

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 שלושה פרקים ובהם תשע שאלות.
יש להשיב על ארבע שאלות בלבד: שאלה אחת לפחות מן הפרק הראשון, ושאלה אחת לפחות מן הפרק השני.
לכל שאלה – 25 נקודות, סך-הכול – 100 נקודות.

ג. חומר עזר מותר בשימוש:

- כל חומר הכתוב (בכתב יד או בהדפסה) על שלושה דפי A4, הכתובים משני הצדדים.
- מחשבון.
- "חוק ותקנות בנושא חשמל".

ד. הוראות מיוחדות:

- ענו על מספר השאלות הנדרש בשאלון. המעריך יקרא ויעריך את מספר התשובות הנדרש בלבד, לפי סדר כתיבתן במחברת, ולא יתייחס לתשובות נוספות.
- התחילו כל תשובה לשאלה חדשה בעמוד חדש.
- כתבו את התשובות אך ורק בעט.
- הקפידו לנסח את התשובות כהלכה ולסרטט את התרשימים בבהירות.
- כתבו את התשובות בכתב-יד ברור, כדי לאפשר הערכה נאותה שלהן.
- בכל שאלה ניתנו הנתונים לפתרונה. אם לדעתכם חסר נתון, הוסיפו אותו על-פי שיקול דעתכם ופתרו בעזרתו את השאלה. כתבו בתשובה את הנתון שהוספתם.
- בכתיבת 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.
- בנספח ד' לשאלון זה מובא מילון מונחים בשפות עברית, אנגלית, רוסית וערבית. תוכלו להיעזר בו בעת הצורך.
- 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 10 עמודים ו-44 עמודי נספחים.

השאלות בשאלון זה מנוסחות בלשון רבים,
אף על פי כן על כל תלמידה וכל תלמיד להשיב עליהן באופן אישי.

בהצלחה!

המשך מעבר לדף

השאלות

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

פרק ראשון: מערכות הספק ב'

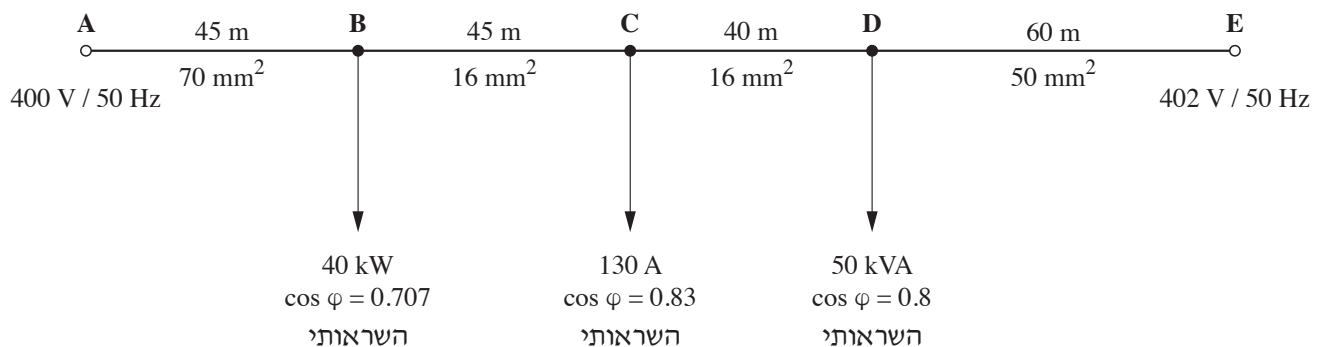
ענו על שאלה אחת לפחות מבין השאלות 1-4 (לכל שאלה – 25 נקודות).

שאלה 1

באיור לשאלה 1 מתואר קו חלוקה המוזן משני מקורות מתח שונים במופעים זהים.

$$\gamma = 57 \left[\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} \right]$$

שטח החתך של כל אחד מקטעי הקו נתון באיור לשאלה. הזניחו בחישוביכם את ההיגב ההשראותי של מוליכי הקו. בחישובי הזרמים, התבססו על מתח נומינלי של 400 V.

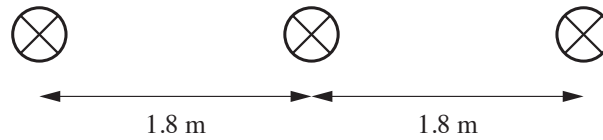


איור לשאלה 1

- א. (9 נק') כל העומסים מנותקים. חשבו את עוצמת הזרם הזורם בקו החלוקה.
- ב. (8 נק') כל העומסים מחוברים והמתחים שווים. חשבו את עוצמת הזרמים הזורמים בקו החלוקה.
- ג. (8 נק') קו החלוקה מוזן ממקורות מתח שונים, כמתואר באיור לשאלה. העתיקו את האיור למחברת הבחינה וכתבו בכל אחד מקטעי הקו את עוצמת הזרם הזורם בו. כתבו את התשובה כמספר מרוכב.

שאלה 2

באיור לשאלה 2 מתואר סידור מוליכים בקו עילי תלת-מופעי המוזן במתח נקוב של 120 kV בתחילת הקו. מוליכי הקו עשויים אלומיניום-ברזל (Al/Fe) ומועבר בהם הספק של 100 MVA במקדם הספק של 0.92 השראותי. טמפרטורת הסביבה היא 20°C ומקדם מבנה המוליכים הוא $m_1 = 0.7$.

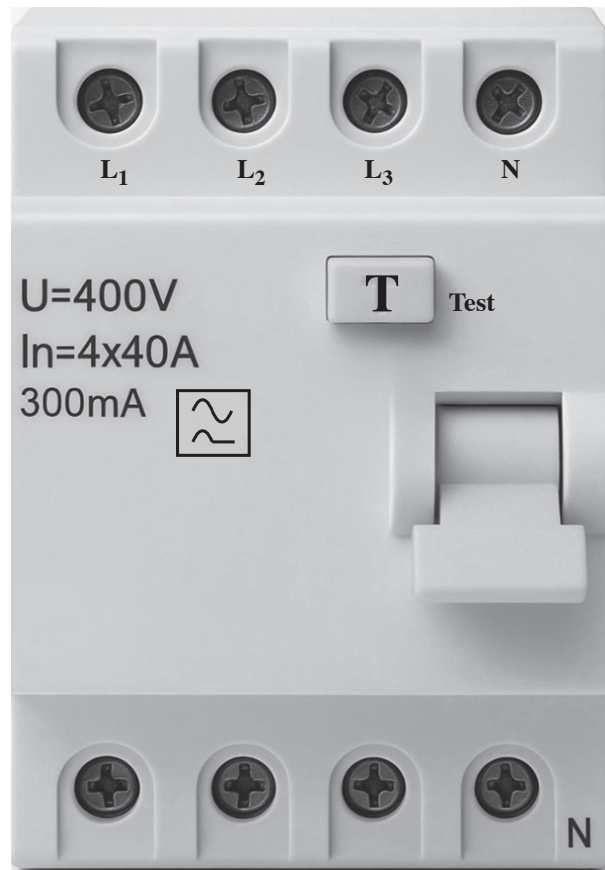


איור לשאלה 2

- א. (5 נק') קבעו את שטח החתך של מוליכי הקו.
- ב. (10 נק') נתון כי האוויר לח, ולחץ האוויר הוא 74 cm/Hg. הראו באמצעות חישוב כי בקו מתקיימת תופעת קורונה.
- ג. (10 נק') חשבו את הפסדי הקורונה לק"מ בקו, בפאזות R ו-T.

שאלה 3

א. באיור א' לשאלה 3 מוצג ממסר מגן לזרם דלף (ממסר פחת). (9 נק')

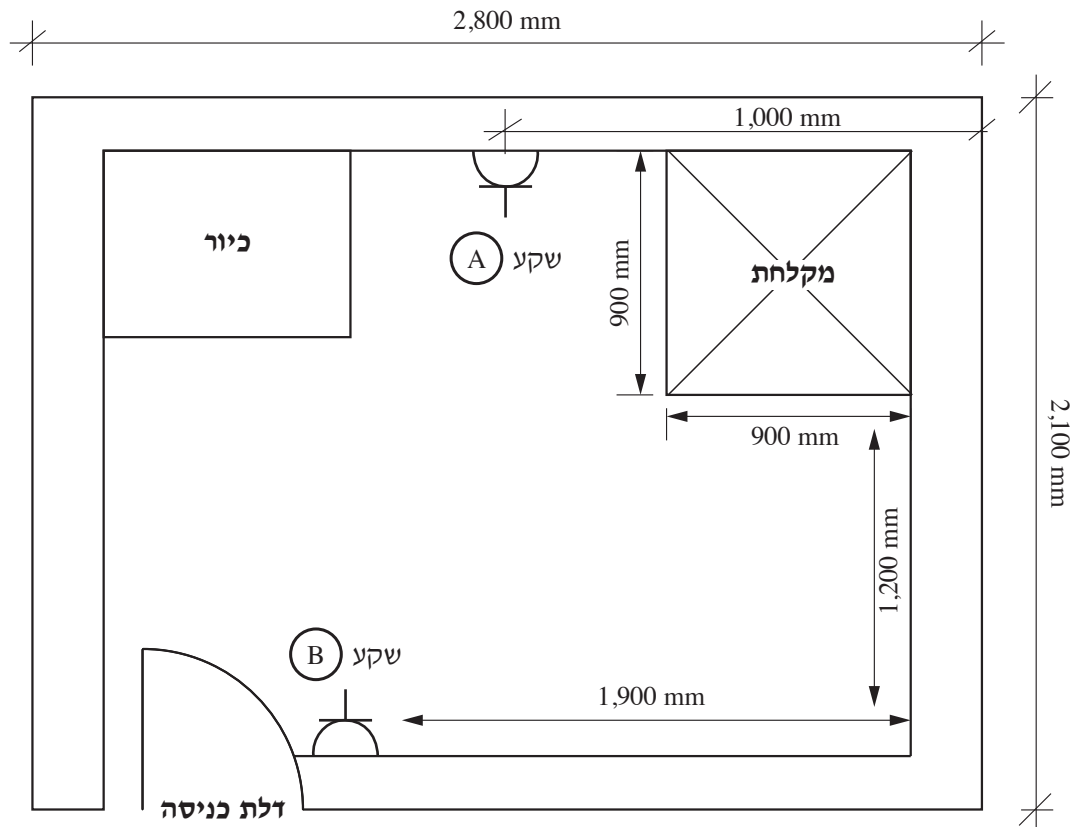


איור א' לשאלה 3

האם ממסר זה מתאים, על-פי חוק החשמל, להגנה על בית מגורים חדש המוזן בהזנה של $3 \times 25 \text{ A}$?
נמקו את התשובה.

ב. כתבו **ארבעה** סייגים (תנאים מגבילים) לשימוש בשיטה "הפרד מגן" להגנה מפני התחשמלות. (8 נק')

ג. (8 נק') באיור ב' לשאלה 3 נתון סרטוט אדריכלי של חדר מקלחת בבית מגורים.



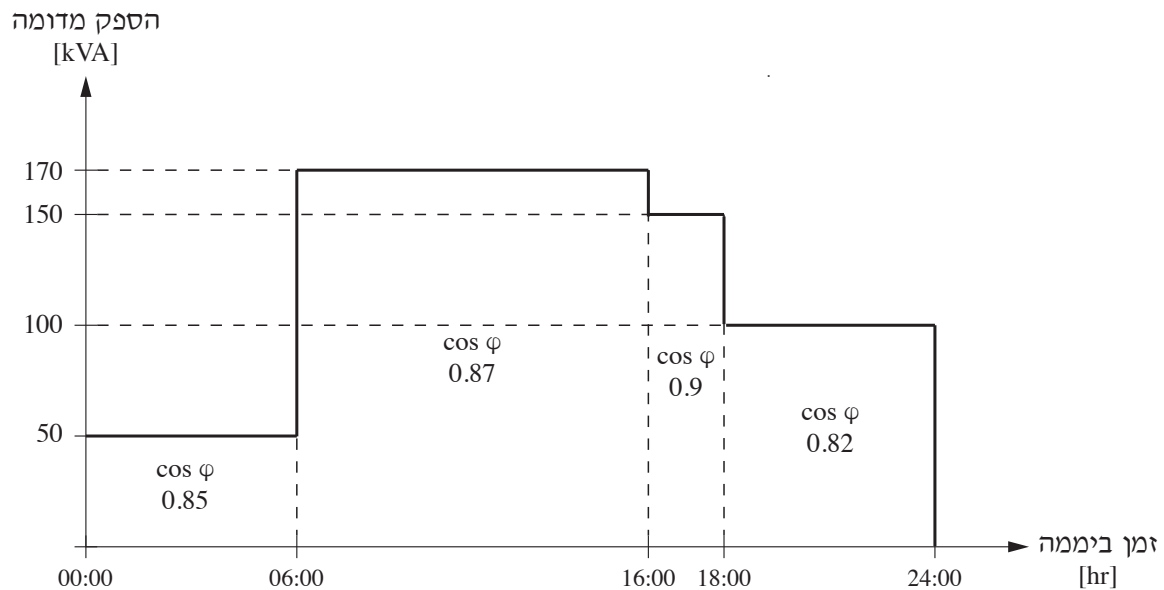
איור ב' לשאלה 3

חשמלאי מבקש להתקין שני בתי תקע (שקעים) במיקומים המסומנים באותיות A ו-B בסרטוט, בגובה של 1m.

קבעו אם המיקומים המוצעים לבתי התקע עונים על דרישות חוק החשמל. אם כן, קבעו מהי רמת האטימות המותרת בחוק לכל בית תקע במיקום המוצע.

שאלה 4

באיור לשאלה 4 נתון עקום העמסה יומי של מפעל המוזן במתח של $400 \text{ V} / 50 \text{ Hz}$ על-ידי תחנת משנה (תחמ"ש).
עקום ההעמסה היומי זהה לאורך כל השנה. מוליכי הקו עשויים נחושת.



איור לשאלה 4

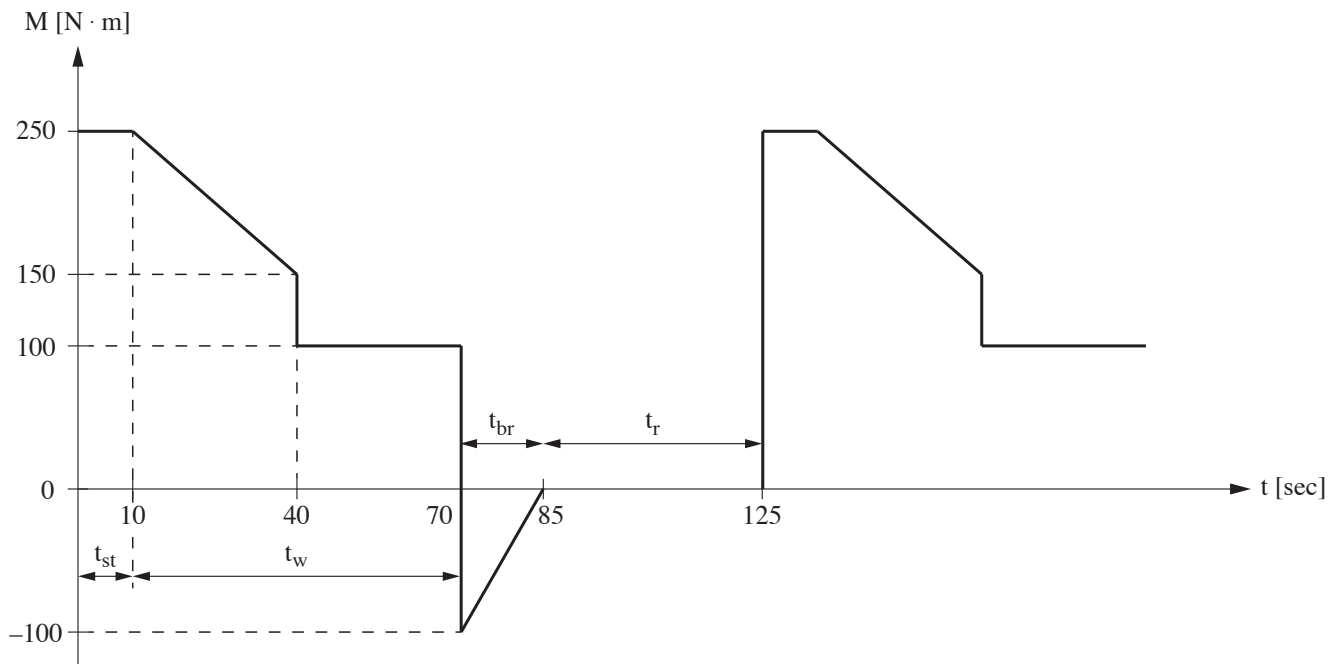
- א. (8 נק') חשבו את ההספק הממשי ואת ההספק ההיגבי המרבי של המפעל.
- ב. (9 נק') חשבו את האנרגייה הכללית היומית שהמפעל צורך.
- ג. (8 נק') חשבו את שטח החתך **המומלץ** של כבל ההזנה המותקן בשיטת ההתקנה 2 – כבלים רב גידיים, בצינור בתוך האדמה, בבידוד של 90°C – בהתאם לצפיפות זרם אחידה, וקבעו שטח חתך **תקני**.

פרק שני: המרת אנרגייה והינע ב'

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

שאלה 5

באיור לשאלה 5 נתון תרשים העמסה של מנוע השראה תלת-מופעי.



איור לשאלה 5

נתונים:

$$\alpha = 0.5 ; \beta = 0.7 ; \text{ המנוע פועל באוויר עזמי } ; U_n = 400 \text{ V } ; n_{\text{ממוצע}} = 970 \text{ rpm}$$

9 נק' א. חשבו את ההספק הנדרש של המנוע.

8 נק' ב. הוחלט להשתמש במנוע השראה תלת-מופעי אחר, בעל הנתונים האלה:

$$P_n = 14.5 \text{ kW} ; n_n = 970 \text{ rpm} ; \text{ חומרי הבידוד מקבוצה B} ; \text{ ההפסדים הקבועים: } 40\% ; \text{ ההפסדים המשתנים: } 60\% ; \text{ טמפרטורת הסביבה התקנית: } 40^\circ\text{C}$$

חשבו את זמן המנוחה המזערי הנדרש במחזור עבודה אחד של המנוע המתואר בסעיף זה.

8 נק' ג. חשבו את ההספק העומס המרבי המותר למנוע המתואר בסעיף ב', כאשר טמפרטורת הסביבה היא 60°C .

שאלה 6

להלן נתוניו הנקובים של מנוע לזרם ישר בעירור זר:

$$P_n = 8 \text{ kW} ; U_n = 250 \text{ V} ; n_n = 1,150 \text{ rpm} ; \eta = 0.8 ; R_a = 0.25 \Omega$$

ניתן להזניח את מפל המתח על הפחמים ואת תגובת העוגן.

המנוע פועל בתחום הליניארי של עקום המגנט. המנוע מועמס בעומס נקוב ומועבר לבלימה בחיבור נגדי.

(10 נק') א. חשבו את הערך של נגד הבלימה, R_b , שיש לחבר בטור לסליל העוגן כדי להגביל את זרם הבלימה ההתחלתי ל- $1.8 I_{an}$.

(10 נק') ב.

1. חשבו את זרם הבלימה בעת עצירת המנוע.

2. חשבו את מומנט הבלימה ההתחלתי.

(5 נק') ג. סרטוט, על-גבי מערכת צירים אחת, את האופיין המכני הטבעי של המנוע ואת האופיין המכני שלו בבלימה בחיבור נגדי.

שאלה 7

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

$$P_n = 50 \text{ kW} ; U_n = 400 \text{ V} ; f = 50 \text{ Hz} ; \eta = 0.87 ; X_s = 1.5 \Omega$$

המנוע פועל בתחום הליניארי של עקום המגנט.

סלילי הסטטור של המנוע מחוברים בחיבור כוכב והתנגדותם זניחה.

בניסוי בריקם נדרש זרם עירור של $I_{f0} = 18 \text{ A}$ כדי שהכא"מ יהיה שווה למתח נקוב.

(10 נק') א. המנוע פועל בתנאים נקובים במקדם הספק של 0.82 השראות.

1. חשבו את הכא"מ המופעי המושרה.

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

3. חשבו את זרם העירור.

(10 נק') ב. מגדילים ב-50% את זרם העירור שחישבתם בתשובה לסעיף א' 3 כאשר המנוע פועל בנצילות נקובה ובעומס נקוב. חשבו את הזרם הנצרך מהרשת.

(5 נק') ג. על-פי התנאים המופיעים בסעיף ב':

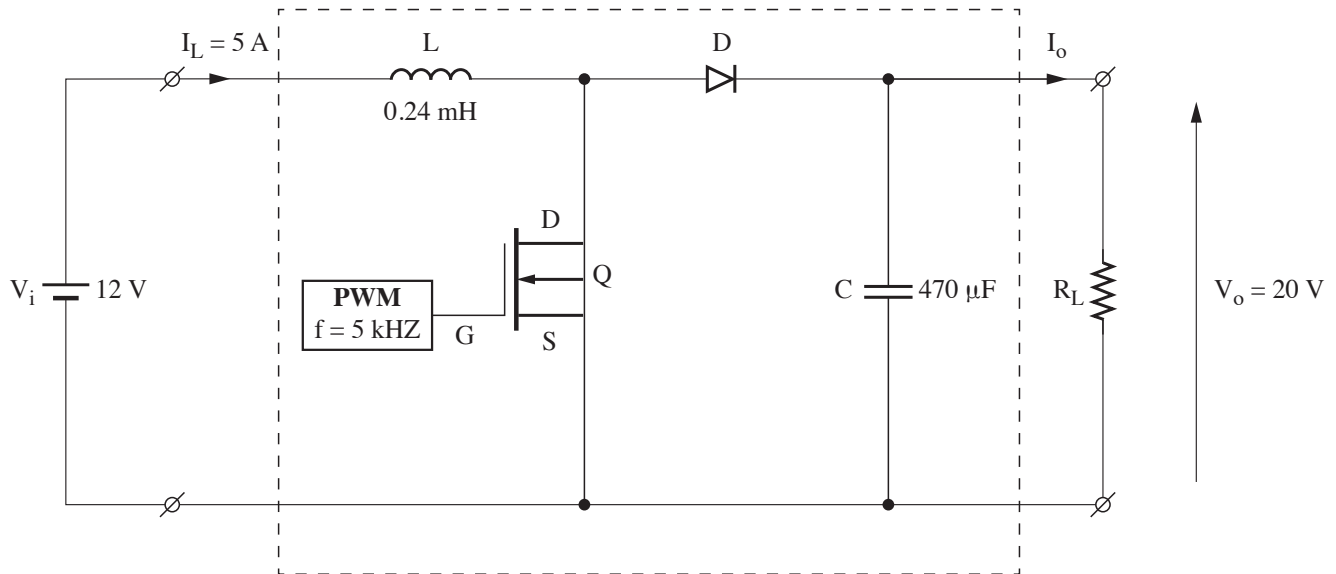
1. חשבו את מקדם ההספק של המנוע.

2. קבעו את אופי פעולתו של המנוע.

פרק שלישי: אלקטרוניקה של מערכות הספק (לכל שאלה – 25 נקודות).

שאלה 8

באיור לשאלה 8 מתואר מעגל חשמלי של ממיר ממותג מסוג BOOST (STEP UP). רכיבי המיתוג שבמעגל אידיאליים.

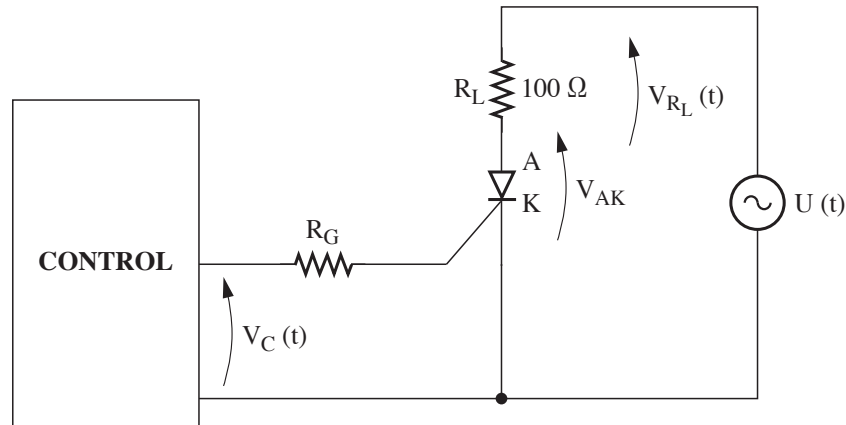


איור לשאלה 8

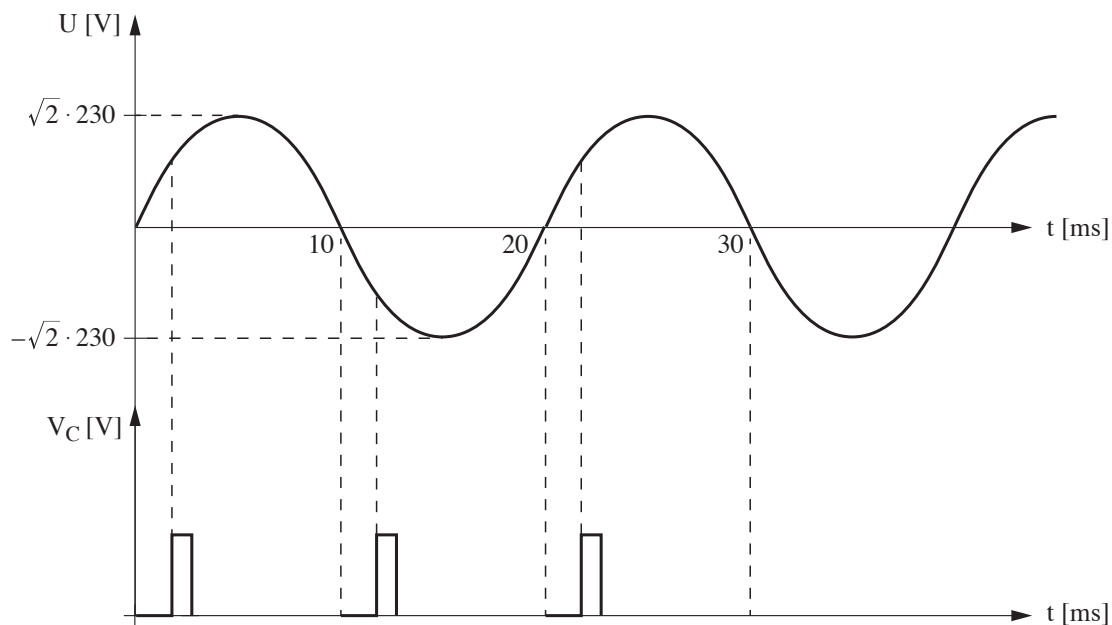
- א. (8 נק') חשבו את מחזור הפעולה (Duty Cycle) של הממיר.
- ב. (7 נק')
 1. חשבו את ערכו של הנגד, R_L .
 2. חשבו את ההספק המתפתח בנגד, R_L .
- ג. (5 נק') חשבו את אדוות מתח המוצא, ΔV_o .
- ד. (5 נק') סרטטו באופן סכמתי, זה מתחת לזה בהתאמה, גרף המתאר את צורת הזרם על הסליל, $I_L(t)$, ואת צורת המתח על הקבל, $U_C(t)$.

שאלה 9

באיור א' לשאלה 9 מתואר מעגל חשמלי לבקרת הספק בעומס R_L שהתנגדותו היא 100Ω . הבקרה מתבצעת באמצעות SCR. באיור ב' לשאלה מתוארות צורות הגלים $U(t)$, $V_C(t)$.



איור א' לשאלה 9



איור ב' לשאלה 9

13 נק' א. העתיקו למחברת הבחינה את צורות הגלים שבאיור ב' לשאלה, וסרטטו מתחתיהן בהתאמה את צורות המתחים $V_{AK}(t)$ ו- $V_{RL}(t)$.

12 נק' ב. נתונה זווית הצתה $\alpha = \frac{\pi}{4} \text{ rad}$.

1. חשבו את המתח היעיל, V_{RMS} , על נגד העומס R_L .

2. חשבו את ההספק המתפתח בנגד העומס R_L .

בהצלחה!

אין להעביר את הנוסחאון
לנבחן אחר

נוסחאון במערכות הספק לכיתה י"ד (17 עמודים)

1. חישוב פרמטרים של מרכיבי מערכות הספק
1.1 פרמטרים של שנאי

כאשר סלילי השנאי מחוברים בכוכב:

$R_{TR} \quad [\Omega]$	- התנגדות סלילי השנאי למופע אחד	$R_{TR} = \frac{\Delta P_{CU} \cdot U_n^2}{S_{TR}^2}$
$\Delta P_{CU} \quad [W]$	- הפסדי נחושת בשנאי	
$U_n \quad [V]$	- מתח נקוב של השנאי	$R_{TR} = \frac{U_{a\%} \cdot U_n^2}{100 \cdot S_{TR}}$
$S_{TR} \quad [VA]$	- הספק מדומה של השנאי	
$U_{a\%} \quad [\%]$	- רכיב ממשי של מתח הקצר באחוזים	$X_{TR} = \frac{U_{r\%} \cdot U_n^2}{100 \cdot S_{TR}}$
$X_{TR} \quad [\Omega]$	- היגב סלילי השנאי למופע אחד	
$U_{r\%} \quad [\%]$	- רכיב היגבי של מתח הקצר באחוזים	$R_{Fe} = \frac{U_{ph}}{I_{Fe(ph)}} = \frac{U_{ph}}{I_{0(ph)} \cdot \cos \varphi_0}$
$R_{Fe} \quad [\Omega]$	- התנגדות מותאמת להפסדי ברזל	
$I_{Fe(ph)} \quad [A]$	- זרם הפסדי ברזל למופע	$R_{Fe} = \frac{3 \cdot U_{ph}^2}{\Delta P_{Fe}}$
$I_{0(ph)} \quad [A]$	- זרם ריקם למופע	
$X_{\mu} \quad [\Omega]$	- היגב מגנוט	$X_{\mu} = \frac{U_{ph}}{I_{\mu(ph)}} = \frac{U_{ph}}{I_{0(ph)} \cdot \sin \varphi_0}$
$X_{\mu(ph)} \quad [A]$	- זרם מגנוט למופע	
$U_{sc\%} \quad [\%]$	- מתח קצר באחוזים	$U_{sc\%} = \sqrt{U_{a\%}^2 + U_{r\%}^2}$

1.2 הפסדי הספק בשנאי

- הפסדי הספק כלליים ממשיים בשנאי - ΔP_T [W]
- הפסדי ברזל (הפסדי ריקם) בשנאי - ΔP_{Fe} [W]
- הפסדי נחושת (הפסדי קצר) בשנאי - ΔP_{cun} [W]
- הפסדי הספק כלליים היגביים בשנאי - ΔQ_T [VAr]
- הפסדי הספק היגביים (הפסדי ריקם) בשנאי - ΔQ_{Fe} [VAr]
- הפסדי הספק היגביים (הפסדי קצר) בשנאי - ΔQ_{cun} [VAr]
- זרם קצר למופע - $I_{sc(ph)}$ [A]
- מקדם העמסה - β
- הספק מדומה של העומס - S_L [VA]
- הספק מדומה של השנאי - S_{TR} [VA]

$$\Delta P_T = \Delta P_{Fe} + \beta^2 \cdot \Delta P_{cun}$$

$$\Delta Q_T = \Delta Q_{Fe} + \beta^2 \cdot \Delta Q_{cun}$$

$$\Delta P_{Fe} = \frac{3 \cdot U_{ph}^2}{R_{Fe}} = 3 \cdot I_{Fe(ph)}^2 \cdot R_{Fe}$$

$$\Delta Q_{Fe} = \frac{3 \cdot U_{ph}^2}{X_{\mu}} = 3 \cdot I_{\mu(ph)}^2 \cdot X_{\mu}$$

$$\Delta Q_{Fe} = \Delta P_{Fe} \cdot \tan \varphi_0$$

$$\Delta P_{cun} = 3 \cdot I_{sc(ph)}^2 \cdot R_{sc}$$

$$\Delta Q_{cun} = 3 \cdot I_{sc(ph)}^2 \cdot X_{sc}$$

$$\Delta Q_{cun} = \Delta P_{cun} \cdot \tan \varphi_{sc}$$

$$\beta = \frac{S_L}{S_{TR}}$$

2. קווי תמסורת

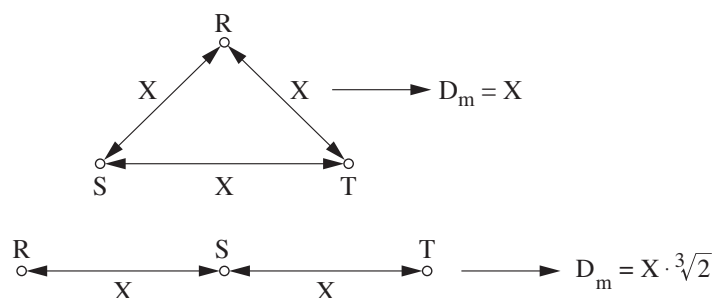
2.1 פרמטרים של קווי תמסורת

התנגדות הקו	R_L	$[\Omega]$	$R_L = R_0 \cdot L$
התנגדות הקו ליחידת אורך	R_0	$\left[\frac{\Omega}{\text{km}} \right]$	$X_L = X_0 \cdot L$
אורך הקו	L	$[\text{km}]$	$X_0 = 0.144 \log \frac{D_m}{r} + 0.016$
היגב הקו	X_L	$[\Omega]$	$C_0 = \frac{0.0242}{\log \frac{D_m}{r}}$
היגב הקו ליחידת אורך	X_0	$\left[\frac{\Omega}{\text{km}} \right]$	$B_C = \frac{1}{X_C} = \omega \cdot C = \omega \cdot C_0 \cdot L$
מרחק ממוצע בין מוליכי המופע	D_m	$[\text{cm}]$	
רדיוס המוליך	r	$[\text{cm}]$	
מניחות קיבולית	B_C	$[\text{S}]$	
קיבול קו עילי ליחידת אורך עבור מוליך אחד	C_0	$\left[\frac{\mu\text{F}}{\text{km}} \right]$	
מוליכות אומית	G_{CR}	$[\text{S}]$	בהינתן הפסדי (איבודי) קורונה:
הפסדי קורונה כלליים	ΔP_{CR}	$[\text{kW}]$	$G_{CR} = \frac{\Delta P_{CR}}{3 \cdot U_{ph}^2} = \frac{\Delta P_{CR}}{U_n^2}$
מתח שלוב של הרשת	U_n	$[\text{V}]$	

2.2 הפסדי הספק בקו

הפסדי הספק ממשיים (אקטיביים)	ΔP_L	$[\text{W}]$	$\Delta P_L = 3 \cdot I_L^2 \cdot R_L$
זרם בקו	I_L	$[\text{A}]$	$\Delta Q_L = 3 \cdot I_L^2 \cdot X_L$
הפסדי הספק היגביים השראותיים	ΔQ_L	$[\text{VAr}]$	$\Delta Q_C = \frac{3 \cdot (U_{ph})^2}{X_C} = 3 \cdot (U_{ph})^2 \cdot B_C$
הפסדי הספק היגביים קיבוליים	ΔQ_C	$[\text{VAr}]$	
מניחות קיבולית	B_C	$[\text{S}]$	

מרחק בין מוליכים X $[\text{cm}]$



2.3 תופעת קורונה

מתח קריטי שבו מופיעה תופעת קורונה	-	U_{CR}	[kV]	$U_{CR} = \sqrt{3} \cdot 21.1 \cdot r \cdot 2.3 \log \frac{D_m}{r} \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot \delta$										
רדיוס המוליך	-	r	[cm]	$\delta = \frac{3.92 \cdot b}{273 + t}$										
מרחק ממוצע בין מוליכי המופע	-	D_m	[cm]											
מקדם פני השטח של המוליך (מקדם מבנה המוליך) * מלא: 1 * שזור : 0.7–0.9	-	m_1		<table><tr><th>R</th><th>S</th><th>T</th><th rowspan="3">שינויים של מתח קורונה מופעי</th></tr><tr><td>o</td><td>o</td><td>o</td></tr><tr><td>+6%</td><td>-4%</td><td>+6%</td></tr></table>	R	S	T	שינויים של מתח קורונה מופעי	o	o	o	+6%	-4%	+6%
R	S	T	שינויים של מתח קורונה מופעי											
o	o	o												
+6%	-4%	+6%												
מקדם לחות האוויר * יבש: 1 * רטוב/ לח : 0.8	-	m_2		$U_{CR(R)} = U_{CR(T)} = 1.06 \cdot U_{CR(ph)}$										
מקדם לחץ האוויר והטמפרטורה	-	δ		$U_{CR(S)} = 0.96 \cdot U_{CR(ph)}$										
לחץ אוויר	-	b	[cm Hg]	$U_{CR(ph)} = \frac{U_{CR}}{\sqrt{3}}$										
טמפרטורה של האוויר	-	t	[°C]											
הפסדי קורונה במופע אחד	-	ΔP_{OCR}	$\left[\frac{kW}{km} \right]$	$\Delta P_{OCR} = \frac{0.18}{\delta} \cdot \sqrt{\frac{r}{D_m}} \cdot (U_{ph} - U_{CR(ph)})^2$										
מתח קריטי מופעי שבו מופיעה תופעת קורונה	-	$U_{CR(ph)}$	[kV]											
מתח מופע	-	U_{ph}	[kV]											

נתונים של מוליכי AI-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]												
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

γ – המוליכות הסגולית [m/Ωmm²]

g – המשקל הסגולי [g/cm³]

חומרים		γ
חמרן	נחושת	
35	57	
2.7	8.9	g

3. ויסות מתח

3.1 ויסות מתח באמצעות חיבור קבלים בטור לרשת

ΔU_L [V] - מפל מתח על הקו

I_L [A] - זרם בקו

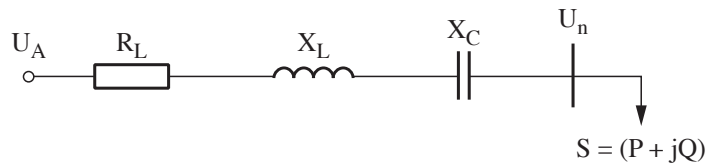
X_L [Ω] - היגב השראתי של הקו

X_C [Ω] - היגב קיבולי של סוללת קבלים

U_n [V] - מתח ייחוס (מתח רצוי)

P [W] - הספק פעיל של העומס

Q [VAr] - הספק היגבי של העומס



$$\Delta U_L = \sqrt{3} \cdot I_L \cdot [R_L \cdot \cos \varphi + (X_L - X_C) \cdot \sin \varphi]$$

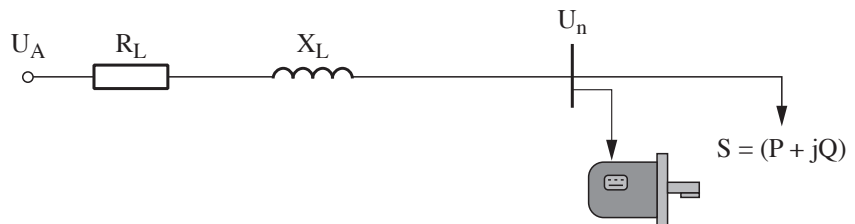
$$\Delta U_L = \frac{P \cdot R_L + Q \cdot (X_L - X_C)}{U_n}$$

3.2 ויסות מתח באמצעות חיבור מקזז סינכרוני

Q_{MC} [VAr] - הספק היגבי קיבולי של מקזז סינכרוני

Q_{ML} [VAr] - הספק היגבי השראתי

U_n [V] - מתח ייחוס (מתח רצוי)



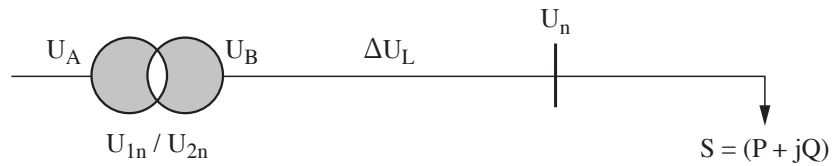
מקזז סינכרוני:

הקטנת מפל מתח
$$\Delta U_L = \frac{P_L \cdot R_L + (Q - Q_{MC}) \cdot X_L}{U_n}$$

הגדלת מפל מתח
$$\Delta U_L = \frac{P_L \cdot R_L + (Q + Q_{ML}) \cdot X_L}{U_n}$$

3.3 ויסות מתח באמצעות משנה דרגות

מתח שלוב בצד הראשוני של השנאי	-	U_A	[V]
מתח שלוב בצד המשני של השנאי	-	U_B	[V]
מתח שלוב נומינלי בסליל הראשוני של השנאי	-	U_{1n}	[V]
מתח שלוב נומינלי בסליל המשני של השנאי	-	U_{2n}	[V]
מפל מתח על השנאי	-	ΔU_{TR}	[V]
הספק פעיל של העומס	-	P	[W]
הספק היגבי של העומס	-	Q	[VA _r]
התנגדות של השנאי	-	R_{TR}	[Ω]
היגב של השנאי	-	X_{TR}	[Ω]



$$\Delta U_L = \sqrt{3} \cdot I \cdot [R_L \cdot \cos \varphi + X_L \cdot \sin \varphi]$$

$$\Delta U_L = \frac{P \cdot R_L + Q \cdot X_L}{U_n}$$

$$\Delta U_{TR} = \sqrt{3} \cdot I \cdot [R_{TR} \cdot \cos \varphi + X_{TR} \cdot \sin \varphi]$$

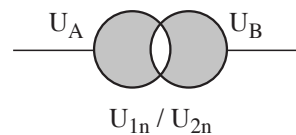
$$\Delta U_{TR} = \frac{P \cdot R_{TR} + Q \cdot X_{TR}}{U_{2n}}$$

$$R_{TR} = \Delta P_{CU} \cdot \frac{U_{2n}^2}{S_{TR}^2}$$

$$R_{TR} = \frac{U_{a\%} \cdot U_{2n}^2}{100 \cdot S_{TR}}$$

$$X_{TR} = \frac{U_{r\%} \cdot U_{2n}^2}{100 \cdot S_{TR}}$$

מתח U_B משוקף לצד הראשוני של השנאי	-	U_B'	[V]
--------------------------------------	---	--------	-----



$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{U_{1n} - X}{U_{2n}}$$

$$U_B' = U_B \cdot \left(\frac{U_{1n}}{U_{2n}} \right)$$

$$X = |U_B' - U_A|$$

$$X\% = \frac{X}{U_{1n}} \cdot 100$$

$$n = \frac{X\%}{a\%}$$

גודל הקטנת המתח בצד הראשוני של השנאי	-	X	[V]
שינוי הקטנה (באחוזים)	-	$X\%$	
מספר דרגות	-	n	
שיעור ויסות המתח בין דרגה לדרגה (באחוזים)	-	$a\%$	

4. שיקולים טכנו-כלכליים בתכנון רשת חשמלית

4.1 צפיפות זרם כלכלית

שטח חתך מומלץ	-	A	$[mm^2]$
זרם מרבי	-	I_{max}	$[A]$
צפיפות זרם כלכלית	-	j	$\left[\frac{A}{mm^2}\right]$
הספק ממשי מרבי	-	P_{max}	$[W]$
מתח נקוב	-	U_n	$[kV]$
אנרגייה ממשיית שנתית	-	$W_{a(שנתי)}$	$[kWh]$
הספק ממשי רגעי בקטע n	-	P_n	$[kW]$
הפרש זמנים בין קטעים	-	ΔT_n	$[h]$
אנרגייה כללית שנתית	-	$W_T(שנתי)$	$[kVAh]$
הספק ממשי ממוצע	-	P_{av}	$[kW]$
סה"כ שעות בשנה	-	8760	
אנרגייה היגבית שנתית	-	$W_{r1}(שנתי)$	$[kVArh]$
הספק היגבי רגעי בקטע n	-	Q_n	$[kVAr]$
הספק היגבי ממוצע	-	Q_{av}	$[kVAr]$
הספק היגבי מרבי	-	Q_{max}	$[kVAr]$
זמן שימוש בהספק מרבי	-	$T_v(שנתי)$	$[h]$
מתח מומלץ	-	U	$[kV]$
אורך הקו	-	L	$[km]$
הפסדי הספק (באחוזים)	-	$\Delta P\%$	
הפסדי הספק	-	ΔP	$[W]$

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

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

$$W_{a(שנתי)} = \sum_{n=1}^{n=N} (P_n \cdot \Delta T_n)$$

$$W_{r(שנתי)} = \sum_{n=1}^{n=N} (Q_n \cdot \Delta T_n)$$

$$W_{T(שנתי)} = \sqrt{W_a^2 + W_r^2}$$

$$P_{av(שנתי)} = \frac{W_{a(שנתי)}}{8760}$$

$$Q_{av(שנתי)} = \frac{W_{r(שנתי)}}{8760}$$

$$T_{v(שנתי)} = \frac{\sum_{n=1}^{n=N} W_{a(שנתי)}}{P_{max}} = \frac{\sum_{n=1}^{n=N} (P_n \cdot \Delta T_n)}{P_{max}} = \frac{P_{av}}{P_{max}} \cdot 8760$$

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

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

$$\Delta P_{\%} = \frac{\Delta P}{P_{max}} \cdot 100$$

4.2 חישוב כלכלי של שטח חתך מומלץ

עלות השקעה לשנה בבניית רשת החשמל	-	C_1	[ש"ח]
חלק ההשקעה התלוי בשטח חתך של המוליכים	-	a	$\left[\frac{\text{ש"ח}}{\text{km} \cdot \text{mm}^2} \right]$
שטח חתך של המוליכים	-	A	$[\text{mm}^2]$
חלק ההשקעה שאינו תלוי בשטח חתך של המוליכים	-	b	$\left[\frac{\text{ש"ח}}{\text{km}} \right]$
אורך הקו	-	L	$[\text{km}]$
ריבית ופחת שנתיים	-	p	$\left[\frac{\%}{100} \right]$
עלות הפסדי אנרגייה שנתית במוליכי הקו	-	C_2	[ש"ח]
זרם מרבי של העומס	-	$I_{\max}$	$[\text{A}]$
מוליכות סגולית של מוליכים	-	γ	$\left[\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} \right]$
זמן הפסדים מרביים ברשת	-	T_S	$[\text{h}]$
מחיר אנרגייה חשמלית	-	c	$\left[\frac{\text{ש"ח}}{\text{kWh}} \right]$
הפסדי אנרגייה חשמלית בקו במשך שנה	-	ΔW	$[\text{kWh}]$
הפסדי הספק לפני השינוי	-	ΔP_1	$[\text{kW}]$
הפסדי הספק לאחר השינוי	-	ΔP_2	$[\text{kW}]$
עלות השקעה חד-פעמית להקטנת הפסדי האנרגייה	-	C_3	[ש"ח]
מספר שנים להחזרת ההשקעה	-	n	

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

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

$$T_S = \frac{\sum_{n=1}^{n=N} (I^2 \cdot t)}{I_{\max}^2} = \frac{\sum_{n=1}^{n=N} (S^2 \cdot t)}{S_{\max}^2}$$

לפי חוק קלווין:

$$C_1 = C_2$$

בתנאי ש-b זניח:

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

$$\Delta W = \sum_{n=1}^{n=N} \Delta P \cdot t = 3 \cdot R_L \cdot \sum_{n=1}^{n=N} I^2 \cdot t$$

$$(\Delta P_1 - \Delta P_2) \cdot T_S \cdot c \cdot n = C_3 (1 + p \cdot n)$$

5. חישוב ותכנון רשתות חלוקה

5.1 חישוב מפל מתח והפסדי הספק ברשת תלת-מופעית

מפל מתח מרבי	-	ΔU	[V]
מפל מתח מרבי ממשי	-	ΔU_a	[V]
מפל מתח מרבי היגבי	-	ΔU_r	[V]
זרם ממשי בקטע n	-	$I_{a(n)}$	[A]
זרם היגבי בקטע n	-	$I_{r(n)}$	[A]
התנגדות הקו	-	R_L	[Ω]
היגב הקו	-	X_L	[Ω]
מוליכות סגולית של מוליכים	-	γ	$\left[\frac{m}{\Omega \cdot mm^2} \right]$
שטח חתך של מוליכים	-	A	[mm ²]
אורך של קטע n	-	L_n	[m]
היגב הקו ליחידת אורך	-	X_0	$\left[\frac{\Omega}{km} \right]$
הפסדי הספק מרביים	-	ΔP	[W]
גודל הזרם בקטע n	-	$I_{(n)}$	[A]
זווית בין מתח לזרם בקטע n	-	φ_n	

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

$$\Delta U_a = \sqrt{3} \cdot I_{a(n)} \cdot R_L$$

$$\Delta U_r = \sqrt{3} \cdot I_{r(n)} \cdot X_L$$

$$I_n = \sqrt{I_{a(n)}^2 + I_{r(n)}^2}$$

כאשר שטח חתך אחיד:

$$\Delta U_a = \frac{\sqrt{3}}{\gamma \cdot A} \cdot \sum_{n=1}^{n=N} (I_{a(n)} \cdot L_n)$$

$$\Delta U_r = \sqrt{3} \cdot X_0 \cdot \sum_{n=1}^{n=N} (I_{r(n)} \cdot L_n)$$

$$\Delta P = \frac{3}{\gamma \cdot A} \cdot \sum_{n=1}^{n=N} I_n^2 \cdot L_n$$

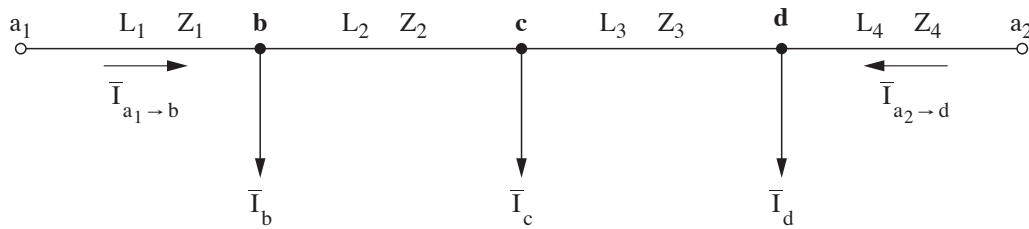
כאשר שטח חתך בלתי אחיד:

$$\Delta U_a = \frac{\sqrt{3}}{\gamma} \cdot \left(\frac{I_{a(n)} \cdot L_n}{A_n} \right)$$

$$\Delta P = \frac{3}{\gamma} \cdot \sum_{n=1}^{n=N} \left(\frac{I_n^2 \cdot L_n}{A_n} \right)$$

$$\bar{I}_n = I_{a(n)} \pm jI_{r(n)} = I_n = \angle \pm \varphi_n$$

5.2 רשת תלת-מופעית בעלת זינה משני כיוונים במתחים זהים



כאשר שטח חתך של מוליכי הרשת אחיד:

$$\bar{I}_{a_1 \rightarrow b} = \frac{\bar{I}_b \cdot L_{b \rightarrow a_2} + \bar{I}_c \cdot L_{c \rightarrow a_2} + \bar{I}_d \cdot L_{d \rightarrow a_2}}{L_T}$$

$$\bar{I}_{a_2 \rightarrow d} = \frac{\bar{I}_d \cdot L_{d \rightarrow a_1} + \bar{I}_c \cdot L_{c \rightarrow a_1} + \bar{I}_b \cdot L_{b \rightarrow a_1}}{L_T}$$

הערות:

- * כאשר מוליכי הרשת עשויים מאותו חומר, ושטח החתך שלהם **אינו אחיד** ונתון בתרגיל היגב של הקו (X_0), יש להשתמש בעכבות (Z) במקום אורכים (L) בנוסחאות לחישוב הזרמים בקטעים.
- * כאשר מוליכי הרשת עשויים מאותו חומר, ושטח החתך שלהם **אינו אחיד** והיגב של הקו (X_0) זניח, יש להשתמש בהתנגדויות (R) במקום אורכים (L) בנוסחאות לחישוב הזרמים בקטעים.

5.3 רשת תלת-מופעית בעלת זינה משני כיוונים במתחים שונים בעלי מופעים זהים

הזרם המשלים:

$$\begin{array}{cc} \begin{array}{c} \xrightarrow{\text{משלים } \bar{I}} \\ a_1 \text{ } U_1 \quad \quad \quad a_2 \text{ } U_2 \end{array} & \begin{array}{c} \xleftarrow{\text{משלים } \bar{I}} \\ a_1 \text{ } U_1 \quad \quad \quad a_2 \text{ } U_2 \end{array} \\ (U_1 > U_2: \text{כאשר:}) \quad \bar{I}_{\text{משלים}} = \frac{U_1 - U_2}{\sqrt{3} \cdot Z_T} & (U_2 > U_1: \text{כאשר:}) \quad \bar{I}_{\text{משלים}} = \frac{U_2 - U_1}{\sqrt{3} \cdot Z_T} \end{array}$$

עכבה כללית של הקו	-	$Z_T [\Omega]$	* כאשר היגב של קו (X_0) זניח, בחישוב זרם משלים $\bar{I}$ ניתן להציב התנגדות כללית R_T במקום עכבה כללית Z_T .
התנגדות כללית של הקו	-	$R_T [\Omega]$	
היגב כללי של הקו	-	$X_T [\Omega]$	* כאשר שטח חתך אינו אחיד, נחשב התנגדות R עבור כל קטע ולאחר מכן נסכם את כל ההתנגדויות.
אורך כללי של הקו	-	$L_T [\Omega]$	
מוליכות סגולית של מוליכים	-	$\gamma \left[\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} \right]$	* בהתאם לשרטוט 5.2 בדף 11 שבדף נוסחאון.
שטח חתך של מוליכים	-	$A [\text{mm}^2]$	
היגב הקו ליחידת אורך	-	$X_0 \left[\frac{\Omega}{\text{km}} \right]$	

$$Z_T = R_T + jX_T$$

$$R_T = \frac{L_T}{\gamma \cdot A}$$

$$X_T = X_0 \cdot L_T$$

זרם אמיתי:

$$\begin{array}{cc} (U_1 > U_2: \text{כאשר:}) & (U_2 > U_1: \text{כאשר:}) \\ \bar{I}_{a_1 \rightarrow b}^* = \bar{I}_{a_1 \rightarrow b} + \bar{I}_{\text{משלים}} & \bar{I}_{a_1 \rightarrow b}^* = \bar{I}_{a_1 \rightarrow b} - \bar{I}_{\text{משלים}} \\ \bar{I}_{a_2 \rightarrow d}^* = \bar{I}_{a_2 \rightarrow d} - \bar{I}_{\text{משלים}} & \bar{I}_{a_2 \rightarrow d}^* = \bar{I}_{a_2 \rightarrow d} + \bar{I}_{\text{משלים}} \end{array}$$

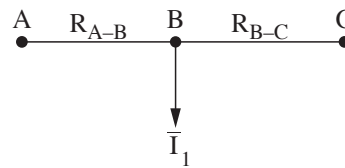
5.4 צפיפות זרם אחידה

צפיפות זרם אחידה	-	j	$\left[\frac{A}{mm^2} \right]$
גודל הזרם בקטע n	-	$I_{(n)}$	[A]
שטח חתך בקטע n	-	$A_{(n)}$	$[mm^2]$
מוליכות סגולית של מוליכים	-	γ	$\left[\frac{m}{\Omega \cdot mm^2} \right]$
מפל מתח מרבי ממשי	-	ΔU_a	[V]
אורך בקטע n	-	$L_{(n)}$	[m]
זווית בין המתח לזרם בקטע n	-	$\varphi_{(n)}$	

$$j = \frac{I_{(n)}}{A}$$

$$j = \frac{\gamma \cdot \Delta U_a}{\sqrt{3} \cdot \sum_{n=1}^{n=N} L_{(n)} \cdot \cos \varphi_{(n)}}$$

5.5 פירוק זרמים והעברתם לנקודות שונות



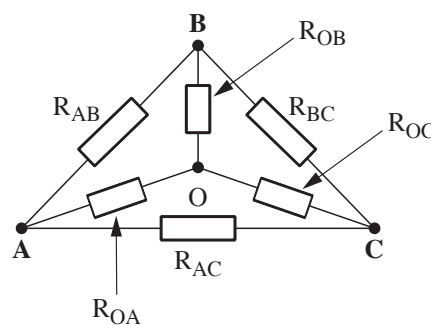
הערה:

כאשר שטח חתך של מוליכי הרשת אחיד, ניתן להשתמש באורכים (L) במקום התנגדות (R) בנוסחאות אלו.

$$I_{1 \rightarrow A} = \bar{I}_1 \cdot \frac{R_{BC}}{R_{A-B} + R_{BC}}$$

$$I_{1 \rightarrow C} = \bar{I}_1 \cdot \frac{R_{A-B}}{R_{AB} + R_{BC}}$$

הפיכת משולש לכוכב:



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

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

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

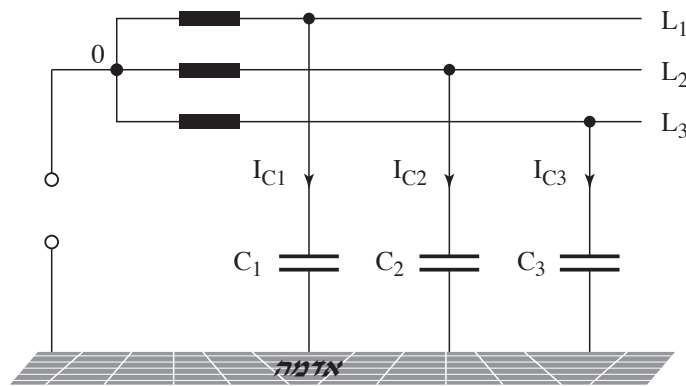
6. שיטות לחיבור של נקודת כוכב (האפס) ברשת חשמל

6.1 נקודת האפס מבודדת מהאדמה

6.1.1 מצב תקין

$|\bar{U}_1|, |\bar{U}_2|, |\bar{U}_3|$ [V]
 גודל של מתחי המופעים (פאזות) במצב תקין

$|\bar{U}_{1-2}|, |\bar{U}_{2-3}|, |\bar{U}_{3-1}|$ [V]
 גודל של מתחים שלובים בין שני מופעים (פאזות) במצב תקין



זרם קיבולי דרך
 קיבול C_1 - $\bar{I}_{C1(ph)}$ [A]

מתח מופעי (פאזי) על
 קיבול C_1 - $\bar{U}_{C1(ph)}$ [U]

היגב קיבולי של מופע L_1 - X_{C1} [Ω]

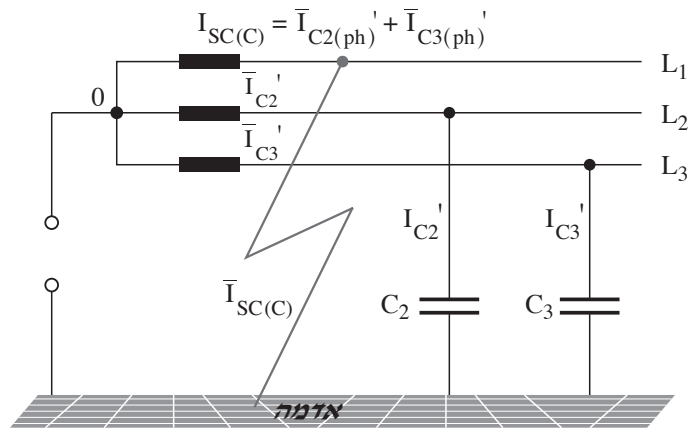
$$|\bar{U}_1| = |\bar{U}_2| = |\bar{U}_3| = U_{ph}$$

$$|\bar{U}_{1-2}| = |\bar{U}_{2-3}| = |\bar{U}_{3-1}| = \sqrt{3} \cdot U_{ph}$$

$$\bar{I}_{C1(ph)} = \frac{\bar{U}_{C1(ph)}}{-jX_{C1}}$$

6.1.2 מצב תקלה – (דוגמה לקצר חד-מופעי בין מופע L_1 לאדמה)

- גודל המתח במופע המקוצר – $|\bar{U}'_1| [V]$
- גודל של מתחי המופעים התקינים כלפי האדמה – $|\bar{U}'_2|, |\bar{U}'_3| [V]$
- זרמים קיבוליים במופעים תקינים לאחר קצר חד-מופעי לאדמה – $I'_{C2(ph)} = I'_{C3(ph)} [A]$
- זרם קצר קיבולי חד-מופעי לאדמה – $\bar{I}_{sc} [A]$
- זרם מופעי קיבולי לפני התרחשות קצר חד-מופעי לאדמה – $I_{C(ph)} [A]$



$$|\bar{U}'_1| = 0V$$

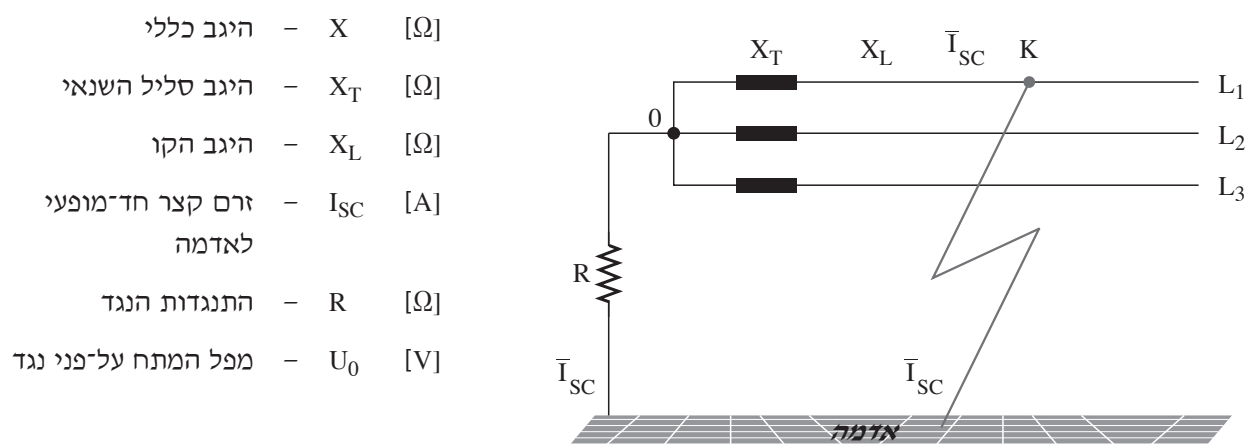
$$|\bar{U}'_2| = |\bar{U}'_3| = |\bar{U}'_{2-3}| = \sqrt{3} \cdot U_{ph}$$

$$I'_{C2(ph)} = I'_{C3(ph)} = \sqrt{3} \cdot I_{C(ph)}$$

$$\bar{I}_{sc(c)} = \bar{I}'_{C2(ph)} + \bar{I}'_{C3(ph)}$$

$$I_{sc(c)} = 3 \cdot I_{C(ph)}$$

6.2.1 מצב תקלה – (דוגמה לקצר חד-מופעי בין מופע L_1 לאדמה)



$$X = X_T + X_L$$

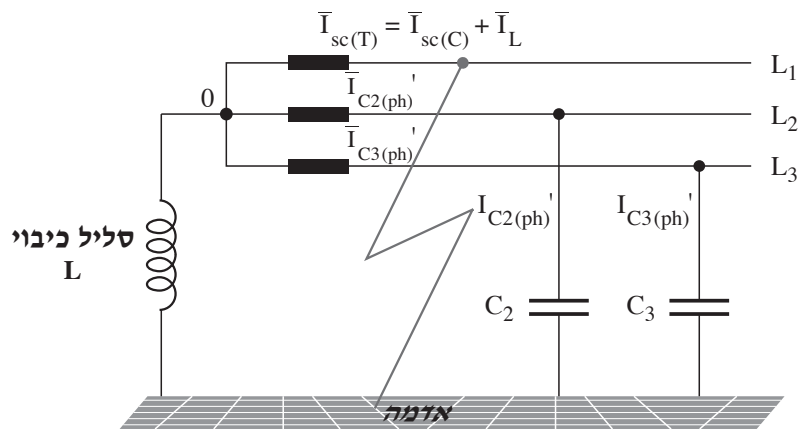
$$I_{sc} = \frac{U_{ph}}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$

$$U_0 = U_R = I_{sc} \cdot R$$

6.3 נקודת אפס מוארקת דרך סליל כיבוי (סליל פטרסון)

6.3.1 מצב תקלה - (דוגמה לקצר חד-מופעי בין מופע L_1 לאדמה)

- גודל המתח במופע המקוצר - $|\bar{U}'_1|$ [V]
- גודל של מתחי המופעים התקינים כלפי האדמה - $|\bar{U}'_2|, |\bar{U}'_3|$ [V]
- זרמים קיבוליים במופעים תקינים לאחר קצר חד-מופעי לאדמה - $I'_{C2(ph)}, I'_{C3(ph)}$ [A]
- זרם קצר קיבולי חד-מופעי לאדמה - $\bar{I}_{sc(C)}$ [A]
- זרם מופעי קיבולי לפני התרחשות קצר חד-מופעי לאדמה - $I_{C(ph)}$ [A]
- זרם השראי הזורם דרך הסליל בעת התרחשות קצר חד-מופעי לאדמה - $\bar{I}_L$ [A]
- מתח מופעי על סליל כיבוי - $U_{(ph)}$ [V]
- היגב סליל כיבוי - X_L [Ω]
- זרם קצר כולל לאחר קיזוז - $\bar{I}_{sc(T)}$ [A]



$$|\bar{U}'_1| = 0V$$

$$|\bar{U}'_2| = |\bar{U}'_3| = |\bar{U}'_{2-3}| = \sqrt{3} \cdot U_{ph}$$

$$I'_{C2(ph)} = I'_{C3(ph)} = \sqrt{3} \cdot I_{C(ph)}$$

$$\bar{I}_{sc(c)} = \bar{I}'_{C2(ph)} + \bar{I}'_{C3(ph)}$$

$$I_{sc(c)} = 3 \cdot I_{C(ph)}$$

$$\bar{I}_L = \frac{U_{(ph)}}{jX_L}$$

$$\bar{I}_{sc(T)} = \bar{I}_{sc(C)} + \bar{I}_L$$

* זווית של $\bar{I}_{sc(C)}$ ו- $\bar{I}_L$ הפוכות ב- 180°

אין להעביר את הנוסחאון
לנבחן אחר

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

א. מכונה סינכרונית

1. מחולל סינכרוני

משוואת מתחים וקטורית

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

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

- E_{ph} [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

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

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

- E_{pho} [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 המתח המופעי לזרם המופעי
- ψ – הזווית בין הכא"מ המופעי לזרם המופעי
- Θ – הזווית בין הכא"מ המופעי למתח המופעי

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2. מנוע סינכרוני

משוואת מתחים וקטורית

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

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

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

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

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

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

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

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

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

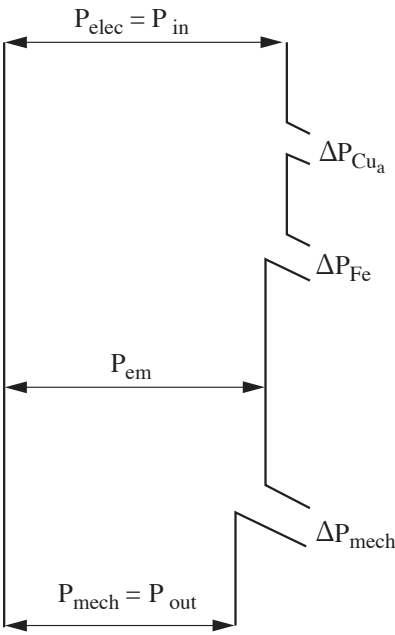
עבור עומס קיבולי $(-90^\circ \leq \varphi < 0^\circ)$:

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

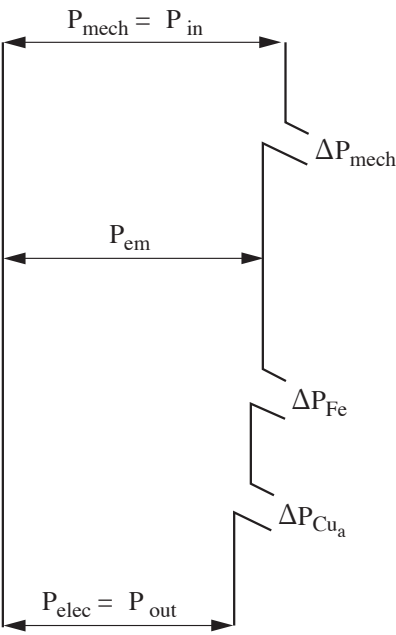
$$\tan \Psi = \frac{U_{ph} \cdot \sin \varphi + I_{ph} \cdot X_s}{U_{ph} \cdot \cos \varphi - I_{ph} \cdot R_a}$$

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

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 עיוור	-	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]

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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)

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

$$\Delta T_\infty \text{ [}^\circ\text{C]} - \text{הפרש הטמפרטורה בין גוף המנוע לסביבה בזמן } t = \infty$$

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

$$t \text{ [sec]} - \text{זמן}$$

$$\tau \text{ [sec]} - \text{קבוע זמן חימום}$$

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

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

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

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

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

$$K - \text{מקדם האיורור}$$

$$A_T \text{ [m}^2\text{]} - \text{שטח פיזור החום}$$

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

$$G \text{ [kg]} - \text{משקל}$$

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

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

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

$$P_n \text{ [W]} - \text{הספק נקוב של המנוע}$$

$$\eta - \text{נצילות המנוע}$$

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:

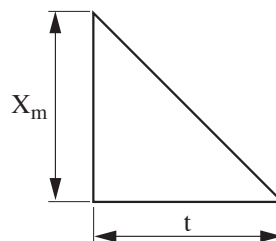
שיטת ההפסדים הממוצעים

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]	
זמן הפסקה (מנוחה) (rest)	-	t_r	[sec]	<u>שיטת הזרם השקול</u>
זמן בעומס כלשהו במצב שאינו בלימה, התנעה או הפסקה	-	t_w	[sec]	$I_{eq} = \sqrt{\frac{\sum (I_i^2 \cdot t_i)}{\beta(t_s+t_b) + \alpha \cdot t_r + \sum t_w}}$
הזרם השקול	-	I_{eq}	[A]	
זרם המנוע בקטע i	-	I_i	[A]	<u>שיטת המומנט השקול</u>

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

מציאת זרם/מומנט שקול

משולש:

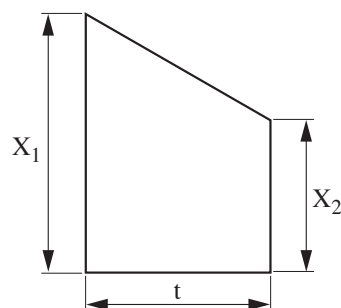


$$X_{eq} = \frac{X_m}{\sqrt{3}}$$

זרם/מומנט שקול - X_{eq}

זרם/מומנט מרבי - X_m

טרפז:



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

זרם/מומנט מרבי - X_1

זרם/מומנט מזערי - X_2

קביעת הספק מנוע בעבודה בטמפרטורת סביבה לא תקנית:

הספק העמסה מותר - P_T [W]

הספק נומינלי - P_n [W]

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

הפרש הטמפרטורה בין המנוע לסביבה בטמפרטורת 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 הזרם ישר

כוח אלקטרו-מניע:

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

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

$$z - \text{מספר המוליכים ברוטור}$$

$$p - \text{מספר זוגות הקטבים}$$

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

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

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

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

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

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

מומנטים:

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

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

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

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

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

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

$$M_{out} = \frac{P_{out}}{\omega} = 9.55 \cdot \frac{P_{out}}{n}$$

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

הספקים:

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

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

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

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

$$\eta - \text{נצילות המנוע}$$

$$M_{out} \text{ [Nm]} - \text{מומנט מופק על ציר המנוע}$$

$$P_{out} \text{ [W]} - \text{הספק מופק}$$

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

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

$$P_{out} = M_{out} \cdot \omega$$

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

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

איבודי הספק:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- R_e [Ω] - התנגדות סליל העירור המקבילי
- R_s [Ω] - התנגדות סליל העירור הטורי

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

(*) הערה:

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

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

ויסות מהירות במנוע לזרם ישר בעירור מקבילי/נפרד

מהירות סיבוב	-	n [rpm]
מהירות סיבוב בריקם אידיאלית	-	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]

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

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

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

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

בלימה של מנוע לזרם ישר בעירור מקבילי/זר

זרמים

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

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

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

בבלימה גנרטורית:

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

* המתח במעגל העירור קבוע

מומנט בלימה

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

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

זמני בלימה והתנעה

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

ד. מנוע השראה תלת-מופעי

זרמים:

זרם נומינלי קווי	-	I_{n_1}	[A]
גורם ההספק	-	$\cos \varphi$	
נצילות	-	η	
זרם נומינלי פאזי בסטטור	-	I_{nph_1}	[A]
זרם נומינלי פאזי ברוטור, המשוקף לסטטור	-	I'_{nph_2}	[A]
מתח פאזי בסטטור	-	U_{ph_1}	[V]
התנגדות סליל הסטטור	-	R_1	[Ω]
התנגדות סליל הרוטור המשוקף לסטטור	-	R'_2	[Ω]
ההיגב הכולל של סלילי המנוע	-	X_T	[Ω]
זרם נומינלי פאזי ברוטור	-	I_{ph_2}	[A]
כא"מ פאזי ברוטור נייח	-	$E_{ph_{2(0)}}$	[V]
יחס התמסורת	-	a_{ph}	
מהירות סיבוב בעומס	-	n	[rpm]
מהירות סינכרונית	-	n_s	[rpm]
גורם החליקה	-	s	
תדירות	-	f	[Hz]
מומנט קריטי	-	M_K	[Nm]
חליקה נומינלית	-	s_n	
חליקה קריטית	-	s_K	
היגב סליל הסטטור	-	X_1	[Ω]
היגב סליל הרוטור המשוקף לסטטור	-	X'_2	[Ω]

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

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

בהזנחת * זרם ריקם.

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

מהירות וגורם החליקה:

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

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

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

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

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

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

$$X_T = X_1 + X'_2$$

הספקים, איבודי הספק ומומנטים:

מומנט נומינלי	-	M_n	[Nm]
מומנט אלקטרו-מגנטי	-	M_{em}	[Nm]
מומנט קריטי	-	M_K	[Nm]
מהירות סיבוב הרוטור	-	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]

$$M_{out} = 9.55 \frac{P_{out}}{n}$$

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

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

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

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

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

$$P_{in} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_1 \cdot \cos \varphi$$

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

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

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

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

$$\frac{M'_k}{M_k} = \frac{M'_{st}}{M_{st}} = \left(\frac{U'}{U} \right)^2$$

$$X_T = X_1 + X'_2$$

הכנסת נגד נוסף לרוטור מלופף:

כאשר המנוע מועמס
 במומנט נקוב:

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

כאשר המנוע מועמס
 במומנט כלשהו (M_x) :

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

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

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

שינוי תדירות הרשת:

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

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

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

ה. תופעות מעבר

מצבי מעבר בהתנעת מנוע זרם ישר בעירור מקבילי

מהירות סיבוב בריקס	-	n_o	[rpm]	$n_o = \frac{U}{K_e \phi}$
שטף בסליל העירור	-	ϕ	[Wb]	
מתח הדקים	-	U	[V]	
קבוע זמן אלקטרומכני	-	T	[sec]	$T = \frac{GD^2}{38.2} \cdot \frac{R}{K_e K_m \phi^2}$
מקדמים	-	K_e, K_m		
מומנט תנופה	-	GD^2	[kgf · m ²]	$R = R_a + R_s$
ההתנגדות הכוללת של מעגל העוון	-	R	[Ω]	$\Delta n_L = \frac{M_L R}{K_e K_m \phi^2}$
התנגדות סליל העוון	-	R_a	[Ω]	
התנגדות המתנע במעגל העוון	-	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]	$i = I_L + (I_{st} - I_L) e^{-\frac{t}{T}}$
מומנט העומס בזמן התנעה (מומנט נגדי)	-	M_L	[kgf · m]	$M = M_L + (M_{st} - M_L) e^{-\frac{t}{T}}$

בלימה דינמית של מנוע זרם ישר בעירור מקבילי

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

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

א. ללא הפיכת קוטביות

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

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

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

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

5. כוחות ומומנטים במערכות הינע

5.1 תנועה קווית

כוח מניע	—	F	[N]
כוח דינמי	—	F _d	[N]
כוח נגדי	—	F _s	[N]

$$F = F_s + F_d$$

מסת הגוף	—	m	[kgf · sec ² / m] , [Kg]
----------	---	---	-------------------------------------

$$F_d = m \frac{dv}{dt} = ma$$

מהירות	—	v	[m / sec]
תאוצה	—	a	[m / sec ²]

5.2 תנועה סיבובית

מומנט סיבובי	—	M	[N · m]
מומנט סטטי (נגדי)	—	M _s	[N · m]
מומנט דינמי	—	M _d	[N · m]
מומנט התמדה (אינרציה)	—	J	[kgf · m · sec ²]
תאוצה זוויתית	—	$\frac{d\omega}{dt}$	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}^2} \right]$
מומנט תנופה	—	GD ²	[kgf · m ²]
מהירות סיבוב	—	n	[r.p.m]

$$M = M_s + M_d$$

$$M_d = J \frac{d\omega}{dt}$$

$$M - M_s = \frac{GD^2}{38.2} \frac{dn}{dt}$$

$$GD^2 = 4gJ$$

6. העברת מומנטיים

תנועה סיבובית

העברת מומנט סטטי:

מומנט סטטי (נגדי) של המנגנון	—	M_{sm}	$M_{sm} \text{ [kgf} \cdot \text{m]}$	$M_s = \frac{M_{sm}}{K \cdot \eta}$ מומנט על ציר מנוע
מומנט סטטי (נגדי) המועבר לציר המנוע	—	M_s	$M_s \text{ [kgf} \cdot \text{m]}$	
מהירות סיבוב ציר המנוע	—	n_M	$[r.p.m]$	$K = \frac{n_M}{n_m}$ תמסורת גלגלי השיניים
מהירות סיבוב ציר המנגנון	—	n_m	$[r.p.m]$	
נצילות התמסורת	—	η		$M_s = M_{sm} \cdot \frac{1}{K_1 K_2 \dots K_i \eta_1 \eta_2 \dots \eta_i}$ עבור תמסורת של i גלגלי שיניים

העברת מומנטי תנופה לציר המנוע:

מומנט תנופה של התמסורת	—	GD_T^2	$[kgf \cdot m^2]$	
מומנט תנופה של המנוע	—	GD_M^2	$[kgf \cdot m^2]$	$GD^2 = GD_M^2 + GD_T^2 + \sum_{i=1}^m GD_i^2 \cdot \frac{1}{k_i^2}$
מומנט תנופה של גלגל התמסורת ה- i	—	GD_i^2	$[kgf \cdot m^2]$	
או העומס הנגדי ה- i				
מהירות סיבוב ציר המנוע	—	n	$[r.p.m]$	$K_i = \frac{n}{n_i}$
מהירות סיבוב הציר המשני של התמסורת או של העומס הנגדי	—	n_i	$[r.p.m]$	$1 \text{ kgf} = 9.81 \text{ N}$

העברת מסות ומומנטים מתנועה קווית לתנועה סיבובית

העברת כוח סטטי למומנט סיבובי על ציר המנוע:

מומנט סטטי (נגדי) של המנגנון	—	M_s	$[N \cdot m]$	$M_s = 9.55 \frac{F_{sm} \cdot v}{n_m \cdot \eta}$
מומנט סטטי (נגדי) המועבר לציר המנוע	—	F_{sm}	$[N]$	
מהירות הקווית של המטען	—	v	$[m/sec]$	$v = \frac{\pi D n_m}{60}$
מהירות סיבוב של ציר המנוע	—	n_M	$[r.p.m]$	
נצילות התמסורת	—	η		
קוטר התוף	—	D	$[m]$	
מהירות סיבוב של המנגנון	—	n_m	$[r.p.m]$	

העברת מסות למומנט תנופה:

$$GD^2 = 365 \cdot G \cdot \left(\frac{v}{n_M} \right)^2 = G \cdot D^2$$

משקל הגוף	—	G	$[kgf]$
קוטר התוף	—	D	$[m]$

זמן התנעה וזמן עצירה

(בהנחה שהמומנט הדינמי ו- GD^2 קבועים)

מומנט תנופה	—	GD^2	$[kgf \cdot m^2]$	$t = \frac{GD^2}{38.2} \frac{n_2 - n_1}{M - M_s}$ בהתנעה:
מהירות סיבוב התחלתית	—	n_1	$[r.p.m]$	
מהירות סיבוב סופית	—	n_2	$[r.p.m]$	$t = \frac{GD^2}{38.2} \frac{n_1 - n_2}{M + M_s}$ בבלימה:
מומנט סיבובי	—	M	$[N \cdot m]$	
מומנט סטטי (נגדי)	—	M_s	$[N \cdot m]$	

אין להעביר את הנוסחאון
לנבחן אחר

נוסחאון באלקטרוניקה של מערכות הספק
לכיתה י"ד

(6 עמודים)

1. אותות מחזוריים

1.1 ערך ממוצע – הגדרה כללית

I_{AV} [A] – זרם ממוצע	$I_{AV} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T i(t) dt$
V_{AV} [V] – מתח ממוצע	$V_{AV} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T v(t) dt$
P_{AV} [W] – הספק ממוצע	$P_{AV} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p(t) dt$
T [sec] – זמן מחזור	

1.2 ערך ממוצע של אותות סינוסואידליים

φ_I [rad]/[°] – זווית המופע של הזרם	$I_{AV} = 0$
φ_V [rad]/[°] – זווית המופע של המתח	$V_{AV} = 0$
$P = P_{AV}$ [W] – הספק ממוצע (הספק פעיל)	$P = P_{AV} = \frac{V_m \cdot I_m}{2} \cdot \cos(\varphi_V - \varphi_I)$ $P = V \cdot I \cdot \cos(\varphi_V - \varphi_I)$

1.3 ערך ממוצע של אות מלבני

D – מחזור פעולה	$T = t_{on} + t_{off}$
t_{on} [sec] – זמן הולכה	$D = \frac{t_{on}}{T}$
t_{off} [sec] – זמן פוגה	$I_{AV} = D \cdot I_m$ $V_{AV} = D \cdot V_m$

1.4. ערך יעיל – הגדרה כללית

הערך היעיל של הזרם – $I_{\text{RMS}} = I_{\text{eff}} = I$ [A]

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

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

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

1.5. ערך יעיל – של אות סינוסואידלי

הערך המרבי של הזרם – I_m [A]

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

הערך המרבי של המתח – V_m [V]

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

1.6. ערך יעיל – של אות מלבני

מחזור פעולה (Duty Cycle) – D

$$T = t_{\text{on}} + t_{\text{off}}$$

זמן הולכה – t_{on} [sec]

$$D = \frac{t_{\text{on}}}{T}$$

זמן פוגה – t_{off} [sec]

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

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

1.7. גורם צורה של אות מחזורי – F.F (Form Factor)

גורם צורה של אות מחזורי – $F.F$

$$F.F = \frac{V_{\text{RMS}}}{V_{\text{AV}}}$$

$$F.F = \frac{I_{\text{RMS}}}{I_{\text{AV}}}$$

1.8. יחס האדווה של אות מחזורי – R.F (Ripple Factor)

$$V_{\text{acRMS}}^2 = V_{\text{RMS}}^2 - V_{\text{AV}}^2$$

יחס האדווה של אות מחזורי – $R.F$

$$R.F = \frac{V_{\text{acRMS}}}{V_{\text{AV}}} = \sqrt{\left(\frac{V_{\text{RMS}}}{V_{\text{AV}}}\right)^2 - 1} = \sqrt{F.F^2 - 1}$$

$$R.F = \frac{I_{\text{acRMS}}}{I_{\text{AV}}}$$

2. משוואות מתח-זרם

2.1 משוואת מתח-זרם של קבל

$$\begin{aligned} & \text{זרם רגעי בקבל} - i_c(t) \quad [\text{A}] \\ & \text{שינוי המתח בקבל (נגזרת של המתח)} - \frac{dv_c(t)}{dt} \end{aligned}$$

$$i_C(t) = C \frac{dv_C(t)}{dt}$$

כאשר השינוי במתח הקבל הוא ליניארי:

$$\begin{aligned} & \text{מתח רגעי על הקבל} - v_c(t) \quad [\text{V}] \\ & \text{שינוי המתח על הקבל בפרק זמן } \Delta t - \Delta V_c \quad [\text{V}] \end{aligned}$$

$$I_C = C \cdot \frac{\Delta V_C}{\Delta t}$$

2.2 משוואת מתח-זרם של סליל

$$\begin{aligned} & \text{זרם רגעי בסליל} - i_L(t) \quad [\text{A}] \\ & \text{שינוי הזרם בסליל (נגזרת של המתח)} - \frac{di_L(t)}{dt} \\ & \text{מתח רגעי על הסליל} - v_L(t) \quad [\text{V}] \\ & \text{שינוי הזרם בסליל בפרק זמן } \Delta t - \Delta I_L \quad [\text{A}] \end{aligned}$$

$$v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}$$

כאשר השינוי בזרם הסליל הוא ליניארי:

$$V_L = L \cdot \frac{\Delta I_L}{\Delta t}$$

3. מיישרים חד-מופעיים

3.1 מיישר חד-מופעי דו-דרכי עם עומס התנגדותי

$$I_{RMS} = I_{eff} = I \quad [A] \quad - \quad \text{הערך היעיל של הזרם}$$

$$V_{RMS} = V_{eff} = V \quad [V] \quad - \quad \text{הערך היעיל של המתח}$$

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

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

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

$$P = \frac{V_{RMS}^2}{R} = \frac{V_m^2}{4R}$$

$$F.F = \frac{\pi}{2} = 1.571$$

$$F.F \quad - \quad \text{גורם צורה (Form Factor)}$$

$$R.F = \sqrt{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - 1} = 1.211$$

$$R.F \quad - \quad \text{יחס האדווה (Ripple Factor)}$$

3.2 מיישר חד-מופעי דו-דרכי עם עומס התנגדותי

$$I_{RMS} = I_{eff} = I \quad [A] \quad - \quad \text{הערך היעיל של הזרם}$$

$$V_{RMS} = V_{eff} = V \quad [V] \quad - \quad \text{הערך היעיל של המתח}$$

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

$$V_{AV} = \frac{2 \cdot V_m}{\pi}$$

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

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

$$F.F = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1.111$$

$$F.F \quad - \quad \text{גורם צורה (Form Factor)}$$

$$R.F = \sqrt{\left(\frac{\pi}{2\sqrt{2}}\right)^2 - 1} = 0.483$$

$$R.F \quad - \quad \text{יחס האדווה (Ripple Factor)}$$

4. בקרת הספק במעגלי זרם חילופין חד-מופעיים

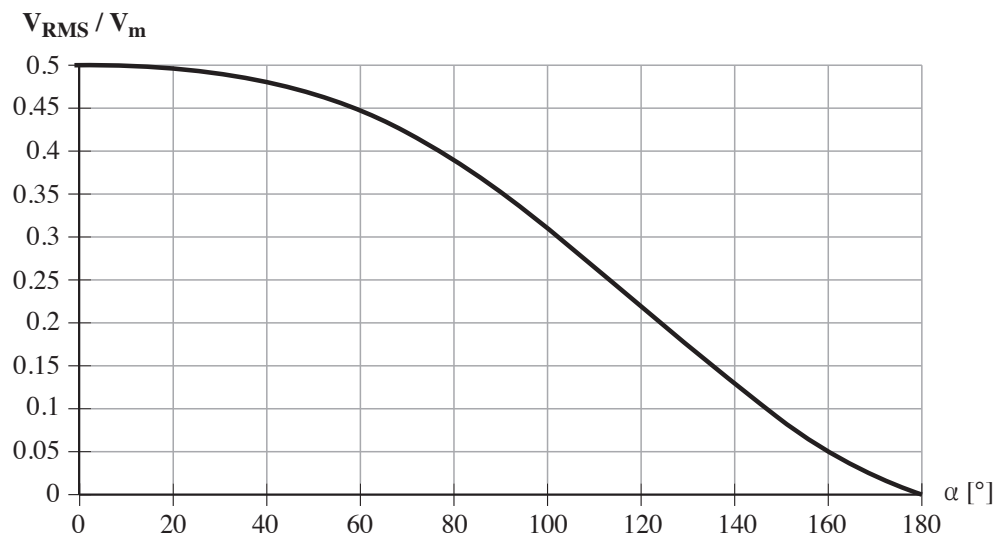
4.1 מיישר מבוקר חד-דרכי (בקרת חצי גל) בעומס אומי

זווית ההצתה $0 \leq \alpha \leq \pi$ [rad] -
הערך היעיל של המתח $V_{\text{RMS}} = V_{\text{eff}} = V$ [V] -

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

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

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



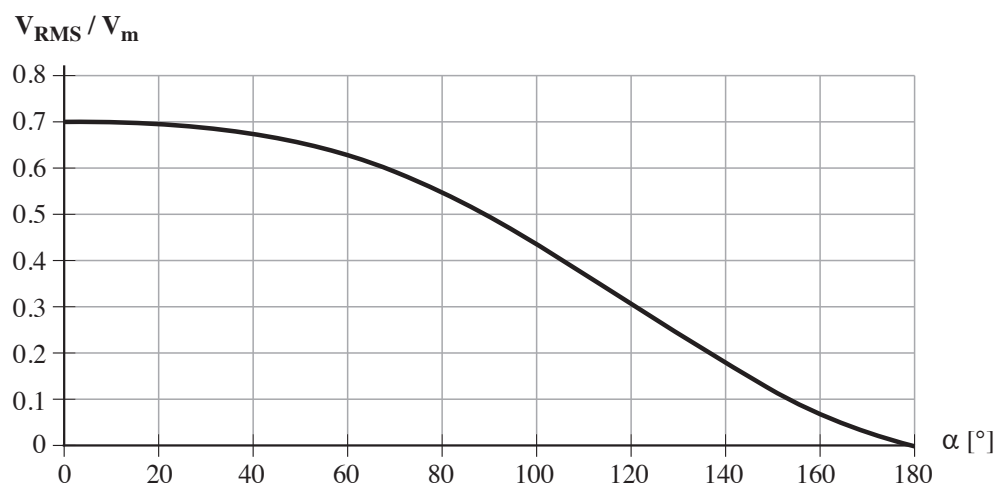
4.2 מיישר מבוקר דו-דרכי (בקרת גל שלם מיושר) בעומס אומי

זווית ההצתה $0 \leq \alpha \leq \pi$ [rad] -
הערך היעיל של המתח $V_{\text{RMS}} = V_{\text{eff}} = V$ [V] -

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

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

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



5. ממירים ממותגים

5.1 ממיר מוריד מתח אידיאלי (STEP-DOWN (BUCK

מחזור פעולה (Duty Cycle)	-	D	$T = \frac{1}{f}$
מתח מוצא ממוצע	-	V_o [V]	$V_o = D \cdot V_{in}$
מתח מבוא	-	V_{in} [V]	
זרם מוצא ממוצע	-	I_o [A]	$I_o = \frac{I_{in}}{D}$
זרם מבוא ממוצע	-	I_{in} [A]	
שינוי הזרם בסליל	-	ΔI_L [A]	$\Delta I_L = \frac{(V_{in} - V_o) \cdot D \cdot T}{L}$
אדוות (גליות) המתח במוצא	-	ΔV_o [V]	$\Delta I_{L_{max}} = 2 \cdot I_o$ $\Delta V_o = \frac{(1-D) \cdot T^2}{8 \cdot L \cdot C} \cdot V_o$

5.2 ממיר מעלה מתח אידיאלי (STEP-UP (BOOST

מחזור פעולה (Duty Cycle)	-	D	$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_o}$
מתח מוצא ממוצע	-	V_o [V]	
מתח מבוא	-	V_{in} [V]	$V_o = \frac{V_{in}}{1-D}$
זרם מוצא ממוצע	-	I_o [A]	$I_o = (1-D) \cdot I_{in}$
זרם מבוא ממוצע	-	I_{in} [A]	
שינוי הזרם בסליל	-	ΔI_L [A]	$I_L = I_{in}$ $\Delta I_L = \frac{V_{in} \cdot D \cdot T}{L}$
אדוות (גליות) המתח במוצא	-	ΔV_o [V]	$\Delta I_{L_{max}} = 2 \cdot I_{in}$

5.3 ממיר FLYBACK

מחזור פעולה (Duty Cycle)	-	D	$n = \frac{N_2}{N_1}$
יחס הליפופים	-	n	
מספר הליפופים בסליל הראשוני	-	N_1	$V_o = n \cdot \frac{D}{1-D} \cdot V_{in}$
מספר הליפופים בסליל השניוני	-	N_2	
מתח מוצא ממוצע	-	V_o [V]	
מתח מבוא	-	V_{in} [V]	

נספח ד': מילון מונחים

לשאלון 733913, אביב תשפ"ו

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