

## תהליך התאמת הגנה והזנה למתקן חשמלי

### תהליך התחממות של מוליך

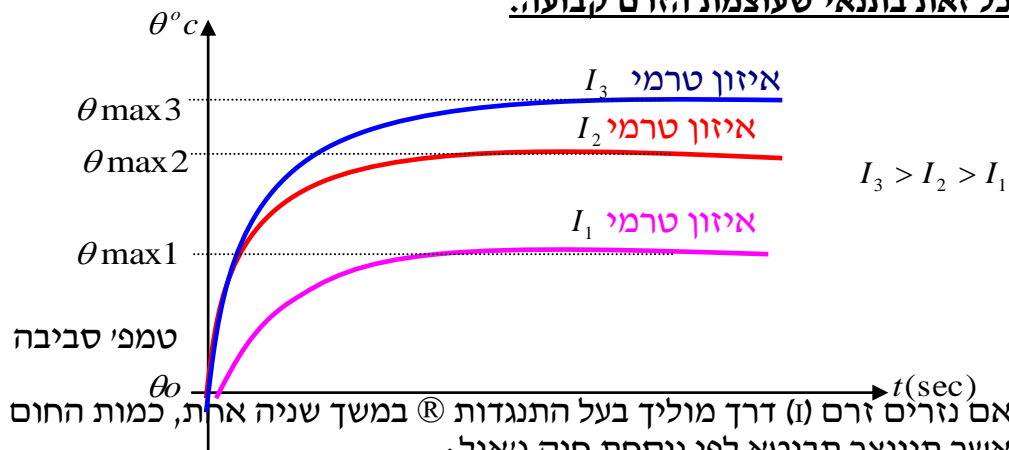
זרם אשר זורם במוליך, גורם ליצירת חום אשר מעלה את הטמפרטורה שלו. אם המוליך היה מבודד בצורה מושלמת, אזי טמפרטורת המוליך הייתה עולה לאין סוף. במציאות, כאשר טמפרטורת המוליך עולה על טמפרטורת הסביבה, מתבצעת מסירת חום מהמוליך לסביבה, אשר גורמת להתקררות התיל. ככל שהטמפרטורה עולה, מסירת החום גם היא גדלה עד אשר נוצר ברגע מסויים יזון טרמי בין החום הנוצר במוליך לסביבה. האיזון הטרמי הוא לעשה מצב שבו החום הנוצר במוליך, נמסר כולו לסביבה, מבלי שיגרום לעליה נוספת של טמפרטורת התיל, דבר זה מתאים למצב בו עוצמת הזרם קבועה. אם נגדיל את הזרם, תעלה גם הטמפרטורה הסופית ולהיפך. מצב האיזון הטרמי מאפשר לקבוע בצורה מקורבת את התלות בין הזרם לבין סוג התיל והטמפרטורה הסופית שאליו יגיע.

כאשר מדברים על שיקול בחירת שטח חתך למוליך, השיקול הנפוץ ביותר לתכנון מערכות חשמל במתקנים למתח נמוך הוא השיקול הטרמי. שיקול זה קובע מה צריך להיות שטח החתך של הקו במשטר עבודה תקין ומה צריכים להיות האמצעים להגן על שטח החתך הנבחר.

בדיקה טרמית, פירושה למצוא את הטמפרטורה ( $\theta$ ) אליה מגיע מוליך נושא זרם  $I$ . לכל מוליך, נתונה טמפרטורה עבודה מקסימלית מותרת בעבודה. טמפרטורה זו תלויה במספר גורמים: תנאי התקנת המוליך, תנאי הסביבה, טמפרטורת התחלתית וסופית, התנגדות טרמית של הקרקע (במידה והמוליך מותקן מתחת לאדמה) וסוג בידוד המוליך.

כל זאת בהנחה שמדובר על עמס רציף וקבוע (אינו משתנה לעורך זמן העבודה). בתרשים הבא מופיעות עקומות חימום של תיל העשוי נחושת בעל שטח חתך  $A$ . מהעקומות ניתן ללמוד מספר דברים על התנהגות המוליך מבחינה טרמית ביחס לזרם הזורם דרכו.

- א. תהליך התחממות המוליך, מרגע מעבר הזרם דרכו, המוליך מעלה את הטמפרטורה שלו בצורה אקספוננציאלית עד לנקודת התייצבות.
  - ב. ככל שעוצמת הזרם גבוהה יותר קצב עליית החום מהיר יותר.
  - ג. ככל שהזרם יהיה גדול יותר טמפרטורת התייצבות תהיה גבוהה יותר.
- כל זאת בתנאי שעוצמת הזרם קבועה.**



$$Q = 0.24 \cdot I^2 \cdot R \cdot t [cal]$$

כאשר מדובר על זמן של שניה נוכל גם לרשום:

$$Q = 0.24 \cdot I^2 \cdot R [cal]$$

Q – כמות החום המתפתחת בתיל בקלוריות

I- הזרם דרך המוליך (A)  
 R- התנגדות המוליך באום.  
 0.24- יחס בין קלוריה לג'אול

כמות החום הנוצרת עקב מעבר הזרם, מתחלק לכמות חום הדרושה לשנות את הטמפ' של המוליך ולכמות החום הנמסרת לסביבה.  
 כמות החום הנמסרת לסביבה בדרך כלל היא של הולכה, קרינה והסעה.  
 כמות החום הנמסרת לסביבה תלויה בשטח דרכו מתפשט החום, היות ושטח החתך של המוליך קטן בהרבה משטח מעטפת התיל והתפשטות דרך הולכה היא זניחה לעומת התפשטות דרך קרינה והסעה.  
 כאמור החום הנמסר לסביבה הוא יחסי לטמפ' של התיל והסביבה ולמעטפת שלו אשר משמשת כשטח קירור.

$$Q_2 = 0.24 \cdot \alpha \cdot A^* \cdot (\tau - \tau_o) [cal]$$

Q2- החום הנמסר לסביבה תוך שניה אחת (בקלוריות).  
 A\* - שטח מעטפת התיל (שטח הקירור בסמ"ר).

$\tau$  - טמפ' התיל

$\tau_o$  - טמפ' הסביבה

$\alpha$  - מקדם פיזור חום בו נכללות כל הדרכים: הולכה, קרינה והסעה

ביחידות:  $\frac{W}{C \cdot cm^2}$

במצב איזון טרמי, החום המיוצר והנמסר שווים.

$$Q_1 = Q_2$$

$$0.24 \cdot I^2 \cdot R = 0.24 \cdot \alpha \cdot A^* \cdot (\tau - \tau_o)$$

$$I^2 \cdot R = \alpha \cdot A^* \cdot (\tau - \tau_o)$$

אם התיל הוא עגול אז מעטפת עיגול מחושבת כך:  $A^* = 10 \cdot \Pi \cdot d \cdot l (cm^2)$

אם התיל בעל מבנה ריבועי (פס צבירה למשל) אזי מעטפתו תחושב לפי:

$$A^* = 2 \cdot (b + a) \cdot 10 \cdot l (cm^2)$$

d קוטר התיל (מ"מ)

l אורך התיל (מ"מ)

A\* - שטח מעטפת המוליך (מ"מ)

a אורך צלע פני המוליך הריבועי (מ"מ)

b רוחב צלע פני המוליך הריבועי (מ"מ)

$$R = \frac{\delta \cdot \ell}{A} \left[ \frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \right] : \text{מאחר וידוע שהתנגדותו של מוליך מחושבת כך:}$$

A - שטח פני המוליך מ"מ

$$A = \frac{\Pi \cdot d^2}{4} [mm^2] : \text{עבור מוליך עגול שטחו יחושב לפי:}$$

$$A = a \cdot b \text{ עבור מוליך ריבועי שטחו יחושב לפי מכפלת הצלעות}$$

כעת נציב את הנתונים בנוסחא :  
 $I^2 * R = \alpha * A * (\tau - \tau_0)$

$$I^2 * \frac{\delta \cdot \ell}{A} = \alpha * 10 * \Pi * d * l * (\tau - \tau_0)$$

$$I^2 * \frac{\delta \cdot \ell}{\frac{\Pi * d^2}{4}} = \alpha * 10 * \Pi * d * l * (\tau - \tau_0)$$

$$I^2 * \frac{\delta \cdot \ell \cdot 4}{\Pi \cdot d^2} = \alpha * 10 * \Pi * d * l * (\tau - \tau_0) \quad \text{ומקבל:}$$

$$I^2 * \delta * \ell * 4 = \Pi^2 * d^3 * \alpha * 10 * l * (\tau - \tau_0)$$

$$I^2 = \frac{10 * \alpha * \Pi^2 * d^3 * (\tau - \tau_0)}{\delta * 4}$$

$$K = \frac{10 * \alpha * \Pi^2}{4} \quad \text{אם נסמן ש:}$$

$$I^2 = \frac{K * d^3 * (\tau - \tau_0)}{\delta} \quad \text{נקבל ש:}$$

$$I^2 = g * K * d^3 * (\tau - \tau_0) \quad \text{או שנקבל:}$$

$$I = \sqrt{K * g * d^3 * (\tau - \tau_0)} \quad \text{ולכן בתוצאת החישוב נקבל:}$$

כאשר :  $d$  - קוטר התיל מ"מ  
 מוליכות חומר התיל

$g$

$K$  קבוע

$\tau$  טמפי' סופית (תלויה בסוג הבידוד)

$\tau_0$  טמפי' הסביבה (תלויה במקום ההתקנה)

כאשר יש צורך בקביעת שטח חתך של מוליך, יש מיגבלות טמפי' מאחר ומוליך אינו יכול להתחמם לאין סוף, כמו כן הטמפי' הסופית שלו תלויה בסוג הבידוד והיא שמגבילה את גודל העומס המותר בתיל (את הזרם).

את התלות הזו אנו יכולים לראות בנוסחא הבאה :

$$I = \sqrt{K \cdot g \cdot d^3 \cdot (\tau - \tau_0)}$$

יצרני הכבלים מגדירים את הטמפ' המירבית המותרת בהתאם לסוג הבידוד.

טמפ' מירבית מותרת	סוג הבידוד
80° C	תיילים חשופים ברשת עילית (ללא בידוד)
65° C	תיילים חשופים המותקנים בבניינים
70° C	בידוד P.V.C
90° C	בידוד XLPE
60° C	בידוד סיבי גומע
65° C	כבלים תת קרקעיים עד 3KV

אם נניח את הטמפ' המתאימות לסוג הבידוד והחומר ממנו עשוי התיל, אפשר לחשב עבור כל שטח חתך תקני את הזרם המירבי המותר אשר לא יגרום לעליית הטמפ' בתיל מעל המותר מבחינת הבידוד. נתונות טבלאות אשר בהן מרוכזות תוצאות חישובים עבור התאמת זרמים בהתאם לסוג הבידוד, סוג המוליך ואופן התקנתו (קיימים מס' סוגי התקנה המוגדרים בחוק החשמל) טבלאות אלו ניתן לראות בחוק החשמל לדוגמא:

### ערכי זרם מירבי של מוליך לפי שיטת התקנתו

#### טבלה 70.1

שיטות התקנה: א', ב', ד', ה', ו' ו-ז'

מוליכים מנחושת – בידוד עד 70° C

מוליכים מנחושת					
טבלה מס' 1 מעגל חד מופעי			טבלה מס' 1 מעגל תלת מופעי		
נתוך $I_n$ אמפר	זרם מירבי $I_z$	חתך ממ"ר	נתוך $I_n$ אמפר	זרם מירבי $I_z$	חתך ממ"ר
10	16	1.5	10	14	1.5
16	22	2.5	13	19	2.5
20	29	4	20	26	4
25	38	6	25	33	6
50	53	10	40	46	10
63	70	16	50	63	16
80	94	25	63	82	25
100	116	35	80	103	35
125	140	50	100	124	50
160	178	70	125	159	70
200	215	95	160	192	95
224	250	120	200	222	120

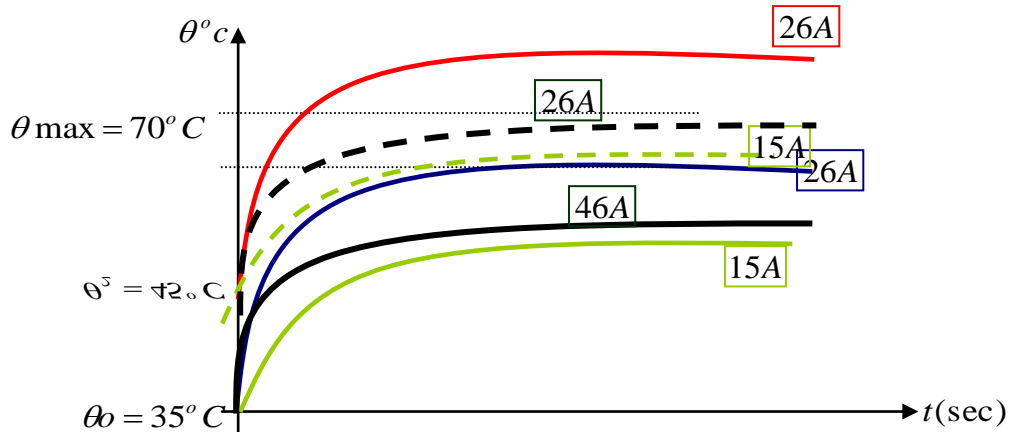
טבלה זו מתאימה עבור טמפ' סביבה של  $\tau = 35^\circ C$

כאשר הטמפ' המירבית המותרת היא  $T_2 = 70^\circ C$

הטבלה הנ"ל היא אחת ממס' טבלאות.

יש לציין שנתוני הטבלה מתאימים למצב בו הטמפי' בסביבה היא עד  $35^{\circ}C$  כאשר מדובר על התקנת המוליך בטמפי' אחרת, נתוני הטבלה אינם מתאימים ולכן יש לחשב את הזרם המירבי המותר להעביר דרך המוליך בטמפי' האחרת. מובן שבטמפי' גבוהה יותר הזרם המירבי המותר יהיה נמוך יותר ולהיפך. כדי להבין זאת נתבונן במצב הבא :

אם נשתמש במוליך בעל שטח חתך של 4 ממ"ר בטמפי' של עד  $35^{\circ}C$  הזרם המירבי המותר יהיה (עבור מעגל תלת פאזי)  $I_z = 26A$  (כאשר ערך הזרם קבוע) בתחילה המוליך נמצא בטמפי' החדר והוא מתחיל להתחמם עקב הזרם דרכו. תהליך עליית הטמפי' במוליך הינו תהליך אקספוננציאלי (עקום) ולא מיידי והתהליך נמשך עד למצב התייצבות טמפי' המוליך (הגרף הכחול). אולם אם הטמפי' בחדר הינה  $45^{\circ}C$  משמעות הדבר שהטמפי' ההתחלתית של המוליך הינה טמפי' החדר ולכן למרות שיזרום דרכו אותו ערך של זרם (26A) הגרף יתחיל מטמפי' החדר ( $45^{\circ}C$ ) ונבחין שטמפי' ההתייצבות תעבור את הערך המירבי של הטמפי' המותרת והדבר יגרום לפגיעה במוליך (הגרף באדום).



במצב שבו טמפי' ההתחלתית גבוהה יותר יוגבל ערך הזרם המירבי המותר לאותו מוליך לערך נמוך יותר. בעזרת חישוב ניתן למצא את ערך הזרם המירבי המותר בטמפי' אחרת. במקרה שלנו, אם נבחר במוליך של 4 ממ"ר ונגביל את זרם שלו עד 15A במצב רגיל נקבל גרף נמוך יותר (הגרף הירוק), אך אם נתקין את המוליך בטמפי' של 45 מעלות נקבל גרף גבוה יותר (גרף ירוק מקווקו) אך הטמפי' של המוליך תהיה נמוכה יותר מהערך המירבי המותר של הטמפי'.

במקרה בו טמפי' החדר גבוהה יש להבין שכמות הזרם המירבית דרך אותו מוליך יהיה נמוך יותר ובמידה וערך זה לא יתאים לזרם הצרכן שיהיה גבוה יותר, יש לקחת שטח חתך גדול יותר ואז במידה וניקח מוליך למשל של 10 ממ"ר שלו הזרם המירבי הוא 46 אמפר (הגרף השחור) ונציבו בטמפי' חדר של 45 מעלות אך נעביר דרכו 26 אמפר הטמפי' שיגיע בהתייצבות עם אותו זרם יהיה נמוך מ 70 מעלות (הגרף השחור מקווקו).

### הערה:

חשיבות נוספת יש לנושא מיקום ואופן ההתקנה שאף הם גורמים להגבלת הזרם המירבי המותר דרך המוליך. לצורך כך יש להתחשב בגורמי תיקון, אליהם נתייחס בהמשך.

כאמור קיימות טבלאות, אך ניתן לבצע חישוב מהיר על פי נוסחא, ולמצא עבור כל עומס בתנאים שונים (כולל בסוג מוליך שונה) את הזרם המירבי המותר דרך אותו מוליך.

למשל :

$$g_{AI} = 35 \frac{m}{\Omega \cdot mm^2} : \text{ ידוע שמוליכות אלומיניום שווה ל:}$$

$$g_{CU} = 57 \frac{m}{\Omega \cdot mm^2} : \text{ ידוע שמוליכות נחושת שווה ל:}$$

אם ברשותנו מוליך מנחושת המבודד בבידוד P.V.C כאשר המוליך בעל שטח חתך של 16 מ"מ"ר כאשר קוטרו הוא  $d = 4.5mm$  הזרם המירבי המותר דרכו יחושב במצב רגיל:

$$I_{CU} = \sqrt{K \cdot 57 \cdot 4.5^3 \cdot (70 - 35)}$$

אם ברצוננו לדעת מהו העומס המותר על מוליך אלומיניום הנמצא באותם תנאים ובעל אותו שטח חתך כאשר הנוסחא עבור אלומיניום הינה :

$$I_{AL} = \sqrt{K \cdot 35 \cdot 4.5^3 \cdot (70 - 35)}$$

נמצא את היחס בין הנוסחאות כדי למצא את יחס העמסה.

$$\left( \frac{I_{CU}}{I_{AL}} \right)^2 = \frac{K \cdot 57 \cdot 4.5^3 \cdot (70 - 35)}{K \cdot 35 \cdot 4.5^3 \cdot (70 - 35)}$$

לאחר צמצום נקבל את היחס :

$$\frac{I_{CU}}{I_{AL}} = \sqrt{\frac{g_{CU}}{g_{AI}}}$$

לכן אם ידוע שעבור מוליך נחושת בעל שטח חתך של 16 מ"מ"ר הזרם המירבי המותר דרכו יהיה 57 אמפר לעומת זאת עבור מוליך אלומיניום בעל אותם נתונים יהיה מותר להעביר דרכו זרם מירבי של 45 A את זאת ניתן לראות בחישוב הבא :

$$I_{AL} = I_{CU} \cdot \sqrt{\frac{g_{AL}}{g_{CU}}}$$

$$I_{AL} = 57 \cdot \sqrt{\frac{35}{57}} = 45A$$

מכאן שניתן לחשב את ערכי הזרם ביחס למוליכי נחושת או אלומיניום כך :

$$I_{AL} = I_{CU} \cdot \sqrt{\frac{g_{AL}}{g_{CU}}}$$

$$I_{CU} = I_{AL} \cdot \sqrt{\frac{g_{CU}}{g_{AL}}}$$

## מציאת זרם מירבי במוליך בהתאם לטמפ' האופפת אותו

למציאת הזרם המותר במוליך בטמפ' שונות ניתן להיעזר בנוסחא הבאה ( מעבר לשימוש בטבלאות).

$$\frac{I'_{T1}}{I_{T1}} = \sqrt{\frac{T_2 - T_1'}{T_2 - T_1}}$$

$I'_{T1}$  זרם מותר בטמפ' הסביבה האמיתית  
 $I_{T1}$  זרם מותר בטמפ' שהטבלה מותאמת  
 $T_1$  טמפ' סביבה שעבורה בנויה הטבלה  
 $T_1'$  טמפ' הסביבה במציאות  
 $T_2$  טמפ' מירבית מותרת בדרך כלל 90 מעלות צלסיוס עבור XLPE

### תרגיל דוגמא:

נתון מוליך נחושת בעל שטח חתך של 50 ממ"ר בהתאם לטבלה 70.1 במדריך לחשמלאי של "דונויבסקי" הזרם המירבי המותר הוא 123 אמפר עבור טמפ' סביבה של 35 מעלות כאשר הטמפ' המרבית היא 70 מעלות. מה יהיה הזרם המירבי המותר שניתן להעביר דרכו אם נמצא שטמפ' הסביבה הינה 60 מעלות צלסיוס?

$$I'_{T1} = I_T \cdot \sqrt{\frac{T_2 - T_1'}{T_2 - T_1}}$$
$$I'_{T1} = 123 \cdot \sqrt{\frac{70 - 60}{70 - 35}} = 65.7 A$$

כתוצאה מטמפ' סביבה גבוהה, מוגבל הזרם דרך המוליך ל- 65.7 אמפר. אנו רואים שבטמפ' גבוהה קיימת הגבלה לזרם המותר לכן לעיתים אם הזרם המחושב המותר בתנאים החדשים נמוך מידי, יש להגדיל את שטח החתך.

### תרגיל דוגמא:

בכבל תת קרקעי בעל שטח חתך של 10 ממ"ר, מותר להזרים זרם מירבי של 63 אמפר בטמפ' 35 מעלות צלסיוס. בהנחה שטמפ' הסביבה הינה בת 25 מעלות והטמפ' המירבית המותרת הינה 65 מעלות צלסיוס. מצא לאיזו טמפ' יגיע המוליך אם יזרום דרכו זרם של 76 אמפר באותם תנאים?

$$\frac{I'_{T1}}{I_{T1}} = \sqrt{\frac{T_2 - T_1'}{T_2 - T_1}}$$
$$\left(\frac{I'_{T1}}{I_{T1}}\right)^2 = \frac{T_2 - T_1'}{T_2 - T_1}$$
$$\left(\frac{76}{63}\right)^2 = \frac{T_2 - 25}{65 - 25}$$
$$1.455 = \frac{T_2 - 25}{40}$$
$$58.2 = T_2 - 25$$
$$T_2 = 58.2 + 25 = 83.2^\circ C$$

את הביטוי בתוך השורש ניתן לבטא כ מקדם טמפי שמסומן ב-  $K_T$

$$K_T = \sqrt{\frac{T_2 - T_1'}{T_2 - T_1}}$$

$$\frac{I_{T1}'}{I_T} = K_T \quad \text{דהיינו}$$

מקדם זה המהווה מקדם תיקון טמפי, ניתן למצא בטבלאות תיקון והוא אחד מתוך 5 מקדמי תיקון.

### מקדמי תיקון ( $K_{15} - K_{20}$ )

הטמפי מהווה גורם המשפיעה על ערך הזרם המירבי המותר להעביר דרך המוליך. למדנו שערכי הזרמים המירביים הנתונים בטבלה מתאימים לתנאי בו הטמפי האופפת הינה 35 מעלות. כל זאת בתנאים אידיאליים (כבל בודד, מאוורר והמותקן בהתקנה גלויה) אולם קיימים מצבים אחרים אשר משפיעים על התחממות/קירור המוליך ובכך מצריכים חישוב התאמה לזרם המירבי בהתאם לתנאי המקום. על כן מקומם של מקדמי התיקון אשר מיועדים לאפשר חישוב הזרם המירבי. מקדמי התיקון נתונים בטבלאות במדריך לחשמלאי של דונייבסקי. קיימים 6 מקדמים. (כל מקדם שאינו מתאים לתנאי ההתקנה, ערכו יהיה שווה ל- 1)

- K15 – מקדם התקנת מוליכים מבודדים או כבלים חד גידיים ללא רווח ביניהם.
- K16 – מקדם התקנת כבלים רב גידיים ללא רווח ביניהם.
- K17 – מקדם טמפי אופפת של האויר (למדנו גם לחשב בעמוד הקודם)
- K18 – מקדם טמפי של האדמה (עבור התקנה תת קרקעית)
- K19 – מקדם התקנת כבלים אחדים באדמה
- K20 – מקדם התנגדות התרמית הסגולית באדמה (בהתקנה תת קרקעית)

את הזרם המירבי המותר בתנאים אשר כוללים שימוש במקדמי תיקון מחשבים כך?

$$I_Z' = I_Z \cdot K_{15} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot K_{18} \cdot K_{19} \cdot K_{20}$$

- במידה והערכי המקדמים קטנים מ-1 נקבל זרם מותר נמוך יותר
- במידה וערכי המקדמים גדולים מ-1 נקבל זרם מירבי גבוה יותר ומשמעותו אפשרות להעמסת יתר של המוליך, מעל הערך המירבי הנתון בטבלאות.

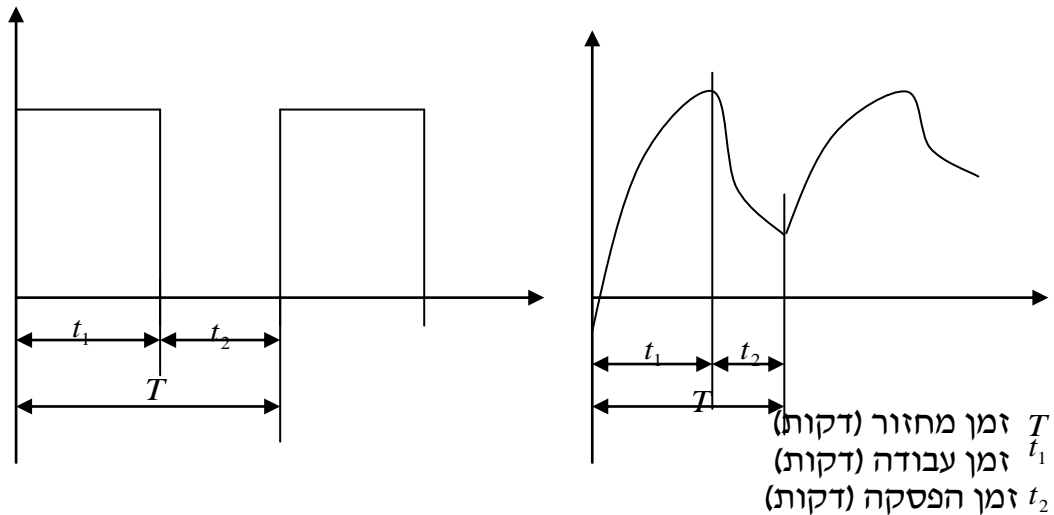
כאשר נתון צרכן אשר מותקן בתנאים הדורשים התערבות מקדמי תיקון, קל יהיה למצא את המוליך המתאים בתנאים המגבילים אם נשתמש בנוסחא באופן הבא:

$$I_Z' = \frac{I_Z}{K_{15} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot K_{18} \cdot K_{19} \cdot K_{20}}$$

## בחירת שטח חתך להזנת מיתקן המופעל בהפעלה מתוזמנת

בתהליך עבודה רציף הזרם במוליך קבוע ולכן טמפי המוליך מתייצבת לערך מסויים בהתאם לעוצמת הזרם. במצב זה מוגבל הזרם לערך מירבי מותר. אולם כאשר מתקן פועל במחזוריות, קיים זמן שבו זרם לא עובר דרך המוליך והוא מתקרר, ולאחר פרק זמן ממשיך לעבוד פרק זמן נוסף עד לעצירה. במיקרה ובו מתקן פועל במחזוריות, המוליך מצליח להתקרר ולכן אינו מגיע לערכי התחממות ואפילו ערך יציב. במקרה זה ניתן להשתמש במוליך בעל שטח חתך קטן יותר ורק כאמור אם מדובר על עבודה מחזורית. בצורה זו משתמשים במוליך שאמנם מתחמם יותר אך עדיין בגלל ההפסקות אינו מגיע לערכי חום מרביים.

### דוגמאות של תרשימי עבודה מחזוריים

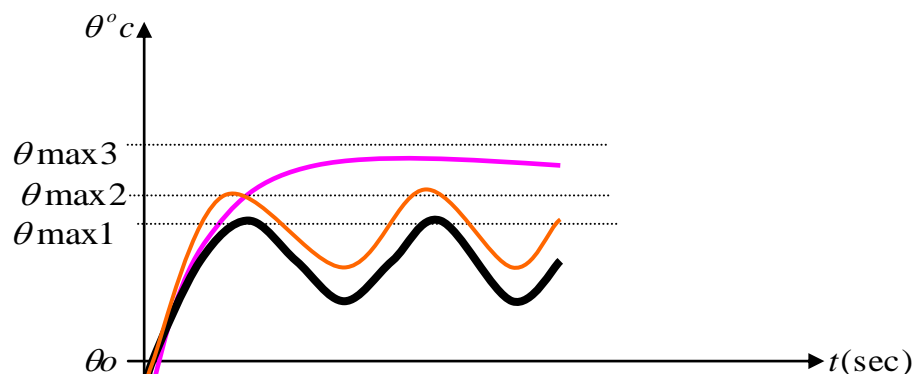


חישוב הזרם המירבי המותר להעביר דרך מוליך בהפעלה מחזורית יחושב כך:

$$I_Z' = I_n \cdot C$$

$I_Z'$  זרם מירבי מותר בהפעלה מחזורית  
 $I_n$  זרם מירבי מותר בהפעלה קבועה (יש להתחשב גם בתנאי חום סביבה אם צריך)  
 $C$  מקדם הפחתה של עבודה מחזורית

$$C = \frac{0.875}{\sqrt{\frac{t_1}{T}}}$$



כאן ניתן לראות שבהפעלה עם זרם קבוע, הטמפ' עולה לערך מסויים ומתייצבת (אופיין וורוד) אולם בהפעלה מחזורית הטמפ' המירבית אינה מגיעה לערך גבוה מאחר ולמנוע יש הפסקות עבודה שבעקבותיהן טמפ' המוליך יורדת (אופיין שחור). לכן ניתן לנצל מוליך בעל שטח חתך קטן יותר, אמנם הוא יתחמם יותר אך לא יעלה את הערך המירבי של הטמפ' המותרת (הגרף בכתום).

## תנאי בדיקת התאמת אמצעי הגנה והזנה לציוד חשמל

קיימים שני תנאים עיקריים לבדיקת התאמת אמצעי הגנה והזנה לציוד חשמלי. שני התנאי מיועדים להגנה בפני התחממות יתר של המוליכים.

א. תנאי המקיים :  $I_z \geq I_n \geq I_b$

$I_b$  זרם הצרכן

$I_n$  זרם נומינלי של המפסק או נתיך

$I_z$  זרם מירבי של המוליך

ב. תנאי זרם בדיקה גבוה :

לגבי נתיכים או מפסקים אוטומטים זעירים אופיין L

לגבי מפסקים אוטומטים זעירים מסוג B או C

לגבי מפסקים אוטומטיים

$$I_2 \leq 1.45 * I_z$$

$$I_2 \leq 1.3 * I_z$$

$$I_2 \leq 1.15 * I_z$$

זרם הבדיקה הגבוה  $I_2$  ילקח מתוך הטבלה הבאה :

$I_2$ (A) זרם בדיקה גבוה	$I_n$ (A) זרם המבטח	סוג המבטח
$1.45 * I_n$	כל הערכים	מא"ז B או C
19 43.8 - 35 - 28 $1.6 * I_n$	10 25 - 20 - 16 35 ומעלה	מא"ז L או נתיך g:l
$1.15 * I_n$	כל הערכים	מפסק אוטומטי הניתן לכיוון

## דוגמאות חישוב בהתאם לתנאי עבודה והתקנה שונים

**א. דוגמא לחישוב וקביעת הגנה והזנה לצרכן תלת פאזי יחיד במצב התקנה של הכבל בתוך תעלה המתקנת על הטיח כשהטמפ' האופפת את הכבל היא עד 35 מעלות צלסיוס**

נתונה מחרטה בעלת מנוע תלת פאזי, הפועלת בהספק של 18HP בנצילות של 85% ובמתח קווי של 400 וולט.

המכונה פועלת במקדם הספק השראתי של 0.87. בחר מפסק הגנה מתאים ושטח חתך למוליכי ההזנה.

תחילה נחשב את הספק המנוע

$$P_1 = \frac{P_2 \cdot 736}{\eta} \cdot 100 = \frac{18 \cdot 736}{85} \cdot 100 = 15585.88W$$

$$\cos\varphi = 0.87 \Rightarrow \varphi = 29.54 \Rightarrow \tan\varphi = 0.566$$

$$Q_1 = P_1 \cdot \tan\varphi = 15585.88 \cdot 0.566 = 8832.92VAR$$

כעת נחשב את הזרם שצורך המתקן:

$$I_b = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} = \frac{15585.88}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0.87} = 25.85A$$

להגנת המתקן נשתמש במפסק מסוג מא"ז תלת מופעי דגם C (דגם זה מיועד למנועים) בזרם נומינלי של  $I_n = 32A$  בחירה המקיימת את התנאי ש:  $I_n \geq I_b$

כעת יש להתאים כבל להזנת הצרכן. לצורך כך יש להיעזר בטבלאות על פי סוג ההתקנה וסוג המוליך והמעגל. נבחר לצורך החישוב בהתקנה א' (התקנת כבל בתוך תעלה גלויה) ובטבלה 70.1.

המוליך המתאים הינו מוליך מנחשת בעל זרם מירבי של  $I_z = 33A$  זהו מוליך בעל שטח חתך של 6 ממ"ר.

בחירה זו מקיימת את התנאי של:  $I_z \geq I_n$

כאמור נקיים את התנאי  $33 > 32 > 25.8$

$$I_z \geq I_n \geq I_b$$

כעת נבדוק תנאי נוסף לבדיקת הבחירה הנ"ל וזהו בדיקת "זרם בדיקה גבוה"  $I_2$  מאחר והבחירה היא הגנה ע"י מא"ז דגם C התנאי המדובר לפי טבלה עומד על:

$$I_2 \leq 1.3 \cdot I_n$$

על פי הטבלה, נחשב את ערכו של  $I_2$  עבור מא"ז מסוג C שיהיה:

$$I_2 = 1.45 \cdot I_n$$

$$I_2 = 1.45 \cdot 32 = 46.4A$$

$$46.4 > 42.9$$

$$I_2 > 1.3 \cdot I_z$$

כעת נחשב את הערך  $1.3 \cdot 33 = 42.9$

התוצאות המתקבלות אינן עומדות בתנאי השני משום ש

תוצאות אלו אינן מקיימות את התנאי שבו  $I_2 \leq 1.3 \cdot I_z$

על כן עלינו לבחור מוליך בעל שטח חתך גדול יותר אשר יאפשר עמידה בתנאי C.

לכן בהתאם לטבלה במדריך לחשמלאי, התקנה א', טבלה 70.1, נבחר מוליך בעל זרם מירבי של 46A כלומר מוליך בעל שטח חתך של 10 ממ"ר.

מבחינת התנאי הראשון, אנו רואים שהתנאי מתקיים.

$$46 > 32 > 25.8$$

$$I_Z \geq I_n \geq I_b$$

נבדוק כעת את התנאי השני תנאי זרם בדיקה גבוה.

$$I_2 \leq 1.3 * I_n$$

$$I_2 = 1.45 * I_n$$

$$I_2 = 1.45 * 32 = 46.4A$$

$$1.3 * 46 = 59.8$$

$$46.4 < 59.8$$

$$I_2 \leq 1.3 * I_Z$$

כעת אנו מבחינים שהתוצאה מקיימת את התנאי כלומר

להגנה טרמית על המנוע, נתקין יחידת O.L אשר תכוייל לערך הנומינלי של זרם המנוע.

לסיכום: להגנה על המנוע נבחר מא"ז תלת מופעי מסוג C 3x32A

להזנת המנוע נבחר כבל מסוג XLPE 4x10mm<sup>2</sup>

להגנה בפני עומס יתר, נתקין יחידת O.L אשר תכוייל לזרם של 26A

## **ב. דוגמא לחישוב וקביעת הגנה והזנה של צרכן תלת פאזי התקנת הכבל המזין בתוך תעלה המותקנת על הטיח כשהטמפ' האופפת את הכבל היא 45 מעלות צלסיוס.**

מנוע תלת מופעי צורך 23 אמפר.

כבלי ההזנה למנוע מותקנים בהתקנה תת קרקעית כאשר טמפ' הסביבה בתעלה הינה 45 מעלות

מצא את ההגנה וההזנה המתאים למנוע זה.

להגנת המנוע נשתמש במפסק מסוג מא"ז תלת מופעי דגם C (דגם זה מיועד

למנועים) בזרם נומינלי של  $I_n = 25A$  בחירה המקיימת את התנאי ש:  $I_n \geq I_b$

כעת יש להתאים כבל להזנת הצרכן. לצורך כך יש להיעזר בטבלאות על פי סוג ההתקנה וסוג המוליך והמעגל. נבחר לצורך החישוב בהתקנה א' (התקנת כבל בתוך תעלה גלויה) ובטבלה 70.1.

במצב רגיל המוליך המתאים הינו מוליך מנחושת בעל זרם מירבי של  $I_Z = 26A$  זהו מוליך בעל שטח חתך של 4 ממ"ר.

בחירה זו מקיימת את התנאי של:  $I_Z \geq I_n$

כאמור נקיים את התנאי  $26 > 25 > 23$

$$I_Z \geq I_n \geq I_b$$

במצב רגיל שבו ההתקנה בתעלה (התקנה א' בדונייבסקי בטבלה 70.1) ובטמפ' של 35 מעלות הזרם המירבי המתאים הינו 26 אמפר וזהו כבל של 4 ממ"ר.

והיינו ממשיכים בבדיקת תנאי שני תנאי זרם בדיקה גבוה.

אולם מאחר ומדובר על תנאי התקנה מגבילים, מוליך זה יתאים להעברה

מקסימלית של זרם בגודל של :  $I'_Z = 26 * 1 * 1 * 0.85 * 1 * 1 * 1 = 22.1A$   
כאמור לפי טבלה מקדם הטמפי הינו 0.85 .  
כמובן ניתן גם לחשבו על פי הנוסחה הנ"ל כך :

$$K\tau = K_{17} = \sqrt{\frac{70 - 45}{70 - 35}} = 0.845$$

וזהו תוצאה הזוהה לזו של הטבלה.

אנו רואים שבתנאים האמורים עוצמת הזרם המרבית המותרת דרך המוליך תוגבל  
ל 22.1 אמפר וכמובן זה אינו מתאים לדרישה לחיבור לצרכן שצורך 23 אמפר.  
לכן כדי להתאים את המוליך המתאים נמצא את הערך המרבי של המוליך כך?

$$I'_Z = \frac{26}{1 * 1 * 0.85 * 1 * 1 * 1} = 30.58A$$

עלינו למצא בטבלה מוליך שלו זרם מירבי גדול או שווה ל 30.58 אמפר.  
לכן לצורך זאת נבחר מוליך שלו זרם מירבי של 33 אמפר וזהו מוליך בעל שטח חתך  
של 6 מ"מ"ר.

כדי לדעת בתנאים המדוברים האם מוליך זה מתאים להזנת המנוע, נחשב שוב את  
הזרם המירבי אך הפעם עם המוליך החדש :  $I'_Z = 33 * 1 * 1 * 0.85 * 1 * 1 * 1 = 28.05A$   
כלומר בתנאים האמורים מותר להעביר דרכו עד 28 אמפר וזה מתאים לחיבור מנוע  
הצורך 23 אמפר.

ולכן התנאי  $I_Z \geq I_n \geq I_b$   $28.05 \geq 25 \geq 23$  מתקיים.

כעת נבדוק תנאי נוסף לבדיקת הבחירה הנ"ל וזהו בדיקת " זרם בדיקה גבוהה "  $I_2$   
מאחר והבחירה היא הגנה ע"י מא"ז דגם C התנאי המדובר לפי טבלה עומד על :

$$I_2 \leq 1.3 * I_n$$

על פי הטבלה, נחשב את ערכו של  $I_2$  עבור מא"ז מסוג C שיהיה :

$$I_2 = 1.45 * I_n$$

$$I_2 = 1.45 * 25 = 36.25A$$

כעת נחשב את הערך  $1.3 * 28.05 = 36.465$   $36.25 < 36.465$

התוצאות המתקבלות עומדות בתנאי השני  $I_2 < 1.3 * I_Z$

תוצאות אלו מקיימות את התנאי שבו  $I_2 \leq 1.3 * I_Z$  תנאי זרם הבדיקה הגבוהה

להגנה טרמית על המנוע, נתקין יחידת O.L אשר תכוייל לערך הנומינלי של זרם  
המנוע.

לסיכום : להגנה על המנוע נבחר מא"ז תלת מופעי מסוג C  $3 \times 25A$

להזנת המנוע נבחר כבל מסוג XLPE  $4 \times 6mm^2$

להגנה בפני עומס יתר, נתקין יחידת O.L אשר תכוייל לזרם של 23A

**ג. דוגמא לחישוב וקביעת הגנה והזנה של שלושה צרכנים תלת פאזיים המוזנים באמצעות כבלים מסוג XLPE בתעלה המותקנת על הטיח כשהטמפ' האופפת את הכבלים היא 45 מעלות צלסיוס.**

נתונים שלושה מנועים תלת פאזיים זהים. כל מנוע צורך 23 אמפר. כבלי ההזנה מותקנים יחדיו בתוך תעלה (3 כבלים צמודים) כאשר טמפ' בתעלה הינו 45 מעלות. מצא את המוליך המתאים להזנת הצרכן.

להגנת כל מנוע נשתמש במפסק מסוג מא"ז תלת מופעי דגם C (דגם זה מיועד למנועים) בזרם נומינלי של  $I_n = 25A$  בחירה המקיימת את התנאי ש:  $I_n \geq I_b$

כעת יש להתאים כבל להזנת הצרכן. לצורך כך יש להיעזר בטבלאות על פי סוג ההתקנה וסוג המוליך והמעגל. נבחר לצורך החישוב בהתקנה א' (התקנת כבל בתוך תעלה גלויה) ובטבלה 70.1. במצב רגיל המוליך המתאים הינו מוליך מנחושת בעל זרם מירבי של  $I_z = 26A$  זהו מוליך בעל שטח חתך של 4 ממ"ר. בחירה זו מקיימת את התנאי של:  $I_z \geq I_n$  כאמור נקיים את התנאי  $26 > 25 > 23$   $I_z \geq I_n \geq I_b$

אולם במקרה שלנו עלינו להתחשב בהתקנה המגבילה (כמות מוליכים בתעלה ובטמפ' האופפת אותם) אשר מובילה לכך שמוליך של 4 ממ"ר ניתן להעביר דרכו זרם של:  $I'_z = 26 * 1 * 0.73 * 0.85 * 1 * 1 * 1 = 16.133A$  זרם זה אינו מתאים לחיבור לצרכן לכן נמצא את המוליך המתאים כך:

$$I'_z = \frac{26}{1 * 0.73 * 0.85 * 1 * 1 * 1} = 41.9A$$

מוליך שלו זרם מירבי 46 אמפר בשטח חתך של 10 ממ"ר יתאים להזנת כל מנוע. נבדוק זאת ע"י חישוב הזרם המירבי המותר למוליך זה בתנאים המגבילים:

$$I'_z = 46 * 1 * 0.73 * 0.85 * 1 * 1 * 1 = 28.5A$$

אנו רואים שעוצמת זרם זו מתאימה להזנת צרכן הצורך 23 אמפר המוגן באמצעות מא"ז תלת פאזי 3\*25A, דגם C, כאשר כבל ההזנה שלו מותקן בתעלה אחת עם עוד שני כבלים נוספים והטמפ' האופפת היא 45 מעלות צלסיוס בעל זרם מירבי של 46A.

כדי לדעת בתנאים המדוברים האם מוליך זה מתאים להזנת המנוע, נחשב שוב את הזרם המירבי, אך הפעם עם המוליך החדש:  $I'_z = 46 * 1 * 0.73 * 0.85 * 1 * 1 * 1 = 28.54A$

ולכן התנאי מתקיים.  $28.54 \geq 25 \geq 23$

כעת נבדוק תנאי נוסף לבדיקת הבחירה הנ"ל וזהו בדיקת " זרם בדיקה גבוה"  $I_2$  מאחר והבחירה היא הגנה ע"י מא"ז דגם C התנאי המדובר לפי טבלה עומד על:

$$I_2 \leq 1.3 * I_n$$

על פי הטבלה, נחשב את ערכו של  $I_2$  עבור מא"ז מסוג C שיהיה:

$$I_2 = 1.45 * I_n$$

$$I_2 = 1.45 * 25 = 36.25A$$

$$36.25 < 37.102$$

$$I_2 < 1.3 * I_z$$

כעת נחשב את הערך  $1.3 * 28.54 = 37.102$  התוצאות המתקבלות עומדות בתנאי השני

תוצאות אלו מקיימות את התנאי שבו  $I_2 \leq 1.3 * I_z$  תנאי זרם הבדיקה הגבוה

להגנה טרמית על המנוע, נתקין יחידת O.L אשר תכוייל לערך הנומינלי של זרם המנוע.

לסיכום: להגנה על כל המנוע נבחר מא"ז תלת מופעי מסוג C  $3 \times 25A$

להזנת המנוע נבחר כבל מסוג XLPE  $4 \times 10mm^2$

להגנה בפני עומס יתר, נתקין יחידת O.L אשר תכוייל לזרם של 23A

**ד. דוגמא לחישוב וקביעת הגנה והזנה לצרכן תלת פאזי יחיד במצב התקנה של הכבל בתוך תעלה המתקנת על הטיח כשהטמפ' האופפת את הכבל היא עד 35 מעלות צלסיוס ובהפעלה מחזורית**

נתון מנוע הצורך 23 אמפר הפועל במחזוריות. זמן מחזור 10 דקות, זמן הפעלה 4 דקות. מצא את כבל ההזנה המתאים בעבודה קבועה ובעבודה מחזורית.

א. במצב רגיל להגנת המנוע נשתמש במפסק מסוג מא"ז תלת מופעי דגם C (דגם זה מיועד למנועים) בזרם נומינלי של  $I_n = 25 A$  בחירה המקיימת את התנאי ש:

$$I_n \geq I_b$$

יש להתאים כבל להזנת הצרכן. לצורך כך יש להיעזר בטבלאות על פי סוג ההתקנה וסוג המוליך והמעגל. נבחר לצורך החישוב בהתקנה א' (התקנת כבל בתוך תעלה גלויה) ובטבלה 70.1.

במצב רגיל המוליך המתאים הינו מוליך מנחושת בעל זרם מירבי של  $I_z = 26 A$  זהו מוליך בעל שטח חתך של 4 ממ"ר.

בחירה זו מקיימת את התנאי של:  $I_z \geq I_n$

כאמור נקיים את התנאי  $26 > 25 > 23$

$$I_z \geq I_n \geq I_b$$

ב. אם נפעיל את המנוע בעזרת הכבל הנ"ל נראה שנוכל להעמיס אותו בעבודה מחזורית של עד:  $I'_z = 26 \cdot \frac{0.875}{\sqrt{\frac{4}{10}}} = 35.9 A$  יותר מאשר אנו צריכים להפעלת המנוע

ג. כעת בהתאם להפעלה המחזורית נבחר כבל שלו הזרם המירבי יהיה גדול או שווה לתוצאה הבאה:

$$I_n = \frac{I'_z}{C} = \frac{26}{\frac{0.875}{\sqrt{\frac{4}{10}}}} = 18.79 A$$

עלינו למצא כבל בעל זרם מירבי השווה או גדול מ 18.79 אמפר. תוצאה זו מתאימה לכבל בעל זרם מירבי של 19 אמפר (לפי טבלה 70.1) נבדוק את הזרם המירבי המותר להעביר דרך מוליך זה בתנאים מחזוריים ונקבל שהזרם המירבי המותר דרך מוליך זה ששטחו 2.5 ממ"ר הינו:

$$I'_z = 19 * \frac{0.875}{\sqrt{\frac{4}{10}}} = 26.28 A$$

אנו רואים שניתן להפעיל מנוע זה הצורך 23 מפר בתנאים מחזוריים בעזרת מוליך בעל שטח חתך קטן יותר מבלי לפגום במוליך למרות היותו בעל שטח חתך קטן וזרם מירבי בתנאים רגילים נמוך יותר.

**ה. דוגמא לחישוב וקביעת הגנה והזנה לצרכן תלת פאזי יחיד במצב התקנה של הכבל בתוך תעלה המתקנת על הטיח כשהטמפ' האופפת את הכבל היא עד 45 מעלות צלסיוס ובהפעלה מחזורית**

אם נתייחס לתרגיל הקודם אך ידוע שהמוליך מותקן בטמפ' אופפת של 45 מעלות עלינו להתחשב בכך:

א. במצב רגיל להגנת המנוע נשתמש במפסק מסוג מא"ז תלת מופעי דגם C (דגם זה מיועד למנועים) בזרם נומינלי של  $I_n = 25 A$  בחירה המקיימת את התנאי ש:

$$I_n \geq I_b$$

יש להתאים כבל להזנת הצרכן. לצורך כך יש להיעזר בטבלאות על פי סוג ההתקנה וסוג המוליך והמעגל. נבחר לצורך החישוב בהתקנה א' (התקנת כבל בתוך תעלה גלויה) ובטבלה 70.1.

במצב רגיל המוליך המתאים הינו מוליך מנחושת בעל זרם מירבי של  $I_z = 26 A$  זהו מוליך בעל שטח חתך של 4 ממ"ר.

בחירה זו מקיימת את התנאי של:  $I_z \geq I_n$

כאמור נקיים את התנאי  $26 > 25 > 23$

$$I_z \geq I_n \geq I_b$$

ב. אם נפעיל את המנוע בעזרת הכבל הנ"ל נראה שנוכל להעמיס אותו בעבודה

מחזורית של עד:  $I'_z = 26 \cdot \frac{0.875}{\sqrt{\frac{4}{10}}} = 35.9 A$  יותר מאשר אנו צריכים להפעלת המנוע

ג. כעת בהתאם להפעלה המחזורית נבחר כבל שלו הזרם המירבי יהיה גדול או שווה לתוצאה הבאה:

$$I_n = \frac{I'_z}{C} = \frac{26}{\frac{0.875}{\sqrt{\frac{4}{10}}}} = 18.79 A$$

עלינו למצא כבל בעל זרם מירבי השווה או גדול מ 18.79 אמפר. תוצאה זו מתאימה לכבל בעל זרם מירבי של 19 אמפר (לפי טבלה 70.1) נבדוק את הזרם המירבי המותר להעביר דרך מוליך זה בתנאים מחזוריים ונקבל שהזרם המירבי המותר דרך מוליך זה ששטחו 2.5 ממ"ר הינו:

$$I'_z = 19 * \frac{0.875}{\sqrt{\frac{4}{10}}} = 26.28 A$$

אנו רואים שניתן להפעיל מנוע זה הצורך 23 אמפר בתנאים מחזוריים בעזרת מוליך בעל שטח חתך קטן יותר מבלי לפגום במוליך למרות היותו בעל שטח חתך קטן וזרם מירבי בתנאים רגילים נמוך יותר.

עד כאן התייחסנו לתנאי הפעלה מחזורי. אך בדוגמא זו יש להתייחס גם לתנאי השני והוא הטמפ' בה מצוי הכבל. לכן

$$K\tau = K_{17} = \sqrt{\frac{70-45}{70-35}} = 0.845 \quad \text{נחשב את מקדם הטמפ':}$$

כעת נמצא את הזרם המירבי למוליך המתאים בתנאי של טמפי גבוהה יותר :

$$I'_z = \frac{I_n}{K_\tau} = \frac{19}{0.845} = 22.48 A$$

זרם זה מתאים למוליך של 4 ממ"ר כשהזרם המירבי שלו הוא  $I_z = 26 A$  נבדוק מהו הזרם המירבי שמותר להעביר דרך המוליך בתנאי הפעלה מחזורי ובטמפי גבוהה יותר :

$$I'_z = 26 * 1.38 * 0.845 = 30.3 A$$

אנו רואים מתוצאת החישוב שמוליך בעל שטח חתך של 4 ממ"ר בתנאים המיוחדים הנ"ל, ניתן להעביר דרכו זרם מרבי של 30.3 אמפר שמתאימים להזנת המנוע הצורך 23 אמפר.