

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 ו-45 דקות.

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.

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. בכתיבת פתרונות חישוביים, קבלת מִרְב 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.

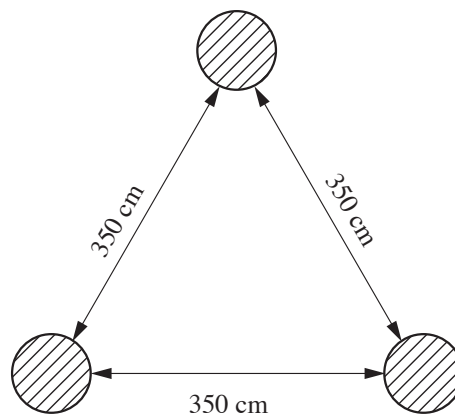
השאלות

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 מתואר סידור המוליכים ברשת עילית תלת-מופעית המוזנת במתח נקוב של $161 \text{ kV} / 50 \text{ Hz}$.
מוליכי הרשת עשויים חמרן-פלדה (Al-Fe). הם שזורים וגלויים, וזורם בהם זרם של 405 A .
אורך קווי הרשת הוא 40 km .

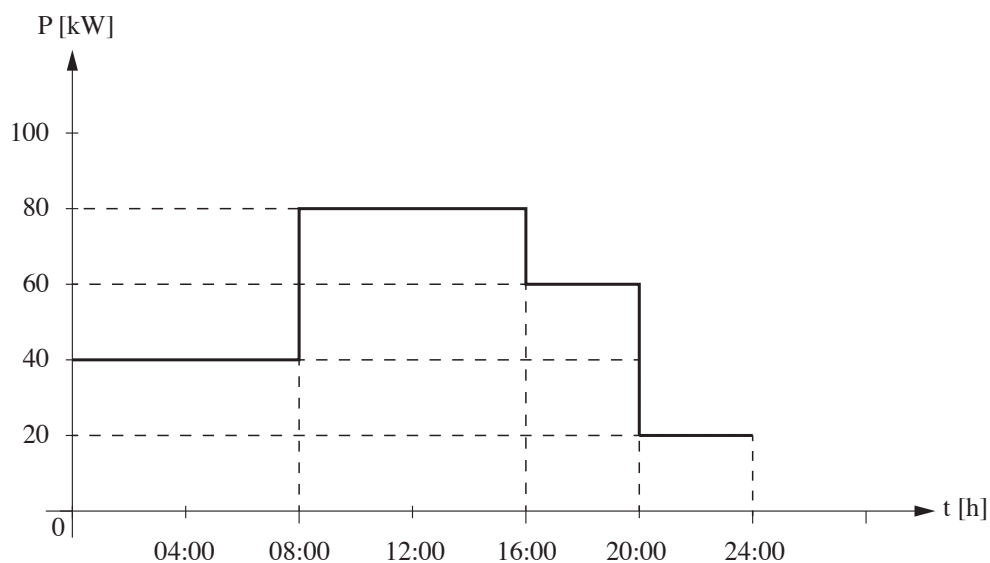


איור לשאלה 1

- (5 נק') א. קבעו את שטח החתך של מוליכי הרשת.
- (12 נק') ב. נתון כי האוויר רטוב, לחץ האוויר הוא 73.5 cm Hg , טמפרטורת הסביבה היא 20°C , ומקדם מבנה המוליך הוא 0.9 . הראו, באמצעות חישוב, כי ברשת מתקיימת תופעת קורונה.
- (8 נק') ג. חשבו את הפסדי הקורונה לאורך כל הרשת.

שאלה 2

באיור לשאלה 2 נתון עקום העמסה שעתית של מפעל המזון על-ידי תחנת משנה. המפעל מוזן מכבל נחושת תת-קרקעי באורך של 750 מטר ובמתח של $400 \text{ V} / 50 \text{ Hz}$. המפעל עובד ברציפות 12 חודשים (365 ימים בשנה). הניחו שמקדם ההספק של המפעל קבוע והוא 0.94. בחישוביכם הזניחו את ההיגב ליחידת אורך, X_0 .



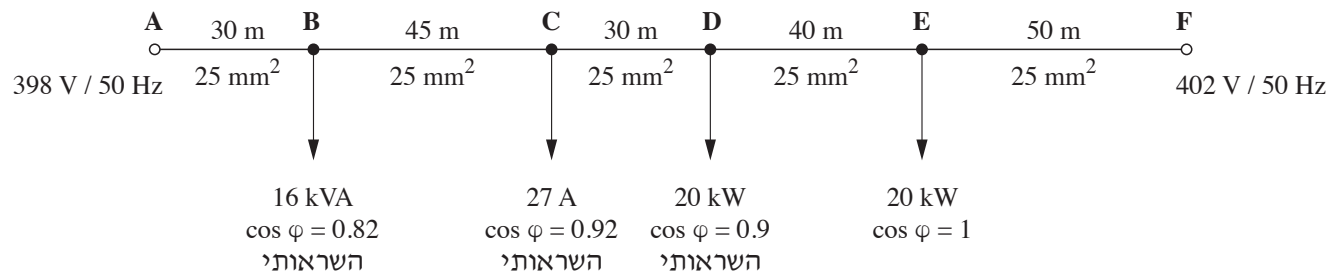
איור לשאלה 2

- א. (12 נק') חשבו את זמן השימוש השנתי בהספק המרבי ואת סך-כל האנרגייה השנתית הנצרכת במפעל.
- ב. (8 נק') קבעו את צפיפות הזרם הכלכלית, וחשבו את שטח החתך הדרוש להזנת המפעל. (בחרו שטח חתך מסחרי).
- ג. (5 נק') חשבו את הפסדי האנרגייה היומית בקו ההזנה, שאת שטח החתך המסחרי שלו בחרתם בתשובה לסעיף ב'.

שאלה 3

באיור לשאלה 3 מתוארת רשת תלת־מופעית המוזנת בשני קצותיה במתחים שונים ובמופעים זהים. מוליכי הרשת עשויים מנחושת $\gamma = \left[57 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} \right]$ ושטח החתך האחיד שלהם הוא 25 mm^2 . המוליכים מותקנים בקרקע בשיטת התקנה ל"א, והם בעלי בידוד של 90°C .

הזניחו בחישובכם את ההיגב ההשראותי של מוליכי הרשת.



איור לשאלה 3

(12 נק') א.

1. חשבו את הזרם של כל צרכן. הניחו מתח נקוב של 400 V.

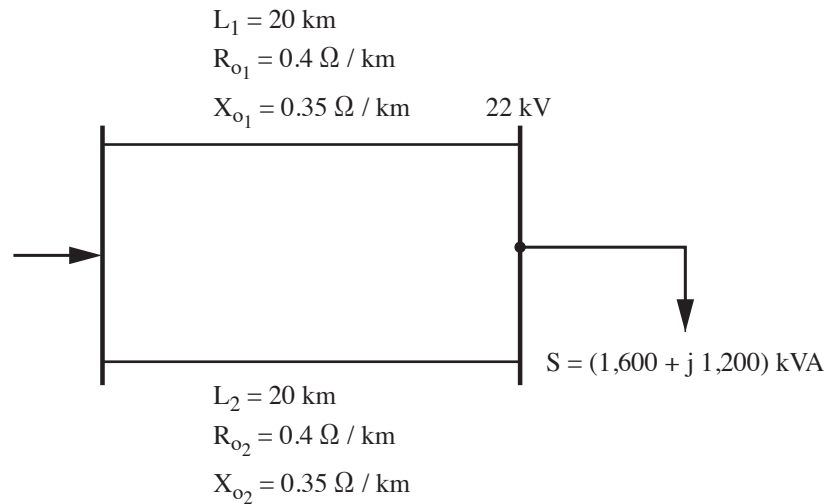
2. חשבו את הזרם בכל אחד מקטעי הרשת. השתמשו במתחי הרשת הנתונים בסרטוט.

(8 נק') ב. מהו גורם ההספק בנקודה F ובנקודה A?

(5 נק') ג. חשבו את המתח המזערי ברשת.

שאלה 4

באיור לשאלה 4 נתון תרשים חד-קווי של רשת תלת-מופעית הכוללת שני קווים זהים המזינים צרכן במתח גבוה 22 kV .
האורך ופרמטרי הרוחב (B , G) של שני הקווים – זהים.



איור לשאלה 4

- (15 נק') א. חשבו את מפל המתח על הקווים L_1 ו- L_2 .
(10 נק') ב. סרטטו את מעגל התמורה של שני הקווים L_1 ו- L_2 .

המרת אנרגייה והינע ב'

שאלה 5

להלן נתוניו הנקובים של מנוע השראה תלת-מופעי בעל רוטור כלוב:

$$U_n = 400 \text{ V} ; n_n = 1450 \text{ rpm} ; f_l = 50 \text{ Hz}$$

$$\eta_{n\%} = 88.6\% ; \cos \varphi_n = 0.84 ; \lambda_{\max} = 2.8$$

$$M_K = 168.8 \text{ N} \cdot \text{m} ; \Delta P_{\text{mech}} = 250 \text{ W}$$

12 נק' א.

1. (8 נק') חשבו את ההספק הנקוב של המנוע.

2. (4 נק') חשבו את הפסדי הנחושת ברוטור.

8 נק' ב. המנוע פועל במהירות סיבוב של 1000 rpm ובגורם חליקה נקוב. חשבו את מתח ההזנה ואת התדירות הנדרשים לכך.

5 נק' ג.

מפעילים את המנוע, שנתוניו מוצגים בפתיח, במתח ובתדירות נקובים. משטר העבודה המחזורי של המנוע כולל 30 דקות פעולה בעומס נקוב, ושעתיים הפסקה. קבוע הזמן התרמי של המנוע הוא 20 דקות וההפסדים הקבועים שווים להפסדים המשתנים. קבעו באמצעות חישוב את סוג משטר העבודה של המנוע.

שאלה 6

נתוניו הנקובים של מנוע לזרם ישר בעירור מקבילי הם:

$$P_n = 8 \text{ kW} ; U_n = 250 \text{ V} ; n_n = 1250 \text{ rpm} ; \eta_n = 0.9 ; R_a = 0.25 \Omega ; R_e = 100 \Omega$$

המנוע פועל בעומס נקוב בתחום הליניארי של עקום המינגוט. הזניחו בחישוביכם את מפל המתח על הפחמים, את תגובת העוגן ואת איבודי המומנט בריקם.

15 נק' א. מקטינים את מתח ההזנה ל-200 V.

7 נק' 1. חשבו את זרם העוגן.

8 נק' 2. חשבו את מהירות המנוע.

(10 נק') ב. מעבירים את המנוע לבלימה בחיבור נגדי, במתח הזנה ובעומס נקובים.

1. (5 נק') חשבו את ערך נגד הבלימה (R_b) שיש לחבר בטור לסליל העוגן על מנת להגביל את זרם

הבלימה ההתחלתי בעוגן ל- $I_{b1} = 2 \cdot I_{an}$.

2. (3 נק') חשבו את זרם הבלימה בעוגן I_b כאשר מהירות המנוע יורדת ל-0.

3. (2 נק') חשבו את מומנט הבלימה ההתחלתי.

שאלה 7

נתוניו הנקובים של מנוע סינכרוני תלת־מופעי בעל ארבעה קטבים הם:

$$U_n = 400 \text{ V} ; I_{1n} = 85 \text{ A} ; \cos \varphi_n = 0.8 \text{ (השראות)} ; \eta_n = 0.87 ; f_1 = 50 \text{ Hz} ; X_S = 1.6 \Omega ; R_a = 0 \Omega$$

סלילי הסטטור מחוברים בכוכב.

(10 נק') א. חשבו את המומנט על ציר המנוע בעומס נקוב.

(10 נק') ב.

1. (5 נק') חשבו את הכא"מ המופעי.

2. (5 נק') חשבו את זווית העומס (הזווית בין המתח לכא"מ) כאשר המנוע מועמס בעומס נקוב.

(5 נק') ג. המנוע מועמס בעומס נקוב ובנצילות נקובה ומספק לרשת 25 kVA.

חשבו את הזרם הנצרך מהרשת ואת מקדם ההספק של המנוע.

אלקטרוניקה של מערכות הספק

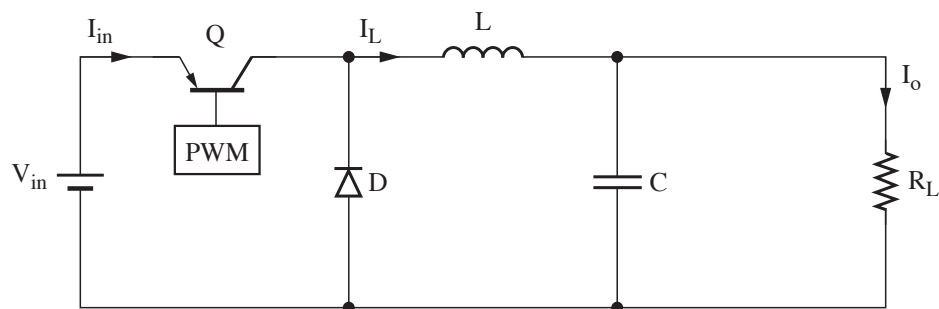
שאלה 8

באיור לשאלה 8 נתון מעגל ממיר מסוג (BUCK-STEP DOWN).

נתוני הממיר:

$$t_{\text{off}} = 67 \mu\text{sec} ; f_{\text{PWM}} = 8 \text{ kHz} ; \eta = 85\% ; V_{\text{in}} = 12 \text{ V}$$

$$I_L(\text{ave}) = 1 \text{ A} ; \Delta V_0 = \Delta V_C = 0.1 \text{ V}$$



איור לשאלה 8

10 נק' א. חשבו את מתח המוצא.

8 נק' ב. חשבו את גודל נגד העומס.

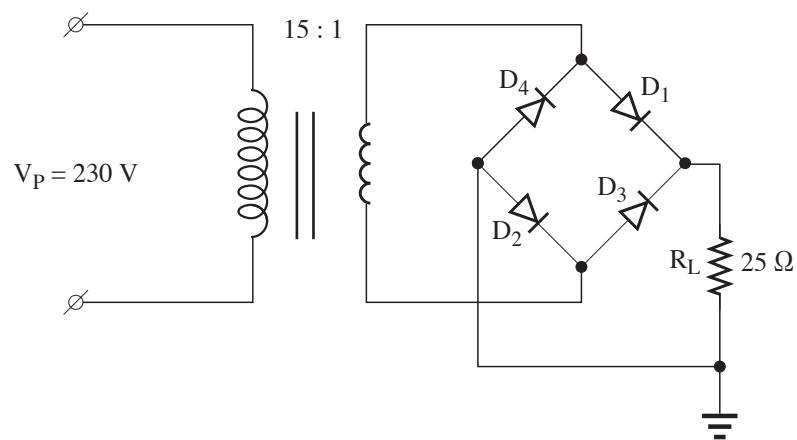
7 נק' ג.

4 נק' 1. חשבו את גודלו המינימלי של הקבל, C.

3 נק' 2. חשבו את גודלו המינימלי של הסליל, L.

שאלה 9

באיור לשאלה 9 מתואר מיישר דו־דרכי הכולל שנאי מוריד מתח. בעל יחס השנאה 15:1 .
הניחו שהדיודות אידיאליות.



איור לשאלה 9

- א. (5 נק') חשבו את המתח הממוצע על־פני העומס.
- ב. (5 נק') חשבו את הזרם הממוצע הזורם בעומס.
- ג. (5 נק') חשבו את המתח היעיל על־פני העומס.
- ד. (5 נק') חשבו את הזרם היעיל הזורם בעומס.
- ה. (5 נק') חשבו את ההספק שמתפתח על העומס.

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-מופעי

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

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

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

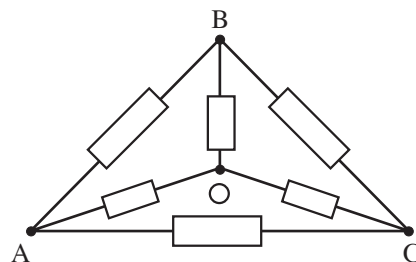
$$K = \frac{\sqrt{3}}{\gamma \Delta U_a} \sum_{k=1}^{k=n} (L_k \sqrt{I_k} \cos \varphi_k)$$

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

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



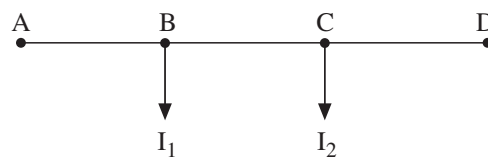
$$R_{OB} = \frac{R_{AB} \cdot R_{BC}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{AC}}$$

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

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

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.

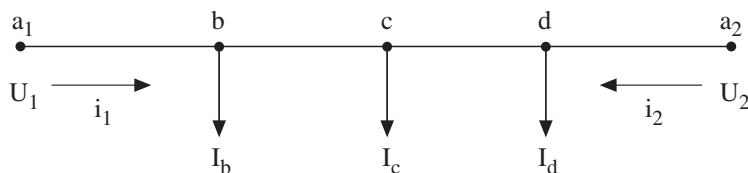
$$I_{1 \rightarrow A} = I_1 \frac{R_{BD}}{R_{AD}}$$

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

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

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

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



הזרמים המדומים:

הערות:

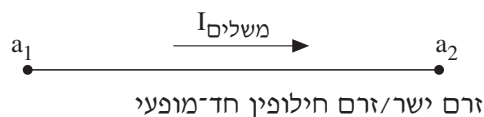
1. כאשר מוליכי הרשת עשויים מאותו חומר ושטח החתך שלהם אינו אחיד לכל אורכם, יש להשתמש בהתנגדויות במקום באורכים בנוסחאות לחישוב הזרמים המדומים.
2. במערכת זרם חילופין יש לבצע חישובים של זרם מדומה, זרם אקטיבי וזרם ריאקטיבי.

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

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

רשת בעלת זינה משני כיוונים במתחים שונים בעלי מופעים זהים

הזרם המשלים:



(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

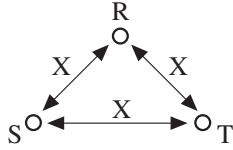
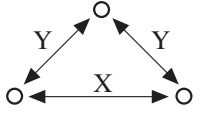
הזרם האמיתי:

$$I_1 = i_1 + I_{\text{משלים}}$$

$$I_2 = i_2 - I_{\text{משלים}}$$

5. פרמטרים של קווי הספק

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

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		
X ₀ [Ω/km]														
[A]	[Ω/km]	[A]	[Ω/km]										[mm]	[mm ²]
—	—	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

משוואות מתחים וקטוריות

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

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

כא"מ מופעי E_{ph} [V] -

מתח מופעי U_{ph} [V] -

זרם מופעי בסטטור I_{ph} [A] -

התנגדות העוגן למופע אחד R_a [Ω] -

היגב סינכרוני למופע אחד X_s [Ω] -

חישוב היגב סינכרוני

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

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

כא"מ מופעי בניסוי בריקס E_{pho} [V] -

כא"מ מופעי בניסוי בקצר E_{phk} [V] -

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

זרם עירור בניסוי בריקס I_{fo} [A] -

זרם עירור בניסוי בקצר I_{fk} [A] -

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

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

הזווית בין הזרם המופעי למתח המופעי φ -

הזווית בין הזרם המופעי לכא"מ המופעי ψ -

הזווית בין המתח המופעי לכא"מ המופעי Θ -

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

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 התנגדותי ($\varphi = 0^\circ$):

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

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

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

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

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

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

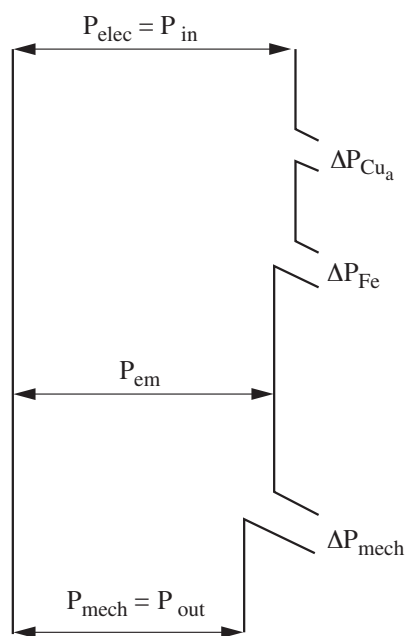
עבור עומס קיבולי $(-90^\circ \leq \varphi < 0^\circ)$:

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

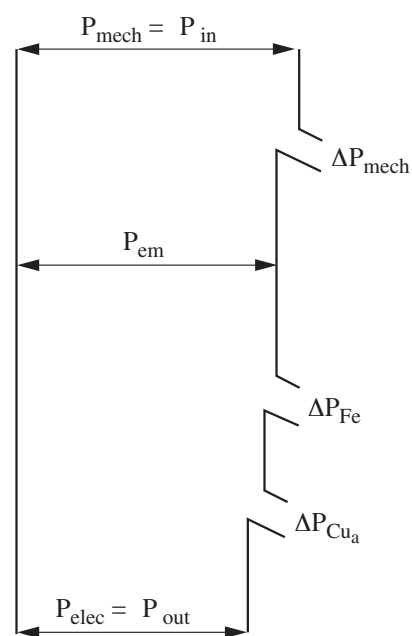
$$\tan \Psi = \frac{U_{ph} \cdot \sin \varphi + I_{ph} \cdot X_s}{U_{ph} \cdot \cos \varphi - I_{ph} \cdot R_a}$$

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

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.):

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

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

בחירת הספק מנוע בעומס משתנה בעבודה ממושכת:

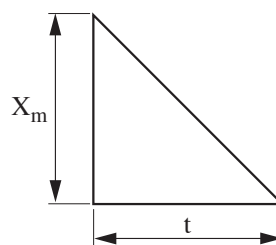
שיטת ההפסדים הממוצעים

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

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

מציאת זרם/מומנט שקול

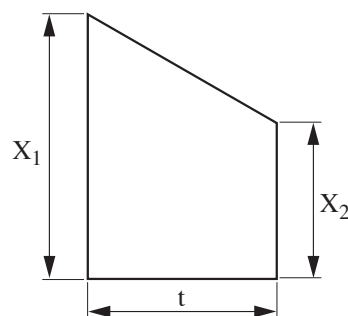
משולש:



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

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

טרפז:



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

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

קביעת הספק מנוע בעבודה בטמפרטורת סביבה לא תקנית:

	- P_T	[W]
הספק העמסה מותר	- 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:

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

E – כוח אלקטרו-מניע [V]

z – מספר המוליכים ברוטור

p – מספר זוגות הקטבים

a – מספר זוגות הענפים המקבילים ברוטור

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

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

$a = 1$ (ליפוף גלי פשוט)

$a = p$ (ליפוף עניבה פשוט)

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

מומנטים:

M_{em} – מומנט אלקטרו-מגנטי [Nm]

M_n – מומנט נומינלי [Nm]

ΔM_o – איבודי מומנט בריקם [Nm]

ω – מהירות זוויתית $\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$

n – מהירות סיבוב של הרוטור [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 – עוצמת הזרם ברוטור [A]

P_{in} – הספק חשמלי (מושקע) [W]

P_{em} – הספק אלקטרו-מגנטי [W]

P_n – הספק נומינלי (מופק) [W]

η – 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:

ΔP_{Cu_a} – איבודי הספק ברוטור [W]

ΔP_{Cu_e} – איבודי הספק בסליל העירור המקבילי [W]

ΔP_{Cu_s} – איבודי הספק בסליל העירור הטורי [W]

ΔP_{Fe} – איבודי הספק בברזל [W]

ΔP_{mech} – איבודי הספק מכניים [W]

R_a – התנגדות סליל העוון $[\Omega]$

R_e – התנגדות סליל העירור המקבילי $[\Omega]$

R_s – התנגדות סליל העירור הטורי $[\Omega]$

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

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

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

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

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 ישיר בעירור מקבילי/נפרד

מהירות סיבוב	-	n [rpm]
מהירות סיבוב בריקם	-	n_o [rpm]
התנגדות נוספת במעגל הרוטור	-	R_x [Ω]
התנגדות סליל העוגן	-	R_a [Ω]
שטף מגנטי	-	Φ [Wb]
מתח	-	U [V]
כוח אלקטרו-מניע	-	E [V]
מספר כריכות בסליל העירור	-	N_e [T]
מומנט אלקטרו-מגנטי	-	M_{em} [Nm]

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:

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

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

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:

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

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

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

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

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

זמני בלימה והתנעה

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

ד. 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:

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

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

כאשר המנוע מועמס
 במומנט כלשהו (M_x):

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

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

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

שינוי תדירות הרשת:

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

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

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

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

זרם ממוצע – I_{AV} [A]

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

מתח ממוצע – V_{AV} [V]

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:

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

1.3 ערך ממוצע של גל מלבני

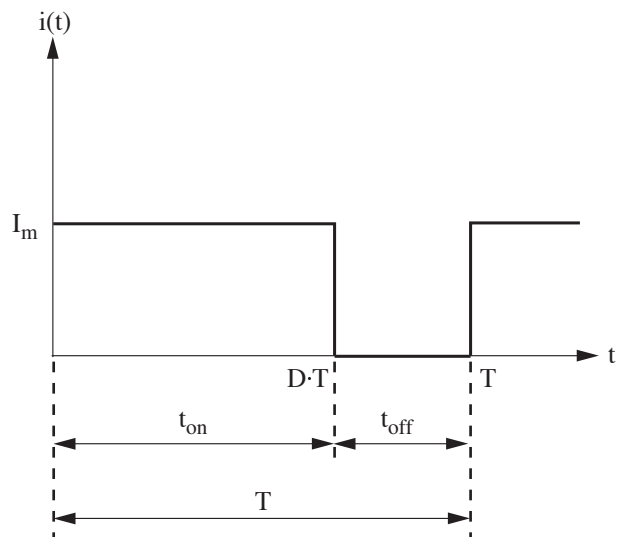
זרם:

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

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

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

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



D - מחזור הפעולה (Duty Cycle)

t_{on} [sec] - זמן הולכה

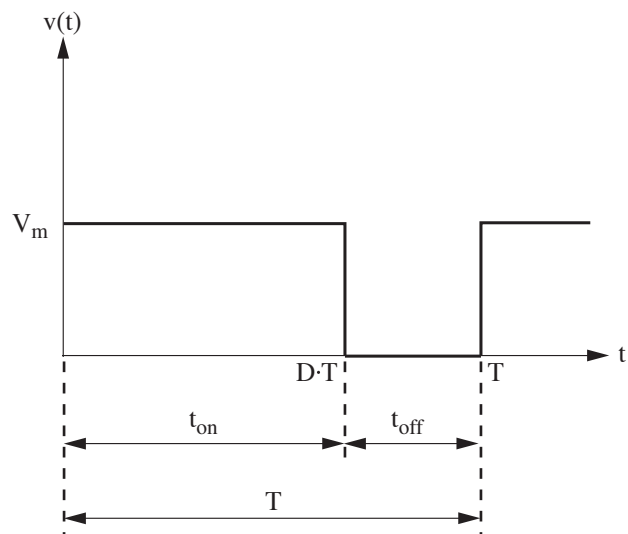
t_{off} [sec] - זמן פוגה

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:

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

הערך היעיל של הזרם – $I_{\text{RMS}} = I$ [A]
זמן מחזור – T [sec]

מתח:

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

הערך היעיל של המתח – $V_{\text{RMS}} = V$ [V]

1.5 ערך יעיל של אותות סינוסואידליים

זרם:

$$I_{\text{RMS}} = I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

הערך המרבי של הזרם – I_m [A]

מתח:

$$V_{\text{RMS}} = V = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

הערך המרבי של המתח – V_m [V]

1.6 ערך יעיל של גל מלבני

זרם:

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

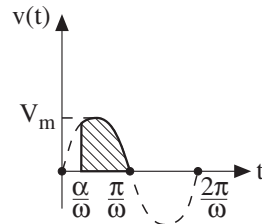
D – מחזור הפעולה (Duty Cycle)

מתח:

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

2. בקרת הספק במעגלי זרם חילופין חד-מופעיים

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



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

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

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

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

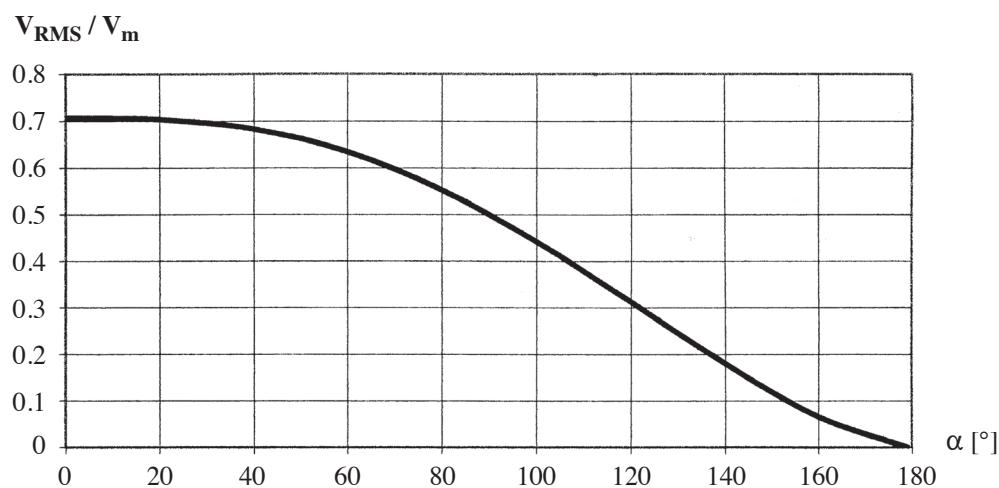
$$V_{RMS} = \frac{V_m}{2} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)}$$

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

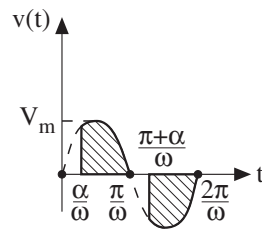
$$P = \frac{V_{RMS}^2}{R}$$

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

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



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

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

$$V_{AV} = 0$$

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

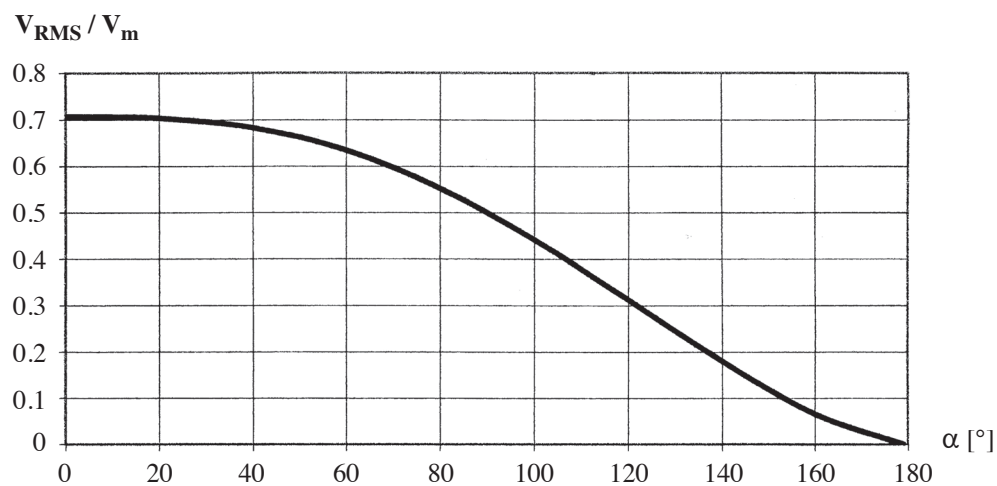
$$V_{RMS_m} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

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

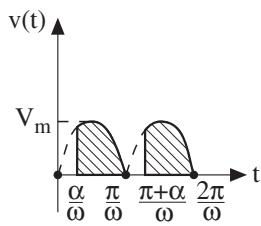
$$I_{AV} = 0$$

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

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	$[\Omega]$
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



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

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

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

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

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

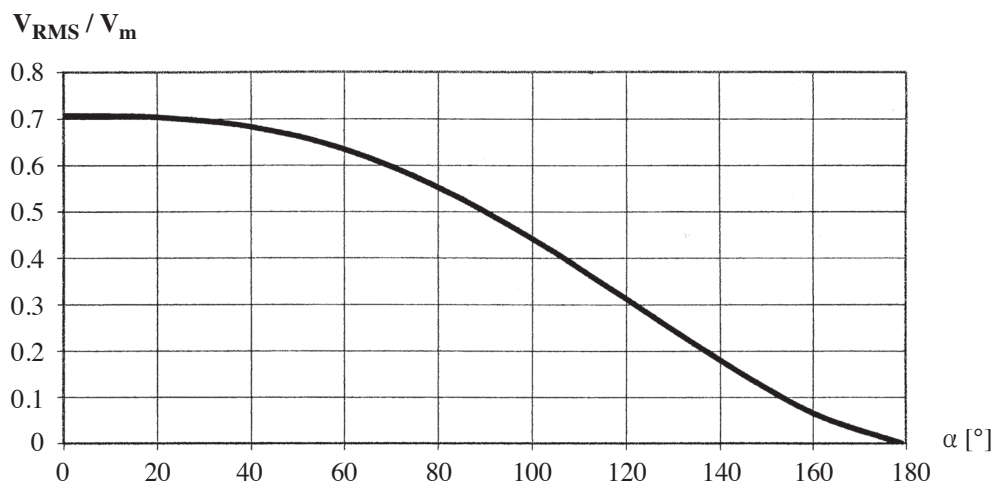
$$V_{RMS_m} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

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

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

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

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	$[\Omega]$
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-מופעי בחיבור כוכב בעומס אומי

פעולה רציפה:

$$0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{6}$$

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

$$V_{AV} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m \cdot \cos \alpha$$

$$V_{AV_m} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m$$

$$V_{RMS} = \sqrt{3} \cdot V_m \cdot \sqrt{\frac{1}{6} + \frac{\sqrt{3}}{8\pi} \cdot \cos 2\alpha}$$

$$V_{RMS_m} = \sqrt{3} \cdot V_m \cdot \sqrt{\frac{1}{6} + \frac{\sqrt{3}}{8\pi}}$$

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

זווית הצתה	-	α	[rad]
מתח מופעי בתלות בזמן	-	$v(t)$	[V]
תדר זוויתי	-	ω	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}}\right]$
זמן	-	t	[sec]
הערך המרבי של המתח המופעי	-	V_m	[V]
הערך הממוצע של המתח על העומס	-	V_{AV}	[V]
הערך המרבי של המתח הממוצע	-	V_{AV_m}	[V]
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:

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

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

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

3.2 מיישר מבוקר תלת-מופעי בחיבור גשר בעומס אומי

פעולה רציפה:

זווית הצתה	α	[rad]	$0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{3}$
מתח מופעי בתלות בזמן	$v(t)$	[V]	$v(t) = V_m \cdot \sin \omega t$
מהירות זוויתית (תדר זוויתי)	ω	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$	$V_{AV} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \cdot \cos \alpha$
זמן	t	[sec]	$V_{AV_m} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m$
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]	$I_{AV} = \frac{V_{AV}}{R} ; I_{RMS} = \frac{V_{RMS}}{R}$
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:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$V_o = \frac{V_{in}}{1 - D}$$

$$I_o = (1 - D) \cdot I_{in}$$

$$C = \frac{I_o}{\Delta V_o} \cdot D \cdot T$$

$$L = \frac{V_{in}}{\Delta I_L} \cdot D \cdot T$$

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

בממיר

אידיאלי

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

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

$$V_o = \frac{n \cdot D}{1 - D} \cdot V_{in}$$

$$n = \frac{N_2}{N_1}$$

בממיר

אידיאלי

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):

$$V_o = V_{in}$$

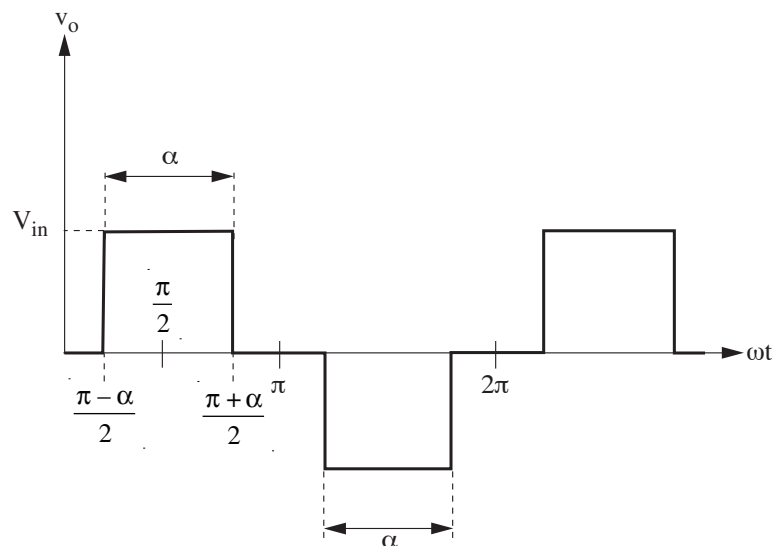
6. אפנון רוחב דופק יחיד (SPWM)

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"ד

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