

שיטת מדידת התנגדות ההארקה (המסננת)

לאור-תקנות החשמל (הארקות ואמצעי הגנה בפני חישמול במתח עד 1000 וולט) תיקון התשס"ב 2002

מערכת ההארקה היא מרכיב חשוב במתקני חשמל, היא המסננת לכל המערכות חשמל בעיקר כאלה, המוגנים בפני בשיטת הארקה הגנה או בשיטת איפוס. למדידת התנגדות ההארקה יש משמעות רבה בקביעת תקינותו של מיתקן הצרכן וברמתו היתר לחיבורו לרשת החשמל. המשמעות הרבה נובעת מהעובדה שערך ההתנגדות משפיע על רמת ההגנה על המיתקן בכלל, ועל מידה ההגנה בפני חישמול של המשמעות במיתקן בעת התרחשות תקלה כמו קצר לאדמה.

מרכיבי ההתנגדות הכוללת של ההארקה

שלושת מרכיבי ההתנגדות הכוללת של ההארקה הם :
התנגדות החלק המתכתי של מסלול ההארקה כולל אלקטרודת ההארקה עצמה.
התנגדות המגע בין אלקטרודת ההארקה לבין האדמה הסובבת אותה.
התנגדות המסה הכללית של האדמה כלפי אלקטרודת ההארקה.
להלן הסבר לגבי כל אחד ממרכיבי ההתנגדות.

התנגדות החלק המתכתי של מסלול ההארקה כולל אלקטרודת ההארקה עצמה.

ניתן להניח שההתנגדות החלק המתכתי של מסלול ההארקה כולל אלקטרודת הארקה עצמה נמוכה בהשוואה לערך התנגדות ההארקה הכוללת. הסיבה להתנגדות כה נמוכה נעוצה בעובדה שמרכיבי החלק המתכתי הם, בדרך כלל, צינורות המוליכים בעלי שטח חתך גדול יחסית.

התנגדות המגע בין אלקטרודת ההארקה לבין האדמה הסובבת אותה.

את ערך התנגדות המגע בין אלקטרודת ההארקה לבין האדמה הסובבת אותה ניתן להזניח בהשוואה לערך התנגדות ההארקה הכוללת. הנחה זו תקפה במקרים בהם האלקטרודה אינה בצבע, שמן וכו' וכן מתקיים התנאי, שהאדמה סביב לאלקטרודה מהודקת היטב. כיסוי אוויר סביב האלקטרודה מקטינים את שטח המגע וגורמים להגדלת ההתנגדות. מכאן נובעת התנגדות הסגולית הגבוהה של אדמה סלעית.

חלודה סביב האלקטרודה אינה מהווה בעיה, אולם שיתוך (corrosion) הגורם להקטנה שטח הפנים בין האלקטרודה לבין האדמה יגרום לעלייה ניכרת של התנגדות האלקטרודה. ניתן לסכם ולומר, כי האלקטרודה חייבת להימצא תמיד במצב תקין. כדי לקבל הערכה לגבי תקינותה של אלקטרודת הארקה יש לבצע מדידות של התנגדות ההארקה בפרקי זמן קצובים ולהשוות את התוצאות המתקבלות. בתקנות החשמל (הארקות ואמצעי הגנה בפני חישמול במתח עד 1.000 וולט, התשנ"א-1991 כתוב :

"במתקני עריכה, בהם קיימת סכנת איכול מוגבר של האלקטרודה, תימדד התנגדותה הכללית של האדמה וכן תבוקר שלמות מוליך ההארקה בחלקו הנראה לעין, אחת לחמש שנים לפחות".

באופן כללי, מערכות ההארקה במיתקן צריכה ייבדקו לפני הפעלת המיתקן, או לאחר שינוי יסודי במיתקן, וכן בכל בדיקה של המיתקן החובה לביצוע מוטלת על בעליו של המיתקן, על מחזיקו, או על מפעילו, בהתאם לעניין.

התנגדות המסה הכללית של האדמה כלפי אלקטרודת ההארקה.

המרכיב בעל ההשפעה הגדולה ביותר על התנגדות ההארקה הוא התנגדות המסה הכללית של האדמה סביב לאלקטרודת הארקה.

אלקטרודת הארקה (radiates) את הזרם העובר לכל הכיוונים באדמה. הזרם נע בתוך המוליך בכיוון אחד בלבד (כלומר לאורך המוליך) אולם, כאמור, האדמה הסובבת את אלקטרודת ההארקה מעבירה את הזרם בכל הכיוונים.

עקרון נפח ההתנגדות.

בתקנות החשמל מגדירים את המושג אלקטרודה באופן הבא :

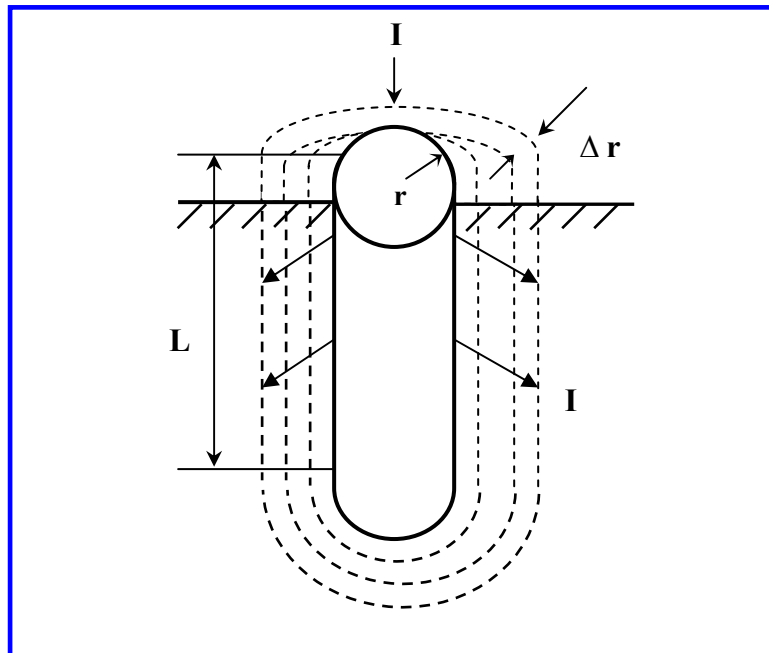
"מוליך הנמצא במגע טוב עם המסה הכללית של האדמה, במישרין או דרך בטון של יסוד המבנה, בין שהוא בודד ובין שהוא מרוכב ממספר המחברים ביניהם".

אלקטרודת הארקה יסוד מוגדרת באופן הבא :

אלקטרודת המורכבת מחלקי פלדה הטמונים ביסוד של מבנה והחיבורים ביניהם".

נניח, לצורך דוגמה שאלקטרודת ההארקה היא מוליך מתכת המוכנס לאדמה, והאדמה האופפת את האלקטרודה בני ויה מצינורות בעלי עובי זהה ובאורך זהה לאורך האלקטרודה. כל צינור הוא בעל התנגדות משלו. הצינור הקרוב ביותר לאלקטרודה הוא בעל התנגדות הגדולה ביותר מאחר שהוא בעל שטח הפנים הקטן ביותר. הצינור הרחוק ביותר יהי בעל התנגדות הקטנה ביותר, ראה איור 1.

הארקה כמסננת – לסינון המתקן



מסננת – לשיפור איכות החשמל איור 1

את התנגדות האדמה ניתן לחשב באמצעות הנוסחה הבאה :

$$R = \rho \cdot \frac{\ell}{a}$$

כאשר :
a שטח החתך של מסלול הולכת הזרם
-p ההתנגדות הסגולית של האדמה

אם נשתמש בנוסחה זו לחישוב ההתנגדות של צינור האדמה האופף את אלקטרודת הארקה אזי :

-r עובי אלקטרודת הארקה
-Δr עובי צינור אדמה סביב האלקטרודה
-L עומק האלקטרודה באדמה.

לצורך החישוב מניחים ש- ρ הוא בעל ערך קבוע ואחיד, כלומר שהאדמה היא בעלת מבנה אחיד מבחינת ההרכב המינרלי. כל הצינורות יחד יוצרים נפח התנגדות אין סופי, אולם באופן מעשי הוא מסתיים כאשר הפרש ההתנגדות בין שני צינורות צמודים מתחיל להיות זניח.

ערך ההתנגדות של הצינור הראשון הוא :

$$R_1 = \frac{\rho \cdot \Delta r}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot L}$$

ערך ההתנגדות של הצינור השני הוא :

$$R_2 = \frac{\rho \cdot \Delta r}{2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot (r + \Delta r) \cdot L}$$

ובאופן דומה, ערך ההתנגדות של הצינור ה-n-י הוא:

$$R_n = \frac{\rho \cdot \Delta r}{2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot (r + \Delta r) \cdot L}$$

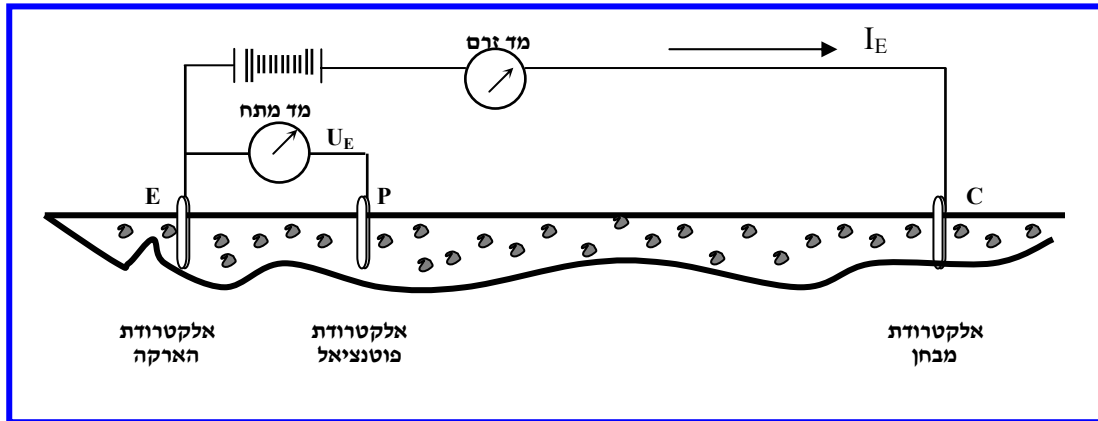
ערך ההתנגדות הכוללת (R_T) מתקבל כתוצאה מסיכום של כל ערכי ההתנגדות של הצינורות.

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$$

גודל נפתח ההתנגדות חשוב לנו לצורך חישוב נכון של ההתנגדות, כפי שיוסבר בהמשך.

מדידת התנגדות ההארקה.

נניח שלצורך מדידת התנגדות הארקה מכניסים לאדמה אלקטרודה מתכתית נוספת, במרחק אין סופי מאלקטרודת הארקה הקיימת. אלקטרודה זו משמשת כאלקטרודת מבחן C. אם נחבר מקור מתח בין אלקטרודת ההארקה E לאלקטרודת המבחן C, יזרום זרם האדמה (I_E) כפי שמוצג באיור 2.



איור 2

נניח שמכניסים לאדמה אלקטרודת מבחן נוספת P, במספר מקומות עוקבים ובקרבת אלקטרודת הארקה E מד מתח המחובר בין אלקטרודת ההארקה E לבין אלקטרודת הפוטנציאל P מודד את הפרש הפוטנציאל (U_E) בין אלקטרודת הארקה E לבין הפוטנציאל P.

על פי חוק אוהם, התנגדות האדמה העוטפת את אלקטרודת הארקה E מכל נקודה שהיא, הוא היחס בין הפרש הפוטנציאלים, שבין האלקטרודות (אלקטרודת ההארקה לבין פוטנציאל) לבין הזרם הזורם דרך האדמה. כלומר התנגדות ההארקה היא היחס בין קריאת מד המתח לבין קריאת מד הזרם ומחושבת לפי הנוסחה:

$$R_E = \frac{U_E}{I_E}$$

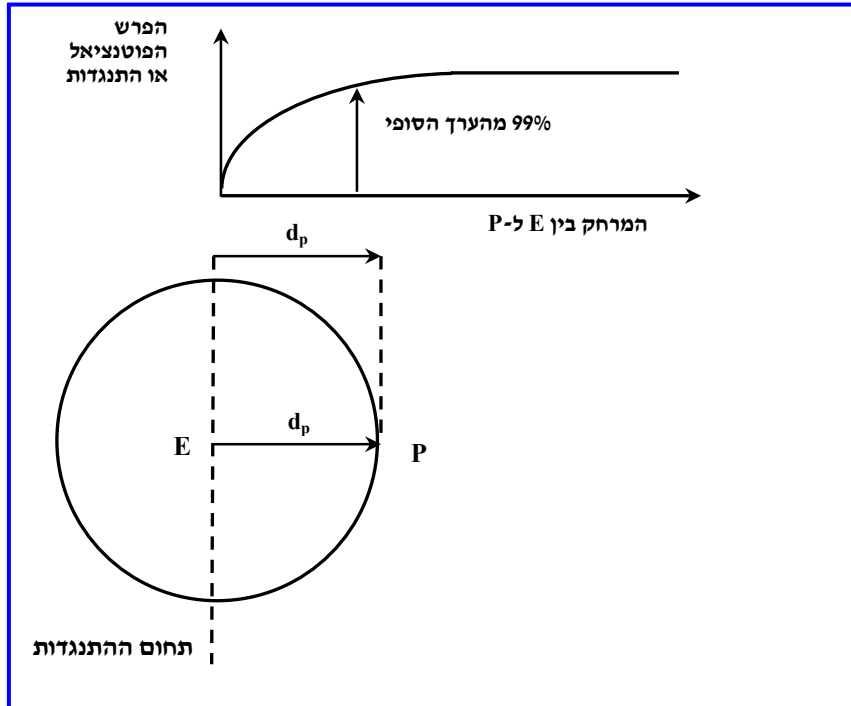
כאשר:

R_E – ערך התנגדות ההארקה

U_E – הפרש הפוטנציאל בין אלקטרודת הפוטנציאל P לבין אלקטרודת ההארקה E.

I_E – הזרם הזורם בין אלקטרודת ההארקה E לבין אלקטרודת המבחן C.

איור מציג את עקומת ההתנגדות או הפרש הפוטנציאל הנמדד בין נקודה E לבין נקודה P המוזנת בקו ישר מאלקטרודת ההארקה P. מעקמה זו ניתן להבחין במגמה עלה של שינוי בערכי ההתנגדות או בערכי הפרש הפוטנציאל.



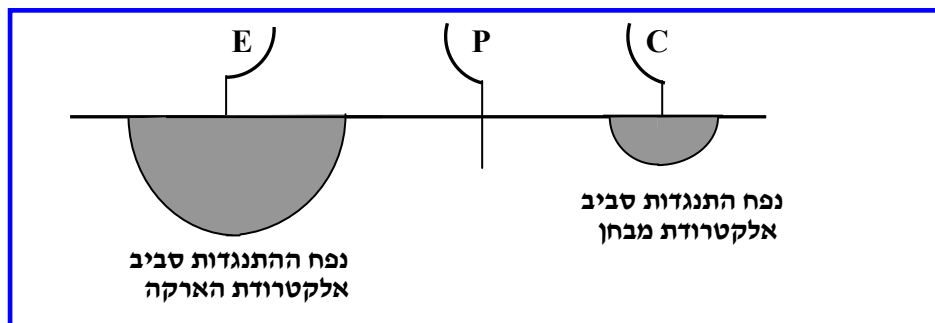
איור 3

כפי שניתן ללמוד מעקומה זו, קצב עליית ערך ההתנגדות קטן ככל שהמרחק בין אלקטרודת ההארקה E לבין אלקטרודת הפוטנציאל P גדל במרחק d_p מגיעים שבו ערך ההתנגדות הוא בין 95% מערכו הסופי. אם האדמה היא הומוגנית לכל הכיוונים אזי תתקבל עקומה דומה מסביב לאלקטרודת ההארקה E בכל הכיוונים.

הערך האדמה של ההתנגדות יתקבל כאשר נקודה P נמצאת במרחק אין סופי מאלקטרודת ההארקה למרות זאת, ניתן לקבל ערך התנגדות הקרוב לערך האמיתי כאשר המרחק בין אלקטרודת הפוטנציאל P לאלקטרודת ההארקה E הוא לא גדול.

השאיפה שגם אלקטרודת המבחן C תמוקם במרחק אין סופי נובעת מהצורך למנוע חפיפה, או השפעה הדדית של אזורי ההתנגדות של כל אלקטרודה, דבר העלול לשבש את תקינות המדידה (איור 4).

מובן שלא ניתן למקום את אלקטרודת המבחן C במרחק אין סופי מאלקטרודת ההארקה E. ככל שנרחיק את אלקטרודת הפוטנציאל מאלקטרודת ההארקה ההתנגדות הנמדדת תיראה כמתואר באיור 3 – בהתחלה ההתנגדות עולה וככל שהמרחק d_p גדל ערך ההתנגדות נשאר קבוע.



איור 4

כאשר מקרבים את אלקטרודת הפוטנציאל אל אלקטרודת המבחן C, מבחינים שוב בתופעה של עלייה חדה בערכי ההתנגדות הנמדדת. העקומה התקבלת מוצגת באיור 5.

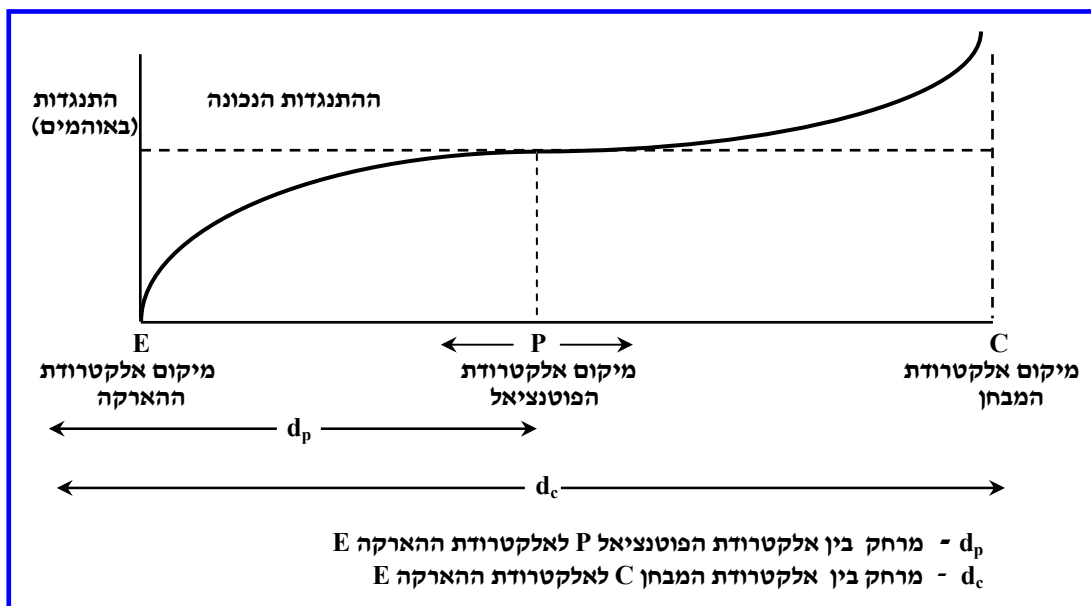
צורתה תלויה אך ורק במידות של אלקטרודת ההארקה ואינה תלויה כלל בהתנגדות האדמה.

על עקומה זו קיימת נקודה, שבה ערך ההתנגדות הוא ערך ההתנגדות האמיתי. ניתן להוכיח באופן מתמטי, שהדבר מתקיים כאשר המרחק בין אלקטרודת ההארקה E לאלקטרודת הפוטנציאל P הוא 61.8% מהמרחק בין נקודת המיקום של אלקטרודת ההארקה E לנקודת המיקום של אלקטרודת המבחן C. אם נגדיר את המרחק הזה כ- d_c , אזי כדי למדוד את הערך האמיתי של התנגדות ההארקה, המרחק בין אלקטרודת הפוטנציאל P לאלקטרודת ההארקה E יצריך לקיים את התנאי הבא:

$$R_E = \frac{U_E}{I_E}$$

אם אלקטרודת פוטנציאל P תמוקם שלא בקו ישר בין אלקטרודת ההארקה E ואלקטרודת המבחן C, אזי ערכי ההתנגדות שימדדו לעולם לא יגיעו לערך ההתנגדות האמיתי, והעקומה שתתקבל תראה דומה לזו המתוארת באיור 6.

באופן מעשי, בבדיקת התנגדות ההארקה המרחק הנדרש d_c הוא בסדר גודל של עשרות מטר ואף מאות מטר. יש להקפיד ולמקם את אלקטרודת המבחן B ואת אלקטרודת הפוטנציאל P במרחק מתאים מאלקטרודת ההארקה E. כפי שכבר הוסבר לעיל, אם אלקטרודת ההארקה E תהיה קרובה מדי לאלקטרודת המבחן C עלול מצב של חפיפה ביניהם ואז העקומה שתתקבל לא תכיל את התחום בו ערך ההתנגדות כמעט קבוע, דבר המוביל לחישוב מוטעה של ערך ההתנגדות.



איור 5

מדידת התנגדות ההארקה במערכת הארקה.

בעקרונות שהוצגו כאן מניחים שהמדידה מתבצעת כאשר אלקטרודת פוטנציאל P נמצאת בין אלקטרודת ההארקה E ואלקטרודת המבחן C. כאשר מערכת ההארקה מכילה אלקטרודת יחידה אין קושי לבצע את המדידה. אולם במקרים רבים, אנו נתקלים במערכות הארקה גדולות ומורכבות יותר המכילות כמה אלקטרודות הארקה, זאת קיימת בעיה באיתור נקודת ההצבה של אלקטרודת הפוטנציאל P. בהנחה שמערכת ההארקה היא בצורת מלבן, קיימת טבלאות עזר הקבועות את מיקום האלקטרודות על סמך אורך האלכסון בין שני קצוות שדה ההארקה. בטבלה 1 לדוגמה כמה ערכים.

| אורך האלכסון של שדה ההארקה (מטר) | מרחק האלקטרודות ממרכז שדה ההארקה (מטר) | |
|----------------------------------|--|------------|
| | אלקטרודה P | אלקטרודה C |
| 5 | 37 | 60 |
| 10 | 53 | 85 |
| 30 | 49 | 149 |
| 70 | 146 | 230 |
| 100 | 178 | 279 |

סיכום

השיטה שהצגנו היא השיטה הבסיסית והפשוטה ביותר למדידת התנגדות הארקה. היא מתאימה בעיקר למערכות הארקה קטנות המכילות מוטות יחידים, צינורות או משטחים. הטעויות היכולות לנבוע בשטה זו הן בעיקר בגלל התנגדות משתנה של האדמה באזור הבדיקה, שבו המבנה וההרכב של האדמה אינו אחיד.

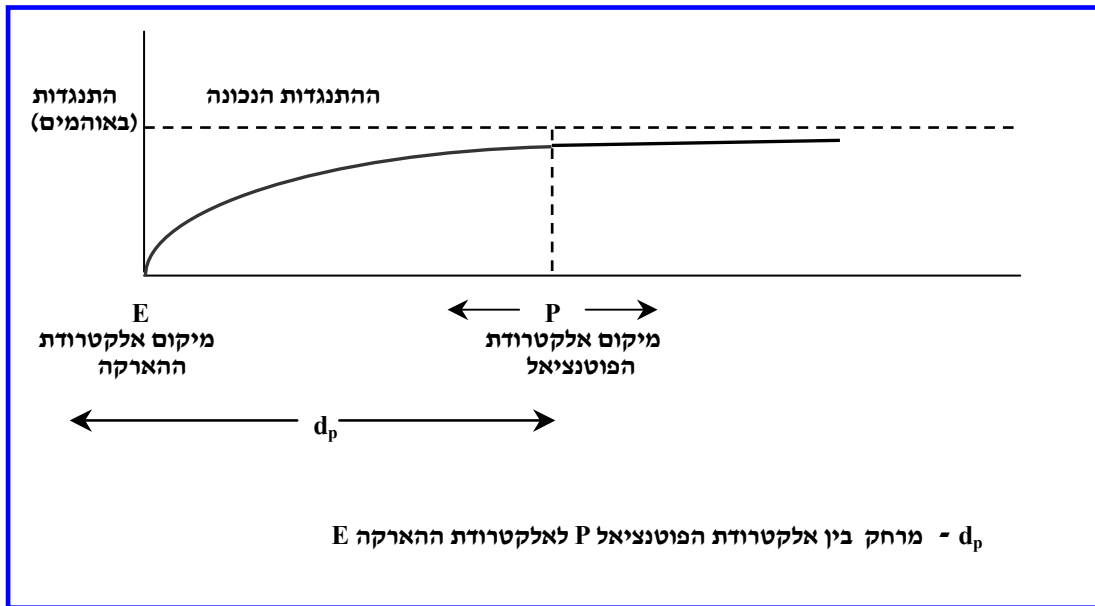
מדידת התנגדות ההארקה, מבוססת על ההנחות האלה:

אלקטרודת ההארקה E ואלקטרודות העזר (אלקטרודת פוטנציאל P ואלקטרודת המבחן C) ממוקמות כולן בקו ישר.

אלקטרודת פוטנציאל P חייבת להיות בין אלקטרודת ההארקה E ואלקטרודת המבחן C ולקיים את התנאי

$$R_E = \frac{U_E}{I_E}$$

משטח האדמה הוא הומוגני.



איור 6

הארקת ייסוד היא הגנה ותקינות למתקן חשמל ועל מידת ההגנה בפני חישמול – המשמעות במתקן בעת התרחשות התקלה כמו זרמי קצר וברקים לאדמה.