הקו ליחידת אורך	X_o	[Ω/km]	$R'_1 = R_1 \cdot K^2$
היגב הקו	X_L	[Ω]	$X'_1 = X_1 \cdot K^2$
אורך הקו	L	[km]	
המתח המופעי שבו נתונים ההתנגדות R_1 וההיגב X_1	U_{1ph}	[V]	$K = \frac{U_{2ph}}{U_{1ph}} = \frac{U_{2L}}{U_{1L}}$
המתח השלוב שבו נתונים ההתנגדות R_1 וההיגב X_1	U_{1L}	[V]	
המתח המופעי שאליו רוצים לשקף את ההתנגדות R_1 ואת ההיגב X_1	U_{2ph}	[V]	
המתח השלוב שאליו רוצים לשקף את ההתנגדות R_1 ואת ההיגב X_1	U_{2L}	[V]	
ההתנגדות R_1 וההיגב X_1 אשר הועברו למתח U_2	R'_1, X'_1	[Ω]	
מקדם ההמרה	K		

המשך בעמוד 9

5.1 נוסחאות לחישוב זרם קצר תלת־מופעי וזרם הלם

רכיב מחזורי של זרם קצר	–	i_k	[A]
רכיב זרם ישר (רכיב אקספוננציאלי)	–	i_a	[A]
זווית המתח ברגע הופעת הקצר $(t = 0)$	–	α	[rad]
זווית המופע של עכבת הקצר	–	φ_k	[rad]
קבוע זמן של מעגל הקצר	–	σ	[sec]
ערך השיא של זרם הקצר	–	$I_{\text{הלם}}$	[A]
מקדם ההלם	–	$K_{\text{הלם}}$	

$$i = i_k + i_a$$

$$i_k = \sqrt{2} I_k \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k)$$

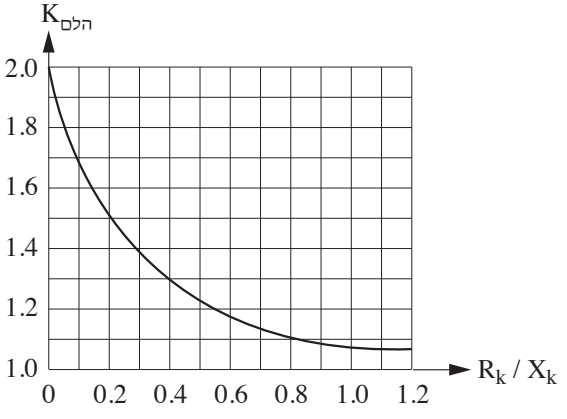
$$i_a = -\sqrt{2}\, I_k \sin(\alpha - \varphi_k) e^{-\frac{t}{\sigma}}$$

$$\sigma = \frac{L}{R}$$

$$I_{\text{הלם}} = \sqrt{2} \cdot I_k \cdot K_{\text{הלם}}$$

5.2 ערכי מקדם ההלם

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

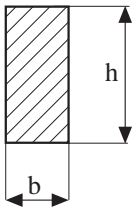
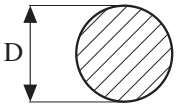


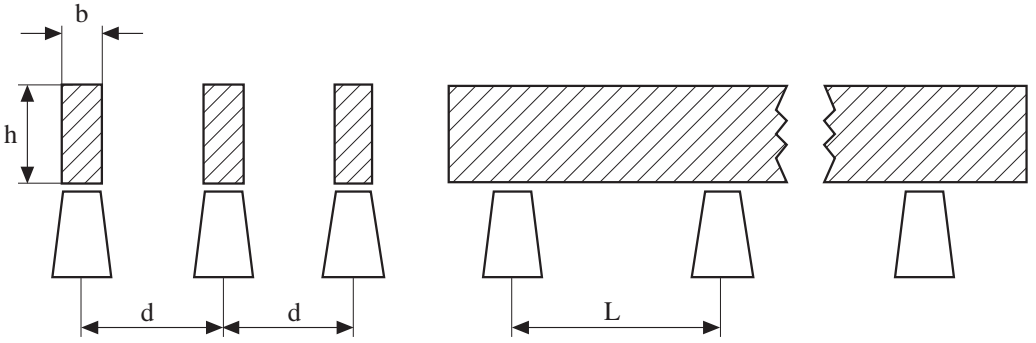
המשך בעמוד 10

6. פסי הצבירה

$F = 1.76 \frac{I_{\text{הלם}}^2}{d}$	
$P = F \frac{L}{100}$	
$\sigma = \frac{P \cdot L}{12W}$	
$f = \frac{112}{L^2} \sqrt{\frac{E \cdot J}{G}}$	

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

חתך	J	W	G
	$\frac{b^3 h}{12}$	$\frac{b^2 h}{6}$	$b \cdot h \cdot g$
	$0.05\ D^4$	$0.1\ D^3$	$\frac{\pi D^2}{4} \cdot g$



המשך בעמוד 11

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

I	D_m [cm] 56	100	200	300	400	500	600	700	1000	R_0	קוטר	שטח חתך
[A]	X_0 [Ω/km]									[Ω/km]	[mm]	[mm²]
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 חמרן 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]									[mm]	[mm²]
—	—	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

המשך בעמוד 12

צפיפות הזרם החד־שנייתית ב־[A/mm^2]

טמפרטורת המוליך לפני הקצר [°C]	טמפרטורה גבולית [°C] – Cu				טמפרטורה גבולית [°C] – Al			
	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 נקוב I_n [A]	עכבה מרבית Z_1 [Ω]	זרם־קצר מזערי I_k [A]
6	8.85	26
10	4.89	47
16	3.19	72
20	2.55	90
25	1.91	120
32	1.40	164
35	1.25	183
40	1.12	205
50	0.92	250
63	0.63	360
80	0.51	450
100	0.39	580

המשך בעמוד 13

8. תאורה

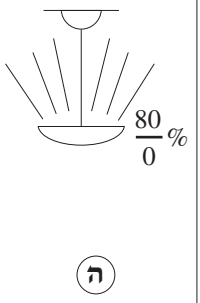
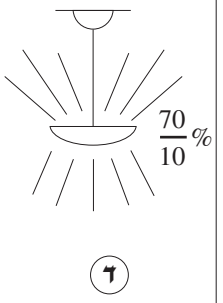
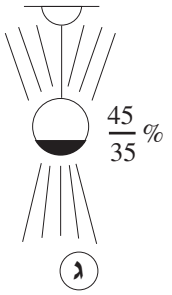
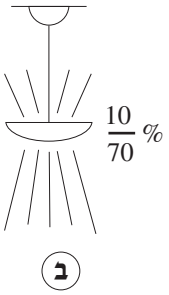
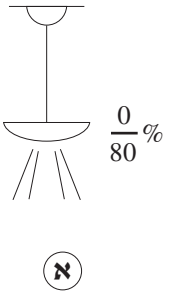
שטף אור ונצילות של מקורות אור שונים

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

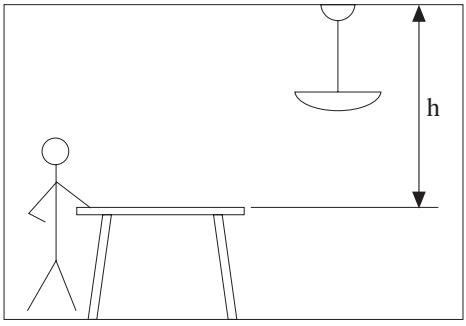
הערות:
1. בנורות פריקה – ההספק נתון עבור הנורה בלבד.
2. הנצילות מחושבת גם על־פי ההפסדים בציוד העזר.

המשך בעמוד 14

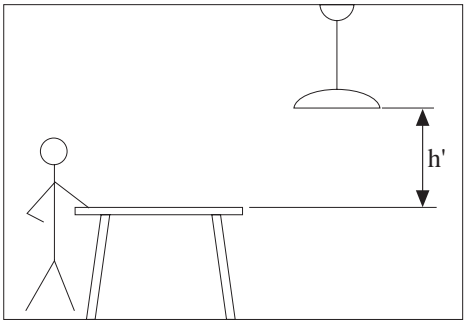
חישוב תאורה כללית

				
תאורה בלתי ישירה	תאורה בלתי ישירה ברובה	תאורה שווה	תאורה כמעט ישירה	תאורה ישירה

תאורה בלתי ישירה



תאורה ישירה



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

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

R_K	–	מקדם האולם	
a	–	רוחב האולם	[m]
b	–	אורך האולם	[m]
h	–	המרחק האנכי בין התקרה ומשטח העבודה	[m]
h'	–	המרחק האנכי של גוף התאורה ממשטח העבודה	[m]
ϕ	–	שטף האור הנדרש	[lm]
E	–	עוצמת המאור הנדרשת	[lx]
A	–	שטח האולם	[m^2]
k	–	מקדם ההפחתה	
η	–	נצילות התאורה	[%]

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

המשך בעמוד 15

מקדמי הפחתה k

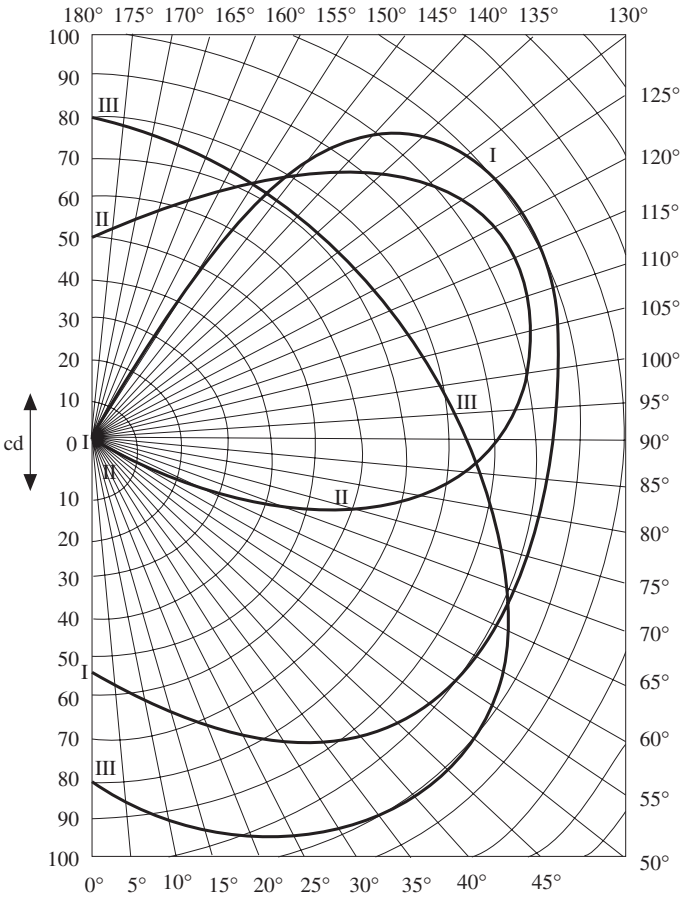
סוג גופי התאורה	סוג התאורה	תאורת ליבון		תאורת כספית		תאורה פלורסנטית	
	מצב האבק	מועט	מרובה	מועט	מרובה	מועט	מרובה
גופים לתאורה ישירה		0.85	0.6	0.8	0.6	0.75	0.55
גופים לתאורה שווה		0.75	0.4	0.7	0.4	0.7	0.37
גופים לתאורה בלתי ישירה		0.7	0.35	0.65	0.35	0.6	0.3

נצילות התאורה η

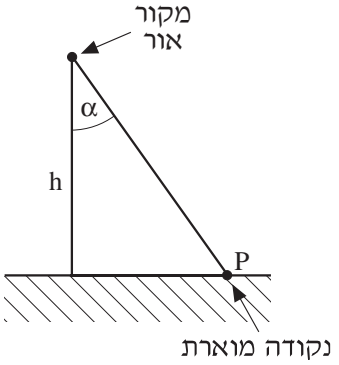
סוג גוף התאורה	R_K	75			50			30	
		50	30	10	50	30	10	30	10
		החזרה מהתקרה (%)							
		החזרה מהקירות (%)							
א	0.6	39	34	31	38	34	31	34	31
	0.8	47	44	42	46	43	41	42	40
	1.0	51	48	47	50	47	46	47	45
	1.5	58	55	52	56	53	52	52	51
	2.0	61	59	57	60	58	58	57	55
	3.0	68	65	62	66	63	62	62	61
	5.0	71	69	67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

המשך בעמוד 16

דיאגרמה פולרית של מקור אור בעל שטף של 1000 lm



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



I_α [cd] – צפיפות ההארה לכל 1000 lm מכיוון α

E_α [lx] – עוצמת ההארה לכל 1000 lm מכיוון α

h [m] – גובה מעל משטח ההארה

בהצלחה!

מדינת ישראל
משרד החינוך

סוג הבחינה: גמר לבתי־ספר לטכנאים ולהנדסאים
מועד הבחינה: אביב תש"ע, 2010
סמל השאלון: 733911

אין להעביר את הנוסחאון לנבחן אחר

מקום למדבקת נבחן

נוסחאון במכונות חשמל והינע לכיתה י"ג

(22 עמודים)

1. מבוא למערכות תלת־מופעיות

כוכב סימטרי

$$I_L = I_{ph}$$

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

[A]	I_L	–	זרם קווי
[A]	I_{ph}	–	זרם מופעי
[V]	U_L	–	מתח שלוב (קווי)
[V]	U_{ph}	–	מתח מופעי

משולש סימטרי

$$I_{ph} = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \qquad U_L = U_{ph}$$

הספק תלת־מופעי

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

$$P = S \cdot \cos\varphi \qquad Q = S \cdot \sin\varphi$$

[VA]	S	–	הספק מדומה תלת־מופעי
[W]	P	–	הספק פעיל תלת־מופעי
[VAr]	Q	–	הספק היגבי תלת־מופעי

חישוב זרמים:

$$I_{ph} = \frac{S}{3 \cdot U_{ph}} \qquad I_L = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_L}$$

המשך בעמוד 2

2. שנאים

2.1 מתח מושרה בסליל

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

E_1 [V] – כא"מ מושרה בסליל הראשוני

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

E_2 [V] – כא"מ מושרה בסליל השניוני

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

Φ_{max} [Wb] – שטף מרבי בגרעין

N_1 – מספר הכריכות בסליל הראשוני

N_2 – מספר הכריכות בסליל השניוני

f [Hz] – תדירות

B_{max} [Wb / m^2] – השראה מגנטית מרבית

A [m^2] – שטח החתך של הגרעין

שנאי חד־מופעי:

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

שנאי תלת־מופעי:

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

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

המשך בעמוד 3

2.2 ניסוי קצר

$$R_2' = R_2\ a^2$$

$$X_2' = X_2\ a^2$$

$$R_k = R_1 + R_2'$$

$$X_k = X_1 + X_2'$$

$$Z_k = \sqrt{R_k^{\ 2} + X_k^{\ 2}}$$

$$R_k = Z_k \cdot \cos\varphi_k$$

$$X_k = Z_k \cdot \sin\varphi_k$$

$$U_{k\%} = \frac{U_k}{U_n} \cdot 100$$

a		–	יחס השנאה
R_2	[Ω]	–	התנגדות הסליל השניוני
R_2'	[Ω]	–	התנגדות הסליל השניוני משוקפת לראשוני
X_2	[Ω]	–	היגב השראותי של הסליל השניוני
X_2'	[Ω]	–	היגב השראותי של הסליל השניוני משוקף לראשוני
R_k	[Ω]	–	התנגדות הקצר
X_k	[Ω]	–	היגב הקצר של השנאי
Z_k	[Ω]	–	עכבת הקצר של השנאי
U_k	[V]	–	מתח הקצר של השנאי
I_k	[A]	–	זרם הקצר של השנאי
$U_{k\%}$		–	מתח הקצר, באחוזים מהמתח הנקוב

המשך בעמוד 4

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:

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

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

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

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

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

P_k	[W]	–	הספק הקצר
I_k	[A]	–	זרם הקצר
R_k	[Ω]	–	התנגדות הקצר
X_k	[Ω]	–	היגב הקצר
Z_k	[Ω]	–	עכבת הקצר
$\Delta U_{R\%}$ / $\Delta U_{X\%}$		–	מפל מתח היגבי / התנגדותי 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:

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

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

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

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

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

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

$I_{o\%}$		–	זרם ריקם באחוזים
I_o	[A]	–	זרם ריקם
I_{Fe}	[A]	–	זרם הפסדי ברזל
I_μ	[A]	–	זרם המגנוט
R_{Fe}	[Ω]	–	התנגדות מותאמת להפסדי ברזל
X_μ	[Ω]	–	היגב המגנוט
P_o	[W]	–	הספק בריקם

המשך בעמוד 5

2.4 מפלי מתח ומתחי עבודה

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

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

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

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

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

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

$\Delta U_{\%}$	–		מפל מתח באחוזים
$\Delta U_{R\%}$	–		מפל מתח התנגדותי באחוזים
$\Delta U_{X\%}$	–		מפל מתח היגבי באחוזים
$\cos\varphi_2$	–		גורם הספק של העומס
β	–		מקדם העמסה של השנאי
S_2	–	[VA]	הספק מדומה של העומס
S_n	–	[VA]	הספק נקוב של השנאי
U_{2n}	–	[V]	מתח שניוני נקוב
U_2	–	[V]	מתח שניוני
U_{1n}	–	[V]	מתח ראשוני נקוב
U_1	–	[V]	מתח ראשוני
η	–		נצילות השנאי
$\beta_{\eta_{max}}$	–		גורם העמסה המותאם לנצילות מרבית
ΔP_{Fe}	–	[W]	הפסדי ברזל
ΔP_{Cu_n}	–	[W]	הפסדי נחושת נקובים

2.5 נצילות השנאי

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

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

התנאי לקבלת נצילות מרבית:

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

המשך בעמוד 6

2.6 עבודת שנאים במקביל

בהפעלת שני שנאים במקביל:

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

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

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

בהפעלת מספר שנאים במקביל:

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

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

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)

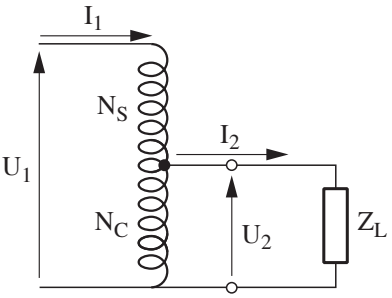
$U_{k\%_{min}}$ – מתח קצר באחוזים, הנמוך ביותר מבין מתחי הקצר של שנאים הפועלים יחד במקביל

m – שנאי כלשהו מבין השנאים

n – מספר השנאים

המשך בעמוד 7

2.7 שנאי עצמי



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

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

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

$$\vec{E_1} = \vec{E_S} + \vec{E_C}$$

$$\vec{E_2} = \vec{E_C}$$

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

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

$$\vec{I_C} = \vec{I_2} + \vec{I_1}$$

$$I_C \approx I_2 - I_1$$

המשך בעמוד 8

3. מכונה לזרם ישר

3.1 כוח אלקטרו־מניע

$$E = K_e \cdot \Phi \cdot n$$

$$K_e = \frac{Z \cdot p}{60 \cdot a}$$

E	[V]	–	כא"מ מושרה ברוטור
Z		–	מספר מוליכים ברוטור
p		–	מספר זוגות קטבים
n	[r.p.m]	–	מהירות סיבוב
a		–	מספר זוגות ענפים מקבילים ברוטור
Φ	[Wb]	–	שטף
K_e		–	מקדם הכא"מ
E	[V]	–	כוח אלקטרו־מניע (כא"מ)
U	[V]	–	המתח בין הדקי המחולל / המתח המסופק למנוע
R_a	[Ω]	–	התנגדות העוגן
R_{es}	[Ω]	–	התנגדות סליל העירור הטורי
ΔU_b	[V]	–	מפל המתח על המברשות
I_a	[A]	–	הזרם בעוגן
I	[A]	–	זרם הצרכן במחולל / זרם המקור במנוע

במחולל לזרם ישר:

$$E = U + I_a \cdot R_a + \Delta U_b$$ (עירור מקבילי)

$$E = U + I \cdot R_a + \Delta U_b$$ (עירור זר)

$$E = U + I(R_a + R_{es}) - \Delta U_b$$ (עירור טורי)

במנוע לזרם ישר:

$$E = U - I_a \cdot R_a - \Delta U_b$$ (עירור מקבילי)

$$E = U - I \cdot R_a - \Delta U_b$$ (עירור זר)

$$E = U - I(R_a + R_{es}) - \Delta U_b$$ (עירור טורי)

המשך בעמוד 9

3.2 זרמים במחולל

עירור זר	$I_e = \frac{U_e}{R_e}$	$I = I_a$
עירור מקבילי	$I_e = \frac{U}{R_e}$	$I = I_a - I_e$
עירור טורי	$I = I_a = I_e$	

[A] I – הזרם המסופק לצרכן על־ידי המחולל

3.3 זרמים במנוע

עירור זר	$I_e = \frac{U_e}{R_e}$	$I = I_a$
עירור מקבילי	$I_e = \frac{U}{R_e}$	$I = I_a + I_e$
עירור טורי	$I = I_a = I_e$	

$$I_{a_{st}} = \frac{U}{R_a + R_{st}}$$

[A] I – הזרם הנצרך על־ידי המנוע

[A] I_a – הזרם בעוגן (ברוטור)

[A] I_e – הזרם בסליל העירור

[V] U_e – מתח העירור

[Ω] R_e – התנגדות סליל העירור

[A] $I_{a_{st}}$ – זרם ההתנעה בעוגן

[Ω] R_{st} – התנגדות המתנע

המשך בעמוד 10

3.4 הספקים והפסדי הספק

$$P_{em} = E \cdot I_a$$

$$\Delta P_{Cu_a} = I_a^2 \cdot R_a$$

$$\Delta P_{Cu_e} = I_e^2 \cdot R_e$$

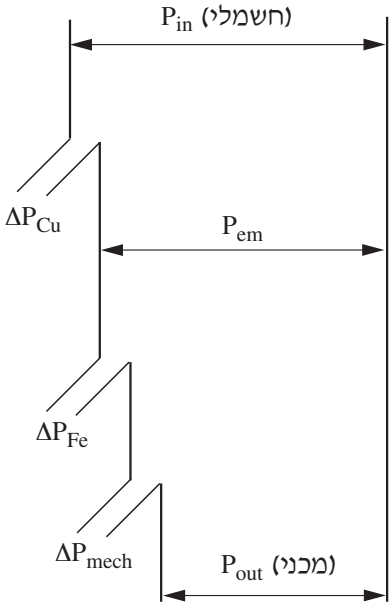
$$\Delta P = \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech}$$

$$P_{חשמלי} = U \cdot I$$

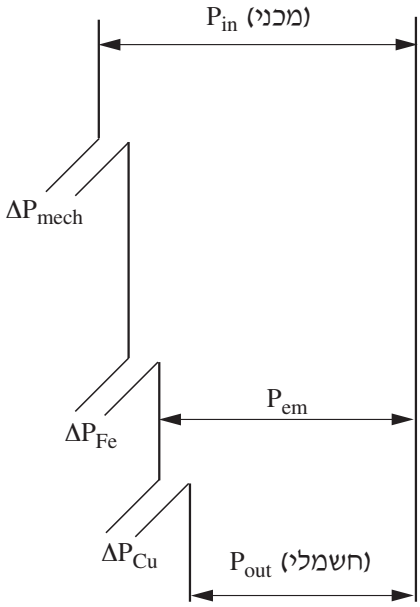
$$P_{מכני} = M \cdot \omega$$

[W]	P_{em}	–	הספק אלקטרו מגנטי
[W]	ΔP_{Cu}	–	הפסדי נחושת
[W]	ΔP_{Cu_a}	–	הפסדי נחושת בעוגן (רוטור)
[W]	ΔP_{Cu_e}	–	הפסדי נחושת בסליל העירור
[W]	ΔP	–	הפסדי הספק
[W]	ΔP_{Fe}	–	הפסדי ברזל
[W]	ΔP_{mech}	–	הפסדי הספק מכני
[W]	P_{in}	–	הספק מבוא
[W]	P_{out}	–	הספק מוצא
[W]	$P_{חשמלי}$	–	הספק חשמלי
[W]	$P_{מכני}$	–	הספק מכני

במנוע



במחולל



המשך בעמוד 11

3.5 מומנטים

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

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

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

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

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

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

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 מקבילים בעוגן	–	a	
מומנט אלקטרומגנטי	–	M_{em}	$[N \cdot m]$
שטף מגנטי	–	Φ	$[Wb]$
זרם העוגן	–	I_a	$[A]$
איבודי מומנט בריקם	–	ΔM_0	$[N \cdot m]$

המשך בעמוד 12

3.6 מהירות במנוע

א. במנוע לזרם ישר בעירור מקבילי

$$n_o = \frac{U}{K_e \Phi}$$

$$n = n_o - \Delta n$$

$$n = \frac{U - I_a\left(R_a + R_x\right)}{K_e \Phi}$$

$$n = \frac{U}{K_e \Phi} - M_{em}\frac{R_a + R_x}{K_e \Phi \cdot K_m \Phi}$$

$$n = \frac{U}{K_e \Phi} - M_{em}\frac{R_a + R_x}{9.55 \cdot \left(K_e \Phi\right)^2}$$

K_e		–	מקדם הכא"מ
Φ	[Wb]	–	שטף מגנטי
n	[r.p.m]	–	מהירות המנוע
n_o	[r.p.m]	–	מהירות המנוע בריקם
I_a	[A]	–	זרם בעוגן
I	[A]	–	זרם כללי (הנצרך מהמקור)
I_e	[A]	–	זרם העירור
M_{em}	[N · m]	–	מומנט אלקטרומגנטי
U	[V]	–	מתח
R_a	[Ω]	–	התנגדות העוגן
R_e	[Ω]	–	התנגדות סליל העירור
R_x	[Ω]	–	התנגדות נוספת במעגל העוגן

ב. במנוע לזרם ישר בעירור טורי

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

המשך בעמוד 13

3.7 תכנון מתנע דרגתי למנוע לזרם ישר בעירור מקבילי

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

$$r_1 = \frac{U}{I_{a\,max}}$$

$$\lambda = \frac{I_{a\,max}}{I_{a\,min}}$$

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

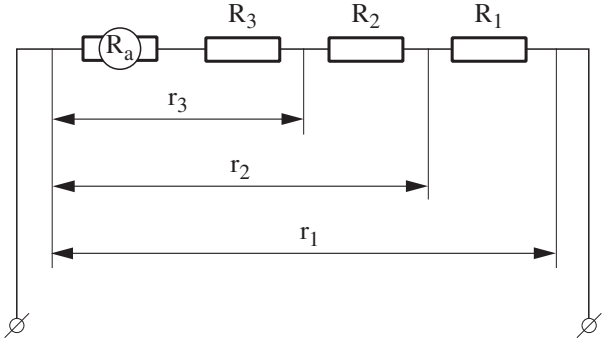
$$r_2 = \frac{r_1}{\lambda}$$

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

$$n_i = \frac{U - I_{a\,min} \cdot r_i}{K_e\,\Phi}$$

m	–		מספר דרגות
r_1	–	$[\Omega]$	התנגדות מרבית של מעגל העוגן ברגע ההתנעה $(n = 0\ ,\ E = 0)$
R_a	–	$[\Omega]$	התנגדות הרוטור
$I_{a\,max}$	–	$[A]$	זרם התנעה מרבי בעוגן
$I_{a\,min}$	–	$[A]$	זרם מזערי בעוגן
R_n	–	$[\Omega]$	התנגדות הדרגה ה־n
r_n	–	$[\Omega]$	התנגדות כוללת עד הדרגה ה־n
n_i	–		מהירות המנוע שבה נדרש לקצר את הנגד R_i , כאשר הזרם בעוגן הוא מזערי $(I_{a\,min})$

מתנע בעל שלוש דרגות



המשך בעמוד 14

4. מנוע השראתי תלת־מופעי

4.1 חישוב זרמים

(בהזנחת זרם ריקם)

$$I_{1n} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos\varphi \cdot \eta}$$

$$I_{ph1} \approx I'_{ph2} = \frac{U_{1ph}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_T^2}}$$

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

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

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

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

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

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

I_{1n}	[A]	–	זרם נקוב קווי
P_n	[W]	–	הספק נקוב המופק על־ידי המנוע
$\cos\varphi$		–	גורם הספק
η		–	נצילות
I_{ph1}	[A]	–	זרם מופעי בסטטור
I_{ph2}	[A]	–	זרם מופעי ברוטור, המשוקף לסטטור
R_1	[Ω]	–	התנגדות סליל אחד בסטטור
R_2	[Ω]	–	התנגדות סליל אחד בעוגן
R'_2	[Ω]	–	התנגדות סליל העוגן המשוקף לסטטור
$X_{2(0)}$	[Ω]	–	היגב מופעי ברוטור נייח
X_T	[Ω]	–	ההיגב הכולל של המנוע
a_{ph}		–	יחס תמסורת בין ערכים מופעיים
N		–	מספר כריכות בסליל
K_N		–	מקדם ליפוף של הסליל
s		–	גורם החליקה
$E_{ph2(0)}$	[V]	–	כא"מ מופעי מושרה ברוטור נייח ופתוח

המשך בעמוד 15

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)

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

$I_{ph1(st)}$ [A] – זרם פאזורי מופעי בסטטור, בהתנעה

$I'_{ph2(st)}$ [A] – זרם פאזורי מופעי ברוטור, משוקף לסטטור, בהתנעה

4.4 מהירות וגורם החליקה

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

$$f_2 = f_1 \cdot s$$

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

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

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

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

n_s [r.p.m] – מהירות סינכרונית

f_1 [Hz] – תדירות הרשת

p – מס' זוגות קטבים

f_2 [Hz] – תדירות הזרם ברוטור

s – גורם החליקה

n_k [r.p.m] – מהירות קריטית

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

M_k [N · m] – מומנט מרבי (קריטי)

M_n [N · m] – מומנט נקוב

s_k – גורם החליקה במומנט קריטי

s_n – גורם החליקה במומנט נקוב

המשך בעמוד 16

4.5 הספקים ואיבודי הספק

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

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

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

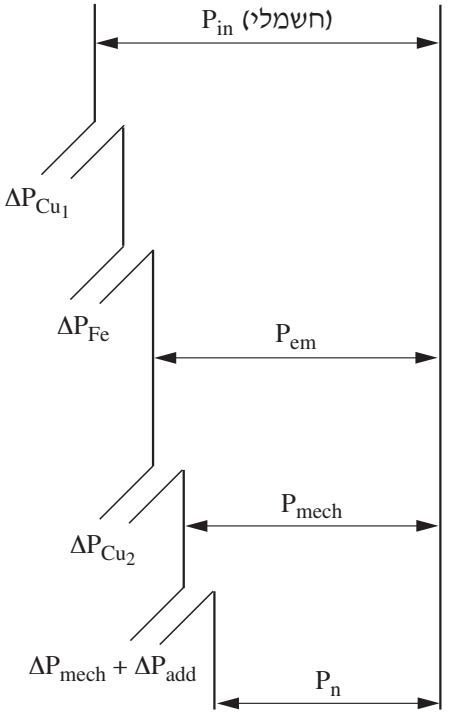
$$P_{em} = \frac{P_{mech}}{1-s}$$

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

$$\Delta P_{\text{סטטור}} \cong \Delta P_{Cu_1} + \Delta P_{Fe}$$

$$\Delta P_{\text{רוטור}} \cong \Delta P_{Cu_2} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{add}$$

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



המשך בעמוד 17

4.6 מומנטים

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

ω_n – המהירות הזוויתית של הרוטור $\left[\frac{rad}{sec}\right]$

$$\omega_s = \frac{2\pi \cdot n_s}{60}$$

ω_s – המהירות הזוויתית של השדה המסתובב $\left[\frac{rad}{sec}\right]$

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

n_n – מהירות סיבוב (סינכרונית) של השדה [r.p.m]

$$M_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_s} = 9.55 \frac{P_{em}}{n_s}$$

P_n – הספק נקוב המופק על־ידי המנוע [W]

P_{em} – הספק אלקטרומגנטי [W]

$$M_{em} = \frac{3 \cdot 9.55 \cdot U_{ph}^2 \cdot \frac{R_2'}{s}}{n_s \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_T^2\right]}$$

$M_{em_{start}}$ – מומנט אלקטרומגנטי בהתנעה $[N \cdot m]$

M_{em} – מומנט אלקטרומגנטי $[N \cdot m]$

M_k – מומנט מרבי (קריטי) $[N \cdot m]$

$$M_{em_{start}} = \frac{3 \cdot 9.55 \cdot U_{ph}^2 \cdot R_2'}{n_s \left[\left(R_1 + R_2'\right)^2 + X_T^2\right]}$$

s – גורם החליקה

s_k – גורם החליקה במומנט קריטי

$$M_k \cong \frac{3 \cdot 9.55 \cdot U_{ph}^2}{2 \cdot n_s \cdot X_T}$$

$$M = \frac{2 \cdot M_k}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}}$$

$$\frac{M_I}{M_{II}} = \left(\frac{U_I}{U_{II}}\right)^2$$

$$\frac{M_{start}(\Delta)}{M_{start}(Y)} = 3$$

המשך בעמוד 18

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

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

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

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

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

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

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

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

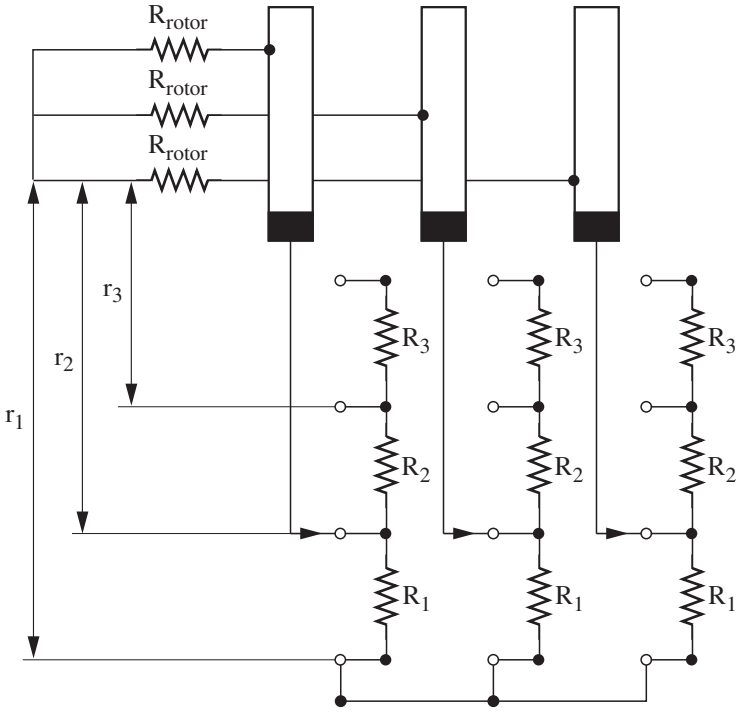
M_{max} [N · m] – מומנט מרבי בהתנעה

M_n [N · m] – מומנט נומינלי

r_n [Ω / ph] – התנגדות כוללת עד הדרגה ה־n

R_n [Ω / ph] – התנגדות הדרגה n

המשך בעמוד 19



המשך בעמוד 20

5. כוחות ומומנטים במערכות הינע

5.1 תנועה קווית

$$F = F_s + F_d$$

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

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	$[m / s^2]$

5.2 תנועה סיבובית

$$M = M_s + M_d$$

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

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

$$GD^2 = 4gJ$$

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	$[r.p.m]$

המשך בעמוד 21

6. העברת מומנטים

תנועה סיבובית

העברת מומנט סטטי:

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

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

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

M_{sm} [kgf · m] – מומנט סטטי (נגדי) של המנגנון

M_s [kgf · m] – מומנט סטטי (נגדי) המועבר לציר המנוע

n [r.p.m] – מהירות סיבוב ציר המנוע

n_m [r.p.m] – מהירות סיבוב ציר המנגנון

η – נצילות התמסורת

העברת מומנטי תנופה לציר המנוע:

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

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

$$1\ kgf = 9.81\ N$$

$GD^2{}_N$ [kgf · m²] – מומנט תנופה של המנוע

$GD^2{}_i$ [kgf · m²] – מומנט תנופה של גלגל התמסורת ה־i או העומס הנגדי ה־i

n [r.p.m] – מהירות סיבוב ציר המנוע

n_i [r.p.m] – מהירות סיבוב הציר המשני של התמסורת או של העומס הנגדי

המשך בעמוד 22

העברת מסות ומומנטים מתנועה קווית לתנועה סיבובית

העברת כוח סטטי למומנט סיבובי על ציר המנוע:

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

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

M_s	$[N \cdot m]$	–	המומנט הסטטי המועבר לציר המנוע
F_{sm}	$[N]$	–	הכוח הנגדי של העומס (או של המטען)
v	$[m / s]$	–	המהירות הקווית של המטען
n	$[r.p.m]$	–	מהירות הסיבוב של ציר המנוע
η		–	נצילות התמסורת
D	$[m]$	–	קוטר התוף

העברת מסות למומנט תנופה:

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

G	$[kgf]$	–	משקל הגוף

זמן התנעה וזמן עצירה

(בהנחה שהמומנט הדינמי ו-GD^2 קבועים)

בהתנעה:

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

בבלימה:

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

GD^2	$[kgf \cdot m^2]$	–	מומנט תנופה
n_1	$[r.p.m]$	–	מהירות סיבוב התחלתית
n_2	$[r.p.m]$	–	מהירות סיבוב סופית
M	$[N \cdot m]$	–	מומנט סיבובי
M_s	$[N \cdot m]$	–	מומנט סטטי (נגדי)

בהצלחה!