

מערכות הספק ומכונות חשמל והינע ט'

למתמחים במערכות הספק, פיקוד ובקרה במגמת הנדסת חשמל, בקרה ואנרגיה

(כיתה י"ג)

הוראות לנבחנים

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. כל חומר הכתוב (בכתב-יד או בהדפסה) על שלושה דפי A4, הכתובים משני הצדדים.

2. מחשבון.

3. "חוק ותקנות בנושא חשמל".

ד. הוראות מיוחדות:

- ענו על מספר השאלות הנדרש בשאלון. המעריך יקרא ויעריך את מספר התשובות הנדרש בלבד, לפי סדר כתיבתן במחברת, ולא יתייחס לתשובות נוספות.
- התחילו כל תשובה לשאלה חדשה בעמוד חדש.
- כתבו את כל התשובות אך ורק בעט.
- הקפידו לנסח את התשובות כהלכה ולסרטט את התרשימים בבהירות.
- כתבו את התשובות בכתב-יד ברור, כדי לאפשר הערכה נאותה שלהן.
- בכל שאלה ניתנו הנתונים לפתרונה. אם לדעתכם חסר נתון, הוסיפו אותו על-פי שיקול דעתכם ופתרו בעזרתו את השאלה. כתבו בתשובה את הנתון שהוספתם.
- בכתיבת פתרונות חישוביים, קבלת מֶרֶב הנקודות מותנית בהשלמת כל המהלכים שלהן, 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 ג' 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 דפי ה-A4 למחברת הבחינה.

כתבו במחברת הבחינה בלבד, בעמודים נפרדים, כל מה שברצונכם לכתוב כטייטה (ראשי פרקים, חישובים וכדומה).

כתבו "טייטה" בראש כל עמוד טייטה. כתיבת טייטות כלשהן על דפים שמחוץ למחברת הבחינה עלולה לגרום לפסילת הבחינה!

בשאלון זה 9 עמודים ו-27 עמודי נספחים.

השאלות בשאלון זה מנוסחות בלשון רבים,
אף על פי כן על כל תלמידה וכל תלמיד להשיב עליהן באופן אישי.

בהצלחה!

המשך מעבר לדף

השאלות

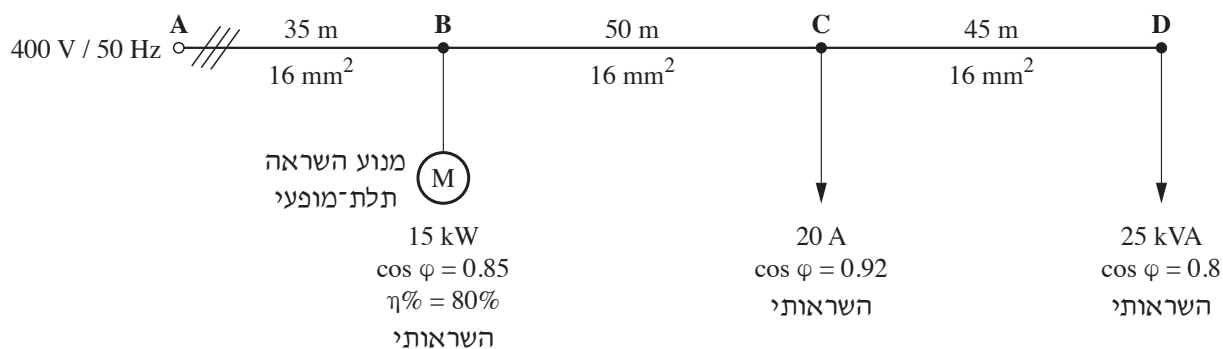
ענו על ארבע מבין השאלות 1–9. עליכם לענות על שאלה אחת לפחות מן הפרק הראשון, ועל שאלה אחת לפחות מן הפרק השני.

פרק ראשון: מערכות הספק א'

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

שאלה 1

באיור לשאלה 1 מתוארת רשת תלת-מופעית $400\text{ V} / 50\text{ Hz}$ המוזנת בנקודה A. מוליכי הרשת עשויים מנחושת $\gamma = 57 \left[\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} \right]$. ההיגב ההשראותי ליחידת אורך זניח. שטח החתך של המוליכים אחיד וערכו 16 mm^2 .
הערה: זרמי הצרכנים יחושבו לפי מתח נקוב של 400 V .



איור לשאלה 1

א. (9 נק') חשבו את הזרם הזורם בכל אחד מקטעי הרשת. כתבו את התשובה בהצגה מרוכבת.

ב. (8 נק')

1. (4 נק') חשבו את מקדם ההספק של הרשת.

2. (4 נק') חשבו את ההספק, P , המסופק לרשת.

ג. (8 נק') חשבו את המתח המזערי ברשת.

שאלה 2

לוח חשמל ראשי במפעל מוזן מרשת תלת-מופעית במתח של 400 V / 50 Hz . אל לוח החשמל הראשי של המפעל מחוברים הצרכנים המפורטים בטבלה שלפניכם:

שם הצרכן	מספר יחידות	הספק נקוב ליחידה [kW]	מקדם הספק [cosφ]	נצילות [η]
מנוע M_A	10	5	0.82	0.8
מנוע M_B	5	8	0.85	0.78
תנור	3	10	1	–

א. (7 נק') חשבו את ההספק הממשי, P, את ההספק העיוור, Q, ואת ההספק המדומה, S, של המפעל.

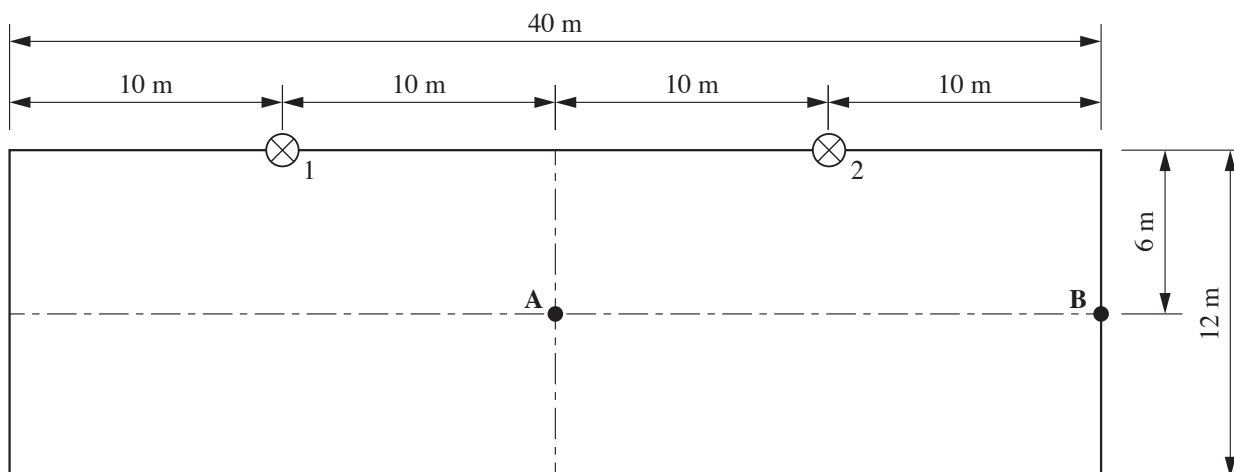
ב. (6 נק') חשבו את מקדם ההספק של לוח החשמל.

ג. (6 נק') חשבו את הזרם הכללי בכניסה ללוח החשמל של המפעל.

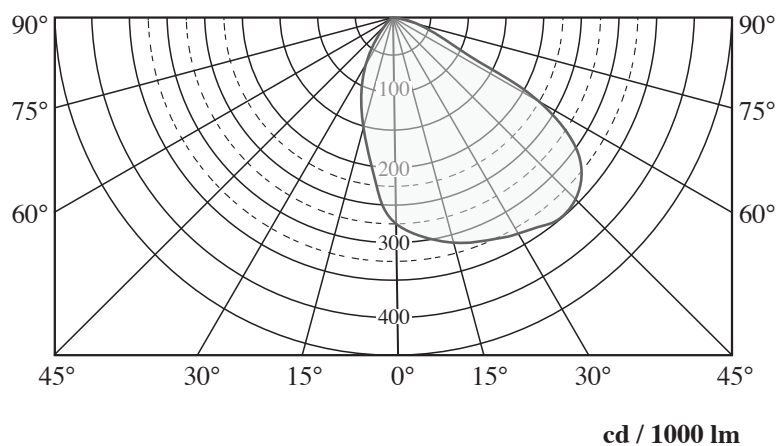
ד. (6 נק') חשבו את הספק סוללת הקבלים הנדרשת כדי לשפר את מקדם ההספק ל-0.92 .

שאלה 3

באיור א' לשאלה 3 מתואר מגרש חניה שממדיו $40 \text{ m} \times 12 \text{ m}$, המואר באמצעות שני עמודי תאורה זהים שגובהם 8 m ומיקומם מסומן ב-⊗. על כל עמוד מותקן גוף תאורה הכולל נורת LED. לכל גוף תאורה הספק של 120 W ושטף אור של $16,000 \text{ lm}$. גוף התאורה מותקן כך שבמישור האופקי הוא מאיר באופן אחיד את שטח המגרש. העקומה הפולרית של כל גוף תאורה מתוארת באיור ב' לשאלה ב' נתונה ביחידות $\text{cd}/1000 \text{ lm}$.



איור א' לשאלה 3

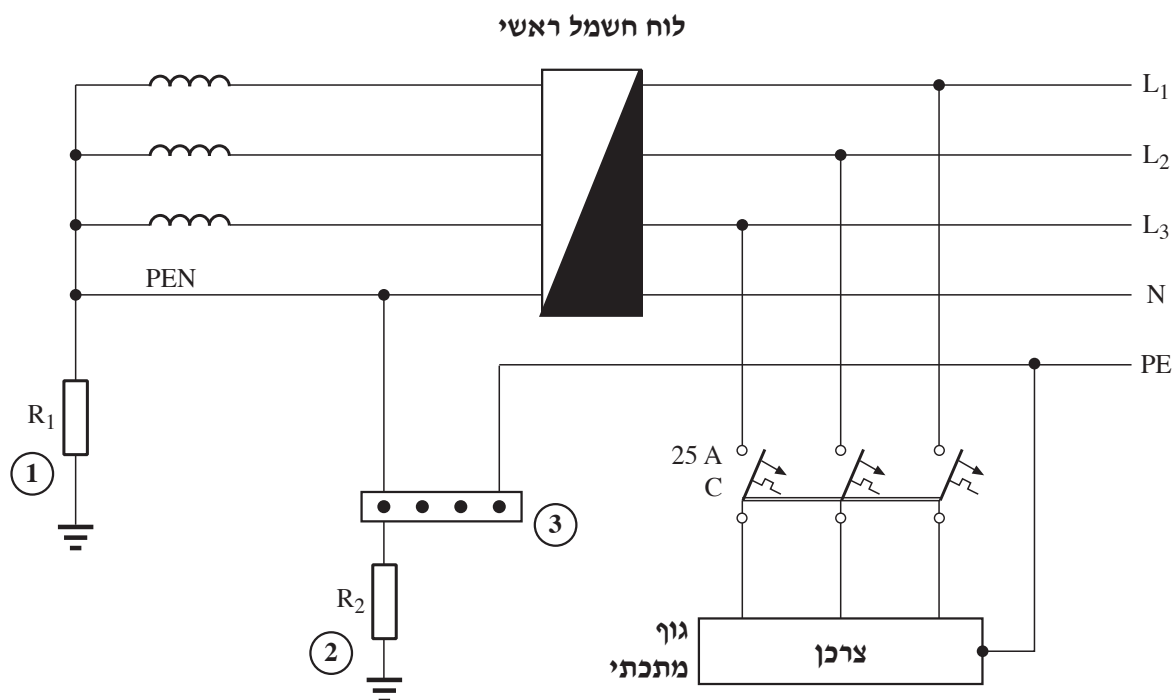


איור ב' לשאלה 3

- א. (8 נק') חשבו את עוצמת ההארה מתחת לעמוד תאורה 1. הזניחו את השפעת עמוד תאורה 2.
- ב. (10 נק') חשבו את עוצמת ההארה בנקודה A ואת עוצמת ההארה בנקודה B.
- ג. (7 נק') משנים את גובה עמודי התאורה ל- 6 m . באיזה גובה של עמודים, 6 m או 8 m , תהיה עוצמת ההארה בנקודה A גבוהה יותר?

שאלה 4

באיור לשאלה 4 נתון תרשים חשמלי של מתקן המוזן במתח של 400 V / 50 Hz על ידי כבלי נחושת ברשת תת קרקעית. אל המתקן מחובר צרכן תלת-מופעי שמוזן מהלוח הראשי ומוגן על ידי מבטח.



איור לשאלה 4

(12 נק') א.

1. ציינו את שמות הרכיבים שמסומנים בספרות 1-3, והסבירו את תפקידם. (6 נק')
 2. קבעו על פי חוק החשמל מהי ההתנגדות בין האלקטרודה לבין המסה הכללית של האדמה (6 נק').
- בכל אחת מן הנקודות 1 ו-2.

(13 נק') ב.

מהי שיטת ההגנה בפני חשמול של מתקן זה, ומהו שטח החתך המזערי של מוליך PEN ברשת מסוג זה, אם ידוע ששטח החתך של מוליך מופע הוא $A = 10 \text{ mm}^2$? בתשובה התבססו על "חוק ותקנות בנושא חשמל" והפנו אל התקנה.

פרק שני: המרת אנרגייה א'

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

שאלה 5

להלן נתוניו הנקובים של שנאי תלת־מופעי:

$$S_n = 400 \text{ kVA} ; U_{1n} = 22 \text{ kV} ; U_{2n} = 400 \text{ V} ; D/y - 11$$

$$R_1 = R_2' = 21.2 \Omega ; X_1 = X_2' = 77 \Omega ; R_{Fe} = 2251.8 \text{ k}\Omega ; X_\mu = 305.13 \text{ k}\Omega$$

השנאי פועל במתח נקוב, והזרם הזורם בקו הזינה שלו הוא 7.875 A .

10 נק') א.

1. חשבו את הפסדי הנחושת הנקובים. (5 נק')

2. חשבו את הפסדי הברזל הנקובים. (5 נק')

8 נק') ב. חשבו את מתח המוצא השלוב בהדקי השנאי, כאשר מקדם ההספק של העומס הוא $\cos \varphi = 0.85$ השראות.

7 נק') ג. חשבו את נצילות השנאי בהתאם לתנאים של סעיף ב'.

שאלה 6

להלן נתוניו הנקובים של מנוע לזרם ישר בעירור מקבילי:

$$P_n = 8 \text{ kW} ; U_n = 240 \text{ V} ; R_a = 0.3 \Omega ; R_e = 120 \Omega ; n_n = 1,150 \text{ rpm} ; \eta_n = 0.86 ; \Delta P_{Fe} = 200 \text{ W}$$

המנוע פועל בתחום הליניארי של עקום המגנט. ניתן להזניח את תגובת העוגן ואת מפל המתח על הפחמים.

10 נק') א.

1. חשבו את ההספק האלקטרומגנטי הנקוב שמועבר לרוטור. (5 נק')

2. חשבו את הפסדי הנחושת הנקובים ברוטור ובסטטור. (5 נק')

15 נק') ב. המנוע מועמס ב־80% מהמומנט הנקוב.

8 נק') 1. חשבו את זרם העוגן.

7 נק') 2. חשבו את מהירות הסיבוב של המנוע.

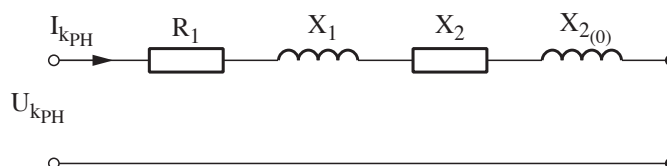
שאלה 7

להלן נתונים הנקובים של מנוע השראה תלת-מופעי, בעל רוטור כלוב, אשר סלילי הסטטור שלו מחוברים בחיבור כוכב:

$$U_n = 400 \text{ V} ; f = 50 \text{ Hz} ; P = 1 ; s_n = 0.02 ; \lambda_{\max} = 2.8 ; \Delta P_{\text{mech}} = 250 \text{ W}$$

$$I_{\text{ln}} = 11 \text{ A} ; R_1 = 0.5 \Omega ; \eta\% = 87.4\% ; \cos\varphi = 0.82$$

בניסוי בקצר כאשר הרוטור בלום מתקבל מעגל תמורה כמתואר באיור לשאלה 7.



איור לשאלה 7

להלן הנתונים שהתקבלו מניסוי בקצר: $I_{\text{Ik}} = 3 \text{ A} ; U_{\text{Ik}} = 16 \text{ V}$

(12 נק') א. בתנאי העבודה הנקובים:

1. חשבו את איבודי הנחשת ברוטור. (6 נק')
2. חשבו את איבודי הנחשת בסטטור. (6 נק')

(13 נק') ב. בהתנעה ישירה ובמתח נקוב:

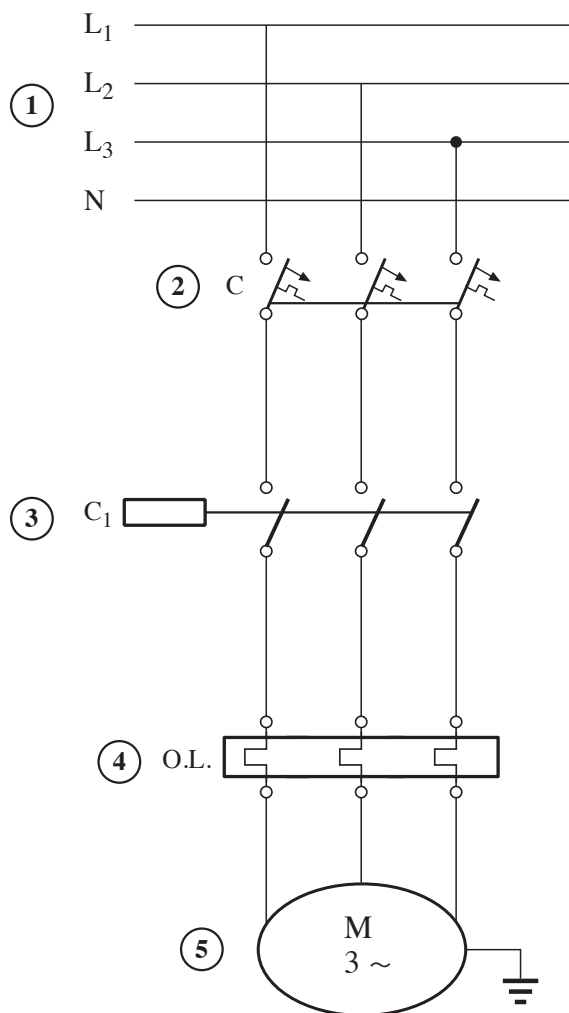
1. חשבו את זרם ההתנעה. (6 נק')
2. חשבו את מומנט ההתנעה. (7 נק')

פרק שלישי: מערכות פיקוד ממוחשבות ובקרים בני-תכנות

(לכל שאלה – 25 נקודות).

שאלה 8

באיור לשאלה 8 נתון תרשים חשמלי של מעגל הכוח להפעלת מנוע תלת-מופעי.



איור לשאלה 8

13 נק') א. ציינו את תפקידו של כל אחד מהרכיבים המסומנים באיור בספרות 1-5.

12 נק') ב. תכננו וסרטטו מעגל פיקוד או דיאגרמת סולם להפעלה וניתוק של מנוע תלת-מופעי הכולל הגנה בפני עומס יתר.

על המעגל או הדיאגרמה לכלול:

- מגענים מסוג START(NO), STOP(NC)
- מגע נעילה – אחזקה עצמית C1
- ממסר תרמי O.L. במעגל הפיקוד שהפעלתו תנתק את C1
- נורית חיווי RUN שתידלק כאשר C1 מופעל

שאלה 9

תכננו באמצעות בקר בר־תכנות מערכת פיקוד להפעלת מנוע בהתנעת כוכב־משולש.
המערכת תכלול:

- לחצן START
- לחצן STOP
- נורית חיווי בצבע צהוב, עבור פעולת המנוע בחיבור כוכב.
- נורית חיווי בצבע ירוק, עבור פעולת המנוע בחיבור משולש.
- נורית חיווי בצבע אדום, עבור התראת תקלה של זרם יתר במנוע.

אופן פעולת המערכת:

לחיצה על לחצן START תפעיל את המנוע בהזנה בחיבור כוכב למשך 10 שניות ותדליק את נורית החיווי הצהובה.
לאחר 10 שניות המנוע יועבר להזנה בחיבור משולש ונורית בצבע ירוק תדלק.
לחיצה על לחצן STOP תפסיק את פעולת המערכת.
תקלת זרם יתר תפסיק את פעולת המערכת ותדליק את נורית החיווי האדומה.

(10 נק') א. הגדירו את המבואות ואת המוצאים של הבקר בר־התכנות.

(15 נק') ב. תארו באמצעות דיאגרמת סולם את תוכנית הפיקוד של המערכת. על התוכנית לכלול את ההגנה התרמית של המנוע (O.L.).

בהצלחה!

אין להעביר את הנוסחאון
לנבחן אחר

נוסחאון במערכות הספק לכיתה י"ג

(9 עמודים)

1. מפלי מתח והפסדי הספק

1.1 מתח ישר	
שטח חתך אחיד	
$\Delta U [V]$ – מפל מתח מרבי	$\Delta U = \frac{2}{\gamma \cdot A} \cdot \sum_{n=1}^{n=N} (I_n \cdot L_n)$
$\gamma \left[\frac{m}{\Omega \cdot mm^2} \right]$ – מוליכות סגולית של מוליכים	$\Delta P = \frac{2}{\gamma \cdot A} \cdot \sum_{n=1}^{n=N} (I_n^2 \cdot L_n)$
$A [mm^2]$ – שטח חתך של מוליכים	שטח חתך בלתי אחיד
$I_n [A]$ – זרם בקטע n	
$L_n [m]$ – אורך של קטע n	$\Delta U = \frac{2}{\gamma} \cdot \sum_{n=1}^{n=N} \left(\frac{I_n \cdot L_n}{A_n} \right)$
$\Delta P [W]$ – הפסדי הספק מרביים	$\Delta P = \frac{2}{\gamma} \cdot \sum_{n=1}^{n=N} \left(\frac{I_n^2 \cdot L_n}{A_n} \right)$
$A_n [mm^2]$ – שטח חתך של מוליכים בקטע n	

1.2 מתח חילופין חד-מופעי	
$\Delta U [V]$ – מפל מתח מרבי	$\Delta U = \Delta U_a + \Delta U_r$
$\Delta U_a [V]$ – מפל מתח מרבי ממשי	* על-פי אופי הקטע, ΔU_r יכול לצאת חיובי או שלילי.
$\Delta U_r [V]$ – מפל מתח מרבי היגבי	$I_n = \sqrt{I_{a(n)}^2 + I_{r(n)}^2}$
	$\bar{I}_n = I_{a(n)} \pm j I_{r(n)} = I_n \angle \pm \varphi_n$
שטח חתך אחיד	
$\gamma \left[\frac{m}{\Omega \cdot mm^2} \right]$ – מוליכות סגולית של המוליכים	$\Delta U_a = \frac{2}{\gamma \cdot A} \cdot \sum_{n=1}^{n=N} (I_{a(n)} \cdot L_n)$
$A [mm^2]$ – שטח חתך של מוליכים	$\Delta U_r = 2 \cdot X_o \cdot \sum_{n=1}^{n=N} (I_{r(n)} \cdot L_n)$
$I_{a(n)} [A]$ – זרם ממשי בקטע n	$\Delta P = \frac{2}{\gamma \cdot A} \cdot \sum_{n=1}^{n=N} (I_n^2 \cdot L_n)$
$I_{r(n)} [A]$ – זרם היגבי בקטע n	
$L_n [m]$ – אורך של קטע n	
$X_o \left[\frac{\Omega}{m} \right]$ – היגב הקו ליחידת אורך	
$\Delta P [W]$ – הפסדי הספק מרביים	
$I_n [A]$ – זרם בקטע n	
$A_n [mm^2]$ – שטח חתך של מוליכים בקטע n	
φ_n – זווית בין מתח לזרם בקטע n	
שטח חתך בלתי אחיד	
	$\Delta U_a = \frac{2}{\gamma} \cdot \sum_{n=1}^{n=N} \left(\frac{I_{a(n)} \cdot L_n}{A_n} \right)$
	$\Delta P = \frac{2}{\gamma} \cdot \sum_{n=1}^{n=N} \left(\frac{I_n^2 \cdot L_n}{A_n} \right)$

		1.3 מתח חילופין תלת-מופעי	
		$\Delta U = \Delta U_a + \Delta U_r$	* על-פי אופי הקטע, ΔU_r יכול לצאת חיובי או שלילי.
		$I_n = \sqrt{I_{a(n)}^2 + I_{r(n)}^2}$	
		$\bar{I}_n = I_{a(n)} \pm j I_{r(n)} = I_n \angle \pm \varphi_n$	
		שטח חתך אחיד	
		$\Delta U_a = \frac{\sqrt{3}}{\gamma \cdot A} \cdot \sum_{n=1}^{n=N} (I_{a(n)} \cdot L_n)$	
		$\Delta U_r = \sqrt{3} \cdot X_0 \cdot \sum_{n=1}^{n=N} (I_{r(n)} \cdot L_n)$	
		$\Delta P = \frac{3}{\gamma \cdot A} \cdot \sum_{n=1}^{n=N} (I_n^2 \cdot L_n)$	
		שטח חתך בלתי אחיד	
		$\Delta U_a = \frac{\sqrt{3}}{\gamma} \cdot \left(\frac{I_{a(n)} \cdot L_n}{A_n} \right)$	
		$\Delta P = \frac{3}{\gamma} \cdot \sum_{n=1}^{n=N} \left(\frac{I_n^2 \cdot L_n}{A_n} \right)$	
$\Delta U [V]$	- מפל מתח מרבי		
$\Delta U_a [V]$	- מפל מתח מרבי ממשי		
$\Delta U_r [V]$	- מפל מתח מרבי היגבי		
$\gamma \left[\frac{m}{\Omega \cdot mm^2} \right]$	- מוליכות סגולית של המוליכים		
$A [mm^2]$	- שטח חתך של מוליכים		
$I_{a(n)} [A]$	- זרם ממשי בקטע n		
$I_{r(n)} [A]$	- זרם היגבי בקטע n		
$L_n [m]$	- אורך של קטע n		
$X_0 \left[\frac{\Omega}{m} \right]$	- היגב הקו ליחידת אורך		
$\Delta P [W]$	- הפסדי הספק מרביים		
$I_n [A]$	- זרם בקטע n		
$A_n [mm^2]$	- שטח חתך של מוליכים בקטע n		
φ_n°	- זווית בין מתח לזרם בקטע n		

2. בחירת שטח חתך בפני זרם העמסת יתר

$I_b [A]$ – זרם ממושך מרבי שעבורו תוכנן המעגל	$I_b \leq I_n \leq I'_z$
$I_n [A]$ – זרם נקוב של מבטח	$I'_z = I_z \times C$
$I_z [A]$ – זרם מתמיד מרבי	$C = C_1 \times C_2 \times \dots \times C_7$
$I'_z [A]$ – זרם מתמיד מרבי מתוקן	
C – מקדם תיקון משוקלל	

3. שיפור מקדם הספק

$Q_c [VAr]$ – הספק היגבי של סוללת קבלים הנדרשת לשיפור מקדם הספק	$Q_C = P \cdot (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$
$P [W]$ – הספק פעיל של המתקן	$Q_{C1} = \frac{Q_C}{3}$
$\varphi_1 [^\circ]$ – זווית מופע מצויה (זווית לפני שיפור)	$C = \frac{Q_{C1}}{2\pi \cdot f \cdot U_{ph}^2}$
$\varphi_2 [^\circ]$ – זווית מופע רצויה (זווית אחרי שיפור)	$C_\Delta = \frac{C_\lambda}{3}$
$Q_{c1} [VAr]$ – הספק היגבי של קבל במופע אחד	$I_C = \frac{Q_C}{\sqrt{3} \cdot U_n}$
$f [Hz]$ – תדר הרשת	$I_n \geq 1.43 \cdot I_C$
$I_C [A]$ – זרם נקוב של סוללת קבלים	
$U_n [V]$ – מתח נקוב של סוללת קבלים	
$I_n [A]$ – זרם נקוב של מבטח (מפסק)	
$C [F]$ – קיבול הקבל	
	* מקדם הספק הנדרש לפי חברת החשמל הוא מינימום 0.92

4. זרם קצר

זרם קצר תלת מופעי סימטרי	$I_{sc} [A]$	$I_{sc} = \frac{1.1 \cdot U}{\sqrt{3} \cdot Z_{sc} }$
מתח במקום הקצר	$U [V]$	
גודל עכבה במקום הקצר	$ Z_{sc} [\Omega]$	$X_G = \frac{U_{sc\%} \cdot U^2}{100 \cdot S_G}$
היגב של גנרטור למופע אחד	$X_G [\Omega]$	$X_S = \frac{U^2}{S_{sc}}$
מתח קצר באחוזים	$U_{sc} [\%]$	
הספק מדומה של גנרטור	$S_G [VA]$	כאשר סלילי השנאי מחוברים בכוכב:
היגב מערכת אספקה במתח גבוה	$X_S [\Omega]$	$R_{TR} = \frac{U_{a\%} \cdot U^2}{100 \cdot S_{TR}}$
הספק הקצר של המערכת במתח גבוה	$S_{sc} [VA]$	$R_{TR} = \frac{\Delta P_{CU} \cdot U^2}{S_{TR}^2}$
התנגדות סלילי השנאי למופע אחד	$R_{TR} [\Omega]$	$X_{TR} = \frac{U_{r\%} \cdot U^2}{100 \cdot S_{TR}}$
רכיב ממשי של מתח הקצר באחוזים	$U_{a\%} [\%]$	$U_{sc\%} = \sqrt{U_{a\%}^2 + U_{r\%}^2}$
הספק מדומה של השנאי	$S_{TR} [VA]$	$R_L = \frac{L}{\gamma \cdot A} \quad L [m]$
הפסדי נחושת בשנאי	$\Delta P_{CU} [W]$	$R_L = R_o \cdot L \quad L [km]$
היגב סלילי השנאי למופע אחד	$X_{TR} [\Omega]$	$X_L = X_o \cdot L \quad L [km]$
רכיב היגבי של מתח הקצר באחוזים	$U_{r\%} [\%]$	
התנגדות הקו	$R_L [\Omega]$	
אורך הקו	L	
מוליכות סגולית של המוליכים	$\gamma \left[\frac{m}{\Omega \cdot mm^2} \right]$	
שטח חתך של מוליכים	$A [mm^2]$	
התנגדות הקו ליחידת אורך	$R_o \left[\frac{\Omega}{km} \right]$	
היגב הקו	$X_L [\Omega]$	
היגב הקו ליחידת אורך	$X_o \left[\frac{\Omega}{km} \right]$	

שיקוף עכבות וזרמים 4.1

- $Z_{TR}'[\Omega]$ – עכבת שנאי לאחר שיקוף
- $Z_{TR}[\Omega]$ – עכבת שנאי לפני שיקוף
- $U_2[V]$ – מתח נקוב שבו מתרחש הקצר
- $U_1[V]$ – מתח נקוב בנקודה שממנה משקפים
- $Z_L'[\Omega]$ – עכבת הקו לאחר שיקוף
- $Z_L[\Omega]$ – עכבת הקו לפני שיקוף

$$Z_{TR}' = Z_{TR} \cdot \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2$$

$$Z_L' = Z_L \cdot \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2$$

חישוב זרם הלם ומקדם הלם 4.2

- K_{shok} – מקדם הלם
- $I_{shok}[A]$ – זרם הלם

$$k_{shok} = 1.022 + 0.9688e^{-3.0301 \times \frac{R_{sc}}{X_{sc}}}$$

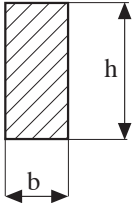
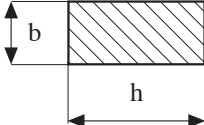
$$I_{shok} = \sqrt{2} \cdot I_{sc} \cdot k_{shok}$$

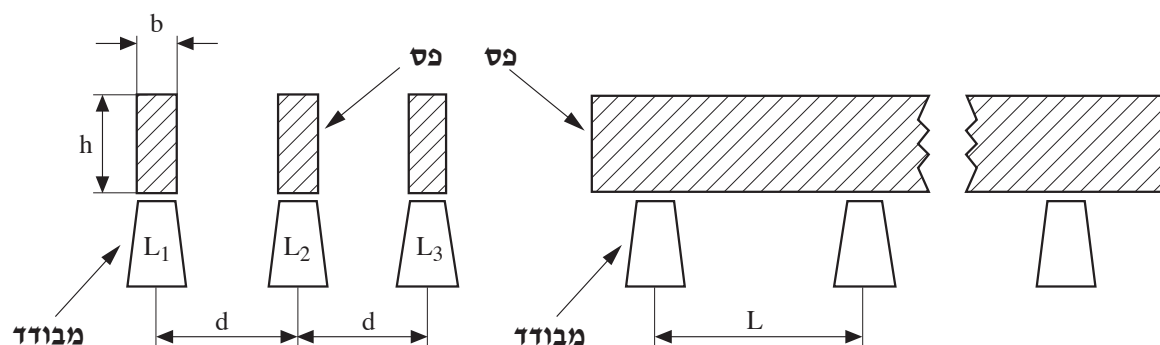
ערכי מקדם ההלם 4.2

0	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.2	R_{sc} / X_{sc}
2	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.2	1.1	1.1	1.08	1.06	1.04	K_{shok}

.5

רוחב הפס – b [cm]				
גובה הפס – h [cm]				
משקל סגולי – g_o [kg/cm ³]				
–				

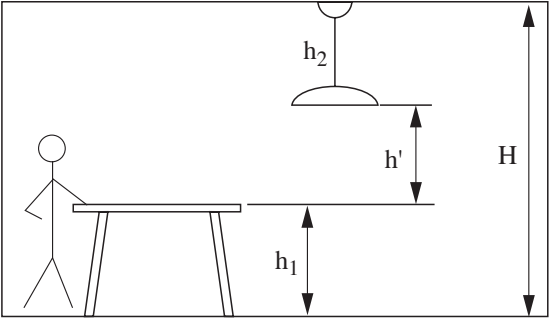
J	W	G	צורת חתך
$\frac{b^3 \cdot h}{12}$	$\frac{b^2 \cdot h}{6}$	$b \cdot h \cdot g_o$	מצב מאונך 
$\frac{b^3 \cdot h}{12}$	$\frac{b \cdot h^2}{6}$	$b \cdot h \cdot g_o$	מצב מאוזן 



6. תאורה חשמלית

$\eta_E = \frac{\Phi}{P}$ $I = \frac{\Phi}{\omega}$ 6.1 תכנון תאורת חוץ $\tan \alpha = \frac{L}{h}$ $I_\alpha = \frac{I_\alpha^\circ}{1000} \cdot \Phi$ $E_P = \frac{I_\alpha \cdot \cos^3 \alpha}{h^2}$ מקור אור	נצילות אורית של הנורה $\eta_E \left[\frac{\text{lm}}{\text{W}} \right]$ עוצמת האור $I [\text{cd}]$ הספק חשמלי של הנורה $P [\text{W}]$ שטף אור הנפלט מהנורה $\Phi [\text{lm}]$ זווית מרחבית $\omega [\text{srad}]$ כאשר האור מוקרן לכל הכיוונים במידה שווה כמו כדור מלא אז $\omega = 4\pi$, וכאשר האור מוקרן לכל הכיוונים במידה שווה כמו חצי כדור אז $\omega = 2\pi$ מרחק מעמוד מקור האור עד לנקודת הבדיקה $L [\text{m}]$ גובה מקור האור מעל המשטח $h [\text{m}]$ עוצמת האור של מקור האור בזווית α $I_\alpha [\text{cd}]$ עוצמת האור של מקור לכל 1000 lm בזווית α $I_\alpha^\circ [\text{cd}/1000 \text{ lm}]$ זווית בין כיוון הארה לנקודה P (היתר) לבין גובה h (הניצב) $\alpha [^\circ]$ רמת ההארה בנקודה P $E_P [\text{lux}]$
---	---

6.2 תכנון תאורת פנים

תאורה ישירה	
$R_K = \frac{a \cdot b}{h' \cdot (a + b)}$	
$h' = H - h_1 - h_2$	
$\Phi_T = \frac{E_T \cdot a \cdot b \cdot 100}{CU \cdot k}$	
$n = \frac{\Phi_T}{\Phi}$	
תאורה ישירה	
	
R_K - מקדם האולם	
$a[m]$ - רוחב האולם	
$b[m]$ - אורך האולם	
$h'[m]$ - מרחק אנכי בין התקרה ומשטח עבודה	
$H[m]$ - מרחק אנכי בין התקרה לרצפה	
$h_1[m]$ - גובה משטח עבודה מהרצפה	
$h_2[m]$ - אורך החוט של גוף תאורה	
$\Phi_T[lm]$ - שטף האור הנדרש באולם	
$E_T[lux]$ - עוצמת הארה הדרושה באולם	
$CU[\%]$ - מקדם ניצול תאורה	
n - מספר נורות	
$\Phi[lm]$ - שטף אור הנפלט מנורה	

מקדם ניצול התאורה CU

30			50			75			R_K	סוג גוף התאורה
10	30	10	30	50	10	30	50	החזרה מהתקרה (%) החזרה מהקירות (%)		
31	34	31	34	38	31	34	39		0.6	תאורה ישירה
40	42	41	43	46	42	44	47		0.8	
45	47	46	47	50	47	48	51		1.0	
51	52	52	53	56	52	55	58		1.5	
55	57	58	58	60	57	59	61		2.0	
61	62	62	63	66	62	65	68		3.0	
64	66	65	67	69	67	69	71		5.0	

אין להעביר את הנוסחאון
לנבחן אחר

נוסחאון במכונות חשמל והינע לכיתה י"ג (17 עמודים)

1. מבוא למערכות תלת-מופעיות

כוכב סימטרי:

$$I_L = I_{ph}$$

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

משולש סימטרי:

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

הספק תלת-מופע:

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

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

חישוב זרמים:

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

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

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

2. שנאים

2.1 מתח מושרה בסליל

כא"מ מושרה בסליל הראשוני	-	E_1	[V]
כא"מ מושרה בסליל השניוני	-	E_2	[V]
שטף מרבי בגרעין	-	$\Phi_{\max}$	[Wb]
מספר הכריכות בסליל הראשוני	-	N_1	
מספר הכריכות בסליל השניוני	-	N_2	
תדירות	-	f	[Hz]
השראה מגנטית מרבית	-	$B_{\max}$	[Wb / m ²]
שטח החתך של הגרעין	-	A	[m ²]

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

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

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

שנאי חד-מופעי אידיאלי:

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

שנאי תלת-מופעי אידיאלי:

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

2.2 ניסוי קצר

יחס השנאה	-	a	
התנגדות הסליל השניוני	-	R_2	[Ω]
התנגדות הסליל השניוני משוקפת לראשוני	-	R_2'	[Ω]
היגב השראותי של הסליל השניוני	-	X_2	[Ω]
היגב השראותי של הסליל השניוני משוקף לראשוני	-	X_2'	[Ω]
התנגדות הקצר	-	R_k	[Ω]
היגב הקצר של השנאי	-	X_k	[Ω]
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	-	$U_{k\%}$	

$$R_2' = R_2 a^2$$

$$X_2' = X_2 a^2$$

$$R_k = R_1 + R_2'$$

$$X_k = X_1 + X_2'$$

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

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

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

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

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:

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

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

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

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

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

- 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 / התנגדות באחוזים

שנאי חד-מופעי בריקם:

$$I_{0\%} = \frac{I_0}{I_n} \cdot 100$$

$$I_{Fe} = \frac{P_0}{U_n}$$

$$I_\mu = \sqrt{I_0^2 - I_{Fe}^2}$$

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

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

$$P_0 = U_n \cdot I_0 \cdot \cos \varphi_0$$

שנאי תלת-מופעי בריקם:

$$I_{0\%} = \frac{I_{oph}}{I_{nph}} \cdot 100 = \frac{I_0}{I_n} \cdot 100$$

$$I_{Feph} = \frac{P_0}{3 \cdot U_{nph}}$$

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

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

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

$$P_0 = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_0 \cdot \cos \varphi_0$$

- $I_{0\%}$ - זרם ריקם באחוזים
- I_0 [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_0 [W] - הספק בריקם

2.4 מפלי מתח ומתחי עבודה

- $\Delta U_{\%}$ - 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

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

$$\Delta U_{\%} = \beta \cdot U_{kn\%} \cdot \cos(\varphi_K - \varphi_2)$$

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

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

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

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

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

2.5 נצילות השנאי

- η - נצילות השנאי
- $\beta \eta_{\max}$ - גורם העמסה המותאם לנצילות מרבית
- ΔP_{Fe} [W] - הפסדי ברזל
- ΔP_{Cu_n} [W] - הפסדי נחושת נקובים

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

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

התנאי לקבלת נצילות מרבית:

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

2.6 עבודת שנאים במקביל

בהפעלת שני שנאים במקביל:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{S_{n_1} \cdot U_{K\%2}}{S_{n_2} \cdot U_{K\%1}}$$

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{Z_{k_2}}{Z_{k_1}}$$

$$S_1 + S_2 = S_L$$

בהפעלת מספר שנאים במקביל:

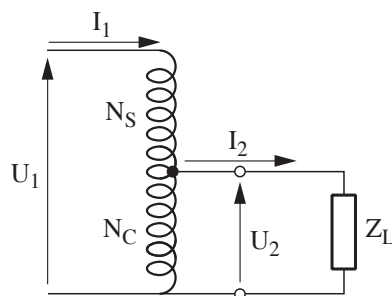
$$S_m = \frac{S_T}{\sum_{i=1}^n \frac{S_{n_i}}{U_{k\%i}}} \cdot \frac{S_{n_m}}{U_{k\%m}}$$

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

- S_1 - הספק מדומה בפועל של שנאי 1
- S_2 - 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_1} - הספק מדומה נקוב של שנאי 1
- S_{n_2} - הספק מדומה נקוב של שנאי 2
- Z_{k_1} - עכבת קצר של שנאי 1
- Z_{k_2} - עכבת קצר של שנאי 2
- $U_{k\%1}$ - מתח קצר באחוזים של שנאי 1
- $U_{k\%2}$ - 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 שני עימי

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



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

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

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

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

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

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

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

$$I_C \approx I_2 - I_1$$

3. מכונה לזרם ישר

3.1 כוח אלקטרו-מניע

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

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

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

במחולל לזרם ישר:

E	[V]	-	כוח אלקטרו-מניע (כא"מ)
U	[V]	-	המתח בין הדקי המחולל / המתח המסופק למנוע
R_a	[W]	-	התנגדות העוגן
R_{es}	[W]	-	התנגדות סליל העירור הטורי

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

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

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

במנוע לזרם ישר:

ΔU_b	[V]	-	מפל המתח על המברשות
I_a	[A]	-	הזרם בעוגן
I	[A]	-	זרם הצרכן במחולל / זרם המקור במנוע

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

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

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

3.2 זרמים במחולל

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

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

3.3 זרמים במנוע

[A] I - הזרם הנצרך על־ידי המנוע

[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

$I = I_a$	$I_e = \frac{U_e}{R_e}$	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

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

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

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

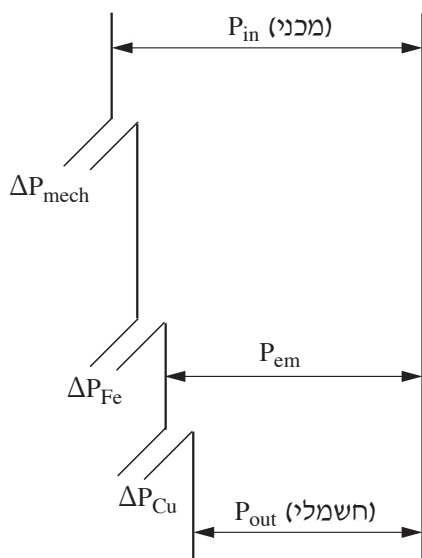
$$\Delta P_{Cu_e} = I_e^2 \cdot R_e$$

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

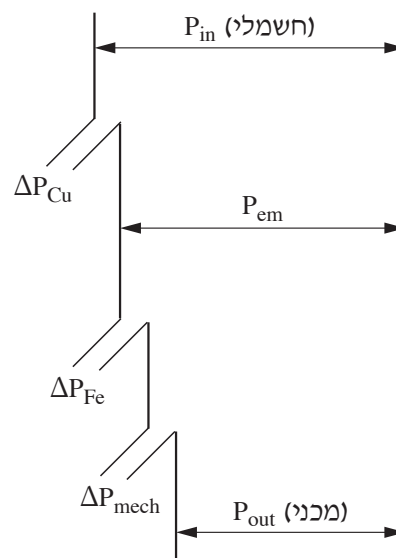
$$P_{חשמלי} = U \cdot I$$

$$P_{מכני} = M \cdot \omega$$

במחולל



במנוע



3.5 מומנטים

מומנט מכני	-	M_{out}	[N · m]
הספק מכני	-	P_{out}	[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 · m]
שטף מגנטי	-	Φ	[Wb]
זרם העוגן	-	I_a	[A]
איבודי מומנט בריקם	-	ΔM_0	[N · m]

$$M_{out} = \frac{P_{out}}{\omega} = 9.55 \frac{P_{out}}{n}$$

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}$$

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

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

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

$$\Delta M_0 = M_{em} - M_{out}$$

$$\Delta M_0 = 9.55 \cdot \frac{\Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech}}{n_n}$$

3.6 מומנטים

א. במנוע לזרם ישר בעירור מקבילי

מקדם הכא"מ	-	K_e	
שטף מגנטי	-	Φ	[Wb]
מהירות המנוע	-	n	[r.p.m]
מהירות המנוע בריקם	-	n_0	[r.p.m]
זרם בעוגן	-	I_a	[A]
זרם כללי (הנצרך מהמקור)	-	I	[A]
זרם העירור	-	I_e	[A]
מומנט אלקטרומגנטי	-	M_{em}	[N · m]
מתח	-	U	[V]
התנגדות העוגן	-	R_a	[Ω]
התנגדות סליל העירור	-	R_e	[Ω]
התנגדות נוספת במעגל העוגן	-	R_x	[Ω]

$$n_0 = \frac{U}{K_e \Phi}$$

$$n = n_0 - \Delta n$$

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

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

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

ב. במנוע לזרם ישר בעירור טורי

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

3.7 ויסות מהירות במנוע לזרם ישר בעירור מקבילי/נפרד

מהירות סיבוב	-	n	[r.p.m]	הכנסת נגד טורי למעגל העוגן
מהירות סיבוב בריקם	-	n_0	[r.p.m]	$n_0 = \frac{U}{K_e \Phi} \quad n = \frac{E}{K_e \Phi}$
התנגדות נוספת במעגל הרוטור	-	R_x	$[\Omega]$	$n = \frac{U - I_a \cdot (R_a + R_x)}{K_e \Phi}$
התנגדות סליל העוגן	-	R_a	$[\Omega]$	$n = \frac{U}{K_e \Phi} - \frac{M_{em}}{9.55 \cdot (K_e \Phi)^2} \cdot \frac{R_a + R_x}{(K_e \Phi)^2}$
שטף מגנטי	-	Φ	[Wb]	הכנסת נגד טורי למעגל העירור:
מתח	-	U	[V]	$n = \frac{E}{K_e \Phi} = \frac{U - I_a \cdot R_a}{K_e \Phi}$
כוח אלקטרו-מניע	-	E	[V]	$\frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \frac{N_e \cdot I_{e1}}{N_e \cdot I_{e2}} \left[\begin{array}{l} \text{עבור} \\ \text{מעגל מגנטי} \\ \text{בתחום הליניארי} \end{array} \right]$
מספר כריכות בסליל העירור	-	N_e	[T]	
מומנט אלקטרו-מגנטי	-	M_{em}	[Nm]	

שינוי מתח העוגן באמצעות בקרת מחזור
הפעולה (Duty Cycle):

מתח	-	U	[V]	$n = \frac{U_a - I_a \cdot R_a}{K_e \Phi} = \frac{U \cdot D - I_a \cdot R_a}{K_e \Phi}$
מתח הרוטור השקול	-	U_a	[V]	$n = \frac{U_a}{K_e \Phi} - \frac{M_{em} \cdot R_a}{9.55 \cdot (K_e \Phi)^2}$
מחזור הפעולה	-	D		$n = \frac{U \cdot D}{K_e \Phi} - \frac{M_{em} \cdot R_a}{9.55 \cdot (K_e \Phi)^2}$
זמן פעולה	-	T_{on}	[sec]	$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}}$
זמן הפסקה	-	T_{off}	[sec]	

4. מנוע השראתי תלת-מופעי

4.1 חישוב זרמים

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 מופעי בסטטור	-	R_1	[Ω]
התנגדות סליל מופעי ברוטור	-	R_2	[Ω]
התנגדות סליל הרוטור המשוקף לסטטור	-	R'_2	[Ω]
היגב מופעי ברוטור נייח	-	$X_{2(0)}$	[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 נייח ופתוח	-	$E_{ph2(0)}$	[V]

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

(בהזנחת זרם ריקם)

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

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

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

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

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

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

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

4.2 חישוב פאזורי של זרמים

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

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

$$\text{זרם מופעי} \quad - \quad I_{ph0} \quad [A]$$

4.3 זרם התנעה

(בהזנחת זרם ריקם)

זרם מופעי בסטטור, בהתנעה	-	$I_{ph1(st)}$	[A]
זרם מופעי ברוטור, משוקף לסטטור, בהתנעה	-	$I'_{ph2(st)}$	[A]

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

4.4 מהירות וגורם החליקה

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

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

$$f_2 = f_1 \cdot s$$

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

$$\lambda_{max} = \frac{M_{cr}}{M_n} = \left(\frac{s_{cr}}{s_n} + \frac{s_n}{s_{cr}} \right) \cdot \frac{1}{2}$$

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

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

4.5 הספקים ואיבודי הספק

הספק (ממשי) מושקע	-	P_{in}	[W]
הספק המופק על-ידי המנוע	-	P_n	[W]
הספק אלקטרומגנטי	-	P_{em}	[W]
הספק מכני	-	P_{mech}	[W]
איבודי נחושת בסטטור	-	ΔP_{Cu_1}	[W]
איבודי נחושת ברוטור	-	ΔP_{Cu_2}	[W]
איבודי ברזל בסטטור	-	ΔP_{Fe}	[W]
איבודי חיכוך ואיורור	-	ΔP_{mech}	[W]
איבודים נוספים	-	ΔP_{add}	[W]
הספק המנוע בריקם	-	P_0	[W]
גורם החליקה	-	s	

$$\Delta P_{Cu_1} = 3 \cdot I_{ph1}^2 \cdot R_1$$

$$\Delta P_{Cu_2} = 3 \cdot I_{ph2}^2 \cdot R_2 = 3 \cdot I_{ph2}^2 \cdot R_2'$$

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

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

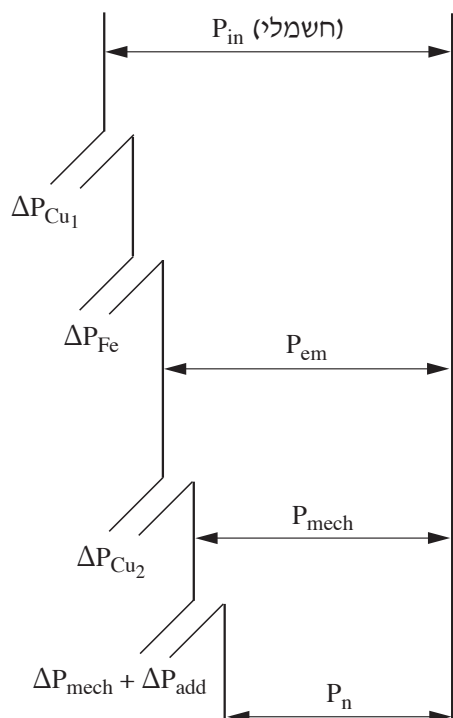
$$P_0 \cong \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech}$$

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

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

$$P_{in(n)} = \frac{P_{out(n)}}{\eta_{(n)}}$$

$$P_{in} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cos \varphi$$



4.6 מומנטים

המהירות הזוויתית של הרוטור	-	ω_n	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$
המהירות הזוויתית של השדה המסתובב	-	ω_s	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$
מהירות סיבוב (סינכרונית) של השדה	-	n_n	[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_{cr}	[N · m]
גורם החליקה	-	s	
גורם החליקה במומנט קריטי	-	s_{cr}	

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

4.7 השפעת שינוי המתח על המומנט

מומנט קריטי	-	M_{cr}	(Nm)	$\frac{M'_{cr}}{M_{cr}} = \frac{M'_{st}}{M_{st}} = \left(\frac{U'}{U}\right)^2$
מומנט התנעה	-	M_{st}	(Nm)	
חליקה נקובה	-	S_n		$S_{cr} = S_n \left[\lambda_{max} + \sqrt{\lambda_{max}^2 - 1} \right] = \frac{n_s - n_{cr}}{n_s}$
חליקה קריטית	-	S_{cr}		
מהירות סינכרונית	-	n_s	(r.p.m)	$S_{cr} = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_T^2}} \approx \frac{R'_2}{X_T}$
מהירות קריטית	-	n_{cr}	(r.p.m)	
היחס בין מומנט קריטי למומנט נקוב	-	λ_{max}		$X_T = X_1 + X'_{2(0)}$
היגב שקול של סליל המנוע	-	X_T	[Ω]	
התנגדות סליל ברוטור המשוקף לסטור	-	R'_2	[Ω]	

4.8 בקרת מהירות באמצעות שינוי תדירות

$$\frac{n'_s}{n_s} = \frac{f'}{f} = \frac{u'}{u}$$

$$U_{max} \leq U_n \quad \text{תנאים:}$$

$$\frac{U}{f} = \text{const}$$

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

$$n_s^* = \frac{60 \cdot f^*}{p}$$

4.9 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

נספח ג': מילון מונחים

לשאלון 733911, אביב תשפ"ו

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