

סוג הבחינה: גמר לבתי-ספר לטכנאים ולהנדסאים

מועד הבחינה: אביב תשפ"ב, 2022

סמל השאלון: 733911

נספחים: א. נספח לשאלה 4

ב. מילון מונחים

ג. נוסחאון במערכות הספק

לכיתה י"ג

ד. 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 שלושה פרקים ובהם תשע שאלות.
יש להשיב על ארבע שאלות בלבד: שאלה אחת לפחות מן הפרק הראשון,
ושאלה אחת לפחות מן הפרק השני.
לכל שאלה – 25 נקודות, סך-הכול – 100 נקודות.

ג. חומר עזר מותר בשימוש:

1. מותר להשתמש בכל חומר הכתוב (בכתב יד או בהדפסה) על שלושה דפי A4, הכתובים משני הצדדים.
2. מחשבון.

ד. הוראות מיוחדות:

1. ענו על מספר השאלות הנדרש בשאלון. המעריך יקרא ויעריך את מספר התשובות הנדרש בלבד, לפי סדר כתיבתן במחברת, ולא יתייחס לתשובות נוספות.
2. התחילו כל תשובה לשאלה חדשה בעמוד חדש.
3. כתבו את כל התשובות אך ורק בעט.
4. הקפידו לנסח את התשובות כהלכה ולסרטט את התרשימים בבהירות.
5. כתבו את התשובות בכתב-יד ברור, כדי לאפשר הערכה נאותה שלהן.
6. אם לדעתכם חסר נתון, הוסיפו אותו על-פי שיקול דעתכם ופתרו בעזרתו את השאלה. כתבו בתשובה את הנתון שהוספתם.
7. בכתיבת פתרונות חישוביים, קבלת מֶרֶב הנקודות מותנית בהשלמת כל המהלכים שלהלן, בסדר שבו הם כתובים:
 - * כתיבת הנוסחה המתאימה.
 - * הצבה של כל הערכים ביחידות המתאימות.
 - * חישוב (אפשר באמצעות מחשבון).
 - * כתיבת התוצאה המתקבלת, יחד עם יחידות המידה המתאימות.
 - * ליווי הפתרון החישובי בהסבר קצר.
8. בנספח ב' לשאלון מובא מילון מונחים בשפות עברית, אנגלית, רוסית וערבית. תוכלו להיעזר בו בעת הצורך.
9. צרפו את שלושת דפי ה-A4 למחברת הבחינה.

הוראות למשגיחים: יש לוודא כי הנבחנים צירפו את נספח א' ואת דפי ה-A4 למחברת הבחינה.

בשאלון זה 11 עמודים ו-40 עמודי נספחים.

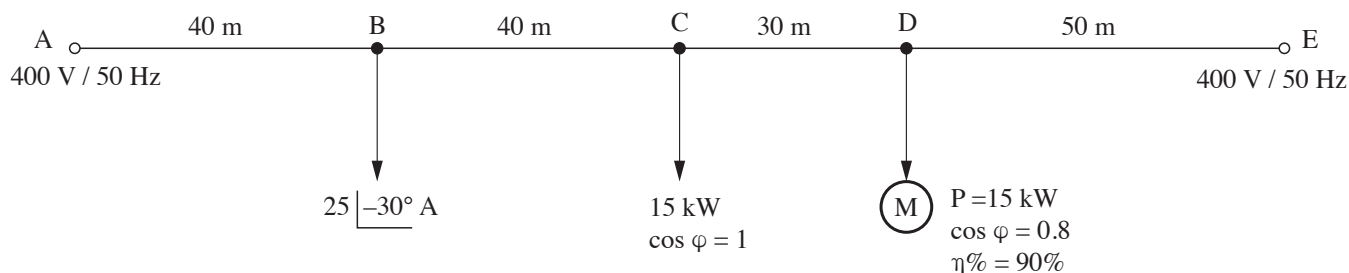
בהצלחה!

המשך מעבר לדף

ענו על ארבע מבין השאלות 1-9. עליכם לענות על שאלה אחת לפחות מן הפרק הראשון, ועל שאלה אחת לפחות מן הפרק השני.

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

באיור לשאלה 1 נתונה רשת תלת־מופעית המוזנת בנקודות A ו-B במתחים ומופעים זהים. מוליכי הרשת עשויים נחושת. $\gamma = 57 \left[\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} \right]$, שטח החתך האחיד שלהם הוא 10 mm^2 וההיגב ההשראותי שלהם ליחידת אורך הוא $X_0 = 0.4 \frac{\Omega}{\text{km}}$.



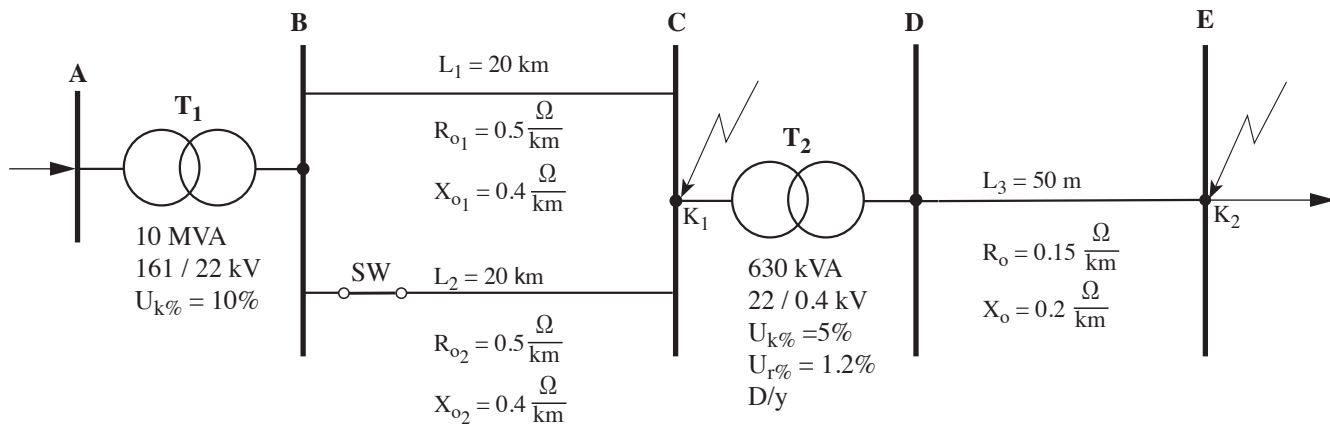
א. חשבו את הזרם הזורם בכל אחד מקטעי הרשת. כתבו את התשובות בהצגה מרוכבת. (8 נק')

(10 נק') ב. חשבו את מפל המתח המרבי, ΔU , את מפל המתח המרבי באחוזים, $\Delta U\%$, ואת המתח המזערי ברשת.

ג. חשבו את הפסדי ההספק הממשיים ברשת, ΔP .

שאלה 2

באיור לשאלה 2 נתונה רשת תלת־מופעית המוזנת בפסי צבירה A ממקור הספק קשיח, שהספק הקצר שלו אינסופי.



איור לשאלה 2

המפסק SW סגור.

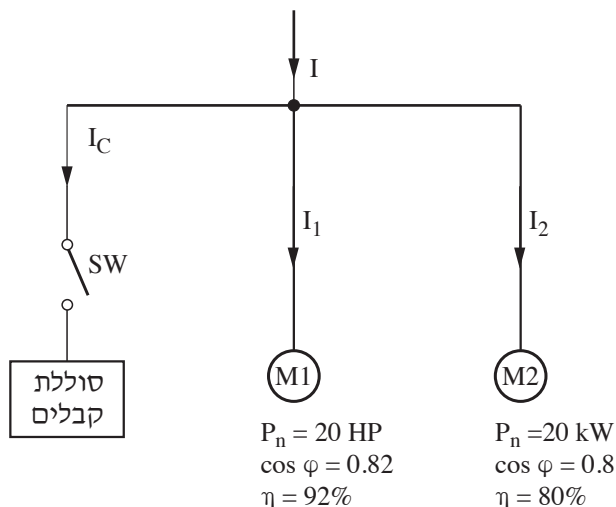
- א. (8 נק') קצר תלת־מופע מתרחש בנקודה K_1 . חשבו את זרם הקצר התלת־מופע בפי הצבירה C.
- ב. (12 נק') קצר תלת־מופע מתרחש בנקודה K_2 . חשבו את זרם הקצר בפי הצבירה E ואת זרם הקצר בפי הצבירה C.

פותחים את המפסק SW.

- ג. (5 נק') קצר תלת־מופע מתרחש בנקודה K_2 . האם במצב זה זרם הקצר בפי הצבירה E יגדל, יקטן או לא ישתנה? נמקו את התשובה.

שאלה 3

באיור לשאלה 3 נתון לוח חשמל משני 400V / 50 Hz, המזין שני מנועים השראותיים M1 ו-M2. לוח החשמל המשני כולל סוללת קבלים.



איור לשאלה 3

המפסק SW פתוח.

א. (8 נק') חשבו את ההספק הממשי, את ההספק העיוור ואת ההספק המדומה הנצרכים על-ידי שני המנועים.

ב. (6 נק') חשבו את מקדם ההספק בכניסה ללוח החשמל המשני ואת הזרם, I .

סוגרים את המפסק SW.

ג. (5 נק') חשבו את ההספק הנדרש של סוללת הקבלים כדי שמקדם ההספק בכניסה ללוח החשמל המשני יהיה 0.92.

ד. (6 נק') חשבו את הזרמים I ו- I_C לאחר הוספת סוללת הקבלים. הציגו את התשובות בהצגה מרוכבת.

שאלה 4

בנספח א' לשאלה 4 מתואר תרשים של רשת תלת-מופעית שמזינה לוח חשמל ראשי במתח של $400\text{ V} / 50\text{ Hz}$. ללוח החשמל מחובר עומס התנגדותי חד-מופעי טהור.

נתוניו הנקובים של העומס:

$$U_n = 230\text{ V}$$

$$R_n = 10\ \Omega$$

א. (10 נק') ציינו את סוג ההגנה בפני חשמול, וכתבו במחברת את שמות הרכיבים ① – ③.

ב. (8 נק') מתרחש קצר בנקודה K. סרטטו על-גבי הנספח את לולאת התקלה.

ג. (7 נק') חשבו את מתח התקלה הכללי בין הגוף המתכתי ובין המסה הכללית של האדמה. בתשובה הזניחו את עכבת המוליכים.

הערה: הדביקו את מדבקת הנבחן במקום המיועד לכך בנספח א' לשאלה 4, והדקו אותו למחברת הבחינה.

פרק שני: המרת אנרגייה והינע א'

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

שאלה 5

נתונים הנקובים של שני שנאים תלת־מופעיים הם:

שנאי 1: $S_n = 800 \text{ kVA}$; $22/0.4 \text{ kV}$; D/y-11

שנאי 2: $S_n = 400 \text{ kVA}$; $22/0.4 \text{ kV}$; D/y-11

בניסוי בקצר שבוצע בהזנת שני השנאים מצד המתח הגבוה התקבלו התוצאות האלה:

שנאי 1: $P_k = 8.5 \text{ kW}$; $I_k = I_n$ $\cos \varphi_k = 0.212$

שנאי 2: $U_{k\%} = 4.4\%$; $I_{1k} = 10.5 \text{ A}$

השנאים מוזנים במתח נקוב ומחוברים במקביל.

(12 נק') א.

8 נק') 1. חשבו את ההספק המועבר על־ידי כל אחד מן השנאים הנתונים, אם ידוע שהעומס הכולל הוא $1,200 \text{ kVA}$.

4 נק') 2. האם אפשר להעמיס את השנאים הנתונים בעומס של $1,200 \text{ kVA}$ לאורך זמן? נמקו את התשובה.

8 נק') ב. חשבו את העומס הכולל המרבי שעבורו אף שנאי לא יפעל בעומס יתר.

5 נק') ג. ציינו שלושה תנאים לחיבור שנאים במקביל.

שאלה 6

נתוניו הנקובים של מנוע לזרם ישר בעירור מקבילי הם:

$$P_n = 15 \text{ kW} ; \quad U_n = 300 \text{ V} ; \quad n_n = 1,100 \text{ rpm} ; \quad \eta_{n\%} = 84\% ; \quad R_a = 0.3 \Omega ; \quad R_e = 120 \Omega$$

הזניחו בחישובים את תגובת העוגן ואת מפל המתח על הפחמים.

הניחו כי המנוע פועל בתחום הליניארי של עקום המיגנוט.

(10 נק') א.

5 נק' 1. חשבו את המומנט הנקוב.

5 נק' 2. חשבו את איבודי המומנט בריקם.

(8 נק') ב. מקטינים את העומס על ציר המנוע כך שזרם העוגן יורד ל-40 A .

4 נק' 1. חשבו את מהירות הסיבוב של המנוע.

4 נק' 2. חשבו את המומנט על ציר המנוע.

(7 נק') ג. חשבו את נצילות המנוע לפי תנאי העמסה של סעיף ב'.

שאלה 7

נתוניו הנקובים של מנוע השראה תלת-מופעי שסלילי הסטטור שלו מחוברים בחיבור כוכב, הם:

$$P_n = 16 \text{ kW} ; \quad U_n = 400 \text{ V} ; \quad f = 50 \text{ Hz} ; \quad \cos \varphi_n = 0.85 ; \quad \eta_{n\%} = 91.2\% ; \quad n_n = 1,455 \text{ rpm} ; \quad \Delta P_{\text{mech}_n} = 250 \text{ W} ;$$

$$\lambda_{\text{max}} = 2.5 ; \quad \Delta P_{\text{Fe}_n} = 300 \text{ W}$$

המנוע מועמס בעומס נקוב.

(10 נק') א.

5 נק' 1. חשבו את איבודי הספק הנחושת ברוטור.

5 נק' 2. חשבו את התנגדות סלילי הסטטור.

(8 נק') ב.

4 נק' 1. חשבו את גורם החליקה במומנט קריטי.

4 נק' 2. חשבו את מומנט ההתנעה בהתנעה ישירה.

(7 נק') ג. חשבו את נצילות המנוע כאשר הוא צורך מהרשת זרם של 25 A , מועמס ב-80% מהמומנט הנקוב ומסתובב במהירות של 1,470 rpm . הניחו בחישובים שההפסדים המכניים אינם משתנים.

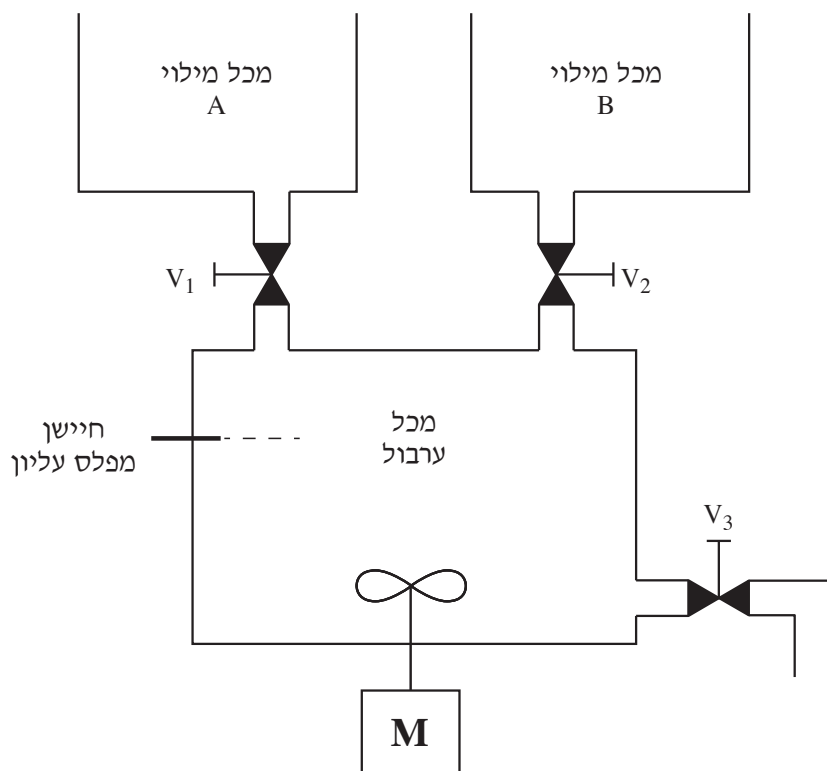
פרק שלישי: מערכות פיקוד ממוחשבות ובקרים בני-תכנות

(לכל שאלה – 25 נקודות)

שאלה 8

באיור לשאלה 8 נתון תרשים של מערכת אוטומטית לערבול שני נוזלים במכל, ולוח הפעלה וחיווי של המערכת.

לוח הפעלה וחיווי



- B₁ - לחצן הפעלה START
- B₂ - לחצן הפסקה STOP
- L₁ - נורית "מערכת בפעולה"
- L₂ - נורית "סיום תהליך"
- L₃ - נורית "גובה מפלס חריג"
- O.L. - נורית תקלת עומס יתר

איור לשאלה 8

תהליך הערבול מבוקר באמצעות בקר בר־תכנות על־פי סדר הפעולות הזה:

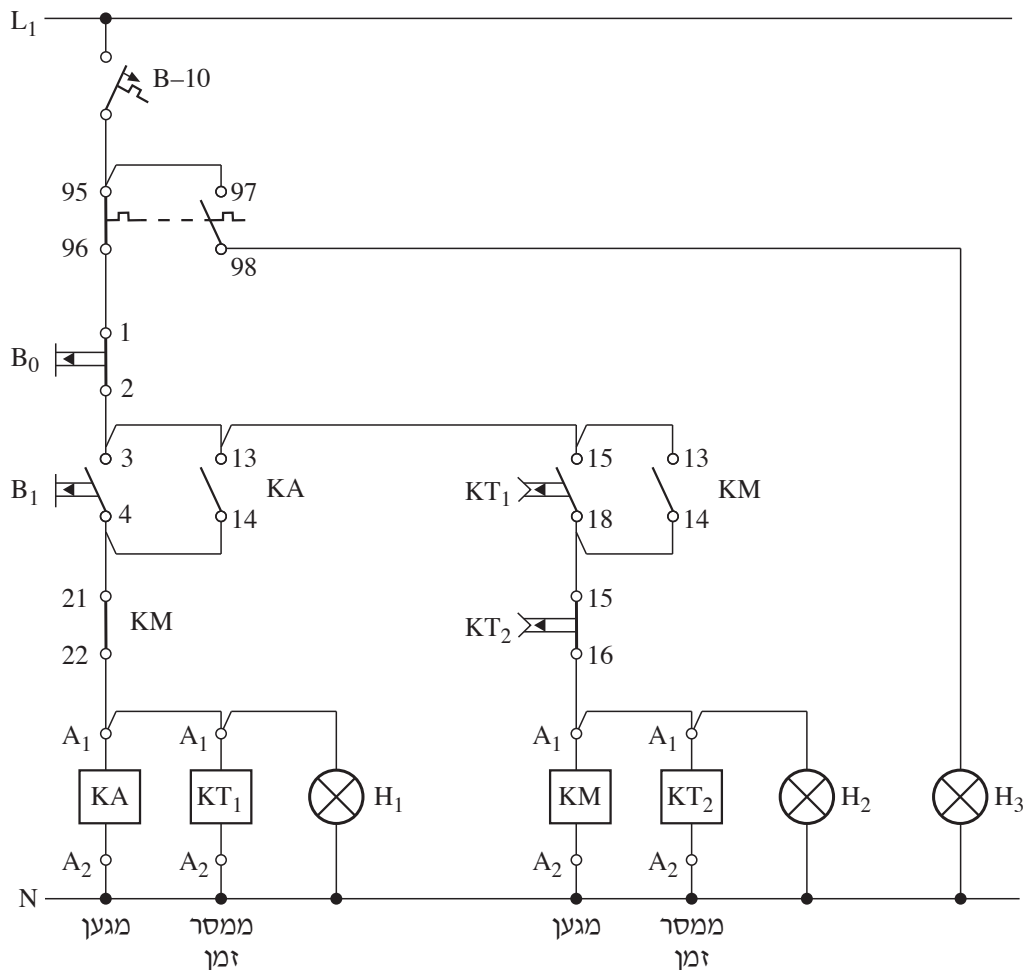
1. המערכת מופעלת באמצעות לחצן ההפעלה B_1 ונורית L_1 ("מערכת בפעולה") נדלקת.
2. השסתום (ברז חשמלי) V_1 נפתח למשך 30 שניות ומאפשר כניסת נוזל ממכל המילוי A למכל הערבול.
3. השסתום V_1 נסגר, מנוע הערבול מופעל, ושסתום V_2 נפתח למשך 40 שניות ומאפשר כניסת נוזל ממכל המילוי B למכל הערבול.
4. מנוע הערבול מפסיק את פעולתו לאחר 2 דקות מרגע הפעלתו.
5. לאחר שהמנוע הפסיק לעבוד, השסתום V_3 נפתח למשך 90 שניות והמכל מרוקן.
6. בסיום התהליך, נורית L_2 ("סיום תהליך") נדלקת.
המערכת מפסיקה לפעול, בכל זמן נתון:
 1. על־ידי לחיצה על הלחצן B_2 .
 2. כאשר יש תקלת עומס יתר (O.L.).
 3. כאשר גובה המפלס עלה ונורית חיווי L_3 ("גובה מפלס חריג") מופעלת.

(10 נק') א. הגדירו את המבואות ואת המוצאים של המערכת.

(15 נק') ב. תארו באמצעות דיאגרמת סולם את תוכנית הפיקוד להפעלת המערכת.

שאלה 9

באיור לשאלה 9 מתואר מעגל פיקוד להפעלת מנוע תלת-מופעי.

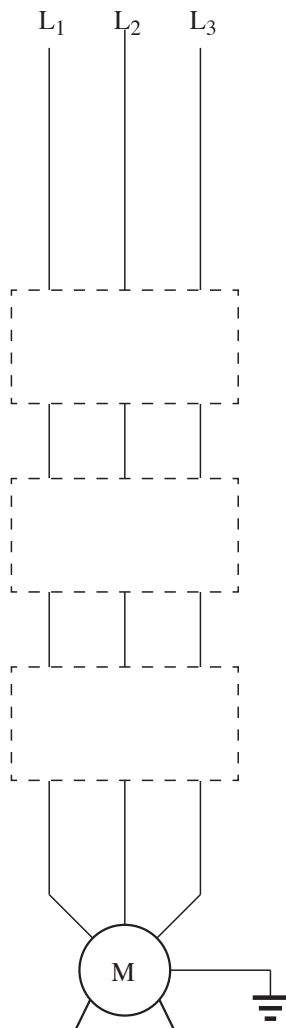


איור א' לשאלה 9

8 נק') א. הסבירו את התפקיד של כל אחד מן הרכיבים האלה: KA , KT_1 , KT_2 , KM .

10 נק') ב. הסבירו את תפקידו של המעגל המתואר באיור וכיצד הוא פועל.

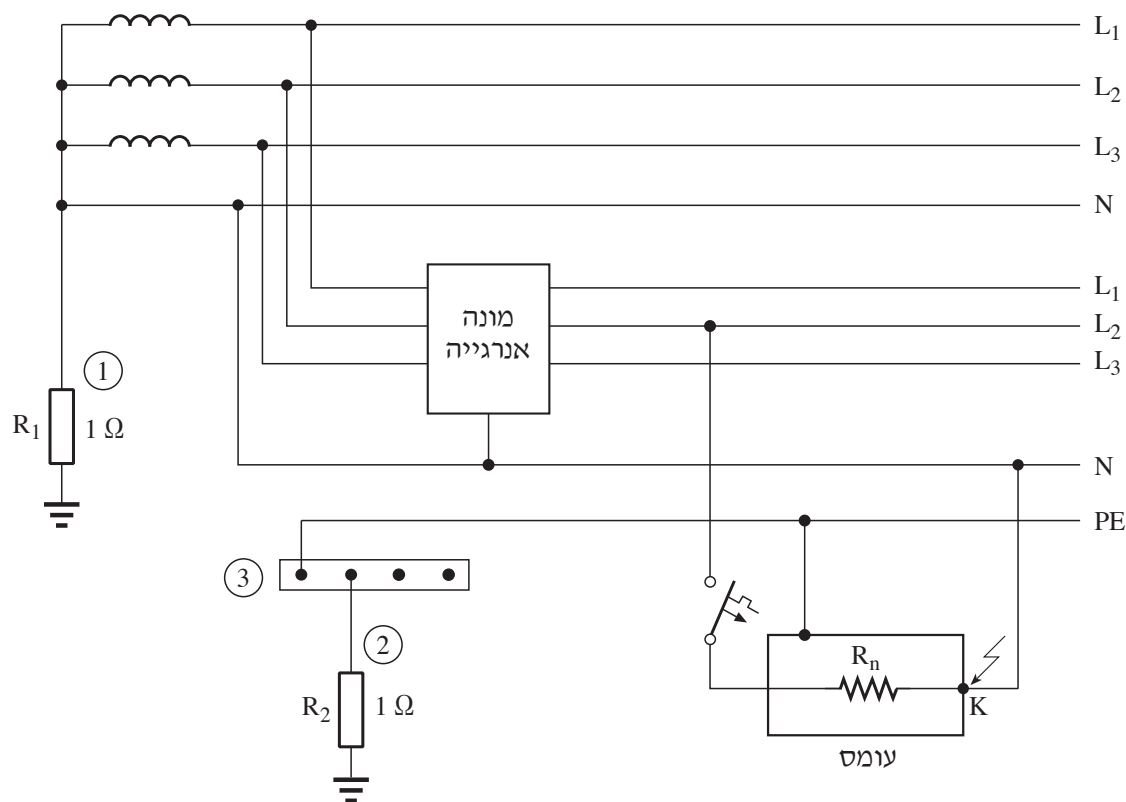
- ג. (7 נק') באיור ב' לשאלה 9 מתואר מעגל כוח של מנוע תלת-מופעי. העתיקו למחברת את האיור, והשלימו בו את הסרטוטים של הרכיבים החסרים.



איור ב' לשאלה 9

בהצלחה!

מקום למדידת נבחן



הערה: הדביקו את מדבקת הנבחן במקום המיועד לכך, והדקו אותו למחברת הבחינה.

נספח ב': מילון מונחים

לשאלון 733911, אביב תשפ"ב

תרגום המונח			המונח
אנגלית	רוסית	ערבית	
programmable controller	Программируемый контроллер	وحدة تحكم مُبرَمَجَة	בקר בר־תכנות
polar diagram	Векторная диаграмма	الرسم القطبي	דיאגרמה פולארית
ladder diagram	Лестничная диаграмма	مُخَطَّط السلم	דיאגרמת סולם
short circuit power	Мощность короткого замыкания	قدرة القصر	הספק קָצֵר
core losses	Потери в железе	خسائر الحديد	הפסדי ברזל
load losses	Потери в меди	خسائر النحاس	הפסדי נחושת
contactors	Контакты	مفاتيح التلامس	מגענים
nominal rotational speed	Номинальная скорость вращения	سرعة الدوران الاسميّة	מהירות־סיבוב נקובה
control system	Система управления	نظام التحكم	מערכת פיקוד
maximum voltage drop	Максимальное падение напряжения	هبوط الجهد الأقصى	מפל מתח מרבי
illuminance	Уровень освещённости	شدة الإضاءة	עוצמת הארה
three-phase short circuit	Трёх фазное короткое замыкание	قصر ثلاثي الأطوار	קצר תלת־מופע
uniform cross-sectional area	Однородное сечение	مساحة مقطع عرضي مُوَحَّد	שטח חתך אחיד
standard cross-sectional area	Стандартное сечение	مساحة مقطع عرضي معياري	שטח חתך תקני

אין להעביר את הנוסחאון
לנבחן אחר

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-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]

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

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

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

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

$$I_a = I \cos \varphi$$

$$I_r = I \sin \varphi$$

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

$$\bar{I} = I_a + jI_r = I / \varphi_k$$

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 [$m/\Omega mm^2$]
שטח חתך של המוליכים	-	A [mm^2]
הפסדי הספק מרביים	-	ΔP [W]
זרם ממשי בקטע k	-	I_a [A]
זרם היגבי בקטע k	-	I_r [A]

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

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

חומרים		
חומר	נחשת	
35	57	γ
2.7	8.9	g

2. התחממות של מוליכים וכבלים

- 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

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

$$I = c \cdot I_n$$

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

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

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

טמפרטורה אופפת של הסביבה: 35°C

2.1.1 מקדם תיקון עבור טמפרטורה אופפת שונה של הסביבה

טמפרטורה אופפת של הסביבה (°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-גזיזיים ללא רווח ביניהם

(1) התקנה בשכבה אחת:

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

(2) התקנה בשכבות אחדות או במקובץ:

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

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

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

טמפרטורה אופפת של האדמה: 30°C

2.2.1 מקדם תיקון עבור טמפרטורה אופפת שונה של האדמה

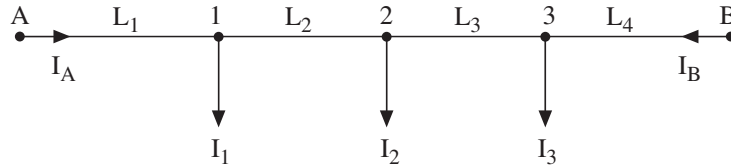
טמפרטורה אופפת של האדמה (°C)									
55	50	45	40	35	30	25	20	15	10
0.77	0.82	0.87	0.91	0.96	1.00	1.04	1.08	1.12	1.15

2.2.2 מקדם תיקון עבור התקנת כבלים אחדים באדמה

מספר המעגלים			מעגלים צמודים	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]	$M = \frac{\Delta U \cdot \gamma \cdot A}{2}$ זרם ישר או זרם חילופין חד-מופע:
הפרש המתחים בין שני מקורות המתח	-	ΔU [V]	
מוליכות סגולית	-	γ [m/Ωmm ²]	$M = \frac{\Delta U \cdot \gamma \cdot A}{\sqrt{3}}$ זרם חילופין תלת-מופע:
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_{c1}	[kVAr]
המתח על-פני הקבל הנדרש	-	U_c	[V]
התדר הזוויתי של הרשת	-	ω	[rad/sec]
תדר הרשת	-	f	[Hz]

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

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

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

$$\omega = 2 \pi f$$

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

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

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

5. זרמי הקצר

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

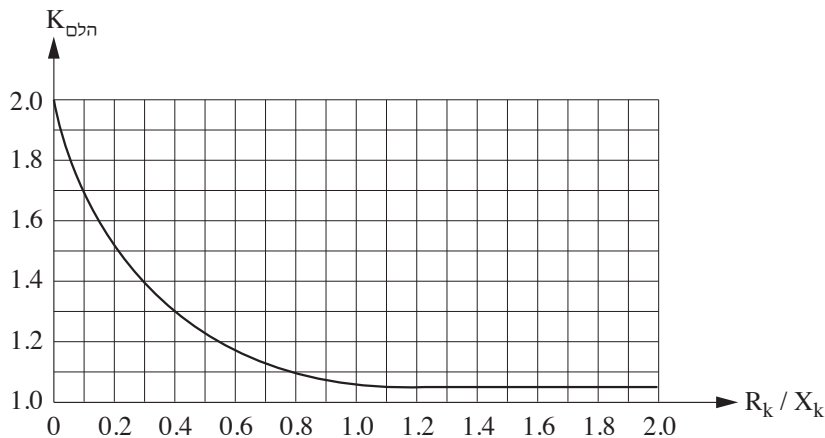
זרם קצר תלת־מופעי סימטרי	- I_k	[A]
עכבת מעגל הקצר (מהמקור למקום הקצר) למופע אחד	- Z	[Ω]
הספק מדומה של שנאי	- S_T	[VA]
הספק מדומה של גנרטור	- S_G	[VA]
היגב של גנרטור למופע אחד	- X_G	[Ω]
היגב מערכת אספקה במתח גבוה	- X_S	[Ω]
הספק הקצר של המערכת	- S_k	[VA]
התנגדות של שנאי למופע אחד	- R_T	[Ω]
היגב של שנאי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

5.1 נוסחאות לחישוב זרם קצר תלת-מופעי זרם הלם

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

5.2 ערכי מקדם ההלם

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



6. פסי הצבירה

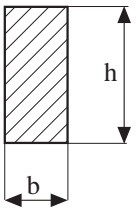
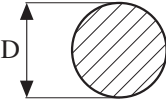
- הכוח הפועל על פס באורך 1m - F [kg/m]
 ערך השיא של זרם הקצר - $I_{\text{הלם}}$ [kA]
 המרחק בין המרכזים של פסי הצבירה - d [cm]
 מאמץ הכפיפה - σ [kg/cm²]
 הכוח הפועל על הפס בקטע בין שני מבדדים - P [kg]
 אורך הפס בין שני מבדדים - L [cm]
 מומנט ההתנגדות (מודול החתך) - W [cm³]
 מקדם האלסטיות - E [kg/cm²]
 מומנט ההתמדה (אינרציה) - J [cm⁴]
 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/cm³]

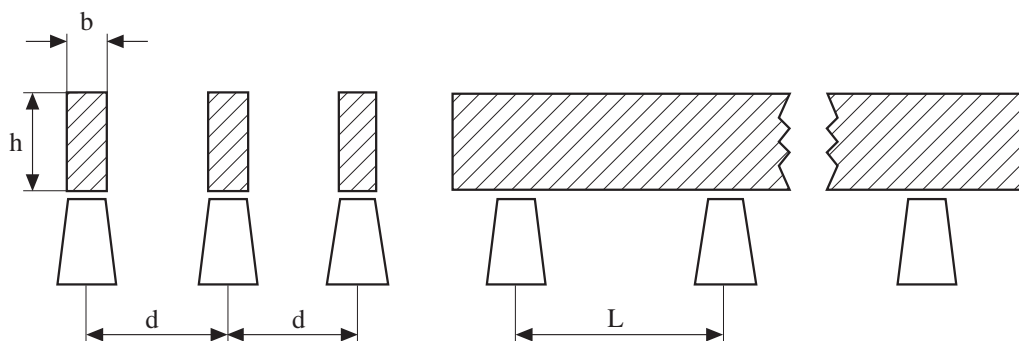
$$F = 1.76 \frac{I_{\text{הלם}}^2}{d}$$

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

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

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

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



נוסחאון במערכות הספק לכיתה י"ג

נספח לשאלון 733911, אביב תשפ"ב

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

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

נתונים של מוליכי 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		
X ₀ [Ω/km]														
[A]	[Ω/km]	[A]	[Ω/km]										[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	210
513	0.118	641	0.074	0.268	0.303	0.346	0.372	0.390	0.404	0.415	0.425	0.447	20.3	240
598	0.096	747	0.060	0.261	0.297	0.340	0.365	0.383	0.397	0.409	0.418	0.441	22.5	300

צפיפות הזרם החד-שנייתית ב-[A/mm²]

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

7. הגנה נגד התחשמלות בשיטת האיפוס

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

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

זרם 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

8. תאורה

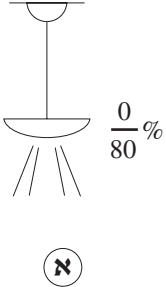
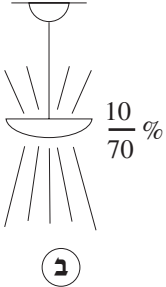
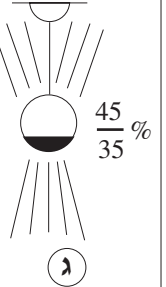
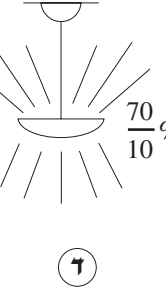
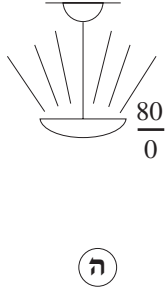
שטף אור ונצילות של מקורות אור שונים

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

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

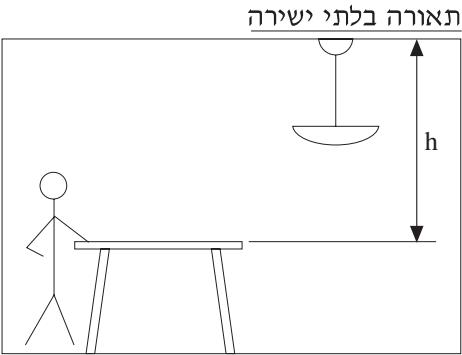
2. הנצילות מחושבת גם על-פי ההפסדים בצידוד העזר.

חישוב תאורה כללית

 א	 ב	 ג	 ד	 ה
תאורה ישירה	תאורה כמעט ישירה	תאורה שווה	תאורה בלתי ישירה ברובה	תאורה בלתי ישירה



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



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

מקדם האולם - R_K

רוחב האולם - a [m]

אורך האולם - b [m]

המרחק האנכי בין התקרה ומשטח העבודה - h [m]

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

שטף האור הנדרש - ϕ [lm]

עוצמת המאור הנדרשת - E [lx]

שטח האולם - A [m²]

מקדם ההפחתה - k

נצילות התאורה - η [%]

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

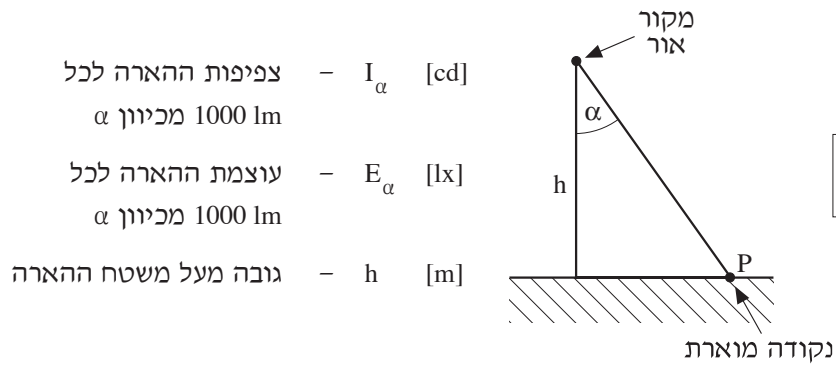
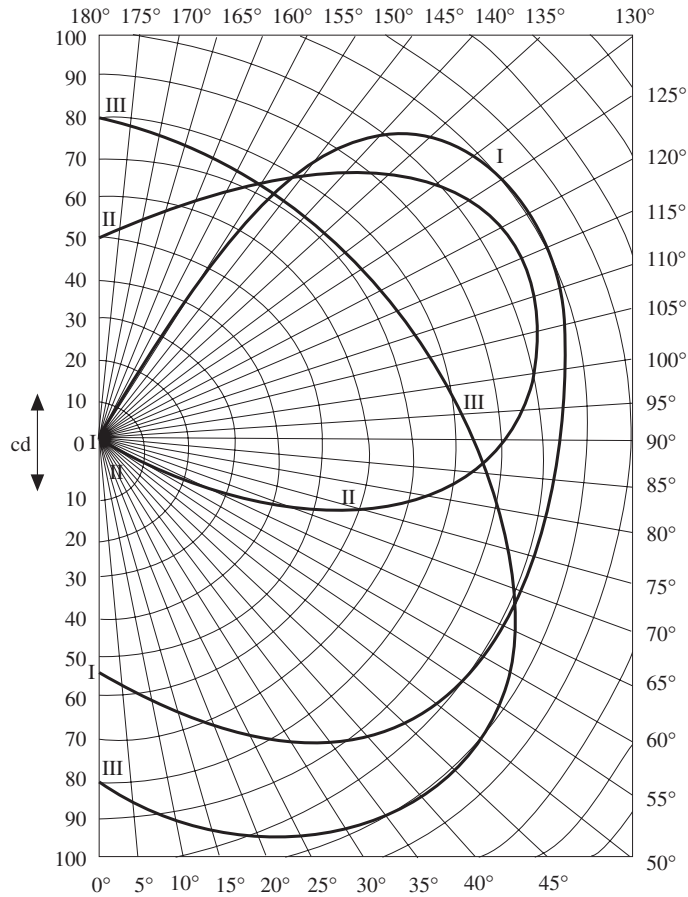
מקדמי הפחתה k

סוג גופי התאורה		סוג התאורה		תאורת ליבון		תאורת כספית		תאורה פלורסנטית	
		מצב האבק		מועט	מרובה	מועט	מרובה	מועט	מרובה
גופים לתאורה ישירה גופים לתאורה שווה גופים לתאורה בלתי ישירה				0.85	0.6	0.8	0.6	0.75	0.55
				0.75	0.4	0.7	0.4	0.7	0.37
				0.7	0.35	0.65	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					17	21	24	17	21	21	17	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	34	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					7	8	9	7	8	9	7	8
	0.8					9	10	11	9	10	11	9	10
	1.0					11	12	13	11	12	13	11	12
	1.5					14	15	16	14	15	17	14	15
	2.0					15	17	19	15	17	20	15	17
	3.0					19	20	21	19	20	24	19	20
	5.0					22	23	24	22	23	27	22	23
ה	0.6					3	4	5	3	4	5	3	4
	0.8					4	6	7	4	6	9	4	6
	1.0					5	7	10	5	7	12	5	7
	1.5					8	9	14	8	9	16	8	9
	2.0					10	11	17	10	11	19	10	11
	3.0					12	13	21	12	13	24	12	13
	5.0					15	16	25	15	16	27	15	16

דיאגרמה פולארית של מקור אור בעל שטף של 1000 lm



אין להעביר את הנוסחאון
לנבחן אחר

נוסחאון במכונות חשמל והינע לכיתה י"ג

(22 עמודים)

1. מבוא למערכות תלת-מופעיות

כוכב סימטרי

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

$$I_L = I_{ph}$$

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

משולש סימטרי

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

הספק תלת-מופע

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

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

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

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

חישוב זרמים:

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

2. שנאים

2.1 מתח מושרה בסליל

- E_1 [V] כא"מ מושרה בסליל הראשוני
- E_2 [V] כא"מ מושרה בסליל השניוני
- $\Phi_{\max}$ [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

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

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

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

שנאי חד-מופעי:

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

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

2.2 ניסוי קצר

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

2.3 פעולת השנאי בקצר ובריקם

שנאי חד-מופעי בקצר: שנאי תלת-מופעי בקצר:

	$Z_k = \frac{U_{kph}}{I_{kph}}$	$z_k = \frac{U_k}{I_k}$
הספק הקצר – P_k [W]		$P_k = 3 \cdot I_{kph}^2 \cdot R_k$
זרם הקצר – I_k [A]		$P_k = I_k^2 \cdot R_k$
התנגדות הקצר – R_k [Ω]	$P_k = \sqrt{3} \cdot U_k I_k \cos \varphi_k$	$P_k = U_k I_k \cos \varphi_k$
היגב הקצר – X_k [Ω]	$\Delta U_{R\%} = \frac{I_{nph} \cdot R_k}{U_{nph}} \cdot 100$	$\Delta U_{R\%} = \frac{I_n R_k}{U_n} \cdot 100$
עכבת הקצר – Z_k [Ω]	$\Delta U_{X\%} = \frac{I_{nph} \cdot X_k}{U_{nph}} \cdot 100$	$\Delta U_{X\%} = \frac{I_n X_k}{U_n} \cdot 100$
מפל מתח היגבי / התנגדויות באחוזים – $\Delta U_{R\%} / \Delta U_{X\%}$		

שנאי חד-מופעי בריקם: שנאי תלת-מופעי בריקם:

	$I_{o\%} = \frac{I_{oph}}{I_{nph}} \cdot 100 = \frac{I_o}{I_n} \cdot 100$	$I_{o\%} = \frac{I_o}{I_n} \cdot 100$
זרם ריקם באחוזים – $I_{o\%}$	$I_{Feph} = \frac{P_o}{3 \cdot U_{nph}}$	$I_{Fe} = \frac{P_o}{U_n}$
זרם ריקם – I_o [A]	$I_{\mu ph} = \sqrt{I_{oph}^2 - I_{Feph}^2}$	$I_{\mu} = \sqrt{I_o^2 - I_{Fe}^2}$
זרם הפסדי ברזל – I_{Fe} [A]	$R_{Fe} = \frac{U_{nph}}{I_{Feph}}$	$R_{Fe} = \frac{U_n}{I_{Fe}}$
זרם המגנוט – I_{μ} [A]	$X_{\mu} = \frac{U_{nph}}{I_{\mu ph}}$	$X_{\mu} = \frac{U_n}{I_{\mu}}$
התנגדות מותאמת להפסדי ברזל – R_{Fe} [Ω]	$P_o = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_o \cdot \cos \varphi_o$	$P_o = U_n \cdot I_o \cdot \cos \varphi_o$
היגב המגנוט – X_{μ} [Ω]		
הספק בריקם – P_o [W]		

2.4 מפלי מתח ומתחי עבודה

מפל מתח באחוזים	-	$\Delta U_{\%}$	$\beta = \frac{S}{S_n}$
מפל מתח התנגדותי באחוזים	-	$\Delta U_{R\%}$	
מפל מתח היגבי באחוזים	-	$\Delta U_{X\%}$	$\Delta U_{\%} = \beta (\Delta U_{R\%} \cos \varphi_2 \pm \Delta U_{X\%} \sin \varphi_2)$
גורם הספק של העומס	-	$\cos \varphi_2$	
מקדם העמסה של השנאי	-	β	$\Delta U_{R\%} = \frac{\Delta P_{Cu_n}}{S_n} \cdot 100$
הספק מדומה של העומס	-	S_2 [VA]	
הספק נקוב של השנאי	-	S_n [VA]	$\Delta U_{X\%} = \sqrt{(U_{k\%})^2 - (\Delta U_{R\%})^2}$
מתח שניוני נקוב	-	U_{2n} [V]	
מתח שניוני	-	U_2 [V]	$U_2 = U_{2n} \left(1 - \frac{\Delta U_{\%}}{100} \right)$
מתח ראשוני נקוב	-	U_{1n} [V]	
מתח ראשוני	-	U_1 [V]	$U_1 = U_{1n} \left(1 + \frac{\Delta U_{\%}}{100} \right)$
נצילות השנאי	-	η	
גורם העמסה המותאם לנצילות מרבית	-	$\beta_{\eta_{\max}}$	2.5 נצילות השנאי
הפסדי ברזל	-	ΔP_{Fe} [W]	$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe}}$
הפסדי נחושת נקובים	-	ΔP_{Cu_n} [W]	$\eta = \frac{\beta \cdot S_n \cos \varphi_2}{\beta S_n \cos \varphi_2 + \beta^2 \Delta P_{Cu_n} + \Delta P_{Fe}}$

התנאי לקבלת נצילות מרבית:

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

2.6 עבודת שנאים במקביל

בהפעלת שני שנאים במקביל:

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

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

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

בהפעלת מספר שנאים במקביל:

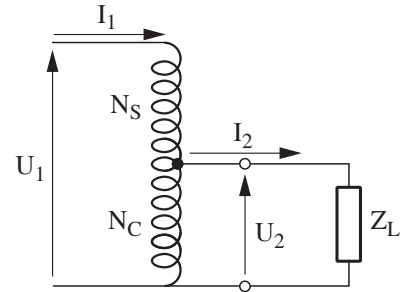
$$S_m = \frac{S_T}{\sum_{i=1}^n \frac{S_{n_i}}{U_{k\%_i}}} \cdot \frac{S_{n_m}}{U_{k\%_m}}$$

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

- 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

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
- $\Phi_{\max}$ [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



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

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

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

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

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

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

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

$$I_C \approx I_2 - I_1$$

3. מכונה לזרם ישר

3.1 כוח אלקטרו-מניע

כא"מ מושרה ברוטור	-	E	[V]
מספר מוליכים ברוטור	-	Z	
מספר זוגות קטבים	-	p	
מהירות סיבוב	-	n	[r.p.m]
מספר זוגות ענפים מקבילים ברוטור	-	a	
שטף	-	Φ	[Wb]
מקדם הכא"מ	-	K_e	

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

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

במחולל לזרם ישר:

כוח אלקטרו-מניע (כא"מ)	-	E	[V]	$E = U + I_a \cdot R_a + \Delta U_b$ (עירור מקבילי)
המתח בין הדקי המחולל / המתח המסופק למנוע	-	U	[V]	
התנגדות העוון	-	R_a	[Ω]	$E = U + I \cdot R_a + \Delta U_b$ (עירור זר)
התנגדות סליל העירור הטורי	-	R_{es}	[Ω]	$E = U + I(R_a + R_{es}) - \Delta U_b$ (עירור טורי)

במנוע לזרם ישר:

מפל המתח על המברשות	-	ΔU_b	[V]	
הזרם בעוון	-	I_a	[A]	$E = U - I_a \cdot R_a - \Delta U_b$ (עירור מקבילי)
זרם הצרכן במחולל / זרם המקור במנוע	-	I	[A]	$E = U - I \cdot R_a - \Delta U_b$ (עירור זר)
				$E = U - I(R_a + R_{es}) - \Delta U_b$ (עירור טורי)

3.2 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

3.3 זרמים במנוע

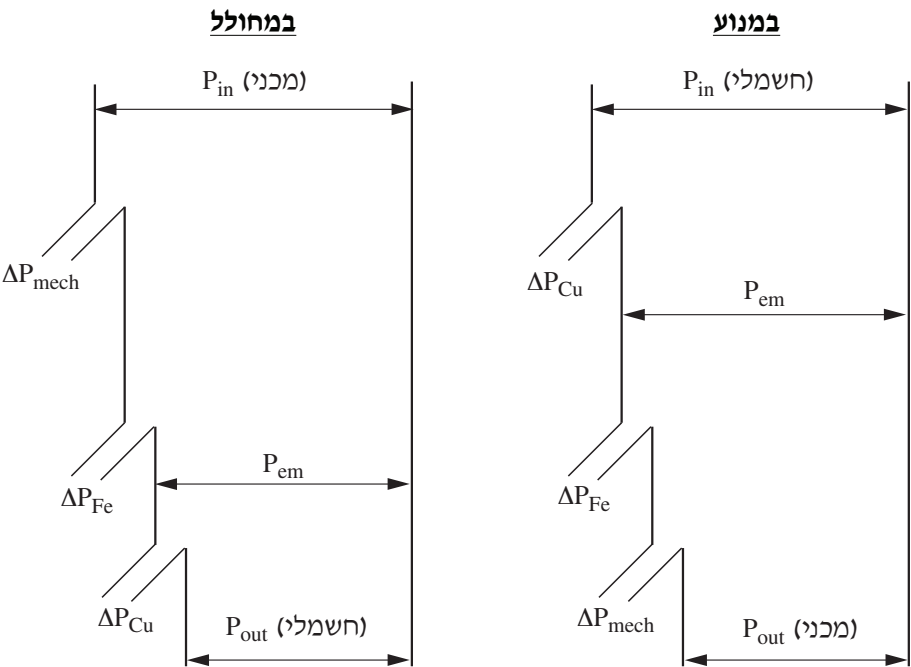
הזרם הנצרך על-ידי המנוע - I [A]
 הזרם בעוגן (ברוטור) - I_a [A]
 הזרם בסליל העירור - I_e [A]
 מתח העירור - U_e [V]
 התנגדות סליל העירור - R_e [Ω]
 זרם ההתנעה בעוגן - I_{a_{st}} [A]
 התנגדות המתנע - R_{st} [Ω]

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

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

3.4 הספקים והפסדי הספק

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



3.5 מומנטים

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

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

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

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

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

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

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

3.6 מהירות במנוע

א. במנוע לזרם ישר בעירור מקבילי

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

ב. במנוע לזרם ישר בעירור טורי

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

3.7 תכנון מתנע דרגתי למנוע לזרם ישר בעירור מקבילי

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

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

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

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

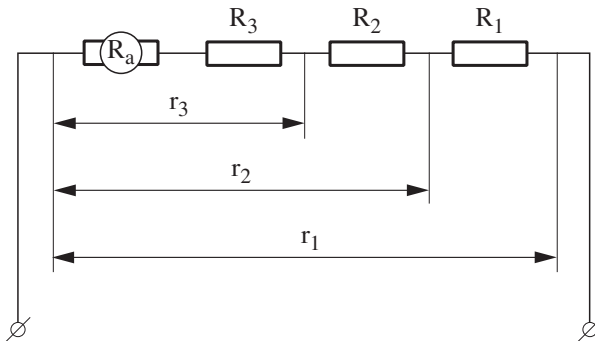
$$r_n = \frac{r_1}{\lambda^{n-1}}$$

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

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

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

מתנע בעל שלוש דרגות



4. מנוע השראתי תלת-מופעי

4.1 חישוב זרמים

(בהזנחת זרם ריקם)

זרם נקוב קווי	-	I_{n1} [A]
הספק נקוב המופק על-ידי המנוע	-	P_n [W]
גורם הספק	-	$\cos \varphi$
נצילות	-	η
זרם מופעי בסטטור	-	I_{ph1} [A]
זרם מופעי ברוטור, המשוקף לסטטור	-	I_{ph2} [A]
התנגדות סליל אחד בסטטור	-	R_1 [Ω]
התנגדות סליל אחד בעוגן	-	R_2 [Ω]
התנגדות סליל העוגן המשוקף לסטטור	-	R'_2 [Ω]
היגב מופעי ברוטור ניח	-	$X_{2(0)}$ [Ω]
ההיגב הכולל של המנוע	-	X_T [Ω]
יחס תמסורת בין ערכים מופעיים	-	a_{ph}
מספר כריכות בסליל	-	N
מקדם ליפוף של הסליל	-	K_N
גורם החליקה	-	s
כא"מ מופעי מושרה ברוטור ניח ופתוח	-	$E_{ph2(0)}$ [V]

$$I_{n1} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi \cdot \eta}$$

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

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

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

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

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

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

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

4.2 חישוב פאזורי של זרמים

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

$$\vec{I}'_{ph2} = \frac{\vec{U}_{ph1}}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right) + jX_T}$$

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] -

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

4.4 מהירות וגורם החליקה

- מהירות סינכרונית n_s [r.p.m] -
- תדירות הרשת f_1 [Hz] -
- מס' זוגות קטבים p -
- תדירות הזרם ברוטור f_2 [Hz] -
- גורם החליקה s -
- מהירות קריטית n_k [r.p.m] -
- היחס בין המומנט המרבי למומנט הנקוב של המנוע λ_{max} -
- מומנט מרבי (קריטי) M_k [N · m] -
- מומנט נקוב M_n [N · m] -
- גורם החליקה במומנט קריטי s_k -
- גורם החליקה במומנט נקוב s_n -

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

$$f_2 = f_1 \cdot s$$

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

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

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

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

4.5 הספקים ואיבודי הספק

הספק (ממשי) מושקע	-	P_{in}	[W]
הספק המופק על-ידי המנוע	-	P_n	[W]
הספק אלקטרומגנטי	-	P_{em}	[W]
הספק מכני	-	P_{mech}	[W]
איבודי נחושת בסטטור	-	ΔP_{Cu1}	[W]
איבודי נחושת ברוטור	-	ΔP_{Cu2}	[W]
איבודי ברזל בסטטור	-	ΔP_{Fe}	[W]
איבודי חיכוך ואווור	-	ΔP_{mech}	[W]
איבודים נוספים	-	ΔP_{add}	[W]
הספק המנוע בריקם	-	P_o	[W]
גורם החליקה	-	s	

$$\Delta P_{Cu1} = 3 \cdot I_{ph1}^2 \cdot R_1$$

$$\Delta P_{Cu2} = 3 \cdot I_{ph2}^2 \cdot R_2 = 3 \cdot I_{ph1}^2 \cdot R_2' \cdot s$$

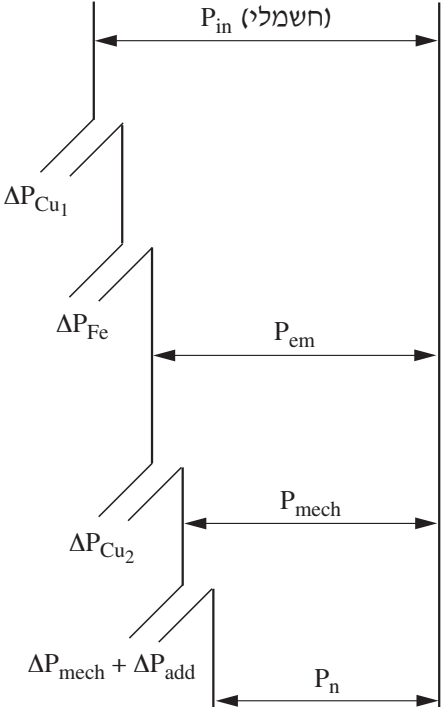
$$\Delta P_{Cu2} = P_{em} \cdot s = P_{mech} \cdot \left(\frac{s}{1-s} \right)$$

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

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

$$\Delta P_{סטטור} \cong \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Fe}$$

$$\Delta P_{רוטור} \cong \Delta P_{Cu2} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{add}$$



4.6 מומנטים

המהירות הזוויתית של הרוטור	-	ω_n	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$
מהירות סיבוב נומינלית	-	n_n	[r.p.m]
המהירות הזוויתית של השדה המסתובב	-	ω_s	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$
מהירות סיבוב (סנכרונית) של השדה	-	n_s	[r.p.m]
הספק נקוב המופק על-ידי המנוע	-	P_n	[W]
הספק אלקטרומגנטי	-	P_{em}	[W]
מומנט אלקטרומגנטי בהתנעה	-	$M_{em_{start}}$	[N · m]
מומנט אלקטרומגנטי	-	M_{em}	[N · m]
מומנט מרבי (קריטי)	-	M_k	[N · m]
גורם החליקה	-	s	
גורם החליקה במומנט קריטי	-	s_k	

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

4.7 נגד נוסף במעגל 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 $[\Omega]$ התנגדות נגד טורי נוסף לסליל הרוטור
- R_2 $[\Omega]$ התנגדות סליל הרוטור
- s_n חליקה נקובה
- s_x חליקה מותאמת למהירות n_x

4.8 תכנון מתנע הדרגתי למנוע השראתי בעל רוטור מלופף

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

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

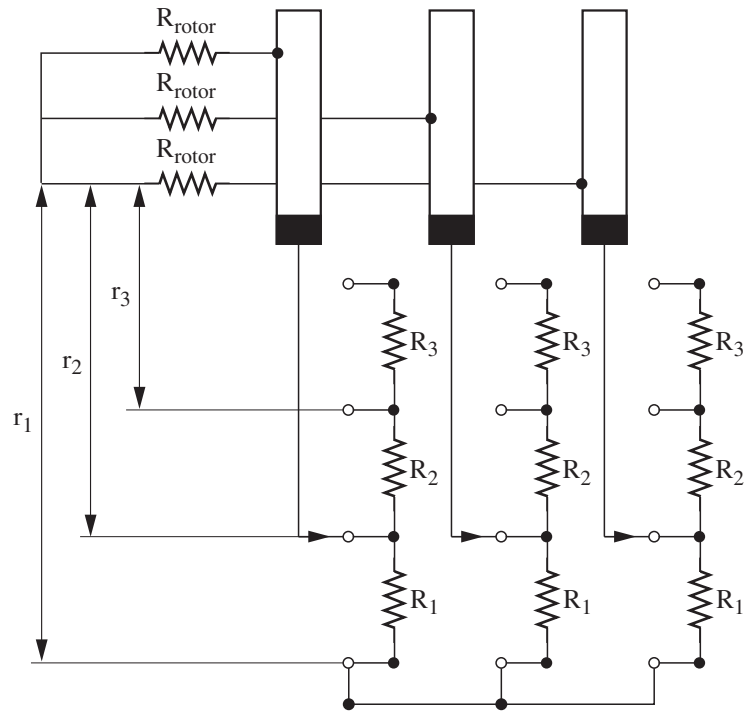
$$m = \frac{\ln \frac{r_1}{R_2}}{\ln \lambda}$$

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

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

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

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



5. כוחות ומומנטים במערכות הינע

5.1 תנועה קווית

כוח מניע – F [N]

כוח דינמי – F_d [N]

כוח נגדי – F_s [N]

מסת הגוף – m [kgf · sec² / m] , [kg]

מהירות – v [m / sec]

תאוצה – a [m / sec²]

$$F = F_s + F_d$$

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

5.2 תנועה סיבובית

מומנט סיבובי – M [N · m]

מומנט סטטי (נגדי) – M_s [N · m]

מומנט דינמי – M_d [N · m]

מומנט התמדה (אינרציה) – J [kgf · m · sec²]

תאוצה זוויתית – $\frac{d\omega}{dt} \left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}^2} \right]$

מומנט תנופה – GD² [kgf · m²]

מהירות סיבוב – n [r.p.m]

$$M = M_s + M_d$$

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

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

$$GD^2 = 4gJ$$

6. העברת מומנטים

תנועה סיבובית

העברת מומנט סטטי:

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

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

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

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

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

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 – $n_i \text{ [r.p.m]}$

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

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

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

העברת מסות ומומנטים מתנועה קווית לתנועה סיבובית

העברת כוח סטטי למומנט סיבובי על ציר המנוע:

המומנט הסטטי המועבר לציר המנוע	-	M_s [N · m]	$M_s = 9.55 \frac{F_{sm} \cdot v}{n \cdot \eta}$
הכוח הנגדי של העומס (או של המטען)	-	F_{sm} [N]	
המהירות הקווית של המטען	-	v [m / sec]	$v = \frac{\pi D n}{60}$
מהירות הסיבוב של ציר המנוע	-	n [r.p.m]	
נצילות התמסורת	-	η	
קוטר התוף	-	D [m]	

העברת מסות למומנט תנופה:

משקל הגוף	-	G [kgf]	$GD^2 = 365 \cdot G \cdot \left(\frac{v}{n}\right)^2$
-----------	---	-----------	---

זמן התנעה וזמן עצירה

(בהנחה שהמומנט הדינמי ו- GD^2 קבועים)

מומנט תנופה	-	GD^2 [kgf · m ²]	$t = \frac{GD^2}{38.2} \frac{n_2 - n_1}{M - M_s}$	בהתנעה:
מהירות סיבוב התחלתית	-	n_1 [r.p.m]		
מהירות סיבוב סופית	-	n_2 [r.p.m]	$t = \frac{GD^2}{38.2} \frac{n_1 - n_2}{M + M_s}$	בבלימה:
מומנט סיבובי	-	M [N · m]		
מומנט סטטי (נגדי)	-	M_s [N · m]		