

סוג הבחינה: גמר לבתי-ספר לטכנאים ולהנדסאים

מועד הבחינה: אביב תש"ף, 2020

סמל השאלון: 733913

נספחים: א. נספח לשאלה 8

ב. נוסחאון במערכות הספק לכיתה י"ד

ג. נוסחאון במכונות חשמל והינע

לכיתה י"ד

ד. 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:

- ענה על מספר השאלות הנדרש בשאלון. המעריך יקרא ויעריך את מספר השאלות הנדרש בלבד, לפי סדר כתיבתן במחברתך, ולא יתייחס לתשובות נוספות.
 - התחל כל תשובה לשאלה חדשה בעמוד חדש.
 - רשום את כל תשובותיך אך ורק בעט.
 - הקפד לנסח את תשובותיך כהלכה ולסרטט את תרשימיך בבהירות.
 - כתוב את תשובותיך בכתב-יד ברור, כדי לאפשר הערכה נאותה שלהן.
 - אם לדעתך חסרים נתונים הדרושים לפתרון שאלה, אתה רשאי להוסיף אותם, בתנאי שתנמק מדוע הוספת אותם.
 - 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.
 - לנוחותך, לשאלון זה מצורף מילון מונחים בשפות עברית, אנגלית, רוסית וערבית. תוכל להיעזר בו בעת הצורך.
- בשאלון זה 9 עמודים ו-40 עמודי נספחים.

ההנחיות בשאלון זה מנוסחות בלשון זכר,
אך מכוונות הן לנבחנות והן לנבחנים.

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.

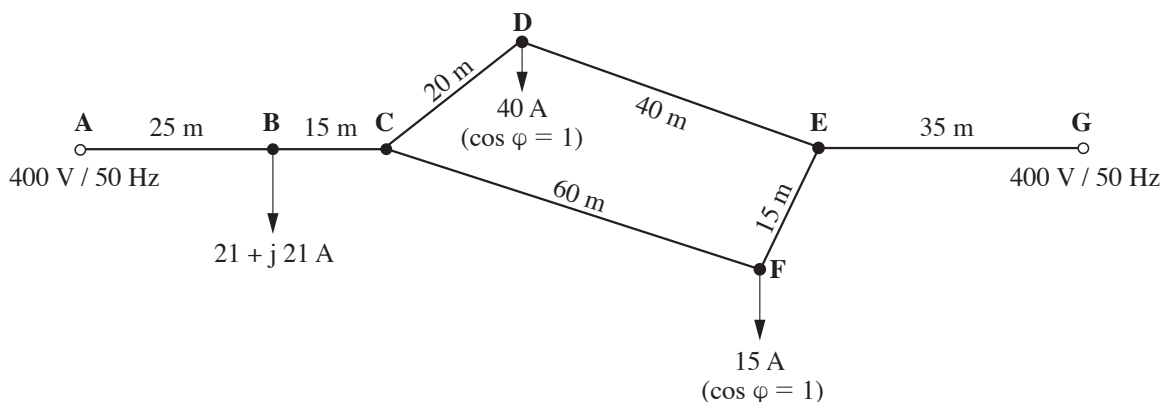
פרק ראשון: מערכות הספק ב'

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

שאלה 1

באיור לשאלה 1 מתוארת רשת תלת-מופעית המוזנת משני צידיה במתח $400 \text{ V} / 50 \text{ Hz}$.

מוליכי הרשת עשויים מאלומיניום $\left[\gamma = 35 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} \right]$, שטח החתך שלהם הוא 70 mm^2 , וההיגב ההשראותי שלהם זניח.



איור לשאלה 1

א. (10 נק')

1. סרטט את הרשת התלת-מופעית **השקולה** לרשת הזו לאחר פיזור העומסים D ו-F.

2. חשב את הזרם בכל אחד מקטעי הרשת השקולה.

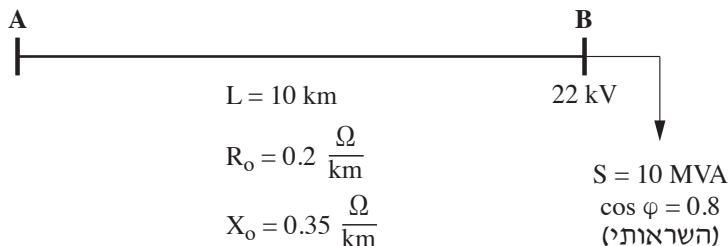
ב. (10 נק')

חשב את הזרם בכל אחד מקטעי הרשת התלת-מופעית ה**נתונה**.

ג. (5 נק') באיזו נקודה ברשת ה**נתונה** נקבל את המתח המזערי? חשב את ערכו תוך הזנחת מפלי המתח ההיגביים ברשת.

שאלה 2

באיור לשאלה 2 נתון צרכן המוזן במתח גבוה באמצעות קו עילי AB.



איור לשאלה 2

מבקשים להקטין את מפל-המתח בקו AB **למחצית מערכו**. לשם כך קיימות שתי שיטות:
חיבור לקו של סוללת קבלים המחוברים בטור **או** חיבור של סוללת קבלים במקביל לקו.

- 5 נק') א. היכן יש לחבר את סוללת הקבלים בכל אחת משתי השיטות? נמק את תשובתך.
10 נק') ב. חשב את ההספק במתח הנקוב של סוללת הקבלים, אם הם מחוברים בטור.
10 נק') ג. חשב את ההספק במתח הנקוב של סוללת הקבלים, אם הם חוברים במקביל לקו.

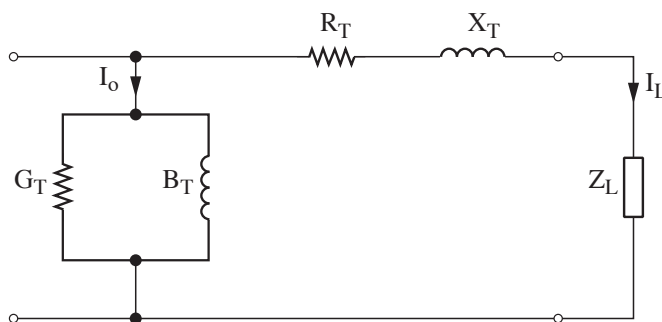
שאלה 3

שני שנאים שווים המחוברים במקביל מזינים צרכן השראותי ($S = 150 \text{ kVA}$, $\cos \varphi = 0.8$).
נתוני השנאי מופיעים על-גבי הלוחית שלו, המתוארת באיור א' לשאלה 3.

Rated power	100 kVA	No. of phases	3
TRANSFORMER to specification		EN (EC) 60076-1	
	Rated voltage [V]	Current [A]	
HV	$11000 \pm 2 \times 2.5\%$	5.25	
LV	415	139.10	
Connection symbol		Dyn 11	
Rated frequency		50 Hz	
Short circuit impedance		3.88%	
Load losses		1750 W	
No-Load losses		145 W	

איור א' לשאלה 3

באיור ב' לשאלה נתון מעגל התמורה החשמלי (במודל I') של השנאים והצרכן (המחובר בצד המשני של השנאים).

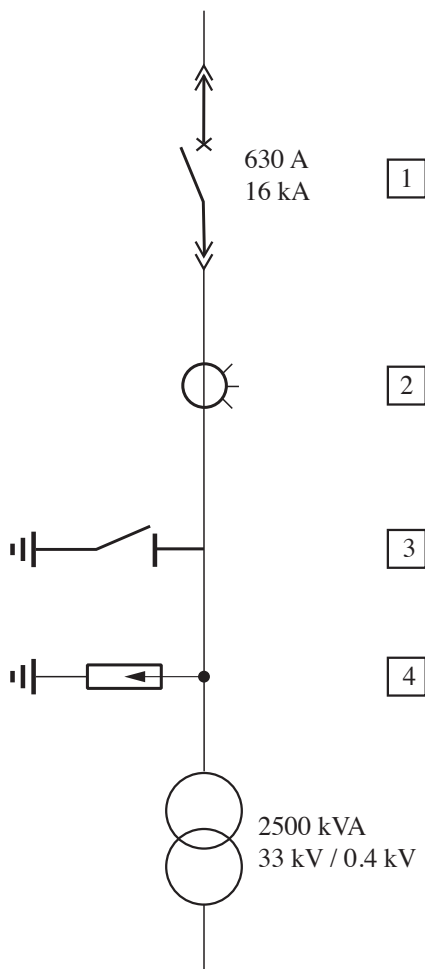


איור ב' לשאלה 3

- א. (5 נק') חשב את עוצמת הזרם I_L המסופק לצרכן על-ידי שני השנאים.
- ב. (8 נק') חשב את ערכי הפרמטרים (R_T , X_T , G_T , B_T) של מעגל התמורה, המשוקף לצד המתח הנמוך של שני השנאים.
- ג. (6 נק') חשב את הפסדי ההספק הממשיים (ΔP) ואת הפסדי ההספק ההיגביים (ΔQ) של השנאים בתנאי ההעמסה הנתונים.
- ד. (6 נק') חשב את המתח בהדקי הצרכן, אם המתח במבוא השנאים הוא 10.5 kV , וכל שנאי מכויל למתח ראשוני של $11 \text{ kV} + 5\%$.

שאלה 4

א. (12 נק') באיור לשאלה 4 נתון תרשים חד-קווי של קו כניסה לתחנת השנאה/יציאה ממנה. כתוב את שמו והסבר את תפקידו של כל אחד מהרכיבים המסומנים באיור בספרות $\boxed{1} \div \boxed{4}$.



איור לשאלה 4

ב. (8 נק') כתוב שתי שיטות לכיבוי קשת חשמלית בזמן ניתוק של קו מתח גבוה.

ג. (5 נק') הסבר את תפקידו של מפסק גז SF6, וציין יתרון אחד שלו.

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 הם:

$$U_n = 400 \text{ V} ; f = 50 \text{ Hz} ; n_n = 720 \text{ r.p.m.} ; M_k = 280 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\lambda_{\max} = 2.8 ; \Delta P_{\text{mech}} = 200 \text{ W} ; I_{n_2} = 40 \text{ A}$$

(10 נק') א. חשב את:

1. ההספק הנקוב של המנוע. (5 נק')

2. ההתנגדות של סלילי הרוטור. (5 נק')

ב. המנוע פועל במהירות-סיבוב של 600 r.p.m., כאשר גורם החליקה הוא בעל ערך נקוב. חשב את מתח ההזנה ואת תדירותו הנדרשים לשם כך. (7 נק')

ג. מפעילים את המנוע הנתון במתח ותדירות נקובים. משטר העבודה המחזורי של המנוע כולל 40 דקות פעולה בעומס נקוב ו-2.5 שעות הפסקה. קבוע זמן החימום של המנוע הוא 25 דקות. ההפסדים הקבועים הם 45% מכלל ההפסדים בעומס נקוב. (8 נק')

1. מהו סוג משטר העבודה של המנוע? (4 נק')

2. חשב את הספק העומס המרבי שמותר להעמיס על ציר המנוע. (4 נק')

שאלה 6

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

$$P_n = 50 \text{ kW} ; U_n = 300 \text{ V} ; I_{a_n} = 185 \text{ A} ; R_a = 0.05 \Omega$$

סליל העירור מוזן ממקור מתח נפרד. הזנה בחישוביך את מפל המתח על המברשות ואת תגובת העוגן. הנח כי המנוע פועל בתחום הליניארי של עקום המגנט.

א. חשב את מהירות הסיבוב של המנוע במתח של 250 V ומומנט אלקטרומגנטי השווה ל-80% מהמומנט האלקטרומגנטי הנקוב, אם מהירות הסיבוב בריקם במתח נקוב היא 1800 r.p.m. (10 נק')

ב. מוסיפים בטור למעגל העוגן נגד שערכו 0.15 Ω, כאשר המנוע פועל בעומס ומתח נקובים. חשב במצב הזה את זרם העוגן ואת מהירות הסיבוב של המנוע לאחר התייצבות פעולת המנוע. (10 נק')

ג. באיזו שיטת בלימה של מנוע לזרם ישר מפסיק עוגן המנוע לקבל מתח הזנה, ומהו משטר העבודה של המכונה במצב הזה? (5 נק')

שאלה 7

נתוניו הנקובים של מחולל (גנרטור) סינכרוני תלת-מופעי הם:

$$S_n = (36 + 27j) \text{ MVA} ; U_n = 22 \text{ kV} ; X_s = 2 \Omega ; R_a = 0.04 \Omega$$

סילי הסטטור מחוברים בכוכב. זרם העירור הנדרש לקבלת מתח הדקים נקוב בריקם הוא 120 A.

9 נק' א. חשב את הכא"מ המופעי של המחולל, את הזווית בין הכא"מ המופעי ובין המתח המופעי, ואת זרם העירור הנדרש בתנאי עבודה נקובים.

8 נק' ב. חשב את נצילות המחולל בעומס נקוב, אם הפסדי הנחשת בסטטור מהווים 45% מכלל הפסדי ההספק של המחולל.

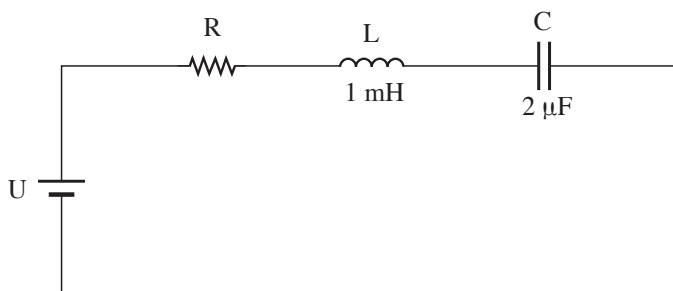
8 נק' ג. מחברים סוללת קבלים בעלת הספק של 12 MVA במקביל לעומס הנקוב המוזן מהמחולל, תוך שמירה על מתח הדקים נקוב. האם במקרה הזה נדרש לשנות את זרם העירור? נמק את תשובתך על-ידי חישוב מתאים.

פרק שלישי: מערכות וטכניקות בקרה

(לכל שאלה – 25 נקודות).

שאלה 8

באיור לשאלה 8 נתון מעגל RLC טורי.



איור לשאלה 8

10 נק' א. היעזר בנספח לשאלה 8 והוכח כי המשוואה האופיינית המייצגת את המעגל הזה היא: $s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC} = 0$.

15 נק' ב.

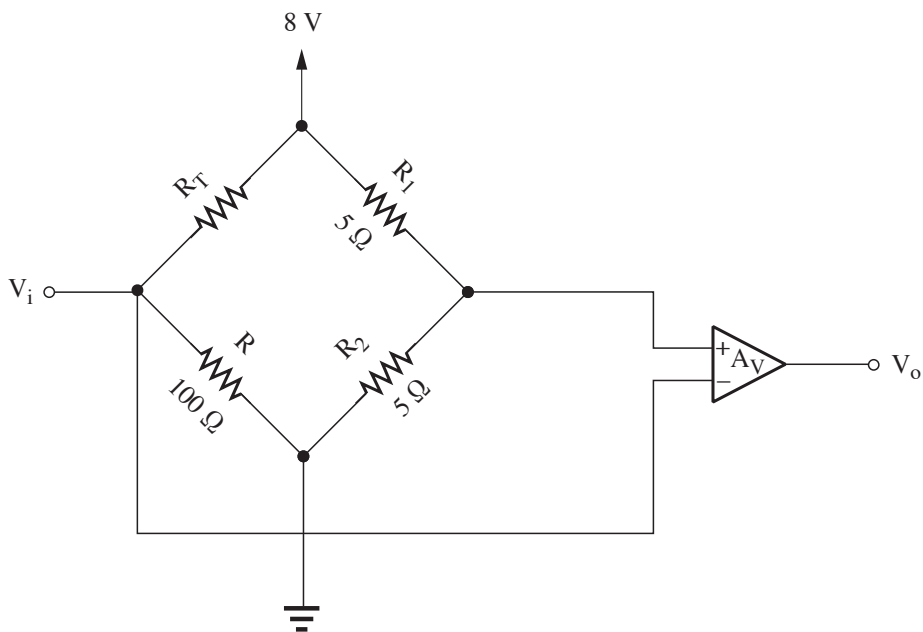
5 נק' 1. חשב את ערכו של הנגד R, שיבטיח ריסון קריטי של הזרם במעגל.

5 נק' 2. חשב את מקדם הריסון של המעגל עבור ערך הנגד שמצאת בסעיף ב'1.

5 נק' 3. חשב את התדר הטבעי של המתח U עבור ערך הנגד שמצאת בסעיף ב'1.

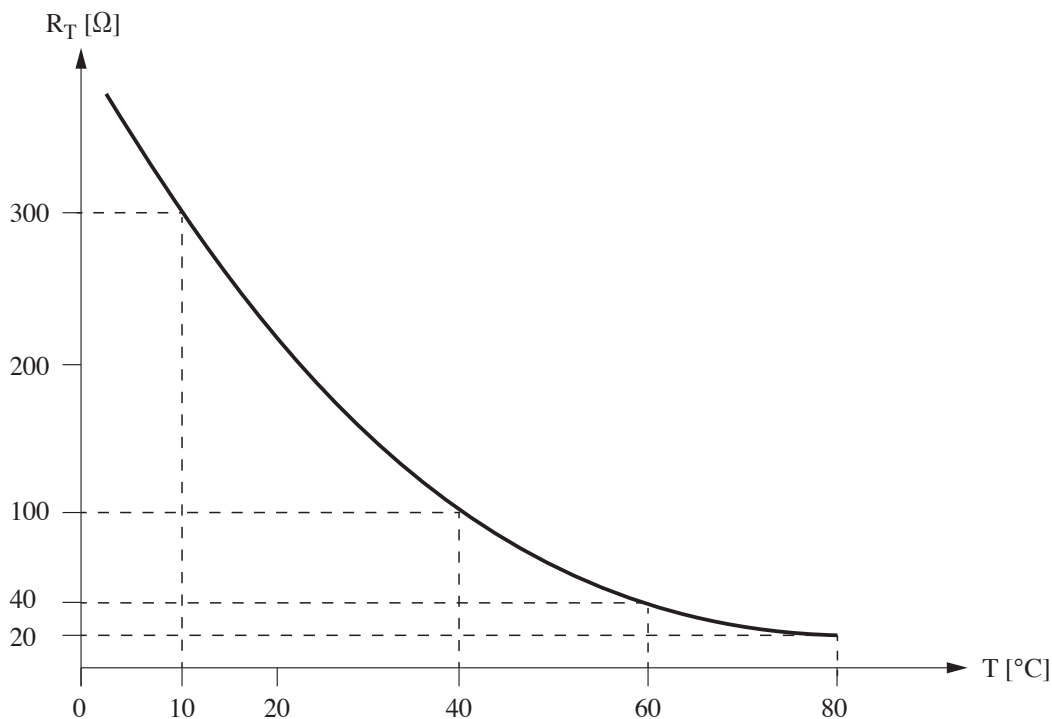
שאלה 9

- א. הגדר את המושגים **חיישן ומתמר**. (6 נק')
- ב. סרטט את המעגל החשמלי שבו משולב חיישן עוצמת הארה (פוטודיודה או LDR). (7 נק')
- ג. באיור א' לשאלה 9 נתון מעגל חשמלי המשמש כחיישן טמפרטורה. המעגל כולל גשר נגדים ומגבר מכשור (12 נק').
- שהגברו $A_V = \frac{V_o}{V_i} = 2$.



איור א' לשאלה 9

התנגדותו של הנגד R_T תלויה בטמפרטורה - אופיין ההתנגדות שלו כפונקצייה של הטמפרטורה מתואר באיור ב' לשאלה.



איור ב' לשאלה 9

1. חשב את מתח המוצא V_o בטמפרטורה של 40°C .
2. באיזו טמפרטורה יתקבל במוצא המעגל מתח של 4 V ?

בהצלחה!

תופעות מעבר במעגלי RLC

- ניתוח של מעגלים חשמליים הכוללים שני רכיבים האוגרים אנרגייה מחייב שימוש במשוואה דיפרנציאלית מסדר שני.
- המשוואה האופיינית עבור מעגל מקבילי ומעגל טורי היא: $s^2 + 2 \cdot \alpha \cdot s + \omega_0^2 = 0$ או $s^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_0 \cdot s + \omega_0^2 = 0$, כאשר: $\omega_0^2 = \frac{1}{L \cdot C}$ במעגל טורי ובמעגל מקבילי.
 α – מקדם המידה, מקדם התיקון של ריסון אקספוננציאלי (neper frequency), המשקף את ההשפעה של R על הריסון.

במעגל טורי

$$\alpha = \frac{R}{2 \cdot L}$$

במעגל מקבילי

$$\alpha = \frac{1}{2 \cdot R \cdot C}$$

השורשים של המשוואה האופיינית הם: $s_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}$

- סוגי הריסון האפשריים במעגל חשמלי מסדר שני נתונים בטבלה שלהלן:

סוגי הריסון במעגל חשמלי מסדר שני		
תופעה טבעית של הריסון	התנאי	סוג הריסון
המתח או הזרם מגיעים לערכם הסופי ללא תנודות	$\alpha^2 > \omega_0^2$	ריסון יתר – overdamped
למתח או לזרם תנודות מתרסנות עד לערכם הסופי	$\alpha^2 < \omega_0^2$	תת ריסון – underdamped
המתח או הזרם מגיעים בערכם הסופי ל"קצה" התנודות	$\alpha^2 = \omega_0^2$	ריסון קריטי – critically damped

אין להעביר את הנוסחאון
לנבחן אחר

נוסחאון במערכות הספק לכיתה י"ד (16 עמודים)

1. מפלי מתח

מתח ישר

מפל מתח מרבי	-	ΔU	[V]
מוליכות סגולית של המוליכים	-	γ	[m / Ωmm^2]
שטח חתך של המוליכים	-	A	[mm ²]
זרם בקטע k	-	I_k	[A]
אורך של קטע k	-	L_k	[m]
הפסדי הספק מרביים	-	ΔP	[W]

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

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

מתח חילופין חד-מופעי

מפל מתח מרבי	-	ΔU	[V]
מפל מתח מרבי ממשי	-	ΔU_a	[V]
מפל מתח מרבי היגבי	-	ΔU_r	[V]
היגב הקו ליחידת אורך עבור מוליך אחד	-	X_o	[Ω / m]
זרם בקטע k	-	I_k	[A]
אורך של קטע k	-	L_k	[m]
הזווית בין מתח לזרם בקטע k	-	φ_k	
מוליכות סגולית של המוליכים	-	γ	[m / Ωmm^2]
שטח חתך של המוליכים	-	A	[mm ²]
הפסדי הספק מרביים	-	ΔP	[W]
הזרם הממשי בקטע k	-	I_a	[A]
הזרם ההיגבי בקטע k	-	I_r	[A]

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

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

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

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

$$I_a = I \cos \varphi$$

$$I_r = I \sin \varphi$$

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

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

מתח חילופין תלת-מופעי

מפל מתח מרבי	-	ΔU	[V]
מפל מתח מרבי ממשי	-	ΔU_a	[V]
מפל מתח מרבי היגבי	-	ΔU_r	[V]
היגב הקו ליחידת אורך עבור מוליך אחד	-	X_o	$[\Omega / m]$
זרם בקטע k	-	I_k	[A]
אורך של קטע k	-	L_k	[m]
הזווית בין מתח לזרם בקטע k	-	φ_k	
מוליכות סגולית של המוליכים	-	γ	$[m / \Omega mm^2]$
שטח חתך של המוליכים	-	A	$[mm^2]$
הפסדי הספק מרביים	-	ΔP	[W]
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	-	γ	$[m / \Omega mm^2]$
מפל המתח המרבי	-	ΔU	[V]
מפל המתח הממשי המרבי	-	ΔU_a	[V]
הזווית בין מתח לזרם בקטע k	-	φ_k	

$$A_k = K \cdot I_k$$

$K = \frac{2 \sum_{k=1}^{k=n} L_k}{\gamma \Delta U}$
$K = \frac{2 \sum_{k=1}^{k=n} (L_k \cos \varphi_k)}{\gamma \Delta U_a}$
$K = \frac{\sqrt{3} \sum_{k=1}^{k=n} (L_k \cos \varphi_k)}{\gamma \Delta U_a}$

זרם ישר

זרם חילופין
חד-מופעי

זרם חילופין
תלת-מופעי

3. מינימום חומר

זרם ישר

שטח חתך בקטע k	-	A_k	$[mm^2]$
זרם בקטע k	-	I_k	$[A]$
מוליכות סגולית של המוליכים	-	γ	$[m / \Omega mm^2]$
מפל המתח המרבי	-	ΔU	$[V]$
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	$[mm^2]$
זרם בקטע k	-	I_k	$[A]$
מוליכות סגולית של המוליכים	-	γ	$[m / \Omega mm^2]$
מפל המתח הממשי המרבי	-	ΔU_a	$[V]$
הזווית בין מתח לזרם בקטע k	-	φ_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

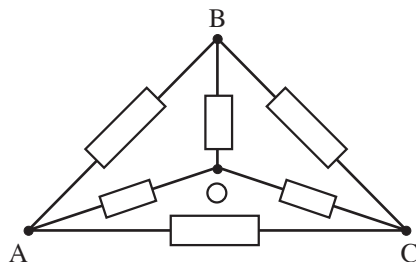
שטח חתך בקטע k	-	A_k	$[mm^2]$
זרם בקטע k	-	I_k	$[A]$
מוליכות סגולית של המוליכים	-	γ	$[m / \Omega mm^2]$
מפל המתח הממשי המרבי	-	ΔU_a	$[V]$
הזווית בין מתח לזרם בקטע k	-	φ_k	
אורך של קטע k	-	L_k	$[m]$

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

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

4. חישובים ברשתות

הפיכת משולש לכוכב



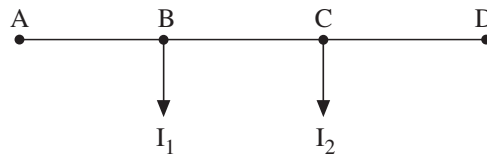
$$R_{OB} = \frac{R_{AB} \cdot R_{BC}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{AC}}$$

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

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

פירוק הזרמים והעברתם לנקודות חדשות

- A, D הנקודות שאליהן מעבירים את הזרמים
- R [Ω] התנגדות הקטע בין הנקודות המצוינות



הערה:

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

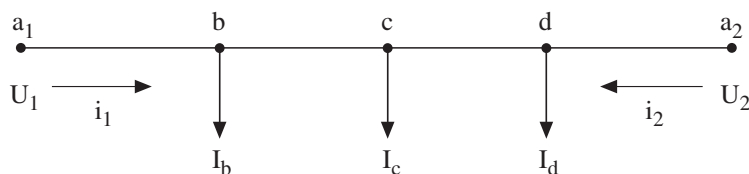
$$I_{1 \rightarrow A} = I_1 \frac{R_{BD}}{R_{AD}}$$

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

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

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

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.

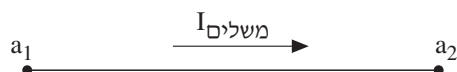
$$i_1 = \frac{I_b \cdot L_{ba_2} + I_c \cdot L_{ca_2} + I_d \cdot L_{da_2}}{L_{a_1 a_2}}$$

2. במערכת זרם חילופין יש לבצע חישובים של זרם מדומה, זרם אקטיבי וזרם ריאקטיבי.

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

רשת בעלת זינה משני כיוונים במתחים שונים בעלי מופעים זהים

הזרם המשלים:



זרם ישר/זרם חילופין חד-מופעי

(כאשר: $U_1 > U_2$)

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

(כאשר: $U_1 > U_2$)

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

זרם חילופין תלת-מופעי

הזרם האמיתי:

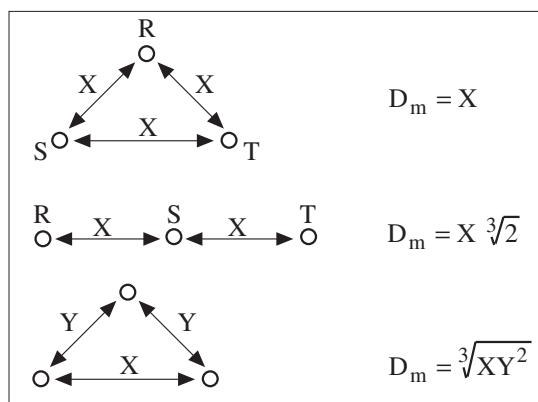
$$I_1 = i_1 + I_{\text{משלים}}$$

$$I_2 = i_2 - I_{\text{משלים}}$$

5. פרמטרים של קווי הספק

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

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



6. פרמטרים של שנאים

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

$$R_T = \Delta P_{Cu} \cdot \frac{U_n^2}{S_n^2}$$

$$R_T = \frac{U_{r\%} \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n}$$

$$X_T = \frac{U_{x\%} \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n}$$

$$U_{x\%} = \sqrt{U_{k\%}^2 - U_{r\%}^2}$$

$$Z_T = \sqrt{R_T^2 + X_T^2}$$

$$G_T = \frac{\Delta P_{Fe}}{U_n^2}$$

$$Y_T = \frac{I_0}{U_n} = \frac{I_{0\%} \cdot S_n}{100 \cdot U_n^2}$$

$$B_T = \sqrt{Y_T^2 - G_T^2}$$

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

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

טמפרטורה אופפת של הסביבה: 35°C

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

טמפרטורה אופפת של האדמה: 30°C

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. מקדם תיקון עבור התקנת כבלים אחדים באדמה

מספר המעגלים			מעגלים צמודים	אופן התקנת המעגלים
4	3	2		
0.59	0.66	0.78	מעגלים שהמרחק המזערי בין המעטים שלהם 7 ס"מ	
0.67	0.72	0.83		

נוסחאון במערכות הספק לכיתה י"ד

נספח לשאלון 733913, אביב תש"ף

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

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

נתונים של מוליכי חמרון ונחושת שזורים וגלויים בטמפרטורת סביבה 20 °C

Al		Cu		D _m [cm]										קוטר	שטח חתך
I	R ₀	I	R ₀	56	100	200	300	400	500	600	700	1000			
[A]	[Ω/km]	[A]	[Ω/km]	X ₀ [Ω/km]											
—	—	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 הסגולית – γ [m / Ωmm²]

המשקל הסגולי – g [g / cm³]

חומרים		
חמרון	נחושת	
35	57	
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

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

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

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

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

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

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

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

הפרשי מתח בנקודה K	-	δU_K	[%]
תוספות של מתח בשנאים	-	U_T	[%]
מפלי מתח מהמקור עד לנקודה K	-	ΔU_{AK}	[%]
הפרשי מתח מזעריים	-	$\delta U_{\min}$	[%]
הפרשי מתח מרביים	-	$\delta U_{\max}$	[%]
מתח הייחוס	-	U_n	[V]
מפל מתח	-	ΔU	[V]
הספק פעיל של העומס	-	P	[W]
התנגדות	-	R	[Ω]
הספק עיוור של העומס	-	Q	[VAr]
היגב	-	X	[Ω]
מפל המתח על השנאי	-	ΔU_T	[%]
מפל המתח על הקו	-	ΔU_L	[%]
זרם הרשת	-	I	[A]
התנגדות השנאי (למופע)	-	R_T	[Ω]
ההיגב ההשראותי של שנאי (למופע)	-	X_T	[Ω]
ההתנגדות של מוליך אחד	-	R_L	[Ω]
ההיגב ההשראותי של מוליך אחד	-	X_L	[Ω]
יחס השנאה	-	K_x	
מתח בסליל הראשוני	-	U_1	[V]
מתח בסליל השניוני	-	U_2	[V]
מספר דרגות ויסות	-	n	
שיעור ויסות המתח (באחוזים) בין דרגה לדרגה	-	a	

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
 ΔP_{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
 ω $\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$ - 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]
- צפיפות זרם כלכלית j [A / mm²]
- אורך הקו L [km]
- הפסדי הספק מרביים $\Delta P_{\%}$
- מוליכות סגולית γ [m / Ωmm²]
- הזווית בין מתח לזרם בקו φ
- הזרם המרבי $I_{\max}$ [A]
- ההספק המרבי $P_{\max}$ [kW]
- המתח הנקוב U_n [kV]
- שטח חתך מומלץ A [mm²]

$$U = \frac{\sqrt{3} j L \cdot 100}{\Delta P_{\%} \gamma \cos \varphi}$$

$$I_{\max} = \frac{P_{\max}}{\sqrt{3} U_n \cos \varphi}$$

$$A = \frac{I_{\max}}{j}$$

- אנרגייה שנתיית W_{ψ} [kWh]
- הספק רגעי P [kW]
- הספק ממוצע P_{av} [kW]
- זמן שימוש בהספק מרבי T_v [h]

$$W_{\psi} = \int_0^{8760} P dt$$

$$P_{av} = \frac{W_{\psi}}{8760}$$

$$T_v = \frac{W_{\psi}}{P_{\max}} = \frac{P_{av} \cdot 8760}{P_{\max}} = \frac{1}{P_{\max}} \int_0^{8760} P dt$$

T_v [h]	j [A / mm ²]			
	נבלים		קווים עיליים	
	Cu	Al	Cu	Al-Fe
$T_v > 5000$ h	2	1.3	1.25	0.75
$3000 \text{ h} < T_v < 5000$ h	2.25	1.5	1.75	1
$T_v < 3000$ h	2.65	1.65	2.5	1.5

חישוב כלכלי של שטח החתך המומלץ:

ההשקעה לשנה בבניית רשת החשמל	-	C_1	[ש"ח]	$C_1 = (a \cdot A + b) \cdot L \cdot p$
חלק ההשקעה התלוי בשטח החתך של המוליכים	-	a	$\left[\frac{\text{ש"ח}}{\text{km} \cdot \text{mm}^2} \right]$	
שטח החתך של המוליכים	-	A	$[\text{mm}^2]$	
חלק ההשקעה שאינו תלוי בשטח החתך של המוליכים	-	b	$\left[\frac{\text{ש"ח}}{\text{km}} \right]$	
אורך הקו	-	L	[km]	
החזר שנתי של ההוצאות, ריבית ופחת	-	p	$\left[\frac{\%}{100} \right]$	
ההוצאות לכיסוי הפסדי ההספק ברשת	-	C_2	[ש"ח]	$C_2 = 3 \cdot I_{\max}^2 \cdot R \cdot T_S \cdot c = 3 \cdot I_{\max}^2 \cdot \frac{\rho L}{A} \cdot T_S \cdot c$
זרם העומס העובר בקו	-	$I_{\max}$	[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	[kΩ]	
זמן ההפסדים המרביים ברשת	-	T_S	[h]	
מחיר האנרגייה החשמלית	-	c	$\left[\frac{\text{ש"ח}}{\text{kWh}} \right]$	
התנגדות סגולית של המוליכים	-	ρ	$\left[\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \right]$	

נוסחת קלווין:

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

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

11. הפסדי הספק והפסדי אנרגיה ברשת חשמל

הפסדי אנרגייה ברשת חשמל:

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

הפסדי אנרגייה בשנאי:

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

כאשר N שנאים זהים מחוברים זה לזה במקביל:

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

העמסה אופטימלית של שנאי:

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

ההספק האופטימלי להפעלת שנאי הנוסף ל-N שנאים:

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

בהצלחה!

אין להעביר את הנוסחאון
לנבחן אחר

נוסחאון במכונות חשמל והינע לכיתה י"ד

(22 עמודים)

א. מכונה סינכרונית

1. מחולל סינכרוני

משוואות מתחים וקטוריות

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

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

$$E_{ph} \text{ [V]} - \text{כא"מ מופעי}$$

$$U_{ph} \text{ [V]} - \text{מתח מופעי}$$

$$I_{ph} \text{ [A]} - \text{זרם מופעי בסטטור}$$

$$R_a \text{ [\Omega]} - \text{התנגדות העוגן למופע אחד}$$

$$X_s \text{ [\Omega]} - \text{היגב סינכרוני למופע אחד}$$

חישוב היגב סינכרוני

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

$$\left(\begin{array}{l} \text{בהזנחת } R_a \\ \text{ובעקום מיגנוט} \\ \text{לינארי} \end{array} \right) \frac{E_{phk}}{E_{pho}} = \frac{I_{fk}}{I_{fo}}$$

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

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

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

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

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

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

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

φ - הזווית בין הזרם המופעי למתח המופעי

ψ - הזווית בין הזרם המופעי לכא"מ המופעי

Θ - הזווית בין המתח המופעי לכא"מ המופעי

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

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

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

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

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

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

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

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

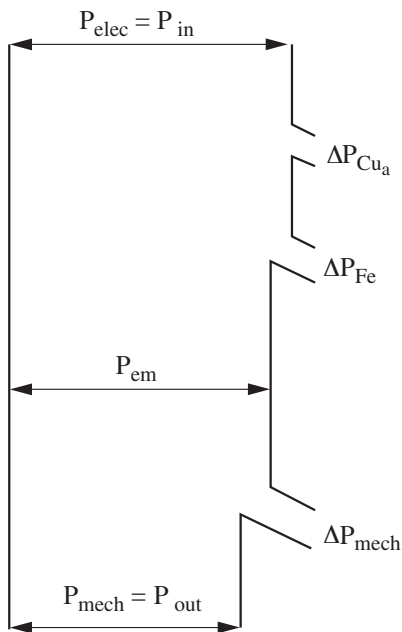
עבור עומס קיבולי ($-90^\circ \leq \varphi < 0^\circ$):

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

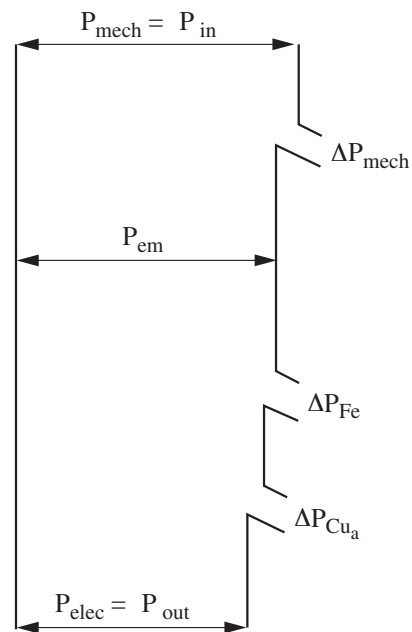
$$\tan \Psi = \frac{U_{ph} \cdot \sin \varphi + I_{ph} \cdot X_s}{U_{ph} \cdot \cos \varphi - I_{ph} \cdot R_a}$$

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

הספקים ואיבודי הספק במכונה סינכרונית:



מנוע



מחולל

הספק מכני	-	P_{mech}	[W]	$P_{\text{mech}} = M \cdot \omega_s = \frac{M \cdot n_s}{9.55}$
מומנט	-	M	[Nm]	
מהירות זוויתית סינכרונית	-	ω_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_{elec}	[W]	
גורם הספק	-	$\cos \varphi$		$P_{\text{elec}} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi = 3 \cdot U_{\text{ph}} \cdot I_{\text{ph}} \cdot \cos \varphi$
כא"מ מופעי	-	E_{ph}	[V]	
היגב סינכרוני מופעי	-	X_s	[Ω]	$P_{\text{elec}} = \frac{3 \cdot E_{\text{ph}} \cdot U_{\text{ph}}}{X_s} \cdot \sin \Theta$
הזווית בין הזרם המופעי לכא"מ המופעי	-	ψ		
הזווית בין המתח המופעי לכא"מ המופעי	-	Θ		$Q = \frac{3}{X_s} \left[U_{\text{ph}} \cdot E_{\text{ph}} \cdot \cos \Theta - U_{\text{ph}}^2 \right]$
הספק עיוור	-	Q	[VAr]	
הספק אלקטרו-מגנטי	-	P_{em}	[W]	$P_{\text{em}} = 3 \cdot E_{\text{ph}} \cdot I_{\text{ph}} \cdot \cos \psi$
הפסדי נחושת בסטטור	-	ΔP_{Cu_a}	[W]	
הפסדי נחושת בסליל (DC) ברוטור	-	ΔP_{Cu_e}	[W]	$\Delta P_{\text{Cu}_a} = 3 \cdot I_{\text{ph}}^2 \cdot R_a$
הפסדים מגנטיים בליבת הברזל	-	ΔP_{Fe}	[W]	
הפסדים מכניים	-	ΔP_{mech}	[W]	
נצילות המכונה	-	η	[%]	$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \cdot 100$
הספק מוצא	-	P_{out}	[W]	
הספק מבוא	-	P_{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)

$t = 0$ - הפרש הטמפרטורה בין גוף המנוע לסביבה בזמן ΔT_0 [°C]

$$\Delta T = \Delta T_0 + (\Delta T_\infty - \Delta T_0) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

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

- הפרש הטמפרטורה בין גוף המנוע לסביבה בזמן t כלשהו ΔT [°C]

$$\left(\begin{array}{c} \text{בהנחת} \\ \Delta T_0 = 0 \end{array}\right) \Delta T = \Delta T_\infty \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

זמן - t [sec]

קבוע זמן חימום - τ [sec]

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

$$\alpha = \alpha_o (1 - K \cdot \sqrt{V})$$

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

$$\tau = \frac{G \cdot C}{\alpha \cdot A_T}$$

מהירות האוויר - V $\left[\frac{m}{sec}\right]$

מקדם האיוורור - K

שטח פיזור החום - A_T [m²]

$$\Delta T_\infty = \frac{\Delta P}{\alpha \cdot A_T}$$

משקל - G [kg]

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

$$\Delta P = \frac{P_n}{\eta} - P_n$$

סכום הפסדי ההספק של המנוע - ΔP [W]

הספק נקוב של המנוע - P_n [W]

נצילות המנוע - η

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

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

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

זמן הפסקה	-	t_o	[sec]	$P_n = \frac{P_x}{\sqrt{\left(\frac{1}{1-e^{-\frac{t_w}{\tau}}}\right) \frac{1}{K_2} - \frac{K_1}{K_2}}}$
זמן עבודה	-	t_w	[sec]	
קבוע זמן תרמי	-	τ	[sec]	
הספק נקוב של המנוע בעבודה ממושכת	-	P_n	[W]	$P_n = P_x \left(1 - e^{-\frac{t_w}{\tau}}\right)$ (עבור נצילות קבועה)
הספק העומס	-	P_x	[W]	
מהירות זוויתית	-	ω	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}}\right]$	
מהירות סיבוב	-	n	[rpm]	$P_x = M \cdot \omega$
קבוע ההפסדים הקבועים	-	K_1		$\omega = \frac{2\pi n}{60}$
קבוע ההפסדים המשתנים	-	K_2		

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

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

$$\left(\begin{array}{c} \text{כאשר} \\ t_w \ll \tau \end{array}\right) \quad P_n = P_x \cdot \sqrt{\frac{t_w}{t_w + t_o}}$$

בחירת הספק מנוע בעומס משתנה בעבודה ממושכת:

שיטת ההפסדים הממוצעים

הפסדי הספק ממוצעים - ΔP_{av} [W]

הפסדי הספק בקטע i - ΔP_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 - α

מקדם הרעת תנאי הקרור בהתנעה ובבלימה - β

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

התנאי לבחירת מנוע: $\Delta P_{av} \leq \Delta P_n$

שיטת הזרם השקול

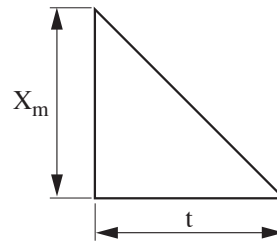
$$I_{eq} = \sqrt{\frac{\sum (I_i^2 \cdot t_i)}{\beta(t_s + t_b) + \alpha \cdot t_r + \sum t_w}}$$

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

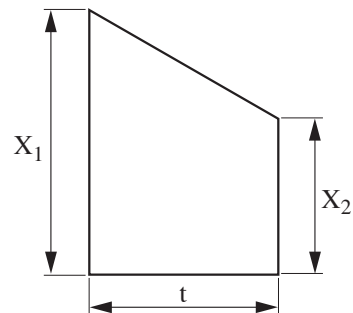
משולש:



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

- X_{eq} זרם/מומנט שקול
- X_m זרם/מומנט מרבי

טרפז:



- X_1 זרם/מומנט מרבי
- X_2 זרם/מומנט מזערי

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

קביעת הספק מנוע בעבודה בטמפרטורת סביבה לא תקנית:

$$P_T \quad [W] \quad - \quad \text{הספק העמסה מותר}$$

$$P_n \quad [W] \quad - \quad \text{הספק נומינלי}$$

$$\Delta T_{\infty T} \quad [^{\circ}C] \quad - \quad \text{הפרש הטמפרטורה בין המנוע לסביבה בטמפרטורה לא תקנית}$$

$$\Delta T_{\infty} \quad [^{\circ}C] \quad - \quad \text{הפרש הטמפרטורה בין המנוע לסביבה בטמפרטורה תקנית}$$

$$K_1 \quad - \quad \text{קבוע ההפסדים הקבועים}$$

$$K_2 \quad - \quad \text{קבוע ההפסדים המשתנים}$$

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

ג. מנוע לזרם ישר

כוח אלקטרו-מניע:

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

$$E \quad [V] \quad - \quad \text{כוח אלקטרו-מניע}$$

$$z \quad - \quad \text{מספר המוליכים ברוטור}$$

$$p \quad - \quad \text{מספר זוגות הקטבים}$$

$$a \quad - \quad \text{מספר זוגות הענפים המקבילים ברוטור}$$

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

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

$$a = 1 \quad (\text{ליפוף גלי פשוט})$$

$$a = p \quad (\text{ליפוף עניבה פשוט})$$

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

מומנטים:

מומנט אלקטרו-מגנטי	-	M_{em}	[Nm]
מומנט נומינלי	-	M_n	[Nm]
איבודי מומנט בריקס	-	ΔM_o	[Nm]
מהירות זוויתית	-	ω	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$
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	-	η	

$$P_{in} = U \cdot I \quad P_{em} = E \cdot I_a$$

$$P_n = M_n \cdot \omega \quad \omega = \frac{2\pi n}{60}$$

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

איבודי הספק:

איבודי הספק ברוטור	-	ΔP_{Cu_a}	[W]
איבודי הספק בסליל העירור המקבילי	-	ΔP_{Cu_e}	[W]
איבודי הספק בסליל העירור הטורי	-	ΔP_{Cu_s}	[W]
איבודי הספק בברזל	-	ΔP_{Fe}	[W]
איבודי הספק מכניים	-	ΔP_{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	$I_a = I - I_e$	$I_e = \frac{U}{R_e + R_{re}}$		
מעורב ארוך			$E = U - I_a(R_a + R_s)$	$NI = N_e \cdot I_e \pm N_s \cdot I_a$ (*)
מעורב קצר			$E = U - I \cdot R_s - I_a \cdot R_a$	$NI = N_e \cdot I_e \pm N_s \cdot I$ (*)

(*) הערה:

הסימן (+) מתייחס לעירור מעורב מתוסף

הסימן (-) מתייחס לעירור מעורב מתחסר

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

ויסות מהירות במנוע לזרם ישר בעירור מקבילי/נפרד

הכנסת נגד טורי למעגל העוגן:	n [rpm]	מהירות סיבוב
$n_o = \frac{U}{K_e \Phi}$	n_o [rpm]	מהירות סיבוב בריקם
$n = \frac{E}{K_e \Phi}$	R_x [Ω]	התנגדות נוספת במעגל הרוטור
$n = \frac{U - I_a \cdot (R_a + R_x)}{K_e \Phi}$	R_a [Ω]	התנגדות סליל העוגן
$n = \frac{U}{K_e \Phi} - \frac{M_{em}}{9.55} \cdot \frac{R_a + R_x}{(K_e \Phi)^2}$	Φ [Wb]	שטף מגנטי
$n = \frac{E}{K_e \Phi} = \frac{U - I_a \cdot R_a}{K_e \Phi}$	U [V]	מתח
$\frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \frac{N_e \cdot I_{e1}}{N_e \cdot I_{e2}}$	E [V]	כוח אלקטרו-מניע
$n = \frac{U_a - I_a \cdot R_a}{K_e \Phi} = \frac{U \cdot D - I_a \cdot R_a}{K_e \Phi}$	N_e [T]	מספר כריכות בסליל העירור
$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}}$	M_{em} [Nm]	מומנט אלקטרו-מגנטי

הכנסת נגד טורי למעגל העירור:

$$n = \frac{E}{K_e \Phi} = \frac{U - I_a \cdot R_a}{K_e \Phi}$$

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

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

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

בבלימה דינמית:	I_b	[A]	- זרם העוגן בבלימה
	R_a	[Ω]	- התנגדות העוגן
	R_b	[Ω]	- התנגדות נוספת במעגל העוגן בבלימה
בבלימה בחיבור נגדי:	E_b	[V]	- הכא"מ בבלימה
	U	[V]	- מתח

$$I_b = \frac{E_b}{R_a + R_b}$$

$$I_b = \frac{E_b + U}{R_a + R_b}$$

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

זמני בלימה והתנעה

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

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

זמן התנעה	–	t_s	[sec]
זמן בלימה	–	t_b	[sec]
מומנט תנופה כולל המועבר לציר המנוע	–	GD_T^2	[kgf · m ²]
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]

ד. מנוע השראה תלת-מופעי

זרמים:

זרם נומינלי קווי	-	I_{n_1}	[A]
גורם ההספק	-	$\cos \varphi$	
נצילות	-	η	
זרם נומינלי פאזי בסטטור	-	I_{nph_1}	[A]
זרם נומינלי פאזי ברוטור, המשוקף לסטטור	-	I'_{nph_2}	[A]
מתח פאזי בסטטור	-	U_{ph_1}	[V]
התנגדות סליל הסטטור	-	R_1	[Ω]
התנגדות סליל הרוטור המשוקף לסטטור	-	R'_2	[Ω]
ההיגב הכולל של סלילי המנוע	-	X_T	[Ω]
זרם נומינלי פאזי ברוטור	-	I_{ph_2}	[A]
כא"מ פאזי ברוטור נייח	-	$E_{ph_{2(0)}}$	[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	[Ω]
היגב סליל הרוטור המשוקף לסטטור	-	X'_2	[Ω]

$$I_{n_1} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi \cdot \eta}$$

$$I'_{nph_2} = I_{nph_1} = \frac{U_{ph_1}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_T^2}}$$

$$a_{ph} = \frac{U_{ph_1}}{E_{ph_{2(0)}}} \approx \frac{I_{ph_2}}{I_{ph_1}}$$

מהירות וגורם החליקה:

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

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

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

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

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

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

$$X_T = X_1 + X'_2$$

הספקים, איבודי הספק ומומנטים:

מומנט נומינלי	-	M_n	[Nm]
מומנט אלקטרו-מגנטי	-	M_{em}	[Nm]
מומנט קריטי	-	M_K	[Nm]
מהירות סיבוב נומינלית	-	n_n	[rpm]
מהירות סיבוב סינכרונית	-	n_s	[rpm]
גורם החליקה	-	s	
חליקה קריטית	-	s_K	

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

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

$$P_{em} = \frac{P_{mech}}{1-s} = \frac{\Delta P_{Cu2}}{s}$$

$$\Delta P_{Cu2} = P_{mech} \cdot \frac{s}{1-s} = 3 \cdot I_{ph2}^2 \cdot R_2$$

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

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

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

הספק נומינלי (מופק)	-	P_n	[W]
הספק חשמלי (מושקע)	-	P_{in}	[W]
הספק אלקטרו-מגנטי	-	P_{em}	[W]
הספק מכני	-	P_{mech}	[W]
נצילות	-	η	

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

איבודי הספק מכניים	-	ΔP_{mech}	[W]
איבודי הספק בנחשת בסטור	-	ΔP_{Cu1}	[W]
איבודי הספק בנחשת ברוטור	-	ΔP_{Cu2}	[W]
זרם נומינלי קווי	-	I_{n1}	[A]
זרם פאזי ברוטור	-	I_{ph2}	[A]

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

$$\left(\begin{array}{c} \text{נוסחת קלוס} \\ \text{מקורבת} \end{array} \right) \quad M = \frac{2 \cdot M_K}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}}$$

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

$$X_T = X_1 + X'_2$$

הכנסת נגד נוסף לרוטור מלופף:

כאשר המנוע מועמס

במומנט נקוב:

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

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:

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

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

התנגדות פאזית נוספת ברוטור	-	R_x	$[\Omega]$
התנגדות הפאזית של הרוטור	-	R_2	$[\Omega]$
גורם החליקה במהירות מסוימת	-	s_x	
גורם החליקה במהירות נומינלית	-	s_n	
מומנט	-	M_x	$[Nm]$
מומנט נומינלי	-	M_n	$[Nm]$
מהירות סיבוב	-	n_x	$[rpm]$
מהירות סיבוב סינכרונית	-	n_s	$[rpm]$

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	-	ϕ	[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		
מומנט תנופה	-	GD^2	[kgf · m ²]	$R = R_a + R_s$
ההתנגדות הכוללת של מעגל העוגן	-	R	[Ω]	$\Delta n_L = \frac{M_L R}{K_e K_m \phi^2}$
התנגדות סליל העוגן	-	R_a	[Ω]	
התנגדות המתנע במעגל העוגן	-	R_s	[Ω]	
שינוי מהירות כתוצאה מעומס	-	Δn_L	[rpm]	$n = n_L + (n_{st} - n_L) e^{-\frac{t}{T}}$
זמן	-	t	[sec]	$n_L = n_o - \Delta n_L$
מהירות סיבוב בזמן התנעה (ברגע $t = 0$)	-	n_{st}	[rpm]	
מהירות סיבוב המתאימה למומנט העומס M_L	-	n_L	[rpm]	$n_L = n_o - \frac{I_L R}{K_e \phi}$
זרם המתאים למומנט נגדי M_L	-	I_L	[A]	
זרם המנוע בהתנעה	-	I_{st}	[A]	$n_{st} = n_o - \frac{I_{st} R}{K_e \phi}$
זרם רגעי של המנוע	-	i	[A]	
מומנט המתפתח על-ידי המנוע בזמן התנעה	-	M_{st}	[kgf · m]	$I_L = \frac{M_L}{K_m \phi}$
מומנט העומס בזמן התנעה (מומנט נגדי)	-	M_L	[kgf · m]	
				$i = I_L + (I_{st} - I_L) e^{-\frac{t}{T}}$
				$M = M_L + (M_{st} - M_L) e^{-\frac{t}{T}}$

בלימה דינמית של מנוע זרם ישר בעירור מקבילי

מפל מהירות הסיבוב כתוצאה מעומס M_L , בערך מוחלט	Δn_L [rpm]	$n = -\Delta n_L + (n_{st} + \Delta n_L) e^{-\frac{t}{T}}$
התנגדות כוללת במעגל העוגן	R [Ω]	
התנגדות סליל העוגן	R_a [Ω]	$\Delta n_L = \frac{M_L R}{K_e K_m \phi^2} = \frac{I_L R}{K_e \phi}$
התנגדות נגד הבלימה	R_b [Ω]	
מומנט העומס בזמן בלימה (מומנט נגדי)	M_L [kgf · m]	$R = R_a + R_b$
שטף בסליל העירור	ϕ [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 ²]	
מהירות סיבוב בזמן בלימה (ברגע $t = 0$)	n_{st} [rpm]	$\text{כאשר } U = 0:$
זמן	t [sec]	$n_{st} = \frac{I_{st} R}{K_e \phi}$
זרם המתאים לעומס נגדי M_L	I_L [A]	
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	$[\Omega]$

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

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

$$R = R_a + R_b$$

ב. עם הפיכת קוטביות

כא"מ מושרה בתחילת הבלימה	-	E_{st}	[V]
מהירות סיבוב בריקם	-	n_o	[rpm]
מפל מהירות הסיבוב כתוצאה מעומס M_L , בערך מוחלט	-	Δn_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

לשאלון 733913, אביב תש"ף

תרגום המונח			המונח
אנגלית	רוסית	ערבית	
reactive power	Реактивная мощность	قدرة ارتكاسية	הספק היגבי
active power	Активная мощность	قدرة فعّالة	הספק ממשי
inductive	Индуктивность	حثّي	השראותי
torque	Момент	عزم	מומנט
three-phase induction motor	Трёхфазный двигатель	مُحرّك الحثّ ثلاثي الأطوار	מנוע השראה תלת-מופע
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	هبوط الجهد على الفرش	מפל המתח על המברשות
efficiency	коэффициент полезного действия	الكفاءة	נצילות
capacitor bank	Конденсаторная батарея	بطارية مكثفات	סוללת קבלים
nominal load	Номинальная нагрузка	حمل اسمي	עומס נקוב
external excitation	Внешнее возбуждение	إثارة خارجية	עירור זר
magnetization curve	Намагничивающая цепь	منحنى المغنطة	עקום המיגנוט
wound rotor	Ротор с намоткой	الدوّار الملفوف	רוטור מלופף
no-load	Холостой ход	لا حمل	ריקים
three-phase network	Трёхфазная сеть	شبكة ثلاثية الأطوار	רשת תלת-מופעית
uniform cross-sectional area	Однородное сечение	مساحة مقطع عرضي موحد	שטח חתך אחיד
transformation station	Трансформаторная станция	محطة تحويل	תחנת השנאה
one-line chart	Однолинейная схема	تخطيط أحادي السطر	תרשים חד-קווי