

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.

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 בהירות.
 - 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 מִצָּב 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, ביחד עם יחידות המידה המתאימות.
 - * ליווי הפתרון החישובי בהסבר קצר.
- בשאלון זה 13 עמודים ו-38 עמודים של נוסחאון.

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

בהצלחה!

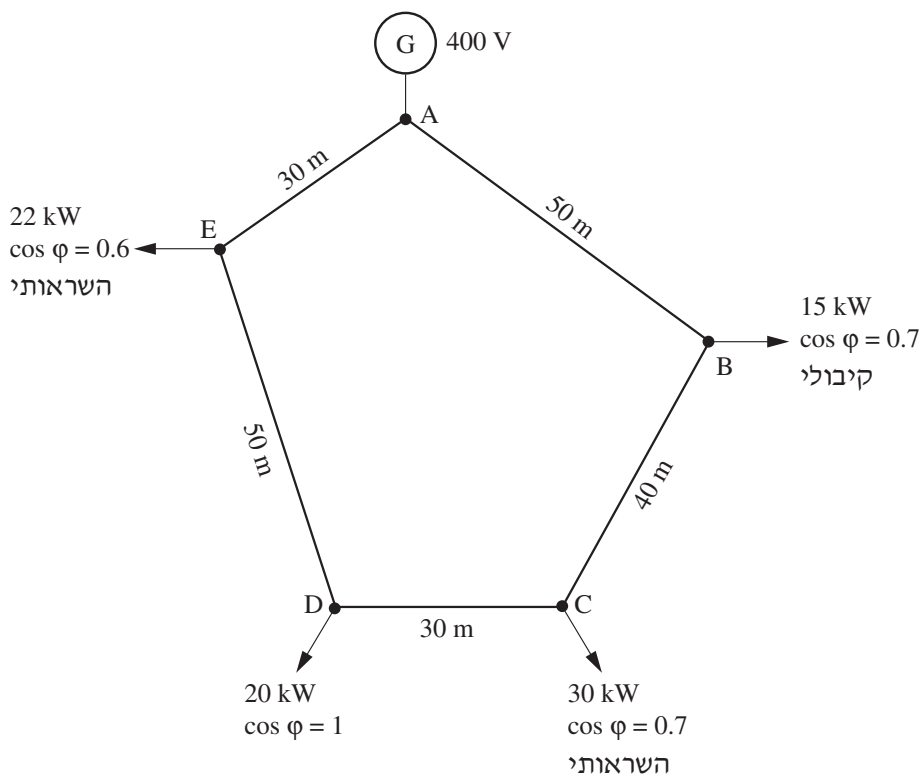
השאלות

ענה על ארבע מבין השאלות 1-9 (לכל שאלה – 25 נקודות).

פרק ראשון: מערכות הספק

שאלה 1

באיור לשאלה 1 נתונה רשת תלת-מופעית, $400\text{V} / 50\text{Hz}$, שמוליכיה עשויים נחושת.
הנח $X_0 = 0.4 \Omega/\text{km}$.

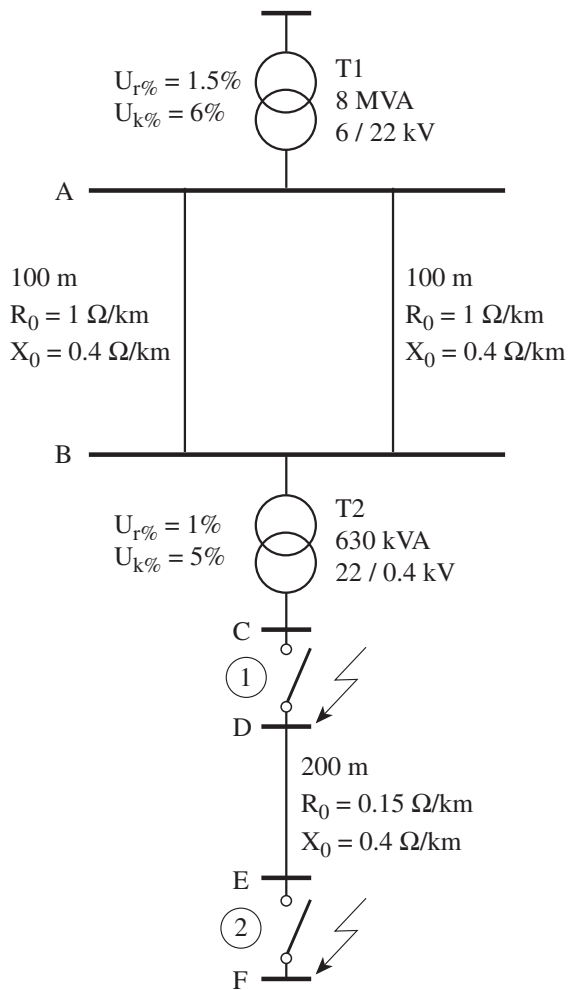


איור לשאלה 1

- חשב את שטח החתך האחיד של מוליכי הרשת עבור מפל מתח מרבי מותר של 3%.
- קבע את שטח החתך המסחרי.
- על-פי שטח החתך המסחרי, חשב את כלל הפסדי ההספק הממשיים ברשת.

שאלה 2

באיור לשאלה 2 נתונה רשת תלת-מופעית.



איור לשאלה 2

- א. חשב את זרם הקצר בפס הצבירה D.
- ב. חשב את זרם הקצר בפס הצבירה F.
- ג. קבע את כושר הניתוק הנדרש של מפסק ②.

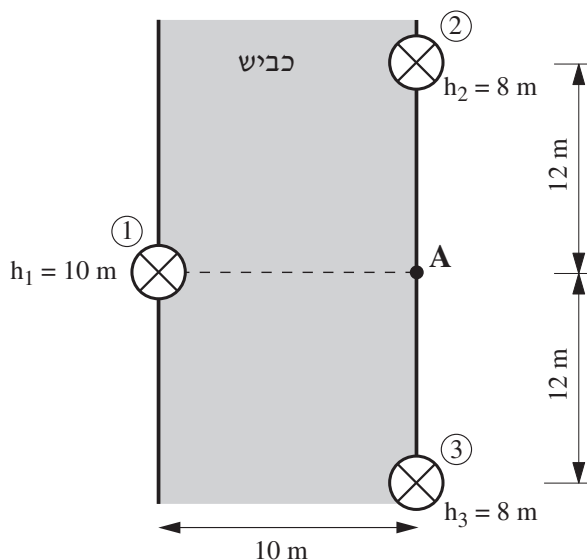
שאלה 3

א. באיור א' לשאלה 3 נתון מקטע של כביש שרוחבו 10 m. מקטע הכביש מואר על-ידי שלושה עמודי תאורה: ①; ② ו-③. הגבהים של עמודי התאורה נתונים באיור (h₃, h₂, h₁). בכל עמוד תאורה מותקן גוף תאורה בודד הכולל נורה יחידה מסוג נתון 150 W.

הערה: בחישוביך היעזר בדיאגרמה הפולרית שבנוסחאון – אופיין מס' I.

חשב את רמת ההארה בנקודות הבאות:

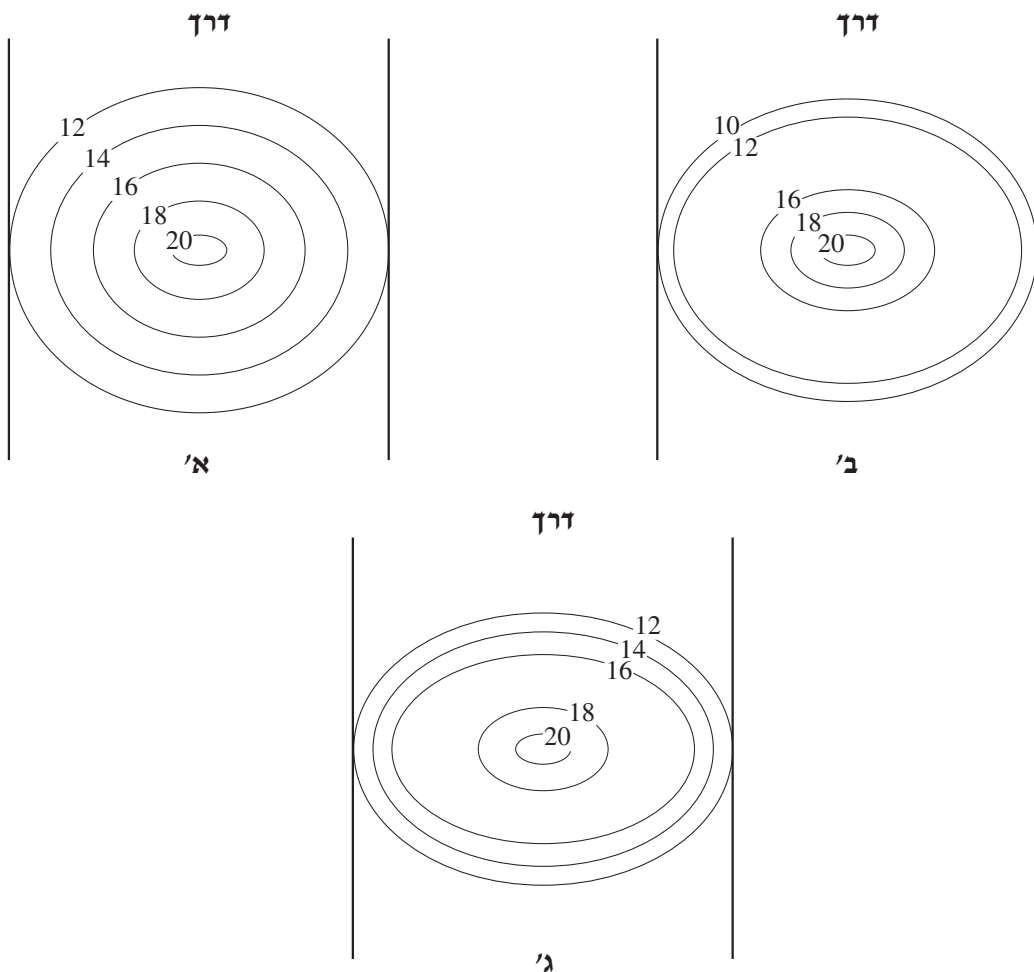
1. לרגלי עמוד התאורה ①.
2. בנקודה A הנמצאת על שפת הכביש.



איור א' לשאלה 3

ב. בתכנון באמצעות תוכנת מחשב עבור תאורת חוץ במקטע של דרך, התקבלו שלוש עקומות איזולוקסיות כמתואר באיור ב' לשאלה 3. כל עקומה מתארת תכנון שונה. קבע איזו עקומה היא המתאימה ביותר לכללים של תכנון תאורה. נמק את תשובתך.

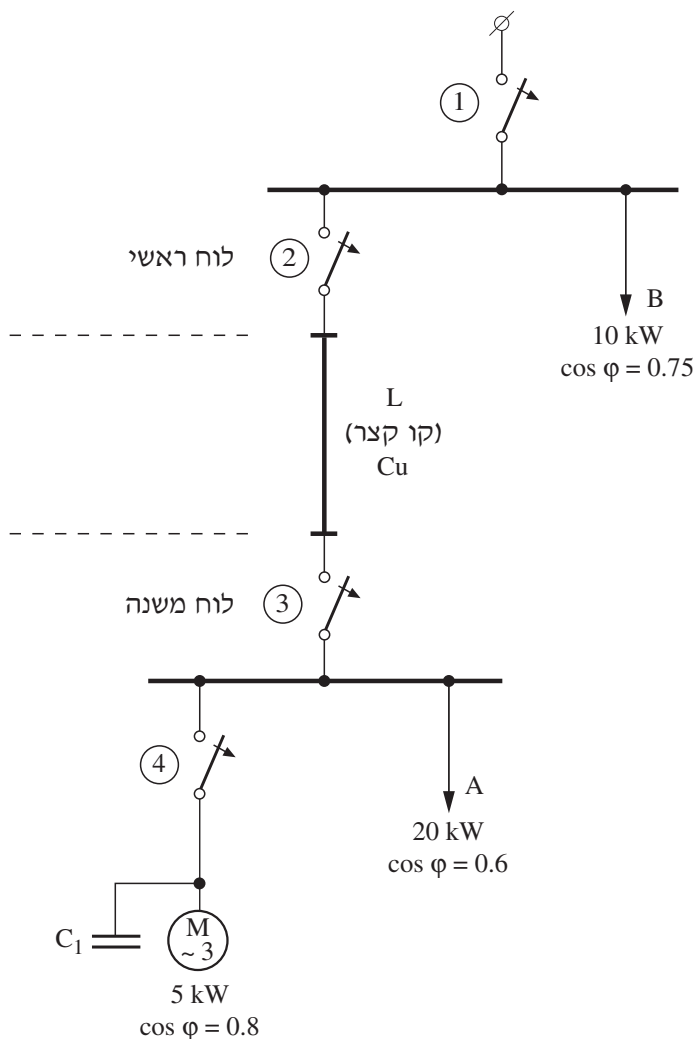
שים לב: כל הערכים המצוינים במפות האיזולוקסיות נתונים ב- lx .



איור ב' לשאלה 3

שאלה 4

באיור לשאלה 4 נתון תרשים חשמלי חד-קווי של לוח חשמל ראשי ולוח חשמל משנה במפעל. ההזנה היא תלת-מופעית, $400V / 50Hz$. לצורך שיפור מקדם ההספק של ההזנה למנוע M, הותקנה סוללת קבלים C_1 בקיזוז בודד. מקדם ההספק שופר ל-0.92.



איור לשאלה 4

- א. קבע את עוצמת הזרם של מפסק ②.
- ב. קבע את שטח החתך המסחרי של כבל L המחובר בין הלוח הראשי ללוח המשנה. הנח שטמפרטורת הסביבה היא 35°C .
- ג. כדי להקטין את שטח החתך של הכבל L המחובר בין הלוחות, הוחלט להתקין סוללת קבלים נוספת במערכת. קבע את מיקום התקנתה ואת גודלה (Q_C) לקבלת שטח חתך מזערי אפשרי של הכבל.
- ד. קבע את שטח החתך המסחרי החדש של הכבל L בהתאם לחישוביך בסעיף ג'.

פרק שני: המרת אנרגיה והינע

שאלה 5

נתוניו הנקובים של מנוע לזרם ישר בעירור נפרד (זר) הם:

$$115 \text{ kW} ; 600 \text{ V} ; 205 \text{ A} ; 1700 \text{ rpm}$$

התנגדות סליל העירור: 240Ω

התנגדות סליל העוגן: 0.15Ω

הערה: הזנח בחישוביך את תגובת העוגן, מפל המתח על הפחמים והפסדים קבועים. סליל העירור מוזן במתח 600 V .

- א. חשב את המומנט המכני ונצילות המנוע בהעמסה הנקובה.
- ב. סרטט במחברתך את האופיין המכני הטבעי $n = f(M)$ העקרוני של המנוע וציין עליו את הנקודות הבאות:
1. נקודת העבודה בעומס נקוב.
 2. נקודת העבודה בריקס.
 3. נקודת ההתנעה.
- ג. חשב את מומנט ההתנעה (בהתנעה ישירה).
- ד. מגדילים את הזרם בסליל העירור פי 2 על-ידי שינוי במתח העירור. העומס על הציר נשאר קבוע. כיצד ישתנו זרם העוגן ומהירות המנוע לאחר זמן ממושך? נמק בקצרה.

שאלה 6

נתוניו הנקובים של מנוע השראה תלת-מופעי בעל רוטור מלופף הם:

$$22 \text{ kW} ; 400 \text{ V} / \Delta ; 50 \text{ Hz} ; 2p = 6$$

הפרמטרים החשמליים של סלילי המנוע הם:

$$R_1 = 0.17 \, \Omega ; R'_2 = 0.15 \, \Omega$$

$$X_1 = 1.3 \, \Omega ; X'_2 = 1.2 \, \Omega$$

הפסדי המנוע הכוללים הם: 1340 W .

- א. חשב את מהירות הסיבוב של המנוע, את המומנט המכני על הציר, את נצילות המנוע ואת מקדם ההספק כאשר החליקה היא 3% .
- ב. קבע את ערכו של נגד נוסף המחובר בטור לכל אחד משלושת סלילי הרוטור, על-מנת לקבל מומנט מרבי (מקסימלי) בעת ההתנעה. תאר את האופיין המכני $M = f(n)$ במקרה זה.
- ג. מקטינים את מתח ההזנה ל-80% מערכו הנקוב. קבע את ערכו של המומנט המכני על הציר במקרה זה. הנח שמהירות המנוע קבועה ושווה לערך שחישבת בסעיף א'.

שאלה 7

נתוניו הנקובים של מנוע לזרם ישר בעירור מקבילי הם:

$$15 \text{ kW} ; 230 \text{ V} ; I_{a_n} = 73.5 \text{ A}$$

כאשר המנוע מוזן במתח הנקוב וזרם העוגן 41.5 A , נמדדה מהירות מנוע של 1150 rpm .

התנגדות סליל העירור: 95Ω

התנגדות סליל העוגן: 0.124Ω

א. קבע את המהירות הנקובה של המנוע.

ב. תכנן מתנע דרגתי להתנעת המנוע הנתון, כאשר:

$$I_{\min} = I_{a_n} ; I_{\max} = 2 \cdot I_{a_n}$$

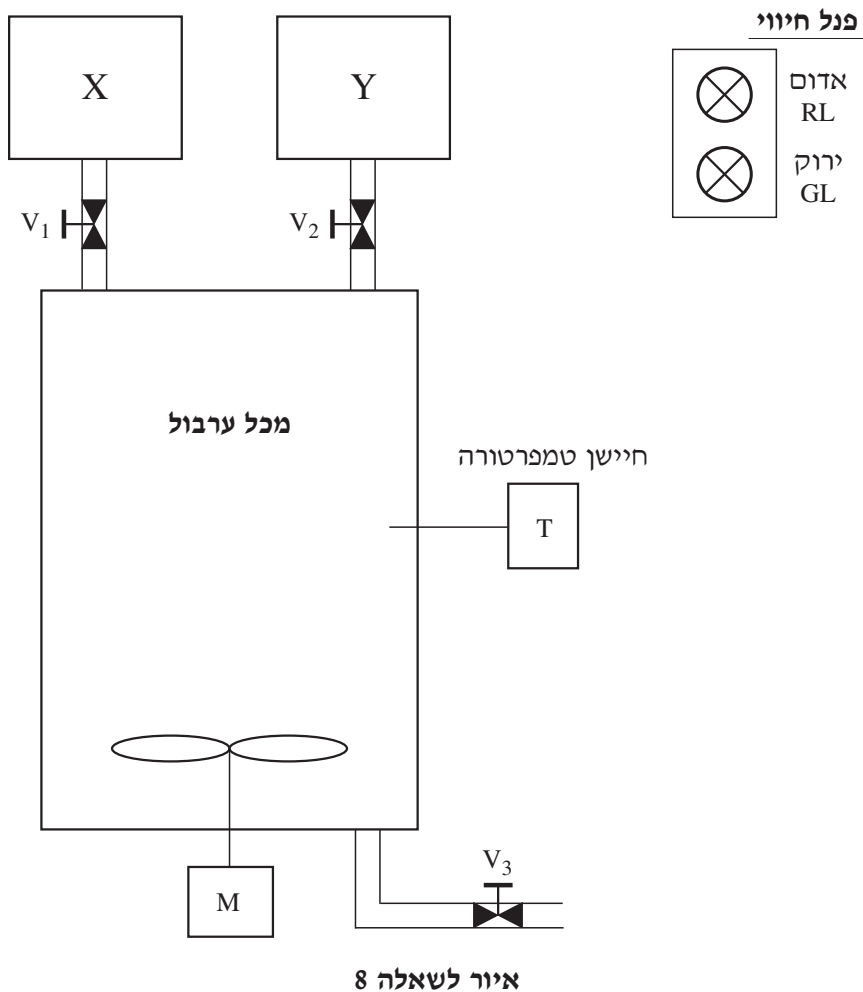
קבע את מספר דרגות המתנע ואת ערך ההתנגדות של נגד ההתנעה.

ג. חשב את הפסדי ההספק החשמלי הכוללים ברגע ההתנעה.

פרק שלישי: מערכות פיקוד ממוחשבות ובקרים בני-תכנות

שאלה 8

באיור לשאלה 8, נתון תרשים של מערכת ערבול לשני חומרים. כאשר החומרים מעורבלים, מתרחשת ביניהם תגובה כימית המעלה את הטמפרטורה של התרכובת.



התהליך מבוקר באמצעות בקר בר־תכנות באופן הבא:

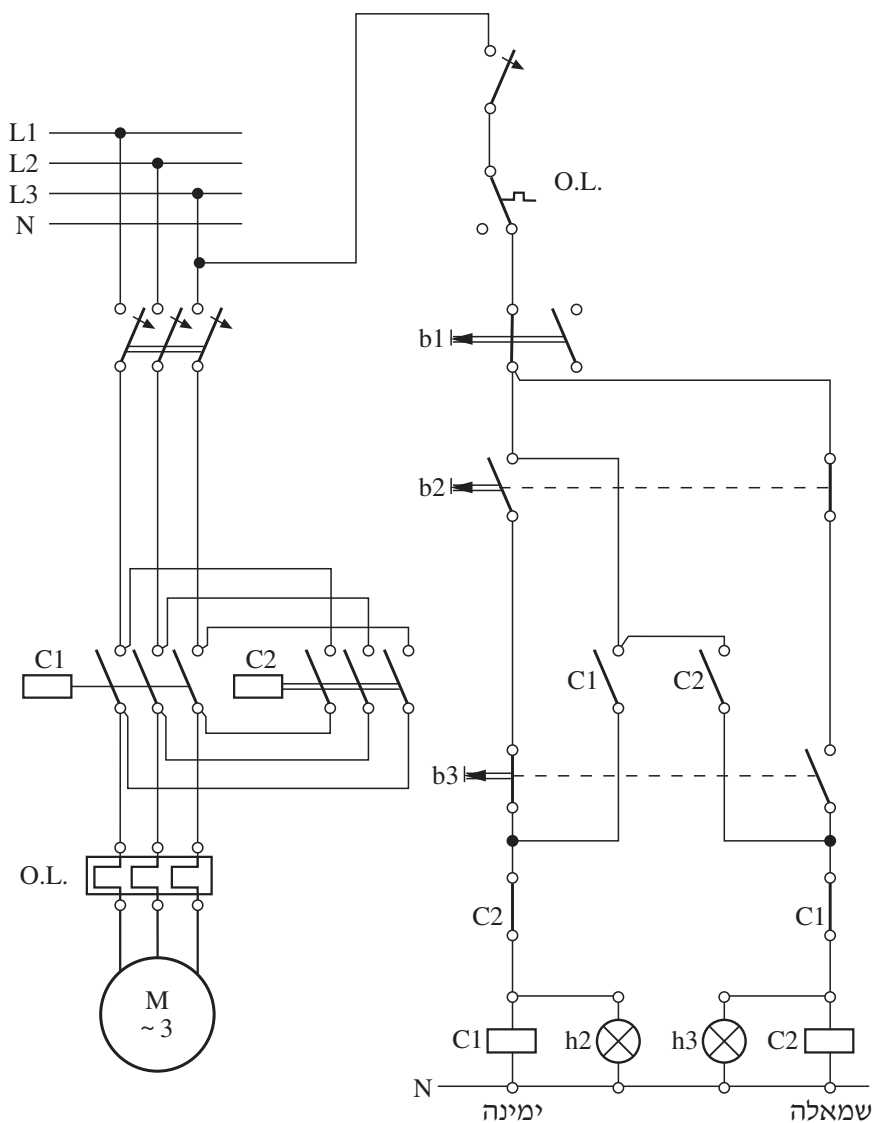
1. הפעלת המערכת על־ידי לחיצה על הלחצן START (B1) .
2. השסתום V_1 נפתח למשך דקה אחת ומאפשר את כניסת החומר X למכל הערבול.
3. מנוע המערבל M מופעל עם פתיחת השסתום V_1 .
4. כאשר הטמפרטורה במכל הערבול גבוהה מ־ 32°C , נפתח השסתום V_2 למשך זמן של שתי דקות. בפרק זמן זה מוכנס החומר Y למכל הערבול, ובתום זמן זה המנוע M נעצר.
5. השסתום V_3 נפתח למשך דקה אחת אחרי שהמנוע M נעצר, והמכל מרוקן.
6. המערכת תכלול את נורות החיווי הבאות:
- נורה אדומה (RL) – דולקת כאשר המערכת פועלת.
- נורה ירוקה (GL) – נדלקת בסוף התהליך.
7. כיבוי המערכת על־ידי הלחצן STOP (B2).

חיישן הטמפרטורה T הוא אנלוגי, ותחום הפעולה שלו הוא $20^{\circ}\text{C} \div 80^{\circ}\text{C}$.

- א. הגדר את המבואות והמוצאים של הבקר.
- ב. תאר באמצעות דיאגרמת סולם את תכנית הפיקוד להפעלת המערכת.

שאלה 9

באיור לשאלה 9 נתונה תכנית פיקוד קונבנציונאלית ותכנית מעגל הכוח להפעלת מנוע תלת-מופעי. הוחלט להחליף את מערכת הפיקוד למערכת פיקוד באמצעות בקר בר-תכנות.



איור לשאלה 9

- א. הגדר את המבואות והמוצאים של הבקר.
- ב. סרטט דיאגרמת סולם של תכנית הפיקוד להפעלת המנוע.
- ג. סרטט תרשים חיווט מפורט שיכלול את מערכת הכוח, ואת המבואות והמוצאים של הבקר.

בהצלחה!

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

אין להעביר את הנוסחאון
לנבחן אחר

מקום לנחשת נבחן

נוסחאון במערכות הספק לכיתה י"ג

(16 עמודים)

1. מפלי מתח

מתח ישר

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]

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

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

מתח חילופין חד-מופע

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]

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

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

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

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

$$I_a = I \cos \varphi$$

$$I_r = I \sin \varphi$$

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

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

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	[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]

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

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

חומרים		
חמרן	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_y	[min]
זמן המחזור	—	t	[min]

$$I = c \cdot I_n$$

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

2.1 כבלים מותקנים בתעלה רחבה, על מגש מחורר או צמודים לקיר

מוליכים מנחושת – בידוד 90°C

מעגל חד-מופעי			מעגל תלת-מופעי		
מבטח B או C I_n	זרם מתמיד מרבי I_z	חתך S ממ"ר	מבטח B או C I_n	זרם מתמיד מרבי I_z	חתך S ממ"ר
אמפר			אמפר		
16	23	1.5	13	20	1.5
20	30	2.5	20	28	2.5
25	40	4	25	36	4
40	53	6	32	41	6
	73	10		66	10
	99	16		88	16
	130	25		118	25
	160	35		145	35
	196	50		175	50
	248	70		223	70
	300	95		270	95
	348	120		313	120

טמפרטורה אופפת: 35°C

2.1.1 מקדם תיקון עבור טמפרטורה אופפת שונה של הסביבה (בידוד 90°)

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 מרבי I _z	חתך S ממ"ר
זרם מתמיד I _z	חתך S ממ"ר	אמפר	
אמפר			
		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

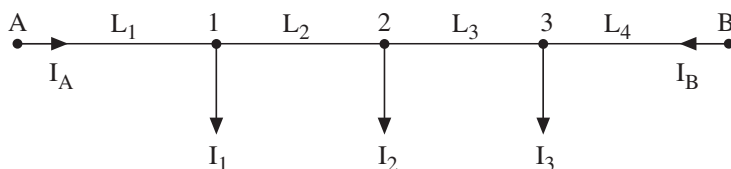
טמפרטורה אופפת של האדמה (°C)									
55	50	45	40	35	30	25	20	15	10
0.77	0.82	0.87	0.91	0.96	1.00	1.04	1.08	1.12	1.15

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

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

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

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_{cl}	[kVar]
תדירות הרשת	—	f	[Hz]
המתח על פני הקבל הנדרש	—	U_c	[V]

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

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 של הקבל כעבור זמן t	—	U_c	[V]
זמן הפריקה	—	t	[s]
הלוגריתם הטבעי	—	$\ln$	

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

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	[UV]
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 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	

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

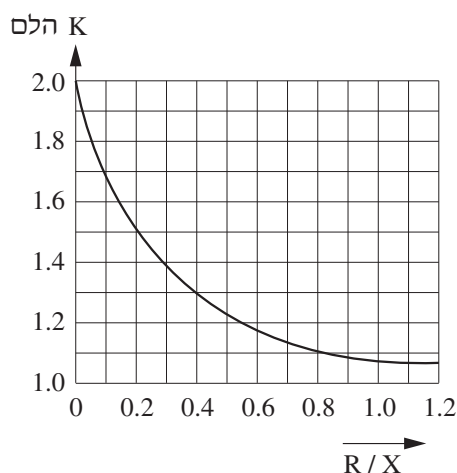
5.1 נוסחאות לחישוב זרם קצר תלת מופעי זרם הלם

רכיב מחזורי של זרם קצר	—	i_k
רכיב זרם ישר (רכיב אקספוננציאלי)	—	i_a
זווית המתח ברגע הופעת הקצר ($t = 0$)	—	α
זווית המופע של עכבת הקצר	—	φ_k
קבוע זמן של מעגל הקצר	—	σ
ערך שיא של זרם הקצר	—	$I_{\text{הלם}}$
מקדם ההלם	—	K

$i = i_k + i_a$
$i_k = \sqrt{2} I_k \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k)$
$i_a = -\sqrt{2} I_k \sin(\alpha - \varphi_k) e^{-\frac{t}{\sigma}}$
$\sigma = \frac{L}{R}$
$I_{\text{הלם}} = \sqrt{2} \cdot I_K \cdot K_{\text{הלם}}$

5.2 ערכי מקדם ההלם המובאים:

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	$[kg/m]$
זרם הקצר	—	I_k	$[kA]$
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	$[cm^3]$

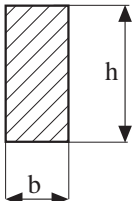
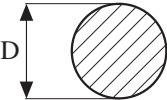
$$F = 1.76 \frac{I_k^2}{d}$$

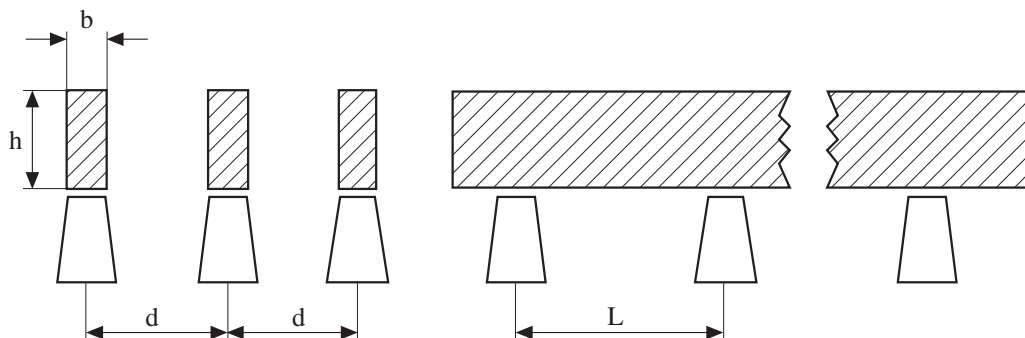
$$P = F \frac{L}{100}$$

$$\sigma = \frac{P \cdot L}{12W}$$

$$f = \frac{112}{L^2} \sqrt{\frac{E \cdot J}{G}}$$

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



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			
[A]	X ₀ [Ω/km]									[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]									[mm]	[mm ²]
—	—	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- $[A/mm^2]$

טמפרטורת המוליך לפני הקצר $[^{\circ}C]$	טמפרטורה גבולית $Cu - [^{\circ}C]$				טמפרטורה גבולית $Al - [^{\circ}C]$			
	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 נקוב	עכבה מרבית	זרם-קצר מזערי
$I_n [A]$	$Z_l [\Omega]$	$I_k [A]$
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

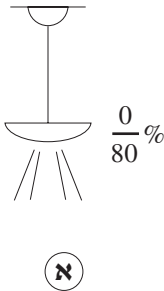
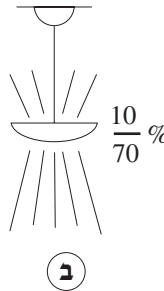
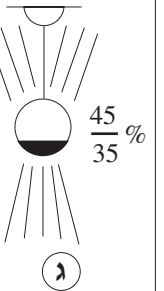
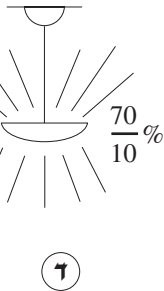
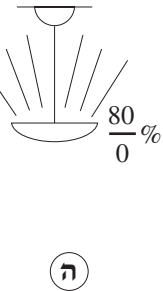
8. תאורה

שטף אור ונצילות של מקורות אור שונים

<u>נצילות [lm/W]</u>	<u>שטף אור [lm]</u>	<u>נורות להט (V 220)</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

- הערות:**
1. בנורות 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



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

- R_K מקדם האולם
- a [m] רוחב האולם
- b [m] אורך האולם

- h [m] המרחק האנכי בין התקרה ומשטח העבודה

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

- ϕ [lm] שטף האור הנדרש

- E [lx] עוצמת המאור הנדרשת

- A [m²] שטח האולם

- k מקדם ההפחתה

- η [%] נצילות התאורה

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

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

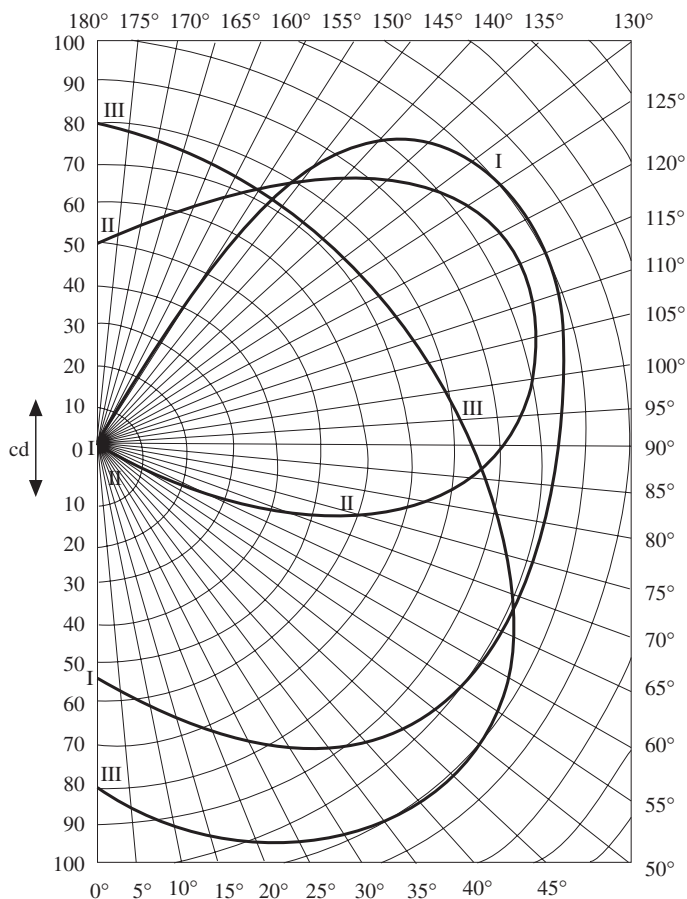
מקדמי הפחתה k

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

נצילות התאורה η

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

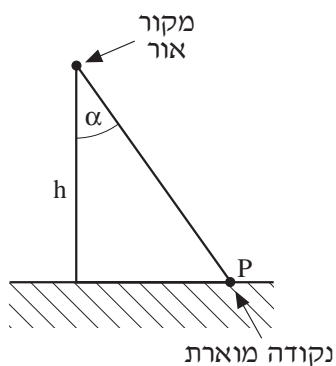
דיאגרמה פולרית של מקור אור בעל 1000 lm



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

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

גובה מעל משטח
ההארה — h [m]



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

בהצלחה!

אין להעביר את הנוסחאון
לנבחן אחר

מקום לנחלקת נבחן

נוסחאון במכונות חשמל והינע לכיתה י"ג
(22 עמודים)

1. מבוא למערכות תלת מופעיות

כוכב סימטרי

$$I_L = I_{ph}$$

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

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

משולש סימטרי

$$U_L = U_{ph} \quad I_L = \sqrt{3} \cdot I_{ph}$$

הספק תלת מופעי

- הספק מדומה תלת-מופעי S [VA] —
- הספק פעיל תלת-מופעי P [W] —
- הספק היגבי תלת-מופעי Q [VAr] —

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

$$P = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cos \varphi$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \sin \varphi$$

2. שנאים

2.1 מתח מושרה בסליל

— E_1 [V] כא"מ מושרה בסליל הראשוני

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

— E_2 [V] כא"מ מושרה בסליל השניוני

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

— $\Phi_{\max}$ [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

— a יחס השנאה

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

שנאי חד-מופעל:

— U_1 [V] מתח בסליל הראשוני

— U_2 [V] מתח בסליל השניוני

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

— I_1 [A] זרם בסליל הראשוני

— I_2 [A] זרם בסליל השניוני

שנאי תלת-מופעל:

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

ניסוי קצר

2.2

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

$R_2' = R_2 a^2$

$X_2' = X_2 a^2$

$R_k = R_1 + R_2'$

$X_k = X_1 + X_2'$

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

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

2.3 פעולת השנאי בקצר ובריקם

שנאי תלת-מופעי בקצר

שנאי חד-מופעי בקצר

הספק
בקצר — P_k [W]

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

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

זרם קצר — I_k [A]

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

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

התנגדות — R_k [Ω]

הקצר

$$\Delta U_{R\%} = \frac{I_{1phn} \cdot R_k}{U_{1phn}} \cdot 100$$

$$\Delta U_{R\%} = \frac{I_{1n} R_k}{U_{1n}} \cdot 100$$

היגב — X_k [Ω]

בקצר

$$\Delta U_{X\%} = \frac{I_{1phn} \cdot X_k}{U_{1phn}} \cdot 100$$

$$\Delta U_{X\%} = \frac{I_{1n} X_k}{U_{1n}} \cdot 100$$

שנאי תלת-מופעי בריקם:

שנאי חד-מופעי בריקם:

זרם ריקם
באחוזים — $I_{o\%}$

$$I_{o\%} = \frac{I_{pho}}{I_{1phn}} \cdot 100 = \frac{I_o}{I_n} \cdot 100$$

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

זרם — I_{Fe} [A]

הפסדי

ברזל

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

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

זרם — I_μ [A]

המגנט

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

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

התנגדות — R_{Fe} [Ω]

מותאמת

להפסדי

ברזל

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

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

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

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

היגב מגנט — X_μ [Ω]

זרם ריקם — I_o [A]

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

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

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 — $\Delta U_{R\%}$

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

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

גורם הספק — $\cos \varphi_2$

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

מקדם העמסה — 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 מותאם — $\beta_{\eta_{\max}}$

לנצילות מירבית

הפסדי ברזל — ΔP_{Fe} [W]

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

הפסדי נחושת נקובים — ΔP_{Cu_n} [W]

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

2.5 נצילות השנאי

תנאי לקבלת נצילות מרבית:

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

2.6 עבודת שנאים במקביל

בהפעלת שני שנאים במקביל:

$$\frac{S_I}{S_{II}} = \frac{S_{nI} \cdot U_{K\%II}}{S_{nII} \cdot U_{K\%I}}$$

$$\frac{S_I}{S_{II}} = \frac{Z_{kII}}{Z_{kI}}$$

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

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_{Tmax} — הספק מדומה של העומס
(המירבי המותר)

S_{nI} — הספק מדומה נקוב של
שנאי (1)

S_{nII} — הספק מדומה נקוב של
שנאי (2)

Z_{kI} — עכבת קצר של שנאי (1)

Z_{kII} — 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 כל השנאים
הפועלים יחד במקביל

m — שנאי כלשהו מבין השנאים

n — מס' השנאים

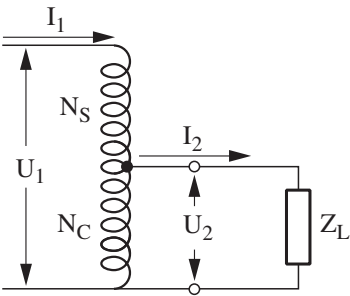
בהפעלת מספר שנאים מקביל:

$$S_m = \frac{S_T}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{S_{ni}}{U_{k\%i}} \right)} \cdot \frac{S_{nm}}{U_{k\%m}}$$

$$S_{Tmax} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{S_{ni}}{U_{k\%i}} \right) \cdot U_{k\%min}$$

2.7 שְנאִי עֲצֻמִי

מס' הכריכות בחלק הלא משותף של הסליל	—	N_S	[T]
מס' הכריכות בחלק המשותף של הסליל	—	N_C	[T]
תדירות	—	f	[Hz]
כח אלקטרומניע	—	E	[V]
מתח	—	U	[V]
זרם	—	I	[A]
שטף מגנטי מירבי	—	$\Phi_{\max}$	[Wb]



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

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

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

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

$$a = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_S + N_C}{N_C}$$

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

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

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

3. מכונה לזרם ישר

3.1 חישוב כוח אלקטרו מניע

—	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 חישוב הכא"מ

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

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

מחולל לזרם ישר

—	E	[V]	כוח אלקטרו מניע (כ.א.מ.)	$E = U + I_a \cdot R_a + \Delta U_b$	(עירור מקבילי)
—	U	[V]	מתח הדקי המחולל	$E = U + I \cdot R_a + \Delta U_b$	עירור זר
—	R_a	[Ω]	התנגדות העוגן	$E = U + I (R_a + R_{es}) + \Delta U_b$	עירור טורי
—	R_{es}	[Ω]	התנגדות סליל בעירור טורי		
—	ΔU_b	[V]	מפל המתח על המברשות		
—	I_a	[A]	הזרם בעוגן	$E = U - I_a \cdot R_a - \Delta U_b$	(עירור מקבילי)
—	I	[A]	זרם הצרכן במחולל / זרם המקור במנוע	$E = U - I \cdot R_a - \Delta U_b$	(עירור זר)
				$E = U - I (R_a + R_{es}) - \Delta U_b$	(עירור טורי)

3.2 במנוע לזרם ישר

3.3 חישוב מהירות

—	n		מהירות המכונה
---	-----	--	---------------

$$n = \frac{E}{K_e \Phi}$$

3.4 חישוב זרמים במנוע

עירור זר	$I_e = \frac{U_e}{R_e}$	$I = I_a$	I [A] – הזרם הנצרך על-ידי המנוע
עירור מקבילי	$I_e = \frac{U}{R_e}$	$I = I_a + I_e$	I_a [A] – הזרם בעוגן (רוטור)
עירור טורי		$I = I_a = I_e$	I_e [A] – הזרם בסליל העירור

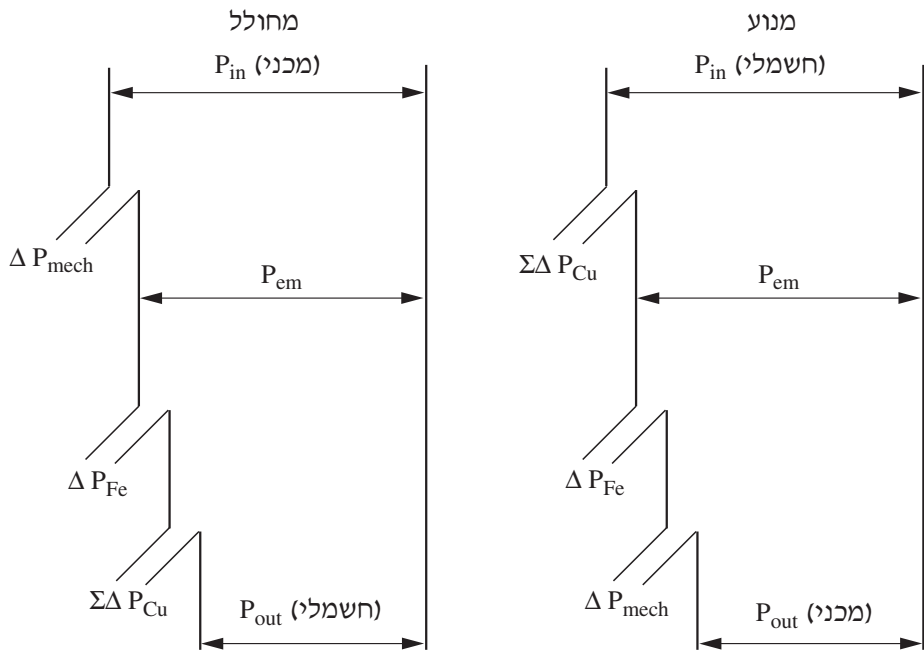
3.5 חישוב זרמים במחולל

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

3.6 חישוב הספקים והפסדי הספק

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

3.7



3.8 מומנטים

מומנט נקוב	—	M_n [N · m]
מהירות זוויתית	—	ω_n $\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$
מהירות סיבוב נקובה	—	n_n [r.p.m]
מקדם חישוב המומנט	—	K_m
מספר מוליכים ברוטור	—	Z
מספר זוגות קטבים	—	p
מספר זוגות ענפים	—	a
מקבילים בעוגן		
מומנט אלקטרומגנטי	—	M_{em} [N · m]
שטף מגנטי	—	Φ [Wb]
זרם העוגן	—	I_a [A]
הספק אלקטרומגנטי	—	P_{em} [W]
סכום הפסדי הנחשת	—	ΣP_{Cu} [W]
הפסדי הברזל	—	ΔP_{Fe} [W]
הספק מבוא	—	P_{in} [W]
הספק מוצא	—	P_{out} [W]
איבודי מומנט בריקם	—	ΔM_0 [N · m]

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

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

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

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

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

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

3.9 חישוב מהירות במנוע

א. במנוע לזרם ישר בעירור מקבילי

מקדם חישוב 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 בריקס	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}	— [Nm]	
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]	

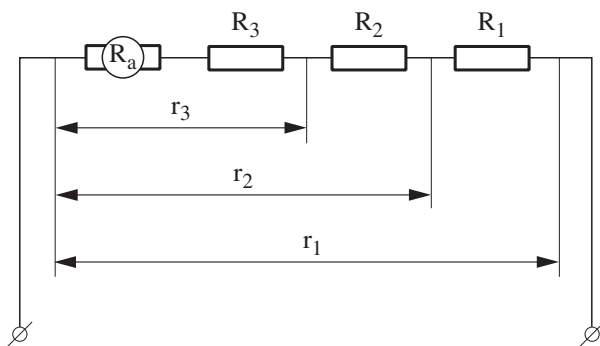
ב. במנוע בעירור טורי

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

3.10 תכנון מתנע דרגתי למנוע לזרם ישר בעירור מקבילי

מספר דרגות	—	m	
התנגדות מרבית של מעגל העוגן ברגע ההתנעה ($n = 0, E = 0$)	—	r_1 [Ω]	$m = \frac{\ln \frac{r_1}{R_a}}{\ln \lambda}$
התנגדות הרוטור	—	R_a [Ω]	$r_1 = \frac{U}{I_{a \max}}$
זרם התנעה מרבי בעוגן	—	$I_{a \max}$ [A]	$\lambda = \frac{I_{a \max}}{I_{a \min}}$
זרם מזערי בעוגן	—	$I_{a \min}$ [A]	
התנגדות הדרגה n	—	R_n [Ω]	$r_n = \frac{r_1}{\lambda^{n-1}}$
			$r_2 = \frac{r_1}{\lambda}$
			$R_n = r_n - r_{n+1}$

מתנע בעל שלוש דרגות



4. מנוע השראתי – תלת-מופעי

4.1 חישוב זרמים

זרם נקוב קוי	—	I_{1n} [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_{20} [Ω]
ההיגב הכולל של המנוע	—	X_T [Ω]
יחס תמסורת בין ערכים מופעיים	—	a_{ph}
מס' כריכות בסליל	—	N [T]
מקדם ליפוף של הסליל	—	K_N
גורם החליקה	—	s
כא"מ מופעי מושרה ברוטור ניח ופתוח	—	$E_{ph2(0)}$ [V]
הספק המנוע בריקם	—	P_0 [W]
גורם ההספק בריקם	—	$\cos \varphi_0$

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

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

$$I_{ph2} = \frac{E_{ph2(0)}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{20}^2}}$$

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

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

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
בסטטור בהתנעה — $I_{ph1(st)}$ [A]

זרם פאזורי מופעי
ברוטור משוקף לסטטור
בהתנעה — $I_{ph2(st)}$ [A]

$$I'_{ph2(st)} \approx I_{ph1(st)} = \frac{U_{ph1}}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + X_T^2}}$$

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

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

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

4.4 מהירות וגורם החלקה

מהירות סנכרונית — n_s [r.p.m]

תדירות הרשת — f_1 [Hz]

מס' זוגות קטבים — p

תדירות הזרם ברוטור — f_2 [Hz]

גורם החלקה (חליקה) — S

מהירות קריטית — n_k [r.p.m]

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

מומנט מרבי (קריטי) — M_k

מומנט נקוב — M_n

גורם החלקה במומנט
קריטי — S_k

גורם החלקה במומנט נקוב — S_n

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

$$f_2 = f_1 \cdot s$$

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

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

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

$$s_k = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_T^2}} \approx \frac{R_2'}{X_T}$$

4.5 הספקים ואיבודי הספק

הספק (ממשי) מושקע	—	P_{in}	[W]
הספק מופק על גל 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 ברוטור	—	ΔP_{Fe}	[W]
איבודי חיכוך ואיורור	—	ΔP_{mech}	[W]
איבודים נוספים	—	ΔP_{add}	[W]
גורם הספק בסטטור	—	$\cos \varphi_1$	
זרם קוי בסטטור	—	I_1	[A]
הספק המנוע בריקם	—	P_o	[W]
גורם החלקה	—	s	

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

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

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

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

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

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

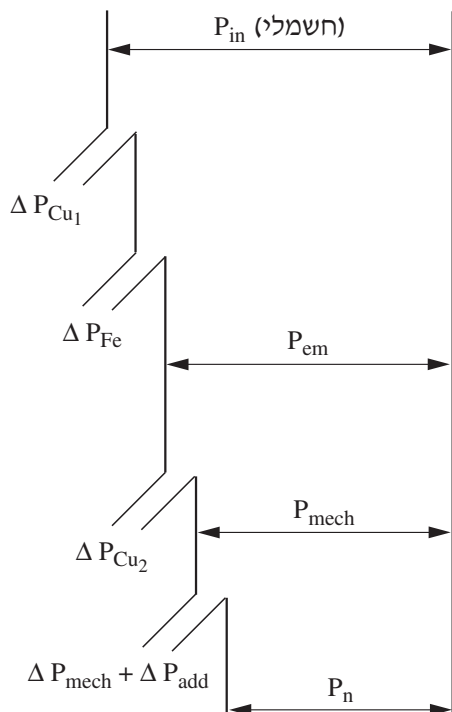
$$\Delta P_{Cu_2} = P_{em} \cdot s = P_{mech} \cdot \left(\frac{s}{1-s} \right)$$

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

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

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

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



4.6 חישובי מומנטים

המהירות הזוויתית של הרוטור	ω_n	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$	$\omega_n = \frac{2\pi n_n}{60}$
המהירות הזוויתית של השדה המסתובב	ω_s	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$	$\omega_s = \frac{2\pi \cdot n_s}{60}$
מהירות סיבובית של השדה (סנכרונית)	n_n	[r.p.m]	$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = 9.55 \cdot \frac{P_n}{n_n}$
הספק נקוב מופק של 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}	[Nm]	$M_{em} = \frac{3 \cdot 9.55 \cdot U_{ph}^2 \cdot R_2'}{n_s \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + X_T^2 \right]}$
מומנט אלקטרומגנטי	M_{em}	[Nm]	$M_{em_start} = \frac{3 \cdot 9.55 \cdot U_{ph}^2 \cdot R_2'}{n_s \left[\left(R_1 + R_2' \right)^2 + X_T^2 \right]}$
מומנט מרבי (קריטי)	M_k	[Nm]	$M_k \cong \frac{3 \cdot 9.55 \cdot U_{ph}^2}{2 \cdot n_s \cdot X_T}$
			$M = \frac{2 \cdot M_k}{\frac{s_K}{s} + \frac{s}{s_K}}$
			$\frac{M_I}{M_{II}} = \left(\frac{U_I}{U_{II}} \right)^2$
			$\frac{M_{start}(\Delta)}{M_{start}(Y)} = 3$

4.7 נגד נוסף במעגל רוטור

א. כאשר המנוע מועמס במומנט נקוב

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

ב. 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 $[\Omega]$ התנגדות נגד טורי נוסף לסליל הרוטור
- R_2 $[\Omega]$ התנגדות סליל הרוטור
- s_n חליקה נקובה
- s_x חליקה מותאמת למהירות n_x
- $\lambda_{\max}$ היחס בין מומנט מרבי למומנט נקוב

4.8 תכנון מתנגד הדרגתי למנוע השראתי רוטור מלופף

- m מספר דרגות התנעה
- r_1 $[\Omega / \text{ph}]$ התנגדות מרבית של מעגל הרוטור ברגע ההתנעה
- R_2 $[\Omega / \text{ph}]$ התנגדות מעגל הרוטור לפאזה
- $M_{\min}$ $[\text{Nm}]$ מומנט מזערי בהתנעה
- $M_{\max}$ $[\text{Nm}]$ מומנט מרבי בהתנעה
- M_n $[\text{Nm}]$ מומנט נומינלי
- r_n $[\Omega / \text{ph}]$ התנגדות כוללת של דרגה n
- R_n $[\Omega / \text{ph}]$ התנגדות הדרגה n

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

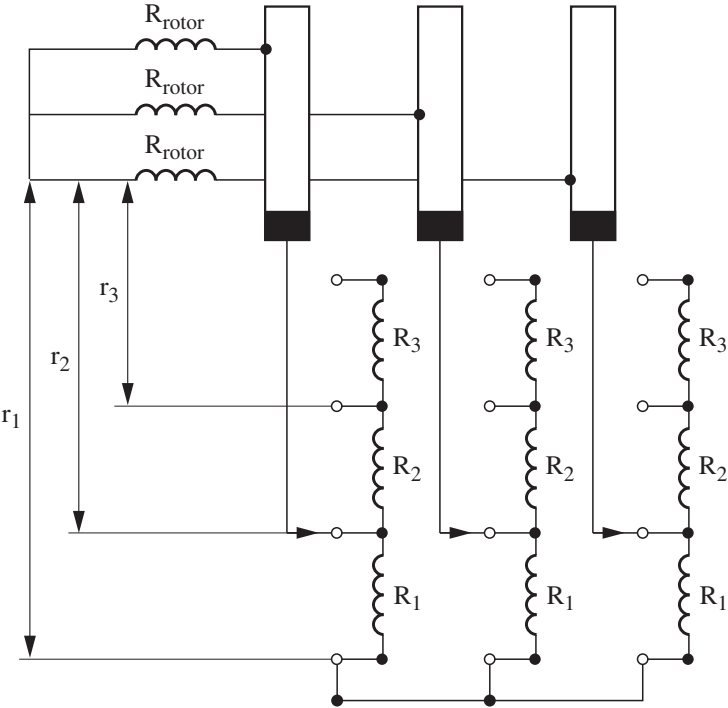
$$\lambda = \frac{M_{\max}}{M_n}$$

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

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

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

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



5. כוחות ומומנטים במערכות הינע

5.1 תנועה קווית

כוח מניע	—	F	[N]	משוואת התנועה:
כוח דינמי	—	F_d	[N]	משוואת התנועה: $F = F_s + F_d$
כוח נגדי	—	F_s	[N]	$F_d = m \frac{dv}{dt} = ma$
מסת הגוף	—	m	[kgf · s ² / m] [kg]	
מהירות	—	v	[m / s]	
תאוצה	—	a	[m / s ²]	

5.2 תנועה סיבובית

מומנט סיבובי	—	M	[N · m]	משוואת התנועה:
מומנט סטטי (נגדי)	—	M_s	[N · m]	משוואת התנועה: $M = M_s + M_d$
מומנט דינמי	—	M_d	[N · m]	$M_d = J \frac{d\omega}{dt}$
מומנט התמדה (אינרציה)	—	J	[kgf · m · s ²]	$M - M_s = \frac{GD^2}{38.2} \frac{dn}{dt}$
תאוצה זוויתית	—	$\frac{d\omega}{dt}$	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$	$GD^2 = 4gJ$
מומנט תנופה	—	GD^2	[kgf · m ²]	
תאוצת הכובד	—	$g = 9.8$	[m/s ²]	
קוטר האינרציה	—	D	[m]	
מהירות סיבוב	—	n	[r.p.m]	

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

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

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

$$\text{עבור תמסורת של } i \text{ גלגלי שיניים:}$$

$$M_s = M_{sm} \cdot \frac{1}{K_1 K_2 \dots \eta_1 \eta_2 \dots \eta_i}$$

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	—	$n_i \text{ [r.p.m]}$

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

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

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

העברת מסות ומומנטים מתנועה קווית לתנועה סיבובית

העברת כוח סטטי למומנט סיבובי על ציר המנוע

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

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

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

העברת מסות למומנט תנופה

משקל הגוף	—	G [kgf]
-----------	---	-----------

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

זמן התנעה וזמן עצירה

(בהנחה שהמומנט הדינמי ו- GD^2 קבועים)

מומנט תנופה	—	GD^2 [kgf · m ²]
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]

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

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

בהצלחה!