

נחשול -

מלתח (SURGE VOLTAGES)

**מאפיינים, מקורות, השלכות
טכניות ואמצעי הגנה**



חברת החשמל



הוכן ונערך על-ידי המהנדס נוראני שגיב,
המחלקה ליעול הצריכה, אגף השיווק, חברת החשמל

מאפיינים, מקורות, השלכות
טכניות ואמצעי הגנה

נחשולי מתח (SURGE VOLTAGES)



תוכן העניינים

5	מבוא
6	מאפיינים של נחשולי מתח
7	מקורות של נחשולי מתח
7	מקורות חיצוניים של נחשולי מתח
8	נחשולי מתח עקב התפרקות ברקים
10	נחשולי מתח עקב התפרקויות מטענים אלקטרוסטטיים
10	מקורות פנימיים של נחשולי מתח
10	נחשולי מתח הנוצרים עקב מיתוג הזינה
14	נחשולי מתח הנובעים מפעולות מיתוג של סוללות קבלים
15	נחשולי מתח הנובעים מקצרים לאדמה
15	השלכות של נחשולי מתח על מתקנים ומכשירי חשמל
17	מישורי הפעילות של חברת החשמל
18	התקני הגנה מפני נחשולי מתח
22	סיכום

מזכ"א

נחשולי מתח (surge voltages), הם אחת מהתופעות המזיקות במיוחד למתקנים ומכשירי חשמל חדישים, שמשולבים בהם רכיבי אלקטרוניקה זעירים כגון מעבדי אותות. נחשולים אלה עלולים לחדור דרך רשתות החשמל וקווי התקשורת למתקנים או למכשירי חשמל אלו שהם רגישים במיוחד, ולגרום להם לנזקים חמורים עד כדי השבתתם המוחלטת. אם לא ינקטו אמצעים מתאימים להגנתם ו/או להבטחת תקינות פעולתם.

נחשולי מתח נוצרים בכל רשתות החשמל והתקשורת בעולם, הן במבנים (משרדים, בתי מגורים, מפעלים וכו') והן מחוץ למבנים. הנחשולים הם פועל יוצא מתופעות טבע שונות ומפעולות מיתוג של מכשירים וציוד חשמלי המהווים חלק מהותי ובלתי נמנע של מרכיבי התפעול שלהם. משום כך, התופעה היא כלל עולמית ולמעשה אינה קשורה לסוג זה או אחר של רשתות החשמל והתקשורת וגם אינה מוגבלת לאזור גיאוגרפי מסוים.

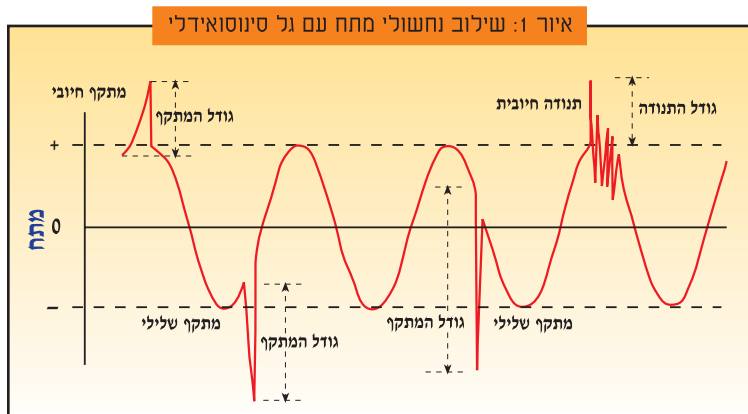


היקף הנזקים שנגרמו למכשירי החשמל כתוצאה מנחשולי מתח התגבר מאוד בשני העשורים האחרונים. בסקר סטטיסטי שערכו חברות ביטוח בורמניה בקרב מדגם מייצג של 7737 נסקרים, התברר כי יותר מ-27% מהמכשירים האלקטרוניים ניזוקו בצורה כלשהי מנחשולי מתח, היינו אחד מכל ארבעה מכשירים לערך. אחת מהחברות דיווחה אף על נזקים גבוהים יותר בסדר גודל שמגיע עד ל-35%.

עלון זה מיועד לעוסקים בתחום החשמל במגזרי המעק העשונים. בעלון מוצגים בתמצית המאפיינים ומקורות של נחשולי המתח, השלכותיהם על פעילותם של מתקנים ומכשירי חשמל רגישים ומובאים האמצעים והפעולות שיש לנקוט כדי למזער את נזקיהם. כל זה במטרה להגביר את המודעות ולהרחיב את הידע המקצועי של העוסקים בתחום החשמל לנושא חשוב זה.

נחשולי מתח הם אותות חשמליים המופיעים בצורת מתקפי מתח (impulse voltages) או תנודות מתח מתרסנות (oscillatory voltages). בעלי עוצמה גבוהה ומשך זמן קצר יחסית. אותות אלה נובעים בעיקר משחרור מהיר של אנרגיה, האגורה בהשראות ובקיבוליות של מערכת החשמל או בענן טעון (ברק). נחשולי המתח ברשתות החשמל, "רוכבים" על גל המתח הסיוסואידלי של הרשת.

עוצמת נחשולי המתח נמדדת מהנקודה שבה הם רוכבים על הגל הסינוסואידלי (כמתואר באיור 1). לפיכך, אות בעוצמה של 500 וולט, הרוכב בנקודת השיא של גל סינוסואידלי בעל אמפליטודה של 400 וולט, גורם למתח רגעי מירבי של 900 וולט.



בהתאם לקוטביותם, יכולים נחשולי מתח להתחבר לגל המתח הסינוסואידלי של 50Hz, או להיחסר ממנו. קצב עליית המתח יכול להגיע עד אלפי וולטים לכל מיקרושנייה.

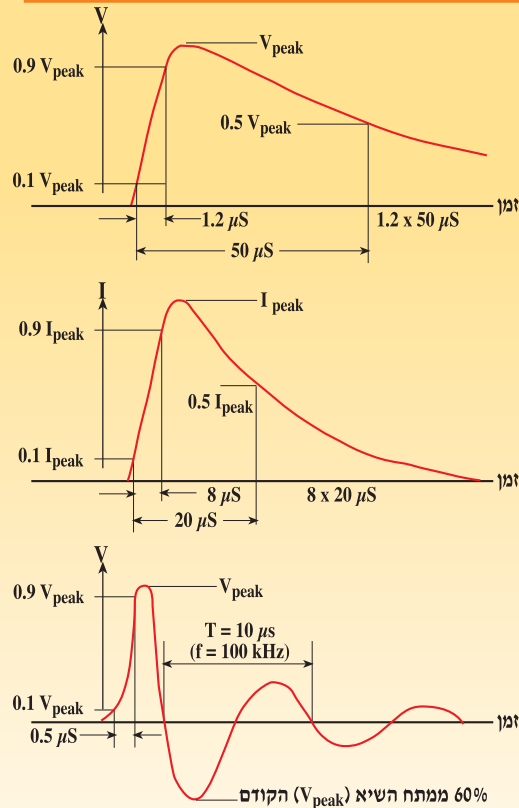
אין הגדרה תקינה ומדויקת לנחשולי מתח במערכת אספקת החשמל, הואיל והם משתנים בצורתם ובגודלם במווח רחב מאוד. עוצמות המתח האופייניות לנחשולי מתח הן החל ממאות ועד לאלפי וולטים. פרק הזמן בו נמשך הנחשול נע בין 0.5 ל-200 מיקרושניות, בעבור מתקף יחיד של מתח, ועד זמן מחזור אחד (20 מילישניות) ויותר, בעבור מתח תנודתי. תדירות גל מתח תנודתי משתנה ממאות ספרות של הרצים (Hz) ועד למגאהרצים (MHz) רבים.

מאפיינים של נחשולי מתח

- המאפיינים העיקריים של נחשולי מתח הם:
- אנרגיה (בג'אולים או באמפר-שניות) של הנחשול.
 - שיא המתח (או הזרם) של הנחשול.
 - קצב העלייה של חזית נחשול המתח או הזרם.
 - זמן הדעיכה של נחשול המתח או הזרם למחצית ערך השיא שלו.

שני המאפיינים האחרונים מהווים אינדיקציה לתכולת התדרים של הנחשולים.

איור 2: דוגמאות לנחשולי מתח וזרם חקניים (על-פי IEEE)



ערכים אופייניים

מתח שיא (V_{peak}): 10 kV-6 kV

זרם שיא (I_{peak}): 80 kA

אנרגיה: 70 A·S

צורת הנחשול מאופיינת בצמד מספרים, הנקראים משמאל לימין, ומציינים את זמן העלייה ואת זמן הירידה למחצית ערך השיא (לדוגמה $8/20 \mu s$). פירושו שהנחשול מגיע מ-10% ל-90% מערך השיא שלו כעבור $8 \mu s$ ודועך למחצית ערך זה כעבור $20 \mu s$.

על מנת לסייע בהבנת תכונותיהם ולצורך ביצוע מדידות ובדיקות הביצועים של ההתקנים ומערכות ההגנה בפניהם, פיתח המכון הבינלאומי של מהנדסי חשמל ואלקטרוניקה (Institute of Electrical & Electronic Engineers) IEEE של נחשולי מתח ושילב אותן בתקן IEEE C62.41 (ראה דוגמאות באיור 2).

מקורות של נחשולי מתח

נחשולי מתח נוצרים הן ברשתות אספקת החשמל והתקשורת של חברות שונות, והן במערכות החשמל והתקשורת הפרטיות של הצרכנים. הם פועל יוצא מתופעות טבע שונות כגון פגיעות ברק, או מפעולות ומאירועים מאולצים ובלתי מאולצים, המהווים חלק מהותי ואף הכרחי של המציאות התפעולית של כל אחת ממערכות אלה.

המקורות העיקריים של נחשולי מתח הם:

- מקורות חיצוניים.
- מקורות פנימיים.

מקורות חיצוניים של נחשולי מתח

המקורות החיצוניים לנחשולי מתח נובעים מתופעות טבע שונות, שהמרכזיות שבהן הן:

- התפרקות ברקים.
- התפרקות מטענים אלקטרוסטטיים.

נחשולי מתח עקב התפרקות ברקים

ניתן להגדיר את הברק כתופעת מעבר אטמוספירית מהירה, המאופיינת על-ידי התפרקות מטענים חשמליים הנמצאים בעננים. התפרקות זו היא בעלת זרם חשמלי גבוה מאוד ומסלול התפרקות ארוך. ההתפרקות בין הענן לאדמה מתרחשת, כאשר מתפתחים בענן מטענים חשמליים (חיוביים או שליליים) ומטענים הפוכים ובכמות זהה על פני המוליכים (אדמה, בנינים וכו') שמתחת לענן. המטענים הולכים ומתרחבים ויוצרים מתח (שדה חשמלי) של מיליוני וולטים בין הענן ובין השטחים שמתחתיו (בדומה לקבל גדול הטעון במיליוני וולטים). בעת ההתפרקות, נוצר ברק שהוא למעשה זרם חשמלי בעוצמה של אלפי אמפרים, הזורם מן הענן דרך נתיב הפריקה, שנוצר בין הענן לגופים בולטים הנמצאים על פני האדמה. בדרך כלל, מורכב הברק מארבע התפרקויות בממוצע, הנמשכות כ-100 מיקרושניות כל אחת. נתיב הפריקה של הברק עובר, לעתים, דרך התקנים חשוכים ויקרים, ביניהם: רשתות החשמל והתקשורת, תרנים ואף בני אדם וחיות וגורם להם נזקים. בדומה לאלה, קיימות גם התפרקויות המתרחשות בין העננים עצמם וגורמות למתחים מושרים ומזיקים בגופים שמתחתם.

איור 3: נחשולי מתח מולכים כתוצאה מפגיעה ישירה של ברק בקווים עיליים



מתקפי זרם/מתח הנוצרים בקווים מתפשטים לאורכם, דועכים בהדרגה במעבר דרך הקווים, מגיני ברק ושנאים ולבסוף מגיעים למכשירים רגישים.

פגיעת ברקים ברשתות החשמל והתקשורת יכולה להיות ישירה (ראה איור 3) או השראית/עקיפה (ראה איורים 4 ו-5). בפגיעה השראית, השינוי המהיר של השדה האלקטרומגנטי סביב לנתיב הברק גורם למתחים מושרים בגופים ובמוליכים הנמצאים בקרבת הנתיב. פגיעת ברק באדמה גורמת לעליית פוטנציאל האדמה (ראה איור 6).

כאשר הברק פוגע בקו חשמל

או בקו תקשורת (איור 3), עולה המתח בנקודת הפגיעה במהירות רבה וגל המתח הנוצר נע לכל הכיוונים. עם תנועת הגל, עוצמתו הולכת ודועכת בהדרגה ובמהירות, עקב העכבה החשמלית (impedance) של הקו, השנאים ואמצעי ההגנה.

מאפייני גל הזרם הם:

- עוצמת הזרם: 300 kA - 5 (ממוצע 25kA)
- תכולת האנרגיה: כ-1000 kwh
- זמני עלייה ודעיכה אופייניים: 1.2/50, 4/10 ו-8/20 מיקרושניות.

נחשולי מתח, הנוצרים מכגיעה ישירה של ברקים בקווי החשמל והתקשורת, הם בדרך כלל הגבוהים והמאיימים ביותר על ציוד חשמלי לסוגיו.

על פי מפת הרמה האיזוקרואנית (isokeraunic level), שבה מתוארת העשיחות הממוצעת של ימי סופות רעמים בשנה, מספר ימי הברקים בארץ נמוך לעומת מדינות אירופה וארה"ב, והוא נע בין 4 ל-35 ימים בשנה. אזור החוף, בין חל-אביב וגבול הצפון, הוא האזור הרגיש ביותר בארץ לפגיעות ברק.



נציין כי בחברת החשמל מותקנת מערכת ארציית לאיתור ורישום של ברקים, המאפשרת לגלות ולרשום את כל הברקים הנוצרים בכל עת, בכל שטח המדינה ומחוצה לה עד טווח של 600 ק"מ. על בסיס נתונים רב שנתיים של מערכת זו, הצפיפות המרבית של ברקים לכל קמ"ר בשנה היא 5. לקבלת מידע על צפיפות הברקים באזורים שונים בארץ, ניתן לפנות למעבדת חשמל למחקר ופיתוח בחברת החשמל.

נחשולי מתח עקב התפרקות מטענים אלקטרוסטטיים

בסביבה יבשה מצטברים מטענים חשמליים ויוצרים שדה אלקטרוסטטי חזק מאוד. לדוגמה, אדם המתהלך על שטיח ונעול בנעליים מבודדות, נטען במטענים חשמליים העשויים להגיע לאלפי וולטים. אם ההליכה מתקיימת בקרבת מבנה מוליך, המטענים נפרקים למבנה בזרם של כמה אמפרים בזמן עלייה קצר מאוד של נוכסיות בודדות. אם קיים במבנה מכשיר אלקטרוני רגיש, כגון מחשב, רכיבי המכשיר או מעגליו המודפסים עלולים להיזק.

מקורות פנימיים של נחשולי מתח

איור 6: פגיעת ברק באדמה גורמת לעליית פוטנציאל האדמה



המקורות הפנימיים של נחשולי מתח הם פועל יוצא משיוניים מהירים, המתרחשים במערכת החשמל, לרוב בעקבות פעולות מיתוג (חיבור וניתוק) במערכת, שגורמים לתופעות מעבר (transient phenomena). הגלים שנוצרים עקב כך, הם בדרך כלל בעלי חדר גבוה יחסית או גלים תנודתיים מתרסנים. לגלים חזית לא תלולה ותדירותם משתנה בין עשרות קילוהרץ למאות קילוהרץ.

המקורות הפנימיים העיקריים של נחשולי מתח הם:

- מיתוג הזינה (המתח) למתקן או למכשיר חשמלי.
- מיתוג סוללות קבלים.
- קצרים ברשתות החשמל ותופעות תהודה.

נחשולי מתח הנוצרים עקב מיתוג הזינה

מהיבט טכני/חשמלי, לכל אירוע המסתים בהפסקת הזינה למתקן או למכשיר חשמלי, עלול להתלוות נחשול מתח. זאת, בין אם הפסקת הזינה נעשית במתכוון, כמו פעולות מיתוג יזומות, או אם היא נגרמת בשל אירועים בלתי נשלטים או כאלה המתרחשים במערכות לאספקת החשמל, כחלק מן המציאות התפעולית שלהן, לרבות:

- פעולות מיתוג שגרתיות, ידניות או אוטומטיות, של הזינה לעומסים שונים, כמו: מיתוג משאבה, מעלית, מסוע, מכונות ייצור למיניהן, מקרר, מזון, מכונת כביסה, מטחנת קפה וכו'.
- הפסקת הזינה למתקן בעקבות פעולת המבטח של המתקן או מפסק מגן (ממסר פחת).

- ניתוק/הפסקת קו/ תיל מתח גבוה.
- חיבור חוזר (reclosing) בקו מתח גבוה.
- הפסקת חשמל יזומה או מתוכננת וחיבור חשמל מחדש.

פעולות מיתוג של הזינה, הנעשות מעת לעת במערכות חברת החשמל, נועדו למטרות שונות, ביניהן:

- תיקון תקלות ברשת החשמל.
- שינויים ברמות העומס, המחייבים מיתוג שנאים בתחנות משנה (תחמ"ש).
- הגנה על רשתות חשמל מפני תופעות חיצוניות: סופות ברקים ותופעות טבע יוצאות דופן.
- הבטחת רציפות אספקת החשמל (פועל יוצא מ-"חיבורים חוזרים").
- תחזוקה וביצוע עבודות ברשת.

ניתן להסביר את נחשולי המתח המתלווים לפעולות המיתוג של הזינה, באופי ההשראתי האופייני למתקני החשמל. מיתוג של הזינה למתקנים אלה גורם להיווצרות נחשול מתח, שעוצמתו תלויה בקצב שינוי הזרם הרגעי - di/dt ובגודל הרכיב ההשראתי L (inductance) של המתקן.

המתח המתפתח על הרכיב ההשראתי בעת המיתוג הוא: $E = L di/dt$

להלן פירוט נוסף למקורות עיקריים של נחשולי מתח, הנובעים מפעולות מיתוג כאלה.

א. נחשול מתח הנובע מפעולות מיתוג של מכשירים.

מיתוג (הפעלה וניתוק) של כל עומס השראתי עלול ליצור נחשול מתח. עומס זה יכול להיות גדול, כמו מנוע חשמלי גדול, או קטן כמו מכונת צילום או מטחנת קפה. המונח "עומס השראתי" הוא ביטוי כללי. כל מכשיר או התקן חשמלי, הכולל סליל, קבל או שנאי עלול ליצור בעת המיתוג נחשול מתח. עם מכשירים אלה נמנים: ממסרים, מנעונים, טלויזיות, מכשירי וידאו, מדפסות, מחשבים וציוד היקפי, תנורים חשמליים, מסננים, מתקני קירור ומיזוג אוויר ועוד.

קיים מקור נוסף לנחשולי מתח, הקשור למגע חשמלי רופף שגורם לקשת חשמלית בין שני משטחי מגע של ציוד במתקן החשמל.

מגע רופף הוא מגע גלוי "חלש" (בלתי מושלם), שגבולות ההולכה שלו הם בין ניתוק מוחלט לבין חיבור מוחלט. מגע רופף, המגיע לגבולות אלה, גורם למעשה, לפעולת מיתוג בלתי רצויה של המעגל החשמלי, ויוצר נחשול מתח. התרופפות המגע של מוליך הפאזה במתקן החשמל ובאופן חמור יותר, במנעים של ציוד למיתוג קבלים, (ראה התייחסות בהמשך), היא דוגמה מתאימה לכך. בעת ההתרופפות נוצרת קשת חשמלית, הגורמת לנחשול מתח. קשת חשמלית מלווה, ברוב המקרים, גם בהפרעות אחרות, ובהן: הפסקות רגעיות של הזינה, עיוות גדול של מתח הזינה ושקיעות מתח.

ב. נחשול מתח הנובע מהפעלת אמצעי הגנה ובקרה.

נחשול מתח נוצר גם עקב ניתוק התקנים מן הזינה, כתוצאה מהפעלת אמצעי הגנה (נתיכים, מפסקים אוטומטיים לסוגיהם) וממיתוג של התקני בקרה (ממסרים, מגעונים וכו') במערכת האספקה של חברת החשמל ובמתקן הפרטי של הצרכן.

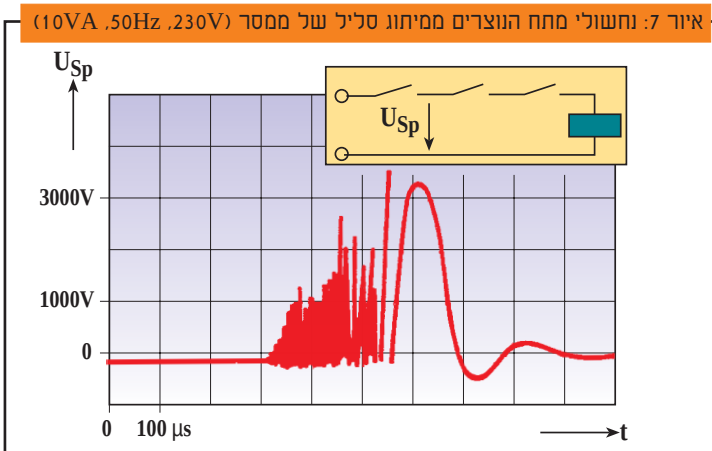
בזמן ניתוק זרמי קצר, מופיעות קשתות חשמליות בתוך הנתיכים - מגבילי הזרם. המתח שנוצר לאורך קשתות אלו הוא בכיוון ה"מתנגד" לזרימת הזרם במעגל. מתח הקשת (E_a) גדול ממח העבודה הרגיל במעגל (E), בגלל השינוי המהיר של הזרם (di/dt) דרך ההשראות (L) של המעגל, מתקיים הקשר הבא:

$$E_a = E + (-L di/dt)$$

הבדיקות מראות, שערכו של מתח הקשת (E_a) אינו גדול יותר מפי 2.2 מערך השיא של המתח הרגיל (U_m) במעגל. לדוגמה: ברשת, שבה המתח הנקוב (U_n) שווה ל-22 ק"ו (המתח המרבי (U_m) שווה ל-24 ק"ו), ערך השיא של המתח הפאזי במעגל (U_m) שווה ל-19.6 ק"ו (במונחים של 1 PU, per unit, $U_m = U_n \sqrt{2} / \sqrt{3} = 1$). במקרה זה, מתח היתר (E) שווה ל-43 ק"ו ($19.6 \times 2.2 = 43$ ק"ו), דהיינו 2.2 PU.

במהלך ניתוק סליל של מגעון מן המתח במתקן הצרכן, עלולים להיווצר נחשולי מתח בעוצמה של עד כדי 10 kV, כאשר קצב עליית המתח האופייני של הדפקים הוא $1 \text{ kV}/\mu\text{s}$ (ראה איור 7).

✓



ג. נחשול מתח הנובע ממיתוג מנועים ושנאים.

נחשול מתח יכול להיווצר גם עקב מיתוג מנועים חשמליים במתקני הצרכנים וניתוק שנאים מן הרשת של חברת החשמל (בתחנות משנה ובתחנות טרנספורמציה) ומרשת החשמל הפרטית של הצרכן.

מנועים חשמליים הם "סוס העבודה" של החברה המודרנית. ככאלה, הם מהווים את החלק העיקרי של העומס החשמלי וצורכים כשני שלישים מן האנרגיה החשמלית המיוצרת במדינות המערב ובישראל. בבתי מגורים הם מניעים את מכונת הכביסה את המזון את המקרר את המעלית וכד'. במגזר המסחרי-ציבורי, הם מפעילים את מערכות הקירור ומיזוג האוויר. בתעשייה הם מניעים את המשאבות, את המדחסים, את המסועים ומכונות ייצור שונות.

המנועים ממותגים לזינה בתדירויות שונות ולפי הצורך. כל פעולת מיתוג מלווה בהיווצרות נחשול מתח, הנובע משחרור האנרגיה האגורה במנוע. מנוע מסתובב כולל כמות מסוימת של אנרגיה אלקטרומגנטית, הנקבעת, בעיקר, על-ידי מידות המרווח שבין הסטטור לרוטור. ככל שהמרווח גדול יותר, גדלה כמות האנרגיה האלקטרומגנטית הצבורה בו. (בשל כך, גדולה יותר האנרגיה הצבורה במנוע השראה מאשר בשנאי, והאנרגיה הצבורה במנוע סינכרוני גדולה מזו שבמנוע השראה).

לדוגמא, האנרגיה הצבורה במנוע השראה של 20hp בהעמסה מלאה, היא כ-40 ג'אול לפאזה. עם ניתוק המנוע מן הזינה, חייבת האנרגיה הצבורה בעדה המגנטי שלו להשתחרר בצורה כלשהי. אם מעגל הרוטור של מנוע השראה פתוח, גורם היעלמו המהיר של השטף המגנטי- φ במכונה, להופעת נחשולי מתח ניכרים בסטטור, ומופיעה קשת (על פי חוק פרדי $E \propto d\varphi/dt$). מבדיקות ניסיוניות מתברר, כי עוצמת המתח במקרה זה, גדולה פי שלושה ויותר מן המתח הנקוב.

תופעה דומה (פחות חריפה) מתרחשת, כאשר הרוטור של המנוע נסגר על ידי התנגדות או קצר חשמלי, מאחר שהתנגדות זו מחישה את דעיכת השטף.

בדיקות ניסיוניות מוכיחות, שבמהלך הכעולה של מנועי חשמל, נוצרים נחשולי מתח בעוצמה של 250 עד 300 וולט, ובעת המיתוג, בין 250 ל-300 וולט.

ניתוק שנאי מן הרשת באמצעות מפסק, המנתק את זרם השנאי שלא בעת מעבר גל הזרם דרך האפס, (פעולת "קיטום" chopping), מלווה בנחשול מתח, הנובע משחרור אנרגיה מגנטית הלכודה בתוך השראות השנאי, דרך קיבוליות המעגל. נחשול מתח זה אינו תלוי במתח הרשת, והוא מתרחש בזמן ניתוק שנאי בלתי מועמס.

את ערכו של נחשול מתח זה (V_{ch}) מחשבים באופן הבא:

$$V_{ch} = I_{ch} \cdot \sqrt{L_m / C}$$

כאשר:

I_{ch} - זרם הקיטום (chopping current)

L_m - השראות המעגל המגנטי של השנאי

C - קיבוליות המעגל אחרי המפסק (בצד השנאי).

אם לשנאי של 1000 קו"א, יש השראה גלית של 50 קילו-אוהם, ואם ערכו של זרם הקיטום שווה ל-2 אמפר, נוצר נחשול מתח של 100 ק"ו. למעשה, עקב איבוד אנרגיה בגרעין השנאי, שווה מתח היתר המופיע במעגל ל-60% מן הערך המחושב.

ד. נחשול מתח הנובע ממייתוג קו ושנאי כיחידה אחת

נחשולי מתח נוצרים גם כאשר ממתנים קו עילי ארוך או כבל, המזין עומס קטן או שנאי גדול בלתי מועמס, שמחברים בקצהו סוללת קבלים גדולים. מצב זה אופייני לקווי תמסורת במתח עליון בריקם, אך גם לקווי חלוקה במתח גבוה, כאשר מתקיימים התנאים הבאים:

- כאשר מתבצע מייתוג של קו מתח גבוה עילי ארוך או כבל, שבקצהו מחוברים במקביל שנאי וסוללת קבלים גדולה.
- כאשר מתבצע חיבור חוזר בקו המתח הגבוה, המזין בקצהו שנאי גדול בלתי מועמס.

נחשולי מתח הנובעים מבעולות מייתוג של סוללות קבלים

הקבלים המותקנים במתקני חברת החשמל ובמתקני הצרכנים נועדו לשיפור מקדם ההספק ($\cos\phi$). בזמן החיבור של סוללות קבלים, עלולים להופיע נחשולי מתח. עוצמתם של נחשולי מתח אלה אינה גדולה במיוחד (פחות מ-2PU), אולם, אם בו בזמן מתרחשת תהודה (resonance) במעגל, היא גורמת להגדלת עוצמתם עד כדי 5PU.

על פי תקנות החשמל, חייבים הקבלים להיות מצוידים באמצעי פריקה שיבטיחו כי דקה אחת לכל היותר, לאחר ניתוקם מן הזינה, לא יישאר בין הדקיהם מתח העולה על 50 וולט. לפיכך, אם חיבור הקבלים לזינה יתבצע כעבור פרק זמן זה, מתח היתר שיינוצר במעגל יהיה חלש יותר.

גם בזמן ניתוק סוללות קבלים עלולים להופיע נחשולי מתח, הנובעים מהצתה חוזרת. נחשולים אלה מכונים "מתחי השבה" (recovery voltages) ושיעורם יכול להגיע עד פי 8 מעוצמת המתח המרבי ברשת (8PU).

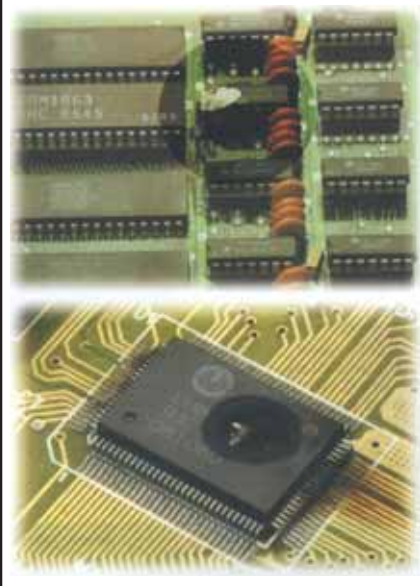
לעתים הקבלים של צרכני החשמל עלולים לגרום להגברת עוצמת נחשולי המתח (במתקני הצרכנים). הנובעים מחיבור סוללת הקבלים של חברת החשמל (עד ל-4PU). שימוש בסליל (היגב - inductance) בטור לקבלים, המיועד להגבלת זרמי ההרמוניות בקבלים, מסייע גם להגבלת עוצמת נחשולי המתח. באופן דומה לכך, פועלים גם סלילים או שנאי מבדל, המותקנים במבוא של וסתי מהירות אלקטרוניים. ככלל, היגב (reactor) של 3% יעיל למטרה זו. כיום, וסתי מהירות רבים כוללים בתוכם התקן הגנה מסוג זה.

תופעה אחרת, העלולה להתרחש בזמן חיבור סוללות קבלים, מכונה תופעת "הצתה מוקדמת" (Prestrike). בעקבות תופעה זו מתפתח נחשול מתח, ששיעורו עלול להגיע ל-3.65PU. כמו כן מתפתח זרם יתר, שעוצמתו גדולה מאוד.

בין הגורמים להופעת נחשולי מתח נמנים גם קצרים לאדמה ברשתות החשמל. שיעורם המרבי של נחשולי המתח תלוי בעומק ההארקה של נקודת האפס ברשת. כמו כן נגרמים נחשולי מתח כתוצאה מהתרחשות תנאי תהודה בין סליל כיבוי (petersen coil) לבין קיבוליות הרשת.

השלכות של נחשולי מתח על מתקנים ומכשירי חשמל

איור 8: דוגמאות לפגיעות מנחשולי מתח בבידוד וברכיבים אלקטרוניים



נחשול מתח עלול לחדור לתוך מתקנים או מכשירי חשמל דרך כל מוליך מתכתי המחובר אליהם. כגון: קווי אספקת חשמל, כבלי תקשורת, קווי נתונים וכד'. הופעת נחשול המתח במוליכים אלה יכולה להיגרם עקב חיבור חשמלי ישיר בין המוליכים למקור נחשול המתח, או עקב השראה אלקטרומגנטית (אם זרם הברק עובר בסמוך לקווים), או עקב צימודים השראיים או קיבוליים בין הקווים לבין מערכת אחרת, שבה מופיעים נחשולי מתח.

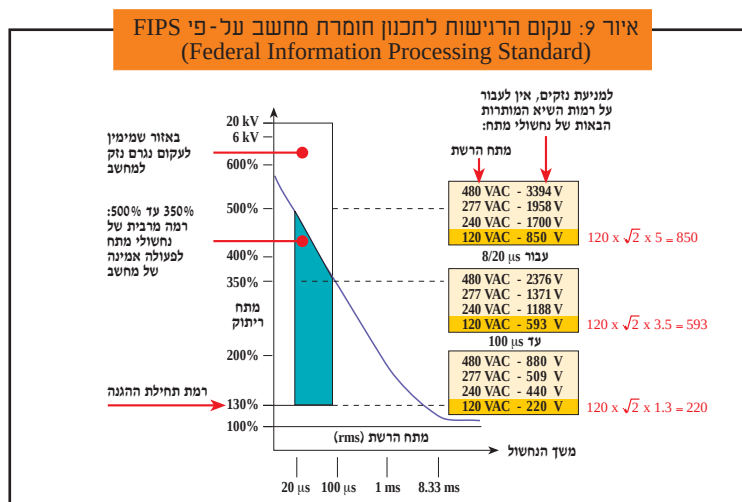
כאמור, נחשול מתח הוא אחד מהגורמים המאיימים ביותר על תקינותם של מכשירים ומערכות, שמשולבים בהם רכיבי מיקרואלקטרוניקה. לעומת היתרונות העצומים של טכנולוגיות אלו, נקודת התורפה שלהן היא עמידותן הנמוכה בפני נחשולי מתח, כדוגמת אלו המופיעים בסביבה תעשייתית, מסחרית ואפילו ביחית.

הופעת נחשולי מתח יכולה לצמצם באופן ניכר את הזמן הממוצע בין התקלות (MTBF - mean time between failure), במערכת שאינה מוגנת בפני נחשולים. לכל מתקן מוגדרים מספר מחי עבודה נקובים. החל ממתח הזינה (400/230) וולט ז"ח, 24 וולט ז"י וכד', דרך אותות מדידה ובקרה אנלוגיים (5 או 10 וולט או זרם מ-4 עד 20 מיליאמפר) וכלה באותות דיגיטליים (וולטים בודדים). בנוסף לערכים נקובים אלו, מוגדרים גם ערכי מתח גבוהים יותר, שניתן להגיע אליהם למשך זמן קצר של מיקרושניות עד מילישניות. כאשר מופיע על הדקי המתקן אות מתח החורג מגבולות המותר באותם הדקים, הוא מהווה נחשול מתח העלול לפגוע במתקן.

המתחים והתדירויות של נחשולי המתח גורמים למאמצים גדולים יותר במתקן החשמל מאשר המתחים הנומינליים. מאמצים אלה גורמים, לרוב, לנזק מתמשך, שתוצאתו הסופית עלולה להיות "שריפת" מעגלים חשמליים של המתקן או המכשיר. תוצאה בלתי רצויה זו עלולה להתרחש באחד משני האופנים הבאים:

א. ההתקנים, מוליכי הזרם, הקרובים ביותר להדקים שנחשול המתח דרכם חדר (במעגלי הכניסה או היציאה). סופגים את האנרגיה החשמלית המתלווה לנחשולי המתח וממירים אותה לחום. מאחר שקיבולת החום של התקנים אלה אינה מספיקה ואינה מסוגלת לעמוד במשטר העבודה המאולץ על-ידי הנחשול, הם נשרפים. באירוע מסוג זה לא נפגעת רמת הבידוד של המערכת בנקודת החדירה של הנחשול (ראה איור 8).

ב. אם במהלך חדירת נחשול המתח נפגעת רמת הבידוד של מוליכי זרם קרובים, שאינם קשורים בקשר גליוני, אזי הנחשול עלול לחדור עמוק לתוך המכשיר ולגרום לתקלות משניות חמורות. לדוגמה: אם המעגל, שנפגע מנחשול מתח, מחובר למקור אנרגיה המזין את המכשיר, מקור זה יכול להזרים זרם לנקודת התקלה, ומאחר שכמות האנרגיה שלו בלתי מוגבלת, הוא יגרום לנזקים מצטברים עד שיופסק בדרך כלשהי (ראה איור 8).



במתקנים מודרניים, הרגישים יותר לנחשולי מתח, יש להתייחס ברצינות יתרה לנזקים העלולים להיגרם להם.

נחשולי המתח אינם נחשבים למזיקים במדה והם נמצאים ברמות שהציוד יכול לעמוד בפניהם, אף על פי שערכם גדול מן המתחים הנומינליים. נחשול מתח נעשה "מסוכן" לציוד, אם גודלו, תדירותו ומשכו גדולים מרמת עמידותו של הציוד (ראה איור 9).

רמת העמידות של המתקנים או של המכשירים, הנמצאים בשימוש, בפני נחשולי מתח, היא בעלת טווח רחב, אפילו באותו דגם של מתקן. דבר זה נובע, בין היתר, מהעדר אחידות של חומרי הבידוד ומרכיבים אחרים.

הבידוד של התקנים ומכשירי חשמל נחלש במשך הזמן מסיבות שונות: החלשת חוזקם המכני, ייבושם, קורוזיה, ליכלוך ועוד. דבר זה מקטין, כמובן, את רמת עמידותו של הציוד בפני נחשולי מתח, ולעתים, אף בפני המתח הנקוב של הציוד.

אין זה כלכלי (אפילו אם הדבר היה ניתן) לתכנן את המתקנים או את המכשירים כך, שלעולם לא ייפגעו מנחשולי מתח והפרעות חשמליות אחרות. באמצעים מקובלים, אשר קובעים את משך חייהם הכלכליים של המתקנים או המכשירים, משתדלים למזער את נזקיהם על בסיס שיקולים טכנו-כלכליים והתפתחויות טכנולוגיות.

מישורי הפעילות של חברת החשמל

חברת החשמל לישראל, בדומה לחברות החשמל בעולם המערבי, נוקטת אמצעים מגוונים להגבלת נחשולי מתח ולמזעור נזקים. אמצעים אלה כוללים: התקנת אמצעי הגנה, הדרכה והסברה.

החברה מציידת את רשתות החשמל שלה במתח גבוה ובמתח עליון במגני ברק - ציוד המיועד להגביל את רמת נחשולי המתח הנוצרים עקב ברקים ומיתווגים. על פי כללי החברה, מותקנים מגני ברק ברשתות הנ"ל באזורי הארץ שבהם פעילות הברקים הנה עשרה ימים ויותר בשנה. (במקרים חריגים, מותקנים מגני ברק גם באזורים שבהם פחות מ-10 ימי ברקים בשנה וזאת בהתחשב בשיקולים טכניים מוגדרים).



פעילות החברה מבוססת על כללי המקצוע המקובלים באירופה ובארה"ב. לעתים נוהגת החברה אפילו באופן מחמיר יותר מן הנהוג במדינות אלו ומתקנה מגני ברק על פרטי ציוד, ללא כל חלות בעוצמת פעילות הברקים באזורי הארץ השונים (ראה איור 10).

מגני ברק אלה, יחד עם העכבה (אימפדנס חשמלי) של הרשתות, סופגים ומחלישים את נחשולי המתח, הנוצרים ברשתות החשמל עקב ברקים ו/או כתוצאה מפעולות מיתוג. לפיכך, **ההסתברות שנחשולי מתח אלו יגיעו למתקן הפרטי של הצרכן, היא נמוכה ביותר.**

רשתות חלוקת מתח נמוך של החברה - קווי מתח נמוך, המחברים את צרכני חברת החשמל לתחנות טרנספורמציה, אינן מוגנות בפני פגיעות ברקים, מאחר שההסתברות לפגיעה בהן נמוכה מאוד. הסיבות העיקריות לכך הן:

א. רוב פגיעות הברקים מסתיימות בקווים עיליים של מתח גבוה ומתח עליון (קווים אלה ארוכים וחשופים לברקים), אך עם זאת מוגנים היטב בפני פגיעות ברקים.

- ב. הפגיעות בקווי מתח נמוך הן מועטות, מן הסיבות הבאות:
- קווים אלה הם קצרים מאוד (אורכו של קו עילי היוצא מתחנת טרנספורמציה הוא כ-50 מטר).
 - חלק גדול מהקווים בנויים מכבלים תת-קרקעיים, שהם בדרך כלל פחות פגיעים מקווים עיליים.
 - קווים עיליים במתח נמוך, נמצאים, בדרך כלל, ליד בניינים גבוהים ו/או ליד קווי מתח גבוה, המהווים הגנה טבעית בפני ברקים (עמודי קווי מתח נמוך נמוכים מגובה הבניין הסמוך, כך שהבניין מושך אליו את הברקים).

ג. במקרה שקו עילי במתח נמוך נפגע ישירות מברק, לא יועילו שום אמצעי הגנה. במקרה זה, ניזוקים כליל מתקני החשמל לרבות השנאי ולוחות החשמל, וצרכנים רבים נשארים ללא אספקת חשמל.

ד. חברות חשמל בודדות בלבד בעולם מגינות על רשתות המתח הנמוך שלהן בפני פגיעות ברקים. אלו הן חברות הפועלות באזורים שמתרחשת בהם פעילות ברקים רבה. לדוגמא: בחברות החשמל שבמדינת פלורידה, ארה"ב, בה מתרחשים כ-100 ימי ברק בשנה (פי שלושה ויותר ממספר ימי הברק המרביים בישראל), מרכיבים מגני ברק גם בצד המתח הנמוך של השנאים שאליהם מחוברים קווי רשת מתח נמוך.

ה. הגנת קווי החשמל שבתוך בניינים ומבנים ציבוריים בפני פגיעות ברקים, אינה בתחום אחריותה של חברת החשמל.

חברת החשמל יזמה ומימנה הכנת תקן ישראלי (ת"י 2283) בנושא "התקני הגנה מפני נחשולי מתח ברשתות למתח נמוך: דרישות תפקוד ושיטות בדיקה". התקן, למעט השינויים והתוספות המצויינים בו, זהה לתקן הנציבות הבינלאומית לאלקטרוטכניקה IEC61643-1-1998.

התקני הגנה מפני נחשולי מתח

מבדיקות שנערכו בארה"ב מתברר, כי יותר מ-80% מנחשולי מתח "הרסניים", מקורם במתקן החשמל הפרטי של הצרכן.

עובדה זו אינה מפתיעה, שכן רוב מקורות נחשולי המתח וביניהם פעולות מיתוג שונות מצויים במתקן החשמל הפרטי של הצרכן או בקרבתו. יתרה מזו: נחשולי מתח הנוצרים מחוץ למתקן החשמל הפרטי של הצרכן, דועכים במהירות, ובהיעם למתקן הצרכן הם, לרוב, בעלי עוצמה נמוכה, לעומת זאת, נחשולי מתח הנוצרים במתקן החשמל הפרטי של הצרכן או בקרבתו (אצל שכנים), מגיעים במהירות וללא התנגדות יחסית למכשירי החשמל הקרובים, קודם שדעכו (עקב המרחק הקצר) וגורמים להם לנזקים.

ניתן לחלק את התקני ההגנה מפני נחשולי המתח על פי אופן החיבור שלהם למתקן החשמל לשני סוגים, טורי ומקבילי. **התקני הגנה טוריים**, המתחברים בטור לקווי אספקת המתח של המערכות שעליהן הם מגנים, החל מהתקנים פשוטים חולים יחסית כמו שנאים ומסננים וכלה ב"סופגי גלים" (wave absorbers), "מייצבי רשת" (network conditioners) ויחידות מיוחדות של אל-פסק (UPS).

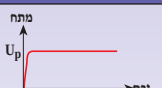
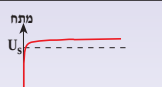
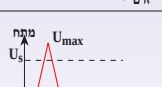
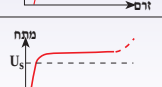
- **שנאים** מקטינים את רמת נחשולי המתח עקב ההשראות שלהם ומבטלים חלק מההרמוניות על ידי צימוד (coupling). היעילות של הגנה זו אינה גבוהה במיוחד.
- **מסננים** המורכבים מנגדים, מסלילים ומקבלים מיועדים להגנה מפני נחשולי המתח הנוצרים בתעשייה ועקב תפעול של מתקנים היוצרים הרמוניות בתחום תדרים מוגדר.

התקני הגנה מקביליים. המותאמים למערכות שעליהן הם מגנים ומחוברים במקביל אליהן. אלה הם התקנים מגוונים, פשוטים וחולים יחסית להגנה בפני חדירת נחשולי מתח ומתחי יתר למתקן או מכשיר חשמלי ולכן גם הנפוצים והשימושיים ביותר.

- התכונות העיקריות הנדרשות מהתקני הגנה מקביליים הן:
- התקן תקני, המתאים לדרישות התקן הישראלי - ת"י 2283.
- המתח הנקוב של ההתקן חייב להתאים למתח הנומינלי בהדקי הרשת - 230/400V.
- בהעדר נחשול מתח, לא יזרום זרם דלף דרך ההתקן אשר נמצא במצב הכן (standby).

- כשנוצר נחשול מתח ברמה העולה על סף המתח המותר של מתקן החשמל המוגן, התקן ההגנה יוליך את זרם הנחשול לאדמה ובכך יגביל את המתח על פני המתקן לרמת ההגנה הנדרשת (U_p). בהעלם נחשול המתח, התקן ההגנה יפסיק להוליך זרם ויחזור למצב הכן, ללא זרם אחזקה. זהו אופיין אידאלי של מתח זרם (U/I).

איור 11: רכיבי הגנה בפני נחשולי מתח ומאפיניהם

אופיין מתח/זרם					סימון				
						רכיב אידאלי	אפס	גבוה	נמוך
						דיודת זנר	נמוך	נמוך	אפס
						שפופרת פריקת גז	אפס	גבוה	גבוה
						ואריסטור	נמוך	גבוה	אפס

- כדי להגן על המתקן במהירות מרבית, זמן התגובה של התקן ההגנה (t_r) חייב להיות קצר ככל האפשר.

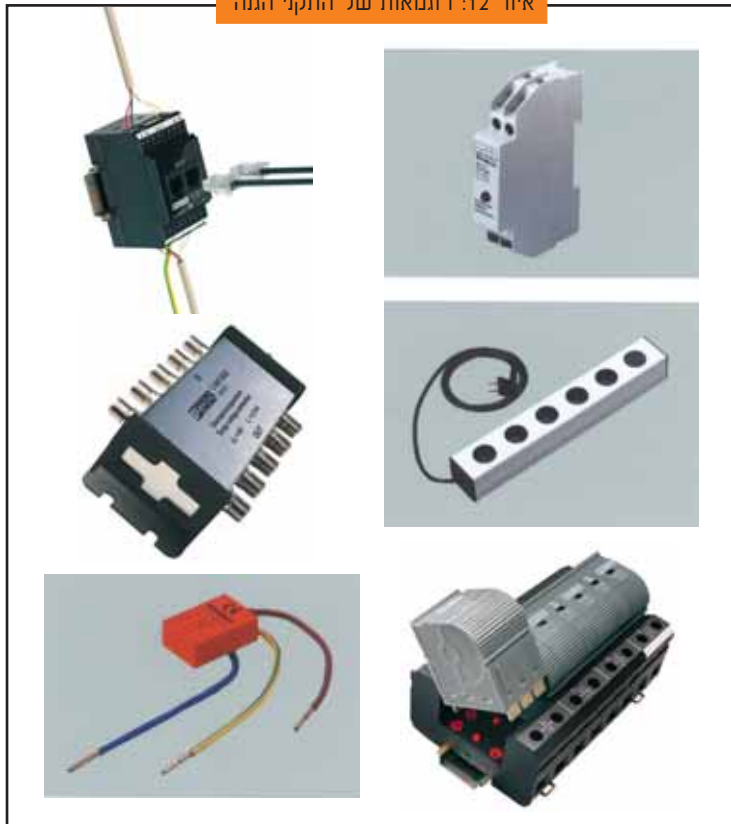
- התקן ההגנה חייב להיות בעל יכולת להעברת האנרגיה של נחשולי המתח הצפויים להיווצר על המתקן המוגן.

כדי להשיג מהתקן ההגנה תכונות הקרובות ככל האפשר לתכונות הנדרשות, הוא מורכב מרכיבים חשמליים מתאימים, ביניהם: דיודת זנר (zener diode), שפופרת פריקת גז (gas discharge tube), וריסטור (varistor), וכו'. באיור 11 מובאים המאפיינים של רכיבי הגנה אלה. נציין כי, אופיין מתח-זרם של דיודת זנר קרוב מאוד לאופיין רכיב אידאלי.

בהתאם לאופי ההגנה הדרוש, כוללים התקני הגנה רכיב אחד או שילוב של רכיבים שונים. בהתקן, המשלב מספר רכיבים ניתן למצוא, בדרך כלל, דיודת זור, וריסטור, שפופרת התפרקות בגז וסלילים המחברים בין הרכיבים. הסלילים נועדו לתזמן את הפעלת הרכיבים השונים בהתאם להשתנות אות מתח היתר, כך שהעמסת כל אחד מן הרכיבים לא תעבור את גבולות המותר עבורו, הרכיב עצמו לא ייפגע ותקינות ההתקן תישמר.

קיימים סוגים שונים של התקני הגנה בעלי רמות הגנה (קט) שונות. רמת ההגנה של ההתקן צריכה להתאים לרמת ההגנה הנדרשת (הרגישות) של המתקן/המכשיר המוגן וכן למתח הנקוב שלו (לדוגמה, התקני הגנה למתח נקוב 230/400 וולט ורמת ההגנה של: 6; 4; 2.5, 1-1.5 קילוולט).

איור 12: דוגמאות של התקני הגנה

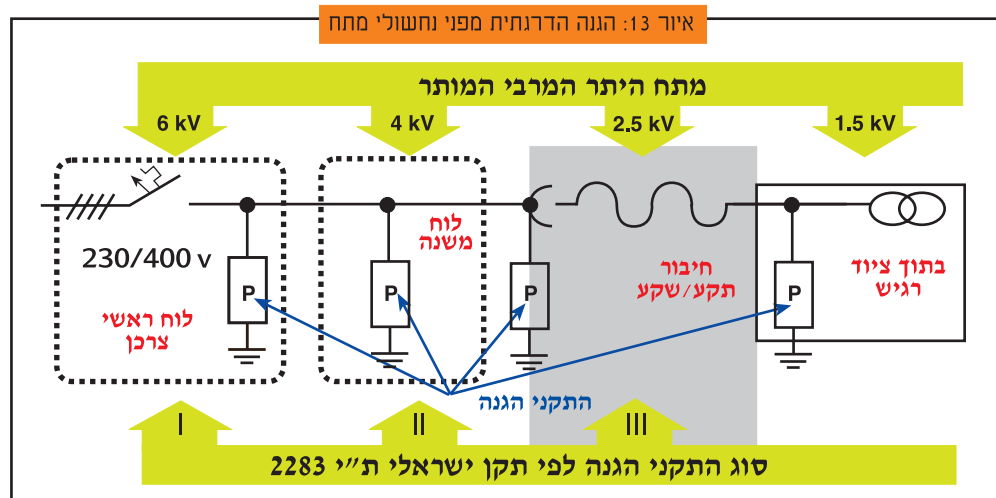


תקן ישראלי, ת"י 2283 - "התקני הגנה מפני נחשולי מתח ברשתות למתח נמוך: דרישות ביצועים ושיטות בדיקה", חל על התקנים המגנים מפני נחשולי מתח, שמקורם בהשפעות ישירות ועקיפות של ברקים, מיתונים או גורמים אחרים. הוא מתאר את הדרישות לבדיקות ביצועי ההתקנים להגנה מפני נחשולי מתח. תקן זה, למעט השינויים והתוספות המצוינים בו, זהה לתקן של הנוציבות הבינלאומית IEC61643-1-1998.

התקן מבחין בין שלושה סוגים של בדיקות: הבדיקה מסוג 1 (class 1) מיועדת לדמות הולכה חלקית של זרם הנחשול. את התקני ההגנה העומדים בבדיקה מסוג 1, מומלץ למקם כהגנה ראשית באתרים ובנקודות שבהן רמת החשיפה לנחשולי מתח גבוהה, כגון נקודות הכניסה של הקווים למבנים (בלוח הראשי) המוגנים על ידי מערכות הגנה מפני פגיעות ברקים.

התקנים העומדים בבדיקה מסוג 2 (class 2) או מסוג 3 (class 3), חשופים לנחשולים שמשכם קצר יותר. מומלץ למקם התקני הגנה אלה באתרים פחות חשופים לנחשולים (בלוחות משנה, בכניסה לציד רגיש וכו'). כהגנה מישנית ובמשולב להגנה הראשית.

באופן עקרוני, מומלץ להגן על ציוד חשמלי רגיש במבנה מפני נחשולי מתח בצורה הדרגתית, החל מהדקי הזינה של מתקן החשמל בשלמותו ועד להדקי הזינה (הכניסה) של המכשיר והציוד הסופי. במילים אחרות: התקנת התקני ההגנה ייעשו בלוחות הראשיים, בלוחות המשנה, בשקעים או בין בית התקע (שקע) לתקע של ציוד רגיש (ראה איור 13). זאת במטרה להגן על הציוד גם מנחשולי מתח הנוצרים מההתקנים שבמבנה עצמו. בחירת הסוג המתאים של התקני הגנה והתקנתם הנכונה בלוחות החשמל ואחרים, כרוכות בגורמים רבים ובדיקות מוקדמות שיש להתחשב בהם בטרם רכישת ההתקנים והתקנתם. להגנה מרבית על הציוד הרגיש, רצוי להגן עליו גם מכיוון קווי התקשורת: קווי הטלפון, כבלי טלוויזיה וכו'.



קביעת התקני ההגנה ומיקומם ייעשו בהתאם לחוק החשמל והתקנות הנגזרות ממנו, לתקינה הרלוונטית ולשיקולי המתכנן. רוב היצרנים של ציוד חשמלי רגיש מודעים לתופעת נחשולי המתח, וחלקם אף מתקינים אמצעי הגנה מפני נחשולי מתח בתוך הציוד עצמו. לפיכך, בעת רכישת ציוד חשמלי רגיש, רצוי לרכוש ציוד שמוגן מפני נחשולי מתח.

נציין כי בארץ קיים תקן ישראלי - ת"י 1173, "מערכות הגנה מפני פגיעות ברק למבנים ולמתקנים". התקן דן בצורך במערכות הגנה מפני פגיעות ברק, בתכנון, בביצוע ובדיקתן בבנייני מגורים ומבנים ציבוריים. התקן אינו דן בהגנה על מתקני חשמל, תקשורת וכדומה.

יש להבהיר כי, שימוש באמצעים המפורטים לעיל, כמקובל בעולם, אינו מבטיח מניעה מוחלטת של נזק לציוד ולמכשירים רגישים, אך יכול להקטין את הסבירות לגרימת נזק באופן ניכר.



- נחשולי מתח הם דפקים או גלים בעלי עוצמה גבוהה ומשך זמן קצר, הנוצרים ברשתות החשמל והתקשורת החיצוניות והפנימיות כאחת. הם נוצרים ממקורות חיצוניים, כגון: התפרקות ברקים ומטענים אלקטרוסטטיים, וממקורות פנימיים: פעולות מיתוג בעיקר, קצרים לאדמה ותופעות תהודה.
- רוב נחשולי המתח שמקורם בברקים, נובעים מפגיעה עקיפה/השראתית ברשתות החשמל והתקשורת החיצוניות והפנימיות.
- נחשולי מתח הנוצרים ברשת אספקת החשמל מתפשטים בכל הכיוונים ודועכים במהירות לאורך קווי הרשת, עקב עכבה חשמלית של הרשת ונוכחות מגני ברק. ההסתברות שמקצת ממחירי יתר אלו יגיעו למתקני הלקוחות היא נמוכה מאוד.
- הנוזק הנגרם למכשירים רגישים, עקב נחשולי מתח, הוא נזק מצטבר. חומרת הנוזק תלויה בעיקר בעוצמת הנחשולים, משכם, וקצב שכיחות הופעתם, איכות המכשיר ו"גילו" (מכשיר ישן או חדש).
- על מנת להקטין את הסבירות לגרימת נזק למכשירי חשמל רגישים, נוקטת חברת החשמל באמצעי הזהירות וההגנה הסבירים בפני נחשולי מתח, כפי שמקובל בחברות החשמל בעולם המערבי.
- אף על פי שחברת החשמל נוקטת אמצעי הגנה מקובלים, הרי שבשל פגיעות ברקים במערכת ההולכה והחלוקה של החשמל, ופעולות המיתוג המהוות חלק מן המציאות התפעולית היומיומית, אי אפשר למנוע לחלוטין הופעת חלק קטן מנחשולי המתח במתקני הלקוחות, שמקורם במערכת חברת החשמל.
- המשתמש בצידוד רגיש לנחשולי מתח, ייטיב לעשות באם ינהג בצורה מושכלת וידאג למגן את הצידוד הרגיש שבברשותו באמצעות התקנת אמצעי הגנה מתאימים בפני נחשולי מתח.



להבהרות או לפרטים
נוספים נא להתקשר
למחלקה ליעול הצריכה,
אגף השיווק של חברת החשמל
טל: 04-8182651
פקס: 04-8182687



חברת החשמל

הופק על-ידי היחידה לקשרי הציבור והפרסום - בשיתוף המחלקה ליעול הצריכה וגף השיווק - חברת החשמל