

מערכות הספק ומכונות חשמל והינע ה'

למתמחים במערכות הספק פיקוד ובקרה במגמת הנדסת חשמל בקרה ואנרגיה

(כיתה י"ד)

הוראות לנבחנים

א. משך הבחינה: ארבע שעות.

ב. מבנה השאלון ומפתח ההערכה: בשאלון זה תשע שאלות. עליכם להשיב על ארבע שאלות בלבד.

לכל שאלה – 25 נקודות. סך-הכול – 100 נקודות.

ג. חומר עזר מותר בשימוש:

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

2. מחשבון.

3. "חוק ותקנות בנושא חשמל".

ד. הוראות מיוחדות:

1. ענו על מספר השאלות הנדרש בשאלון. המעריך יקרא ויעריך את מספר התשובות הנדרש בלבד, לפי סדר כתיבתן במחברת, ולא יתייחס לתשובות נוספות.

2. התחילו כל תשובה לשאלה חדשה בעמוד חדש.

3. כתבו את התשובות אך ורק בעט.

4. הקפידו לנסח את התשובות כהלכה ולסרטט את התרשימים בבהירות.

5. כתבו את התשובות בכתב-יד ברור, כדי לאפשר הערכה נאותה שלהן.

6. בכל שאלה ניתנו הנתונים לפתרונה. אם לדעתכם חסר נתון, הוסיפו אותו על-פי שיקול דעתכם ופתרו בעזרתו את השאלה. כתבו בתשובה את הנתון שהוספתם.

7. בכתובת פתרונות חישוביים, קבלת מֶרֶב הנקודות מותנית בהשלמת כל המהלכים שלהלן, בסדר שבו הם רשומים:

* כתיבת הנוסחה המתאימה.

* הצבה של כל הערכים ביחידות המתאימות.

* חישוב (אפשר באמצעות מחשבון).

* כתיבת התוצאה המתקבלת, יחד עם יחידות המידה המתאימות.

* ליווי הפתרון החישובי בהסבר קצר.

8. בנספח ד' לשאלון זה מובא מילון מונחים בשפות עברית, אנגלית, רוסית וערבית. תוכלו להיעזר בו בעת הצורך.

9. צרפו את שלושת דפי ה-A4 (חומר העזר המותר לשימוש) למחברת הבחינה.

הוראות למשגיחים: יש לוודא כי הנבחנים צירפו את דפי ה-A4 למחברת הבחינה.

בשאלון זה 9 עמודים ו-47 עמודי נספחים

השאלות בשאלון זה מנוסחות בלשון רבים,

אף על פי כן על כל תלמידה וכל תלמיד להשיב עליהן באופן אישי.

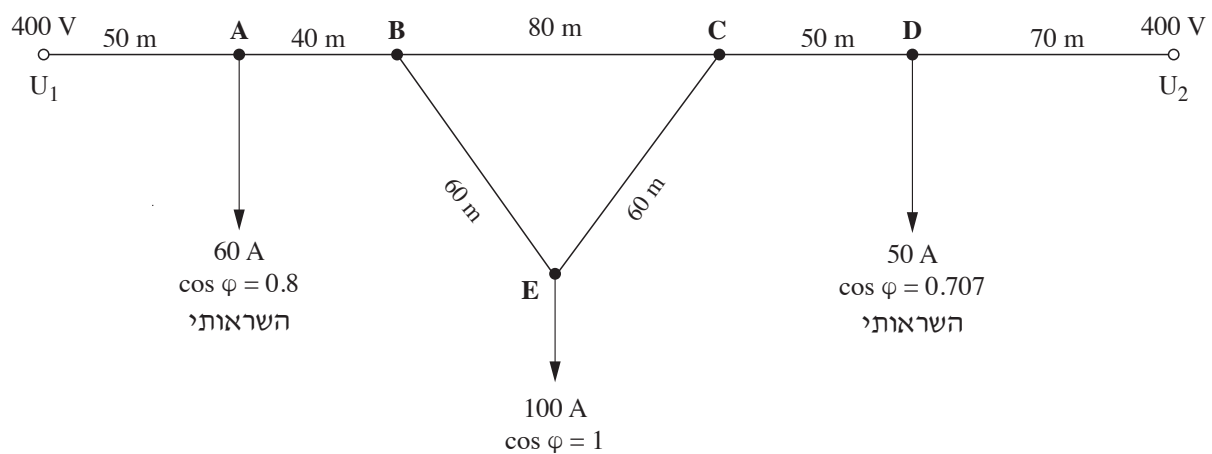
השאלות

בשאלון זה תשע שאלות. עליכם לענות על ארבע שאלות מן השאלות 1-9 (לכל שאלה – 25 נקודות).

מערכות הספק ב'

שאלה 1

באיור לשאלה 1 מתוארת רשת תלת-מופעית. מוליכי הרשת עשויים מנחושת $\gamma = 57 \left[\frac{\text{m}}{\Omega \text{mm}^2} \right]$. שטח החתך האחיד של מוליכי הרשת הוא 50 mm^2 . נתון כי ההיגב ליחידת אורך הוא $X_0 = 0.3 \frac{\Omega}{\text{km}}$.



איור לשאלה 1

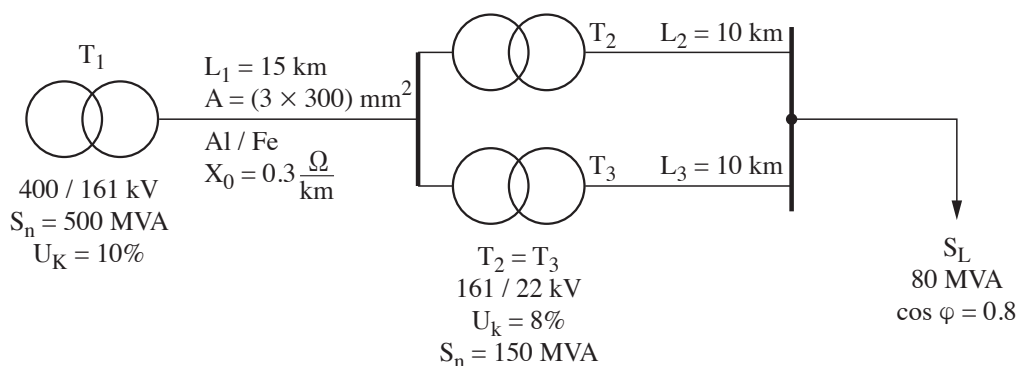
א. (10 נק') חשבו את הזרם הזורם כל אחד מקטעי הרשת.

ב. (8 נק') חשבו את המתח המזערי ברשת.

ג. (7 נק') חשבו את הפסדי ההספק ברשת.

שאלה 2

באיור לשאלה 2 מתואר קו להעברת הספק.



איור לשאלה 2

- שני הקווים L_2 ו- L_3 זהים. נתוני הקווים הם $L_2 = L_3 = 10 \text{ km}$, $X_0 = 0.3 \frac{\Omega}{\text{km}}$, $R_0 = 0.05 \frac{\Omega}{\text{km}}$.
 (10 נק') א. חשבו את הזרמים בכל קטע בקו, בהנחה שרק העומס S_L מחובר.
 (10 נק') ב. חשבו את הפסדי ההספק $\Delta Q, \Delta P$ בקווים L_1 ו- L_2 .
 (5 נק') ג. הקו L_3 נקרע ולא מעביר זרם. קבעו ללא חישוב אם המתח על הצרכן יקטן, יגדל, או לא ישתנה. נמקו את התשובה.

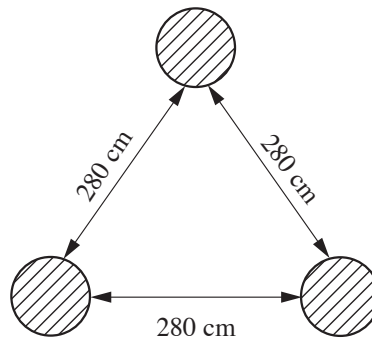
שאלה 3

היעזרו בחוק החשמל וענו בקצרה על השאלות הבאות:

- (5 נק') א. האם מותר להתקין מבטח (הגנה) במוליך הארקה? נמקו את התשובה.
 (5 נק') ב. כתבו **שלוש** דרישות לשימוש בשיטת איפוס (TN-C-S) במתקן חשמל.
 (5 נק') ג. הגדירו מהי לולאת תקלה, ומהם מסלולי לולאת התקלה בשיטת ההגנה TN-C-S.
 (5 נק') ד. ציינו **שלוש** שיטות הגנה נגד התחשמלות, שיש בהן איסור הארקה שיטה או הארקה הגנה.
 (5 נק') ה. הגדירו מהו מתח נמוך מאוד, ופרטו מהו שדה השימוש שלו. תנו **שתי** דוגמאות למקומות שבהם משתמשים במתח נמוך מאוד.

שאלה 4

באיור לשאלה 4 מתואר סידור המוליכים ברשת עילית תלת-מופעית המוזנת במתח נקוב של 161 kV/50 Hz. מוליכי הרשת עשויים חמרון פלדה (A ℓ -Fe), הם שזורים וגלויים ומועבר בהם הספק של 30 MVA.



איור לשאלה 4

- א. (9 נק') קבעו את שטח החתך של מוליכי הרשת הדרוש להעברת ההספק הנתון.
- ב. (8 נק') נתון כי מזג האוויר רטוב, לחץ האוויר הוא 73.5 cmHg, טמפרטורת הסביבה היא 20° C, ומקדם מבנה המוליך הוא 0.9. הראו באמצעות חישוב כי מתקיימת תופעת קורונה.
- ג. (8 נק') חשבו את הפסדי הקורונה לאורך כל הרשת.

מכונות חשמל והינע

שאלה 5

נתוניו הנקובים של מנוע השראה תלת-מופעי שסלילי הסטטור שלו מחוברים במשולש הם:

$$P_n = 11 \text{ kW} ; U_n = 400 \text{ V} ; f_l = 50 \text{ Hz} ; \eta_n\% = 89.8\% ; n_n = 2940 \text{ rpm} ; \cos\varphi_n = 0.85 ; \lambda_{\max} = 2.4$$

קבוצת חומרי הבידוד F , $(T \in 155^\circ \text{C})$, טמפרטורת סביבה תקנית $T_o = 40^\circ \text{C}$

(10 נק') א. המנוע פועל בעומס נקוב.

1. חשבו את הזרם בסלילי הסטטור.

2. חשבו את תדירות זרמי הרוטור.

(9 נק') ב. חשבו את מומנט ההתנעה במתח הזנה של 360 V .

(6 נק') ג. מפעילים את המנוע במשטר עבודה של 40 דקות פעולה בעומס נקוב ו-2.5 שעות הפסקה באופן מחזורי.

נתון כי קבוע הזמן התרמי הוא 25 דקות, והפסדי ההספק הקבועים שווים להפסדי ההספק המשתנים.

1. קבעו את סוג משטר העבודה של המנוע.

2. חשבו את הספק העומס המרבי המותר להעמסת המנוע הנתון בטמפרטורת סביבה תקנית.

3. חשבו את הספק העומס המרבי המותר במשטר העבודה הנתון ובטמפרטורת סביבה של 55°C .

שאלה 6

נתוניו הנקובים של מנוע לזרם ישר בעירור מקבילי הם:

$$P_n = 14 \text{ kW} ; U_n = 240 \text{ V} ; n_n = 1100 \text{ rpm} ; \eta_n = 0.84 ; R_a = 0.22 \Omega ; R_e = 100 \Omega$$

המנוע פועל בתחום הליניארי של עקום המגנט.

הזניחו בחישוביכם את מפל המתח על הפחמים ואת תגובת העוגן.

המנוע מועמס בעומס נקוב ומועבר לבלימה דינמית.

(10 נק') א. חשבו את ערך נגד הבלימה שיש לחבר בטור לסליל העוגן, כדי להגביל את זרם הבלימה ההתחלתי ל- $1.4 \cdot I_{an}$.

(10 נק') ב.

1. חשבו את מומנט הבלימה ההתחלתי.

2. חשבו את מומנט הבלימה השקול.

(5 נק') ג. חשבו את זמן בלימת המנוע עד לעצירתו, כאשר מומנט התנופה הכולל המועבר לציר המנוע הוא $G \cdot D_T^2 = 16 \text{ kg} \cdot \text{f} \cdot \text{m}^2$.

שאלה 7

נתוניו הנקובים של מחולל סנכרוני תלת-מופעי הם:

$$S_n = 25 \text{ MVA} ; U_n = 22 \text{ kV} ; \cos\varphi = 0.82 \text{ (השראותי)} ; Z_s = X_s = 6 \Omega$$

סלילי הסטטור מחוברים בחיבור כוכב.

המחולל פועל בתחום הליניארי של עקום המגנט.

זרם העירור הנדרש לקבלת מתח הדקים נקוב בריקם, שווה 100 A .

(12 נק') א. המחולל פועל בעומס נקוב.

1. חשבו את הכא"מ המופעי של המחולל.

2. חשבו את הזווית בין הכא"מ המופעי לבין המתח המופעי.

3. חשבו את זרם העירור.

(8 נק') ב. המחולל מועמס בעומס שהספקו $S = 18 + 12j \text{ MVA}$ במתח נקוב. חשבו את זרם העירור הדרוש לשם כך.

(5 נק') ג. משפרים את מקדם ההספק של העומס הנקוב (25 MVA) ל- 0.9 (השראותי) בהספק ממשי ובמתח נקוב. האם נדרש לשנות את זרם העירור במקרה זה כדי לקבל את מתח ההדקים הנקוב של המחולל? נמקו את התשובה בעזרת חישוב.

אלקטרוניקה של מערכות הספק

שאלה 8

באיור א' לשאלה 8 מתואר מעגל של ממיר מסוג Buck (הניחו שהממיר אידיאלי).

להלן נתוני המעגל:

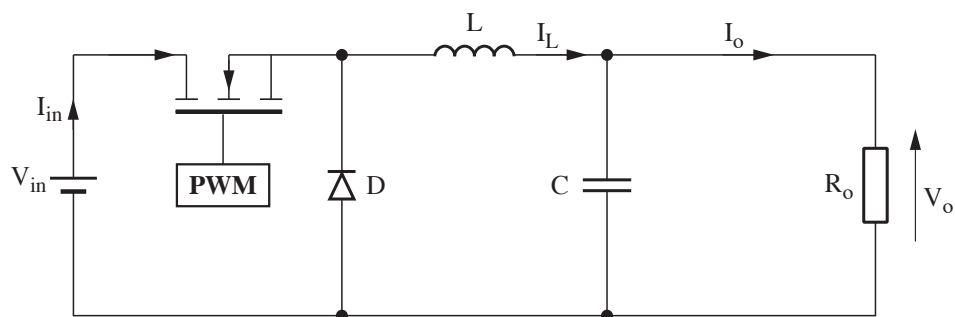
$$V_o = 10 \text{ V}$$

$$f_{\text{PWM}} = 10 \text{ kHz}$$

$$T_{\text{on}} = 50 \text{ } \mu\text{sec}$$

$$R_o = 10 \text{ } \Omega$$

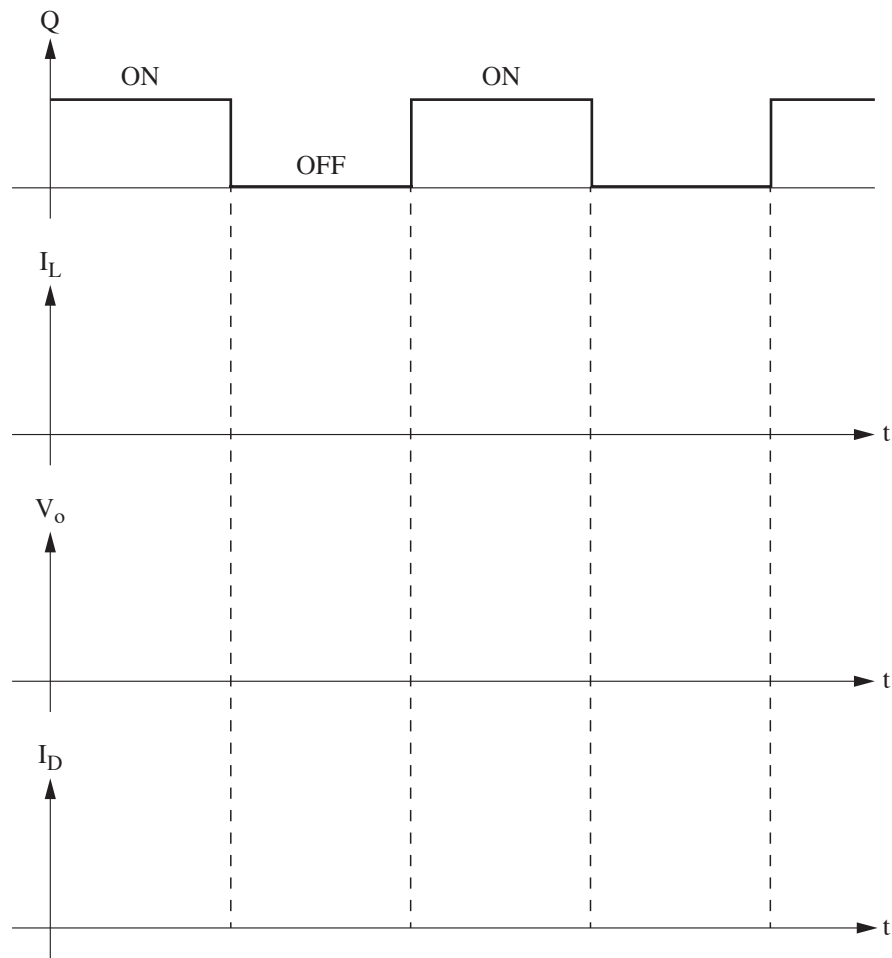
נתון כי השינוי בזרם דרך המשרן הוא $\Delta I_L = 0.2 I_{\text{in}}$.



איור א' לשאלה 8

- 8 נק' (8) א. חשבו את זרם המוצא, I_o .
6 נק' (6) ב. חשבו את זרם המבוא, I_{in} .
6 נק' (6) ג. חשבו את ערך המשרן, L .

באיור ב' לשאלה מתואר תרשים גלים.

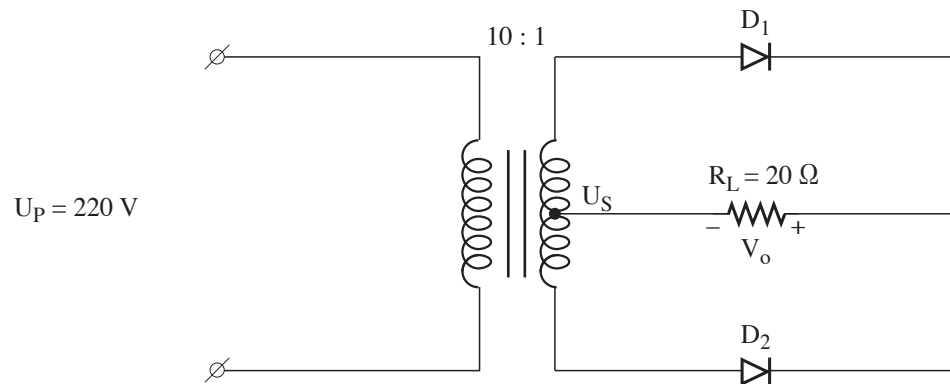


איור ב' לשאלה 8

- ד. (5 נק') העתיקו למחברת את תרשימים הגלים שבאיור, וסרטטו באופן איכותי את צורות הגלים של זרם I_L , מתח המוצא, V_o , וזרם הדיודה, I_D .

שאלה 9

באיור לשאלה 9 מתואר מיישר דו־דרכי, המורכב משתי דיודות ומשנאי בעל סנף אמצעי ויחס השנאה של 10:1. הניחו שהדיודות אידיאליות.



איור לשאלה 9

- (10 נק') א. חשבו את המתח הממוצע בעומס.
- (5 נק') ב. חשבו את הזרם הממוצע שזורם דרך העומס.
- (5 נק') ג. חשבו את הזרם היעיל שזורם דרך העומס.
- (5 נק') ד. סרטטו באופן איכותי את צורת מתח המוצא על העומס, V_o .

בהצלחה!

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-מופע

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]

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

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	$[mm^2]$	$A_k = K \cdot I_k$	
זרם בקטע k	-	I_k	[A]		
אורך של קטע k	-	L_k	[m]		
מוליכות סגולית של המוליכים	-	γ	$[m / \Omega mm^2]$	$K = \frac{2 \sum_{k=1}^{k=n} L_k}{\gamma \Delta U}$	זרם ישר
מפל המתח המרבי	-	ΔU	[V]		
מפל המתח הממשי המרבי	-	ΔU_a	[V]	$K = \frac{2 \sum_{k=1}^{k=n} (L_k \cos \varphi_k)}{\gamma \Delta U_a}$	זרם חילופין חד-מופעי
הזווית בין מתח לזרם בקטע k	-	φ_k		$K = \frac{\sqrt{3} \sum_{k=1}^{k=n} (L_k \cos \varphi_k)}{\gamma \Delta U_a}$	זרם חילופין תלת-מופעי

3. מינימום חומר

זרם ישר

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

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

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	$[m]$

זרם חילופין חד-מופע

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

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

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	$[m]$

זרם חילופין תלת-מופע

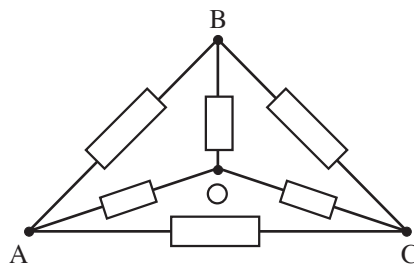
$$K = \frac{\sqrt{3}}{\gamma \Delta U_a} \sum_{k=1}^{k=n} (L_k \sqrt{I_k} \cos \varphi_k)$$

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

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	$[m]$

4. חישובים ברשתות

הפיכת משולש לכוכב



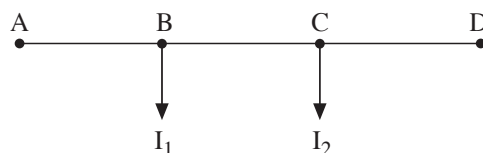
$$R_{OB} = \frac{R_{AB} \cdot R_{BC}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{AC}}$$

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

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

פירוק הזרמים והעברתם לנקודות חדשות

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



הערה:

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

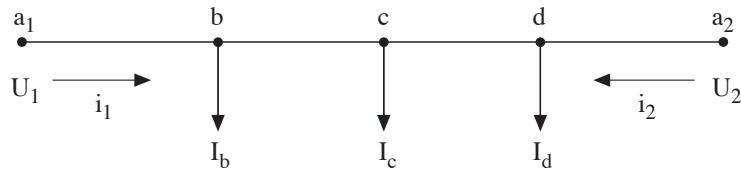
$$I_{1 \rightarrow A} = I_1 \frac{R_{BD}}{R_{AD}}$$

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

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

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

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.

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

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

רשת בעלת זינה משני כיוונים במתחים שונים בעלי מופעים זהים

הזרם המשלים:

$$a_1 \xrightarrow{I_{\text{משלים}}} a_2$$

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:

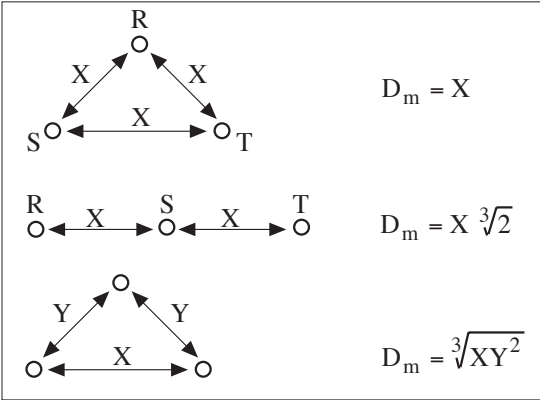
$$I_1 = i_1 + I_{\text{משלים}}$$

$$I_2 = i_2 - I_{\text{משלים}}$$

5. פרמטרים של קווי הספק

הפסד הספק אקטיבי	-	ΔP [W]	$\Delta P = 3I^2 R_o L$
הפסד הספק היגבי (השראות)	-	ΔQ_L [VAr]	
התנגדות הקו ליחידת אורך עבור מוליך אחד	-	R_o [Ω / km]	$\Delta Q_L = 3I^2 X_o L$
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 [$\mu\text{F} / \text{km}$]	עבור: $f = 50\text{Hz}$ $I_C = 0.181 U C_o L \cdot 10^{-3}$
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	[Ω]
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	[Ω]
עכבת השנאי	-	Z_T	[Ω]
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 (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 (°C)									
55	50	45	40	35	30	25	20	15	10
0.77	0.82	0.87	0.91	0.96	1.00	1.04	1.08	1.12	1.15

2. מקדם תיקון עבור התקנת כבלים אחדים באדמה

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

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

I	D _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 הסגולית

γ [m / Ωmm²]

–

המשקל הסגולי

g [g / cm³]

–

חומרים		γ
חמרן	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

$t [^{\circ}C]$ - טמפרטורת הסביבה

$D_m [cm]$ - המרחק הממוצע בין המוליכים

$r [cm]$ - רדיוס המוליך

m_1 - מקדם מבנה המוליך

* מלא: 1

* שזור: 0.7 - 0.9

m_2 - מקדם מזג האוויר

* יבש: 1

* רטוב: 0.8

$U_O [kV]$ - מתח מופעי של הרשת

$U_{OKR} [kV]$ - מתח קורונה מופעי

$\Delta P_{OKR} [kW / km]$ - הפסדי קורונה במופע אחד

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

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

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

עבור: $f = 50 \text{ Hz}$

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

9. נקודת האפס ברשת חשמל

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

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

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

10. צפיפות זרם כלכלית (מערכת תלת־מופעית)

המתח המומלץ	-	U	[kV]	$U = \frac{\sqrt{3} j L \cdot 100}{\Delta P_{\%} \gamma \cos \varphi}$
צפיפות זרם כלכלית	-	j	[A / mm ²]	
אורך הקו	-	L	[km]	$I_{\max} = \frac{P_{\max}}{\sqrt{3} U_n \cos \varphi}$
הפסדי הספק מרביים	-	$\Delta P_{\%}$		
מוליכות סגולית	-	γ	[m / Ωmm ²]	$A = \frac{I_{\max}}{j}$
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	[mm ²]	
אנרגייה שנתית	-	W_{ψ}	[kWh]	$W_{\psi} = \int_0^{8760} P dt$
הספק רגעי	-	P	[kW]	$P_{av} = \frac{W_{\psi}}{8760}$
הספק ממוצע	-	P_{av}	[kW]	
זמן שימוש בהספק מרבי	-	T_v	[h]	$T_v = \frac{W_{\psi}}{P_{\max}} = \frac{P_{av} \cdot 8760}{P_{\max}} = \frac{1}{P_{\max}} \int_0^{8760} P dt$

T_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:

$$C_1 = (a \cdot A + b) \cdot L \cdot p$$

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

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

- C_2 [ש"ח] ההוצאות לכיסוי הפסדי ההספק ברשת
- $I_{\max}$ [A] זרם העומס העובר בקו
- R [kΩ] התנגדות המוליכים
- T_S [h] זמן ההפסדים המרביים ברשת
- c $\left[\frac{\text{ש"ח}}{\text{kWh}} \right]$ מחיר האנרגייה החשמלית
- ρ $\left[\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \right]$ התנגדות סגולית של המוליכים

$$T_S = \frac{\int_0^t I^2 dt}{I_{\max}^2} = \frac{\sum (I^2 \cdot t)}{I_{\max}^2} = \frac{\sum (S^2 \cdot t)}{S_{\max}^2}$$

נוסחת קלווין:

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

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

11. הפסדי הספק והפסדי אנרגיה ברשת חשמל

הפסדי אנרגייה ברשת חשמל:

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

הפסדי אנרגייה בשנאי:

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

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:

$$\begin{aligned} S_{\max} &= S_n \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_o \cdot t}{\Delta P_{Cu_n} \cdot T_S}} & (\text{מבחינת חיטון}) & \quad S_{\max} &= S_n \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_o}{\Delta P_{Cu_n}}} \\ & \text{בהפסדי אנרגייה} & (\text{בהפסדי הספק}) & \end{aligned}$$

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 חיטון)
(בהפסדי הספק)

אין להעביר את הנוסחאון
לנבחן אחר

נוסחאון במכונות חשמל והינע לכיתה י"ד
(18 עמודים)

א. מכונה סינכרונית

1. מחולל סינכרוני

משוואת מתחים וקטורית

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

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

- E_{ph} [V] – כא"מ מופעי
- U_{ph} [V] – מתח מופעי
- I_{ph} [A] – זרם מופעי בסטטור
- R_a [Ω] – התנגדות העוגן למופע אחד
- X_s [Ω] – היגב סינכרוני למופע אחד

חישוב היגב סינכרוני

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

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

- E_{pho} [V] – כא"מ מופעי בניסוי בריקם
- E_{phk} [V] – כא"מ מופעי בניסוי בקצר
- I_{phk} [A] – זרם מופעי בסטטור בניסוי בקצר
- I_{fo} [A] – זרם עירור בניסוי בריקם
- I_{fk} [A] – זרם עירור בניסוי בקצר

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

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

- 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

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

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

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

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

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

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

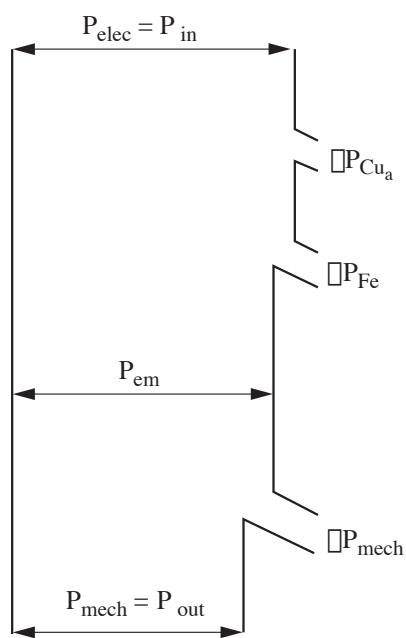
עבור עומס קיבולי $(-90^\circ \leq \varphi < 0^\circ)$:

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

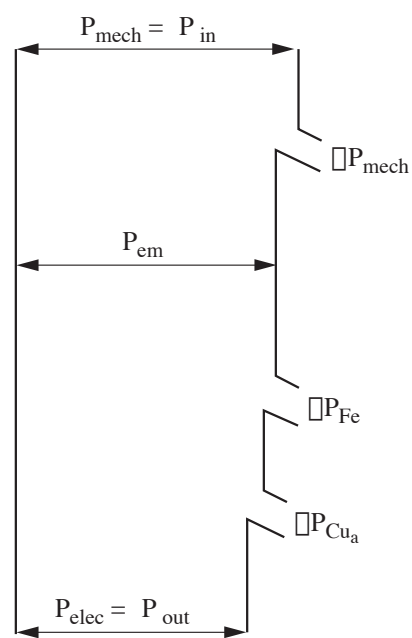
$$\tan \Psi = \frac{U_{ph} \cdot \sin \varphi + I_{ph} \cdot X_s}{U_{ph} \cdot \cos \varphi - I_{ph} \cdot R_a}$$

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

הספקים ואיבודי הספק במכונה סינכרונית:



מנוע



מחולל

מומנט	-	M	[Nm]
מהירות זוויתית סינכרונית	-	ω_s	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$
מהירות סינכרונית	-	n_s	[rpm]
תדירות	-	f	[Hz]
מס' זוגות קטבים	-	p	
הספק חשמלי	-	P_{elec}	[W]
גורם הספק	-	$\cos \varphi$	
כא"מ מופעי	-	E_{ph}	[V]
היגב סינכרוני מופעי	-	X_s	$[\Omega]$
הזווית בין הזרם המופעי לכא"מ המופעי	-	ψ	
הזווית בין המתח המופעי לכא"מ המופעי	-	Θ	
הספק עיור	-	Q	[VAr]
הספק אלקטרו-מגנטי	-	P_{em}	[W]
הפסדי נחושת בסטטור	-	ΔP_{Cu_a}	[W]
הפסדי נחושת בסליל (DC) ברוטור	-	ΔP_{Cu_e}	[W]
הפסדים מגנטיים בליבת הברזל	-	ΔP_{Fe}	[W]
הפסדים מכניים	-	ΔP_{mech}	[W]
נצילות המכונה	-	η	[%]
הספק מוצא	-	P_{out}	[W]
הספק מבוא	-	P_{in}	[W]

$$P_{\text{mech}} = M \cdot \omega_s = \frac{M \cdot n_s}{9.55}$$

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

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

$$P_{\text{elec}} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi = 3 \cdot U_{\text{ph}} \cdot I_{\text{ph}} \cdot \cos \varphi$$

$$P_{\text{elec}} = \frac{3 \cdot E_{\text{ph}} \cdot U_{\text{ph}}}{X_s} \cdot \sin \Theta$$

$$Q = \frac{3}{X_s} \left[U_{\text{ph}} \cdot E_{\text{ph}} \cdot \cos \Theta - U_{\text{ph}}^2 \right]$$

$$P_{\text{em}} = 3 \cdot E_{\text{ph}} \cdot I_{\text{ph}} \cdot \cos \psi$$

$$\Delta P_{\text{Cu}_a} = 3 \cdot I_{\text{ph}}^2 \cdot R_a$$

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \cdot 100$$

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]	
t	- הפרש הטמפרטורה בין גוף המנוע לסביבה בזמן כלשהו	ΔT [°C]	$\left(\frac{\text{בהנחת}}{\Delta T_0 = 0}\right) \Delta T = \Delta T_\infty \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$
t	- זמן	[sec]	
τ	- קבוע זמן חימום	[sec]	$\alpha = \alpha_0 (1 - K \cdot \sqrt{V})$
α	- מקדם פיזור החום באוויר זורם	$\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right]$	
α_0	- מקדם פיזור החום באוויר נח	$\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right]$	$\tau = \frac{G \cdot C}{\alpha \cdot A_T}$
V	- מהירות האוויר	$\left[\frac{m}{sec}\right]$	
K	- מקדם האיוורור		$\Delta T_\infty = \frac{\Delta P}{\alpha \cdot A_T}$
A_T	- שטח פיזור החום	[m ²]	
G	- משקל	[kg]	
C	- חום סגולי	$\left[\frac{W \cdot sec}{kg \cdot ^\circ C}\right]$	$\Delta P = \frac{P_n}{\eta} - P_n$
ΔP	- סכום הפסדי ההספק של המנוע	[W]	
P_n	- הספק נקוב של המנוע	[W]	
η	- נצילות המנוע		

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

תנאי פעולה: $t_w \leq 2 \cdot \tau$
 $t_o \geq 5 \cdot \tau$

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]	(עבור נצילות קבועה) $P_n = P_x \left(1 - e^{-\frac{t_w}{\tau}}\right)$
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.):

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

(כאשר $t_w \ll \tau$)

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

בחירת הספק מנוע בעומס משתנה בעבודה ממושכת:

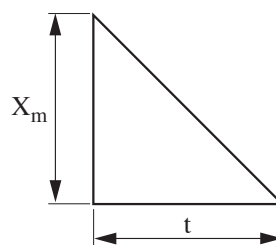
שיטת ההפסדים הממוצעים

הפסדי הספק ממוצעים	-	ΔP_{av}	[W]	$\Delta P_{av} = \frac{\sum (\Delta P_i \cdot t_i)}{\beta(t_s + t_b) + \alpha \cdot t_r + \sum t_w}$
הפסדי הספק בקטע i	-	ΔP_i	[W]	
זמן בקטע i	-	t_i	[sec]	התנאי לבחירת מנוע: $\Delta P_{av} \leq \Delta P_n$
זמן התנעה (start)	-	t_s	[sec]	
זמן בלימה (brake)	-	t_b	[sec]	<u>שיטת הזרם השקול</u>
זמן הפסקה (מנוחה) (rest)	-	t_r	[sec]	
זמן בעומס כלשהו במצב שאינו בלימה, התנעה או הפסקה	-	t_w	[sec]	

הזרם השקול	-	I_{eq}	[A]	$I_{eq} = \sqrt{\frac{\sum(I_i^2 \cdot t_i)}{\beta(t_s + t_b) + \alpha \cdot t_r + \sum t_w}}$
זרם המנוע בקטע i	-	I_i	[A]	שיטת המומנט השקול
מקדם הרעת תנאי קירור ובמנוחה	-	α		$M_{eq} = \sqrt{\frac{\sum(M_i^2 \cdot t_i)}{\beta(t_s + t_b) + \alpha \cdot t_r + \sum t_w}}$
מקדם הרעת תנאי הקירור בהתנעה ובבלימה	-	β		

מציאת זרם/מומנט שקול

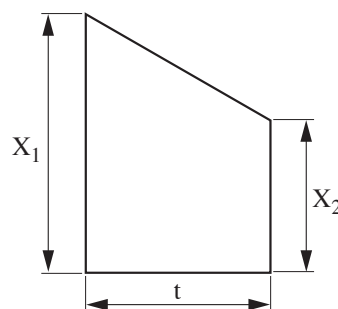
משולש:



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

- 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:

הספק העמסה מותר	-	P_T	[W]	
הספק נומינלי	-	P_n	[W]	$P_T = P_n \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta T_{\infty T}}{\Delta T_{\infty}} - K_1\right) \cdot \frac{1}{K_2}}$
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		

ג.

מנוע לזרם ישר

כוח אלקטרו־מניע:

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

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

$$z \text{ - מספר המוליכים ברוטור}$$

$$p \text{ - מספר זוגות הקטבים}$$

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

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

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

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

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

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

מומנטים:

$$M_{em} \text{ - מומנט אלקטרו־מגנטי} \quad [Nm]$$

$$M_n \text{ - מומנט נומינלי} \quad [Nm]$$

$$\Delta M_o \text{ - איבודי מומנט בריקם} \quad [Nm]$$

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

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

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

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

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

הספקים:

$$I_a \text{ - עוצמת הזרם ברוטור} \quad [A]$$

$$P_{in} \text{ - הספק חשמלי (מושקע)} \quad [W]$$

$$P_{em} \text{ - הספק אלקטרו־מגנטי} \quad [W]$$

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

$$\eta \text{ - נצילות המנוע}$$

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

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

$$P_n = M_n \cdot \omega$$

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

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

איבודי הספק:

$$\Delta P_{Cu_a} \text{ - איבודי הספק ברוטור} \quad [W]$$

$$\Delta P_{Cu_e} \text{ - איבודי הספק בסליל העירור המקבילי} \quad [W]$$

$$\Delta P_{Cu_s} \text{ - איבודי הספק בסליל העירור הטורי} \quad [W]$$

$$\Delta P_{Fe} \text{ - איבודי הספק בברזל} \quad [W]$$

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

$$R_a \text{ - התנגדות סליל העוון} \quad [\Omega]$$

$$R_e \text{ - התנגדות סליל העירור המקבילי} \quad [\Omega]$$

$$R_s \text{ - התנגדות סליל העירור הטורי} \quad [\Omega]$$

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

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

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

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

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 ארון			$E = U - I_a(R_a + R_s)$	$NI = N_e \cdot I_e \pm N_s \cdot I_a$ ^(*)
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

- 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

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

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

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

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

בבלימה גנרטורית:

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

* המתח במעגל העירור קבוע

מומנט בלימה

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

זמני בלימה והתנעה

$t_s = \frac{GD_T^2}{38.2} \left(\frac{n_2 - n_1}{M - M_s} \right)$	t_s	[sec]	- זמן התנעה
	t_b	[sec]	- זמן בלימה
$t_b = \frac{GD_T^2}{38.2} \left(\frac{n_1 - n_2}{M + M_s} \right)$	GD_T^2	[kgf · m ²]	- מומנט תנופה כולל המועבר לציר המנוע
	n_1	[rpm]	- מהירות סיבוב התחלתית
	n_2	[rpm]	- מהירות סיבוב סופית
	M	[Nm]	- מומנט סיבובי שקול בבלימה/בהתנעה
	M_s	[Nm]	- מומנט סטטי (נגדי)

ז. מנוע השראה תלת-מופעי

זרמים:

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

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

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

מהירות וגורם החליקה:

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

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

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

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

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

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

$$X_T = X_1 + X'_2$$

זרם נומינלי קווי	-	I_{n1}	[A]
גורם ההספק	-	$\cos \varphi$	
נצילות	-	η	
זרם נומינלי פאזי בסטטור	-	I_{nph1}	[A]
זרם נומינלי פאזי ברוטור, המשוקף לסטטור	-	I'_{nph2}	[A]
מתח פאזי בסטטור	-	U_{ph1}	[V]
התנגדות סליל הסטטור	-	R_1	[Ω]
התנגדות סליל הרוטור המשוקף לסטטור	-	R'_2	[Ω]
ההיגב הכולל של סלילי המנוע	-	X_T	[Ω]
זרם נומינלי פאזי ברוטור	-	I_{ph2}	[A]
כא"מ פאזי ברוטור נייח	-	$E_{ph2(0)}$	[V]
יחס התמסורת	-	a_{ph}	
מהירות סיבוב בעומס	-	n	[rpm]
מהירות סינכרונית	-	n_s	[rpm]
גורם החליקה	-	s	
תדירות	-	f	[Hz]
מומנט קריטי	-	M_K	[Nm]
חליקה נומינלית	-	s_n	
חליקה קריטית	-	s_K	
היגב סליל הסטטור	-	X_1	[Ω]
היגב סליל הרוטור המשוקף לסטטור	-	X'_2	[Ω]

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	

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	

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$X_T = X_1 + X'_2$$

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:

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

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

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

ה. תופעות מעבר

מצבי מעבר בהתנעת מנוע זרם ישר בעירור מקבילי

מהירות סיבוב בריקם	- 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]	
שטף בסליל העירור	ϕ [Wb]	$R = R_a + R_b$
קבוע זמן אלקטרומכני	T [sec]	
מומנט תנופה	GD^2 [kgf · m ²]	$T = \frac{GD^2}{38.2} \frac{R}{K_e K_m \phi^2}$
מהירות סיבוב בזמן בלימה (ברגע $t = 0$)	n_{st} [rpm]	
זמן	t [sec]	$\text{כאשר } U = 0:$
זרם המתאים לעומס נגדי M_L	I_L [A]	$n_{st} = \frac{I_{st} R}{K_e \phi}$
זרם המנוע בתחילת הבלימה	I_{st} [A]	
זרם רגעי של המנוע	i [A]	$i = I_L - (I_{st} + I_L) e^{-\frac{t}{T}}$

בלימה על-ידי חיבור נגדי של מנוע זרם ישיר 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	[Ω]
התנגדות סליל העוגן	-	R_a	[Ω]
התנגדות נגד הבלימה	-	R_b	[Ω]

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

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

$$R = R_a + R_b$$

ב. עם הפיכת קוטביות

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

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

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

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

אין להעביר את הנוסחאון
לנבחן אחר

נוסחאון באלקטרוניקה של מערכות הספק לכיתה י"ד

(12 עמודים)

1. אותות מחזוריים

1.1 ערך ממוצע – הגדרה כללית

זרם ממוצע – I_{AV} [A]

$$I_{AV} = \overline{i(t)} = \langle i(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt$$

מתח ממוצע – V_{AV} [V]

$$V_{AV} = \overline{v(t)} = \langle v(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt$$

הספק ממוצע – P_{AV} [W]
(הספק יעיל)

$$P_{AV} = \overline{p(t)} = \langle p(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt$$

זמן מחזור – T [sec]

1.2 ערך ממוצע של אותות סינוסואידליים

זרם:

ערך רגעי של הזרם	-	$i(t)$ [A]	$i(t) = I_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_I)$
הערך המרבי של הזרם	-	I_m [A]	$I_{AV} = 0$
תדר זוויתי	-		
זווית המופע של הזרם	-	φ_I [rad] / [°]	
הזרם הממוצע	-	I_{AV} [A]	

מתח:

ערך רגעי של המתח	-	$v(t)$ [V]	$v(t) = V_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_V)$
הערך המרבי של המתח	-	V_m [V]	$V_{AV} = 0$
זווית המופע של המתח	-	φ_V [rad] / [°]	
המתח הממוצע	-	V_{AV} [V]	

הספק:

ערך רגעי של ההספק	-	$p(t)$ [W]	$p(t) = v(t) \cdot i(t) = I_m \cdot V_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_I) \cdot \sin(\omega t + \varphi_V)$
ההספק הממוצע (ההספק היעיל)	-	$P = P_{AV}$ [W]	$P = P_{AV} = \frac{I_m \cdot V_m}{2} \cos(\varphi_V - \varphi_I) = V \cdot I \cdot \cos(\varphi_V - \varphi_I)$

1.3 ערך ממוצע של גל מלבני

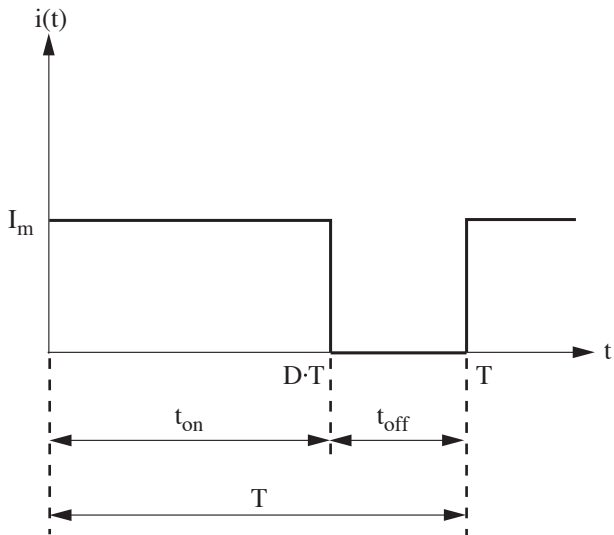
זרם:

$$i(t) = \begin{cases} I_m & , 0 \leq t \leq D \cdot T \\ 0 & , D \cdot T < t \leq T \end{cases}$$

$$I_{AV} = D \cdot I_m$$

$$t_{on} = D \cdot T$$

$$t_{off} = (1 - D) \cdot T$$



D - מחזור הפעולה (Duty Cycle)

t_{on} [sec] - זמן הולכה

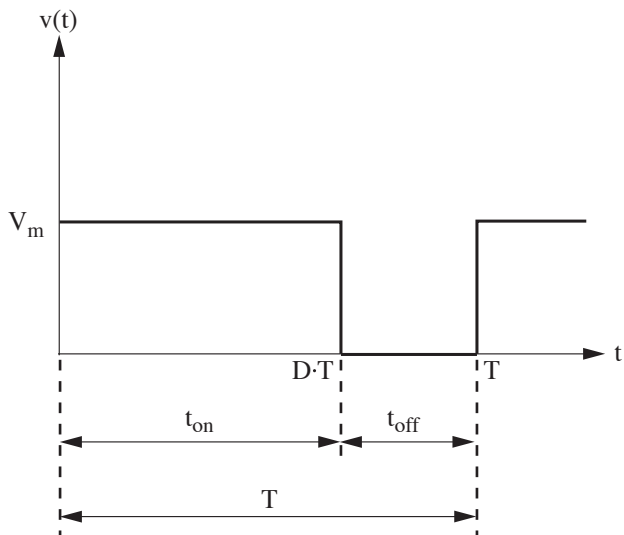
t_{off} [sec] - זמן פוגה

T [sec] - זמן מחזור

מתח:

$$v(t) = \begin{cases} V_m & , 0 \leq t \leq D \cdot T \\ 0 & , D \cdot T < t \leq T \end{cases}$$

$$V_{AV} = D \cdot V_m$$



1.4 ערך יעיל – הגדרה כללית

זרם:

$$I_{RMS} = I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad [A]$$

הערך היעיל של הזרם – $I_{RMS} = I$

זמן מחזור – T [sec]

מתח:

$$V_{RMS} = V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \quad [V]$$

הערך היעיל של המתח – $V_{RMS} = V$

1.5 ערך יעיל של אותות סינוסואידליים

זרם:

$$I_{RMS} = I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad [A]$$

הערך המרבי של הזרם – I_m

מתח:

$$V_{RMS} = V = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad [V]$$

הערך המרבי של המתח – V_m

1.6 ערך יעיל של גל מלבני

זרם:

$$I_{RMS} = I = \sqrt{D} \cdot I_m$$

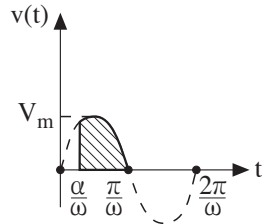
D – מחזור הפעולה (Duty Cycle)

מתח:

$$V_{RMS} = V = \sqrt{D} \cdot V_m$$

2. בקרת הספק במעגלי זרם חילופין חד-מופעיים

2.1 מיישר מבוקר חד-דרכי (בקרת חצי גל) בעומס אומי



$$0 \leq \alpha \leq \pi$$

$$v(t) = V_m \cdot \sin \omega t$$

$$V_{AV} = \frac{V_m}{2\pi} (1 + \cos \alpha)$$

$$V_{AV_m} = \frac{V_m}{\pi}$$

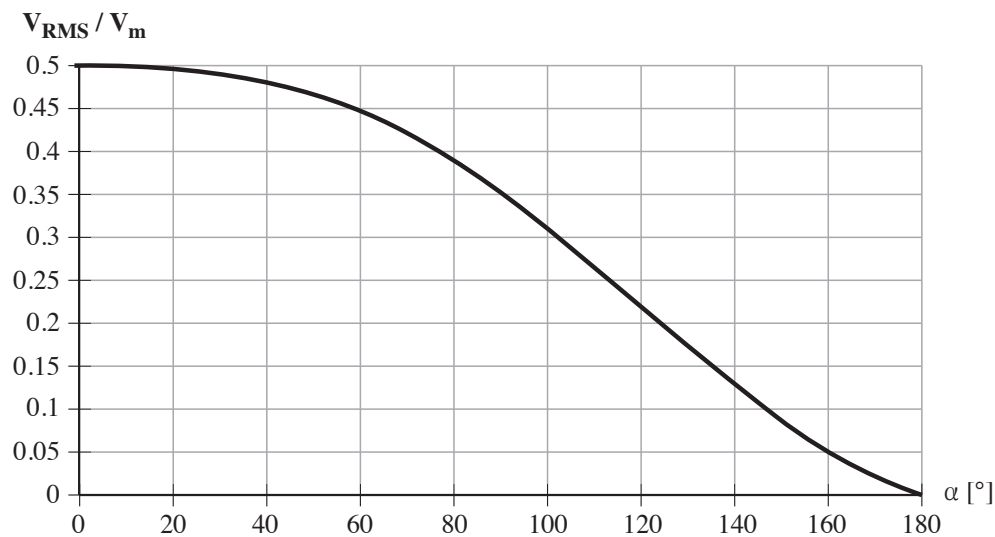
$$V_{RMS} = \frac{V_m}{2} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)}$$

$$V_{RMS_m} = \frac{V_m}{2}$$

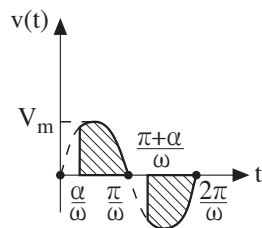
$$P = \frac{V_{RMS}^2}{R}$$

$$I_{RMS} = \frac{V_{RMS}}{R} ; I_{AV} = \frac{V_{AV}}{R}$$

זווית הצתה	-	α	[rad]
מתח הגל בתלות בזמן	-	$v(t)$	[V]
הערך המרבי של המתח	-	V_m	[V]
הערך הממוצע של המתח	-	V_{AV}	[V]
הערך המרבי של המתח הממוצע	-	V_{AV_m}	[V]
הערך היעיל של המתח	-	V_{RMS}	[V]
הערך המרבי של המתח היעיל	-	V_{RMS_m}	[V]
תדר זוויתי	-	ω	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$
זמן	-	t	[sec]
התנגדות העומס	-	R	[Ω]
הספק על העומס	-	P	[W]
הערך הממוצע של הזרם	-	I_{AV}	[A]
הערך היעיל של הזרם	-	I_{RMS}	[A]



2.2 בקרת גל שלם לא מיושר בעומס אומי



$$0 \leq \alpha \leq \pi$$

$$v(t) = V_m \cdot \sin \omega t$$

$$V_{AV} = 0$$

$$V_{RMS} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)}$$

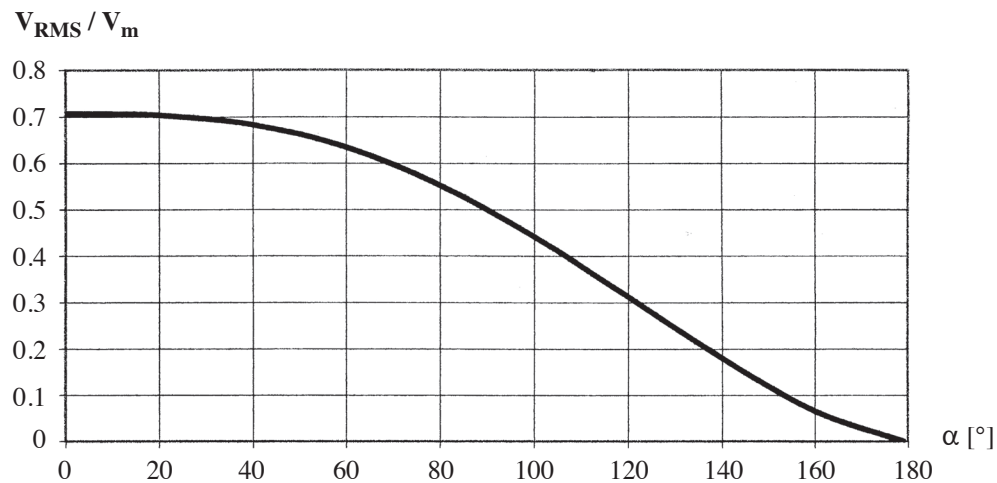
$$V_{RMS_m} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

$$P = \frac{V_{RMS}^2}{R}$$

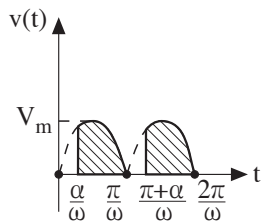
$$I_{AV} = 0$$

$$I_{RMS} = \frac{V_{RMS}}{R}$$

זווית הצתה	-	α	[rad]
מתח הגל בתלות בזמן	-	$v(t)$	[V]
הערך המרבי של המתח	-	V_m	[V]
הערך הממוצע של המתח	-	V_{AV}	[V]
הערך היעיל של המתח	-	V_{RMS}	[V]
הערך המרבי של המתח היעיל	-	V_{RMS_m}	[V]
תדר זוויתי	-	ω	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$
זמן	-	t	[sec]
התנגדות העומס	-	R	[Ω]
הספק על העומס	-	P	[W]
הערך הממוצע של הזרם	-	I_{AV}	[A]
הערך היעיל של הזרם	-	I_{RMS}	[A]



2.3 מיישר מבוקר דו-דרכי (בקרת גל שלם מיושר) בעומס אומי



$$0 \leq \alpha \leq \pi$$

$$v(t) = V_m \cdot \sin \omega t$$

$$V_{AV} = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha)$$

$$V_{AV_m} = \frac{2 V_m}{\pi}$$

$$V_{RMS} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)}$$

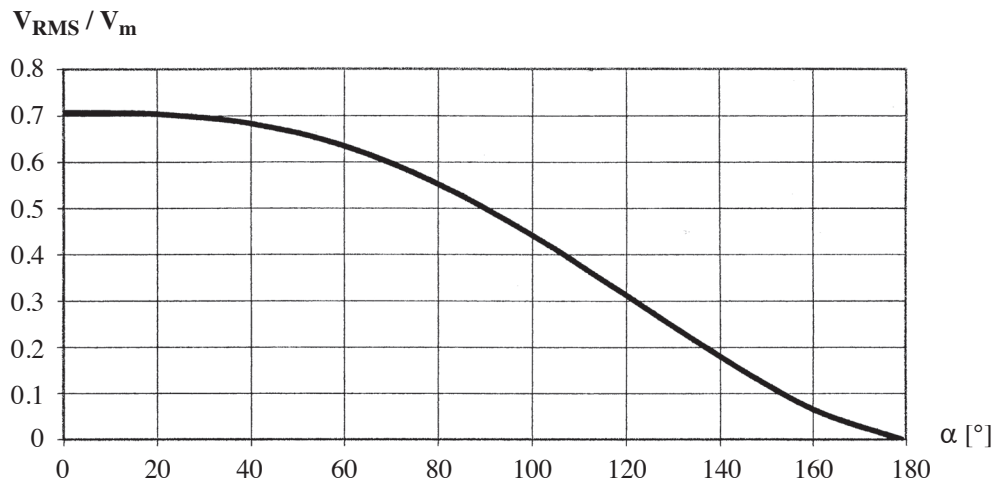
$$V_{RMS_m} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

$$P = \frac{V_{RMS}^2}{R}$$

$$I_{AV} = \frac{V_{AV}}{R}$$

$$I_{RMS} = \frac{V_{RMS}}{R}$$

זווית הצתה	-	α	[rad]
מתח הגל בתלות בזמן	-	$v(t)$	[V]
הערך המרבי של המתח	-	V_m	[V]
הערך הממוצע של המתח	-	V_{AV}	[V]
הערך המרבי של המתח הממוצע	-	V_{AV_m}	[V]
הערך היעיל של המתח	-	V_{RMS}	[V]
הערך המרבי של המתח היעיל	-	V_{RMS_m}	[V]
תדר זוויתי	-	ω	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$
זמן	-	t	[sec]
התנגדות העומס	-	R	[Ω]
הספק על העומס	-	P	[W]
הערך הממוצע של הזרם	-	I_{AV}	[A]
הערך היעיל של הזרם	-	I_{RMS}	[A]



3. בקרת הספק במעגלי זרם חילופין תלת-מופעיים

3.1 מיישר מבוקר תלת-מופע בציבור כוכב בעומס אומי

פעולה רציפה:

זווית הצתה	-	α	[rad]	$0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{6}$
מתח מופעי בתלות בזמן	-	$v(t)$	[V]	$v(t) = V_m \cdot \sin \omega t$
תדר זוויתי	-	ω	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$	$V_{AV} = \frac{3\sqrt{3} V_m}{2\pi} \cdot \cos \alpha$
זמן	-	t	[sec]	$V_{AV_m} = \frac{3\sqrt{3} V_m}{2\pi}$
הערך המרבי של המתח המופעי	-	V_m	[V]	$V_{RMS} = \sqrt{3} \cdot V_m \cdot \sqrt{\frac{1}{6} + \frac{\sqrt{3}}{8\pi} \cdot \cos 2\alpha}$
הערך הממוצע של המתח על העומס	-	V_{AV}	[V]	$V_{RMS_m} = \sqrt{3} \cdot V_m \cdot \sqrt{\frac{1}{6} + \frac{\sqrt{3}}{8\pi}}$
הערך המרבי של המתח הממוצע	-	V_{AV_m}	[V]	$I_{AV} = \frac{V_{AV}}{R}$; $I_{RMS} = \frac{V_{RMS}}{R}$
הערך היעיל של המתח על העומס	-	V_{RMS}	[V]	
הערך המרבי של המתח היעיל	-	V_{RMS_m}	[V]	
התנגדות העומס	-	R	[Ω]	
הערך הממוצע של הזרם העובר דרך העומס	-	I_{AV}	[A]	
הערך היעיל של הזרם העובר דרך העומס	-	I_{RMS}	[A]	

פעולה לא רציפה:

$$v(t) = V_m \cdot \sin \omega t \quad \frac{\pi}{6} < \alpha \leq \pi$$

$$V_{AV} = \frac{3 V_m}{2\pi} \left[1 + \cos \left(\frac{\pi}{6} + \alpha \right) \right]$$

$$V_{RMS} = \sqrt{3} \cdot V_m \cdot \sqrt{\frac{5}{24} - \frac{\alpha}{4\pi} + \frac{1}{8\pi} \sin \left(\frac{\pi}{3} + 2\alpha \right)}$$

3.2 מיישר מבוקר תלת-מופעי בחיבור גשר בעומס אומי

פעולה רציפה:

		$0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{3}$
זווית הצתה	α [rad]	
מתח מופעי בתלות בזמן	$v(t)$ [V]	$v(t) = V_m \cdot \sin \omega t$
מהירות זוויתית (תדר זוויתי)	ω $\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$	$V_{AV} = \frac{3\sqrt{3} V_m}{\pi} \cdot \cos \alpha$
זמן	t [sec]	$V_{AV_m} = \frac{3\sqrt{3} V_m}{\pi}$
הערך המרבי של המתח המופעי	V_m [V]	$V_{RMS} = \sqrt{3} \cdot V_m \cdot \sqrt{\frac{3}{4\pi} \left(\frac{2\pi}{3} + \sqrt{3} \cdot \cos 2\alpha \right)}$
הערך הממוצע של המתח על העומס	V_{AV} [V]	$V_{RMS_m} = \sqrt{3} \cdot V_m \cdot \sqrt{\frac{3}{4\pi} \left(\frac{2\pi}{3} + \sqrt{3} \right)}$
הערך המרבי של המתח הממוצע	V_{AV_m} [V]	
הערך היעיל של המתח על העומס	V_{RMS} [V]	$I_{AV} = \frac{V_{AV}}{R} ; I_{RMS} = \frac{V_{RMS}}{R}$
הערך המרבי של המתח היעיל	V_{RMS_m} [V]	
התנגדות העומס	R [Ω]	
הערך הממוצע של הזרם העובר דרך העומס	I_{AV} [A]	
הערך היעיל של הזרם העובר דרך העומס	I_{RMS} [A]	

פעולה לא רציפה:

$$v(t) = V_m \cdot \sin \omega t ; \frac{\pi}{3} < \alpha \leq \pi$$

$$V_{AV} = \frac{3\sqrt{3} \cdot V_m}{\pi} \left[1 + \cos \left(\alpha + \frac{\pi}{3} \right) \right]$$

$$V_{RMS} = \sqrt{3} \cdot V_m \cdot \sqrt{1 - \frac{3\alpha}{2\pi} + \frac{3}{4\pi} \cdot \sin \left(2\alpha + \frac{2\pi}{3} \right)}$$

4. ממירים ממותגים

4.1 משוואת מתח-זרם של סליל

מתח רגעי על הסליל	-	v_L	[V]
זרם רגעי בסליל	-	i_L	[A]
זמן	-	t	[sec]
השראות הסליל	-	L	[H]
מתח על הסליל	-	V_L	[V]
השינוי בזרם הסליל	-	ΔI_L	[A]
השינוי בזמן	-	ΔT	[sec]
זרם רגעי בקבל	-	i_C	[A]
מתח רגעי על הקבל	-	v_C	[V]
קיבול הקבל	-	C	[F]
זרם הקבל	-	I_C	[A]
השינוי במתח על הקבל	-	ΔV_C	[V]

$$v_L = L \frac{di_L}{dt}$$

(כאשר השינוי
בזרם הסליל
הוא לינארי)

$$V_L = L \frac{\Delta I_L}{\Delta T}$$

4.2 משוואת מתח-זרם של קבל

$$i_C = C \frac{dv_C}{dt}$$

(כאשר השינוי
במתח הקבל
הוא לינארי)

$$I_C = C \frac{\Delta V_C}{\Delta T}$$

4.3 ממיר (BUCK) STEP DOWN

מחזור הפעולה (Duty Cycle)	-	D	
זמן פעולה	-	t_{on}	[sec]
זמן פוגה	-	t_{off}	[sec]
זמן מחזור	-	T	[sec]
מתח מוצא	-	V_o	[V]
מתח מבוא	-	V_{in}	[V]
זרם מוצא	-	I_o	[A]
זרם מבוא	-	I_{in}	[A]
אדוות-המתח הדרושה	-	ΔV_o	[V]
הספק במוצא	-	P_o	[W]
הספק במבוא	-	P_{in}	[W]
נצילות	-	η	

בממיר
אידיאלי

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T}$$

$$V_o = D \cdot V_{in}$$

$$I_o = \frac{I_{in}}{D}$$

$$L = \frac{(V_{in} - V_o)}{\Delta I_L} \cdot D \cdot T$$

$$C = \frac{V_o}{\Delta V_o} \cdot \frac{T^2(1 - D)}{8L}$$

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

4.4 ממיר (BOOST) STEP UP

D	-	מחזור הפעולה (Duty Cycle)
t_{on} [sec]	-	זמן פעולה
t_{off} [sec]	-	זמן פוגה
T [sec]	-	זמן מחזור
V_o [V]	-	מתח מוצא
V_{in} [V]	-	מתח מבוא
I_o [A]	-	זרם מוצא
I_{in} [A]	-	זרם מבוא
C [F]	-	קיבול הקבל
ΔV_o [V]	-	אדוות-המתח הדרושה
L [H]	-	השראות הסליל
ΔI_L [A]	-	השינוי בזרם הסליל
P_o [W]	-	הספק במוצא
P_{in} [W]	-	הספק במבוא
η	-	נצילות

בממיר
אידיאלי

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_o = \frac{V_{in}}{1 - D} \\ I_o = (1 - D) \cdot I_{in} \\ C = \frac{I_o}{\Delta V_o} \cdot D \cdot T \\ L = \frac{V_{in}}{\Delta I_L} \cdot D \cdot T \end{array} \right.$$

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

4.5 ממיר FLYBACK

n	-	יחס הליפופים בין הסליל השניוני ובין הסליל הראשוני
N_1	-	מספר הליפופים בסליל הראשוני
N_2	-	מספר הליפופים בסליל השניוני

בממיר
אידיאלי

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_o = \frac{n \cdot D}{1 - D} \cdot V_{in} \\ n = \frac{N_2}{N_1} \end{array} \right.$$

5. מהפכים חד-מופעיים

מהפך חצי גשר (H/2):

$$V_o = \frac{V_{in}}{2}$$

הערך היעיל של מתח המוצא - V_o [V]

הערך היעיל של מתח המבוא - V_{in} [V]

מהפך גשר מלא (H):

$$V_o = V_{in}$$

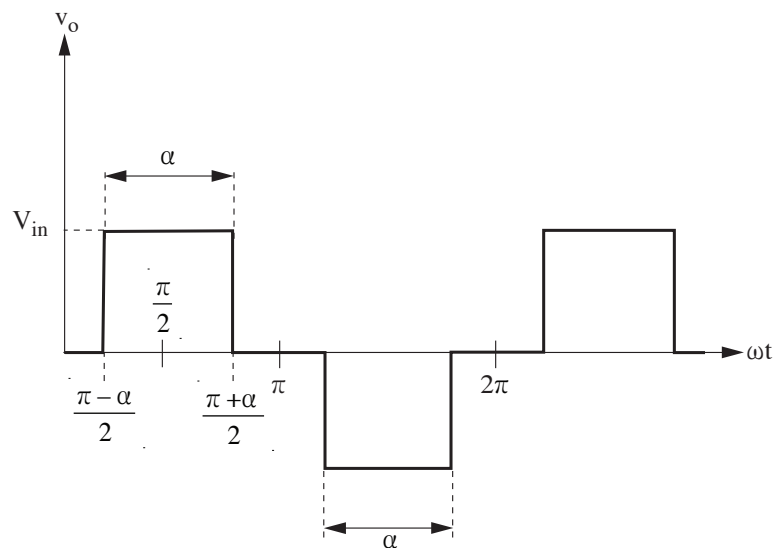
6. אפנון רוחב דופק יחיד (SPWM)

מתח יעיל - V_o [V]

מתח רגעי - v_o [V]

$$V_o = V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi-\alpha}{2}}^{\frac{\pi+\alpha}{2}} V_{in}^2 d(\omega t)}$$

$$V_o = V_{in} \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}}$$



בהצלחה!

נספח ד': מילון מונחים
לשאלון 733913, אביב תשפ"ה

המונח	תרגום המונח		
	ערבית	רוסית	אנגלית
הספק היגבי	قدرة ارتكاسية	Реактивная мощность	reactive power
הספק ממשי	قدرة فعّالة	Активная мощность	active power
השראותי	حثّي	Индуктивность	inductive
מומנט	عزم	Момент	torque
מנוע השראה תלת-מופעלי	مُحرّك الحثّ ثلاثي الأطوار	Трёхфазный двигатель	three-phase induction motor
מנוע סינכרוני	مُحرّك متزامن	Синхронный двигатель	synchronous motor
מעגל תמורה	دائرة التعويض	Схема замещения	equivalent circuit
מפל המתח על המברשות	هبوط الجهد على الفرش	Падение напряжения на щётках	the voltage drop on the brushes
נצילות	الكفاءة	коэффициент полезного действия	efficiency
סוללת קבלים	بطارية مكثفات	Конденсаторная батарея	capacitor bank
עומס נקוב	جَمَل اسمي	Номинальная нагрузка	nominal load
עירור זר	إثارة خارجية	Внешнее возбуждение	external excitation
עקום המגנוט	منحنى المغنطة	Намагничивающая цепь	magnetization curve
רוטור מלופף	الدوّار الملفوف	Ротор с намоткой	wound rotor
ריקם	لا جَمَل	Холостой ход	no-load
רשת תלת-מופעלית	شبكة ثلاثيّة الأطوار	Трёхфазная сеть	three-phase network
שטח חתך אחיד	مساحة مقطع عرضي مُوحّد	Однородное сечение	uniform cross-sectional area
תחנת השנאה	محطة تحويل	Трансформаторная станция	transformation station
תרשים חד-קווי	تخطيط أحادي السطر	Однолинейная схема	one-line chart