

סוג הבחינה: גמר לבתי-ספר לטכנאים ולהנדסאים

מועד הבחינה: אביב תשפ"ב, 2022

סמל השאלון: 733913

נספחים: א. מילון מונחים

ב. נוסחאון במערכות הספק לכיתה י"ד

ג. נוסחאון במכונות חשמל והינע

לכיתה י"ד

ד. נוסחאון באלקטרוניקה של מערכות

הספק לכיתה י"ד

מערכות הספק ומכונות חשמל והינע ה'

למתמחים במערכות הספק פיקוד ובקרה במגמת הנדסת חשמל בקרה ואנרגיה

(כיתה י"ד)

הוראות לנבחן

א. משך הבחינה: ארבע שעות.

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

ג. חומר עזר מותר בשימוש: מחשבון

1. מותר להשתמש בכל 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 מֶרֶב הנקודות מותנית בהשלמת כל המהלכים שלהלן, בסדר שבו הם רשומים:

* כתיבת הנוסחה המתאימה.

* הצבה של כל הערכים ביחידות המתאימות.

* חישוב (אפשר באמצעות מחשבון).

* כתיבת התוצאה המתקבלת, יחד עם יחידות המידה המתאימות.

* ליווי הפתרון החישובי בהסבר קצר.

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

9. צרפו את שלושת דפי ה-A4 למחברת הבחינה. בשאלון זה 9 עמודים ו-51 עמודי נספחים.

השאלות

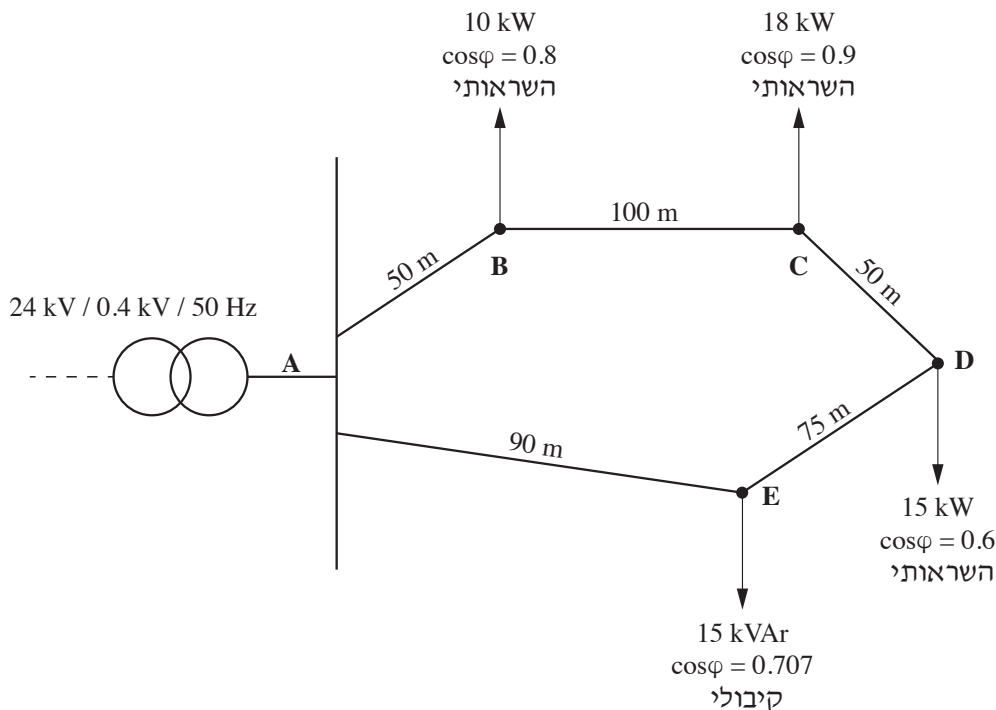
ענו על ארבע מבין השאלות 1-9. עליכם לענות על שאלה אחת לפחות מן הפרק הראשון ועל שאלה אחת לפחות מן הפרק השני.

פרק ראשון: מערכות הספק ב'

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

שאלה 1

באיור לשאלה 1 מתוארת רשת תלת-מופעית המוזנת במתח של $400 \text{ V} / 50 \text{ Hz}$, ומוזינה עומסים תלת-מופעיים. מוליכי הרשת עשויים אלומיניום $\gamma = 35 \left[\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} \right]$ וההיגב ההשראותי שלהם ליחידת אורך הוא $X_o = 0.4 \cdot \frac{\Omega}{\text{km}}$.



איור לשאלה 1

א. (10 נק') חשבו את עוצמת הזרם בכל אחד ממקטעי הרשת (EA, DE, CD, BC, AB).

ב. (5 נק') חשבו את עוצמת הזרם בצד המתח הגבוה של השנאי (24 kV).

ג. (8 נק')

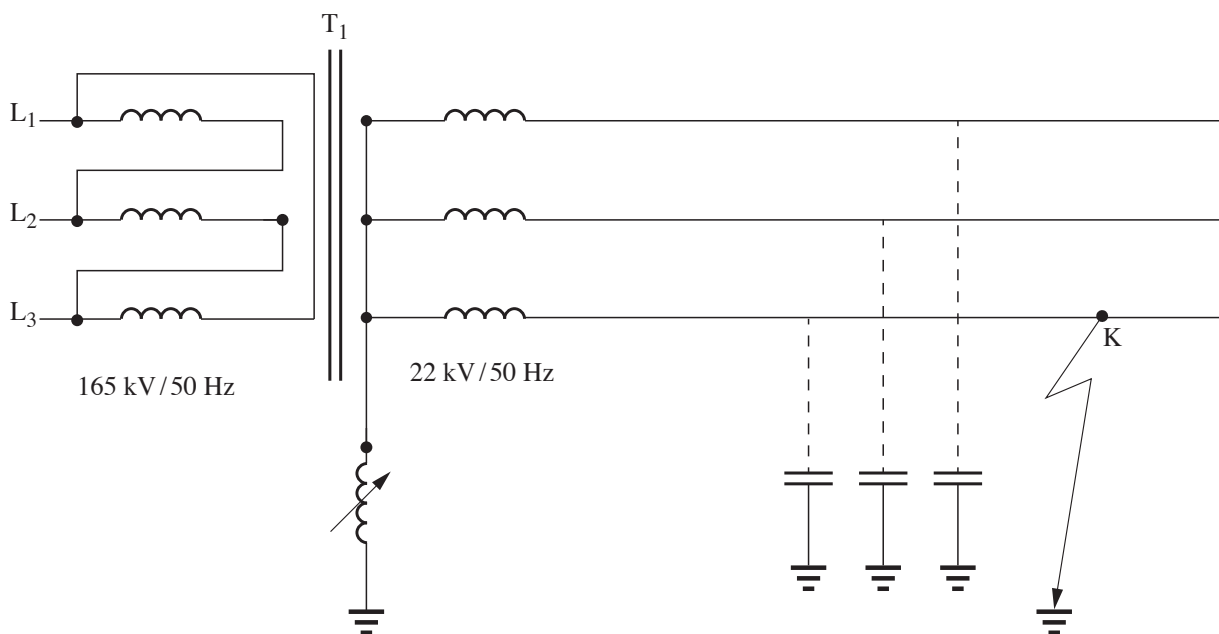
1. חשבו את שטח החתך האחיד של מוליכי הרשת אם מפל המתח המרבי המותר ברשת הוא 5% . (4 נק')

2. קבעו את שטח החתך התקני (המסחרי) של מוליכי הרשת. (4 נק')

ד. (2 נק') מוסיפים לרשת צרכן המוזן ישירות מפס צבירה A. האם הוספת הצרכן תגרום לשינוי בשטח החתך של מוליכי הרשת שחישבתם בתשובה לסעיף ג'? נמקו את התשובה.

שאלה 2

באיור לשאלה 2 מתוארת רשת מתח גבוה 22 kV / 50 Hz המוארקת באמצעות סליל כיבוי.



איור לשאלה 2

א. (12 נק') בנקודה K מתרחש קצר חד-מופעי לאדמה, ובסליל הכיבוי נמדד זרם של 20 A . הקיבוליות הסגולית של הקווים היא $C_o = 0.012 \frac{\mu F}{km}$, וסליל הכיבוי מכויל לקיזוז יתר של 10% . חשבו את האורך הכולל של הרשת.

ב. (8 נק') ציינו איזו הגנה מתאימה לתקלה המתוארת בסעיף א'.

ג. (5 נק') ציינו שני יתרונות שיש למערכת בעלת נקודת אפס המוארקת דרך סליל כיבוי.

שאלה 3

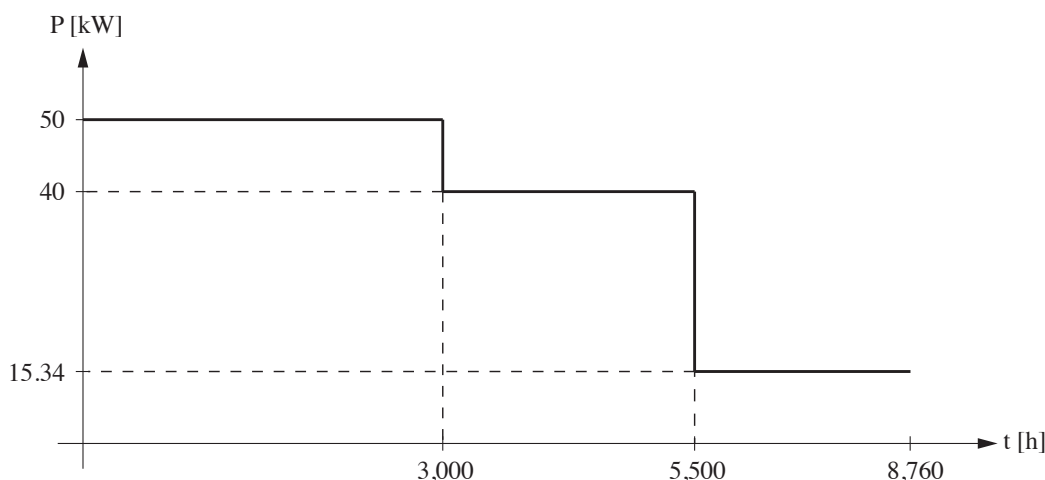
באיור לשאלה 3 נתון עקום העמסה שנתי של מפעל המוזן על-ידי תחנת משנה (תחמ"ש). מונה החשמל של המפעל ממוקם במרחק של 800 מטרים מלוח החשמל.

נתונים:

קו ההזנה בין מונה החשמל ללוח הראשי עשוי ממוליכי חמרן (אלומיניום) $\gamma = 35 \left[\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} \right]$.

מקדם ההספק של המפעל הוא 1.

המחיר של האנרגייה החשמלית הוא $35 \frac{\text{אג}}{\text{kWh}}$.



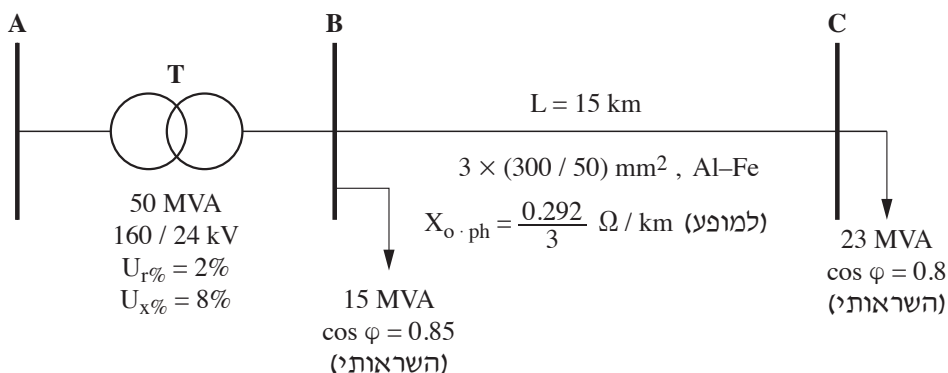
איור לשאלה 3

- א. (10 נק') חשבו את זמן השימוש בהספק המרבי.
- ב. (10 נק') עלות צריכת האנרגייה במפעל היא 105,000 ש"ח לשנה, וההפסדים על קו הזינה מהווים 3% מההספק הפעיל. בהתחשב בהספק המרבי וזמן מעבר ההספק המרבי, חשבו את ההפסדים בקו הזינה ואת שטח החתך של המוליכים בקו.
- ג. (5 נק') מעוניינים לצמצם את הפסדי ההספק בקו על-ידי החלפה של מוליכי האלומיניום במוליכי נחושת $\gamma = 57 \left[\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} \right]$. שטח החתך של מוליכי הנחושת יהיה זהה לזה של מוליכי האלומיניום, כפי שחישבתם בתשובה לסעיף ב' לשאלה. עלות ההשקעה בהחלפת המוליכים היא 7,000 ש"ח. הזניחו את עלויות הריבית והפחת, וחשבו בתוך כמה זמן תוחזר ההשקעה.

שאלה 4

באיור לשאלה 4 נתון קו חלוקה המזין שני עומסים. קו החלוקה מוזן על-ידי שנאי בעל משנה דרגות בצד הראשוני. כל דרגה 1.5%.

הערה: ההיגב ושטח החתך הנתונים באיור הם למופע אחד.



איור לשאלה 4

א. (13 נק') חשבו את המתח בפס הצבירה B ואת המתח בפס הצבירה C כאשר השנאי **ללא משנה דרגות** ומתח המבוא לשנאי הוא 157 kV.

ב. (12 נק')

1. (6 נק') מה צריכה להיות הדרגה של משנה הדרגות, אם נדרש לקבל בפס הצבירה C מתח של 22.5 kV בקירוב?

2. (6 נק') חשבו את המתח שיתקבל בפס הצבירה B לאחר כיול משנה הדרגות על-פי הנדרש בסעיף ב'1 לשאלה.

פרק שני: המרת אנרגייה והינע ב'

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

שאלה 5

נתוניו הנקובים של מנוע השראה תלת-מופעי בעל רוטור מלופף שסלילי הסטטור שלו מחוברים בחיבור משולש הם:

$$P_n = 18.5 \text{ kW} ; U_n = 400 \text{ V} ; I_{n1} = 38 \text{ A} ; I_{n2} = 40 \text{ A} ; n_n = 1,470 \text{ rpm} ; f_1 = 50 \text{ Hz}$$

הזניחו בחישוב את הפסדי ההספק המכניים.

(10 נק') א. חשבו את התנגדות סלילי הרוטור.

(10 נק') ב. המנוע מועמס ב-85% מהמומנט הנקוב. חשבו את ערכו של הנגד שיש לחבר בטור לכל סליל ברוטור כדי להקטין את מהירות הסיבוב של המנוע ל-1,250 rpm.

(5 נק') ג. נדרש להפעיל את המנוע במהירות סיבוב של 1,300 rpm בעומס נקוב ובגורם חליקה השווה לערך נקוב. חשבו את מתח ההזנה ואת התדירות הנדרשים לשם כך.

שאלה 6

נתוניו הנקובים של מנוע לזרם ישר בעירור מקבילי הם:

$$P_n = 12.5 \text{ kW} ; U_n = 300 \text{ V} ; n_n = 1,400 \text{ rpm} ; \eta_n\% = 85\% ; R_a = 0.35 \Omega ; R_e = 120 \Omega$$

המנוע מועמס בעומס נקוב.

הזניחו בחישוב את מפל המתח על הפחמים, את תגובת העוגן ואת איבודי המומנט בריקם.

הניחו כי המנוע פועל בתחום הליניארי של עקום המגנט.

(12 נק') א. מקטינים את מתח ההזנה ב-15%.

4 נק' 1. חשבו את זרם העוגן.

4 נק' 2. חשבו את מהירות הסיבוב של המנוע.

4 נק' 3. האם אפשר להפעיל את המנוע במצב זה לאורך זמן? נמקו את התשובה.

(8 נק') ב. פעולת המנוע התייצבה. מוסיפים למעגל העירור נגד שהתנגדותו 30Ω במתח הזנה נקוב.

4 נק' 1. חשבו את זרם העוגן.

4 נק' 2. חשבו את מהירות הסיבוב של המנוע.

(5 נק') ג. המנוע מועבר לבלימה בחיבור נגדי במתח ובעומס נקובים.

3 נק' 1. חשבו את ערכו של נגד הבלימה, R_b , שיש לחבר בטור לסליל העוגן כדי להגביל את זרם

$$\text{הבלימה ההתחלתי בעוגן ל-} I_{b1} = 1.2 \cdot I_{an}.$$

2 נק' 2. חשבו את זרם הבלימה, I_{b2} , כאשר מהירות המנוע במהלך הבלימה מגיעה ל-0.

שאלה 7

נתוניו הנקובים של מנוע סינכרוני תלת-מופעי הם:

$$P_n = 20 \text{ kW} ; U_n = 400 \text{ V} ; f = 50 \text{ Hz} ; \eta = 91.5\% ; X_s = 1 \Omega$$

המנוע פועל בחלקו הליניארי של עקום המגנט. סלילי הסטטור מחוברים בחיבור כוכב והתנגדותם זניחה.

בניסוי בריקם נדרש זרם עירור של $I_{f0} = 9.5 \text{ A}$ כדי לקבל כא"מ השווה למתח הנקוב.

(15 נק') א. המנוע פועל בתנאים נקובים ובמקדם הספק 0.8 השראותי.

1. חשבו את הכא"מ המופעי המושרה. (5 נק')

2. חשבו את זווית העומס (הזווית בין המתח המופעי לבין הכא"מ המופעי). (5 נק')

3. חשבו את זרם העירור. (5 נק')

(10 נק') ב. מגדילים ב-30% את זרם העירור, שחישבתם בתשובה לסעיף א' לשאלה, כאשר המנוע פועל בנצילות נקובה ומועמס בעומס נקוב.

1. חשבו את הזרם הנצרך מהרשת. (4 נק')

2. חשבו את מקדם ההספק של המנוע. (3 נק')

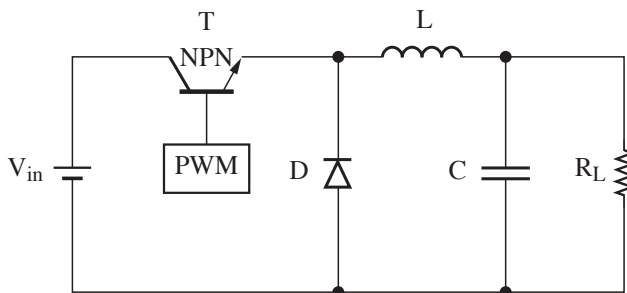
3. קבעו את אופי המנוע כעומס חשמלי. נמקו את קביעתכם. (3 נק')

פרק שלישי: אלקטרוניקה של מערכות הספק

(לכל שאלה – 25 נקודות)

שאלה 8

באיור לשאלה 8 נתון מעגל של ממיר מסוג BUCK – STEP DOWN.



איור לשאלה 8

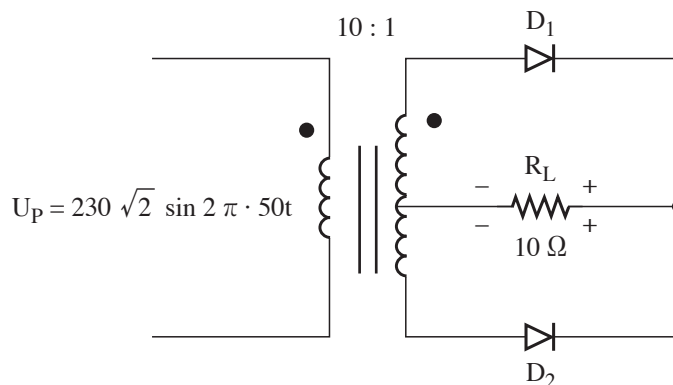
נתוני הממיר:

$$V_{in} = 10 \text{ V} ; F_{PWM} = 20 \text{ kHz} ; L = 200 \mu\text{H} ; C = 500 \mu\text{F} ; V_o = 3.3 \text{ V} ; R_L = 1.1 \Omega$$

- א. (6 נק') חשבו את מחזור הפעולה (Duty Cycle).
- ב. (6 נק') חשבו את הזרם הממוצע הזורם דרך הסליל L.
- ג. (5 נק') חשבו את הזרם המרבי הזורם בטרנזיסטור T.
- ד. (8 נק')
 1. (4 נק') חשבו את אדוות מתח המוצא, ΔV_o .
 2. (4 נק') חשבו את מתח המוצא המרבי.

שאלה 9

באיור א' לשאלה 9 מתואר מעגל חשמלי של מיישר דו־דרכי המורכב משתי דיודות ומשנאי בעל סנף אמצעי ויחס השנאה של 10:1. הסנפים זהים כך שעל כל אחד מהם נופל מתח בשיעור של מחצית מהמתח השניוני.



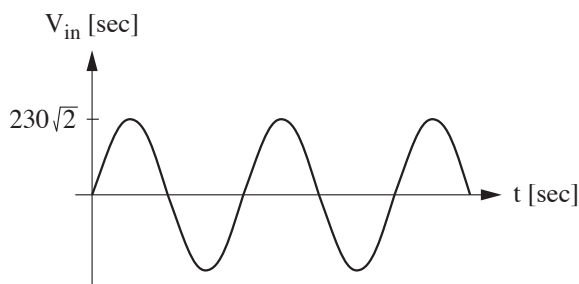
איור א' לשאלה 9

10 נק' (א).

1. חשבו את המתח הממוצע על העומס R_L . (5 נק')
2. חשבו את הזרם הממוצע הזורם בנגד העומס R_L . (5 נק')

5 נק' (ב). חשבו את ההספק המתפתח בנגד העומס R_L .

באיור ב' לשאלה 9 מתוארת צורת אות הכניסה למיישר, V_{in} , כפונקצייה של הזמן.



איור ב' לשאלה 9

5 נק' (ג). העתיקו למחברת את צורת אות הכניסה, וסרטטו מתחתיה, בהתאמה, את צורת אות מתח העומס, V_{R_L} , כפונקצייה של הזמן.

5 נק' (ד). מנתקים את הדיודה D_1 . כיצד הניתוק ישפיע על פעולת המעגל?

בהצלחה!

נספח א': מילון מונחים

לשאלון 733913, אביב תשפ"ב

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

אין להעביר את הנוסחאון
לנבחן אחר

נוסחאון במערכות הספק לכיתה י"ד (16 עמודים)

1. מפלי מתח

מתח ישר

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

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

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

מתח חילופין חד-מופעי

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

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

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

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

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

$$I_a = I \cos \varphi$$

$$I_r = I \sin \varphi$$

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

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

מתח חילופין תלת-מופעי

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

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

2. צפיפות זרם אחידה

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

$$A_k = K \cdot I_k$$

$K = \frac{2 \sum_{k=1}^{k=n} L_k}{\gamma \Delta U}$	זרם ישר
$K = \frac{2 \sum_{k=1}^{k=n} (L_k \cos \varphi_k)}{\gamma \Delta U_a}$	זרם חילופין חד-מופעי
$K = \frac{\sqrt{3} \sum_{k=1}^{k=n} (L_k \cos \varphi_k)}{\gamma \Delta U_a}$	זרם חילופין תלת-מופעי

3. מינימום חומר

זרם ישר

שטח חתך בקטע k	-	A_k	$[mm^2]$
זרם בקטע k	-	I_k	$[A]$
מוליכות סגולית של המוליכים	-	γ	$[m / \Omega mm^2]$
מפל המתח המרבי	-	ΔU	$[V]$
אורך של קטע k	-	L_k	$[m]$

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

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

זרם חילופין חד-מופעי

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

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

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

זרם חילופין תלת-מופעי

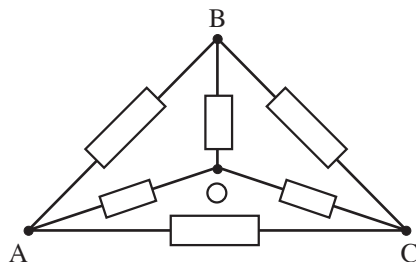
שטח חתך בקטע k	-	A_k	$[mm^2]$
זרם בקטע k	-	I_k	$[A]$
מוליכות סגולית של המוליכים	-	γ	$[m / \Omega mm^2]$
מפל המתח הממשי המרבי	-	ΔU_a	$[V]$
הזווית בין מתח לזרם בקטע k	-	φ_k	
אורך של קטע k	-	L_k	$[m]$

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

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

4. חישובים ברשתות

הפיכת משולש לכוכב



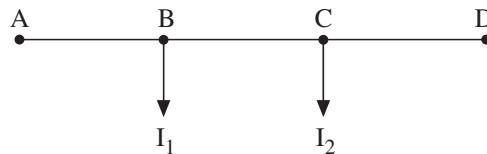
$$R_{OB} = \frac{R_{AB} \cdot R_{BC}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{AC}}$$

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

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

פירוק הזרמים והעברתם לנקודות חדשות

- 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.

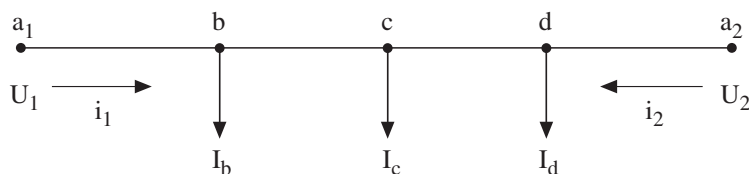
$$I_{1 \rightarrow A} = I_1 \frac{R_{BD}}{R_{AD}}$$

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

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

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

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.

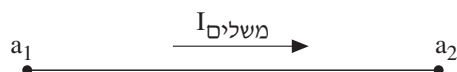
$$i_1 = \frac{I_b \cdot L_{ba_2} + I_c \cdot L_{ca_2} + I_d \cdot L_{da_2}}{L_{a_1 a_2}}$$

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

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

רשת בעלת זינה משני כיוונים במתחים שונים בעלי מופעים זהים

הזרם המשלים:



זרם ישר/זרם חילופין חד-מופעי

(כאשר: $U_1 > U_2$)

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

(כאשר: $U_1 > U_2$)

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

זרם חילופין תלת-מופעי

הזרם האמיתי:

$$I_1 = i_1 + I_{\text{משלים}}$$

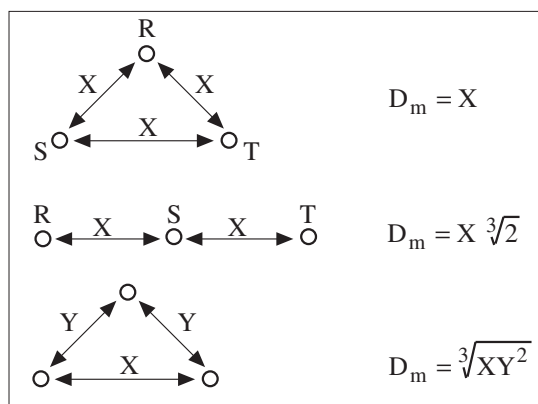
$$I_2 = i_2 - I_{\text{משלים}}$$

5. פרמטרים של קווי הספק

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

$$C_o = \frac{0.0242}{D_m \log \frac{D_m}{r}}$$

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



6. פרמטרים של שנאים

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

מוליכים מנחושת		מוליכים מאלומיניום	
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		
41	6	36	6
66	10	50	10
88	16	68	16
118	25	92	25
145	35	113	35
175	50	137	50
223	70	174	70
270	95	211	95
313	120	244	120

טמפרטורה אופפת של הסביבה: 35°C

1. מקדם תיקון עבור טמפרטורה אופפת שונה של הסביבה

טמפרטורה אופפת של הסביבה ($^{\circ}\text{C}$)									
55	50	45	40	35	30	25	20	15	10
0.80	0.85	0.90	0.95	1.00	1.04	1.09	1.13	1.17	1.21

2. מקדם תיקון עבור התקנת כבלים רב־גידיים ללא רווח ביניהם

(1) התקנה בשכבה אחת:

מספר הכבלים	2	3	4	6	9
המקדם	0.80	0.73	0.70	0.68	0.66

(2) התקנה בשכבות אחדות או במקובץ:

מספר הכבלים	2	3	4	5	6	8	10	12
המקדם	0.80	0.70	0.65	0.60	0.57	0.52	0.48	0.45

**כבלים טמונים במישרין באדמה עם כיסוי מגן – בידוד 90°C
כבל רב־גידי במעגל תלת־מופעי**

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

טמפרטורה אופפת של האדמה: 30°C

1. מקדם תיקון עבור טמפרטורה אופפת שונה של האדמה

טמפרטורה אופפת של האדמה ($^{\circ}\text{C}$)									
55	50	45	40	35	30	25	20	15	10
0.77	0.82	0.87	0.91	0.96	1.00	1.04	1.08	1.12	1.15

2. מקדם תיקון עבור התקנת כבלים אחדים באדמה

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

נוסחאון במערכות הספק לכיתה י"ד

נספח לשאלון 733913, אביב תשפ"ב

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

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

Al		Cu		D _m [cm]									קוטר	שטח חתך
I	R ₀	I	R ₀	56	100	200	300	400	500	600	700	1000		
[A]	[Ω/km]	[A]	[Ω/km]	X ₀ [Ω/km]										
—	—	70	1.786	0.368	0.403	0.446	0.472	0.490	0.504	0.515	0.525	0.547	4.1	10
92	1.805	115	1.123	0.354	0.389	0.433	0.458	0.476	0.490	0.502	0.511	0.533	5.1	16
121	1.185	151	0.738	0.341	0.376	0.420	0.445	0.463	0.477	0.488	0.498	0.520	6.3	25
149	0.845	174	0.525	0.330	0.365	0.409	0.434	0.452	0.466	0.477	0.487	0.509	7.5	35
187	0.587	234	0.364	0.319	0.354	0.397	0.423	0.441	0.455	0.466	0.476	0.498	9.0	50
226	0.435	282	0.271	0.309	0.344	0.388	0.413	0.431	0.445	0.456	0.466	0.488	10.5	70
282	0.309	357	0.192	0.298	0.333	0.377	0.402	0.420	0.434	0.445	0.455	0.477	12.5	95
329	0.245	411	0.153	0.291	0.326	0.370	0.395	0.413	0.427	0.438	0.448	0.470	14.0	120
382	0.196	477	0.122	0.283	0.319	0.362	0.387	0.405	0.419	0.431	0.440	0.463	15.8	150
435	0.158	544	0.098	0.277	0.312	0.356	0.381	0.399	0.413	0.424	0.434	0.456	17.5	185
502	0.126	630	0.078	0.270	0.305	0.349	0.374	0.392	0.406	0.417	0.427	0.449	19.6	240
513	0.118	641	0.074	0.268	0.303	0.346	0.372	0.390	0.404	0.415	0.425	0.447	20.3	240
598	0.096	747	0.060	0.261	0.297	0.340	0.365	0.383	0.397	0.409	0.418	0.441	22.5	300

חומרים		
חמרון	נחושת	
35	57	
2.7	8.9	g

המוליכות הסגולית – γ [m / Ωmm²]

המשקל הסגולי – g [g / cm³]

זרם מרבי (באמפר) בכבלים, במתח נמוך עד 1000 V
(טמפרטורת הסביבה: 20 °C)

כבלי חמרון NAYY ; NAYFGBY ; NAYCY		כבלי נחושת NYY ; NYFGBY ; NYCY		חתך (ממ"ר)
באדמה	באוויר	באדמה	באוויר	
—	—	25	20	3 × 1.5
—	—	35	28	3 × 2.5
36	29	45	36	3 × 4
48	38	60	48	3 × 6
64	51	80	64	3 × 10
88	70	110	88	3 × 16
110	88	135	110	3 × 25
130	105	165	130	3 × 35
160	130	200	160	3 × 50
195	155	245	195	3 × 70
235	190	295	235	3 × 95
270	215	340	270	3 × 120
310	250	390	310	3 × 150
355	285	445	355	3 × 185
410	330	515	410	3 × 240

7. ויסות מתח

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

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

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

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

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

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

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

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

8. מתח קורונה

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

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

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

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

עבור: $f = 50 \text{ Hz}$

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

9. נקודת האפס ברשת חשמל

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

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

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

10. צפיפות זרם כלכלית (מערכת תלת־מופעית)

המתח המומלץ	-	U	[kV]
צפיפות זרם כלכלית	-	j	[A / mm ²]
אורך הקו	-	L	[km]
הפסדי הספק מרביים	-	$\Delta P_{\%}$	
מוליכות סגולית	-	γ	[m / Ωmm ²]
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]

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

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

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

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

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

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

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

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

חישוב כלכלי של שטח החתך המומלץ:

ההשקעה לשנה בבניית רשת החשמל	-	C_1	[ש"ח]	$C_1 = (a \cdot A + b) \cdot L \cdot p$
חלק ההשקעה התלוי בשטח החתך של המוליכים	-	a	$\left[\frac{\text{ש"ח}}{\text{km} \cdot \text{mm}^2} \right]$	
שטח החתך של המוליכים	-	A	$[\text{mm}^2]$	
חלק ההשקעה שאינו תלוי בשטח החתך של המוליכים	-	b	$\left[\frac{\text{ש"ח}}{\text{km}} \right]$	
אורך הקו	-	L	$[\text{km}]$	
החזר שנתי של ההוצאות, ריבית ופחת	-	p	$\left[\frac{\%}{100} \right]$	
				$C_2 = 3 \cdot I_{\max}^2 \cdot R \cdot T_S \cdot c = 3 \cdot I_{\max}^2 \cdot \frac{\rho L}{A} \cdot T_S \cdot c$
ההוצאות לכיסוי הפסדי ההספק ברשת	-	C_2	[ש"ח]	
זרם העומס העובר בקו	-	$I_{\max}$	$[\text{A}]$	$T_S = \frac{\int_0^t I^2 dt}{I_{\max}^2} = \frac{\sum (I^2 \cdot t)}{I_{\max}^2} = \frac{\sum (S^2 \cdot t)}{S_{\max}^2}$
התנגדות המוליכים	-	R	$[\text{k}\Omega]$	
זמן ההפסדים המרביים ברשת	-	T_S	$[\text{h}]$	
מחיר האנרגייה החשמלית	-	c	$\left[\frac{\text{ש"ח}}{\text{kWh}} \right]$	
התנגדות סגולית של המוליכים	-	ρ	$\left[\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \right]$	

נוסחת קלווין:

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

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

11. הפסדי הספק והפסדי אנרגיה ברשת חשמל

הפסדי אנרגייה ברשת חשמל:

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

הפסדי אנרגייה בשנאי:

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

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:

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

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)

בהצלחה!

אין להעביר את הנוסחאון
לנבחן אחר

נוסחאון במכונות חשמל והינע לכיתה י"ד

(22 עמודים)

א. מכונה סינכרונית

1. מחולל סינכרוני

משוואות מתחים וקטוריות

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

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

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

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

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

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

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

חישוב היגב סינכרוני

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

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

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

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

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

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

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

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

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

φ - הזווית בין הזרם המופעי למתח המופעי

ψ - הזווית בין הזרם המופעי לכא"מ המופעי

Θ - הזווית בין המתח המופעי לכא"מ המופעי

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2. מנוע סינכרוני

משוואת מתחים וקטורית

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

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

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

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

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

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

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

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

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

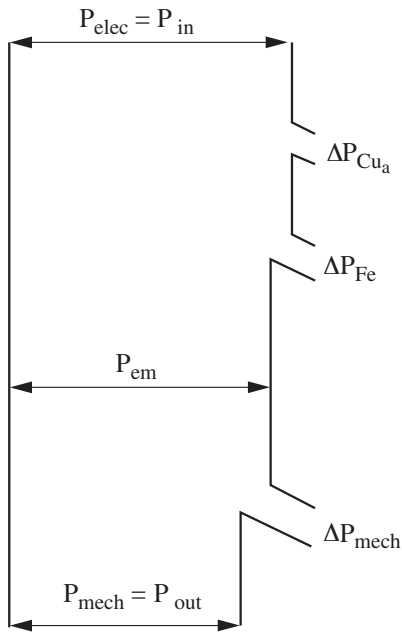
עבור עומס קיבולי ($-90^\circ \leq \varphi < 0^\circ$):

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

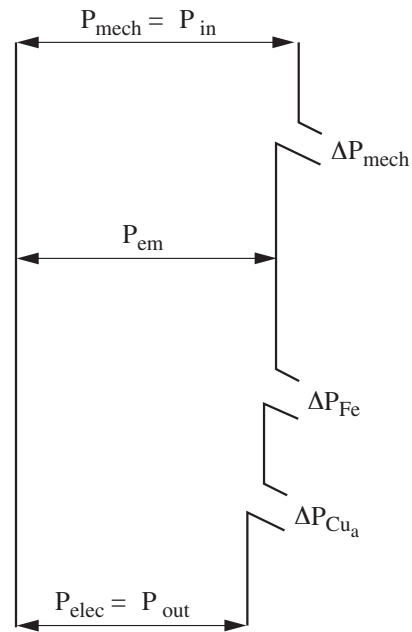
$$\tan \Psi = \frac{U_{ph} \cdot \sin \varphi + I_{ph} \cdot X_s}{U_{ph} \cdot \cos \varphi - I_{ph} \cdot R_a}$$

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

הספקים ואיבודי הספק במכונה סינכרונית:



מנוע



מחולל

הספק מכני	-	P_{mech}	[W]
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]

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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)

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

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

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

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

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

t [sec] - זמן

τ [sec] - קבוע זמן חימום

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

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

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

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

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

K - מקדם האיוורור

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

A_T [m²] - שטח פיזור החום

G [kg] - משקל

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

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

ΔP [W] - סכום הפסדי ההספק של המנוע

P_n [W] - הספק נקוב של המנוע

η - נצילות המנוע

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

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

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

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

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

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

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

בחירת הספק מנוע בעומס משתנה בעבודה ממושכת:

שיטת ההפסדים הממוצעים

הפסדי הספק ממוצעים - ΔP_{av} [W]

הפסדי הספק בקטע i - ΔP_i [W]

זמן בקטע i - t_i [sec]

זמן התנעה (start) - t_s [sec]

זמן בלימה (brake) - t_b [sec]

זמן הפסקה (מנוחה) (rest) - t_r [sec]

זמן בעומס כלשהו במצב שאינו בלימה, התנעה או הפסקה - t_w [sec]

הזרם השקול - I_{eq} [A]

זרם המנוע בקטע i - I_i [A]

מקדם הרעת תנאי קירור ובמנוחה - α

מקדם הרעת תנאי הקירור בהתנעה ובבלימה - β

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

התנאי לבחירת מנוע:

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

שיטת הזרם השקול

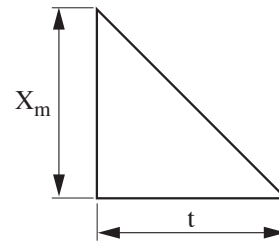
$$I_{eq} = \sqrt{\frac{\sum (I_i^2 \cdot t_i)}{\beta(t_s + t_b) + \alpha \cdot t_r + \sum t_w}}$$

שיטת המומנט השקול

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

מציאת זרם/מומנט שקול

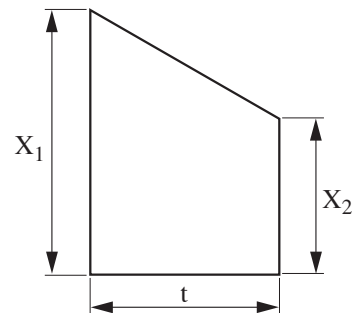
משולש:



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

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

טרפז:



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

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

קביעת הספק מנוע בעבודה בטמפרטורת סביבה לא תקנית:

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

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

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

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

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

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

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

ג. מנוע לזרם ישר

כוח אלקטרו-מניע:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

מומנטים:

מומנט אלקטרו-מגנטי	-	M_{em}	[Nm]
מומנט נומינלי	-	M_n	[Nm]
איבודי מומנט בריקס	-	ΔM_o	[Nm]
מהירות זוויתית	-	ω	$\left[\frac{rad}{sec} \right]$
מהירות סיבוב של הרוטור	-	n	[rpm]

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

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

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

הספקים:

עוצמת הזרם ברוטור	-	I_a	[A]
הספק חשמלי (מושקע)	-	P_{in}	[W]
הספק אלקטרו-מגנטי	-	P_{em}	[W]
הספק נומינלי (מופק)	-	P_n	[W]
נצילות המנוע	-	η	

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

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

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

איבודי הספק:

איבודי הספק ברוטור	-	ΔP_{Cu_a}	[W]
איבודי הספק בסליל העירור המקבילי	-	ΔP_{Cu_e}	[W]
איבודי הספק בסליל העירור הטורי	-	ΔP_{Cu_s}	[W]
איבודי הספק בברזל	-	ΔP_{Fe}	[W]
איבודי הספק מכניים	-	ΔP_{mech}	[W]
התנגדות סליל העוגן	-	R_a	$[\Omega]$
התנגדות סליל העירור המקבילי	-	R_e	$[\Omega]$
התנגדות סליל העירור הטורי	-	R_s	$[\Omega]$

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

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

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

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

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

(*) הערה:

הסימן (+) מתייחס לעירור מעורב מתוסף

הסימן (-) מתייחס לעירור מעורב מתחסר

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

ויסות מהירות במנוע לזרם ישר בעירור מקבילי/נפרד

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

הכנסת נגד טורי למעגל העירור:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

בבלימה גנרטורית:

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

* המתח במעגל העירור קבוע

מומנט בלימה

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

זמני בלימה והתנעה

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

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

זמן התנעה	–	t_s	[sec]
זמן בלימה	–	t_b	[sec]
מומנט תנופה כולל המועבר לציר המנוע	–	GD_T^2	[kgf · m ²]
מהירות סיבוב התחלתית	–	n_1	[rpm]
מהירות סיבוב סופית	–	n_2	[rpm]
מומנט סיבובי שקול בבלימה/בהתנעה	–	M	[Nm]
מומנט סטטי (נגדי)	–	M_s	[Nm]

ד. מנוע השראה תלת-מופעי

זרמים:

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

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

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

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

מהירות וגורם החליקה:

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

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

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

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

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

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

$$X_T = X_1 + X'_2$$

הספקים, איבודי הספק ומומנטים:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$X_T = X_1 + X'_2$$

הכנסת נגד נוסף לרוטור מלופף:

כאשר המנוע מועמס
במומנט נקוב:

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

כאשר המנוע מועמס
במומנט כלשהו (M_x):

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

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

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

שינוי תדירות הרשת:

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

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

התנגדות פאזית נוספת ברוטור	-	R_x	$[\Omega]$
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 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 · m²] -

$$T = \frac{GD^2}{38.2} \frac{R}{K_e K_m \phi^2}$$

מהירות סיבוב בזמן בלימה (ברגע $t = 0$) n_{st} [rpm] -

זמן t [sec] -

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 ישר בעירור מקבילי

א. ללא הפיכת קוטביות

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

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

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

$$R = R_a + R_b$$

ב. עם הפיכת קוטביות

כא"מ מושרה בתחילת הבלימה	-	E_{st}	[V]
מהירות סיבוב בריקם	-	n_o	[rpm]
מפל מהירות הסיבוב כתוצאה מעומס M_L , בערך מוחלט	-	Δn_L	[rpm]
מהירות סיבוב בזמן התנעה (ברגע $t = 0$)	-	n_{st}	[rpm]
זרם רגעי של המנוע	-	i	[A]
זרם המתאים למומנט נגדי M_L	-	I_L	[A]
זרם המנוע בתחילת הבלימה	-	I_{st}	[A]

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

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

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

בהצלחה!

אין להעביר את הנוסחאון
לנבחן אחר

נוסחאון באלקטרוניקה של מערכות הספק לכיתה י"ד

(12 עמודים)

1. אותות מחזוריים

1.1 ערך ממוצע – הגדרה כללית

זרם ממוצע – I_{AV} [A]

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

מתח ממוצע – V_{AV} [V]

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

הספק ממוצע – P_{AV} [W]
(הספק יעיל)

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

זמן מחזור – T [sec]

1.2 ערך ממוצע של אותות סינוסואידליים

זרם:

ערך רגעי של הזרם	-	$i(t)$	[A]	$i(t) = I_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_I)$
הערך המרבי של הזרם	-	I_m	[A]	$I_{AV} = 0$
תדר זוויתי	-	ω	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$	
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

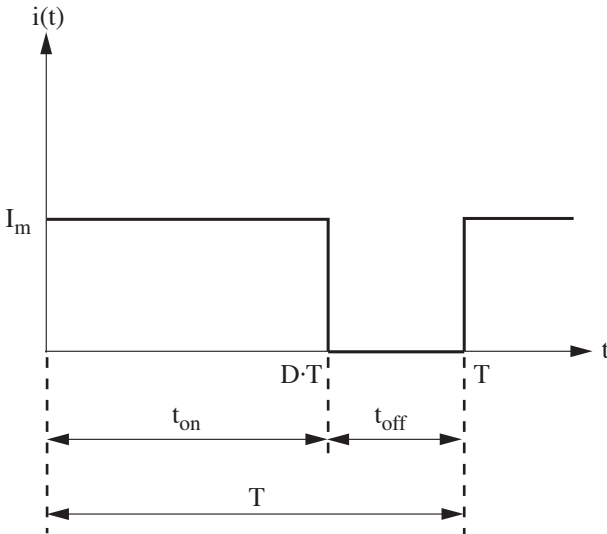
זרם:

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

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

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

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



D - מחזור הפעולה (Duty Cycle)

t_{on} [sec] - זמן הולכה

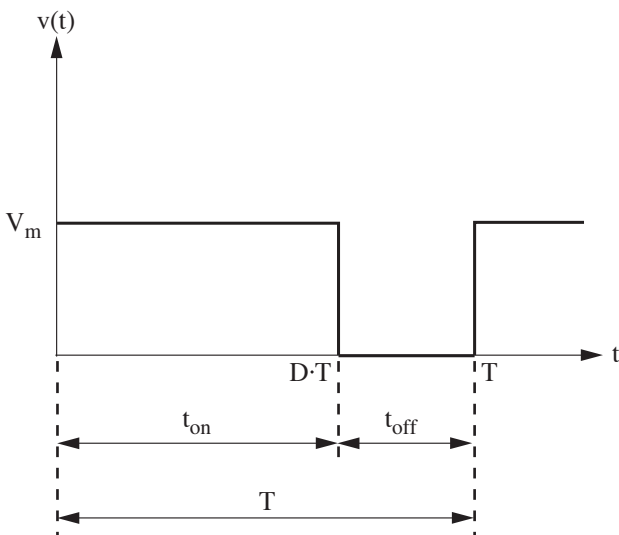
t_{off} [sec] - זמן פוגה

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:

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

הערך היעיל של הזרם – $I_{RMS} = I$

זמן מחזור – T [sec]

מתח:

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

הערך היעיל של המתח – $V_{RMS} = V$

1.5 ערך יעיל של אותות סינוסואידליים

זרם:

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

הערך המרבי של הזרם – I_m

מתח:

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

הערך המרבי של המתח – V_m

1.6 ערך יעיל של גל מלבני

זרם:

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

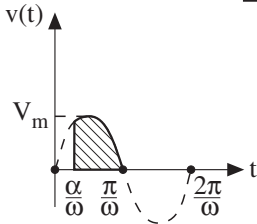
D — מחזור הפעולה (Duty Cycle)

מתח:

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

2. בקרת הספק במעגלי זרם חילופין חד-מופעיים

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



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

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

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

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

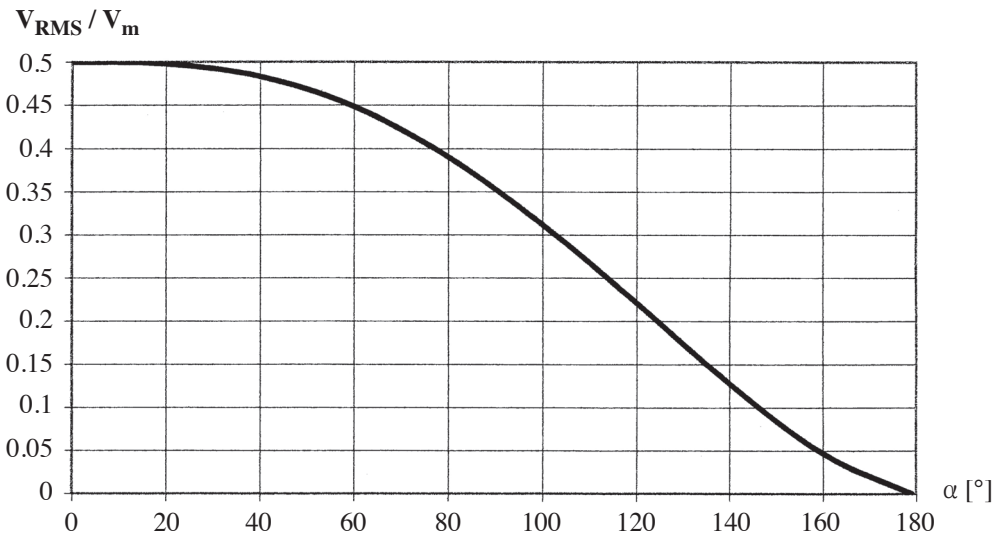
$$V_{RMS} = \frac{V_m}{2} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)}$$

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

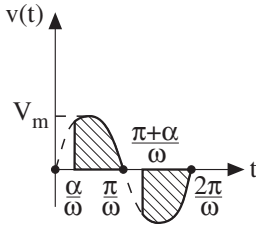
$$P = \frac{V_{RMS}^2}{R}$$

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

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



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

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

$$V_{AV} = 0$$

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

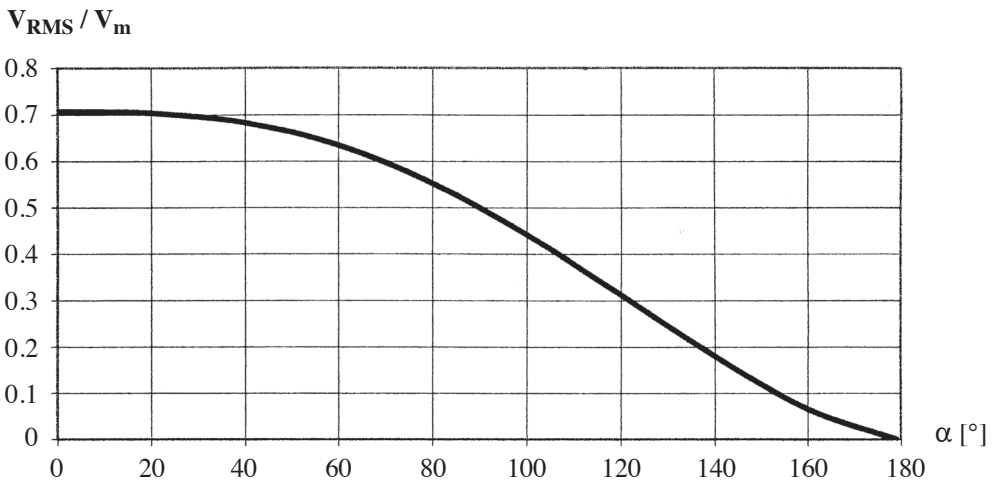
$$V_{RMS_m} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

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

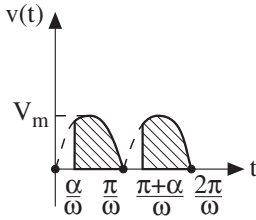
$$I_{AV} = 0$$

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

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



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

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

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

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

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

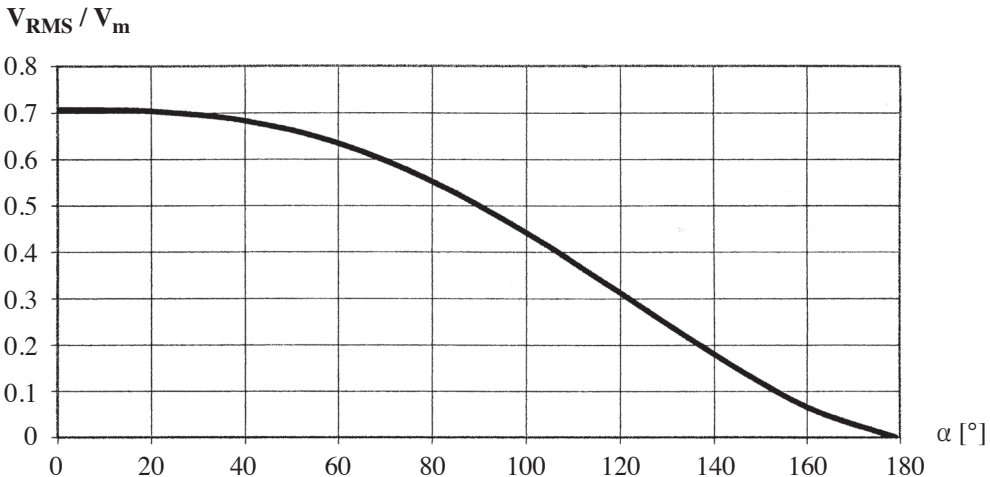
$$V_{RMS_m} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

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

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

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

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	[Ω]
הספק על העומס	-	P	[W]
הערך הממוצע של הזרם	-	I_{AV}	[A]
הערך היעיל של הזרם	-	I_{RMS}	[A]



3. בקרת הספק במעגלי זרם חילופין תלת-מופיעים

3.1 מיישר מבוזר תלת-מופעי בחיבור כוכב בעומס אומי

פעולה רציפה:

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

פעולה לא רציפה:

הערך היעיל של הזרם העובר דרך העומס	-	I_{RMS}	[A]	$v(t) = V_m \cdot \sin \omega t$	$\frac{\pi}{6} < \alpha \leq \pi$
				$V_{AV} = \frac{3 V_m}{2\pi} \left[1 + \cos\left(\frac{\pi}{6} + \alpha\right) \right]$	
				$V_{RMS} = \sqrt{3} \cdot V_m \cdot \sqrt{\frac{5}{24} - \frac{\alpha}{4\pi} + \frac{1}{8\pi} \sin\left(\frac{\pi}{3} + 2\alpha\right)}$	

3.2 מיישר מבוקר תלת-מופעי בחיבור גשר בעומס אומי

פעולה רציפה:

$$0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{3}$$

זווית הצתה α [rad] -

מתח מופעי בתלות בזמן $v(t)$ [V] -

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

מהירות זוויתית ω $\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}}\right]$ -
(תדר זוויתי)

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

זמן t [sec] -

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

הערך המרבי של V_m [V] -

המתח המופעי

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

הערך הממוצע של המתח V_{AV} [V] -

על העומס

$$V_{RMS_m} = \sqrt{3} \cdot V_m \cdot \sqrt{\frac{3}{4\pi} \left(\frac{2\pi}{3} + \sqrt{3} \right)}$$

הערך המרבי של המתח V_{AV_m} [V] -

הממוצע

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

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

הערך היעיל של המתח V_{RMS} [V] -

על העומס

הערך המרבי של המתח V_{RMS_m} [V] -

היעיל

התנגדות העומס R [Ω] -

הערך הממוצע של הזרם I_{AV} [A] -

העובר דרך העומס

פעולה לא רציפה:

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

הערך היעיל של הזרם I_{RMS} [A] -

העובר דרך העומס

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

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

4. ממירים ממותגים

4.1 משוואת מתח-זרם של סליל

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

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

(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

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
ΔV_o [V]	-	אדוות-המתח הדרושה
P_o [W]	-	הספק במוצא
P_{in} [W]	-	הספק במבוא
η	-	נצילות

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

בממיר
אידיאלי

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

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

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

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

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

4.4 ממייר (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

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

בממייר
אידיאלי

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

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

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

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

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

4.5 ממייר FLYBACK

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

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

בממייר
אידיאלי

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

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

5. מהפכים חד-מופעיים

מהפך חצי גשר (H/2):

הערך היעיל של מתח המוצא V_o [V] -

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

הערך היעיל של מתח המבוא V_{in} [V] -

מהפך גשר מלא (H):

$$V_o = V_{in}$$

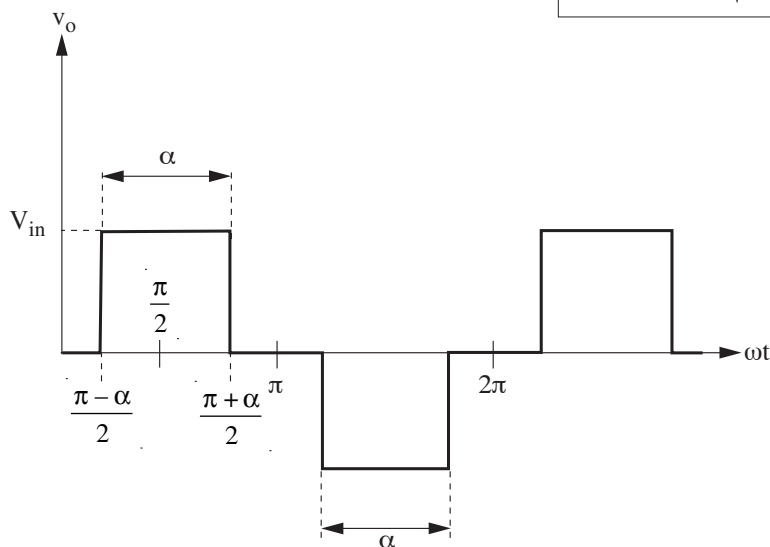
6. אפנון רוחב דופק יחיד (SPWM)

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!