

## 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 עשר שאלות. יש להשיב על ארבע שאלות בלבד. לכל שאלה – 25 נקודות, סך-הכול – 100 נקודות.  
שים לב: עליך לענות על שאלה אחת לפחות מן הפרק הראשון ועל שאלה אחת לפחות מן הפרק השני.
- ג. חומר עזר מותר לשימוש: מחשבון.
- ד. הוראות מיוחדות:
  1. ענה על מספר השאלות הנדרש בשאלון. המעריך יקרא ויעריך את מספר השאלות הנדרש בלבד, לפי סדר כתיבתן במחברתך, ולא יתייחס לתשובות נוספות.
  2. התחל כל תשובה לשאלה חדשה בעמוד חדש.
  3. רשום את כל תשובותיך אך ורק בעט.
  4. הקפד לנסח את תשובותיך כהלכה ולסרטט את תרשימיך בהירות.
  5. כתוב את תשובותיך בכתב-יד ברור, כדי לאפשר הערכה נאותה של תשובותיך.
  6. אם לדעתך חסרים נתונים הדרושים לפתרון שאלה, אתה רשאי להוסיף אותם, בתנאי שתנמק מדוע הוספת אותם.
  7. בכתיבת פתרונות חישוביים, קבלת 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 10 עמודים ו-39 עמודי נספחים.

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

בהצלחה!

## השאלות

ענה על ארבע מבין השאלות 1–10. עליך לענות על שאלה אחת לפחות מן הפרק הראשון ועל שאלה אחת לפחות מן הפרק השני (לכל שאלה – 25 נקודות).

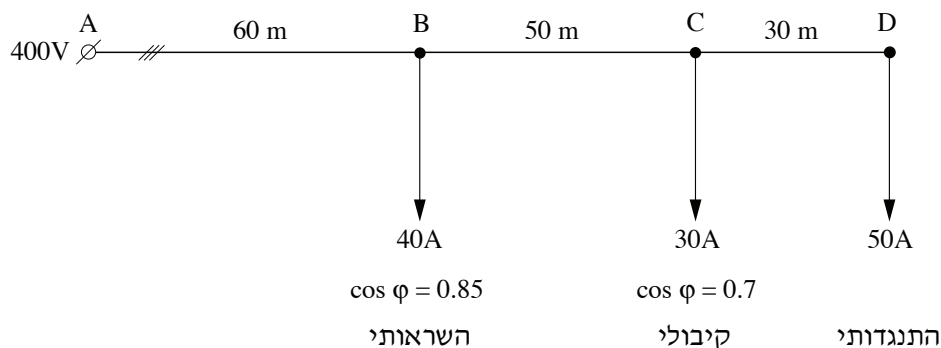
### פרק ראשון: מערכות הספק א'

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

#### שאלה 1

באיור לשאלה 1 נתונה רשת עילית תלת-מופעית  $400 \text{ V} / 50 \text{ Hz}$ , שמוליכיה עשויים נחושת.

ההיגב ההשראותי של מוליכי הרשת הוא  $X_0 = 0.35 \Omega / \text{km}$ .



#### איור לשאלה 1

א. חשב את שטח החתך האחיד של מוליכי הרשת, אם ידוע כי הפסדי ההספק המרביים ברשת הם 3%.

ב. קבע את שטח החתך התקני (המסחרי) של מוליכי הרשת, וחשב את המתח המזערי ברשת.

## שאלה 2

א. לוח חשמל ראשי של מפעל מוזן מרשת תלת-מופעית במתח של  $400 \text{ V} / 50 \text{ Hz}$ .  
בלוח החשמל נמדדו הערכים האלה:  $500 \text{ A}$ ,  $300 \text{ kW}$ .  
מבצעים בלוח החשמל את השינויים האלה:

— מנתקים קו-הזנה לתנור התנגדותי שהספקו  $50 \text{ kW}$ .

— מנתקים קווי-הזנה לחמישה מנועים השראתיים, ומחברים קווי הזנה לשלושה מנועים סינכרוניים.

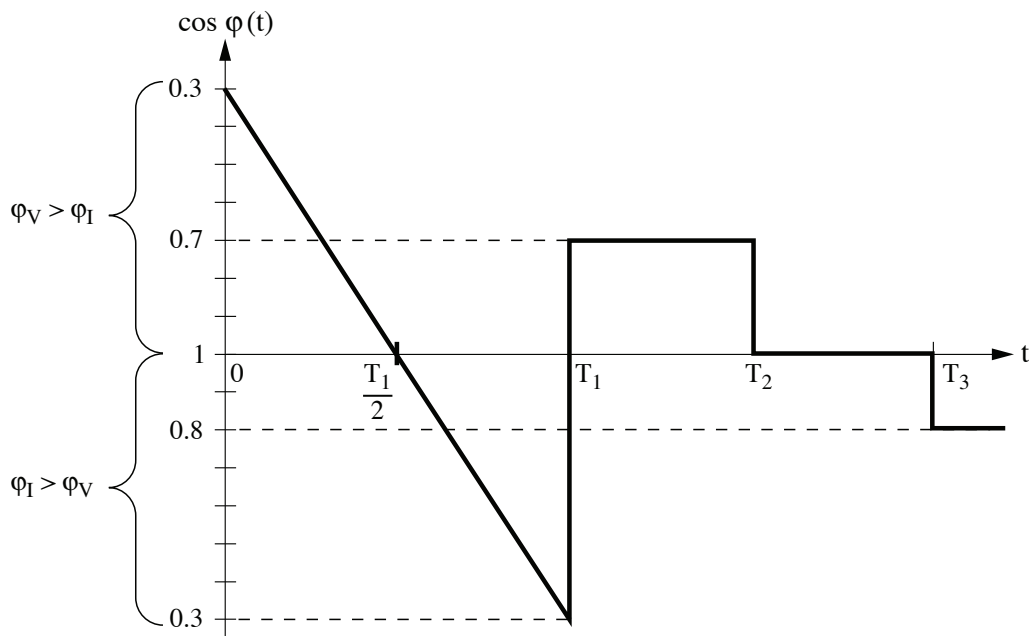
**נתוניו של כל מנוע השראתי הם:**  $12 \text{ kW}$ ,  $\eta = 0.8$ ,  $\cos \varphi = 0.88$  (השראותי).

**נתוניו של כל מנוע סינכרוני הם:**  $12 \text{ kW}$ ,  $\eta = 0.8$ ,  $\cos \varphi = 0.88$  (קיבולי).

1. חשב את מקדם ההספק של המתקן החשמלי במפעל לאחר ביצוע השינויים.

2. חשב את ההספק של סוללת הקבלים, הדרושה לשיפור מקדם ההספק של המתקן החשמלי במפעל לערך הנדרש על-ידי חברת החשמל.

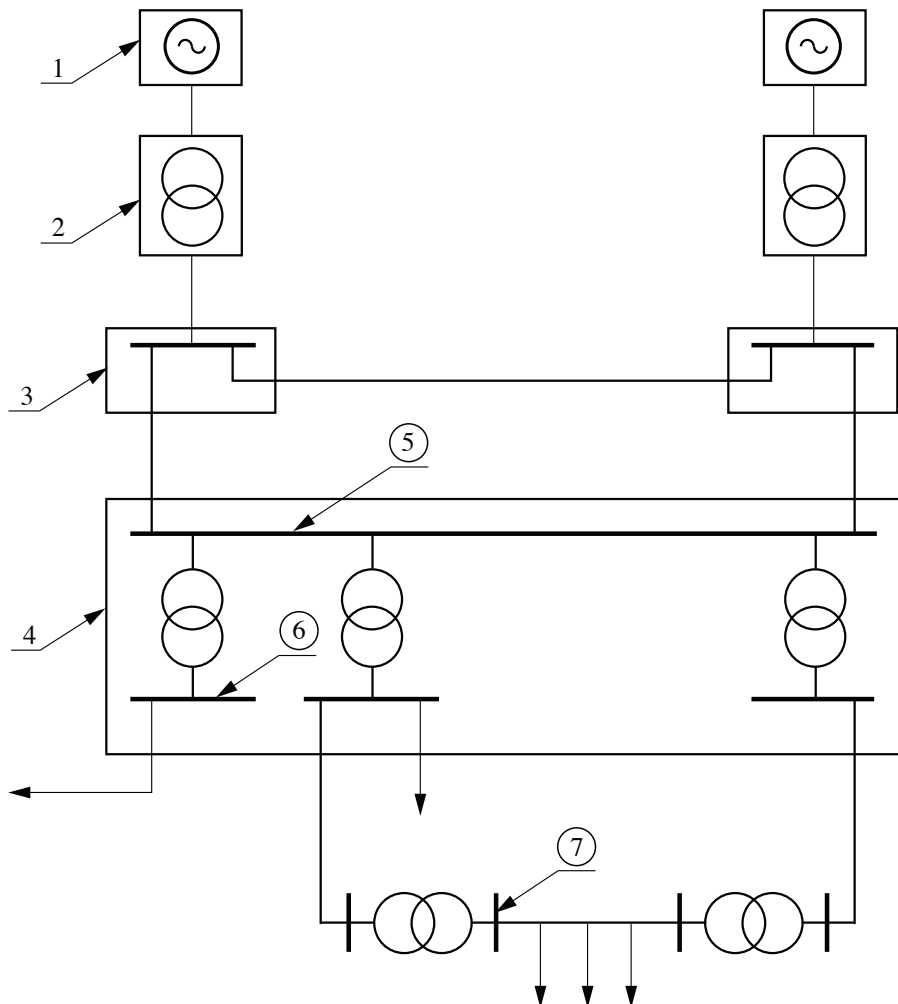
ב. באיור לשאלה 2 מתואר מקדם הספק, **המשתנה** כפונקציה של הזמן, של צרכן. קבע את האופי הממוצע של הצרכן כלפי המקור (רשת ההזנה) בקטעי הזמן:  $T_2 - T_3$ ,  $T_1 - T_2$ ,  $0 - T_1$ . נמק את קביעותיך.



איור לשאלה 2

### שאלה 3

באיור לשאלה 3 נתון תרשים עקרוני של מערכת אספקת החשמל בישראל.

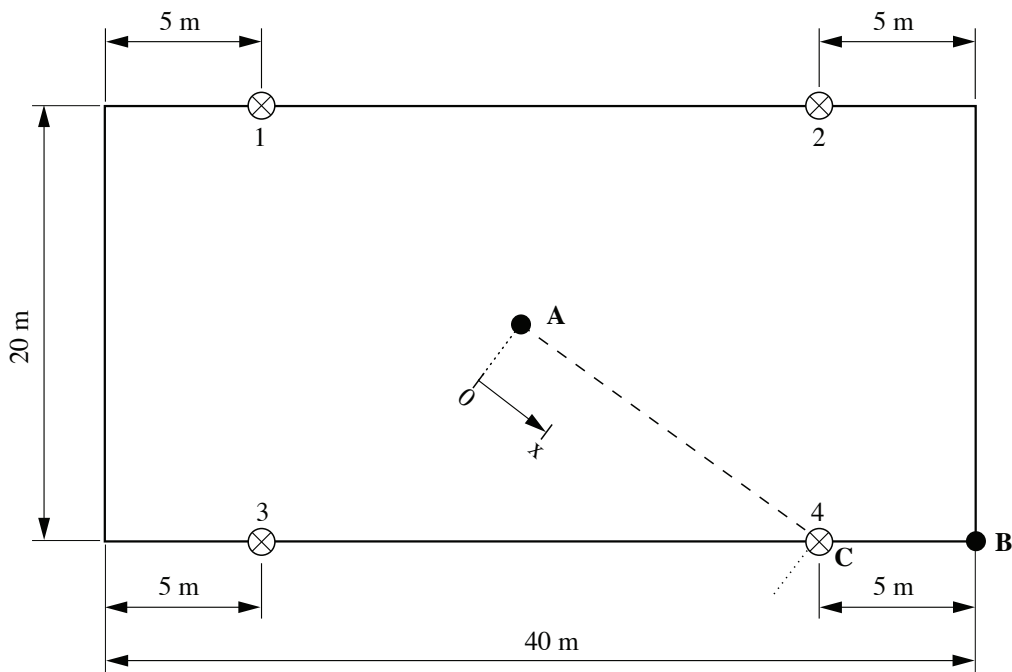


### איור לשאלה 3

- א. ציין את שמה של כל אחת מן התחנות המסומנות בספרות 1 ÷ 4.
- ב. קבע את רמות המתחים בכל אחד מפסי הצבירה המסומנים בספרות (5) ÷ (7).
- ג. מהו המבנה של רשת החלוקה במתח נמוך המופיעה באיור? נמק את תשובתך.

#### שאלה 4

באיור לשאלה 4 נתון מגרש חנייה, המואר על-ידי ארבעה עמודי תאורה. גובהו של כל עמוד הוא 8 מטרים. בכל עמוד מותקנים שלושה גופי תאורה. בכל גוף תאורה מותקנת נורת כספית בלחץ גבוה. ההספק של כל נורה הוא 250 W. הדיאגרמה הפולרית של כל אחד מגופי התאורה מתוארת על-ידי אופיין III שבנוסחאון.



#### איור לשאלה 4

- חשב את רמת ההארה בנקודה A (מרכז המגרש).
- חשב את רמת ההארה בנקודה B (הקצה הימני התחתון של המגרש).
- מכבים את כל הנורות בעמודי התאורה 1÷3. אדם הולך מנקודה A אל עמוד תאורה 4, הממוקם בנקודה C, לאורך הקו המרוסק, כמתואר באיור. סרטט גרף עקרוני של רמת ההארה (E) לאורך המסלול מ-A ל-C, כפונקציה של מרחק האדם (x) מן הנקודה A:  $E = f(x)$ .

## פרק שני: המרת אנרגיה והינע א'

ענה על שאלה אחת לפחות מבין השאלות 5–8 (לכל שאלה – 25 נקודות).

### שאלה 5

נתוניו של מנוע השראה תלת-מופעי בעל רוטור כלוב הם:

$$30 \text{ HP} ; 400 \text{ V} ; 50 \text{ Hz} ; 2p = 6$$

נתוני עכבת הקצר של המנוע הם:

$$R_1 = R'_2 = 0.1 \Omega ; X_T = 0.8 \Omega$$

היחס בין המומנט המרבי לבין המומנט הנקוב של המנוע הוא  $\frac{M_{\max}}{M_n} = 1.8$ , וההפסדים המכניים של המנוע – זניחים.

א. חשב את המומנט האלקטרומגנטי המרבי (הקריטי) ואת החליקה הקריטית.

ב. חשב את מהירות המנוע בעומס נקוב.

ג. במתח נקוב, המנוע מפתח מומנט התנעה הגדול פי 1.1 מהמומנט הנקוב. קבע האם ניתן להתניע את המנוע כאשר הוא מועמס בעומס נקוב, ומוזן במתח הקטן ב-7% מהמתח הנקוב. נמק את קביעתך.

### שאלה 6

נתוניו של שנאי תלת-מופעי, המסומן באות A, הם:  $50 \text{ Hz} ; \Delta / Y-5 ; 6.3 / 0.4 \text{ kV} ; 63 \text{ kVA}$   
 $U_{k\%} = 6\%$ ,  $\Delta P_{Cu_n} = 882 \text{ W}$

השנאי מוזן בצד הסליל הראשוני במתח נקוב.

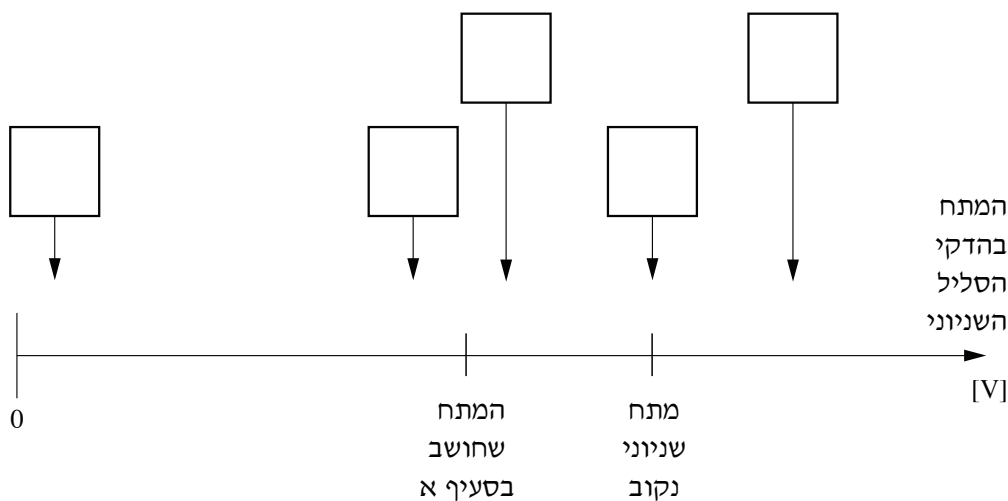
א. חשב את מפל-המתח ואת מתח-המוצא של השנאי, כאשר הוא מועמס בעומס נקוב במקדם הספק השראותי של 0.85.

ב. נתונים חמישה סוגי עומסים שניתן לחברם לשנאי הנתון (המסומן באות A), המוזן במתח נקוב:

1. התנגדות טהורה אינסופית (עומס השואף להיות נתק)
2. התנגדות טהורה אפסית (עומס השואף להיות קצר)
3. התנגדות טהורה בהעמסה נקובה
4. עומס בעל אופי קיבולי בהעמסה נקובה
5. עומס השראותי טהור בהעמסה נקובה

באיור לשאלה 6 מופיעים חמישה ריבועים ריקים. העתק את האיור למחברתך, ורשום בכל אחד מן הריבועים את **מספרו** של סוג העומס המתאים, על מנת שהמתח בהדקי הסליל השניוני יהיה כמצוין באיור.

**הערה:** ייתכן שלריבוע מסוים יתאימו מספר סוגי עומסים.



### איור לשאלה 6

ג. נתונים של שני שנאים תלת-מופיעים, המסומנים באותיות B ו-C, הם:

שנאי B :  $100 \text{ kVA}$  ;  $6.3 / 0.4 \text{ kV}$  ;  $Y / Y - 6$  ;  $U_{k\%} = 6\%$

שנאי C :  $100 \text{ kVA}$  ;  $6.3 / 0.4 \text{ kV}$  ;  $\Delta / Y - 11$  ;  $U_{k\%} = 6\%$

קבע אם ניתן לחבר כל אחד מן השנאים הללו בנפרד לעבודה במקביל עם השנאי הנתון A, שנתוניו מופיעים בתחילת השאלה. נמק את קביעתך.

## שאלה 7

נתוניו הנקובים של מנוע לזרם ישר בעירור מקבילי הם:

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

כאשר המנוע מוזן במתח הנקוב וזרם העוּגוֹן  $41.5 \text{ A}$ , נמדדה מהירות מנוע של  $1150 \text{ rpm}$ .

התנגדות סליל העירור:  $R_e = 95 \Omega$

התנגדות סליל העוּגוֹן:  $R_a = 0.124 \Omega$

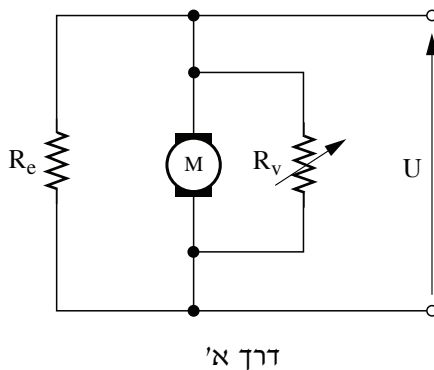
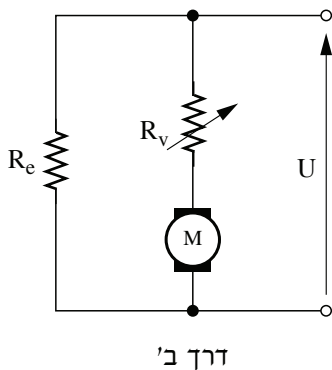
**א.** קבע את מהירות הסיבוב הנקובה של המנוע.

**ב.** חשב את זרם ההתנעה הנצרך מרשת-החשמל ואת מומנט-ההתנעה האלקטרומגנטי של המנוע הזה בשני מקרים:

1. כאשר המנוע מותנע ישירות מרשת החשמל.

2. כאשר המנוע מותנע באמצעות ריאוסטט-התנעה ( $R_{st} = 0.7 \Omega$ ) המחובר בטור לסליל העוּגוֹן. סליל העירור מחובר ישירות לרשת החשמל.

**ג.** כדי לווסת את מהירות המנוע, חיברו אליו נגד משתנה  $R_v$  בשני אופנים, המתוארים באיור א' לשאלה 7.

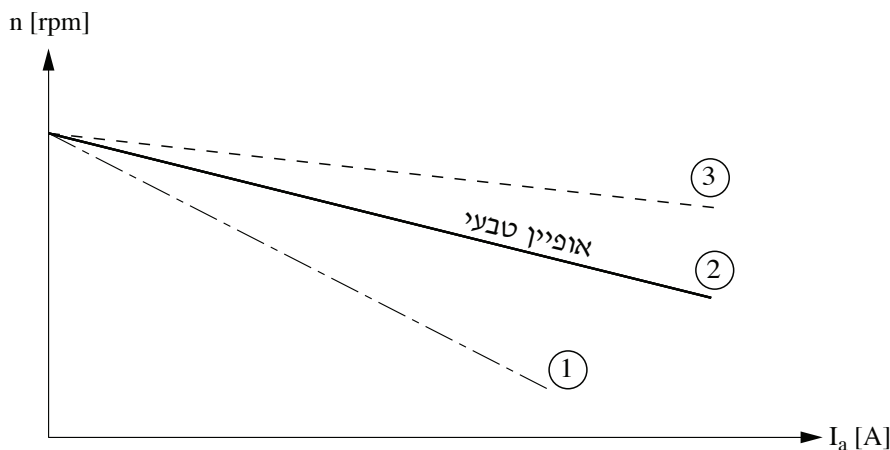


### איור א' לשאלה 7

באיור ב' לשאלה 7 נתונים שלושה אופייניים, המתארים את מהירות-הסיבוב של המנוע כפונקציה של הזרם בסליל העוּגוֹן,  $n = f(I_a)$ .

קבע איזה אופיין מתאים לכל אחד מאופני החיבור של הנגד המשתנה  $R_v$  למנוע. נמק את קביעתך.





איור ב' לשאלה 7

## שאלה 8

נתוניו הנקובים של מנוע לזרם ישר בעירור מקבילי הם:

$$U_n = 220 \text{ V} ; I_n = 60 \text{ A} ; n_n = 1200 \text{ rpm}$$

התנגדות סליל העירור:  $R_e = 100 \Omega$ .

התנגדות סליל העוגן:  $R_a = 0.55 \Omega$ .

ההפסדים הקבועים של המנוע הם 500 W.

מתניעים את המנוע באמצעות נגד התנעה, המחובר בטור למעגל העוגן. זרם העוגן ברגע חיבור המנוע לרשת גדול פי 2.5 מזרם העוגן הנקוב.

א. חשב את ההתנגדות של נגד ההתנעה.

ב. חשב את מהירות הסיבוב של המנוע, אם נגד ההתנעה לא מקוצר בסיום תהליך ההתנעה עקב תקלה, והזרם בעוגן הוא זרם העוגן הנקוב.

ג. סרטט, במערכת צירים אחת, את האופיין הטבעי ואת אופיין ההתנעה של המנוע,  $n = f(I_a)$ . בסרטוטך, סמן ב-A את נקודת ההתנעה, ב-B את נקודת העבודה הנקובה, וב-C את נקודת העבודה במצב התקלה המתואר בסעיף ב'.

## פרק שלישי: מערכות פיקוד ממוחשבות ובקרים בני-תכנות

### שאלה 9

בטבלה שבנספח לשאלה 9 נתונים היגדים שונים לגבי חיישנים/מתמרים. סמן את **כל** ההיגדים הנכונים עבור כל חיישן/מתמר (על-ידי סימון הריבועים המתאימים באות X).  
**שים לב:** ייתכן שיש יותר מהיגד אחד נכון בחלק מן המשבצות בטבלה.

הערה: הדבק את מדבקת הנבחן במקום המיועד לכך בנספח, וצרף אותו למחברתך.  
אין להעתיק את הטבלה שבנספח למחברת!

### שאלה 10

מערכת להתנעת מנוע בשיטת  $\Delta/\lambda$  כוללת לוח הפעלה וחיווי, שמרכיביו הם: לחצן הפעלה (B1), לחצן הפסקה (B2), נורית סימון ירוקה (GL) ונורית סימון כחולה (BL).  
מערכת ההתנעה מבצעת את הפעולות שלהלן לפי הסדר הבא:

1. התנעת המנוע בחיבור כוכב.
  2. הדלקת נורית הסימון הירוקה (GL) למשך 8 שניות.
  3. כיבוי נורית הסימון הירוקה, והדלקת נורית הסימון הכחולה (BL) למשך שנייה אחת.
  4. כיבוי נורית הסימון הכחולה, והדלקת נורית הסימון הירוקה (GL) למשך שנייה אחת.
  5. העברת המנוע להזנה בחיבור משולש, והדלקת נורית הסימון הכחולה (BL).
- מערכת ההתנעה מבוקרת באמצעות בקר בריתכנות.
- א. הגדר את המבואות ואת המוצאים של הבקר.
  - ב. תאר באמצעות דיאגרמת סולם את תכנית הפיקוד להפעלת המערכת. על התכנית לכלול הגנה תרמית (O.L.) למנוע.

### בהצלחה!

## נספח לשאלה 9

לשאלון 733911, אביב תשס"ח

מקום נא?הקת נאחן

סוג החיישן/ המתמר	מושפע על-ידי	תכונה פיזיקלית של החיישן/מתמר	שדה יישום (שימוש עיקרי)
קיבולי	מגע פיזי <input type="checkbox"/> נכון <input type="checkbox"/> לא נכון	שינוי פרמיאביליות (חלחלות) <input type="checkbox"/> נכון <input type="checkbox"/> לא נכון	<input type="checkbox"/> זיהוי גופים מתכתיים בלבד <input type="checkbox"/> זיהוי חומרים פלסטיים <input type="checkbox"/> זיהוי בקבוקי זכוכית
השראותי	קירבה <input type="checkbox"/> נכון <input type="checkbox"/> לא נכון	שינוי השדה החשמלי <input type="checkbox"/> נכון <input type="checkbox"/> לא נכון	<input type="checkbox"/> זיהוי גופים מתכתיים בלבד <input type="checkbox"/> זיהוי גופים בעלי תכונות פרומגנטיות <input type="checkbox"/> זיהוי חומרים פלסטיים
מגנטי	מגע <input type="checkbox"/> נכון <input type="checkbox"/> לא נכון	שינוי השדה המגנטי <input type="checkbox"/> נכון <input type="checkbox"/> לא נכון	<input type="checkbox"/> זיהוי מתכות מסוג נחושת ואלומיניום בלבד <input type="checkbox"/> זיהוי כל סוגי המתכות <input type="checkbox"/> זיהוי מתכות בעלי תכונות פרומגנטיות בלבד
מפסק גבול	שדה חשמלי <input type="checkbox"/> נכון או מגנטי <input type="checkbox"/> לא נכון	<input type="checkbox"/> סגירת מגע מכני <input type="checkbox"/> פתיחת מגע מכני <input type="checkbox"/> שדה מגנטי	<input type="checkbox"/> זיהוי מגע של גוף מתכתי בלבד <input type="checkbox"/> זיהוי מגע של כל חומר <input type="checkbox"/> זיהוי מגע של חומר שאינו פרומגנטי בלבד
חיישן תרמי PT 100	הפרשי <input type="checkbox"/> נכון טמפרטורה <input type="checkbox"/> לא נכון	<input type="checkbox"/> הפרש מתחים כתלות בהפרש טמפרטורה <input type="checkbox"/> שינוי בהתנגדות כתלות בטמפרטורה <input type="checkbox"/> שינוי בהתנגדות כתלות בהפרש טמפרטורה	<input type="checkbox"/> זיהוי שינויים בהפרשי טמפרטורה <input type="checkbox"/> זיהוי שינויים בחום הסביבה <input type="checkbox"/> זיהוי שינויים בהתנגדות החשמלית של חומר נבדק

אין להעביר את הנוסחאון  
לנבחן אחר

מקום לנחלקת נבחן

## נוסחאון במערכות הספק לכיתה י"ג

(16 עמודים)

### 1. מפלי מתח

מתח ישר

$\Delta U$ [V]	—	מפל מתח מרבי
$\gamma$ [m/ $\Omega$ mm <sup>2</sup> ]	—	מוליכות סגולית של המוליכים
$A$ [mm <sup>2</sup> ]	—	שטח חתך של המוליכים
$I_k$ [A]	—	זרם בקטע k
$L_k$ [m]	—	אורך של קטע k
$\Delta P$ [W]	—	הפסדי הספק מרביים

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

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

מתח חילופין חד-מופעי

$\Delta U$ [V]	—	מפל מתח מרבי
$\Delta U_a$ [V]	—	מפל מתח מרבי ממשי
$\Delta U_r$ [V]	—	מפל מתח מרבי היגבי
$X_o$ [ $\Omega$ /m]	—	היגב הקו ליחידת אורך עבור מוליך אחד
$I_k$ [A]	—	זרם בקטע k
$L_k$ [m]	—	אורך של קטע k
$\varphi_k$	—	הזווית בין מתח לזרם בקטע k
$\gamma$ [m/ $\Omega$ mm <sup>2</sup> ]	—	מוליכות סגולית של המוליכים
$A$ [mm <sup>2</sup> ]	—	שטח חתך של המוליכים
$\Delta P$ [W]	—	הפסדי הספק מרביים
$I_a$ [A]	—	זרם ממשי בקטע k
$I_r$ [A]	—	זרם היגבי בקטע k

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

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

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

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

$$I_a = I \cos \varphi$$

$$I_r = I \sin \varphi$$

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

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

מתח חילופין תלת-מופעי

מפל מתח מרבי	—	$\Delta U$	[V]
מפל מתח מרבי ממשי	—	$\Delta U_a$	[V]
מפל מתח מרבי היגבי	—	$\Delta U_r$	[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	—	$\varphi_k$	
מוליכות סגולית של המוליכים	—	$\gamma$	[m/Ωmm <sup>2</sup> ]
שטח חתך של המוליכים	—	A	[mm <sup>2</sup> ]
הפסדי הספק מרביים	—	$\Delta P$	[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	—	$\gamma$	[m/Ωmm <sup>2</sup> ]
המשקל הסגולי	—	g	[g/cm <sup>3</sup> ]

חומרים		
חמרן	נחושת	
35	57	$\gamma$
2.7	8.9	g

## 2. התחממות של מוליכים וכבלים

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

—  $T_1$  [°C] טמפרטורת הסביבה  
 בטבלת ההעמסה

—  $T'_1$  [°C] טמפרטורת הסביבה  
 האמיתית

—  $T_2$  [°C] הטמפרטורה המרבית  
 המותרת

—  $I_{T1}$  [A] הזרם המותר למוליך  
 בטמפרטורת הסביבה על-פי  
 הטבלה

—  $I'_{T1}$  [A] הזרם המותר למוליך  
 בטמפרטורת הסביבה  
 האמיתית

—  $c$  מקדם תיקון לעבודה  
 מחזורית (זמן המחזור עד  
 10 דקות)

—  $I_n$  [A] הזרם המותר בעבודה  
 קבועה

—  $I$  [A] הזרם המותר בעבודה  
 מחזורית

—  $t_w$  [min] זמן עבודה

—  $t$  [min] זמן המחזור

$$I = c \cdot I_n$$

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

**2.1 כבלים מותקנים בתעלה רחבה, על מגש מחורר או צמודים לקיר – בידוד  $90^{\circ}\text{C}$  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:  $35^{\circ}\text{C}$**

**2.1.1 מקדם תיקון עבור טמפרטורה אופפת שונה של הסביבה (בידוד  $90^{\circ}$ )**

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:

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  $90^{\circ}\text{C}$**   
**כבל רב-גידי במעגל תלת-מופעי**

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

**טמפרטורה אופפת של האדמה:  $30^{\circ}\text{C}$**   
**2.2.1 מקדם תיקון עבור טמפרטורה אופפת שונה של האדמה**

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

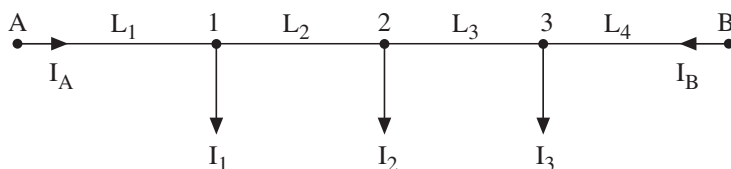
**2.2.2 מקדם תיקון עבור התקנת כבלים אחדים באדמה**

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

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

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

#### 4. שיפור מקדם ההספק

ההספק ההיגבי של סוללת הקבלים התלת-מופעיים הנדרשת לשיפור מקדם ההספק	—	$Q_c$	[kVar]
הספק אקטיבי הנצרך מהרשת	—	$P$	[kW]
הזווית לפני השיפור	—	$\varphi_1$	[°]
הזווית אחרי השיפור	—	$\varphi_2$	[°]
קיבול הקבל הנדרש	—	$C$	[μF]
ההספק ההיגבי של הקבל במופע אחד	—	$Q_{c1}$	[kVar]
תדירות הרשת	—	$f$	[Hz]
המתח על פני הקבל הנדרש	—	$U_c$	[V]

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

**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 של הקבל כעבור זמן $t$	—	$U_c$	[V]
זמן הפריקה	—	$t$	[s]

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

## 5. זרמי הקצר

זרם קצר תלת-מופעי סימטרי	—	$I_k$	[A]
עכבת מעגל הקצר (מהמקור למקום הקצר) למופע אחד	—	$Z$	[Ω]
הספק מדומה של שנאי	—	$S_T$	[VA]
הספק מדומה של גנרטור	—	$S_G$	[VA]
היגב של גנרטור למופע אחד	—	$X_G$	[Ω]
היגב מערכת אספקה במתח גבוה	—	$X_S$	[Ω]
הספק הקצר של המערכת	—	$S_k$	[VA]
התנגדות של שנאי למופע אחד	—	$R_T$	[Ω]
היגב של שנאי למופע אחד	—	$X_T$	[Ω]
סכום ההתנגדויות במעגל הקצר למופע אחד	—	$\Sigma R$	[Ω]
סכום ההיגבים במעגל הקצר למופע אחד	—	$\Sigma X$	[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	—	$K$	

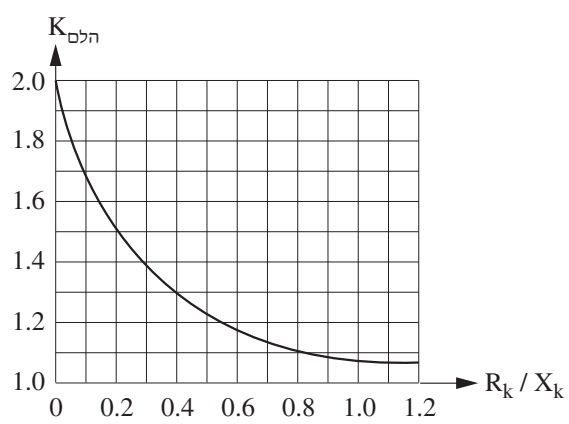
$I_k = \frac{1.1 \cdot U}{\sqrt{3} Z}$
$X_G = \frac{U_{x\%} U^2}{100 S_G}$
$X_S = \frac{U^2}{S_k}$
$R_T = \frac{U_{r\%} U^2}{100 S_T}$
$X_T = \frac{U_{x\%} U^2}{100 S_T}$
$U_{k\%} = \sqrt{U_{r\%}^2 + U_{x\%}^2}$
$Z = \sqrt{(\Sigma X)^2 + (\Sigma R)^2}$
$R_L = R_o \cdot L$
$X_L = X_o \cdot L$
$R'_1 =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

5.1 נוסחאות לחישוב זרם קצר תלת-מופעי זרם הלם

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

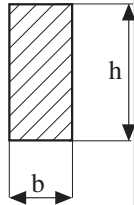
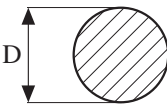
5.2 ערכי מקדם ההלם

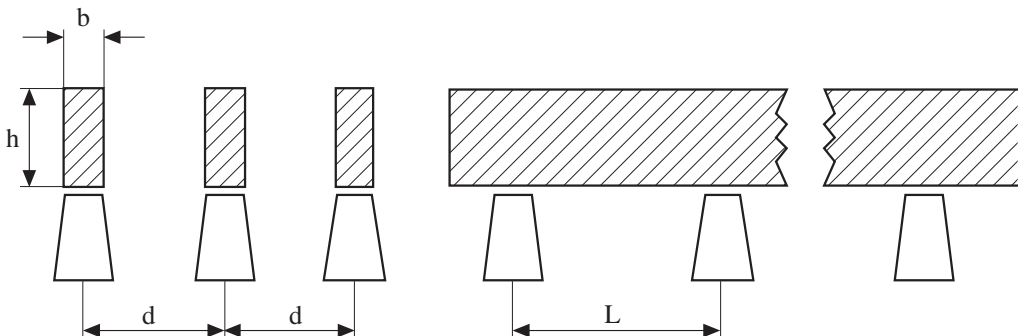
0	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.2	$R_k / X_k$
2	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.2	1.1	1.1	1.08	1.06	1.04	$K_{\text{הלם}}$



## 6. פסי הצבירה

הכוח הפועל על פס באורך $1m$	—	$F$ [kg/m]	$F = 1.76 \frac{I_{הלס}^2}{d}$
ערך השיא של זרם הקצר	—	$I_{הלס}$ [kA]	
המרחק בין המרכזים של פסי הצבירה	—	$d$ [cm]	$P = F \frac{L}{100}$
מאמץ הכפיפה	—	$\sigma$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma = \frac{P \cdot L}{12W}$
הכוח הפועל על הפס בקטע בין שני מבדדים	—	$P$ [kg]	$f = \frac{112}{L^2} \sqrt{\frac{E \cdot J}{G}}$
אורך הפס בין שני מבדדים	—	$L$ [cm]	
מומנט ההתנגדות (מודול החתך)	—	$W$ [cm <sup>3</sup> ]	

מקדם האלסטיות	—	$E$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	חתך	$J$	$W$	$G$
מומנט ההתמדה (אינרציה)	—	$J$ [cm <sup>4</sup> ]		$\frac{b^3 h}{12}$	$\frac{b^2 h}{6}$	$b \cdot h \cdot g$
המשקל של פס באורך $1 cm$	—	$G$ [kg]				
תדירות התהודה העצמית	—	$f$ [Hz]				
רוחב הפס	—	$b$ [cm]		$0.05 D^4$	$0.1 D^3$	$\frac{\pi D^2}{4} \cdot g$
גובה הפס	—	$h$ [cm]				
קוטר הפס	—	$D$ [cm]				
המשקל הסגולי	—	$g$ [kg/cm <sup>3</sup> ]				



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

I	D <sub>m</sub> [cm]									R <sub>0</sub>	קוטר	שטח חתך
	56	100	200	300	400	500	600	700	1000			
[A]	X <sub>0</sub> [Ω/km]									[Ω/km]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]
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 <sub>m</sub> [cm]									קוטר	שטח חתך
I	R <sub>0</sub>	I	R <sub>0</sub>	56	100	200	300	400	500	600	700	1000		
[A]	[Ω/km]	[A]	[Ω/km]	X <sub>0</sub> [Ω/km]									[mm]	[mm <sup>2</sup> ]
—	—	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<sup>2</sup>]**

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

**7. הגנה נגד התחשמלות בשיטת האיפוס**

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

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

זרם נקוב	עכבה מרבית	זרם-קצר מזערי
$I_n$ [A]	$Z_l$ [Ω]	$I_k$ [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

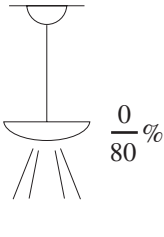
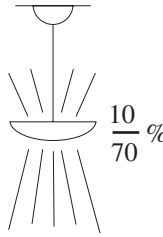
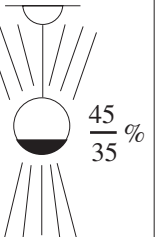
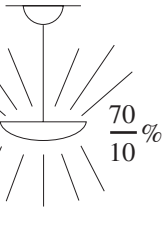
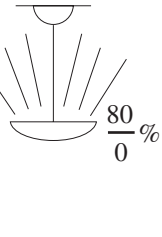
<u>נצילות [lm/W]</u>	<u>שטף אור [lm]</u>	<u>נורות להט (220V)</u>
9.2	230	25 W
10.7	430	40 W
12.2	730	60 W
13.8	1380	100 W
15.7	3140	200 W
16.7	5000	300 W
16.8	8400	500 W
<b><u>נורות להט (עם תוספת יוד)</u></b>		
22.0	22000	1000 W
<b><u>נורות פלורסנטיות</u></b>		
57	2950	40 W לבן בהיר
46	2300	כנ"ל לבן 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
<b><u>נורות כספית (לחץ גבוה)</u></b>		
39	3400	80 W
41	5600	125 W
45	12000	250 W
49	21000	400 W
<b><u>נורות תערובת (כספית + להט)</u></b>		
18	2900	160 W
21	5200	250 W
25	12500	500 W
<b><u>נורות נתרן</u></b>		
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.

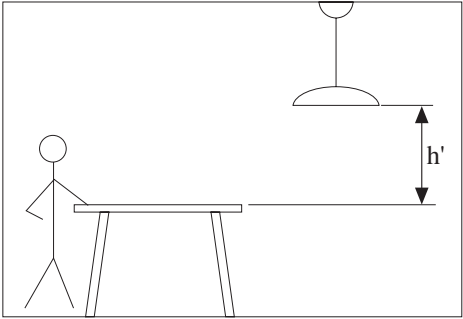
2. הנצילות מחושבת גם על-פי ההפסדים בציוד העזר.



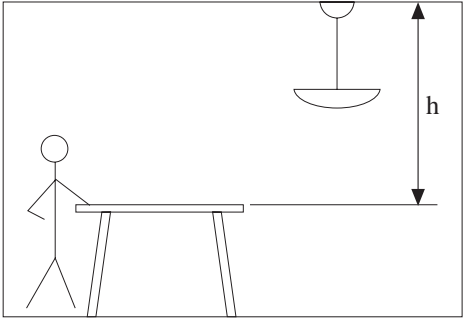
חישוב תאורה כללית

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

תאורה ישירה



תאורה בלתי ישירה



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

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 —  $\phi$  [lm]

עוצמת המאור הנדרשת —  $E$  [lx]

שטח האולם —  $A$  [m<sup>2</sup>]

מקדם ההפחתה —  $k$

נצילות התאורה —  $\eta$  [%]

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

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

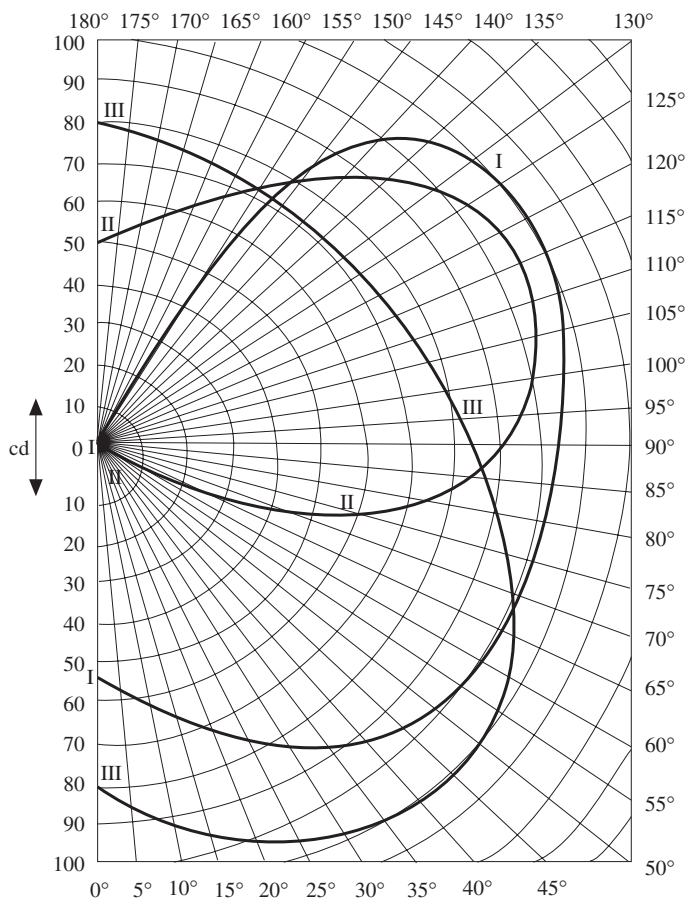
### מקדמי הפחתה k

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

### דיאגרמה פולרית של מקור אור בעל 1000 lm



צפיפות ההארה לכל  $I_\alpha$  [cd]

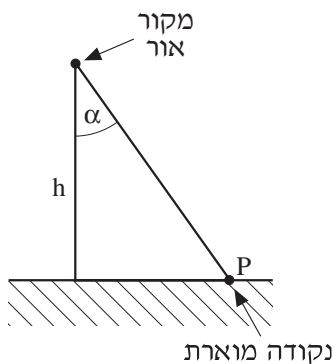
$\alpha$  מכיוון 1000 lm

עוצמת ההארה לכל  $E_\alpha$  [lx]

$\alpha$  מכיוון 1000 lm

גובה מעל משטח  $h$  [m]

ההארה



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

**בהצלחה!**

אין להעביר את הנוסחאון  
לנבחן אחר

מקום לנכתב 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]

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

משולש סימטרי

$$U_L = U_{ph}$$

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

הספק תלת-מופע

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

הספק מדומה תלת-מופע —  $S$  [VA]

הספק פעיל תלת-מופע —  $P$  [W]

הספק היגבי תלת-מופע —  $Q$  [VAr]

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

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

חישוב זרמים:

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

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

## 2. שנאים

### 2.1 מתח מושרה בסליל

— $E_1$ [V]	כא"מ מושרה בסליל הראשוני
— $E_2$ [V]	כא"מ מושרה בסליל השניוני
— $\Phi_{\max}$ [Wb]	שטף מרבי בגרעין
— $N_1$	מספר הכריכות בסליל הראשוני
— $N_2$	מספר הכריכות בסליל השניוני
— $f$ [Hz]	תדירות
— $B_{\max}$ [Wb / m <sup>2</sup> ]	השראה מגנטית מרבית
— $A$ [m <sup>2</sup> ]	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-מופעלי:

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

שנאי תלת-מופעלי:

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

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

## 2.3 פעולת השנאי בקצר ובריקם

### שנאי תלת-מופעי בקצר:

### שנאי חד-מופעי בקצר:

הספק —  $P_k$  [W]  
הקצר

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

זרם הקצר —  $I_k$  [A]

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

התנגדות —  $R_k$  [ $\Omega$ ]  
הקצר

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

היגב —  $X_k$  [ $\Omega$ ]  
הקצר

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

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

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

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

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

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

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

### שנאי תלת-מופעי בריקם:

### שנאי חד-מופעי בריקם:

זרם ריקם —  $I_{0\%}$   
באחוזים

$$I_{0\%} = \frac{I_{pho}}{I_{phn}} \cdot 100 = \frac{I_o}{I_n} \cdot 100$$

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

זרם —  $I_{Fe}$  [A]  
הפסדי  
ברזל

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

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

זרם —  $I_\mu$  [A]  
המגנט

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

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

התנגדות —  $R_{Fe}$  [ $\Omega$ ]  
מותאמת  
להפסדי  
ברזל

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

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

היגב —  $X_\mu$  [ $\Omega$ ]  
המגנט

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

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

זרם ריקם —  $I_o$  [A]  
הספק —  $P_o$  [W]  
בריקם

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

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

## 2.4 מפלי מתח ומתחי עבודה

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

מפל מתח באחוזים —  $\Delta U_{\%}$

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

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

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

גורם הספק של העומס —  $\cos \varphi_2$

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

מקדם העמסה של השנאי —  $\beta$

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 —  $\eta$

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

## 2.5 נצילות השנאי

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

הפסדי ברזל —  $\Delta P_{Fe}$  [W]

הפסדי נחושת נקובים —  $\Delta P_{Cu_n}$  [W]

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

התנאי לקבלת נצילות מרבית:

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



## 2.6 עבודת שנאים במקביל

בהפעלת שני שנאים במקביל:

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

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

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

$S_I$  — הספק מדומה בפועל של  
שנאי (1)

$S_{II}$  — הספק מדומה בפועל של  
שנאי (2)

$S_m$  — הספק מדומה בפועל של  
שנאי (m)

$S_L$  — הספק מדומה של הצרכן

$S_T$  — הספק מדומה של העומס

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

$S_{n_I}$  — הספק מדומה נקוב של  
שנאי (1)

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

$Z_{k_I}$  — עכבת קצר של שנאי (1)

$Z_{k_{II}}$  — עכבת קצר של שנאי (2)

$U_{k\%I}$  — מתח קצר באחוזים של  
שנאי (1)

$U_{k\%II}$  — מתח קצר באחוזים של  
שנאי (2)

$U_{k\%m}$  — מתח קצר באחוזים של  
שנאי (m)

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

$m$  — שנאי כלשהו מבין השנאים

$n$  — מספר השנאים

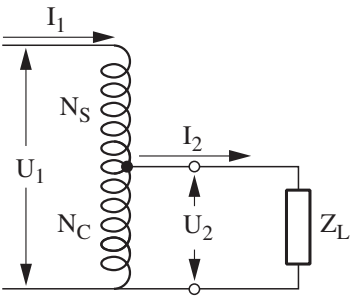
בהפעלת מספר שנאים במקביל:

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

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

2.7 שְנאֵי עֲצֻמִי

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

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

—  $E$  [V] כא"מ מושרה ברוטור

—  $Z$  מספר מוליכים ברוטור

—  $p$  מספר זוגות קטבים

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

—  $n$  [r.p.m] מהירות סיבוב

—  $a$  מספר זוגות ענפים

במחולל לזרם ישר:

מקבילים ברוטור

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

—  $\Phi$  [Wb] שטף

—  $K_e$  מקדם הכא"מ

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

—  $E$  [V] כוח אלקטרו-מניע (כא"מ)

—  $U$  [V] המתח בין הדקי המחולל /

המתח המסופק למנוע

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

—  $R_a$  [ $\Omega$ ] התנגדות העוגן

במנוע לזרם ישר:

—  $R_{es}$  [ $\Omega$ ] התנגדות סליל העירור

הטורי

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

—  $\Delta U_b$  [V] מפל המתח על המברשות

—  $I_a$  [A] הזרם בעוגן

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

—  $I$  [A] זרם הצרכן במחולל /

זרם המקור במנוע

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

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]	—	$I = I_a$	$I_e = \frac{U_e}{R_e}$	עירור זר
			$I = I_a + I_e$	$I_e = \frac{U}{R_e}$	עירור מקבילי
			$I = I_a = I_e$		עירור טורי
הזרם בעוגן (ברוטור)	$I_a$ [A]	—			
הזרם בסליל העירור	$I_e$ [A]	—			
מתח העירור	$U_e$ [V]	—			
התנגדות סליל העירור	$R_e$ [ $\Omega$ ]	—			
זרם ההתנעה בעוגן	$I_{ast}$ [A]	—			
התנגדות המתנע	$R_{st}$ [ $\Omega$ ]	—			

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

### 3.4 הספקים והפסדי הספק

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

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

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

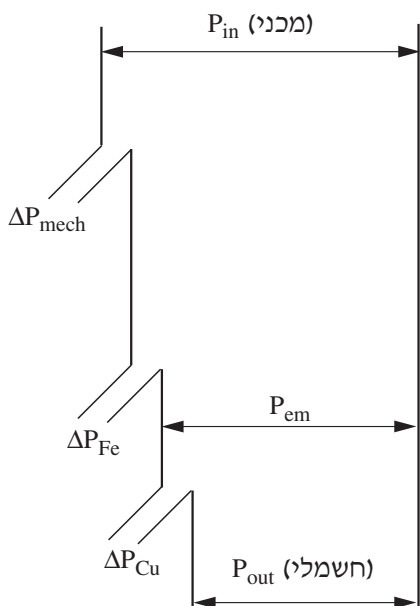
$$\Delta P_{Cu_e} = I_e^2 \cdot R_e$$

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

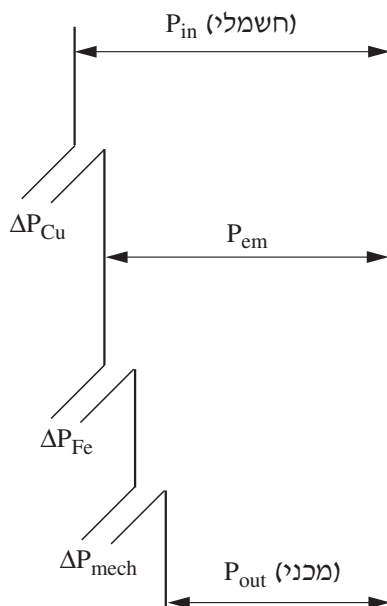
$$P_{חשמלי} = U \cdot I$$

$$P_{מכני} = M \cdot \omega$$

#### במחולל



#### במנוע



### 3.5 מומנטים

מומנט נקוב	—	$M_n$ [N · m]
הספק נקוב	—	$P_n$ [W]
מהירות זוויתית נקובה	—	$\omega_n$ $\left[ \frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$
מהירות סיבוב נקובה	—	$n_n$ [r.p.m]
מקדם המומנט	—	$K_m$
מספר מוליכים ברוטור	—	$Z$
מספר זוגות קטבים	—	$p$
מספר זוגות ענפים	—	$a$
מקבילים בעוגן		
מומנט אלקטרומגנטי	—	$M_{em}$ [N · m]
שטף מגנטי	—	$\Phi$ [Wb]
זרם העוגן	—	$I_a$ [A]
איבודי מומנט בריקם	—	$\Delta M_0$ [N · m]

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

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

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

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

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

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

### 3.6 מהירות במנוע

#### א. במנוע לזרם ישר בעירור מקבילי

מקדם הכא"מ	$K_e$	—	$n_o = \frac{U}{K_e \Phi}$
שטף מגנטי	$\Phi$	—	$n = n_o - \Delta n$
מהירות המנוע	$n$	—	$n = \frac{U - I_a (R_a + R_x)}{K_e \Phi}$
מהירות המנוע בריקס	$n_o$	—	
זרם בעוגן	$I_a$	—	
זרם כללי (הנצרך מהמקור)	$I$	—	
זרם העירור	$I_e$	—	$n = \frac{U}{K_e \Phi} - M_{em} \frac{R_a + R_x}{K_e \Phi \cdot K_m \Phi}$
מומנט אלקטרומגנטי	$M_{em}$	—	$n = \frac{U}{K_e \Phi} - M_{em} \frac{R_a + R_x}{9.55 \cdot (K_e \Phi)^2}$
מתח	$U$	—	
התנגדות העוגן	$R_a$	—	
התנגדות סליל העירור	$R_e$	—	
התנגדות נוספת במעגל העוגן	$R_x$	—	

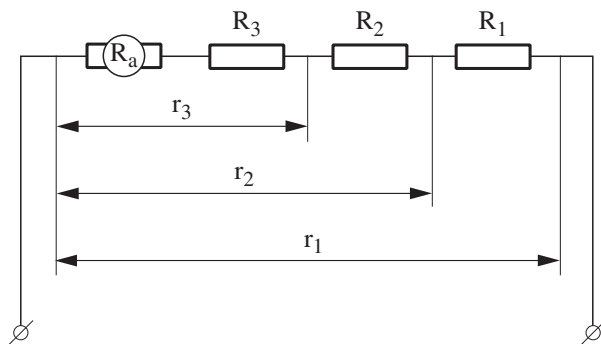
#### ב. במנוע לזרם ישר בעירור טורי

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

### 3.7 תכנון מתנע דרגתי למנוע לזרם ישר בעירור מקבילי

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

מתנע בעל שלוש דרגות





## 4. מנוע השראתי תלת-מופעי

### 4.1 חישוב זרמים

(בהזנחת זרם ריקם)

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

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

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

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

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

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

### 4.2 חישוב פאזורי של זרמים

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

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

### 4.3 זרם התנעה

(בהזנחת זרם ריקם)

זרם פאזורי מופעי —  $I_{ph1(st)}$  [A]

בסטטור, בהתנעה

זרם פאזורי מופעי —  $I'_{ph2(st)}$  [A]

ברוטור, משוקף

לסטטור, בהתנעה

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

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

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

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

### 4.4 מהירות וגורם 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 —  $\lambda_{max}$

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	—	$\Delta P_{Cu_1}$	[W]
איבודי נחושת ברוטור	—	$\Delta P_{Cu_2}$	[W]
איבודי ברזל ברוטור	—	$\Delta P_{Fe}$	[W]
איבודי חיכוך ואיורור	—	$\Delta P_{mech}$	[W]
איבודים נוספים	—	$\Delta P_{add}$	[W]
הספק המנוע בריקם	—	$P_o$	[W]
גורם החליקה	—	$s$	

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

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

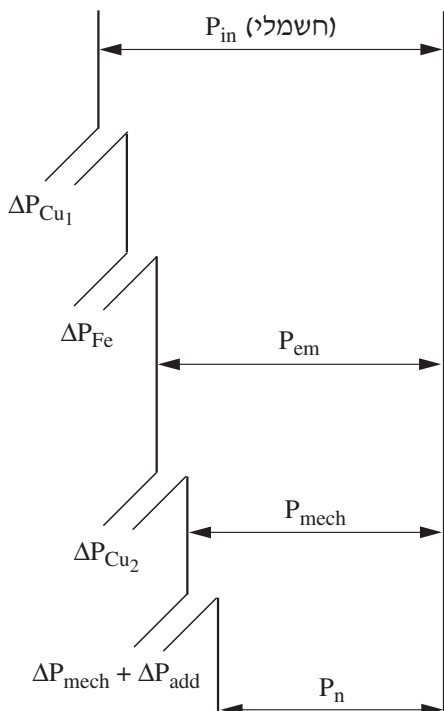
$$\Delta P_{Cu_2} = P_{em} \cdot s = P_{mech} \cdot \left( \frac{s}{1-s} \right)$$

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

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

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

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



#### 4.6 מומנטים

המהירות הזוויתית של הרוטור	$\omega_n$	$\left[ \frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$	$\omega_n = \frac{2\pi n_n}{60}$
המהירות הזוויתית של השדה המסתובב	$\omega_s$	$\left[ \frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$	$\omega_s = \frac{2\pi \cdot n_s}{60}$
מהירות סיבוב (סינכרונית) של השדה	$n_n$	[r.p.m]	$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = 9.55 \cdot \frac{P_n}{n_n}$
הספק נקוב המופק על-ידי המנוע	$P_n$	[W]	$M_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_s} = 9.55 \frac{P_{em}}{n_s}$
הספק אלקטרומגנטי	$P_{em}$	[W]	
מומנט אלקטרומגנטי בהתנעה	$M_{em_{start}}$	[N · m]	$M_{em} = \frac{3 \cdot 9.55 \cdot U_{ph}^2 \cdot R_2'}{n_s \left[ \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + X_T^2 \right]}$
מומנט אלקטרומגנטי	$M_{em}$	[N · m]	
מומנט מרבי (קריטי)	$M_k$	[N · m]	$M_{em_{start}} = \frac{3 \cdot 9.55 \cdot U_{ph}^2 \cdot R_2'}{n_s \left[ \left( R_1 + R_2' \right)^2 + X_T^2 \right]}$
			$M_k \cong \frac{3 \cdot 9.55 \cdot U_{ph}^2}{2 \cdot n_s \cdot X_T}$
			$M = \frac{2 \cdot M_k}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}}$
			$\frac{M_I}{M_{II}} = \left( \frac{U_I}{U_{II}} \right)^2$
			$\frac{M_{start}(\Delta)}{M_{start}(Y)} = 3$

## 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  $M_x$ :

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

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

## 4.8 תכנון מתנע הדרגתי למנוע השראתי בעל רוטור מלופף

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

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

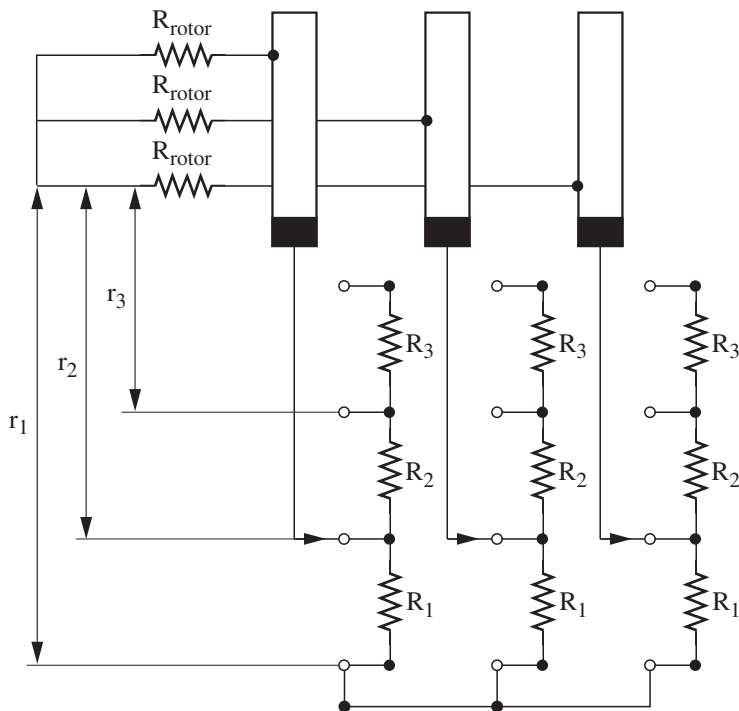
$$\lambda = \frac{M_{max}}{M_n}$$

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

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

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

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



## 5. כוחות ומומנטים במערכות הינע

### 5.1 תנועה קווית

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

$$F = F_s + F_d$$

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

### 5.2 תנועה סיבובית

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

$$M = M_s + M_d$$

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

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

$$GD^2 = 4gJ$$

## 6. העברת מומנטים

### תנועה סיבובית

העברת מומנט סטטי:

מומנט סטטי (נגדי) של המנגנון	—	$M_{sm}$ [kgf · m]
מומנט סטטי (נגדי) המועבר לציר המנוע	—	$M_s$ [kgf · m]
מהירות סיבוב ציר המנוע	—	$n$ [r.p.m]
מהירות סיבוב ציר המנגנון	—	$n_m$ [r.p.m]
נצילות התמסורת	—	$\eta$

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

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

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

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

העברת מומנטי תנופה לציר המנוע:

מומנט תנופה של המנוע	—	$GD_N^2$ [kgf · m <sup>2</sup> ]
מומנט תנופה של גלגל התמסורת ה- $i$ או העומס הנגדי ה- $i$	—	$GD_i^2$ [kgf · m <sup>2</sup> ]
מהירות סיבוב ציר המנוע	—	$n$ [r.p.m]
מהירות סיבוב הציר המשני של התמסורת או של העומס הנגדי	—	$n_i$ [r.p.m]

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

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

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



## העברת מסות ומומנטים מתנועה קווית לתנועה סיבובית

העברת כוח סטטי למומנט סיבובי על ציר המנוע:

$$M_s \text{ [N} \cdot \text{m]} - \text{המומנט הסטטי המועבר}$$

לציר המנוע

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

$$F_{sm} \text{ [N]} - \text{הכוח הנגדי של העומס}$$

(או של המטען)

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

$$v \text{ [m / s]} - \text{המהירות הקווית}$$

של המטען

$$n \text{ [r.p.m]} - \text{מהירות הסיבוב}$$

של ציר המנוע

$$\eta - \text{נצילות התמסורת}$$

$$D \text{ [m]} - \text{קוטר התוף}$$

העברת מסות למומנט תנופה:

$$G \text{ [kgf]} - \text{משקל הגוף}$$

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

## זמן התנועה וזמן עצירה

(בהנחה שהמומנט הדינמי ו- $GD^2$  קבועים)

$$GD^2 \text{ [kgf} \cdot \text{m}^2] - \text{מומנט תנופה}$$

$$n_1 \text{ [r.p.m]} - \text{מהירות סיבוב התחלתית}$$

$$n_2 \text{ [r.p.m]} - \text{מהירות סיבוב סופית}$$

$$M \text{ [N} \cdot \text{m]} - \text{מומנט סיבובי}$$

$$M_s \text{ [N} \cdot \text{m]} - \text{מומנט סטטי (נגדי)}$$

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

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

**בהצלחה !**