

מערכות הספק, פיקוד ובקרה ט'

למתמחים במערכות הספק, פיקוד ובקרה במגמת הנדסת חשמל – אלקטרוניקה

(כיתה י"ג)

הוראות לנבחן

א. משך הבחינה: ארבע שעות.

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

ג. חומר עזר מותר לשימוש: מחשבון.

ד. הוראות מיוחדות:

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

2. התחל כל תשובה לשאלה חדשה בעמוד חדש.

3. רשום את כל תשובותיך אך ורק בעט.

4. הקפד לנסח את תשובותיך כהלכה ולסרטט את תרשימיך בהירות.

5. כתוב את תשובותיך בכתב יד ברור, כדי לאפשר הערכה נאותה של תשובותיך.

6. אם לדעתך חסרים נתונים הדרושים לפתרון שאלה, אתה רשאי להוסיף אותם, בתנאי שתנמק מדוע הוספת אותם.

7. בכתיבת פתרונות חישוביים, קבלת מִרְב הנקודות מותנית בהקפדה על השלמת כל המהלכים הבאים, בסדר שבו הם רשומים:

* רישום הנוסחה המתאימה.

* הצבה של כל הערכים ביחידות המתאימות.

* חישוב (אפשר באמצעות מחשבון).

* רישום התוצאה המתקבלת, ביחד עם יחידות המידה המתאימות.

* ליווי הפתרון החישובי בהסבר קצר.

בשאלון זה 6 עמודים ו-18 עמודי נספחים.

ההנחיות בשאלון זה מנוסחות בלשון זכר, אך מכוונות לנבחנות ולנבחנים כאחד.

בהצלחה!

השאלות

ענה על ארבע מבין השאלות 1–6. עליך לענות על שתי שאלות לפחות מן הפרק הראשון ועל שאלה אחת לפחות מן הפרק השני.

פרק ראשון: מערכות הספק

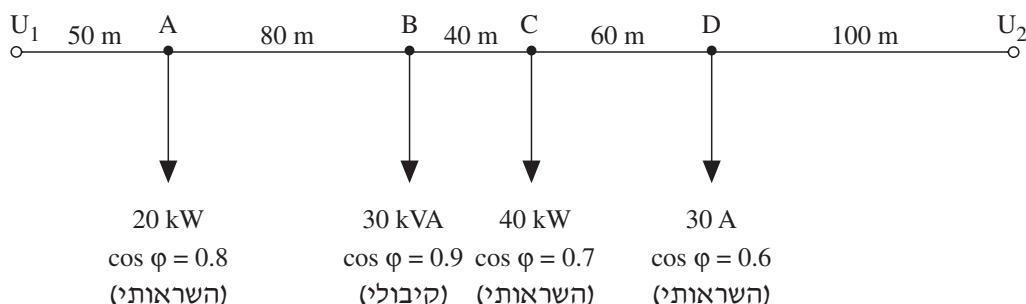
ענה על שתי שאלות לפחות מבין השאלות 1–4 (לכל שאלה – 25 נקודות).

שאלה 1

באיור לשאלה 1 נתונה רשת תלת-מופעית, המוזנת במתחים שווים בשני קצותיה:

$$U_1 = U_2 = 400 \text{ V}$$

מוליכי הרשת עשויים מנחושת, וההיגב ההשראותי שלהם ליחידת אורך הוא $X_0 = 0.3 \frac{\Omega}{\text{km}}$.



איור לשאלה 1

- א. חשב את הזרם בכל אחד מקטעי הרשת.
- ב. חשב את שטח החתך האחיד הנדרש למוליכי הרשת, כדי שמפל המתח המרבי לא יעלה על 3%.
- ג. קבע את שטח החתך התקני (המסחרי) של מוליכי הרשת, וחשב את:
1. המתח המזערי ברשת.
 2. צפיפות הזרם בכל אחד מקטעי הרשת.

שאלה 2

לוח חשמל ראשי במפעל מזין שתי קבוצות צרכנים תלת-מופעיים $400\text{ V} / 50\text{ Hz}$:

סוג הצרכן	מספר הצרכנים	הספק הצרכן (P)	מקדם ההספק	נצילות (η)
I מנוע אסינכרוני	25	20 HP	0.83	86%
II תנור	5	30 kW		

כל הצרכנים פועלים בו-זמנית בעומס מלא.

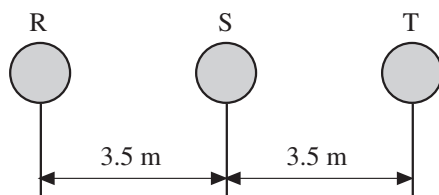
א. חשב את הזרם הנצרך על-ידי המפעל.

ב. מעוניינים לשפר את מקדם ההספק של המפעל ולהתאימו לערך הנדרש על-ידי חברת החשמל. לצורך זה מתקנים במפעל חמישה מנועים סינכרוניים. ההספק החשמלי הנצרך מהרשת על-ידי כל אחד מהם הוא 9 kW .
חשב את מקדם ההספק (הקיבולי) של קבוצת המנועים הסינכרוניים.

ג. מחליפים את קבוצת המנועים הסינכרוניים בחמישה תנורים נוספים, שהספקו של כל אחד מהם הוא 9 kW . האם כתוצאה מכך ישתנה מקדם ההספק של המפעל? נמק את תשובתך.

שאלה 3

נתונה רשת עילית, המעבירה הספק של 90 MVA במתח של 161 kV על-ידי קו הזנה שאורכו 30 km . מוליכי הרשת עשויים מחמרן-פלדה, ומסודרים כמתואר באיור לשאלה 3.



איור לשאלה 3

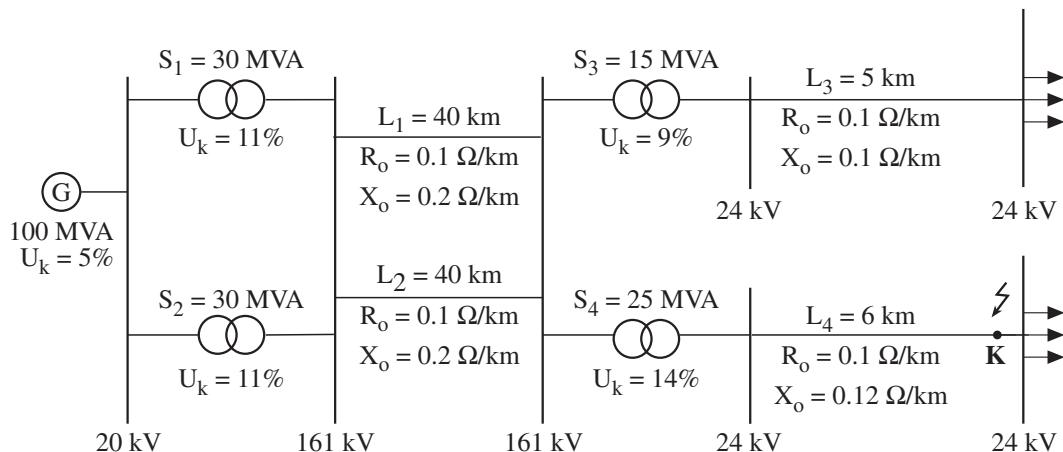
א. קבע את שטח-החתך של מוליכי הרשת הנדרש להעברת ההספק הנתון. היעזר לשם כך בטבלה שבנוסחאון במערכות הספק.

ב. חשב את הפסדי ההספק הפעיל ואת הפסדי ההספק ההיגבי לאורך הקו.

ג. סרטט את סכמת התמורה (מודל T) של קו ההזנה, וחשב את הערכים של רכיביה החשמליים.

שאלה 4

באיור לשאלה 4 נתונה רשת לאספקת חשמל.



איור לשאלה 4

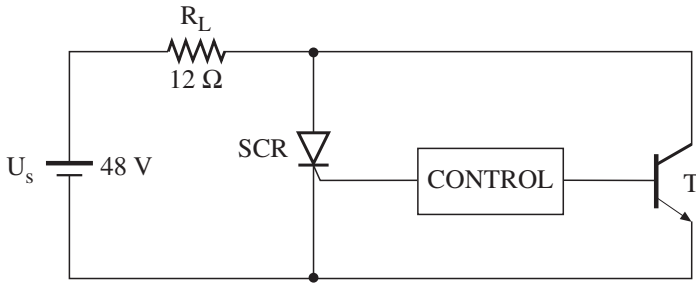
- א. חשב את זרם הקצר בנקודה K.
- ב. מה תפקידו של סליל פטרסון ברשת לאספקת חשמל, והיכן יש לחבר אותו ברשת המתוארת באיור?

פרק שני: אלקטרוניקה של מערכות הספק

ענה על שאלה אחת לפחות מבין השאלות 5–6 (לכל שאלה – 25 נקודות).

שאלה 5

באיור א' לשאלה 5 נתון מעגל לבקרת הספק, המוזן במתח ישר U_s . הטרנזיסטור שבמעגל – אידיאלי. מתח האחזקה של רכיב ה-SCR הוא 1V.



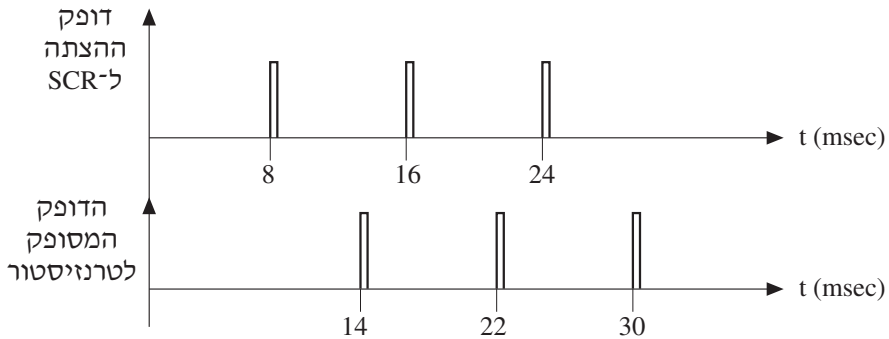
איור א' לשאלה 5

מעגל הבקרה מבצע באופן מחזורי ($f = 125 \text{ Hz}$) שתי פעולות:

1. הוא מצית את ה-SCR.

2. הוא מספק דופק לבסיס הטרנזיסטור T, לאחר הצתת ה-SCR.

באיור ב' לשאלה מתוארים שלושה מחזורים של דופק ההצתה ושל הדופק המסופק לטרנזיסטור. רוחב כל דופק קצר מאוד וניתן להזנחה.



איור ב' לשאלה 5

א. מהי שיטת הכיבוי של ה-SCR במעגל הזה? נמק את תשובתך.

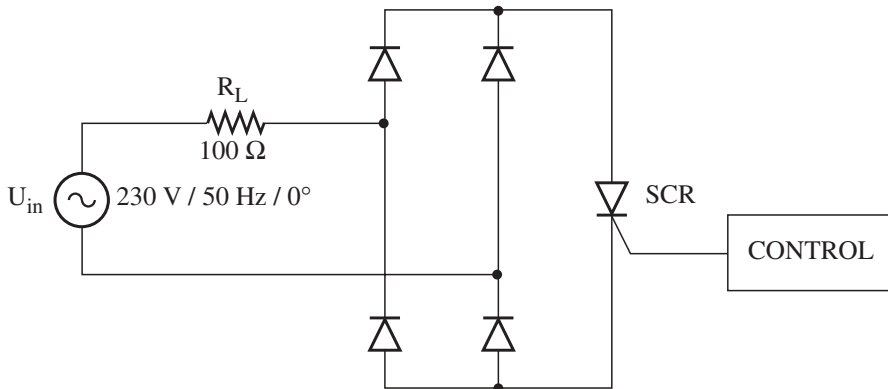
ב. סרטט את צורת הגל של המתח על העומס R_L כפונקציה של הזמן, במשך שלושה מחזורים.

ג. חשב את ההספק המתפתח על העומס R_L .

שאלה 6

המעגל החשמלי שבאיור לשאלה 6 מבקר את ההספק הנמסר לעומס R_L שהתנגדותו 100Ω .

רכיב ה-SCR מוצת בזווית $\alpha = \frac{\pi}{4} + \pi \cdot k$ ($k = 0, 1, 2, \dots$).



איור לשאלה 6

א. עבור זווית ההצתה הנתונה, סרטט, זו מתחת לזו בהתאמה, את צורות הגל האלו (כפונקציה של הזמן):

1. מתח המבוא U_{in} .

2. הזרם בעומס.

3. הזרם ברכיב ה-SCR.

ב. מהו המתח הממוצע על העומס R_L ? נמק את תשובתך.

ג. חשב את ההספק הפעיל המתפתח על העומס R_L .

בהצלחה!

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

מדינת ישראל משרד החינוך

סוג הבחינה: גמר לבתי-ספר לטכנאים ולהנדסאים
מועד הבחינה: אביב תשס"ה, 2005
נספח לשאלון: 750021, 750061

מקום למציאת נבחן

אין להעביר נוסחאון זה
מנבחן אחד למשנהו!

נוסחאון במערכות הספק לכיתה י"ג

(12 עמודים)

1. מפלי מתח

מתח ישר

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

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

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

מתח חילופין חד-מופע

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

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

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

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

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

$$I_a = I \cos \varphi$$

$$I_r = I \sin \varphi$$

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

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

המשך בעמוד 2

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	[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]	—
זרם ממשי בקטע k	I_a	[A]	—
זרם היגבי בקטע k	I_r	[A]	—

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

2. צפיפות זרם אחידה

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

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-מופע

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 הממשי	—	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-מופע

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 הממשי	—	ΔU_a	$[V]$
הזווית בין מתח לזרם בקטע k	—	φ_k	
אורך של קטע k	—	L_k	$[m]$

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

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

צפיפות הזרם החד-שנייתית ב-[A/mm²]

טמפרטורת המוליך לפני הקצר [°C]	טמפרטורה גבולית [°C] – Cu				טמפרטורה גבולית [°C] – Al			
	130	150	170	200	130	150	170	200
	130	150	170	200	130	150	170	200
5	144	153	161	173	96	102	108	114
10	141	150	158	170	94	100	106	113
15	137	146	155	167	91	98	104	111
20	133	143	152	164	89	95	102	109
25	130	140	149	161	87	93	99	107
30	126	136	145	158	84	91	97	105
35	122	135	142	155	82	89	95	103
40	118	129	139	152	80	87	93	102
45	114	125	135	149	77	85	91	100
50	110	122	132	146	75	82	89	97
55	106	118	129	143	72	80	87	95
60	103	115	126	140	69	77	85	93
65	—	111	122	137	67	75	82	91
70	—	108	119	134	64	72	80	89
75	—	104	116	131	61	70	78	87
80	—	110	112	128	58	67	76	85
85	—	96	109	125	55	65	73	83
90	—	92	105	122	51	62	71	81
95	—	88	102	119	48	59	68	79
100	—	84	98	115	44	56	65	75

שטחי חתך אופייניים, זרם מרבי וההגנה הנדרשת במוליכים ובכבלים עשויים נחושת (טמפרטורת הסביבה 35°C)

מעגל חד-מופעי (כבל שכולל מוליך מופע ומוליך אפס)		מעגל תלת-מופעי (כבל שכולל 3 מוליכי מופע)		שטח חתך [mm ²]
נתיך [A]	זרם מרבי [A]	נתיך [A]	זרם מרבי [A]	
10	16	10	14	1.5
16	22	16	19	2.5
20	29	20	26	4
32	38	25	33	6
50	53	40	46	10
63	70	50	63	16
80	94	63	82	25
100	126	80	103	35
125	140	100	124	50
160	178	125	159	70
200	215	160	192	95
224	250	200	222	120

נוסחאון במערכות הספק, אביב תשס"ה

נספח לשאלון 750021, 750061

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

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

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

Al		Cu		D _m [cm]									קוטר	שטח חתך
I	R ₀	I	R ₀	56	100	200	300	400	500	600	700	1000		
				X ₀ [Ω/km]										
[A]	[Ω/km]	[A]	[Ω/km]										[mm]	[mm ²]
—	—	70	1.786	0.368	0.403	0.446	0.472	0.490	0.504	0.515	0.525	0.547	4.1	10
92	1.805	115	1.123	0.354	0.389	0.433	0.458	0.476	0.490	0.502	0.511	0.533	5.1	16
121	1.185	151	0.738	0.341	0.376	0.420	0.445	0.463	0.477	0.488	0.498	0.520	6.3	25
149	0.845	174	0.525	0.330	0.365	0.409	0.434	0.452	0.466	0.477	0.487	0.509	7.5	35
187	0.587	234	0.364	0.319	0.354	0.397	0.423	0.441	0.455	0.466	0.476	0.498	9.0	50
226	0.435	282	0.271	0.309	0.344	0.388	0.413	0.431	0.445	0.456	0.466	0.488	10.5	70
282	0.309	357	0.192	0.298	0.333	0.377	0.402	0.420	0.434	0.445	0.455	0.477	12.5	95
329	0.245	411	0.153	0.291	0.326	0.370	0.395	0.413	0.427	0.438	0.448	0.470	14.0	120
382	0.196	477	0.122	0.283	0.319	0.362	0.387	0.405	0.419	0.431	0.440	0.463	15.8	150
435	0.158	544	0.098	0.277	0.312	0.356	0.381	0.399	0.413	0.424	0.434	0.456	17.5	185
502	0.126	630	0.078	0.270	0.305	0.349	0.374	0.392	0.406	0.417	0.427	0.449	19.6	240
513	0.118	641	0.074	0.268	0.303	0.346	0.372	0.390	0.404	0.415	0.425	0.447	20.3	240
598	0.096	747	0.060	0.261	0.297	0.340	0.365	0.383	0.397	0.409	0.418	0.441	22.5	300

המשך בעמוד 6

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

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

4. זרמי הקצר

— זרם קצר תלת-מופעי סימטרי	I_k	[A]
— עכבת מעגל הקצר (מהמקור למקום הקצר) למופע אחד	Z	[Ω]
— הספק מדומה של שנאי	S_T	[VA]
— הספק מדומה של גנרטור	S_G	[VA]
— היגב של גנרטור למופע אחד	X_G	[Ω]
— התנגדות של שנאי למופע אחד	R_T	[Ω]
— היגב של שנאי למופע אחד	X_T	[Ω]
— סכום ההתנגדויות במעגל הקצר למופע אחד	ΣR	[Ω]
— סכום ההיגבים במעגל הקצר למופע אחד	ΣX	[Ω]
— המתח שבו התרחש הקצר	U	[V]
— מתח הקצר באחוזים	$U_{k\%}$	[%]
— הרכיב הממשי של מתח הקצר באחוזים	$U_{r\%}$	[%]
— הרכיב ההיגבי של מתח הקצר באחוזים	$U_{x\%}$	[%]
— התנגדות הקו ליחידת אורך	R_o	[Ω / km]
— התנגדות הקו	R_L	[Ω]
— היגב הקו ליחידת אורך	X_o	[Ω / km]
— היגב הקו	X_L	[Ω]
— אורך הקו	L	[km]
— המתח המופעי שבו נתונים ההתנגדות R_1 וההיגב X_1	U_{1ph}	[V]
— המתח השלוב שבו נתונים ההתנגדות R_1 וההיגב X_1	U_{1L}	[V]
— המתח המופעי שאליו רוצים לשקף את ההתנגדות R_1 ואת ההיגב X_1	U_{2ph}	[V]
— המתח השלוב שאליו רוצים לשקף את ההתנגדות R_1 ואת ההיגב X_1	U_{2L}	[V]
— ההתנגדות R_1 וההיגב X_1 אשר הועברו למתח U_2	R'_1, X'_1	[Ω]
— מקדם ההמרה	K	

המשך בעמוד 8

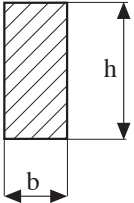
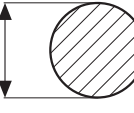
$I_k = \frac{1.1 \cdot U}{\sqrt{3} Z}$
$X_G = \frac{U_{x\%} U^2}{100 S_G}$
$R_T = \frac{U_{r\%} U^2}{100 S_T}$
$X_T = \frac{U_{x\%} U^2}{100 S_T}$
$U_{k\%} = \sqrt{U_{r\%}^2 + U_{x\%}^2}$
$Z = \sqrt{(\Sigma X)^2 + (\Sigma R)^2}$
$R_L = R_o \cdot L$
$X_L = X_o \cdot L$
$R'_1 = R_1 \cdot K^2$
$X'_1 = X_1 \cdot K^2$
$K = \frac{U_{2ph}}{U_{1ph}} = \frac{U_{2L}}{U_{1L}}$

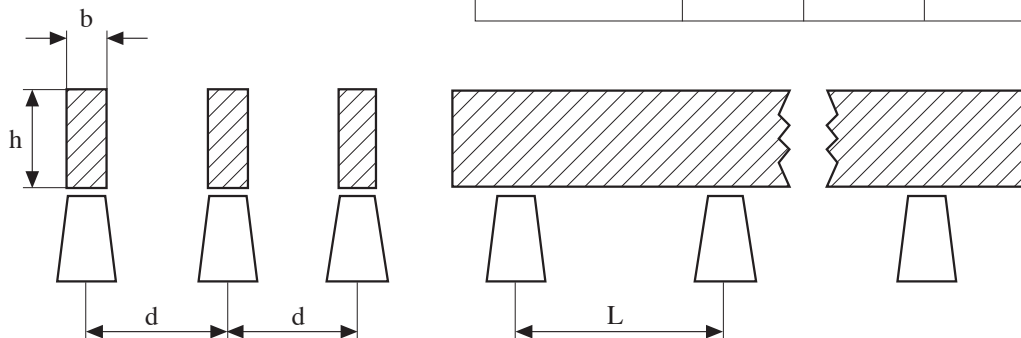
5. פסי הצבירה

הכוח הפועל על פס באורך $1m$	F [kg / m]
זרם הקצר	I_k [kA]
המרחק בין המרכזים של פסי הצבירה	d [cm]
מאמץ הכפיפה	σ [kg / cm ²]
הכוח הפועל על הפס בקטע בין שני מבדדים	P [kg]
אורך הפס בין שני מבדדים	L [cm]
מומנט ההתנגדות (מודול החתך)	W [cm ³]

$F = 1.76 \frac{I_k^2}{d}$
$P = F \frac{L}{100}$
$\sigma = \frac{P \cdot L}{12W}$
$f = \frac{112}{L^2} \sqrt{\frac{E \cdot J}{G}}$

מקדם האלסטיות	E [kg / cm ²]
מומנט ההתמדה (אינרציה)	J [cm ⁴]
המשקל של פס באורך $1 cm$	G [kg]
תדירות התהודה העצמית	f [Hz]
רוחב הפס	b [cm]
גובה הפס	h [cm]
קוטר הפס	D [cm]
המשקל הסגולי	g [kg / cm ³]

חתך	J	W	G
	$\frac{b^3 h}{12}$	$\frac{b^2 h}{6}$	$b \cdot h \cdot g$
	$0.05 D^4$	$0.1 D^3$	$\frac{\pi D^2}{4} \cdot g$



6. שיפור מקדם ההספק

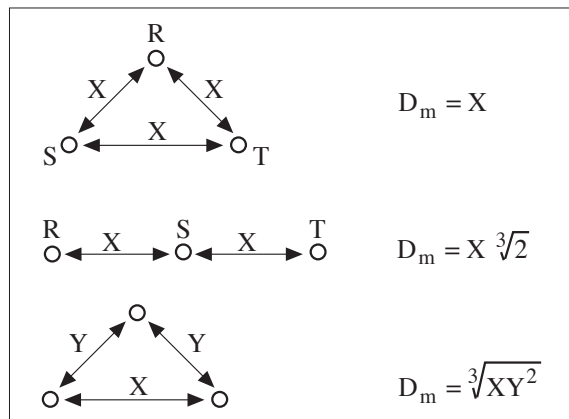
- Q_c [kVAr] — ההספק ההיגבי של סוללת הקבלים התלת-מופעיים הנדרשת לשיפור מקדם ההספק
 P [kW] — הספק אקטיבי הנצרך מהרשת
 φ_1 [°] — הזווית לפני השיפור
 φ_2 [°] — הזווית אחרי השיפור
 C [μF] — קיבול הקבל הנדרש
 Q_{cl} [kVAr] — ההספק ההיגבי של הקבל במופע אחד
 f [Hz] — תדירות הרשת
 U_c [V] — המתח על פני הקבל הנדרש

$Q_c = P(\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2)$
$Q_{cl} = \frac{Q_c}{3}$
$C = \frac{Q_{cl} \cdot 10^9}{U_c^2 \omega}$
$\omega = 2\pi f$

הערה: מקדם ההספק הנדרש על-ידי חברת החשמל הוא: 0.92.

7. קווי הספק

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



- γ [m / Ωmm²] — המוליכות הסגולית
 g [g / cm³] — המשקל הסגולי

חומרים		
חומר	נחשת	
35	57	γ
2.7	8.9	g

הפסד הספק אקטיבי	ΔP [W]	$\Delta P = 3I^2 R_o L$
הפסד הספק היגבי (השראות)	ΔQ_L [VAr]	$\Delta Q_L = 3I^2 X_o L$
התנגדות הקו ליחידת אורך עבור מוליך אחד	R_o [Ω / km]	$X_o = 0.144 \log \frac{D_m}{r} + 0.016$
היגב הקו ליחידת אורך עבור מוליך אחד	X_o [Ω / km]	$\Delta Q_C = \sqrt{3} I_C U$
אורך הקו	L [km]	$I_C = \frac{U}{\sqrt{3}} C_o L \omega \cdot 10^{-6}$
המרחק הממוצע בין המוליכים	D_m [cm]	<u>עבור: $f = 50 \text{ Hz}$</u>
רדיוס המוליך	r [cm]	$I_C = 0.181 U C_o L \cdot 10^{-3}$
הפסד הספק היגבי (קיבולי)	ΔQ_C [VAr]	$C_o = \frac{0.0242}{\log \frac{D_m}{r}}$
זרם הזליגה של הקו	I_C [A]	
קיבול קו עילי ליחידת אורך עבור מוליך אחד	C_o [$\mu\text{F} / \text{km}$]	
המתח השלוב של הרשת	U [V]	

מרחקים מומלצים בין המוליכים ברשת עילית:

U [kV]	D_m [m]
0.5	0.4 – 0.5
10	0.8 – 1.2
15	1.2 – 1.4
20	1.4 – 1.6
30	1.6 – 2
60	2.2 – 3.2
110	3.6 – 5.5
115	5.5 – 6.5
220	6.5 – 7.5
380	9.5 – 14
500	14 – 17

8. התחממות של מוליכים וכבלים

—	T_1	[°C]	טמפרטורת הסביבה בטבלת ההעמסה
—	T'_1	[°C]	טמפרטורת הסביבה האמיתית
—	T_2	[°C]	הטמפרטורה המרבית המותרת
—	I_{T1}	[A]	הזרם המותר למוליך בטמפרטורת הסביבה על-פי הטבלה
—	I'_{T1}	[A]	הזרם המותר למוליך בטמפרטורת הסביבה האמיתית
—	c		מקדם ההפחתה לעבודה מחזורית (זמן המחזור עד 10 דקות)
—	I_n	[A]	הזרם המותר בעבודה קבועה
—	I	[A]	הזרם המותר בעבודה מחזורית
—	t_γ	[min]	זמן עבודה
—	t	[min]	זמן המחזור

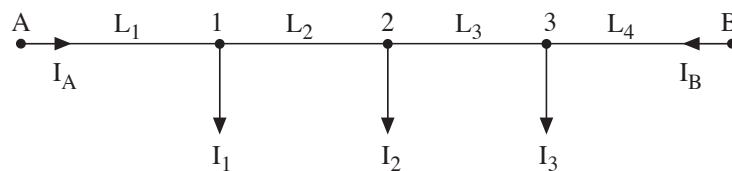
$I'_{T1} = I_{T1} \sqrt{\frac{T_2 - T'_1}{T_2 - T_1}}$
$I = c \cdot I_n$
$c = \frac{0.875}{\sqrt{\frac{t_\gamma}{t}}}$

מקדמי ההפחתה עבור כבלים המונחים בתעלה אחת:

4	3	2	1	מספר הכבלים / מקדם הפחתה
0.59	0.66	0.78	1	כבלים צמודים
0.67	0.72	0.87	1	כבלים במרווח 10 cm

9. חישובים ברשתות

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



$$I_A = \frac{I_1 (L_2 + L_3 + L_4) + I_2 (L_3 + L_4) + I_3 \cdot L_4}{L_1 + L_2 + L_3 + L_4}$$

$$I_B = \frac{I_1 \cdot L_1 + I_2 (L_1 + L_2) + I_3 (L_1 + L_2 + L_3)}{L_1 + L_2 + L_3 + L_4}$$

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

זרם ישר או זרם חילופין חד-מופעי	$M = \frac{\Delta U \cdot \gamma \cdot A}{2}$	—	M [Am]	מומנט ההשוואה
זרם חילופין תלת-מופעי	$M = \frac{\Delta U \cdot \gamma \cdot A}{\sqrt{3}}$	—	ΔU [V]	הפרש המתחים בין שני מקורות המתח
		—	γ [m / Ωmm^2]	מוליכות סגולית
		—	A [mm ²]	שטח חתך של מוליכי הרשת

$$I_A = \frac{I_1 (L_2 + L_3 + L_4) + I_2 (L_3 + L_4) + I_3 L_4 \pm M}{L_1 + L_2 + L_3 + L_4}$$

$$I_B = \frac{I_1 L_1 + I_2 (L_1 + L_2) + I_3 (L_1 + L_2 + L_3) \pm M}{L_1 + L_2 + L_3 + L_4}$$

בהצלחה!

מקום למציאת נבחן

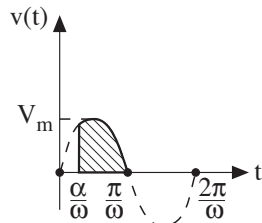
אין להעביר נוסחאון זה
מנבחן אחד למשנהו!

נוסחאון באלקטרוניקה של מערכות הספק לכיתות י"ג, י"ד

(6 עמודים)

מתחים וזרמים בגל סינוס עם זווית הולכה

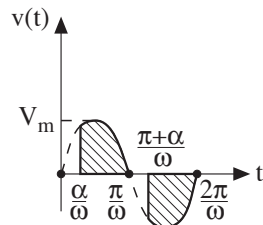
א. בקרת חצי גל בעומס אומי



זווית הצתה	—	α	[rad]
מתח הגל בתלות בזמן	—	$v(t)$	[V]
הערך הממוצע של המתח	—	V_{AV}	[V]
הערך היעיל של המתח	—	V_{RMS}	[V]
הערך המרבי של המתח	—	V_m	[V]
מהירות זוויתית (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]

$0 < \alpha < \pi$
$v(t) = V_m \cdot \sin \omega t$
$V_{AV} = \frac{V_m}{2\pi} [1 + \cos \alpha]$
$V_{RMS} = \frac{V_m}{2} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)}$
$P = \frac{V_{RMS}^2}{R}$
$I_{AV} = \frac{V_{AV}}{R}$
$I_{RMS} = \frac{V_{RMS}}{R}$

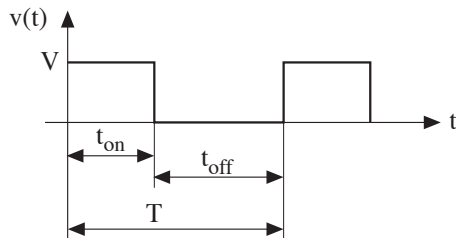
ב. בקרת גל שלם בעומס אומי



מתח הגל בתלות בזמן	—	$v(t)$	[V]
זווית הצתה	—	α	[rad]
הערך הממוצע של המתח	—	V_{AV}	[V]
הערך היעיל של המתח	—	V_{RMS}	[V]
הערך המרבי של המתח	—	V_m	[V]
מהירות זוויתית (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]

$0 < \alpha < \pi$
$V_{AV} = 0$
$V_{RMS} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)}$
$P = \frac{V_{RMS}^2}{R}$
$I_{AV} = \frac{V_{AV}}{R}$
$I_{RMS} = \frac{V_{RMS}}{R}$

מתחים וזרמים בגל מלבני



D	—	מחזור פעולה (Duty Cycle)
t_{on} [sec]	—	זמן הולכה
t_{off} [sec]	—	זמן פוגה
T [sec]	—	זמן המחזור

$D = \frac{t_{on}}{T}$
$V_{AV} = D \cdot V$
$V_{RMS} = V \cdot \sqrt{D}$
$I_{AV} = \frac{V_{AV}}{R}$
$I_{RMS} = \frac{V_{RMS}}{R}$

מיישרים

א. יישור חד-מופעי – חצי גל בעומס אומי

V_m [V]	—	הערך המרבי של המתח
V_{RMS} [V]	—	הערך היעיל של המתח
V_{AV} [V]	—	הערך הממוצע של המתח
I_{AV} [A]	—	הערך הממוצע של הזרם
I_{RMS} [A]	—	הערך היעיל של הזרם
R [Ω]	—	התנגדות העומס
P [W]	—	הספק על העומס

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

ב. יישור חד-מופעי – גל שלם בעומס אומי

הערך המרבי של המתח	—	V_m	[V]	$V_{AV} = \frac{2V_m}{\pi}$
הערך היעיל של המתח	—	V_{RMS}	[V]	$V_{RMS} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$
הערך הממוצע של המתח	—	V_{AV}	[V]	$I_{AV} = \frac{V_{AV}}{R}$
הערך הממוצע של הזרם	—	I_{AV}	[A]	$I_{RMS} = \frac{V_{RMS}}{R}$
הערך היעיל של הזרם	—	I_{RMS}	[A]	$P = \frac{V_{RMS}^2}{R}$
התנגדות העומס	—	R	[Ω]	
הספק על העומס	—	P	[W]	

ג. יישור תלת-מופעי חד-דרכי בעומס אומי

מתח מופעי בתלות בזמן	—	$v(t)$	[V]	$v(t) = V_m \cdot \sin \omega t$
מהירות זוויתית (תדר זוויתי)	—	ω	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$	$V_{AV} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m$
זמן	—	t	[sec]	$I_{AV} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi R} V_m$
הערך המרבי של מתח מופע	—	V_m	[V]	$V_{RMS} = V_m \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3}{4\pi} \sin \frac{2\pi}{3}}$
הערך הממוצע של הזרם העובר דרך העומס	—	I_{AV}	[A]	$I_{RMS} = \frac{V_m}{R} \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3}{4\pi} \sin \frac{2\pi}{3}}$
הערך הממוצע של המתח על פני העומס	—	V_{AV}	[V]	$P = \frac{V_{RMS}^2}{R}$
הערך היעיל של הזרם העובר דרך העומס	—	I_{RMS}	[A]	
הערך היעיל של המתח על פני העומס	—	V_{RMS}	[V]	
התנגדות העומס	—	R	[Ω]	

ד. יישור תלת-מופעי דו-דרכי בעומס אומי

מתח מופעי בתלות בזמן	—	$v(t)$	[V]	$V_{AV} = \frac{6 V_m}{\pi} \sin \frac{\pi}{6}$
מהירות זוויתית (תדר זוויתי)	—	ω	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$	$I_{AV} = \frac{6 V_m}{\pi R} \sin \frac{\pi}{6}$
זמן	—	t	[sec]	$V_{RMS} = V_m \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3}{2\pi} \sin \frac{\pi}{3}}$
הערך המרבי של מתח מופע	—	V_m	[V]	$I_{RMS} = \frac{V_m}{R} \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3}{2\pi} \sin \frac{\pi}{3}}$
הערך הממוצע של הזרם העובר דרך העומס	—	I_{AV}	[A]	
הערך הממוצע של המתח על פני העומס	—	V_{AV}	[V]	
הערך היעיל של הזרם העובר דרך העומס	—	I_{RMS}	[A]	
הערך היעיל של המתח על פני העומס	—	V_{RMS}	[V]	
התנגדות העומס	—	R	[Ω]	

איפנון PWM

זמן פעולה	—	t_{on}	[sec]	$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}$
זמן פוגה	—	t_{off}	[sec]	
מחזור פעולה (Duty Cycle)	—	D		

ממירים ממותגים

א. ממירים

מתח מוצא	—	V_o	[V]	$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}$	
מתח מבוא	—	V_{in}	[V]		
הספק במוצא	—	P_o	[W]	$V_o = D V_{in}$	ממיר STEP DOWN :
הספק במבוא	—	P_{in}	[W]	$V_o = \frac{V_{in}}{1 - D}$	ממיר STEP UP :
נצילות	—	η		$P_o = \eta P_{in}$	

ב. משוואת מתח-זרם של הסליל

מתח על פני הסליל	—	V_L	[V]	$V_L = L \frac{\Delta I_L}{\Delta T}$
השראות הסליל	—	L	[H]	
השינוי בזרם הסליל	—	ΔI_L	[A]	
השינוי בזמן	—	ΔT	[sec]	

ג. משוואת מתח-זרם של הקבל

זרם הקבל	—	I_C	[A]	$I_C = C \frac{\Delta V_C}{\Delta T}$
קיבול	—	C	[F]	
השינוי במתח על פני הקבל	—	ΔV_C	[V]	

בהצלחה !