

סוג הבחינה: גמר לבתי-ספר לטכנאים ולהנדסאים

מועד הבחינה: אביב תשע"ז, 2017

סמל השאלון: 733913

נספחים: א. נוסחאון במערכות הספק לכיתה י"ד

ב. נוסחאון במכונות חשמל והינע

לכיתה י"ד

ג. מילון מונחים

## מערכות הספק ומכונות חשמל והינע ה'

למתמחים במערכות הספק פיקוד ובקרה במגמת הנדסת חשמל בקרה ואנרגיה

(כיתה י"ד)

### 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 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 מִרְב הנקודות מותנית בהשלמת כל המהלכים שלהלן, בסדר שבו הם רשומים:

\* רישום הנוסחה המתאימה.

\* הצבה של כל הערכים ביחידות המתאימות.

\* חישוב (אפשר באמצעות מחשבון).

\* רישום התוצאה המתקבלת, יחד עם יחידות המידה המתאימות.

\* ליווי הפתרון החישובי בהסבר קצר.

8. לנוחותך, לשאלון זה מצורף מילון מונחים בשפות עברית, אנגלית, רוסית וערבית. תוכל להיעזר בו בעת הצורך.

בשאלון זה 8 עמודים ו-40 עמודי נספחים.

ההנחיות בשאלון זה מנוסחות בלשון זכר,

אך מכוונות הן לנבחנות והן לנבחנים.

◀ המשך מעבר לדף

בהצלחה!

## השאלות

ענה על ארבע מבין השאלות 1-9. עליך לענות על שאלה אחת לפחות מן הפרק הראשון ועל שאלה אחת לפחות מן הפרק השני.

### פרק ראשון: מערכות הספק ב'

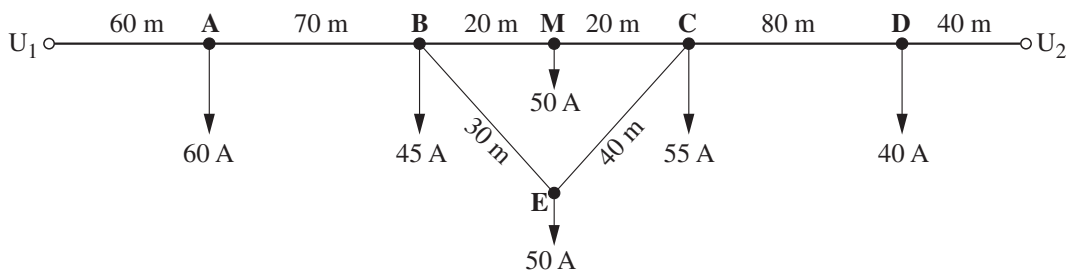
ענה על שאלה אחת לפחות מבין השאלות 1-4 (לכל שאלה – 25 נקודות).

#### שאלה 1

באיור לשאלה 1 מתוארת רשת תלת-מופעית המוזנת במתח שלוב של 400 V בשני קצותיה. מופעי המתחים זהים.

מוליכי הרשת עשויים מנחושת, שטח החתך האחיד שלהם הוא  $50 \text{ mm}^2$ , ומקדם ההספק של כל אחד מהצרכנים הוא 0.92.

הזנח בחישוביך את ההיגב ההשראותי של מוליכי הרשת.

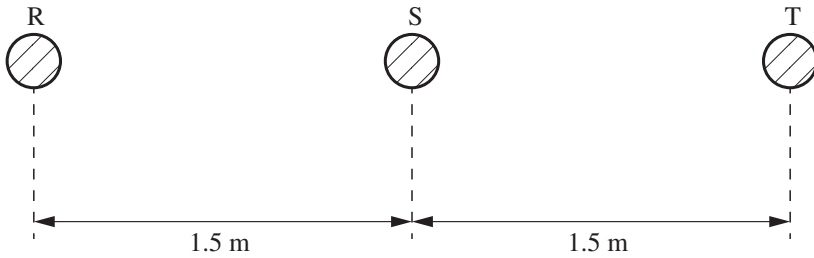


איור לשאלה 1

- א. חשב את הזרם בכל אחד מקטעי הרשת.
- ב. חשב את המתח המזערי ברשת.
- ג. חשב את איבודי ההספק בקטע הקו BM.

## שאלה 2

באיור לשאלה 2 מתואר סידור המוליכים בקו עילי תלת מופעי המוזן במתח נקוב של 120 kV. מוליכי הקו עשויים אלומיניום-ברזל (Al - Fe), הם שזורים וגלויים, ומועבר בהם הספק של 80 MVA במקדם הספק 0.9 השראותי. טמפרטורת הסביבה היא  $20^{\circ}\text{C}$  ומקדם מבנה המוליכים הוא  $m_1 = 0.7$ .

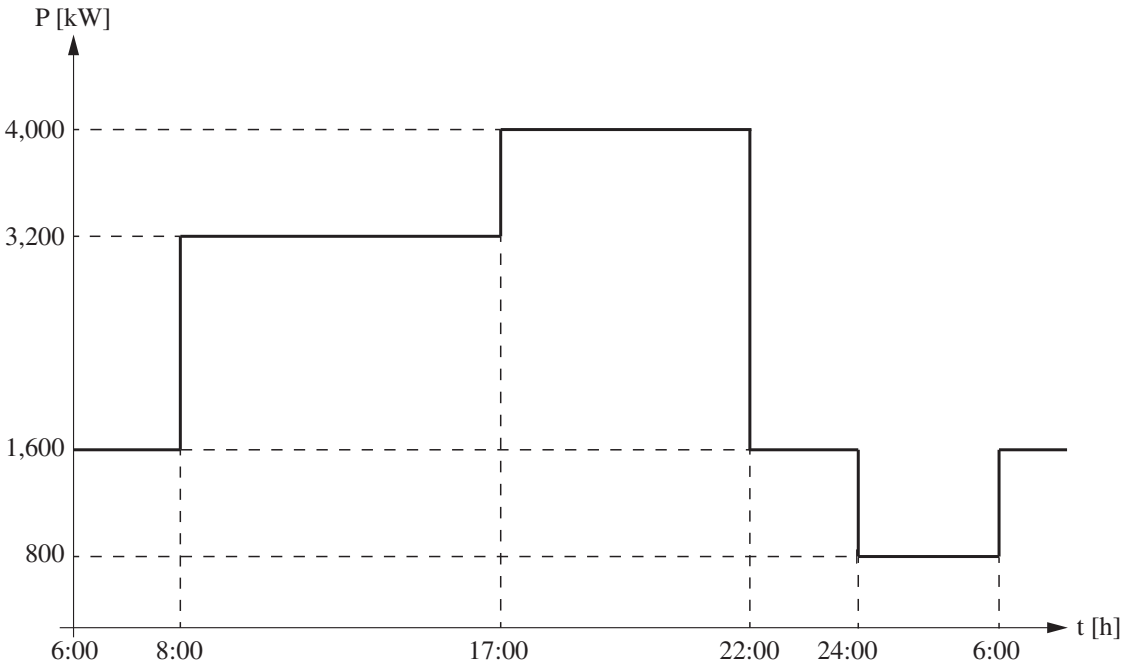


### איור לשאלה 2

- א. 1. קבע את שטח החתך של מוליכי הקו.
  2. נתון כי האוויר לח, ולחץ האוויר הוא 74 cm Hg. הראה, באמצעות חישוב, כי בקו מתקיימת תופעת הקורונה.
- ב. חשב את הפסדי הקורונה לק"מ בקו.
- ג. נתון כי אורך הקו הוא 150 km ושהמתח השלוב בתחילת הקו הוא 120 kV. חשב עד איזה מרחק מתחילת הקו מתקיימת תופעת הקורונה במופע R.

### שאלה 3

באיור לשאלה 3 נתון עקום העמסה יומי של עומס המזון על-ידי תחנת משנה (תחמ"ש).  
עקום ההעמסה היומי זהה לאורך כל ימות השנה.  
קו ההזנה לתחמ"ש הוא כבל תת-קרקעי שעשוי נחושת ושארורכו 100 km .  
מקדם ההספק של העומס הוא 0.9 השראותי.



### איור לשאלה 3

- א. חשב את המתח המומלץ, מבחינה כלכלית, של קו ההזנה אם נתון שהפסדי ההספק המרביים בקו הם 6% .
- ב. חשב את שטח החתך המומלץ של קו ההזנה בהתבסס על צפיפות זרם כלכלית.  
בחישובך התבסס על מתח נקוב מתאים מבין המתחים הנתונים ברשימה שלפניך:  
110 kV ; 161 kV ; 230 kV ; 400 kV
- ג. חשב את הפסדי האנרגייה היומית בקו ההזנה.

#### שאלה 4

בקו הזנה עילי תלת-מופעי 22 kV/50 Hz מועבר הספק של 40 MW במקדם הספק 0.85 השראותי. השנאי המזין את קו ההזנה, מחובר בחיבור D/y ונקודת האפס מוארקת באמצעות סליל פטרסון.

#### נתוני קו ההזנה:

- אורך הקו: 5 km

- ההתנגדות הסגולית של מוליך ליחידת אורך:  $0.015 \Omega/\text{km}$

- ההיגב ההשראותי של מוליך ליחידת אורך:  $0.4 \Omega/\text{km}$

- קיבול הקו ליחידת אורך:  $100 \frac{\text{nF}}{\text{km}}$

א. 1. חשב את ערכי פרמטרי האורך והרוחב של מעגל תמורה מופעי מסוג T של קו ההזנה. בחישובך הזנח את תופעת הקורונה.

2. סרטט את מעגל התמורה הנ"ל, וציין על-גבי הסרטוט את הערכים שחישבת.

ב. חשב את הפסדי ההספק הממשיים וההיגביים בקו ההזנה.

ג. 1. חשב מהו המתח על סליל פטרסון לפני התרחשות קצר חד-מופעי לאדמה בקו, ובזמן התרחשות הקצר.

2. בזמן שמתרחש בקו קצר חד-מופעי לאדמה, זרם הקצר השקול מתאפס. חשב את ההשראות של סליל פטרסון.

## פרק שני: המרת אנרגייה והינע ב'

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

### שאלה 5

נתוניו הנקובים של מנוע השראה תלת-מופעי בעל רוטור מלופף, שסלילי הסטטור שלו מחוברים בחיבור משולש וסלילי הרוטור שלו מחוברים בחיבור כוכב הם:

$$P_n = 20 \text{ kW} ; U_n = 400 \text{ V} ; I_{n1} = 40 \text{ A} ; I_{n2} = 42 \text{ A} ; n_n = 1,460 \text{ rpm} ; f = 50 \text{ Hz}$$

**הערה:** הזנח בחישוביך את איבודי ההספק המכניים.

**א.** חשב את ההתנגדות של סלילי הרוטור.

**ב.** המנוע מועמס ב-80% מהעומס הנקוב. חשב את ערכו של הנגד שיש לחבר בטור לכל סליל ברוטור, כדי שמהירות הסיבוב של המנוע תרד ל-1,200 rpm.

**ג.** מפעילים את המנוע הנתון במשטר עבודה של 30 דקות פעולה ו-3 שעות הפסקה, באופן מחזורי. נתון כי קבוע הזמן התרמי הוא 20 דקות ושההפסדים הקבועים הם 40% מכלל ההפסדים בעומס נקוב.

1. קבע מהו סוג משטר העבודה של המנוע.

2. חשב את הספק העומס המרבי שמותר להעמיס על ציר המנוע, כאשר סלילי הרוטור מקוצרים ללא נגדים טוריים.

### שאלה 6

נתוניו הנקובים של מנוע לזרם ישר בעירור זר הם:

$$P_n = 6 \text{ kW} ; U_n = 250 \text{ V} ; n_n = 1,200 \text{ rpm} ; \eta = 80\% ; R_a = 0.3 \Omega$$

**הערה:** הזנח בחישוביך את מפל המתח על הפחמים ואת תגובת העוגן.

המנוע, המועמס בעומס נקוב, מועבר לבלימה בחיבור נגדי.

**א.** חשב את הערך של נגד הבלימה ( $R_b$ ), שיש לחבר בטור לסליל הרוטור, כדי להגביל את זרם הבלימה ההתחלתי ל- $2I_{an}$ .

**ב.** חשב את זרם הבלימה בעת עצירת המנוע.

- ג. סרטט, על-גבי מערכת צירים אחת, את האופיין המכני הטבעי של המנוע,  $n = f(I_a)$ , ואת האופיין המכני שלו בבלימה בחיבור הנגדי. ציין על-גבי הסרטוט את הערכים הבאים:
- המהירויות:  $n_o, n_n$
- הזרמים:  $I_{b_2}$  (זרם בלימה בעת עצירת המנוע),  $I_{b_1}$  (זרם בלימה התחלתית),  $I_{a_n}$ .

## שאלה 7

נתוניו הנקובים של מנוע סינכרוני תלת-מופעי בעל שני זוגות קטבים הם:

$$P_n = 25 \text{ kW} ; U_n = 400 \text{ V} ; f = 50 \text{ Hz} ; \eta = 0.9 ; X_s = 1 \Omega$$

המנוע עובד בחלק הליניארי של עקומת המינגוט. סלילי הסטטור מחוברים בחיבור כוכב והתנגדותם זניחה.

בניסוי בריקם נדרש זרם עירור של  $I_f = 10 \text{ A}$  כדי שהכא"מ שיתקבל יהיה שווה למתח הנקוב.

- א. נתון כי המנוע פועל בתנאים נקובים ובמקדם הספק 0.8 השראותי. חשב את:

1. הכא"מ המופעי המושרה.

2. הזווית בין המתח המופעי לכא"מ המופעי.

3. זרם העירור.

- ב. מגדילים ב-30% את זרם העירור שחישבת בתשובתך לסעיף א, כאשר המנוע פועל בנצילות נקובה ומועמס בהספק נקוב.

חשב את הזרם הנצרך מהרשת ואת מקדם ההספק של המנוע. קבע את אופי פעולתו של המנוע.

- ג. סרטט עקומות "V" עקרוניות של המנוע. ציין, על-גבי הסרטוטים, את זרם הסטטור ואת זרם העירור בריקם במצבי העבודה המתוארים בסעיפים א' ו-ב'.

**פרק שלישי: מערכות וטכניקות בקרה**  
(לכל שאלה - 25 נקודות)

**שאלה 8**

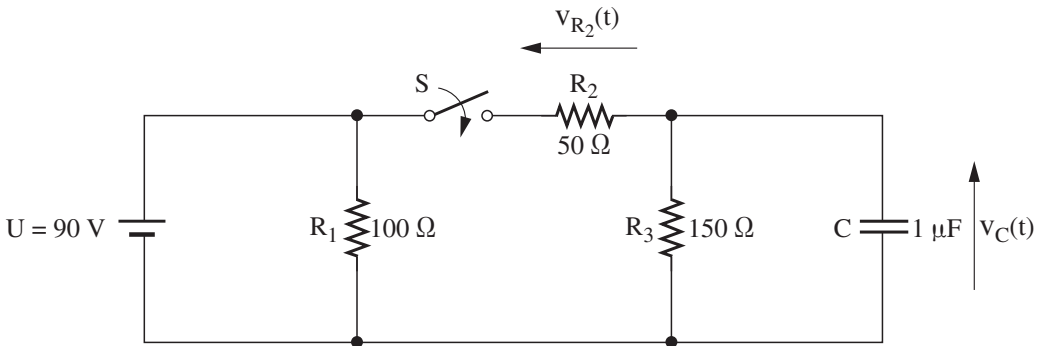
$$H(j\omega) = \frac{100 \cdot \left( j \frac{\omega}{10^3} \right)}{\left( 1 + j \frac{\omega}{10^4} \right)}$$

נתונה פונקציית התמסורת הזאת:

חשב וסרטט עקום בודה אסימפטוטי (עקרוני), המתאר את ההגבר (ביחידות dB) של פונקציית התמסורת  $H(j\omega)$  כפונקציה של התדירות הזוויתית. ציין על-גבי העקום את ההגברים והתדירויות המתאימים.

**שאלה 9**

באיור לשאלה 9 נתון מעגל חשמלי. המתח על הקבל לפני סגירת המפסק היה:  $v_C(t) = 0$ .



**איור לשאלה 9**

בזמן  $t = 0$  סוגרים את המפסק S.

- א. חשב את קבוע הזמן של המעגל.
- ב. חשב את המתח הסופי על-פני הקבל.
- ג. סרטט זה מתחת לזה בהתאמה, גרף עקרוני המתאר את המתח  $v_{R_2}(t)$  על-פני הנגד  $R_2$  ואת המתח  $v_{R_3}(t)$  על-פני הנגד  $R_3$  כפונקצייה של הזמן עבור  $t \geq 0$ . ציין על-גבי הסרטוטים את ערכי המתחים המתאימים.

**בהצלחה!**



אין להעביר את הנוסחאון  
לנבחן אחר

מקום לנספח בקת נבחן

## נוסחאון במערכות הספק לכיתה י"ד (16 עמודים)

### 1. מפלי מתח

מתח ישר

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

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

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

מתח חילופין חד-מופע

מפל מתח מרבי	-	$\Delta U$ [V]
מפל מתח מרבי ממשי	-	$\Delta U_a$ [V]
מפל מתח מרבי היגבי	-	$\Delta U_r$ [V]
היגב הקו ליחידת אורך עבור מוליך אחד	-	$X_o$ [ $\Omega / \text{m}$ ]
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 / $\Omega\text{mm}^2$ ]
שטח חתך של המוליכים	-	A [mm <sup>2</sup> ]
הפסדי הספק מרביים	-	$\Delta P$ [W]
הזרם הממשי בקטע k	-	$I_a$ [A]
הזרם ההיגבי בקטע k	-	$I_r$ [A]

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

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

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

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

$$I_a = I \cos \varphi$$

$$I_r = I \sin \varphi$$

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

$$\vec{I} = I_a + jI_r = I \angle \varphi_k$$

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	-	$X_o$ [ $\Omega / m$ ]
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	-	$\gamma$ [ $m / \Omega mm^2$ ]
שטח חתך של המוליכים	-	$A$ [ $mm^2$ ]
הפסדי הספק מרביים	-	$\Delta P$ [W]
הזרם הממשי בקטע k	-	$I_a$ [A]
הזרם ההיגבי בקטע k	-	$I_r$ [A]

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

**2. צפיפות זרם אחידה**

שטח חתך בקטע k	-	$A_k$ [ $mm^2$ ]
זרם בקטע k	-	$I_k$ [A]
אורך של קטע k	-	$L_k$ [m]
מוליכות סגולית של המוליכים	-	$\gamma$ [ $m / \Omega mm^2$ ]
מפל המתח המרבי	-	$\Delta U$ [V]
מפל המתח הממשי המרבי	-	$\Delta U_a$ [V]
הזווית בין מתח לזרם בקטע k	-	$\varphi_k$

$A_k = K \cdot I_k$	
$K = \frac{2 \sum_{k=1}^{k=n} L_k}{\gamma \Delta U}$	זרם ישר
$K = \frac{2 \sum_{k=1}^{k=n} (L_k \cos \varphi_k)}{\gamma \Delta U_a}$	זרם חילופין חד-מופעי
$K = \frac{\sqrt{3} \sum_{k=1}^{k=n} (L_k \cos \varphi_k)}{\gamma \Delta U_a}$	זרם חילופין תלת-מופעי

### 3. מינימום חומר

#### זרם ישר

- שטח חתך בקטע k -  $A_k$  [mm<sup>2</sup>]
- זרם בקטע k -  $I_k$  [A]
- מוליכות סגולית של המוליכים -  $\gamma$  [m / Ωmm<sup>2</sup>]
- מפל המתח המרבי -  $\Delta U$  [V]
- אורך של קטע k -  $L_k$  [m]

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

$$A_k = K \sqrt{I_k}$$

#### זרם חילופין חד-מופעי

- שטח חתך בקטע k -  $A_k$  [mm<sup>2</sup>]
- זרם בקטע k -  $I_k$  [A]
- מוליכות סגולית של המוליכים -  $\gamma$  [m / Ωmm<sup>2</sup>]
- מפל המתח הממשי המרבי -  $\Delta U_a$  [V]
- הזווית בין מתח לזרם בקטע k -  $\varphi_k$
- אורך של קטע k -  $L_k$  [m]

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

$$A_k = K \sqrt{I_k \cos \varphi_k}$$

#### זרם חילופין תלת-מופעי

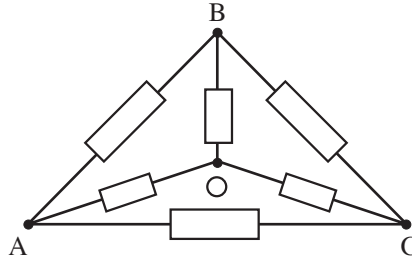
- שטח חתך בקטע k -  $A_k$  [mm<sup>2</sup>]
- זרם בקטע k -  $I_k$  [A]
- מוליכות סגולית של המוליכים -  $\gamma$  [m / Ωmm<sup>2</sup>]
- מפל המתח הממשי המרבי -  $\Delta U_a$  [V]
- הזווית בין מתח לזרם בקטע k -  $\varphi_k$
- אורך של קטע k -  $L_k$  [m]

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

$$A_k = K \sqrt{I_k \cos \varphi_k}$$

4. חישובים ברשתות

הפיכת משולש לכוכב

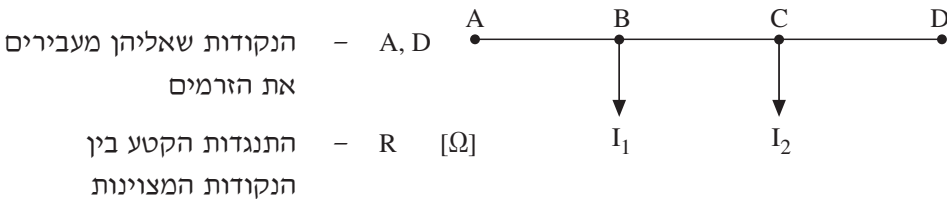


$$R_{OB} = \frac{R_{AB} \cdot R_{BC}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{AC}}$$

$$R_{OC} = \frac{R_{BC} \cdot R_{AC}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{AC}}$$

$$R_{OA} = \frac{R_{AB} \cdot R_{AC}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{AC}}$$

פירוק הזרמים והעברתם לנקודות חדשות



הערה:

כאשר מוליכי הרשת עשויים מאותו חומר ושטח החתך אחיד לכל אורכם, ניתן להשתמש באורכים במקום בהתנגדויות בנוסחאות אלו.

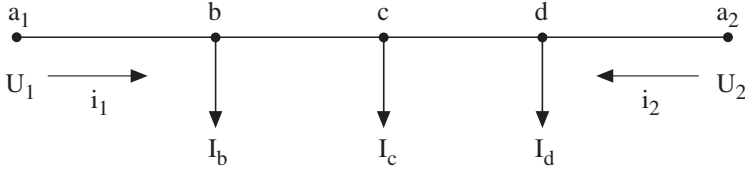
$$I_{1 \rightarrow A} = I_1 \frac{R_{BD}}{R_{AD}}$$

$$I_{1 \rightarrow D} = I_1 \frac{R_{AB}}{R_{AD}}$$

$$I_{2 \rightarrow A} = I_2 \frac{R_{CD}}{R_{AD}}$$

$$I_{2 \rightarrow D} = I_2 \frac{R_{AC}}{R_{AD}}$$

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



הזרמים המדומים:

**הערות:**

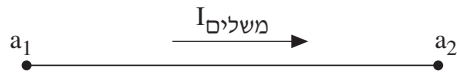
1. כאשר מוליכי הרשת עשויים מאותו חומר ושטח החתך שלהם אינו אחיד לכל אורכם, יש להשתמש בהתנגדויות במקום באורכים בנוסחאות לחישוב הזרמים המדומים.
2. במערכת זרם חילופין יש לבצע חישובים של זרם מדומה, זרם אקטיבי זרם ריאקטיבי.

$$i_1 = \frac{I_b \cdot L_{ba_2} + I_c \cdot L_{ca_2} + I_d \cdot L_{da_2}}{L_{a_1 a_2}}$$

$$i_2 = \frac{I_b \cdot L_{ba_1} + I_c \cdot L_{ca_1} + I_d \cdot L_{da_1}}{L_{a_1 a_2}}$$

**רשת בעלת זינה משני כיוונים במתחים שונים בעלי מופעים זהים**

הזרם המשלים:



זרם ישר/זרם חילופין חד-מופעי

(כאשר  $U_1 > U_2$ )

$$I_{\text{משלים}} = \frac{U_1 - U_2}{2 \cdot R_{a_1 a_2}}$$

זרם חילופין תלת-מופעי

(כאשר  $U_1 > U_2$ )

$$I_{\text{משלים}} = \frac{U_1 - U_2}{\sqrt{3} \cdot R_{a_1 a_2}}$$

$$I_1 = i_1 + I_{\text{משלים}}$$

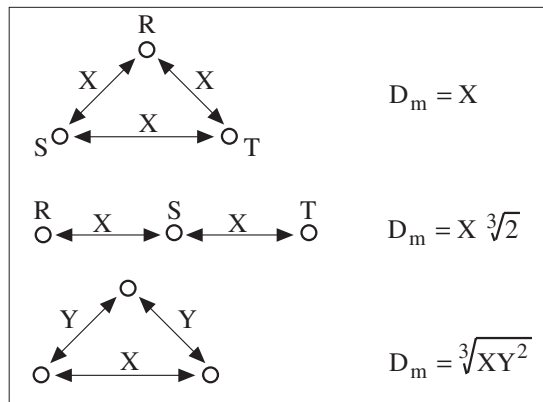
$$I_2 = i_2 - I_{\text{משלים}}$$

הזרם האמיתי:

5. פרמטרים של קווי הספק

הפסד הספק אקטיבי	- $\Delta P$ [W]	$\Delta P = 3I^2 R_o L$
הפסד הספק היגבי (השראותי)	- $\Delta Q_L$ [VAr]	$\Delta Q_L = 3I^2 X_o L$
התנגדות הקו ליחידת אורך עבור מוליך אחד	- $R_o$ [ $\Omega / km$ ]	
היגב הקו ליחידת אורך עבור מוליך אחד	- $X_o$ [ $\Omega / km$ ]	$X_o = 0.144 \log \frac{D_m}{r} + 0.016$
אורך הקו	- $L$ [km]	$\Delta Q_C = \sqrt{3} I_C U$
המרחק הממוצע בין המוליכים	- $D_m$ [cm]	
רדיוס המוליך	- $r$ [cm]	$I_C = \frac{U}{\sqrt{3}} C_o L \omega \cdot 10^{-6}$ עבור: $f = 50Hz$ $I_C = 0.181 U C_o L \cdot 10^{-3}$
הפסד הספק היגבי (קיבולי)	- $\Delta Q_C$ [VAr]	
זרם הזליגה של הקו	- $I_C$ [A]	
קיבול קו עילי ליחידת אורך עבור מוליך אחד	- $C_o$ [ $\mu F / km$ ]	$C_o = \frac{0.0242}{D_m \log \frac{D_m}{r}}$
המתח השלוב של הרשת	- $U$ [V]	

המרחק בין המוליכים	- $X$ [cm]
המרחק הממוצע בין המוליכים	- $D_m$ [cm]



6. פרמטרים של שנאים

התנגדות השנאי	-	$R_T$	[Ω]	$R_T = \Delta P_{Cu} \cdot \frac{U_n^2}{S_n^2}$
הפסדי קצר	-	$\Delta P_{Cu}$	[W]	
מתח נקוב של השנאי	-	$U_n$	[V]	
הפסק נקוב של השנאי	-	$S_n$	[VA]	$R_T = \frac{U_{r\%} \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n}$
הרכיב הממשי של מתח הקצר (באחוזים)	-	$U_{r\%}$		
הרכיב ההיגבי של מתח הקצר (באחוזים)	-	$U_{x\%}$		$X_T = \frac{U_{x\%} \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n}$
מתח הקצר (באחוזים)	-	$U_{k\%}$		$U_{x\%} = \sqrt{U_{k\%}^2 - U_{r\%}^2}$
היגב השנאי	-	$X_T$	[Ω]	
עכבת השנאי	-	$Z_T$	[Ω]	$Z_T = \sqrt{R_T^2 + X_T^2}$
מוליכות השנאי	-	$G_T$	[S]	
מתירות השנאי	-	$Y_T$	[S]	$G_T = \frac{\Delta P_{Fe}}{U_n^2}$
מניחות השנאי	-	$B_T$	[S]	
הפסדי ריקם	-	$\Delta P_{Fe}$	[W]	
זרם ריקם	-	$I_0$	[A]	$Y_T = \frac{I_0}{U_n} = \frac{I_{0\%} \cdot S_n}{100 \cdot U_n^2}$
זרם ריקם (באחוזים)	-	$I_{0\%}$		$B_T = \sqrt{Y_T^2 - G_T^2}$

**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 של הסביבה:  $35^{\circ}\text{C}$**

1. מקדם תיקון עבור טמפרטורה אופפת שונה של הסביבה

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. מקדם תיקון עבור התקנת כבלים רב-גידיים ללא רווח ביניהם

(1) התקנה בשכבה אחת:

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

(2) התקנה בשכבות אחדות או במקובץ:

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



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

מוליכים מאלומיניום		מוליכים מנחושת	
זרם מתמיד I <sub>Z</sub> (אמפר)	חתך S (ממ"ר)	זרם מתמיד מרבי I <sub>Z</sub> (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**

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. 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	

**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 נחושת 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

המוליכות -  $\gamma$  [m / Ωmm<sup>2</sup>]

הסגולית

המשקל - g [g / cm<sup>3</sup>]

הסגולי

חומרים		γ
חמרון	נחושת	
35	57	g
2.7	8.9	g

**זרם מרבי (באמפר) בכבלים, במתח נמוך עד 1000 V  
(טמפרטורת הסביבה: 20 °C)**

כבלי חמרן NAYY ; NAYFGBY ; NAYCY		כבלי נחושת NYY ; NYFGBY ; NYCY		חתך (ממ"ר)
באדמה	באוויר	באדמה	באוויר	
—	—	25	20	3 × 1.5
—	—	35	28	3 × 2.5
36	29	45	36	3 × 4
48	38	60	48	3 × 6
64	51	80	64	3 × 10
88	70	110	88	3 × 16
110	88	135	110	3 × 25
130	105	165	130	3 × 35
160	130	200	160	3 × 50
195	155	245	195	3 × 70
235	190	295	235	3 × 95
270	215	340	270	3 × 120
310	250	390	310	3 × 150
355	285	445	355	3 × 185
410	330	515	410	3 × 240

**7. ויסות מתח**

- הפרשי מתח בנקודה K -  $\delta U_K$  [%]
- תוספות של מתח בשנאים -  $U_T$  [%]
- מפלי מתח מהמקור עד לנקודה K -  $\Delta U_{AK}$  [%]
- הפרשי מתח מזעריים -  $\delta U_{\min}$  [%]
- הפרשי מתח מרביים -  $\delta U_{\max}$  [%]
- מתח הייחוס -  $U_n$  [V]
- מפל מתח -  $\Delta U$  [V]
- הספק פעיל של העומס -  $P$  [W]
- התנגדות -  $R$  [ $\Omega$ ]
- הספק עיוור של העומס -  $Q$  [VA<sub>r</sub>]
- היגב -  $X$  [ $\Omega$ ]
- מפל המתח על השנאי -  $\Delta U_T$  [%]
- מפל המתח על הקו -  $\Delta U_L$  [%]
- זרם הרשת -  $I$  [A]
- התנגדות השנאי (למופע) -  $R_T$  [ $\Omega$ ]
- ההיגב ההשראותי של שנאי (למופע) -  $X_T$  [ $\Omega$ ]
- ההתנגדות של מוליך אחד -  $R_L$  [ $\Omega$ ]
- ההיגב ההשראותי של מוליך אחד -  $X_L$  [ $\Omega$ ]
- יחס השנאה -  $K_x$
- מתח בסליל הראשוני -  $U_1$  [V]
- מתח בסליל השניוני -  $U_2$  [V]
- מספר דרגות ויסות -  $n$
- שיעור ויסות המתח -  $a$

$$\delta U_K = \Sigma(U_T) - \Sigma(\Delta U_{AK})$$

$$\delta U_{\min} < \delta U_K < \delta U_{\max}$$

$$\Delta U = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_n}$$

$$\Delta U_T \% = \frac{\sqrt{3}(I'R_T + I''X_T)}{U_n} \cdot 100$$

$$\Delta U_L \% = \frac{\sqrt{3}(I'R_L + I''X_L)}{U_n} \cdot 100$$

$$I' = I \cos \varphi ; I'' = I \sin \varphi$$

$$K_x = \frac{U_1 \pm n \cdot a}{U_2}$$

8. מתח קורונה

- $U_{KR}$  [kV] - מתח קורונה שלוב בסידור של מוליכים במשולש
- $b$  [cm Hg] - לחץ האוויר
- $t$  [°C] - טמפרטורת הסביבה
- $D_m$  [cm] - המרחק הממוצע בין המוליכים
- $r$  [cm] - רדיוס המוליך
- $m_1$  - מקדם מבנה המוליך
- \* מלא: 1
- \* שזור: 0.7 - 0.9
- $m_2$  - מקדם מזג האוויר
- \* יבש: 1
- \* רטוב: 0.8
- $U_O$  [kV] - מתח מופעי של הרשת
- $U_{OKR}$  [kV] - מתח קורונה מופעי
- $\Delta P_{OKR}$  [kW / km] - הפסדי קורונה במופע אחד

$$U_{KR} = \sqrt{3} \cdot 21.1 \cdot r \cdot 2.3 \log \frac{D_m}{r} m_1 m_2 \delta$$

$$\delta = \frac{3.92 \cdot b}{273 + t}$$

R	S	T	שינויים של מתח קורונה מופעי
o	o	o	
+6%	-4%	+6%	

עבור:  $f = 50 \text{ Hz}$

$$\Delta P_{OKR} = \frac{0.18}{\delta} \sqrt{\frac{r}{D_m}} (U_O - U_{OKR})^2$$

9. נקודת האפס ברשת חשמל

- $I_C$  [A] - זרם תקלה
- $\omega$   $\left[ \frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$  - התדר הזוויתי של הרשת
- $C$  [F] - קיבול הקו
- $C_o$  [F / km] - קיבול הקו ליחידת אורך
- $L$  [km] - אורך הקו
- $U_{ph}$  [V] - מתח קווי
- $L^*$  [H] - השראות סליל פטרסון

$$I_C = 3 \cdot \omega \cdot C \cdot U_{ph} = 3 \cdot \omega \cdot C_o \cdot L \cdot U_{ph}$$

$$L^* = \frac{1}{3 \cdot \omega^2 \cdot C}$$

10. צפיפות זרם כלכלית (מערכת תלת-מופעית)

המתח המומלץ	- U	[kV]	$U = \frac{\sqrt{3} j L \cdot 100}{\Delta P_{\%} \gamma \cos \varphi}$
צפיפות זרם כלכלית	- j	[A / mm <sup>2</sup> ]	
אורך הקו	- L	[km]	$I_{\max} = \frac{P_{\max}}{\sqrt{3} U_n \cos \varphi}$
הפסדי הספק מרביים	- ΔP <sub>%</sub>		
מוליכות סגולית	- γ	[m / Ωmm <sup>2</sup> ]	$A = \frac{I_{\max}}{j}$
הזווית בין מתח לזרם בקו	- φ		
הזרם המרבי	- I <sub>max</sub>	[A]	
ההספק המרבי	- P <sub>max</sub>	[kW]	
המתח הנקוב	- U <sub>n</sub>	[kV]	
שטח חתך מומלץ	- A	[mm <sup>2</sup> ]	
אנרגיה שנתית	- W <sub>ψ</sub>	[kWh]	$W_{\psi} = \int_0^{8760} P dt$
הספק רגעי	- P	[kW]	$P_{av} = \frac{W_{\psi}}{8760}$
הספק ממוצע	- P <sub>av</sub>	[kW]	
זמן שימוש בהספק מרבי	- T <sub>v</sub>	[h]	$T_v = \frac{W_{\psi}}{P_{\max}} = \frac{P_{av} \cdot 8760}{P_{\max}} = \frac{1}{P_{\max}} \int_0^{8760} P dt$

T <sub>v</sub> [h]	j [A / mm <sup>2</sup> ]			
	כבלים		קווים עיליים	
	Cu	Al	Cu	Al-Fe
T <sub>v</sub> > 5000 h	2	1.3	1.25	0.75
3000 h < T <sub>v</sub> < 5000 h	2.25	1.5	1.75	1
T <sub>v</sub> < 3000 h	2.65	1.65	2.5	1.5

חישוב כלכלי של שטח החתך המומלץ:

ההשקעה לשנה בבניית רשת החשמל	-	$C_1$	[נ"ש]	$C_1 = (a \cdot A + b) \cdot L \cdot p$
חלק ההשקעה התלוי בשטח החתך של המוליכים	-	$a$	$\left[ \frac{\text{נ"ש}}{\text{km} \cdot \text{mm}^2} \right]$	
שטח החתך של המוליכים	-	$A$	$[\text{mm}^2]$	
חלק ההשקעה שאינו תלוי בשטח החתך של המוליכים	-	$b$	$\left[ \frac{\text{נ"ש}}{\text{km}} \right]$	
אורך הקו	-	$L$	$[\text{km}]$	
החזר שנתי של ההוצאות, ריבית ופחת	-	$p$	$\left[ \frac{\%}{100} \right]$	

$$C_2 = 3 \cdot I_{\max}^2 \cdot R \cdot T_S \cdot c = 3 \cdot I_{\max}^2 \cdot \frac{\rho L}{A} \cdot T_S \cdot c$$

ההוצאות לכיסוי הפסדי ההספק ברשת	-	$C_2$	[נ"ש]	
זרם העומס העובר בקו	-	$I_{\max}$	$[\text{A}]$	$T_S = \frac{\int_0^t I^2 dt}{I_{\max}^2} = \frac{\sum (I^2 \cdot t)}{I_{\max}^2} = \frac{\sum (S^2 \cdot t)}{S_{\max}^2}$
התנגדות המוליכים	-	$R$	$[\text{k}\Omega]$	
זמן ההפסדים המרביים ברשת	-	$T_S$	$[\text{h}]$	
מחיר האנרגיה החשמלית	-	$c$	$\left[ \frac{\text{נ"ש}}{\text{kWh}} \right]$	
התנגדות סגולית של המוליכים	-	$\rho$	$\left[ \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \right]$	

נוסחת קלווין:

$$A = I_{\max} \sqrt{\frac{3 \cdot \rho \cdot T_S \cdot c}{a \cdot p}} = I_{\max} \sqrt{\frac{3 \cdot T_S \cdot c}{\gamma \cdot a \cdot p}}$$

מוליכות סגולית של המוליכים	-	$\gamma$	$\left[ \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} \right]$
----------------------------	---	----------	--

### 11. הפסדי הספק והפסדי אנרגיה ברשת חשמל

הפסדי אנרגיה ברשת חשמל:

הפסדי הספק בעומס מרבי	-	$\Delta P_{\max}$ [kW]	(כאשר העומס קבוע)	$\Delta W = \Delta P \cdot t$
זמן ההפסדים המרביים ברשת	-	$T_S$ [h]	(כאשר העומס משתנה)	$\Delta W = \Delta P_{\max} \cdot T_S$

הפסדי אנרגיה בשנאי:

הפסדי הספק בריקם (הפסדי ברזל)	-	$\Delta P_o$ [kW]		$\Delta W = \Delta P_o \cdot t + \beta_{\max}^2 \cdot \Delta P_{Cu_n} \cdot T_S$
הפסדי הספק בקצר (הפסדי נחושת)	-	$\Delta P_{Cu_n}$ [kW]		
מקדם ההעמסה של השנאי	-	$\beta$		$\beta = \frac{S}{S_n}$

כאשר N שנאים זהים מחוברים זה לזה במקביל:

מספר השנאים	-	N		$\Delta W = N \cdot \Delta P_o \cdot t + \frac{\beta_{\max}^2}{N} \cdot \Delta P_{Cu_n} \cdot T_S$
-------------	---	---	--	--

העמסה אופטימלית של שנאי:

(מבחינת חיסכון בהפסדי אנרגיה)	$S_{\max} = S_n \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_o \cdot t}{\Delta P_{Cu_n} \cdot T_S}}$	(מבחינת חיסכון בהפסדי הספק)	$S_{\max} = S_n \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_o}{\Delta P_{Cu_n}}}$
-------------------------------	--	-----------------------------	--

ההספק האופטימלי להפעלת שנאי הנוסף ל-N שנאים:

(מבחינת חיסכון בהפסדי הספק)	$S_{\max} = S_n \cdot \sqrt{\frac{N \cdot (N + 1) \cdot \Delta P_o}{\Delta P_{Cu_n}}}$
-----------------------------	--

**בהצלחה!**



אין להעביר את הנוסחאון  
לנבחן אחר

מקום למציאת נבחן

## נוסחאון במכונות חשמל והינע לכיתה י"ד

(22 עמודים)

### א. מכונה סינכרונית

#### 1. מחולל סינכרוני

משוואות מתחים וקטורית

כא"מ מופעי  $E_{ph}$  [V] -

מתח מופעי  $U_{ph}$  [V] -

זרם מופעי בסטטור  $I_{ph}$  [A] -

התנגדות העוגן למופע אחד  $R_a$  [ $\Omega$ ] -

היגב סינכרוני למופע אחד  $X_s$  [ $\Omega$ ] -

$$\vec{E}_{ph} = \vec{U}_{ph} + \vec{I}_{ph} (R_a + j X_s)$$

(בהזנחת התנגדות העוגן)

$$\vec{E}_{ph} = \vec{U}_{ph} + \vec{I}_{ph} \cdot j X_s$$

חישוב היגב סינכרוני

כא"מ מופעי בניסוי בריקם  $E_{pho}$  [V] -

כא"מ מופעי בניסוי בקצר  $E_{phk}$  [V] -

זרם מופעי בסטטור בניסוי בקצר  $I_{phk}$  [A] -

זרם עירור בניסוי בריקם  $I_{fo}$  [A] -

זרם עירור בניסוי בקצר  $I_{fk}$  [A] -

$$X_s \approx \frac{E_{phk}}{I_{phk}}$$

(בהזנחת  $R_a$  ובעקום מיגנוט לינארי)

$$\frac{E_{phk}}{E_{pho}} = \frac{I_{fk}}{I_{fo}}$$

עבור עומס התנגדותי ( $\varphi = 0^\circ$ ):

- |  |  |
|--|--|
| <p><math>\varphi</math> - הזווית בין הזרם המופעי למתח המופעי</p> | $E_{ph} = \sqrt{(U_{ph} + I_{ph} \cdot R_a)^2 + (I_{ph} \cdot X_s)^2}$ |
| <p><math>\psi</math> - הזווית בין הזרם המופעי לכא"מ המופעי</p>   | $\tan \Theta = \frac{I_{ph} \cdot X_s}{U_{ph} + I_{ph} \cdot R_a}$     |
| <p><math>\Theta</math> - הזווית בין המתח המופעי לכא"מ המופעי</p> |  |

עבור עומס השראותי ( $0^\circ < \varphi \leq 90^\circ$ ):

$$E_{ph} = \sqrt{(U_{ph} \cdot \cos \varphi + I_{ph} \cdot R_a)^2 + (U_{ph} \cdot \sin \varphi + I_{ph} \cdot X_s)^2}$$

$$\tan \Psi = \frac{U_{ph} \cdot \sin \varphi + I_{ph} \cdot X_s}{U_{ph} \cdot \cos \varphi + I_{ph} \cdot R_a}$$

$$\Theta = \Psi - \varphi$$

עבור עומס קיבולי ( $-90^\circ \leq \varphi < 0^\circ$ ):

$$E_{ph} = \sqrt{(U_{ph} \cdot \cos \varphi + I_{ph} \cdot R_a)^2 + (U_{ph} \cdot \sin \varphi - I_{ph} \cdot X_s)^2}$$

$$\tan \Psi = \frac{U_{ph} \cdot \sin \varphi - I_{ph} \cdot X_s}{U_{ph} \cdot \cos \varphi + I_{ph} \cdot R_a}$$

$$\Theta = \varphi \pm \Psi$$

## 2. מנוע סינכרוני

משוואת מתחים וקטורית

$$\vec{E}_{ph} = \vec{U}_{ph} - \vec{I}_{ph} (R_a + j X_s)$$

$$\left( \begin{array}{l} \text{בהזנחת} \\ \text{התנגדות} \\ \text{העוגן} \end{array} \right) \vec{E}_{ph} = \vec{U}_{ph} - \vec{I}_{ph} \cdot j X_s$$

עבור עומס התנגדוטי ( $\varphi = 0^\circ$ ):

$$E_{ph} = \sqrt{(U_{ph} - I_{ph} \cdot R_a)^2 + (I_{ph} \cdot X_s)^2}$$

$$\tan \Theta = \frac{I_{ph} \cdot X_s}{U_{ph} - I_{ph} \cdot R_a}$$

עבור עומס השראוטי ( $0^\circ < \varphi \leq 90^\circ$ ):

$$E_{ph} = \sqrt{(U_{ph} \cdot \cos \varphi - I_{ph} \cdot R_a)^2 + (U_{ph} \cdot \sin \varphi - I_{ph} \cdot X_s)^2}$$

$$\tan \Psi = \frac{U_{ph} \cdot \sin \varphi - I_{ph} \cdot X_s}{U_{ph} \cdot \cos \varphi - I_{ph} \cdot R_a}$$

$$\Theta = \varphi \pm \Psi$$

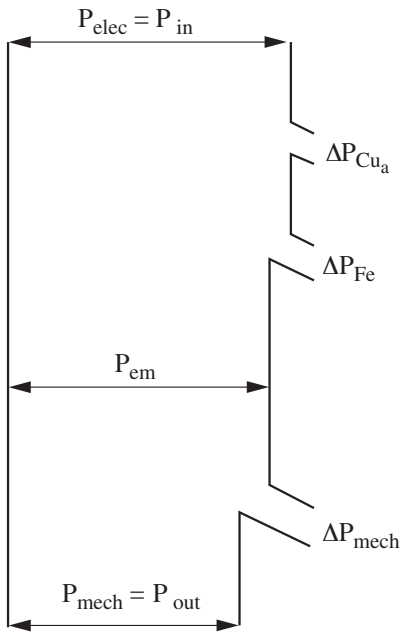
עבור עומס קיבולי  $(-90^\circ \leq \varphi < 0^\circ)$ :

$$E_{ph} = \sqrt{(U_{ph} \cdot \cos \varphi - I_{ph} \cdot R_a)^2 + (U_{ph} \cdot \sin \varphi + I_{ph} \cdot X_s)^2}$$

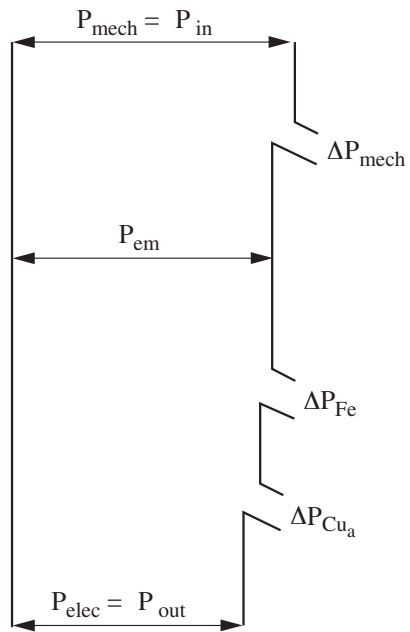
$$\tan \Psi' = \frac{U_{ph} \cdot \sin \varphi + I_{ph} \cdot X_s}{U_{ph} \cdot \cos \varphi - I_{ph} \cdot R_a}$$

$$\Theta = \Psi' - \varphi$$

הספקים ואיבודי הספק במכונה סינכרונית:



**מנוע**



**מחולל**

הספק מכני	-	$P_{\text{mech}}$ [W]	$P_{\text{mech}} = M \cdot \omega_s = \frac{M \cdot n_s}{9.55}$
מומנט	-	$M$ [Nm]	
מהירות זוויתית סינכרונית	-	$\omega_s$ $\left[ \frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$	$\omega_s = \frac{2\pi n_s}{60}$
מהירות סינכרונית	-	$n_s$ [rpm]	
תדירות	-	$f$ [Hz]	
מס' זוגות קטבים	-	$p$	$n_s = \frac{60 \cdot f}{p}$
הספק חשמלי	-	$P_{\text{elec}}$ [W]	
גורם הספק	-	$\cos \varphi$	
כא"מ מופעי	-	$E_{\text{ph}}$ [V]	$P_{\text{elec}} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi = 3 \cdot U_{\text{ph}} \cdot I_{\text{ph}} \cdot \cos \varphi$
היגב סינכרוני מופעי	-	$X_s$ [ $\Omega$ ]	
הזווית בין הזרם המופעי לכא"מ המופעי	-	$\psi$	$P_{\text{elec}} = \frac{3 \cdot E_{\text{ph}} \cdot U_{\text{ph}}}{X_s} \cdot \sin \Theta$
הזווית בין המתח המופעי לכא"מ המופעי	-	$\Theta$	
הספק עיוור	-	$Q$ [VAr]	$Q = \frac{3}{X_s} \left[ U_{\text{ph}} \cdot E_{\text{ph}} \cdot \cos \Theta - U_{\text{ph}}^2 \right]$
הספק אלקטרו-מגנטי	-	$P_{\text{em}}$ [W]	
הפסדי נחושת בסטטור	-	$\Delta P_{\text{Cu}_a}$ [W]	
הפסדי נחושת בסליל (DC) ברוטור	-	$\Delta P_{\text{Cu}_e}$ [W]	$P_{\text{em}} = 3 \cdot E_{\text{ph}} \cdot I_{\text{ph}} \cdot \cos \psi$
הפסדים מגנטיים בליבת הברזל	-	$\Delta P_{\text{Fe}}$ [W]	$\Delta P_{\text{Cu}_a} = 3 \cdot I_{\text{ph}}^2 \cdot R_a$
הפסדים מכניים	-	$\Delta P_{\text{mech}}$ [W]	
נצילות המכונה	-	$\eta$ [%]	$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \cdot 100$
הספק מוצא	-	$P_{\text{out}}$ [W]	
הספק מבוא	-	$P_{\text{in}}$ [W]	

## ב. שיקולים ושיטות לבחירת מנועים חשמליים

מיון חומרי בידוד על-פי טמפרטורה מרבית מותרת:

C	H	F	B	E	A	Y	קבוצת חומר הבידוד
>180	180	155	130	120	105	90	טמפרטורת סביבה מרבית (°C)

הפרש הטמפרטורה בין גוף המנוע לסביבה בזמן  $t = 0$  -  $\Delta T_0$  [°C]  $\Delta T = \Delta T_0 + (\Delta T_\infty - \Delta T_0) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$

הפרש הטמפרטורה בין גוף המנוע לסביבה בזמן  $t = \infty$  -  $\Delta T_\infty$  [°C]

הפרש הטמפרטורה בין גוף המנוע לסביבה בזמן  $t$  כלשהו -  $\Delta T$  [°C]  $\Delta T = \Delta T_\infty \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$  (בהנחת  $\Delta T_0 = 0$ )

זמן -  $t$  [sec]  $\alpha = \alpha_0 (1 - K \cdot \sqrt{V})$

קבוע זמן חימום -  $\tau$  [sec]

מקדם פיזור החום באוויר זורם -  $\alpha$   $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right]$   $\tau = \frac{G \cdot C}{\alpha \cdot A_T}$

מקדם פיזור החום באוויר נח -  $\alpha_0$   $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right]$

מהירות האוויר -  $V$   $\left[\frac{m}{sec}\right]$   $\Delta T_\infty = \frac{\Delta P}{\alpha \cdot A_T}$

מקדם האיוורור -  $K$

שטח פיזור החום -  $A_T$  [m<sup>2</sup>]

משקל -  $G$  [kg]  $\Delta P = \frac{P_n}{\eta} - P_n$

חום סגולי -  $C$   $\left[\frac{W \cdot sec}{kg \cdot ^\circ C}\right]$

סכום הפסדי ההספק של המנוע -  $\Delta P$  [W]

הספק נקוב של המנוע -  $P_n$  [W]

נצילות המנוע -  $\eta$

בחירת הספק מנוע לעבודה עם הפסקות (ש.ה.):

$$t_w \leq 2 \cdot \tau \quad \text{תנאי פעולה:}$$

$$t_o \geq 5 \cdot \tau$$

$$P_n = \frac{P_x}{\sqrt{\left(\frac{1}{1 - e^{-\frac{t_w}{\tau}}}\right) \frac{1}{K_2} - \frac{K_1}{K_2}}}$$

זמן הפסקה -  $t_o$  [sec]

זמן עבודה -  $t_w$  [sec]

קבוע זמן תרמי -  $\tau$  [sec]

הספק נקוב של המנוע  
בעבודה ממושכת -  $P_n$  [W]

הספק העומס -  $P_x$  [W]

מהירות זוויתית -  $\omega$   $\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}}\right]$

מהירות סיבוב -  $n$  [rpm]

(עבור נצילות קבועה)

$$P_n = P_x \left(1 - e^{-\frac{t_w}{\tau}}\right)$$

$$P_x = M \cdot \omega$$

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

קבוע ההפסדים הקבועים -  $K_1$

קבוע ההפסדים המשתנים -  $K_2$

בחירת הספק מנוע לעבודה עם הפסקות מחזוריות (ש.ה.מ.):

$$P_n = P_x \cdot \sqrt{\frac{K_2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_w}{\tau}}\right)}{1 - e^{-(t_w + t_o)/\tau} - K_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_w}{\tau}}\right)}}$$

(כאשר  $t_w \ll \tau$ )

$$P_n = P_x \cdot \sqrt{\frac{t_w}{t_w + t_o}}$$

בחירת הספק מנוע בעומס משתנה בעבודה ממושכת:

שיטת ההפסדים הממוצעים

$$\Delta P_{av} = \frac{\sum(\Delta P_i \cdot t_i)}{\beta(t_s + t_b) + \alpha \cdot t_r + \sum t_w}$$

הפסדי הספק ממוצעים -  $\Delta P_{av}$  [W]

הפסדי הספק בקטע i -  $\Delta P_i$  [W]

זמן בקטע i -  $t_i$  [sec]

זמן התנעה (start) -  $t_s$  [sec]

זמן בלימה (brake) -  $t_b$  [sec]

זמן הפסקה (מנוחה) (rest) -  $t_r$  [sec]

זמן בעומס כלשהו במצב  
שאינו בלימה, התנעה או  
הפסקה -  $t_w$  [sec]

הזרם השקול -  $I_{eq}$  [A]

זרם המנוע בקטע i -  $I_i$  [A]

מקדם הרעת תנאי קרור  
ובמנוחה -  $\alpha$

מקדם הרעת תנאי הקרור  
בהתנעה ובבלימה -  $\beta$

התנאי לבחירת

$$\Delta P_{av} \leq \Delta P_n$$

מנוע:

שיטת הזרם השקול

$$I_{eq} = \sqrt{\frac{\sum(I_i^2 \cdot t_i)}{\beta(t_s + t_b) + \alpha \cdot t_r + \sum t_w}}$$

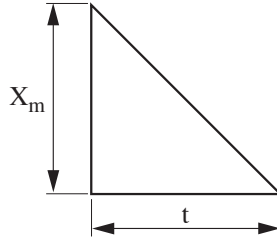
שיטת המומנט השקול

$$M_{eq} = \sqrt{\frac{\sum(M_i^2 \cdot t_i)}{\beta(t_s + t_b) + \alpha \cdot t_r + \sum t_w}}$$



מציאת זרם/מומנט שקול

משולש:

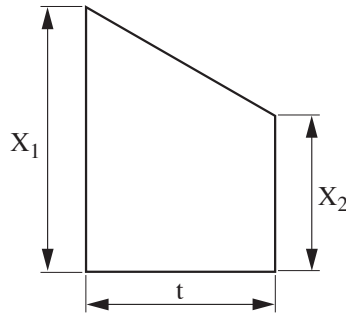


$$X_{eq} = \frac{X_m}{\sqrt{3}}$$

זרם/מומנט שקול -  $X_{eq}$

זרם/מומנט מרבי -  $X_m$

טרפז:



$$X_{eq} = \sqrt{\frac{X_1^2 + X_2^2 + X_1 X_2}{3}}$$

זרם/מומנט מרבי -  $X_1$

זרם/מומנט מזערי -  $X_2$

קביעת הספק מנוע בעבודה בטמפרטורת סביבה לא תקנית:

- הספק העמסה מותר -  $P_T$  [W]
- הספק נומינלי -  $P_n$  [W]
- הפרש הטמפרטורה בין המנוע לסביבה בטמפרטורה לא תקנית -  $\Delta T_{\infty T}$  [°C]
- הפרש הטמפרטורה בין המנוע לסביבה בטמפרטורה תקנית -  $\Delta T_{\infty}$  [°C]
- קבוע ההפסדים הקבועים -  $K_1$
- קבוע ההפסדים המשתנים -  $K_2$

$$P_T = P_n \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta T_{\infty T}}{\Delta T_{\infty}} - K_1\right) \cdot \frac{1}{K_2}}$$

**ג. מנוע לזרם ישר**

כוח אלקטרו-מניע:

- כוח אלקטרו-מניע -  $E$  [V]
- מספר המוליכים ברוטור -  $z$
- מספר זוגות הקטבים -  $p$
- מספר זוגות הענפים -  $a$
- המקבילים ברוטור

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

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

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

$a = 1$  (ליפוף גלי פשוט)

$a = p$  (ליפוף עניבה פשוט)

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

מומנטים:

- מומנט אלקטרו-מגנטי -  $M_{em}$  [Nm]
- מומנט נומינלי -  $M_n$  [Nm]
- איבודי מומנט בריקים -  $\Delta M_o$  [Nm]
- מהירות זוויתית -  $\omega$  [ $\frac{rad}{sec}$ ]
- מהירות סיבוב של הרוטור -  $n$  [rpm]

$$M_{em} = \frac{P_{em}}{\omega} = 9.55 \cdot \frac{P_{em}}{n} = K_m \cdot \Phi \cdot I_a$$

$$M_n = \frac{P_n}{\omega} = 9.55 \cdot \frac{P_n}{n}$$

$$\Delta M_o = M_{em} - M_n$$

הספקים:

- עוצמת הזרם ברוטור -  $I_a$  [A]
- הספק חשמלי (מושקע) -  $P_{in}$  [W]
- הספק אלקטרו-מגנטי -  $P_{em}$  [W]
- הספק נומינלי (מופק) -  $P_n$  [W]
- נצילות המנוע -  $\eta$

$$P_{in} = U \cdot I$$

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

$$P_n = M_n \cdot \omega$$

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

$$\eta = \frac{P_n}{P_{in}}$$

איבודי הספק:

- איבודי הספק ברוטור -  $\Delta P_{Cu_a}$  [W]
- איבודי הספק בסליל העירור המקבילי -  $\Delta P_{Cu_e}$  [W]
- איבודי הספק בסליל העירור הטורי -  $\Delta P_{Cu_s}$  [W]
- איבודי הספק בברזל -  $\Delta P_{Fe}$  [W]
- איבודי הספק מכניים -  $\Delta P_{mech}$  [W]
- התנגדות סליל העוגן -  $R_a$  [ $\Omega$ ]
- התנגדות סליל העירור המקבילי -  $R_e$  [ $\Omega$ ]
- התנגדות סליל העירור הטורי -  $R_s$  [ $\Omega$ ]

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

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

$$\Delta P_{Cu_s} = I_s^2 \cdot R_s$$

$$\Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} = P_{em} - P_n$$

סוג עירור	זרם העוגן	זרם העירור	כ.א.מ.	כ.מ.מ.
טורי	$I = I_a = I_e$		$E = U - I(R_a + R_s)$	$NI = N_s \cdot I$
זר	$I_a = I$	$I_e = \frac{U_e}{R_e + R_{re}}$	$E = U - I_a \cdot R_a$	$NI = N_e \cdot I_e$
מקבילי	$I_a = I - I_e$	$I_e = \frac{U}{R_e + R_{re}}$	$E = U - I_a(R_a + R_s)$	$NI = N_e \cdot I_e \pm N_s \cdot I_a$ (*)
מעורב ארוך			$E = U - I \cdot R_s - I_a \cdot R_a$	$NI = N_e \cdot I_e \pm N_s \cdot I$ (*)
מעורב קצר				

(\*) הערה:

הסימן (+) מתייחס לעירור מעורב מתוסף  
הסימן (-) מתייחס לעירור מעורב מתחסר

- עוצמת הזרם ברוטור -  $I_a$  [A]
- עוצמת הזרם הנצרך על-ידי המנוע -  $I$  [A]
- עוצמת הזרם בסליל העירור -  $I_e$  [A]
- כוח אלקטרו-מניע -  $E$  [V]
- מתח -  $U$  [V]
- מתח העירור -  $U_e$  [V]
- התנגדות סליל העוגן -  $R_a$  [ $\Omega$ ]
- התנגדות סליל העירור המקבילי -  $R_e$  [ $\Omega$ ]
- התנגדות נוספת במעגל העירור -  $R_{re}$  [ $\Omega$ ]
- כוח מגנטו-מניע -  $NI$  [AT]
- מספר הכריכות בסליל העירור הטורי -  $N_s$  [T]
- מספר הכריכות בסליל העירור המקבילי -  $N_e$  [T]

ויסות מהירות במנוע לזרם ישר בעירור מקבילי/נפרד

מהירות סיבוב	-	$n$ [rpm]	הכנסת נגד טורי למעגל העוגן:
מהירות סיבוב בריקס	-	$n_o$ [rpm]	$n_o = \frac{U}{K_e \Phi} \quad n = \frac{E}{K_e \Phi}$
התנגדות נוספת במעגל הרוטור	-	$R_x$ [ $\Omega$ ]	
התנגדות סליל העוגן	-	$R_a$ [ $\Omega$ ]	$n = \frac{U - I_a \cdot (R_a + R_x)}{K_e \Phi}$
שטף מגנטי	-	$\Phi$ [Wb]	
מתח	-	$U$ [V]	$n = \frac{U}{K_e \Phi} - \frac{M_{em}}{9.55} \cdot \frac{R_a + R_x}{(K_e \Phi)^2}$
כוח אלקטרו־מניע	-	$E$ [V]	הכנסת נגד טורי למעגל העירור:
מספר כריכות בסליל העירור	-	$N_e$ [T]	$n = \frac{E}{K_e \Phi} = \frac{U - I_a \cdot R_a}{K_e \Phi}$
מומנט אלקטרו־מגנטי	-	$M_{em}$ [Nm]	

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \frac{N_e \cdot I_{e1}}{N_e \cdot I_{e2}} \quad \left( \begin{array}{l} \text{עבור} \\ \text{מעגל מגנטי} \\ \text{בתחום הליניארי} \end{array} \right)$$

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

$$n = \frac{U_a \cdot D}{K_e \Phi} - \frac{M_{em} \cdot R_a}{9.55 \cdot (K_e \Phi)^2}$$

$$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}}$$

ויסות מהירות של מנוע לזרם ישר בעירור מעורב

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

הכנסת נגד למעגל הרוטור:

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

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

הכנסת נגד למעגל העירור:

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

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

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \frac{(NI)_1}{(NI)_2} \quad \left( \begin{array}{l} \text{עבור} \\ \text{מעגל מגנטי} \\ \text{בתחום הליניארי} \end{array} \right)$$

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

$$n = \frac{U_a - I_a \cdot (R_a + R_s)}{K_e \Phi} = \frac{U \cdot D - I_a R_a}{K_e \Phi}$$

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

$$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}}$$

**בלימה של מנוע לזרם ישר בעירור מקבילי/זר**

**זרמים**

זרם העוגן בבלימה	-	$I_b$	[A]	בבלימה דינמית:	
התנגדות העוגן	-	$R_a$	[Ω]		$I_b = \frac{E_b}{R_a + R_b}$
התנגדות נוספת במעגל העוגן בבלימה	-	$R_b$	[Ω]		
הכא"מ בבלימה	-	$E_b$	[V]	בבלימה בחיבור נגדי:	
מתח	-	$U$	[V]		$I_b = \frac{E_b + U}{R_a + R_b}$
				בבלימה גנרטורית:	
					$I_b = \frac{E_b - U}{R_a + R_b}$

\* המתח במעגל העירור קבוע

**מומנט בלימה**

מומנט אלקטרו-מגנטי נומינלי	-	$M_{em(n)}$	[Nm]		$M_{em(b)} = K_m \Phi \cdot I_b$
מומנט אלקטרו-מגנטי בבלימה	-	$M_{em(b)}$	[Nm]		$M_{em(n)} = K_m \Phi \cdot I_{a(n)} = \frac{P_{em(n)}}{\omega_n}$
מומנט נומינלי	-	$M_n$	[Nm]		
איבודי מומנט בריקם	-	$\Delta M_o$	[Nm]		$M_{(n)} = \frac{P_n}{\omega_n} = 9.55 \cdot \frac{P_{(n)}}{n_{(n)}}$
מומנט בלימה	-	$M_b$	[Nm]		
הספק נומינלי	-	$P_n$	[W]		$\Delta M_o = M_{em(n)} - M_{(n)}$
הספק אלקטרו-מגנטי	-	$P_{em}$	[W]		
מהירות נקובה	-	$n_n$	[rpm]		$M_b = M_{em(b)} + \Delta M_o$
מהירות זוויתית	-	$\omega_n$	$\left[ \frac{rad}{sec} \right]$		$\omega_n = \frac{2 \pi n_n}{60}$

**זמני בלימה והתנעה**

זמן התנעה	-	$t_s$	[sec]
זמן בלימה	-	$t_b$	[sec]
מומנט תנופה כולל המועבר לציר המנוע	-	$GD_T^2$	[kgf · m <sup>2</sup> ]
מהירות סיבוב התחלתית	-	$n_1$	[rpm]
מהירות סיבוב סופית	-	$n_2$	[rpm]
מומנט סיבובי שקול בבלימה/בהתנעה	-	$M$	[Nm]
מומנט סטטי (נגדי)	-	$M_s$	[Nm]

$$t_s = \frac{GD_T^2}{38.2} \left( \frac{n_2 - n_1}{M - M_s} \right)$$

$$t_b = \frac{GD_T^2}{38.2} \left( \frac{n_1 - n_2}{M + M_s} \right)$$



## ד. מנוע השראה תלת-מופעי

זרמים:

זרם נומינלי קווי -  $I_{n1}$  [A]

גורם ההספק -  $\cos \varphi$

נצילות -  $\eta$

זרם נומינלי פאזי בסטטור -  $I_{nph1}$  [A]

זרם נומינלי פאזי ברוטור, המשוקף לסטטור -  $I'_{nph2}$  [A]

מתח פאזי בסטטור -  $U_{ph1}$  [V]

התנגדות סליל הסטטור -  $R_1$  [ $\Omega$ ]

התנגדות סליל הרוטור המשוקף לסטטור -  $R'_2$  [ $\Omega$ ]

ההיגב הכולל של סלילי המנוע -  $X_T$  [ $\Omega$ ]

זרם נומינלי פאזי ברוטור -  $I_{ph2}$  [A]

כא"מ פאזי ברוטור נייח -  $E_{ph2(0)}$  [V]

יחס התמסורת -  $a_{ph}$

מהירות סיבוב בעומס -  $n$  [rpm]

מהירות סינכרונית -  $n_s$  [rpm]

גורם החליקה -  $s$

תדירות -  $f$  [Hz]

מומנט קריטי -  $M_K$  [Nm]

חליקה נומינלית -  $s_n$

חליקה קריטית -  $s_K$

היגב סליל הסטטור -  $X_1$  [ $\Omega$ ]

היגב סליל הרוטור המשוקף לסטטור -  $X'_2$  [ $\Omega$ ]

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

$$I'_{nph2} = I_{nph1} = \frac{U_{ph1}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_T^2}}$$

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

מהירות וגורם החליקה:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad f_2 = f_1 \cdot s$$

$$n = n_s (1 - s) \quad s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

$$\lambda_{\max} = \frac{M_K}{M_n} = \left[ \frac{s_K}{s_n} + \frac{s_n}{s_K} \right] \cdot \frac{1}{2}$$

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

$$s_K = \frac{R'_2}{R_1 + X_T^2}$$

$$R'_2 = R_2 \cdot a_{ph}^2 \quad X'_2 = X_2 \cdot a_{ph}^2$$

$$X_T = X_1 + X'_2$$

הספקים, איבודי הספק ומומנטים:

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

מומנט נומינלי -  $M_n$  [Nm]

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

מומנט אלקטרו-מגנטי -  $M_{em}$  [Nm]

מומנט קריטי -  $M_K$  [Nm]

$$P_{em} = \frac{P_{mech}}{1-s} = \frac{\Delta P_{Cu_2}}{s}$$

מהירות סיבוב נומינלית -  $n_n$  [rpm]

מהירות סיבוב סינכרונית -  $n_s$  [rpm]

גורם החליקה -  $s$

חליקה קריטית -  $s_K$

$$\Delta P_{Cu_2} = P_{mech} \cdot \frac{s}{1-s} = 3 \cdot I_{ph2}^2 \cdot R_2$$

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

הספק נומינלי (מופק) -  $P_n$  [W]

הספק חשמלי (מושקע) -  $P_{in}$  [W]

$$P_{mech} = P_n + \Delta P_{mech}$$

הספק אלקטרו-מגנטי -  $P_{em}$  [W]

הספק מכני -  $P_{mech}$  [W]

$$P_{in} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{n1} \cdot \cos \varphi$$

נצילות -  $\eta$

$$P_n = P_{in} \cdot \eta$$

איבודי הספק מכניים -  $\Delta P_{mech}$  [W]

איבודי הספק בנחושת בסטור -  $\Delta P_{Cu_1}$  [W]

$$M_K = \frac{9.55 \cdot 3 \cdot U_{ph}^2}{2 \cdot n_s \cdot X_T}$$

איבודי הספק בנחושת ברוטור -  $\Delta P_{Cu_2}$  [W]

$$M = \frac{2 \cdot M_K}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}}$$

(נוסחת קלוס מקורבת)

זרם נומינלי קווי -  $I_{n1}$  [A]

זרם פאזי ברוטור -  $I_{ph2}$  [A]

$$M_{em} = \frac{9.55 \cdot 3 \cdot U_{ph}^2 \cdot \frac{R'_2}{s}}{n_s \left[ \left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right) + (X_1 + X'_2)^2 \right]}$$

$$X_T = X_1 + X'_2$$

הכנסת נגד נוסף לרוטור מלופף:

כאשר המנוע מועמס

במומנט נקוב:

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

$R_x$   $[\Omega]$  - התנגדות פאזית נוספת  
 ברוטור

$R_2$   $[\Omega]$  - ההתנגדות הפאזית של  
 הרוטור

$s_x$  - גורם החליקה במהירות  
 מסוימת

$s_n$  - גורם החליקה במהירות  
 נומינלית

$M_x$  [Nm] - מומנט

$M_n$  [Nm] - מומנט נומינלי

$n_x$  [rpm] - מהירות סיבוב

$n_s$  [rpm] - מהירות סיבוב סינכרונית

כאשר המנוע מועמס

במומנט כלשהו ( $M_x$ ):

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

$$s_x = \frac{n_s - n_x}{n_s}$$

$$\lambda_{\max} = \frac{M_K}{M_n}$$

שינוי תדירות הרשת:

$$\frac{U^*}{U} = \frac{f^*}{f}$$

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

## ה. תופעות מעבר

מצבי מעבר בהתנעת מנוע זרם ישר בעירור מקבילי

מהירות סיבוב בריקס	-	$n_o$ [rpm]	$n_o = \frac{U}{K_e \phi}$
שטף בסליל העירור	-	$\phi$ [Wb]	
מתח הדקים	-	$U$ [V]	
קבוע זמן אלקטרומכני	-	$T$ [sec]	$T = \frac{GD^2}{38.2} \cdot \frac{R}{K_e K_m \phi^2}$
מקדמים	-	$K_e, K_m$	$R = R_a + R_s$
מומנט תנופה	-	$GD^2$ [kgf · m <sup>2</sup> ]	
ההתנגדות הכוללת של מעגל העוגן	-	$R$ [ $\Omega$ ]	$\Delta n_L = \frac{M_L R}{K_e K_m \phi^2}$
התנגדות סליל העוגן	-	$R_a$ [ $\Omega$ ]	
התנגדות המתנע במעגל העוגן	-	$R_s$ [ $\Omega$ ]	$n = n_L + (n_{st} - n_L) e^{-\frac{t}{T}}$
שינוי מהירות כתוצאה מעומס	-	$\Delta n_L$ [rpm]	$n_L = n_o - \Delta n_L$
זמן	-	$t$ [sec]	$n_L = n_o - \frac{I_L R}{K_e \phi}$
מהירות סיבוב בזמן התנעה (ברגע $t = 0$ )	-	$n_{st}$ [rpm]	$n_{st} = n_o - \frac{I_{st} R}{K_e \phi}$
מהירות סיבוב המתאימה למומנט העומס $M_L$	-	$n_L$ [rpm]	$I_L = \frac{M_L}{K_m \phi}$
זרם המתאים למומנט נגדי $M_L$	-	$I_L$ [A]	
זרם המנוע בהתנעה	-	$I_{st}$ [A]	$i = I_L + (I_{st} - I_L) e^{-\frac{t}{T}}$
זרם רגעי של המנוע	-	$i$ [A]	
מומנט המתפתח על-ידי המנוע בזמן התנעה	-	$M_{st}$ [kgf · m]	$M = M_L + (M_{st} - M_L) e^{-\frac{t}{T}}$
מומנט העומס בזמן התנעה (מומנט נגדי)	-	$M_L$ [kgf · m]	

בלימה דינמית של מנוע זרם ישר בעירור מקבילי

מפל מהירות הסיבוב כתוצאה מעומס $M_L$ , בערך מוחלט	- $\Delta n_L$ [rpm]	$n = -\Delta n_L + (n_{st} + \Delta n_L) e^{-\frac{t}{T}}$
התנגדות כוללת במעגל העוגן	- $R$ [ $\Omega$ ]	$\Delta n_L = \frac{M_L R}{K_e K_m \phi^2} = \frac{I_L R}{K_e \phi}$
התנגדות סליל העוגן	- $R_a$ [ $\Omega$ ]	
התנגדות נגד הבלימה	- $R_b$ [ $\Omega$ ]	
מומנט העומס בזמן בלימה (מומנט נגדי)	- $M_L$ [kgf · m]	$R = R_a + R_b$
שטף בסליל העירור	- $\phi$ [Wb]	
קבוע זמן אלקטרומכני	- $T$ [sec]	$T = \frac{GD^2}{38.2} \frac{R}{K_e K_m \phi^2}$
מומנט תנופה	- $GD^2$ [kgf · m <sup>2</sup> ]	
מהירות סיבוב בזמן בלימה (ברגע $t = 0$ )	- $n_{st}$ [rpm]	
זמן	- $t$ [sec]	$\text{כאשר } U = 0$
זרם המתאים לעומס נגדי $M_L$	- $I_L$ [A]	$n_{st} = \frac{I_{st} R}{K_e \phi}$
זרם המנוע בתחילת הבלימה	- $I_{st}$ [A]	
זרם רגעי של המנוע	- $i$ [A]	$i = I_L - (I_{st} + I_L) e^{-\frac{t}{T}}$

בלימה על-ידי חיבור נגדי של מנוע זרם ישר בעירור מקבילי

א. ללא הפיכת קוטביות

- מהירות סיבוב -  $n$  [rpm]
- מהירות סיבוב המתאימה למומנט העומס  $M_L$  -  $n_L$  [rpm]
- מהירות סיבוב בזמן בלימה (ברגע  $t = 0$ ) -  $n_{st}$  [rpm]
- זמן -  $t$  [sec]
- קבוע זמן אלקטרומכני -  $T$  [sec]
- מהירות סיבוב נקובה -  $n_n$  [rpm]
- מתח הדקים -  $U$  [V]
- זרם העוגן -  $I$  [A]
- התנגדות כוללת במעגל העוגן -  $R$  [ $\Omega$ ]
- התנגדות סליל העוגן -  $R_a$  [ $\Omega$ ]
- התנגדות נגד הבלימה -  $R_b$  [ $\Omega$ ]

$$n = n_L + (n_{st} - n_L) e^{-\frac{t}{T}}$$

$$n_L = n_n \frac{U - I_a R_a}{U - I_a R_a}$$

$$R = R_a + R_b$$

ב. עם הפיכת קוטביות

- כא"מ מושרה בתחילת הבלימה -  $E_{st}$  [V]
- מהירות סיבוב בריקס -  $n_o$  [rpm]
- מפל מהירות הסיבוב כתוצאה מעומס  $M_L$ , בערך מוחלט -  $\Delta n_L$  [rpm]
- מהירות סיבוב בזמן התנעה (ברגע  $t = 0$ ) -  $n_{st}$  [rpm]
- זרם רגעי של המנוע -  $i$  [A]
- זרם המתאים למומנט נגדי  $M_L$  -  $I_L$  [A]
- זרם המנוע בתחילת הבלימה -  $I_{st}$  [A]

$$n = -n_o - \Delta n_L + (n_o + n_{st} + \Delta n_L) e^{-\frac{t}{T}}$$

$$i = I_L - (I_{st} + I_L) e^{-\frac{t}{T}}$$

$$I_{st} = \frac{U + E_{st}}{R}$$

**בהצלחה!**

נספח: מילון מונחים (2 עמודים)

לשאלון 733913, אביב תשע"ז

תרגום המונח			המונח
אנגלית	רוסית	ערבית	
voltage ripple	Девияция напряжения	جهد تَمْرُج	אדוות המתח
system grounding	Метод заземления	نظام تأريض	הארקת שיטה
reactive power	Реактивная мощность	قدرة ارتكاسية	הספק היגבי
active power	Активная мощность	قدرة فعّالة	הספק פעיל
inductance	Индуктивность	مُحَاثَة	השראות
electrical device	Электрическое устройство	جهاز كهربائي	התקן חשמלי
voltage regulation	Регулировка напряжения	تنظيم الجهد	ויסות מתח
torque	Момент	عزم	מומנט
switching converter	Коммутируемый преобразователь	مُحوّل تبديل	ממיר ממותג
three-phase induction motor	Трёхфазный двигатель	مُحرّك الحثّ ثلاثي المرحلة	מנוע השראה תלת־מופעי
synchronous motor	Синхронный двигатель	مُحرّك متزامن	מנוע סינכרוני
equivalent circuit	Схема замещения	دائرة التعويض	מעגל תמורה
the voltage drop on the brushes	Падение напряжения на щётках	انخفاض / نزول الجهد على الفرش	מפל המתח על המברשות
over-voltage	Перенапряжение	الجهد الزائد	מתחי יתר
nominal efficiency	Номинальный коэффициент полезного действия	الكفاءة الاسمية	נצילות נקובה
neutral point	Нулевая точка	نقطة الصفر	נקודת האפס

תרגום המונח			המונח
אנגלית	רוסית	ערבית	
nominal load	Номинальная нагрузка	حمل اسمي	עומס נקוב
external excitation	Внешнее возбуждение	إثارة خارجيّة	עירור זר
magnetization branch	Намагничивающая цепь	قطاع المغنطة	ענף המיגנוט
capacitor voltage polarity	Полярность напряжения конденсатора	قطبيّة جهد المكثّف	קוטביות מתח הקבל
commutation	Коммутация	توحيد	קומוטציה
capacitance	Ёмкость	سعة	קיבול
single phase short circuit	Однофазное замыкание	قصر وحيد / أحاديّ الطور	קִצֵר חד-מופע
wound rotor	Ротор с намоткой	الدوّار الملفوف	רוטור מלופף
no-load	Холостой ход	لا حمل	ריקם
distribution network	Распределительная сеть	شبكة التوزيع	רשת חלוקה
three-phase network	Трёхфазная сеть	شبكة ثلاثيّة الأطوار	רשת תלת-מופעית
uniform cross-sectional area	Однородное сечение	مساحة مقطع عرضيّ موحّد	שטח-חתך אחיד
transformation station	Трансформаторная станция	محطة تحويل	תחנת השנאה
one-line chart	Однолинейная схема	تخطيط أحاديّ السطر	תרשים חד-קווי