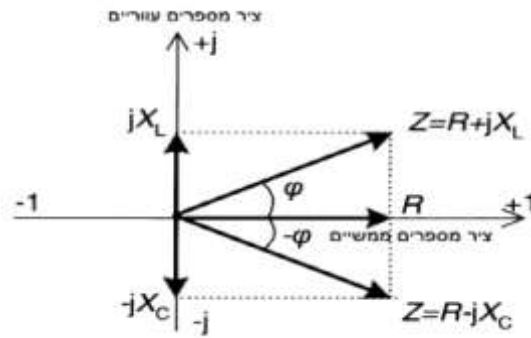


נוסחאון במערכות הספק ומתקני חשמל

הנדסאי חשמל

**נכתב ונערך ע"י ארנון בן טובים
2014**

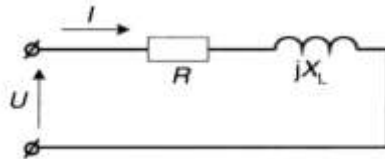
זרמים והספקים בזרם חילופין



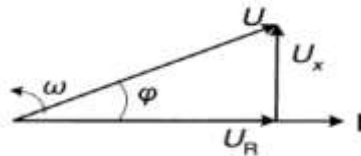
עבור צרכן בעל אופי השראי-

$$\begin{aligned}\varphi &= \cos^{-1} \left(\frac{R}{Z} \right) \\ \varphi &= \sin^{-1} \left(\frac{X_L}{Z} \right) \\ \varphi &= \tan^{-1} \left(\frac{X_L}{R} \right)\end{aligned}$$

מעגל תמורה של צרכן אומי השראי:



$$R + jX_L = Z^{\angle \varphi}$$

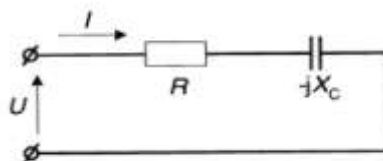


$$U_X = I * jX_L = j * I * X_L, \quad U_R = I * R.$$

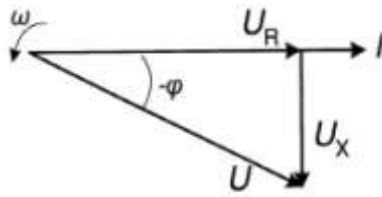
עבור צרכן בעל אופי קיבולי-

$$\begin{aligned}\varphi &= \cos^{-1} \left(\frac{R}{Z} \right) \\ \varphi &= \sin^{-1} \left(\frac{-X_C}{Z} \right) \\ \varphi &= \tan^{-1} \left(\frac{-X_C}{R} \right)\end{aligned}$$

מעגל תמורה של צרכן אומי קיבולי:

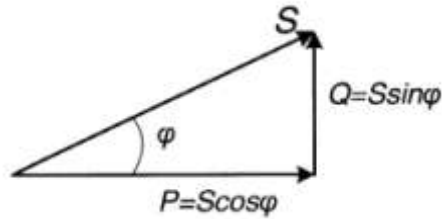


$$R - jX_C = Z^{\angle -\varphi}$$



$$U_X = I * (-jX_C) = -j * I * X_C, \quad U_R = I * R$$

משולש הספקים:



$$P = S * \cos \varphi$$

$$Q = S * \sin \varphi$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

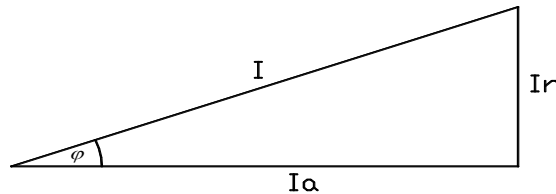
$$\sin \varphi = \frac{Q}{S}$$

$$\tan \varphi = \frac{Q}{P}$$

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

משולש הזרמים:



$$I_a = I * \cos \varphi$$

$$I_r = I * \sin \varphi$$

$$\cos \varphi = \frac{I_a}{I}$$

$$\sin \varphi = \frac{I_r}{I}$$

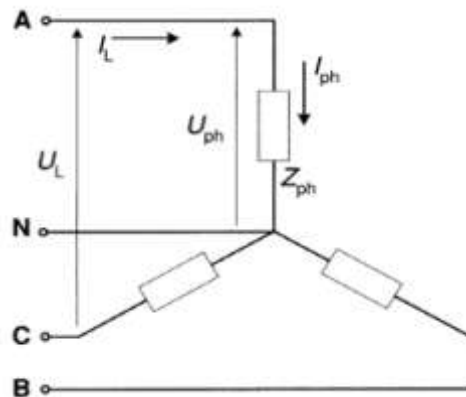
$$\tan \varphi = \frac{I_r}{I_a}$$

$$I^2 = I_a^2 + I_r^2$$

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

מערכת תלת מופעית חיבור צרן בחיבור כוכב ובחיבור משולש:

חיבור צרן בחיבור כוכב:



$$U_A \angle 0^\circ, U_B \angle -120^\circ, U_C \angle 120^\circ$$

$$U_L = \sqrt{3} * U_{ph}$$

לפי חוק מפלי מתח של קירכהוף:

$$\vec{U}_{AB} = \vec{U}_A - \vec{U}_B, \quad \vec{U}_{BC} = \vec{U}_B - \vec{U}_C, \quad \vec{U}_{CA} = \vec{U}_C - \vec{U}_A$$

$$S = 3 * S_{ph} = 3 * \vec{I}_{ph} * \vec{U}_{ph}$$

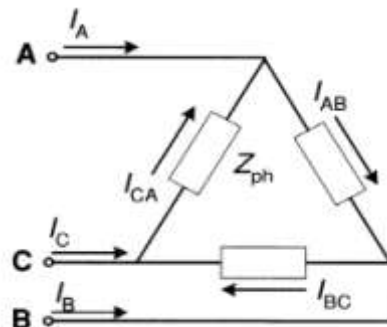
בחיבור צרן מאוזן:

$$\vec{Z}_A = \vec{Z}_B = \vec{Z}_C$$

$$\vec{I}_A = \vec{I}_B = \vec{I}_C$$

$$\vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C = \vec{I}_N = 0A$$

חיבור צרן בחיבור משולש



$$U_A = U_{AB}, \quad U_B = U_{BC}, \quad U_C = U_{CA}$$

$$U_{AB} \angle 0^\circ, \quad U_{BC} \angle -120^\circ, \quad U_{CA} \angle 120^\circ$$

$$\vec{I}_{AB} = \frac{\vec{U}_{AB}}{\vec{Z}_{AB}}, \quad \vec{I}_{BC} = \frac{\vec{U}_{BC}}{\vec{Z}_{BC}}, \quad \vec{I}_{CA} = \frac{\vec{U}_{CA}}{\vec{Z}_{CA}}$$

בעומס סימטרי:

$$I_L = \sqrt{3} * I_{ph}$$

$$S = 3 * I_{ph} * U_{ph} = 3 * \frac{I_L}{\sqrt{3}} * U_L = \sqrt{3} * I_L * U_L$$

חישובי רשתות

בחירת שטח חתך המוליכים לפי שיקול חוזק מכני:

בתקנות החשמל מוגדרים החתכים המינימאליים של המוליכים במתקן מתח נמוך:

- א. למוליך נחושת 1.5 mm^2 .
- ב. למוליך אלומיניום 2.5 mm^2 (במעגלים סופיים 6 mm^2).
- ג. למוליך נחושת בכבל עילי (התלוי על תיל נושא) 4 mm^2 .
- ד. למוליך אלומיניום בכבל עילי 16 mm^2 .
- ה. למוליך נחושת ברשת עילית ללא בידוד 16 mm^2 .
- ו. למוליך אלומיניום ברשת עילית ללא בידוד 25 mm^2 .

חישוב שטח חתך המוליכים לפי שיקול מפל מתח מותר:

תקנות:

לפי תקנות החשמל: "מפל המתח המרבי בין הדקי הצרכן לבין נקודת צריכה כלשהי במתקן הצרכן לא יעלה על 3% מהמתח הנומינאלי של הרשת".

שלבי חישוב שטח חתך אחיד:

א. הצגת זרמי הקטעים או ההספקים ברשת בצורה קרטזית.

ב. חישוב מפל מתח ראקטיבי $\Delta U_r\%$.

הערות:

1. בתצוגה קרטזית של הספקי קטעים מסמנים את הרכיב הראקטיבי ב-(+)
כאשר האופי הוא השראי וב-(-) כאשר האופי הוא קיבולי.
2. בתצוגה קרטזית של זרמי קטעים מסמנים את הרכיב הראקטיבי ב-(+)
כאשר האופי הוא קיבולי וב-(-) כאשר האופי הוא השראי.
3. בחישוב מפל המתח הראקטיבי כאשר הרשת מוצגת ע"י זרמים יש להפוך את הסימנים.
4. מפל מתח הראקטיבי שווה לאפס או ניתן להזנחה במקרים הבאים:
רשת לזרם ישר.
מקדם הספק של צרכנים קרוב ל-1.
מוליכי רשת בעלי חתכים קטנים שהתנגדותם האומית הרבה יותר גדולה מההיגב האשראי שלהם.
במקרים אלו מניחים כי- $\Delta U\% = \Delta U_a\%$ ועוברים לשלב ד.
- ג. חישוב מפל מתח אקטיבי מותר $\Delta U_a\%$ לפי הנוסחה: $\Delta U_a\% = \Delta U\% - \Delta U_r\%$
- ד. חישוב שטח חתך אחיד לפי $\Delta U_a\%$.

נוסחאון במערכות הספק ומתקני חשמל-הנדסאי חשמל

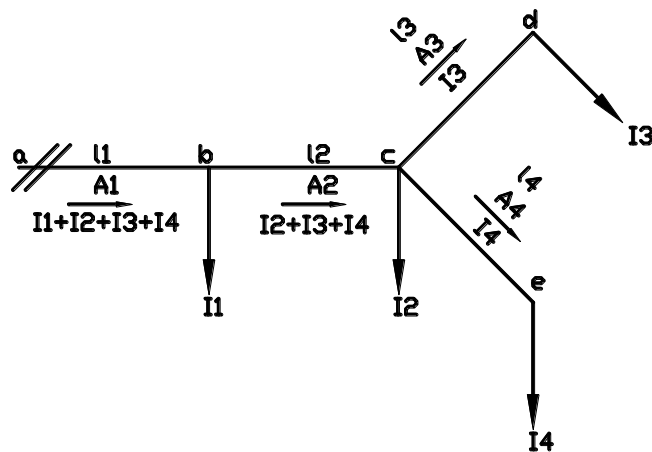
$$\Delta Ua\% = \Delta U\% - \Delta Ur\%$$

סוג הרשת	הצגת הרשת	מפל מתח ראקטיבי (%)	מפל מתח אקטיבי (%)
חד מופעית	זרמי קטעים	$\Delta Ur\% = \frac{Xo}{10Un} \sum_{i=1}^n \bar{I}rli * li$	$\Delta Ua\% = \frac{200\rho}{A * Un} \sum_{i=1}^n Iali * li$
	הספקי קטעים	$\Delta Ur\% = \frac{Xo}{10Un^2} \sum_{i=1}^n Qli * li$	$\Delta Ua\% = \frac{200\rho}{A * Un^2} \sum_{i=1}^n Pli * li$
תלת מופעית	זרמי קטעים	$\Delta Ur\% = \frac{\sqrt{3}Xo}{10Un} \sum_{i=1}^n \bar{I}rli * li$	$\Delta Ua\% = \frac{\sqrt{3} * 100\rho}{A * Un} \sum_{i=1}^n Iali * li$
	הספקי קטעים	$\Delta Ur\% = \frac{Xo}{10Un^2} \sum_{i=1}^n Qli * li$	$\Delta Ua\% = \frac{100\rho}{A * Un^2} \sum_{i=1}^n Pli * li$

$$\Delta U = \Delta Ua + \Delta Ur$$

סוג הרשת	הצגת הרשת	מפל מתח ראקטיבי (V)	מפל מתח אקטיבי (V)
חד מופעית	זרמי קטעים	$\Delta Ur = \frac{Xo}{1000} \sum_{i=1}^n \bar{I}rli * li$	$\Delta Ua = \frac{2\rho}{A} \sum_{i=1}^n Iali * li$
	הספקי קטעים	$\Delta Ur = \frac{Xo}{1000Un} \sum_{i=1}^n Qli * li$	$\Delta Ua = \frac{2\rho}{A * Un} \sum_{i=1}^n Pli * li$
תלת מופעית	זרמי קטעים	$\Delta Ur = \frac{\sqrt{3}Xo}{1000} \sum_{i=1}^n \bar{I}rli * li$	$\Delta Ua = \frac{\sqrt{3} * \rho}{A} \sum_{i=1}^n Iali * li$
	הספקי קטעים	$\Delta Ur = \frac{Xo}{1000Un} \sum_{i=1}^n Qli * li$	$\Delta Ua = \frac{\rho}{A * Un} \sum_{i=1}^n Pli * li$

רשת מתפצלות

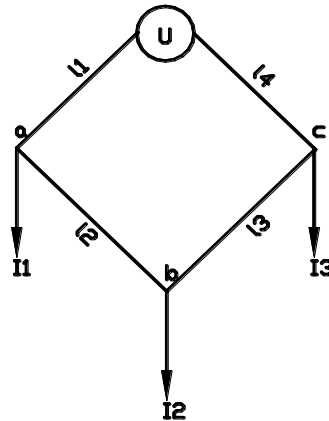


$$\Delta Umax(ad) = \frac{2\rho}{A(ad)} * \sum (I(ad) * l(ad))$$

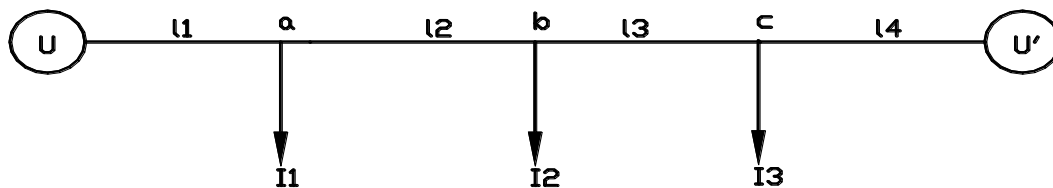
$$\Delta Umax(ae) = \frac{2\rho}{A(ae)} * \sum (I(ae) * l(ae))$$

קובעים את שטח החתך האחיד בהתאם מפל המתח הקטן מביניהם.

רשת טבעתית או רשת עם 2 מקורות שווים



שלב ראשון- יש לפתוח את הרשת הטבעתית כמו רשת בעלת 2 מקורות שווים. סימון כיווני הזרמים-הקטעים הקיצוניים מסמנים את כיוון הזרם לתוך הרשת, כיוון יתר הזרמים יתבררו במהלך החישובים בהתאם לערך הוקטורי שלהם.



שלב שני- לחשב את הזרם (או הספק מדומה) שיוצא מכל מקור עבור כל קטע בהתאם החלק היחסי של אורך הקווים בקטעים השונים עבור שטח חתך אחיד בהתאם לנוסחת מומנט הזרמים כלפי נקודת U או U'.

$$I_u = \frac{\vec{I1} * (l2 + l3 + l4) + \vec{I2} * (l3 + l4) + \vec{I3} * l4}{l1 + l2 + l3 + l4}$$

או

$$I_{u'} = \frac{\vec{I1} * l1 + \vec{I2} * (l1 + l2) + \vec{I3} * (l1 + l2 + l3)}{l1 + l2 + l3 + l4}$$

שלב שלישי- חישוב זרמי הקטעים השונים (או הספקי הקטעים) עלפי קירכהוף. זרם שסימנו שלילי יש לשנות את כיוונו.

$$I_{ab} = I_u - I1$$

$$I_{bc} = I_{ab} - I2$$

$$I_{cu'} = I_{bc} - I3$$

שלב רביעי- יש למצוא את נקודת השפך ברשת. נקודת השפך היא נקודת מפגש הזרמים ברשת בנקודה זו מפל המתח הוא מקסימאלי. ברשת בעלת מקורות שווים מפל המתח מ-2 הכיוונים חייב להיות שווה. לאחר מציאת נקודת השפך ניתן לחשב את שטח החתך בעזרת הנוסחאות הרגילות מאחד המקורות ועד לנקודת השפך באופן שרירותי.

נוסחאון במערכות הספק ומתקני חשמל-הנדסאי חשמל

חישוב שטח חתך המוליכים לפי שיקול הפסדי הספק:

$$\Delta P = I^2 * R \Rightarrow R = \frac{\rho}{A} * l \Rightarrow \Delta P = \frac{I^2 * \rho * l}{A}$$

שלבי החישוב:

א. הצגת זרמי הקטעים או ההספקים ברשת בצורה קרטזית או פולארית.

ב. חישוב שטח אחיד של מוליכי הרשת.

סוג הרשת	הצגת הרשת	שטח חתך אחיד ברשת (mm ²)
רשת חד מופעית	זרמי קטעים	$A = \frac{200\rho}{\Delta P\% * P_{l1}} \sum_{i=1}^n I_{li}^2 * l$
	הספקי קטעים	$A = \frac{200\rho}{\Delta P\% * P_{l1} * Un^2} \sum_{i=1}^n S_{li}^2 * l$
רשת תלת מופעית	זרמי קטעים	$A = \frac{300\rho}{\Delta P\% * P_{l1}} \sum_{i=1}^n I_{li}^2 * l$
	הספקי קטעים	$A = \frac{100\rho}{\Delta P\% * P_{l1} * Un^2} \sum_{i=1}^n S_{li}^2 * l$

סוג הרשת	הצגת הרשת	שטח חתך אחיד ברשת (mm ²)
רשת חד מופעית	זרמי קטעים	$\Delta P = \frac{2\rho}{A} \sum_{i=1}^n I_{li}^2 * l$
	הספקי קטעים	$\Delta P = \frac{2\rho}{A * Un^2} \sum_{i=1}^n S_{li}^2 * l$
רשת תלת מופעית	זרמי קטעים	$\Delta P = \frac{3\rho}{A} \sum_{i=1}^n I_{li}^2 * l$
	הספקי קטעים	$\Delta P = \frac{\rho}{A * Un^2} \sum_{i=1}^n S_{li}^2 * l$

חישוב שטח חתך המוליכים לפי שיקול העמסה מותרת:

$$I_b \leq I_N \leq I_z$$

$$I_z' = I_z * k$$

$$I_b = \frac{P_1}{\sqrt{3} * Un * \cos \varphi} = \frac{P_2}{\sqrt{3} * Un * \cos \varphi * \eta}$$

נוסחאון במערכות הספק ומתקני חשמל-הנדסאי חשמל

חישוב שטח חתך המוליכים לפי שיקול מינימום חומר:

$$k_I = \frac{A_{li}}{\sqrt{I_{ali}}} ; \quad k_P = \frac{A_{li}}{\sqrt{P_{li}}}$$

שלב: חישוב

- א. הצגת זרמי הקטעים או ההספקים ברשת, בצורה קרטזית.
- ב. חישוב מפל המתח הראקטיבי $\Delta U_r\%$.
- ג. חישוב מפל המתח האקטיבי המותר $\Delta U_a\%$.
- ד. חישוב מקדם הרשת k_I או k_P .
- ה. חישוב שטחי החתך של קטעי הרשת.

שטח חתך של כל קטע ברשת (mm^2)	מקדם הרשת	סוג הרשת	הצגת הרשת
$A_{li} = k_I * \sqrt{I_{ali}}$	$k_I = \frac{200\rho}{\Delta U_a\% * Un} \sum_{i=1}^n \sqrt{I_{ali}} * l_i$	חד מופעית	זרמי קטעים
	$k_I = \frac{\sqrt{3} * 100\rho}{\Delta U_a\% * Un} \sum_{i=1}^n \sqrt{I_{ali}} * l_i$	תלת מופעית	
$A_{li} = k_P * \sqrt{P_{li}}$	$k_P = \frac{200\rho}{\Delta U_a\% * Un^2} \sum_{i=1}^n \sqrt{P_{li}} * l_i$	חד מופעית	הספקי קטעים
	$k_P = \frac{100\rho}{\Delta U_a\% * Un^2} \sum_{i=1}^n \sqrt{P_{li}} * l_i$	תלת מופעית	

חישוב שטח חתך המוליכים לפי שיקול כדאיות כלכלית (חוק קלווין):

לפי כלל קלווין, שטח החתך הכדאי ביותר של מוליכי הרשת הינו חתך שבו העלות השנתית של הפסדי האנרגיה ברשת שווה לעלות השנתית של הריבית והפחת.

$$C_w = C_k$$

א. עלות הפסדי אנרגיה שנתית במוליכי הקו C_w :

מרכיב זה תלוי באיבודי ההספק בקו ובתעריף של האנרגיה החשמלית:

$$C_w = \Delta W * M$$

$$\Delta W = 3 * I_{max}^2 * R_L * \frac{T_{max}}{1000}$$

$$R_L = \rho * \frac{l}{A}$$

$$C_w = 3 * I_{max}^2 * \rho * \frac{l}{A} * \frac{T_{max}}{1000} * M$$

ב. עלות השנתית של ריבית והפחת C_k :

$$C_k = \frac{K\%}{100} * B = \frac{K\%}{100} * x * A * l$$

$K\%$ ריבית ופחת שנתיים (%)

B - עלות הרשת (₪). $B = b * l$

$b = x * A$ - מחיר סגולי של הרשת בתלות בשטח החתך $\left(\frac{₪}{m}\right)$.

A - שטח החתך של מוליכי הרשת (mm^2).

l - אורך מוליכי הרשת (m).

נוסחאות במערכות הספק ומתקני חשמל-הנדסאי חשמל

שיקול צפיפות זרם כלכלית:

$$j = \frac{I}{A} \left[\frac{A}{mm^2} \right]$$

כאשר:

I - זרם בקו $[A]$.

A - שטח חתך הקו $[mm^2]$.

j_{ec} - תעריף האנרגיה החשמלית $\left[\frac{A}{mm^2} \right]$.

הערך של צפיפות זרם הכלכלית תלוי בזמן השימוש בהספק המרבי T_{max} ובסוג הרשת והוא נתון הטבלה הבאה:

זמן שימוש בהספק מרבי	צפיפות זרם כלכלית A/mm^2			
	רשת תת-קרקעית		רשת עלית	
	Cu	Al	Cu	Al/Fe
1000-3000	2.65	1.65	2.5	1.5
3000-5000	2.25	1.5	1.75	1
5000-8760	2	1.3	1.25	0.75

$$Un_{ec} = \frac{\sqrt{3} * j_{ec} * \rho * l}{\Delta P\% * \cos \varphi} * 100 [kV]$$

כאשר:

Un_{ec} - המתח הנקוב המומלץ $[kV]$.

l - אורך הקו $[km]$.

$\Delta P\%$ - הפסדי ההספק המרביים בקו $[\%]$.

צפיפות זרם אחידה:

$$j = \frac{I_{l1}}{A_{l1}} = \frac{I_{l2}}{A_{l2}} = \dots = \frac{I_{ln}}{A_{ln}}$$

שלבי חישוב

א. הצגת זרמי הקטעים הרשת בצורה קרטזית ובצורה פולארית.

ב. חישוב מפל המתח הראקטיבי $Ur\%$.

ג. חישוב מפל מתח אקטיבי מותר $Ua\%$.

ד. חישוב צפיפות זרם אחידה j .

ה. חישוב שטחי חתך של הרשת.

הצגת הרשת	סוג הרשת	צפיפות זרם אחידה	שטח חתך של כל קטע (mm^2)
זרמי קטעים	חד-מופעית	$j = \frac{\Delta U_a\% * Un}{200 * \rho * \sum_{i=1}^n l_i * \cos \varphi_{li}}$	$A_{l1} = \frac{I_{l1}}{j}$
	תלת-מופעית	$j = \frac{\Delta U_a\% * Un}{\sqrt{3} * 100\rho * \sum_{i=1}^n l_i * \cos \varphi_{li}}$	

זרמי קצר

ערך הרגעי של זרם הקצר:

ברגע ההתחלתי של הופעת הקצר קיימים 2 רכיבים של זרם הקצר:
א. רכיב מחזורי (סינוסואלי) - i_k – רכיב זה קיים כל הזמן מרגע התחלת הקצר ועד לניתוקו-

$$i_k = I_k * \sqrt{2} * \sin(\omega t + a - \varphi_k)$$

ב. רכיב זרם ישר (אקספוננציאלי) - i_a – והוא הזרם שמקורו בתהליך מעבר ברשת. גודלו מרבי הרגע הראשון של הופעת הקצר והוא הולך ודועך במשך 2-3 מחזורים-

$$i_a = -\sqrt{2} * I_k * \sin(a - \varphi_k) * e^{-\frac{t}{\tau}}$$

הערך הרגעי של זרם הקצר מוגדר-

$$i = i_k + i_a$$

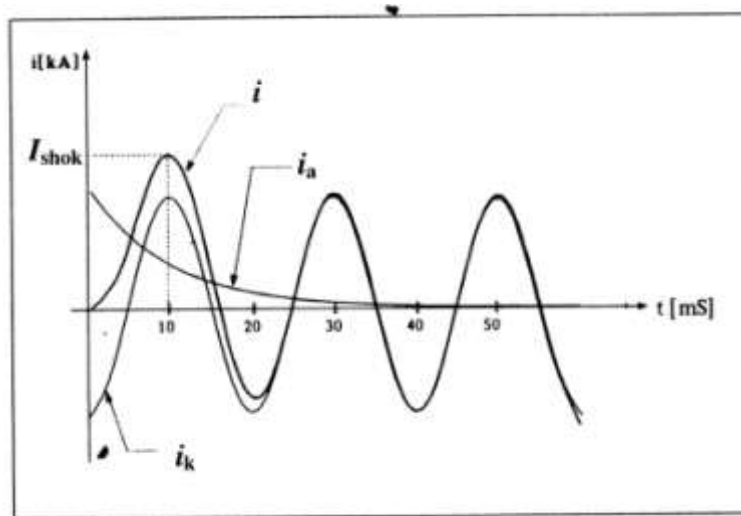
$$i = \sqrt{2} * I_k \left[\sin(\omega t + a - \varphi_k) - \sin(a - \varphi_k) e^{-\frac{t}{\tau}} \right]$$

$$Z_k = R_k + jX_k$$

$$\varphi_k = \varphi_U - \varphi_{I_k}$$

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{X_k}{\omega R_k}$$

$$\omega = 2\pi f$$



ערך המתמיד של זרם הקצר:

$$I_k = \frac{1.1 * U_n}{\sqrt{3} * Z_k}$$

$$S_k = \sqrt{3} * I_k * U_n$$

זרם ההלם:

$$I_{shok} = \sqrt{2} * I_k * k_{shok}$$

חישוב עכבת הקצר Z_k

$$Z_k = \sum Z$$

א. שנאי מוצג על ידי העכבה-

$$Z_{TR} = R_{TR} + jX_{TR}$$

$$R_{TR} = \frac{\Delta P_{cu} * Un^2}{Sn^2}$$

$$R_{TR} = \frac{U_r \% * Un^2}{100Sn}$$

$$X_{TR} = \frac{U_x \% * Un^2}{100Sn}$$

$$Z_{TR} = \frac{U_k \% * Un^2}{100Sn}$$

$$X_{TR} = \sqrt{Z_{TR}^2 - R_{TR}^2}$$

ב. קו מוצג ע"י העכבה-

$$Z_L = R_L + jX_L$$

$$R_L = \rho \frac{l}{A}$$

אם קו נמצא במתח נקוב אחר מהמתח הנקוב בנקודת הקצר, יש לייחס את עכבת הקו למתח בנקודת הקצר.

$$Z_k' = Z_k \left(\frac{Un'}{Un} \right)^2$$

העמסה והגנה על מוליכים

עבור נתיכים או מא"ז בעל אופיין L:

תנאי ראשון: $Ib \leq In \leq Iz$

תנאי שני: $1.103In \leq Iz$

עבור מא"זים בעל אופיין B,C:

תנאי ראשון: $Ib \leq In \leq Iz$

תנאי שני: $1.115In \leq Iz$

עבור מאמ"תים:

תנאי ראשון: $Ib \leq In \leq Iz$

תנאי שני: $1.045In \leq Iz$

תכנון מעגלים מהיבט ההגנה בפני העמסת יתר:

שלבי תכנון

א. חישוב זרם העבודה הממושך I_b הצפוי לעבור במעגל על פי הנוסחאות הבאות:

מנועים	צרכנים רגילים	סוג המעגל
$I_b = \frac{\beta * P_n * (736)}{U_n * \eta * \cos \varphi}$	$I_b = \frac{P}{U_n * \cos \varphi}$	חד מופעי
$I_b = \frac{\beta * P_n * (736)}{\sqrt{3} * U_n * \eta * \cos \varphi}$	$I_b = \frac{P}{\sqrt{3} * U_n * \cos \varphi}$	תלת מופעי

ב. בחירת סוג המאבטח בהתאם לתחום שימושם והזרם נקוב של

מאבטח בהתאם וגדלים הסטנדרטיים הקיימים והתאם לתנאי

$$I_b \leq I_n$$

ג. בחירת שיטת ההתקנה סוג המוליכים וסוג הבידוד.

יש לבחור את שיטת ההתקנה של המוליכים מתוך 18 שיטות ההתקנה בתוספת השנייה לתקנות של חוק החשמל (העמסה והגנה של מוליכים...) בתוך שיטת ההתקנה יש להגדיר סוג החומר של המוליך (נחושת או אלומיניום), ואת סוג הבידוד (70° או 90°). התוצאה של שלב זה קביעת הטבלה המתאימה לתנאי המעגל.

ד. חישוב ערך נדרש של זרם מרבי מתמיד I_z .

על סמך בחירת סוג המאבטח וזרמו הנקוב בשלב ב' יש לחשב את הערך הנדרש של הזרם המתמיד I_z על פי התנאי השני לפי אחת מהנוסחאות:

$$I_z \geq 1.103 I_n \quad \text{עבור נתיכים}$$

$$I_z \geq 1.115 I_n \quad \text{עבור מא"זים}$$

$$I_z \geq 1.045 I_n \quad \text{עבור מאמ"תים}$$

ה. בחירת חתך המוליכים המעגל המתוכנן בתנאי סביבה רגילים.

יש למצוא בטבלה שנקבעה בשלב ג' את חתך המוליך בעל הזרם המתמיד המרבי הגבוה או שווה לערך הנדרש שחושב בשלב ד'.
הערה- תנאי סביבה רגילים הם:

1. למוליכים וכבלים שסביבם אוויר-טמפרטורה של 35°C .

2. לכבלים שסביבם קרקע- טמפרטורה של 30°C והתנגדות תרמית סגולית של הקרקע $120^\circ\text{C} \cdot \frac{\text{cm}}{\text{W}}$.

3. התקנת עד 3 מוליכים מבודדים או 3 כבלים חד גידיים ללא רווח בניהם למעט מוליכי הארקה, בהתקנה חשופה לתנועת לאוויר.

4. התקנת עד כבל רב גידי אחד בהתקנה חשופה לאוויר במידה ותנאי הסביבה אינם רגילים יש צורך בשימוש במקדמי תיקון לקביעת הזרם המרבי המתמיד במוליך I_z .

מקדמי תיקון

1. כאשר טמפרטורת האוויר הסביבתית שונה מ- 35°C יש להכפיל את הערכים

של הזרם המתמיד המרבי I_z שבתוספת הראשונה במקדם המתאים מטבלה 17 שבתקנות החשמל.

2. כאשר טמפרטורת הקרקע הסביבתית שונה מ-30°C יש להכפיל את הערכים של הזרם המתמיד המרבי I_z שבתוספת הראשונה במקדם המתאים מטבלה 18 שבתקנות החשמל.
3. כאשר מותקנים יותר מ-3 מוליכים מבודדים או 3 כבלים חד גידיים למעט מוליכי הארקה ללא רווח בניהם בהתקנה חשופה לתנועת האוויר בתנוחה אופקית או אנכית כדוגמא בהתקנה על סולמות, יש להכפיל את הערכים של הזרם המתמיד המרבי I_z שבתוספת הראשונה במקדם המתאים מטבלה 15 שבתקנות החשמל.
4. כאשר מותקנים כבלים רב גידיים אחדים ללא רווח בניהם בהתקנה חשופה לתנועת האוויר בתנוחה אופקית או אנכית כדוגמא בהתקנה על סולמות, יש להכפיל את הערכים של הזרם המתמיד המרבי I_z שבתוספת הראשונה במקדם המתאים מטבלה 16 שבתקנות החשמל.

תכנון מעגלים מהיבט ההגנה בפני זרם קצר:

תקנות החשמל מחייבות קיום 2 תנאים לגבי תפקיד של מאבטח בהגנת מוליכים בפני קצר:

- א. כושר הניתוק של המאבטח יהיה גדול מזרם הקצר המרבי הצפוי לעבור דרכו.
 1. כושר ניתוק בסיסי I_{cu} (kA).
 2. כושר ניתוק בשרות I_{cs} (%), באחוזים ביחס לכושר הניתוק הבסיסי. זוהי יכולת המאבטח להפסיק 2 קצרים ברצף (במקרה הפעלה חוזרת אוטומטית).

$$I_{cu} > I_{k(max)}$$

- ב. זמן ניתוק קצר על ידי מאבטח יהיה קטן מהערך המחושב על פי הנוסחה הבאה אך לא יותר מ-5 שניות (לפי התקנות):

$$t = \left(\frac{k * S}{I_{k(min)}} \right)^2$$

$$I_{k(min)} = \frac{0.9 * U_{ph}}{Z_T}$$

k - מקדם הנתון בתקנות ערכו תלוי בסוג החומר המוליך וסוג הבידוד $\left[\frac{A \cdot s^{\frac{1}{2}}}{mm^2} \right]$.

סוג הבידוד		
חומר המוליך	בידוד 70°C	בידוד 90°C
נחושת	115	140
אלומיניום	74	90

S - שטח חתך המוליך (mm^2).

אם הזמן t המחושב לפי הנוסחה הנ"ל קטן מ-0.1 s יש לבדוק את התנאי הנוסף:

$$k^2 * S^2 \geq \int_0^t I^2 dt$$

כאשר $I^2 dt$ הוא נתון יצרן המאבטח המבטא את הלם החום המרבי שהמאבטח מעביר למוליכים.

שלב תכנון:

א. חישוב זרם קצר תלת מופעי הצפוי במקום התקנת המאבטח וקביעת כושר הניתוק

$$I_{cu} > I_{k(max)}$$

ב. חישוב זרם קצר חד מופעי הנקודה המרוחקת של המעגל - $I_{k(min)}$.

הערות:

1. במקרה של קצר בין מוליך המופע למוליך האפס החישוב יהיה זהה כיוון שאורך

וחתך מוליך האפס במעגל הסופי זהים לזה של מוליך הארקה: $Z_N = Z_{PE}$

2. להתחשב בעליית התנגדות המוליכים לפני הקצר עקב טמפרטורת העמסה

ולשם כך יש להכפיל את התנגדויות של המוליכים במקדם $k=1.3$.

כאשר גודל ומיקום השנאי אינם ידועים, ניתן לחשב את זרם הקצר המזערי בסוף

המעגל הסופי במתקנים המוגנים בשיטת האיפוס לפי הנוסחה:

$$I_{k(min)} = \frac{0.8 * U_{ph}}{1.5(R_{ph} + R_N)} = \frac{0.8 * U_{ph}}{1.5\rho} * \frac{S_{ph} * S_N}{l(S_{ph} + S_N)}$$

ג. חישוב משך הזמן המרבי לניתוק הקצר:

$$t = \left(\frac{k * S}{I_{k(min)}} \right)^2$$

ד. בדיקת זמן ניתוק t_{br} של זרם הקצר $I_{k(min)}$ על ידי המבטח.

ניתן לבדוק את זמן הניתוק על פי אופיין המבטח. זמן זה חייב להיות קטן מהזמן

המחושב, ולא יותר מ-5 שניות:

$$5s \geq t_{br} \leq t$$

באופן מעשי צריך לוודא, שזרם הקצר $I_{k(min)}$ נמצא בתחום אלקטרו-מגנטי (מידי) של

המבטח. בתחום זה המבטח פועל תוך זמן הקטן מ-0.1s.

בדיקת מבטח לעמידה בזרם התנעה:

סוג הצרכן	זרם מעבר (xI_n)	משך זמן זרם המעבר (s)	התייחסות בבחירת גודל מבטח
נורות ליבון	15-20	0.001	אין
נורות פריקה ללא קבלים לשיפור $\cos \varphi$	1-1.6	0.002	אין
נורות פריקה עם קבלים לשיפור $\cos \varphi$	15-20	0.002	מומלץ לבחור מא"ז מסוג "C" לפי: $I_u \geq 1.3 * I_n$
קבלים לשיפור $\cos \varphi$	30-60	0.002	נדרש בתקנות לבחור מבטח לפי: $I_u \geq 1.43 * I_n$
שנאי חלוקה	10-15	0.002-0.004	בחירת נתיך מתח גבוה לפי: $I_u \geq (1.4 - 2) * I_n$
מנוע השראה	5-7	2-5	מומלץ לבדוק לפי התנאי: $I_5'' \geq 1.3 * I_{st}$

התנאי לבחירת מבטח למעגל מנוע: $I_5'' \geq 1.3 * I_{st}$

משמעותו בדיקת אי פעולת המבטח בזרם העולה ב-30% על זרם התנעת המנוע תוך

זמן של 5 שניות.

שיפור גורם ההספק

חישוב הספק וקיבול סוללת הקבלים:

$$Q_c = P(\tan \varphi_{\text{קיים}} - \tan \varphi_{\text{רצוי}})$$

בחיבור קבלים משולש-

$$C_{\Delta} = \frac{Q_c}{Un^2 * 6\pi f}$$

בחיבור קבלים בכוכב-

$$C_Y = \frac{Q_c}{Un^2 * 2\pi f}$$

תכנון קו הזנה לסוללת הקבלים:

$$I_c = \frac{Q_c}{\sqrt{3} * Un}$$

$$I_n \geq 1.43 * I_c$$

נגדי פריקה:

$$U_c = U_{max_0} * \left(e^{-\frac{t}{RC}} \right)$$

$$R = \frac{t}{-\ln \left(\frac{U_c}{U_{max_0}} \right) * C}$$

חישוב פרק זמן להחזרת השקעה בהתקנת סוללת קבלים:

$$C_{W_n} = C_{Q_n}$$

$$C_{Q_n} = b * Q_c \left(1 + \frac{K\%}{100} * n \right).$$

$$C_{W_n} = \Delta W * M * n.$$

$$\Delta W = (\Delta P_1 - \Delta P_2) * t$$

ציוד בלוח חשמל

חישוב פסי צבירה בלוח

שלבי החישוב:

א. בחירת שטח חתך של פסי הצבירה מבחינת העמסת מותרת-
בשלב זה קובעים את חתך הפס ($S(mm^2)$), גובהו ($h(mm)$), ורוחבו ($b(mm)$).
הנתון הקובע הוא הזרם הנתון של המפסק הראשי בלוח החשמל I_n .
הזרם המתמיד המרבי I_z של פסי הצבירה בחתכים השונים נתון בקטלוגים של
היצרנים. יש לבחור את החתך לפי התנאי: $I_z \geq I_n$.

ב. בדיקת עמידות הפס בהלם תרמי-

בשלב הזה בודקים האם החתך הנבחר מספיק בכדי לעמוד בהעמסה תרמית בזרמי
קצר. חתך הפס המינימאלי שיעמוד בהלם תרמי נתון מחושב ע"י הנוסחה הבאה:

$$S = \sqrt{\frac{I_k^2 * t}{k^2}}$$

כאשר:

S - שטח חתך של הפס (mm^2).

I_k - זרם קצר התלת מופעי הצפוי על פסי הצבירה (A).

t - זמן ניתוק הקצר ע"י המפסק הראשי, כאשר המפסק פועל ללא השהיה ניתן לקבוע
כי: $t = 0.1s$. (מומלץ לבדוק את עמידות הפס בזרם קצר לזמן של 3s).

k - מקדם המאפיין את צפיפות הזרם בשניה. עבור נחושת גלויה: $k = 155$.

יש לבדוק שחתך הפס הנבחר בסעיף א' אינו קטן מחתך המינימאלי המחושב בסעיף
זה, ולהגדילו במידה ויש צורך.

ג. בדיקת עמידות הפסים בפני כוחות אלקטרו דינמיים-

בשלב זה קובעים את המרווח המקסימאלי (L) בין 2 המבודדים (בין 2 נקודות החיזוק)
של פס אחד.

העברת זרם דרך פסי הצבירה יוצרת כוחות אלקטרו דינמיים בין הפסים המותקנים
במקביל. ניתן לחשב את הכוח הפועל על פס אחד בעת העברת זרם הלא לפי
הנוסחה הבאה:

$$F = \frac{1.76 * I_{shok}^2 * L}{d * 100}$$

כאשר:

F - הכוח הפועל על פס הצבירה בקטע שבין 2 מבודדים (kgf) (ק"ג כוח).

L - מרווח בין 2 מבודדים של פס אחד (cm).

I_{shok} - זרם הלם (kA).

d - מרחק בין פסים של מופעים שונים (cm).

הכוח F מפעיל על הפס מאמץ כפיפה σ (סיגמא).

$$\sigma = \frac{F * L}{12 * W}$$

כאשר:

σ - מאמץ כפיפה שפועל על הפס (kg/cm^2).

W - מומנט ההתנגדות (cm^3), הנתון ע"י הנוסחה $W = 0.17 * b^2 * h$ כאשר הפסים מותקנים המצב מאונך ו- $W = 0.17 * b * h^2$ כאשר הם מותקנים במצב מאוזן.
 h - גובה הפס (cm).
 b - עובי הפס (cm).

תנאי לעמידת פסי הצבירה בפני כוחות האלקטרו דינמיים הוא שמאמץ הכפיפה לא יעלה על הערך המרבי המותר לנחושת: $\sigma_{max} = 2500 \left(\frac{\text{gk}}{\text{cm}^2} \right)$
 לפי תנאי זה ניתן לחשב את המרחק המרבי בין 2 מבודדים של פס אחד:

$$L_{max} = \sqrt{\frac{\sigma_{max} * 12 * W * d * 100}{1.76 * I_{shok}^2}}$$

לאחר הצבת הערכים נקבל עבור הפסים המותקנים במאונך:

$$L_{max} = 538 * \frac{b}{I_{shok}} * \sqrt{h * d}$$

על המרחק הנבחר בין החיזוקים להיות קטן מהערך המחושב בסעיף זה.
 ד. בדיקת עמידות פסי הצבירה בפני תהודה-

בשלב זה בודקים האם מידות הפס והמרחק בין החיזוקים לא יגרמו לתופעת תהודה במערכת פסי הצבירה. לשם כך יש לחשב את תדירות התהודה הטבעית של פסי הצבירה לפי הנוסחה:

$$f_0 = \frac{112}{L^2} * \sqrt{\frac{E * J}{G}}$$

כאשר:

f_0 - תדירות הטבעית של הפס (Hz).

L - המרחק בין המבודדים (cm).

E - מודול האלסטיות השווה ל- $1.1 * 10^6 \text{ (gk/cm}^2\text{)}$ עבור נחושת.

J - מומנט האינרציה המחושב לפי: $J = \frac{b^3 * h}{12} \text{ (cm}^4\text{)}$ עבור התקנה במאונך.

$J = \frac{h^3 * b}{12} \text{ (cm}^4\text{)}$ עבור התקנה במאוזן.

G - משקל 1cm פס צבירה (kg/cm).

המשקל הסגולי של נחושת הוא: $g_0 = 8.9 * 10^{-3} \left(\frac{\text{gk}}{\text{cm}^3} \right)$, מכאן:

$$G = g_0 * h * b$$

לאחר הצבת הערכים נקבל את הנוסחה הבאה:

$$f_0 = 3.6 * 10^5 * \frac{b}{L^2}$$

כוחות התהודה המסוכנים ביותר מתפתחים בתדרים השווים לתדר הרשת ולמכפלתו. יש לבדוק שהתדירות הטבעית של הפסים אינה בתחומים:
 45-60Hz ו- 80-110Hz. אם מסתבר שהתדירות הטבעית נמצאת באחד מהתחומים המסוכנים, יש לשנות את המרחק L בין המבודדים ושוב לבדוק את החישוב.

מערכות הספק למתח גבוה ועליון

מתירות B (מוליכות קיבולית) מבטאת את קיבוליות הרשת לפי הביטוי:

$$B = \frac{1}{X_c} = \omega * C = \omega * C_0 * l$$

כאשר: l - אורך הקו ב- Km.

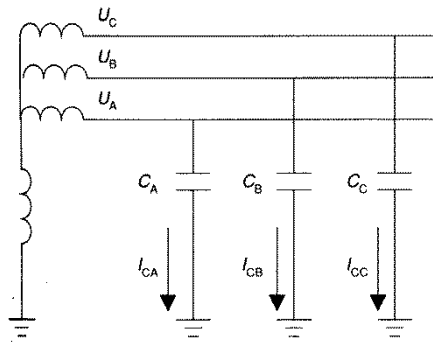
C_0 - קיבולית סגולית $\mu F / Km$.

$$G = \frac{\Delta P_{cor}}{3 * U_{ph}^2}$$

כאשר: G מוליכות האומית של הקו ב- Sm.

ΔP_{cor} - איבודי קורונה Kw / Km .

מערכת עם נקודת האפס מוארכת דרך סליל כיבוי (סליל פטרסון):

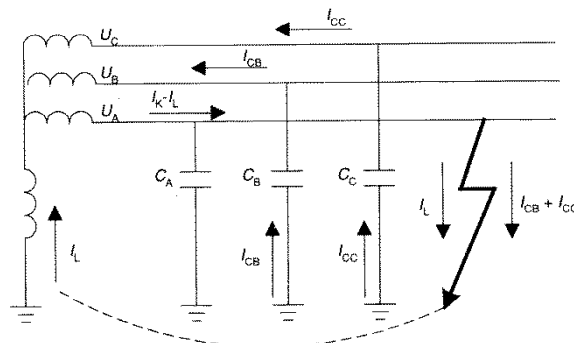


במצב תקין הסכום הוקטורי של 3 הזרמים המופעים הללו שווה ל-0.

$$\vec{I}_{CA} + \vec{I}_{CB} + \vec{I}_{CC} = 0A$$

$$\vec{I}_{CA} + \vec{I}_{CB} + \vec{I}_{CC} = \frac{U_{ph}}{-jX_C}$$

בעת קצר לאדמה במופע A (לדוגמא):



$$U'_B = U'_C = \sqrt{3} * U_{ph}$$

$$\vec{I}_{CB} + \vec{I}_{CC} = \frac{U_L}{-jX_C} = \sqrt{3} * I_C$$

$$I_k = \vec{I}_{CB} + \vec{I}_{CC} = 3 * I_C$$

$$\vec{I}_L = \frac{U_{ph}}{jX_L}$$

$$\vec{I}_C + \vec{I}_L = 0A$$

השפעת ההספק האקטיבי והראקטיבי על תדירות ומתח הרשת:
תדירות הזרם ברשת

$$f = \frac{n * p}{60}$$

עמידות תרמית

$$I_k^2 * t \leq I_{th}^2 * 1sec$$

עמידות דינמית

$$I_{dyn} \geq I_{shok}$$

תאורה

שטף אור-לומן

$$\phi = P * \eta E [lm]$$

נצילות אורית-

$$\eta E = \frac{\phi}{P} \left[\frac{lm}{w} \right]$$

רמת הארה-

$$E = \frac{\phi}{A} [lux]$$

$$E = \frac{I_p * \cos^3 \alpha}{h^2} [lux]$$

עוצמת האור-קנדלה

$$I = \frac{\phi}{\omega} \left[\frac{lm}{sr} = cd \right]$$

$$\omega = 2\pi(1 - \cos \alpha) [sr]$$

בהיקות -קנדלה למ"ר

$$L = \frac{I(cd)}{A(m^2)} = \frac{\rho * E}{\pi} \left[\frac{cd}{m^2} = nit \right]$$

תאורת חוץ:

$$E_p = \frac{I \alpha * \cos^3 \alpha}{h^2} [lux]$$

$$E_p = \sum_{i=1}^n E_{pi} [lux]$$

תאורת פנים:

$$Rc = \frac{2W + L}{6h'}$$

$$n = \frac{E * A * 100}{k * CU * \phi}$$