

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 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 של תשובותיך.
- אם לדעתך חסרים נתונים הדרושים לפתרון שאלה, אתה רשאי להוסיף אותם, בתנאי שתנמק מדוע הוספת אותם.
- בכתיבת פתרונות חישוביים, קבלת מֶרֶב 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.

בשאלון זה 9 עמודים ו-38 עמודי נספחים.

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

בהצלחה!

השאלות

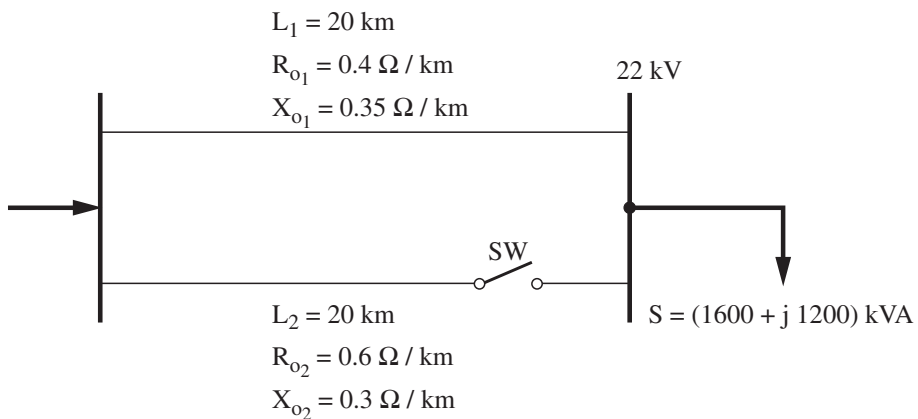
ענה על ארבע מבין השאלות 1–9. עליך לענות על שאלה אחת לפחות מן הפרק הראשון ועל שאלה אחת לפחות מן הפרק השני.

פרק ראשון: מערכות הספק ב'

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

שאלה 1

באיור לשאלה 1 נתון תרשים חד-קווי של רשת תלת-מופעית הכוללת שני קווים המזינים צרכן במתח גבוה 22 kV. האורך ופרמטרי הרוחב (B, G) של שני הקווים – זהים.



איור לשאלה 1

א. חשב את מפל המתח על הקו L_1 כאשר הקו L_2 מנותק (המנתק SW פתוח).

ב. סרטט את מעגל התמורה של שני הקווים L_1 ו- L_2 כאשר:

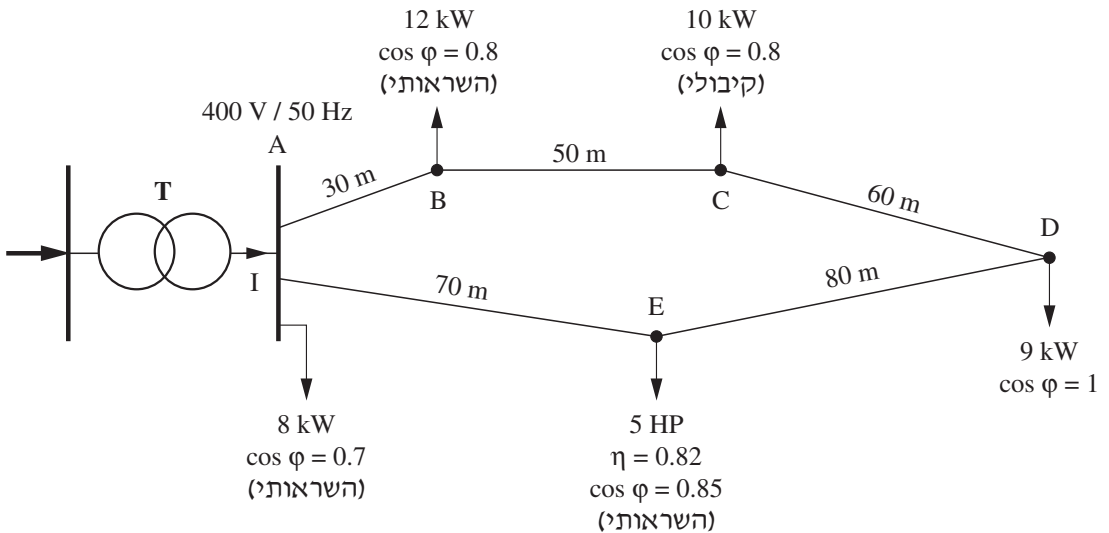
1. המנתק SW פתוח.

2. המנתק SW סגור.

ג. קבע באיזה מבין הקווים הזרם יהיה גדול יותר כאשר המנתק SW סגור. נמק את קביעתך.

שאלה 2

באיור לשאלה 2 נתונה רשת תלת-מופעית, המוזנת בפס-הצבירה A במתח $400 \text{ V} / 50 \text{ Hz}$. מוליכי הרשת עשויים מנחושת $\left(\gamma = 57 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} \right)$, וההיגב ההשראותי שלהם הוא $X_o = 0.3 \cdot 10^{-3} \frac{\Omega}{\text{m}}$.

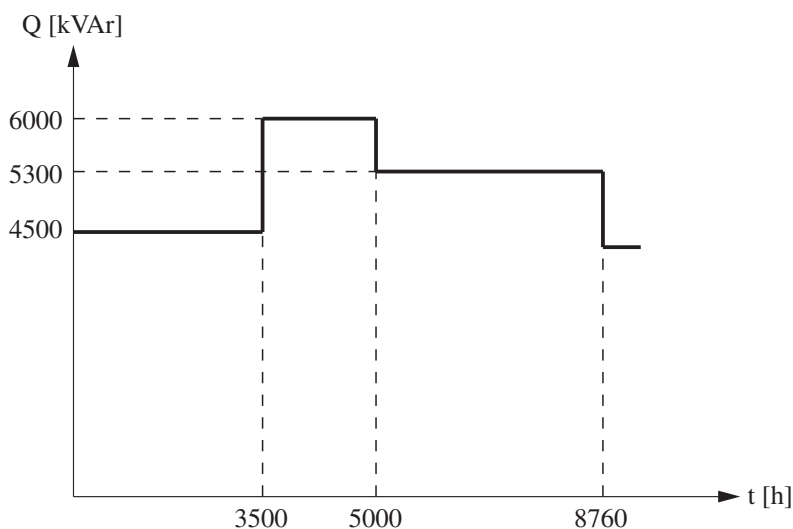
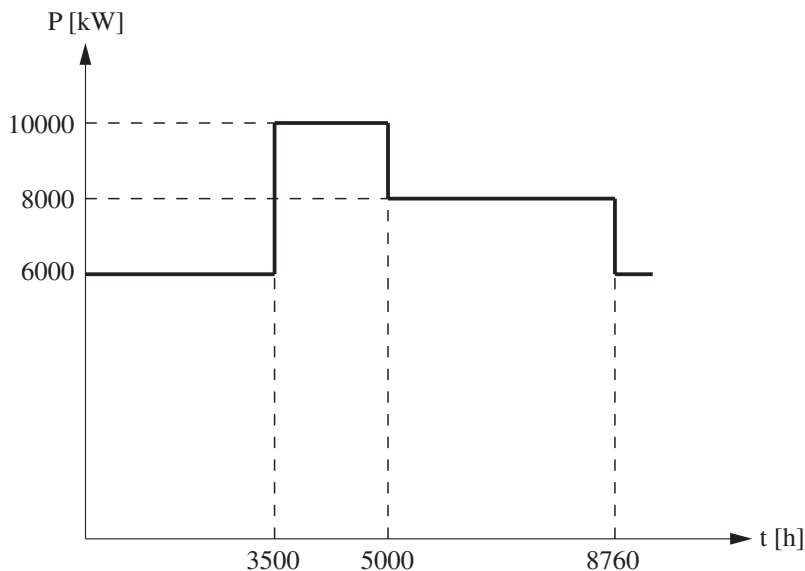


איור לשאלה 2

- א. חשב את הזרם בכל אחד מקטעי הרשת (רשום את תשובותיך בהצגה מרוכבת).
- ב. 1. חשב את שטח-החתך האחיד של מוליכי הרשת, אם ידוע כי מפל המתח המרבי המותר הוא 5%.
2. קבע את שטח-החתך התקני (המסחרי) של מוליכי הרשת.
- ג. 1. חשב את המתח המזערי ברשת הזו.
2. חשב את הזרם I המזון על-ידי השנאי T לפס-הצבירה A (רשום את תשובתך בהצגה מרוכבת).

שאלה 3

מערכת הספק תלת-מופעית מוזנת על-ידי קו מתח גבוה 33 kV . מוליכי הקו עשויים מחמרן-פלדה ($Al-Fe$).
באיור לשאלה 3 נתונות עקומת ההעמסה הממשית (האקטיבית) השנתית ועקומת ההעמסה העיוורת (הריאקטיבית) השנתית של מערכת ההספק הזו.



איור לשאלה 3

א. סרטט את העקומה השנתית של הזרם במערכת ההספק הזו, וציין את ערך הזרם בכל אחד מקטעי הזמן.

ב. חשב את זמן ההפסדים המרביים ברשת הזו (T_S).

ג. להלן נתוני המערכת התלת-מופעית:

- חלק ההשקעה התלוי בשטח-החתך של המוליכים: $a = 1600 \frac{\text{ש"ח}}{\text{km} \cdot \text{mm}^2}$

- מחיר האנרגיה החשמלית: $c = 0.55 \frac{\text{ש"ח}}{\text{kWh}}$

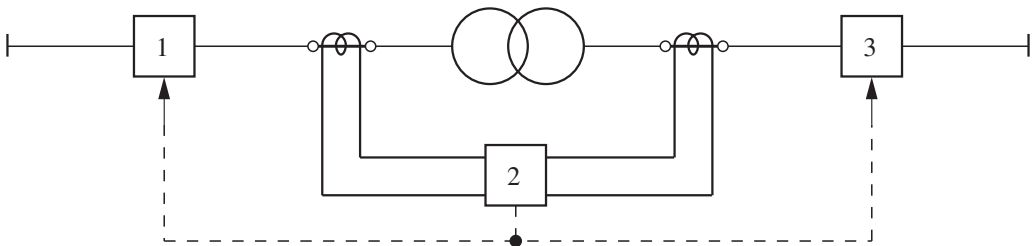
- ההחזר השנתי של הוצאות, ריבית ופחת: $p = 15\%$

- המוליכות הסגולית של מוליכי הקו: $\gamma = 35 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$

חשב את שטח-החתך של מוליכי הרשת המומלץ משיקול כלכלי (על-פי נוסחת קלווין).

שאלה 4

באיור לשאלה 4 נתון תרשים חד-קווי המתאר את אחת ההגנות של שנאי בתחנת משנה.



איור לשאלה 4

א. ציין את סוג ההגנה המתוארת באיור, ורשום את שמות מרכיבי מערכת ההגנה המצוינים בספרות $1 \div 3$.

ב. 1. מהו תפקידה של ההגנה המתוארת באיור?

2. מהו עקרון פעולתה של ההגנה הזו?

ג. 1. איזו הגנה מיועדת להגן על שנאי בתחנת משנה מפני קצף לגוף השנאי?

2. כיצד חייבת להיות מוארכת נקודת-האפס של סלילי השנאי על-מנת לאפשר שימוש בהגנה הזו?

פרק שני: המרת אנרגיה והינע ב'

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

שאלה 5

נתוניו הנקובים של מנוע השראה תלת-מופעי הם:

$$400 \text{ V} ; 50 \text{ Hz} ; 720 \text{ rpm} ; 2p = 8$$

המומנט המרבי שהמנוע מפתח הוא $180 \text{ N}\cdot\text{m}$ במהירות סיבוב של 645 rpm .

א. חשב את היחס בין מומנט ההתנעה לבין המומנט המרבי של המנוע, כאשר הוא מותנע בהתנעה ישירה במתח של 400 V .

ב. 1. מתניעים את המנוע בהתנעה ישירה במתח של 280 V . חשב את מומנט ההתנעה.

2. כאשר מהירות הסיבוב של המנוע מגיעה ל- 500 rpm משנים את מתח ההזנה מ- 280 V ל- 400 V . חשב את המומנט שהמנוע מפתח רגע לפני שינוי המתח ואת המומנט שהוא מפתח מיד לאחר השינוי.

שאלה 6

נתוניו הנקובים של מחולל סינכרוני תלת-מופעי, שסלילי הסטטור שלו מחוברים בחיבור כוכב, הם:

$$17.5 \text{ MVA} ; 24 \text{ kV} ; \cos \varphi = 0.8 \text{ (השראותי)} ; X_s = 10 \Omega ; R_a = 0 \Omega$$

זרם העירור הנדרש לקבלת מתח הדקים נקוב בריקם הוא 200 A .
הנח כי עקום המגנט של המחולל הוא ליניארי.

א. חשב את זרם העירור הנדרש על-מנת שהמחולל יזין עומס התנגדותי טהור בהספק של 15 MW במתח נקוב.

ב. חשב את ההספק העיוור (הריאקטיבי) שעל המחולל להזין לעומס שהספקו הממשי הוא 15 MW , אם זרם העירור הוא 260 A ומתח ההדקים הוא 24 kV .

ג. האם נכון שהמחולל יפעל בתנאים הנתונים בסעיף ב' לאורך זמן? נמק את תשובתך.

שאלה 7

נתוניו הנקובים של מנוע לזרם ישר בעירור מקבילי הם:

$$8 \text{ kW} ; 220 \text{ V} ; 1400 \text{ rpm} ; \eta = 85\%$$

התנגדות סליל העירור היא $R_e = 176 \Omega$, והתנגדות סליל העוגן היא $R_a = 0.18 \Omega$.
המנוע מוזן במתח נקוב ומועמס באופן קבוע במומנט השווה ל-80% מהמומנט הנקוב שלו.
הנח כי קיים קשר ליניארי בין זרם העירור לשטף המגנטי.

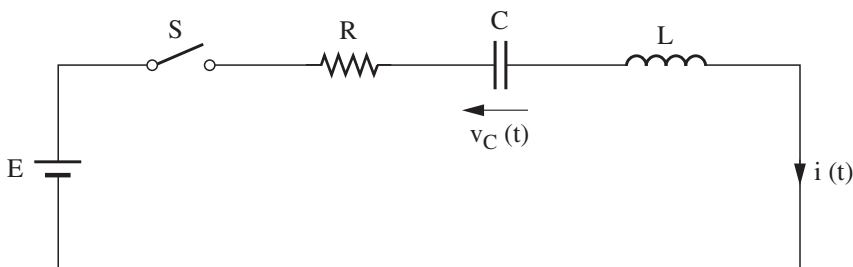
- א. כדי להגדיל את מהירות הסיבוב של המנוע מוסיפים נגד שהתנגדותו 44Ω במעגל העירור. חשב את זרם העוגן ואת מהירות הסיבוב שאליה יגיע המנוע לאחר הוספת הנגד הזה.
- ב. משנים את מצב העבודה של המנוע לבלימה גנרטורית (עם החזרת אנרגיה לרשת). מהירות הסיבוב ההתחלתית של המנוע במצב העבודה הזה לזו שחושבה בסעיף א', וזרם העוגן ברגע השינוי גדול פי 2.2 מזרם העוגן הנקוב. במצב העבודה הזה מקצרים את הנגד שהתנגדותו 44Ω במעגל העירור, ומוסיפים נגד נוסף R_b במעגל העוגן. חשב את התנגדותו של הנגד R_b .
- ג. מה יהיה ערכו של זרם העוגן בגמר תהליך ירידת מהירות הסיבוב של המכונה והתייצבותה במצב עבודה של מנוע, כאשר הנגד הנוסף R_b מחובר במעגל העוגן?

פרק שלישי: מערכות וטכניקות בקרה

(לכל שאלה – 25 נקודות).

שאלה 8

באיור לשאלה 8 נתון מעגל RLC טורי. המתג S היה פתוח זמן רב, וברגע $t = 0$ סוגרים אותו. המתח על הקבל לפני סגירת המתג היה $V_C(t < 0) = 5 \text{ V}$. מתח-המקור E גדול מ-5 V.

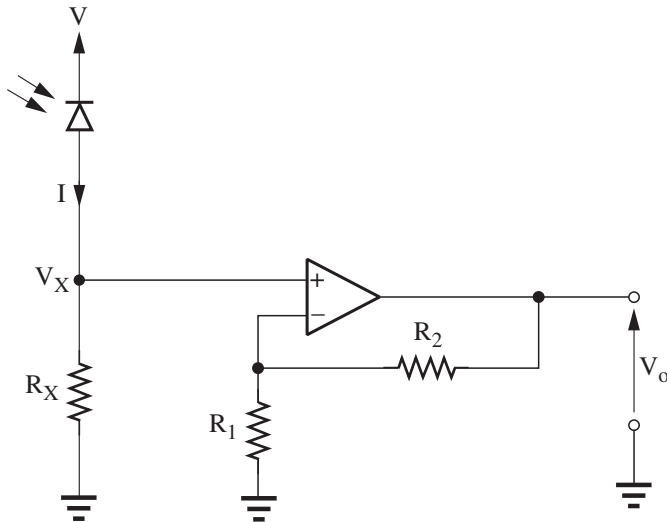


איור לשאלה 8

- א. סרטט גרף עקרוני המתאר את המתח על הקבל, $v_C(t)$, כאשר $t \geq 0$, אם נתון כי הריסון במעגל הוא ריסון יתר.
- ב. סרטט גרף עקרוני המתאר את הזרם במעגל, $i(t)$, כאשר $t \geq 0$, אם נתון כי הריסון במעגל הוא תת-ריסון.
- ג. האם אפשרי שבתגובה לאות-מבוא מדרגה במעגל חשמלי מסדר שני יתנוודדו המתח או הזרם בתדירות הזוויתית הטבעית (ω_0)? נמק את תשובתך.

שאלה 9

- א. 1. סרטט תרשים מלבנים עקרוני המתאר את המבנה של חיישן קירבה קיבולי.
2. הסבר את עקרון פעולתו של חיישן קירבה קיבולי.
- ב. באיור לשאלה 9 נתון המעגל החשמלי של מתמר אור למתח המבוסס על מגבר-שרת. המתמר משמש לגילוי רמת ההארה בחדר.



איור לשאלה 9

1. הסבר את עקרון פעולתו של המעגל החשמלי המתואר באיור.
2. רשום ביטוי המתאר את מתח-המוצא V_o כפונקציה של זרם הפוטו-דיודה, I .

בהצלחה!

זכות היוצרים שמורה למדינת ישראל.
אין להעתיק או לפרסם אלא ברשות משרד החינוך.

אין להעביר את הנוסחאון
לנבחן אחר

מקום נוסף להקמת נבחן

נוסחאון במערכות הספק לכיתה י"ד (16 עמודים)

1. מפלי מתח

מתח ישר

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

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

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

מתח חילופין חד-מופעי

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

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

מתח חילופין תלת-מופעי

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

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

2. צפיפות זרם אחידה

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

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

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

זרם חילופין חד-מופע

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

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

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

זרם חילופין תלת-מופע

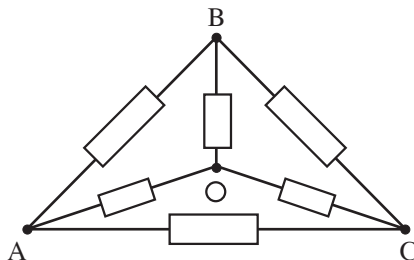
שטח חתך בקטע k	-	A_k	$[\text{mm}^2]$
זרם בקטע k	-	I_k	$[\text{A}]$
מוליכות סגולית של המוליכים	-	γ	$[\text{m} / \Omega\text{mm}^2]$
מפל המתח הממשי המרבי	-	ΔU_a	$[\text{V}]$
הזווית בין מתח לזרם בקטע k	-	φ_k	
אורך של קטע k	-	L_k	$[\text{m}]$

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

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

4. חישובים ברשתות

הפיכת משולש לכוכב

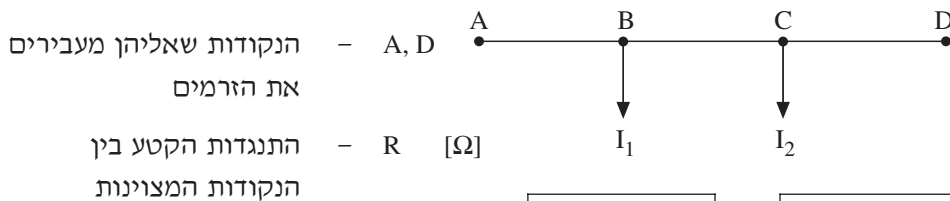


$$R_{OB} = \frac{R_{AB} \cdot R_{BC}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{AC}}$$

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

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

פירוק הזרמים והעברתם לנקודות חדשות



הערה:

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

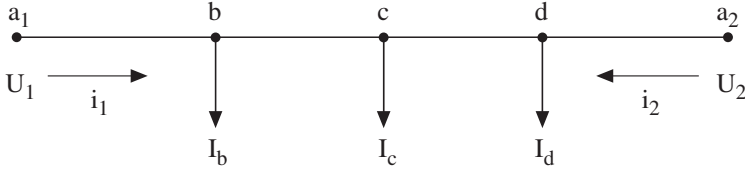
$$I_{1 \rightarrow A} = I_1 \frac{R_{BD}}{R_{AD}}$$

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

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

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

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



הזרמים המדומים:

הערות:

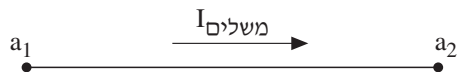
1. כאשר מוליכי הרשת עשויים מאותו חומר ושטח החתך שלהם אינו אחיד לכל אורכם, יש להשתמש בהתנגדויות במקום באורכים בנוסחאות לחישוב הזרמים המדומים.
2. במערכת זרם חילופין יש לבצע חישובים של זרם מדומה, זרם אקטיבי וזרם ריאקטיבי.

$$i_1 = \frac{I_b \cdot L_{ba2} + I_c \cdot L_{ca2} + I_d \cdot L_{da2}}{L_{a1a2}}$$

$$i_2 = \frac{I_b \cdot L_{ba1} + I_c \cdot L_{ca1} + I_d \cdot L_{da1}}{L_{a1a2}}$$

רשת בעלת זינה משני כיוונים במתחים שונים בעלי מופעים זהים

הזרם המשלים:



זרם ישר/זרם חילופין חד-מופעי

$$(U_1 > U_2 \text{ (כאשר)}) \quad I_{\text{משלים}} = \frac{U_1 - U_2}{2 \cdot R_{a1a2}}$$

זרם חילופין תלת-מופעי

$$(U_1 > U_2 \text{ (כאשר)}) \quad I_{\text{משלים}} = \frac{U_1 - U_2}{\sqrt{3} \cdot R_{a1a2}}$$

$$I_1 = i_1 + I_{\text{משלים}}$$

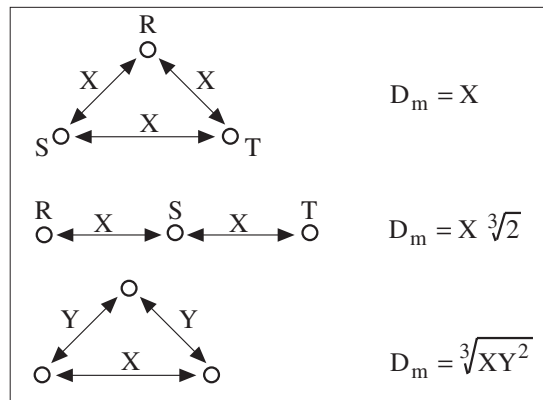
הזרם האמיתי:

$$I_2 = i_2 - I_{\text{משלים}}$$

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

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

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

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

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

Al		Cu		D _m [cm]									קוטר	שטח חתך
I	R ₀	I	R ₀	56	100	200	300	400	500	600	700	1000		
[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 γ [m / Ωmm²]

הסגולית

המשקל g [g / cm³]

הסגולי

חומרים		
חמרן	נחושת	
35	57	γ
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	-	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 [VA _r]
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	-	a

(באחוזים) בין דרגה לדרגה
המשך בעמוד 13

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

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

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

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

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

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

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

8. מתח קורונה

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

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

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

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

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

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

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

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 / Ω mm²]

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]

אנרגיה שנתית - W_{ψ} [kWh]

הספק רגעי - P [kW]

הספק ממוצע - P_{av} [kW]

זמן שימוש בהספק מרבי - T_v [h]

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

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

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

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

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

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

T_v [h]	j [A / mm ²]			
	כבלים		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 בביט 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	$[\text{km}]$	
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	[ש"ח]	
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	$\left[\frac{\text{ש"ח}}{\text{kWh}} \right]$	
התנגדות סגולית של המוליכים	-	ρ	$\left[\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \right]$	

נוסחת קלווין:

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

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

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)	ΔP_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)	ΔP_{Cu_n} [kW]	-		
מקדם ההעמסה של השנאי	β	-		$\beta = \frac{S}{S_n}$

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:

(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 לכתוב את השם

נוסחאון במכונות חשמל והינע לכיתה י"ד

(22 עמודים)

א. מכונה סינכרונית

1. מחולל סינכרוני

משוואות מתחים וקטורית

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

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

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

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

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

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

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

חישוב היגב סינכרוני

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

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

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

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

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

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

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

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

φ - הזווית בין הזרם המופעי
למתח המופעי

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

Ψ - הזווית בין הזרם המופעי
לכא"מ המופעי

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

Θ - הזווית בין המתח המופעי
לכא"מ המופעי

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 התנגדתי ($\varphi = 0^\circ$):

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

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

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

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

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

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

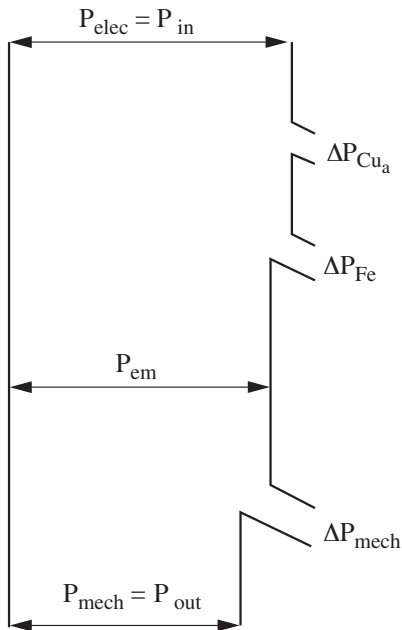
עבור עומס קיבולי ($-90^\circ \leq \varphi < 0^\circ$):

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

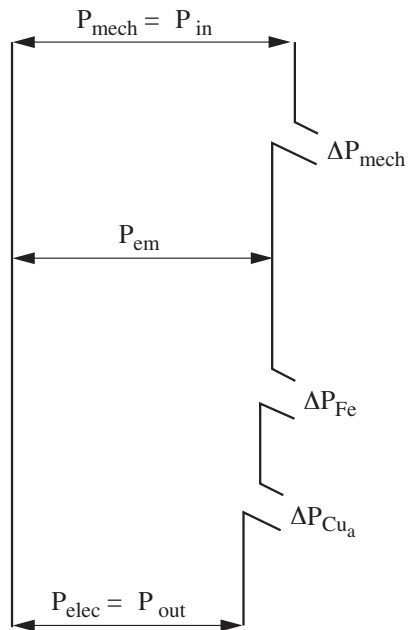
$$\tan \Psi = \frac{U_{ph} \cdot \sin \varphi + I_{ph} \cdot X_s}{U_{ph} \cdot \cos \varphi - I_{ph} \cdot R_a}$$

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

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	-	$\cos \varphi$	
כא"מ מופעי	-	E_{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 [Ω]	
הזווית בין הזרם המופעי לכא"מ המופעי	-	ψ	$P_{\text{elec}} = \frac{3 \cdot E_{\text{ph}} \cdot U_{\text{ph}}}{X_s} \cdot \sin \Theta$
הזווית בין המתח המופעי לכא"מ המופעי	-	Θ	
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_{em} [W]	
הפסדי נחושת בסטטור	-	ΔP_{Cu_a} [W]	$P_{\text{em}} = 3 \cdot E_{\text{ph}} \cdot I_{\text{ph}} \cdot \cos \psi$
הפסדי נחושת בסליל (DC) ברוטור	-	ΔP_{Cu_e} [W]	
הפסדים מגנטיים בליבת הברזל	-	ΔP_{Fe} [W]	$\Delta P_{\text{Cu}_a} = 3 \cdot I_{\text{ph}}^2 \cdot R_a$
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)

הפרש הטמפרטורה בין גוף ΔT_0 [°C] -

המנוע לסביבה בזמן $t = 0$

הפרש הטמפרטורה בין גוף ΔT_∞ [°C] -

המנוע לסביבה בזמן $t = \infty$

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

הפרש הטמפרטורה בין ΔT [°C] -

גוף המנוע לסביבה בזמן t

כלשהו

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

זמן t [sec] -

קבוע זמן חימום τ [sec] -

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

$$\alpha = \alpha_0 (1 - K \cdot \sqrt{V})$$

מקדם פיזור החום באוויר α_0 $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$ -
נח

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

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

מקדם האיורור K -

שטח פיזור החום A_T [m²] -

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 ΔP [W] -
המנוע

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 עבודה	-	t_w	[sec]
קבוע זמן תרמי	-	τ	[sec]
הספק נקוב של המנוע בעבודה ממושכת	-	P_n	[W]
הספק העומס	-	P_x	[W]
מהירות זוויתית	-	ω	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$
מהירות סיבוב	-	n	[rpm]

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

(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.):

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

$\left(\begin{array}{c} \text{כאשר} \\ t_w \ll \tau \end{array} \right)$

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

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 - 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 - t_w [sec]

שאינו בלימה, התנעה או הפסקה

הזרם השקול - I_{eq} [A]

זרם המנוע בקטע i - I_i [A]

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

התנאי לבחירת מנוע:

שיטת הזרם השקול

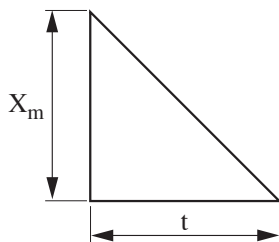
$$I_{eq} = \sqrt{\frac{\sum (I_i^2 \cdot t_i)}{\beta(t_s + t_b) + \alpha \cdot t_r + \sum t_w}}$$

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:

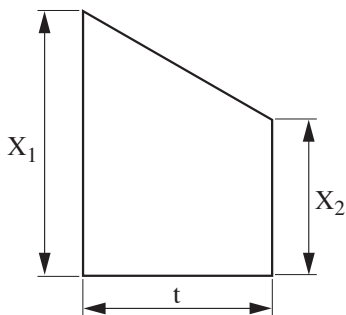


$$X_{eq} = \frac{X_m}{\sqrt{3}}$$

X_{eq} - זרם/מומנט שקול

X_m - זרם/מומנט מרבי

טרפז:



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

X_1 - זרם/מומנט מרבי

X_2 - זרם/מומנט מזערי

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	-	ΔT_{∞}	[°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 המקבילים ברוטור	-	a	

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

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

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

(ליפוף גלי פשוט) $a = 1$

(ליפוף עניבה פשוט) $a = p$

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

מומנטים:

- מומנט אלקטרו-מגנטי - M_{em} [Nm]
מומנט נומינלי - M_n [Nm]
איבודי מומנט בריקם - 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

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

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

$$P_n = M_n \cdot \omega$$

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

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

איבודי הספק:

- איבודי הספק ברוטור - 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 [Ω]
התנגדות סליל העירור המקבילי - R_e [Ω]
התנגדות סליל העירור הטורי - R_s [Ω]

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

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

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

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

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	[Ω]
התנגדות סליל העירור המקבילי	-	R_e	[Ω]
התנגדות נוספת במעגל העירור	-	R_{re}	[Ω]
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

הכנסת נגד טורי למעגל העוגן:

$$n_o = \frac{U}{K_e \Phi} \quad n = \frac{E}{K_e \Phi}$$

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

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

הכנסת נגד טורי למעגל העירור:

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

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

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

מתח - U [V]

מתח הרוטור השקול - U_a [V]

מחזור הפעולה - D

זמן פעולה - T_{on} [sec]

זמן הפסקה - T_{off} [sec]

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

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

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

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

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:

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

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

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

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

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

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

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]	
מומנט אלקטרו-מגנטי בבלימה	-	$M_{em(b)}$	[Nm]	
מומנט נומינלי	-	M_n	[Nm]	
איבודי מומנט בריקם	-	ΔM_o	[Nm]	
מומנט בלימה	-	M_b	[Nm]	
הספק נומינלי	-	P_n	[W]	
הספק אלקטרו-מגנטי	-	P_{em}	[W]	
מהירות נקובה	-	n_n	[rpm]	
מהירות זוויתית	-	ω_n	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$	

$$M_{em(b)} = K_m \Phi \cdot I_b$$

$$M_{em(n)} = K_m \Phi \cdot I_{a(n)} = \frac{P_{em(n)}}{\omega_n}$$

$$M_{(n)} = \frac{P_n}{\omega_n} = 9.55 \cdot \frac{P_{(n)}}{n_{(n)}}$$

$$\Delta M_o = M_{em(n)} - M_{(n)}$$

$$M_b = M_{em(b)} + \Delta M_o$$

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

זמני בלימה והתנעה

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

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

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

ד. מנוע השראה תלת-מופעי

זרמים:

$$I_{1n} \quad [A] \quad - \quad \text{זרם נומינלי קווי}$$

$$\cos \varphi \quad - \quad \text{גורם ההספק}$$

$$\eta \quad - \quad \text{נצילות}$$

$$I_{1phn} \quad [A] \quad - \quad \text{זרם נומינלי פאזי בסטטור}$$

$$I'_{2phn} \quad [A] \quad - \quad \text{זרם נומינלי פאזי ברוטור, המשוקף לסטטור}$$

$$U_{ph1} \quad [V] \quad - \quad \text{מתח פאזי בסטטור}$$

$$R_1 \quad [\Omega] \quad - \quad \text{התנגדות סליל הסטטור}$$

$$R'_2 \quad [\Omega] \quad - \quad \text{התנגדות סליל הרוטור המשוקף לסטטור}$$

$$X_T \quad [\Omega] \quad - \quad \text{ההיגב הכולל של סלילי המנוע}$$

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

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

$$a_{ph} \quad - \quad \text{יחס התמסורת}$$

$$n \quad [rpm] \quad - \quad \text{מהירות סיבוב בעומס}$$

$$n_s \quad [rpm] \quad - \quad \text{מהירות סינכרונית}$$

$$s \quad - \quad \text{גורם החליקה}$$

$$f \quad [Hz] \quad - \quad \text{תדירות}$$

$$M_K \quad [Nm] \quad - \quad \text{מומנט קריטי}$$

$$s_n \quad - \quad \text{חליקה נומינלית}$$

$$s_K \quad - \quad \text{חליקה קריטית}$$

$$X_1 \quad [\Omega] \quad - \quad \text{היגב סליל הסטטור}$$

$$X'_2 \quad [\Omega] \quad - \quad \text{היגב סליל הרוטור המשוקף לסטטור}$$

$$I_{1n} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi \cdot \eta}$$

$$I'_{2phn} = I_{1phn} = \frac{U_{ph1}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_T^2}}$$

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

מהירות וגורם החליקה:

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

$$f_2 = f_1 \cdot s$$

$$n = n_s (1 - s)$$

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

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

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

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

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

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

$$X_T = X_1 + X'_2$$

הספקים, איבודי הספק ומומנטים:

מומנט נומינלי	-	M_n	[Nm]	$M_n = 9.55 \frac{P_n}{n_n}$
מומנט אלקטרו-מגנטי	-	M_{em}	[Nm]	$M_{em} = 9.55 \frac{P_{em}}{n_s}$
מומנט קריטי	-	M_K	[Nm]	$P_{em} = \frac{P_{mech}}{1-s} = \frac{\Delta P_{Cu2}}{s}$
מהירות סיבוב נומינלית	-	n_n	[rpm]	$\Delta P_{Cu2} = P_{mech} \cdot \frac{s}{1-s} = 3 \cdot I_{2ph}^2 \cdot R_2$
מהירות סיבוב סינכרונית	-	n_s	[rpm]	$\Delta P_{Cu1} = 3 \cdot I_{1ph}^2 \cdot R_1$
גורם החליקה	-	s		$P_{mech} = P_n + \Delta P_{mech}$
חליקה קריטית	-	s_K		$P_{in} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{1n} \cdot \cos \varphi$
הספק נומינלי (מופק)	-	P_n	[W]	$P_n = P_{in} \cdot \eta$
הספק חשמלי (מושקע)	-	P_{in}	[W]	$M_K = \frac{9.55 \cdot 3 \cdot U_{ph}^2}{2 \cdot n_s \cdot X_T}$
הספק אלקטרו-מגנטי	-	P_{em}	[W]	$M = \frac{2 \cdot M_K}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}}$
הספק מכני	-	P_{mech}	[W]	$M_{em} = \frac{9.55 \cdot 3 \cdot U_{ph}^2 \cdot \frac{R'_2}{s}}{n_s \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right]}$
נצילות	-	η		$X_T = X_1 + X'_2$
איבודי הספק מכניים	-	ΔP_{mech}	[W]	
איבודי הספק בנחושת בסטור	-	ΔP_{Cu1}	[W]	
איבודי הספק בנחושת ברוטור	-	ΔP_{Cu2}	[W]	
זרם נומינלי קווי	-	I_{1n}	[A]	
זרם פאזי ברוטור	-	I_{2ph}	[A]	

הכנסת נגד נוסף לרוטור מלופף:

כאשר המנוע מועמס

במומנט נקוב:

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

התנגדות פאזית נוספת
ברוטור - R_x [Ω]

ההתנגדות הפאזית של
הרוטור - R_2 [Ω]

כאשר המנוע מועמס

במומנט כלשהו (M_x):

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

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]

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

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

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 ישיר 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]	$n = n_L + (n_{st} - n_L) e^{-\frac{t}{T}}$
שינוי מהירות כתוצאה מעומס	- Δn_L [rpm]	$n_L = n_o - \Delta n_L$
זמן	- t [sec]	
מהירות סיבוב בזמן התנעה (ברגע $t = 0$)	- n_{st} [rpm]	$n_L = n_o - \frac{I_L R}{K_e \phi}$
מהירות סיבוב המתאימה למומנט העומס M_L	- n_L [rpm]	$n_{st} = n_o - \frac{I_{st} R}{K_e \phi}$
זרם המתאים למומנט נגדי M_L	- I_L [A]	$I_L = \frac{M_L}{K_m \phi}$
זרם המנוע בהתנעה	- I_{st} [A]	
זרם רגעי של המנוע	- i [A]	$i = I_L + (I_{st} - I_L) e^{-\frac{t}{T}}$
מומנט המתפתח על-ידי המנוע בזמן התנעה	- M_{st} [kgf · m]	
מומנט העומס בזמן התנעה (מומנט נגדי)	- M_L [kgf · m]	$M = M_L + (M_{st} - M_L) e^{-\frac{t}{T}}$

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]	$\Delta n_L = \frac{M_L R}{K_e K_m \phi^2} = \frac{I_L R}{K_e \phi}$
התנגדות סליל העוגן	- R_a [Ω]	
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]	
זמן	- t [sec]	$n_{st} = \frac{I_{st} R}{K_e \phi} : U = 0$
זרם המתאים לעומס נגדי M_L	- I_L [A]	
זרם המנוע בתחילת הבלימה	- I_{st} [A]	$i = I_L - (I_{st} + I_L) e^{-\frac{t}{T}}$
זרם רגעי של המנוע	- i [A]	

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

א. ללא הפיכת קוטביות

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

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	[Ω]
התנגדות סליל העוגן	-	R_a	[Ω]
התנגדות נגד הבלימה	-	R_b	[Ω]

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

$$R = R_a + R_b$$

ב. עם הפיכת קוטביות

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

כא"מ מושרה בתחילת הבלימה	-	E_{st}	[V]
מהירות סיבוב בריקס	-	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]

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

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

בהצלחה!