

НИКОНОВ МИКОЛА СЕРГІЙОВИЧ ✉ – аспірант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0542-7594>; e-mail: mykola.nikonov@ieee.khpi.edu.ua

ШЕВЧЕНКО СЕРГІЙ ЮРІЙОВИЧ – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9658-7787>; e-mail: Sergii.Shevchenko@khpi.edu.ua

АНАЛІЗ ВИДІВ ПРОБЮЮ ПОЛІМЕРНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ

В роботі досліджено теорію утворення каналу електричного пробую в полімерних діелектриках. Процес експлуатації електричних мереж досить складний, бо діелектричні матеріали під дією напруженості електричного поля втрачають свої ізоляційні властивості, що спричинює руйнування молекулярних зв'язків. Такому явищу дали назву пробую діелектрика або порушення його електричної міцності та втрати діелектричних властивостей, з наступним утворенням каналу пробую з високою електричною провідністю. Додаткові фактори, такі як умови охолодження ізоляції, зовнішнє механічне навантаження, дія ультрафіолетового випромінювання, температура навколишнього середовища, вологість повітря, наближеність до магістральних шляхів, на яких періодично проводять обробку хімічними реагентами, ступінь забрудненості району, наявність колоній грибів на поверхні, прискорюють процес руйнування ізоляційних властивостей діелектрика. У роботі розглянуто класифікацію видів пробую полімерної ізоляції за фізичною природою виникнення, як-от електричний, електротепловий (тепловий), електромеханічний та електрохімічний пробую. Дослідження цих процесів має суттєвий вплив, адже процес діагностики неозброєним оком деяких видів пробую ускладнюється через протікання процесу всередині ізоляції та не завдає пошкодження всьому ізоляту на відміну від класичної фарфорової або скляної. Прикладом такого процесу є електротепловий пробую. Причина його виникнення зумовлена порушенням теплової рівноваги в діелектрику між процесами тепловиділення та тепловіддачі. Зростання температури діелектрика збільшує його електропровідність, збільшуються струми витоку та виділяється в ізоляції тепло. Підвищення температури впливає на збільшення електропровідності діелектрика, що також виділяє додаткове тепло та створює лавиноподібний процес розігріву діелектрика та подальшого пробую.

Ключові слова: полімерна ізоляція; електричний пробую; електротепловий пробую; електромеханічний пробую; електрохімічний пробую.

Вступ. Полімерні матеріали: поліетилен, поліетилен високої та низької щільності, поліпропілен, полівінілхлорид широко використовуються в різних електротехнічних приладах та пристроях низьких та високих класів напруги, оскільки їхня діелектрична міцність перебуває в діапазоні значень 10^6 – 10^9 В/см при кімнатній температурі.

В енергетиці полімерні матеріали набули широкого застосування для ізоляції пристроїв електричної мережі один від одного та як діелектричний компонент конденсаторів. Для використання композитних матеріалів як ізоляції, необхідно забезпечити якомога меншу ємність, зберігши хімічні та механічні властивості. Тому бажано використовувати матеріал з низькою відносною діелектричною проникністю. Інше застосування вимагає високого значення діелектричної проникності, бо це зменшує розміри конденсатора до мінімального значення [1].

Для композитних ізоляторів використовуються три класи матеріалів: вуглеводневі еластомери, епоксидні смоли (компаунди), силіконові еластомери. Серед переваг композитної ізоляції порівняно з фарфоровою та скляною можна виділити низький рівень радіоперешкод, зручність транспортування, меншу вагу, простий монтаж [2].

Конструкція композитної ізоляції складається з окремих полімерних елементів (тарілок) або з монолітної полімерної оболонки. Вони змонтовані на скловолоконному стрижні, на якому тримається конструкція. У деяких випадках використовується

проміжний шар діелектрика для збільшення міцності. Така конструкція забезпечує нерівномірний розподіл ліній електричного поля, що призводить до появи коронного розряду в місцях з високим градієнтом напруги, який зосереджується в таких місцях, як кінцеві металеві частини гірлянди ізолятора, у межах штанги скловолоконного стрижня та на поверхні і в повітряному просторі полімеру.

Інша причина появи локальних розрядів на поверхні є результатом забруднення ізолятора. Цей процес викликає ерозію композитного матеріалу, утримувального стрижня та подальшу деградацію ізоляції. Додаткове посилення процесу руйнації композиту забезпечується механічним зовнішнім навантаженням, дією ультрафіолетового випромінювання, порушенням тепловідведення. Такі чинники призводять до появи пробую ізоляції. На місці пробую виникає дуга, яка викликає плавлення, обгорання, розтріскування або розкладання кристалічної структури полімеру як діелектрика, так і електродів. У результаті такого процесу залишається слід, подібний до пробитого, проплавленого, пропаленого отвору. Для електричних апаратів пробую ізоляції — це явище аварійного характеру, що виводить з ладу ділянки мережі та потребує ремонту або заміни.

Процес електричного пробую діелектрика включає декілька фаз та є результатом передпробійних процесів, таких як утворення дефектів, збудження електронним ударом, високовольтна поляризація, іонізація центрів люмінесценції та іонів у кристалічній



решітці матриці, окислення та гідроліз, забруднення ізолятора.

Мета статті. Розглянути теорію процесу утворення каналу електричного пробую в полімерній ізоляції та проаналізувати класифікацію видів пробую полімерної ізоляції за фізичною природою виникнення.

Огляд літератури. У публікації [1] розглянуто застосування термопластичних, термореактивних полімерів та надано короткий опис функцій кожної підсистеми. Представлено характеристики, механічні властивості полімерних матеріалів, такі як ударна в'язкість, випробування на розтяг, випробування на вигин, термічні властивості, такі як деформація при знятті напруги у формі, загальні термічні індекси, відносна теплоємність і відносний термічний індекс. Описано методи оцінки придатності полімерів для електричної ізоляції.

У роботі [2] проведено аналіз та систематизовано основні види механічного видимого пошкодження полімерної ізоляції. Автор зробив висновки, щодо подальшої експлуатації ізоляції при різних видах пошкодження. Пошкодження умовно розділяються на ті, при яких ізолятор допустимо експлуатувати або необхідна негайна заміна. До першої групи відносяться вапнування, витік з'єднувального наповнювача, накопичення бруду, ріст плісняви та водоростей, зменшення гідрофобності поверхні, механічні пошкодження, незначне пошкодження внаслідок дуги, корозія, поверхневі мікротріщини. До другої групи можна віднести: пошкодження, оголення склопластикового стрижня, поверхневі тріщини, що перевищують значення 0,1 мм, значна ерозія поверхні матеріалу, пробій поверхні, колонії грибів. Для кожного виду дефекту дано короткий опис причини виникнення, тривалості процесу та рекомендації щодо подальшої експлуатації.

У роботі [3] досліджено протікання процесів виникнення струму перед пробую й час його формування в зразках поліетилену з конфігурацією електродів точка-площина. Для реєстрації значення струму використовувався світлодіод, ввімкнений у розрядний проміжок.

В іншій роботі [4], проведено дослідження пробую полімерних зразків на передньому фронті імпульсу, який залежить від часу наростання напруги. У роботі наведено вимір діелектричної проникності плівки поліетилену товщиною 3 мкм імпульсом негативної полярності амплітудою 2,5 кВ. Показано, що зі зменшенням тривалості переднього фронту від 10 пс до 10 нс значення електричного поля зростає від 5,5 до 7 МВ/см. Полімери, як і іонні кристали, характеризуються збільшенням діелектричної проникності електричного поля, коли до них прикладається напруга негативної полярності.

У публікаціях [5, 6] досліджено процес руйнування полімерів шляхом ударної іонізації макромолекул та утворення електронних лавин. Представлено модель формування лавинного пробую в твердих діелектриках та сформульовано висновки щодо потужності електричного пробую.

Теорія утворення каналу електричного пробую в полімерних діелектриках. Атом карбону має чотири валентні електрони, які беруть участь у формуванні зв'язку з іншими атомами. Властивості органічних діелектриків зумовлені наявністю ковалентних зв'язків з sp^3 -орбіталями атома карбону [7].

Прикладом органічного діелектрика є поліетилен, структурний зв'язок якого зображено на рис. 1.

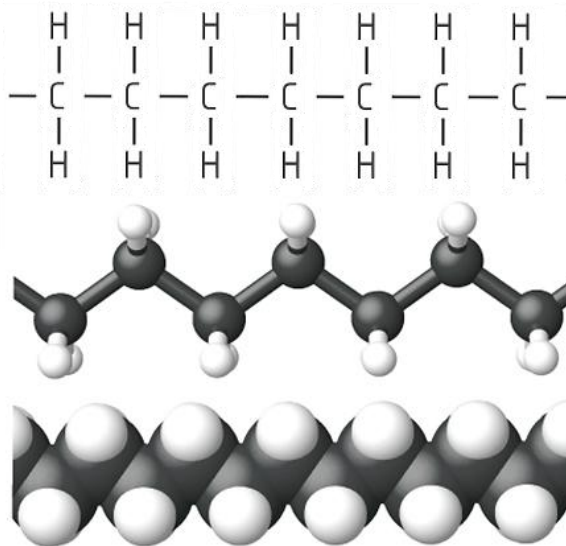


Рисунок 1 – Схема зв'язків в структурі поліетилену

Атом вуглецю формує чотири зв'язки з сусідніми атомами. Такі утворення виникають шляхом перекривання sp^3 -орбіталей, два з яких – атомами карбону, а інші – атомами водню. Енергетичні рівні в органічних матеріалах називають молекулярними орбіталями. При цьому, найнижча незайнята молекулярна орбіталь й найвища зайнята молекулярна орбіталь розділені забороненою зоною [7].

У кристалічній структурі діелектрика необхідна наявність ближнього і дальнього порядку решітки. Кристалічна структура полімеру виникає, коли довгі молекули розташовані більш-менш паралельно одна одній.

Органічні діелектрики характеризуються стрибкоподібною провідністю. Перенесення носіїв заряду діелектрика відбувається шляхом стрибків між локальними електричними станами сусідніх молекул [7]. Початок формування каналу пробую визначається процесами метал-діелектрик. При значенні напруженості поля 10^6 В/см реальна напруженість поблизу електродів може досягати 10^9 В/см. У верхньому шарі діелектрика утворюються іони C^{2+} з дірками на sp^3 -орбіталях внаслідок тунельного переходу електронів [7].

Розвиток каналу пробую в поліетилені пов'язаний з прямолінійним перенесенням позитивного заряду послідовно до найближчих атомів вуглецю і генерацією електронів до зони провідності. Частина з них рекомбінується з дірками з подальшим виділенням тепла. Надлишкова енергія витрачається на розрив хімічних зв'язків і утворення вільних макромолекул.

Тепловий тиск утворює канал, який тягнеться від позитивного електрода вглиб матеріалу. Діаметр каналу пробою визначається розміром шару іонів C^{2+} у верхньому шарі діелектрика і лінійно зростає зі збільшенням напруженості зовнішнього поля та провідності [8]. Процес руху каналу пробою може затримуватися утворенням поверхневого шару іонів C^{2+} . Модель каскадних переходів передбачає умову ініціювання пробою в діелектрику та утворення поверхневого шару іонів C^{2+} за рахунок тунельного переходу електронів з полімеру в метал.

Механізм пробою є складним явищем у випадку твердих тіл і змінюється залежно від часу прикладання напруги, як показано на рис. 2 [5, 9]. За фізичною природою виникнення пробою ізоляції та прояву з плином часу можна класифікувати наступним чином: електричний, електромеханічний, електротепловий, електрохімічний. Час виникнення електричного пробою досягає значень від 10^{-9} до 10^{-6} с, при цьому значення електромагнітного $10\text{--}100$ МВ/см. Для електротеплового та електромеханічного пробою процес виникає при значенні електричного поля 1 МВ/см, за час від 10^{-6} до 10^2 с. Для виникнення електрохімічного пробою необхідно досить тривалий період часу від 1 секунди до 1 місяця та низьке значення електромагнітного поля, внаслідок процесу окиснення та гідролізу.

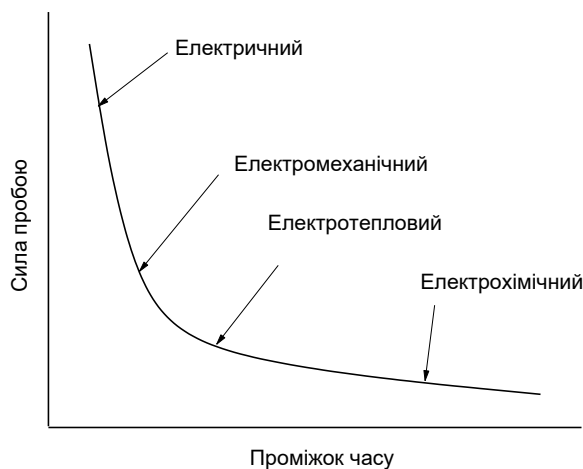


Рисунок 2 – Зміна сили пробою з плином часу після подачі напруги

Електричний пробій. Електричний пробій залежить від наявності вільних електронів, які здатні мігрувати через кристалічну решітку діелектрика. Зазвичай в твердих діелектриках присутня невелика кількість домішок та структурних недосконалостей, в яких накопичуються електрони в наслідок дії електричного поля. Внутрішній пробій виникає коли з деяких початкових електронів у твердому тілі створюється електронна лавина, в якій електрони розсіюють енергію свого руху, збуджуючи пружні коливання кристалічних ґраток. У цьому процесі, при досягненні певної критичної швидкості, відщеплюються нові електрони й виникає ударна іонізація електронами у твердому тілі. У свою чергу,

даний вид можна розділити на пробій макроскопічних однорідних та неоднорідних діелектриків.

Перший підвид характеризується стрімким розвитком протікання процесу, за час від 10^{-9} до 10^{-6} с і не обумовлений тепловою енергією, хоча електрична міцність при електричному пробі до деякої міри залежить від температури. Даний вид пробою передбачає відсутність впливу електропровідності, діелектричних втрат, іонізації газових включень та чинників, які сприяють нагрівання матеріалу.

Електричний пробій неоднорідних діелектриків характерний для матеріалів, що містять газові включення. Перебіг процесу має стрімкий розвиток та велику швидкість. Електрична міцність твердих діелектриків не залежить від товщини матеріалу в однорідному полі й температури до певного значення, інакше виникає електричне зниження міцності матеріалу та розвивається процес теплового пробою.

Електромеханічний пробій. Електромеханічний пробій супроводжується механічним руйнуванням і утворенням мікротріщин під дією активності електричного поля або, в деяких випадках, дії ультрафіолетових променів сонця, що викликає розрив зв'язку між тарілками деяких діелектриків.

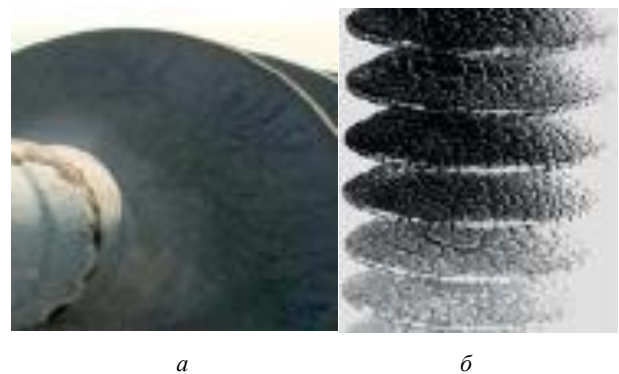


Рисунок 3 – Тріщини на поверхні ізолятора [2]:
а – глибиною менше $0,1$ мм; б – глибиною більше $0,1$ мм

На рис. 3 а показано поверхні мікротріщини глибиною менше $0,1$ мм. Як показано в роботі [2], вони не становлять значної загрози для подальшої роботи ізолятора, але потребують додаткового контролю, бо може статися значне пошкодження. У випадку, якщо глибина тріщини перевищує значення $0,1$ мм рис. 3 б, то це призводить до накопичення значної кількості бруду, що сприяє появі поверхневих трекінгів в зоні дії електричного поля і можливого оголення склопластикового стрижня.

Електротепловий (тепловий) пробій. Причиною такого пробою є руйнування твердого діелектрика під впливом тепла, що виділяється в результаті порушення тепловідведення від внутрішньої області діелектрика. Полімери, як і іонні кристали, характеризуються збільшенням діелектричної напруженості електричного поля, коли подається напруга негативної полярності. Пробивна напруга при даному пошкодженні також залежить від таких факторів, як частота електричного поля, умов охолодження ізоляції, температури навколишнього середовища, ступеня

забрудненості району, наявність грибка або колонії грибів на поверхні.

Пробій композитного матеріалу на передньому фронті імпульсу сильно залежить від часу наростання напруги. Протягом періоду електричного пробою, близько 90 нс, струм лінійно зростає від нуля до певного значення з подальшим різким стрибком у момент, коли на поверхні матеріалу з'являється канал пробою. Як показано в роботі [10], середній струм становить близько 5 мА. При діаметрі каналу 1–10 мкм густина струму становить близько від $5 \cdot 10^3$ до $5 \cdot 10^5$ А/см². Швидкість руху фронту пробійного каналу при імпульсі напруги позитивної полярності становить $1,6 \cdot 10^6$ см/с, а негативної полярності в межах від 10^3 до 10^4 см/с [3, 11]. При цьому, канал пробою виникає від позитивно зарядженого електрода вглиб діелектрика, так званий анодний пробій [7].

Теоретичні моделі розриву враховують утворення вільних носіїв заряду та дезорганізацію полімеру. У роботах [10, 12] запропоновано пояснення даного явища, яке складається з декількох стадій розриву. Цей процес включає введення електронів з катода в полімер і захоплення введених електронів з виділенням енергії, що приблизно пропорційне глибині введення. Далі енергія передається іншому електрону, таким чином виникають «гарячі» електрони. Вони спричиняють розрив макромолекул на вільні неспарені електрони (радикали). Середня довжина вільного пробігу електронів збільшується в областях з меншою густиною (через руйнування макромолекул). Це створює умови для ударної іонізації молекул, що призводить до різкого збільшення струму. Тепло, що виділяється, викликає деструкцію полімеру і утворення каналу пробою [7].

Електрохімічний пробій. Даний вид пробою найбільш характерний для органічних діелектриків та виникає в мережах постійної та змінної напруги низької частоти через процес електрохімічного старіння діелектрика в електричному полі, при якому опір матеріалу ізоляції необоротно зменшується. Розвиток такого процесу займає досить багато часу. У присутності повітря та інших газів відбувається зміна хімічних властивостей діелектричних матеріалів під впливом постійних навантажень. Важливими хімічними реакціями є такі [9]:

Окислення. У присутності повітря або кисню матеріали, такі як гума і поліетилен, піддаються окисленню, що призводить до появи поверхневих мікротріщин.

Гідроліз. Виникає у разі присутності на поверхні твердого діелектрика вологи або водяної пари. У результаті швидко погіршуються електричні властивості діелектричних матеріалів та значно скорочується термін їхньої служби.

Основними чинниками старіння ізоляції діелектрика є високі значення температури та вологості повітря. Навіть за відсутності електричних полів хімічна деградація ізоляційних матеріалів може відбуватися через процеси, такі як хімічна нестабільність при високих температурах, окислення і

розтріскування в присутності повітря і озону, гідроліз під впливом вологи і тепла. Додаткове прискорення старіння ізоляції зумовлене наявністю таких факторів, як ступінь забрудненості району, наближеність до магістральних шляхів, на яких періодично проводять обробку хімічними реагентами, та ін. У результаті у діелектрику виділяється мала кількість хімічно активних речовин, що сприяє утворенню напівпровідникових з'єднань.

Висновки. У роботі проведено теоретичний аналіз процесу утворення каналу електричного пробою в полімерній ізоляції. Проаналізовано класифікацію видів пробою полімерної ізоляції за фізичною природою виникнення.

Діелектрик, як ізоляційний матеріал, втрачає свої властивості, якщо напруженість електричного поля, в якому він знаходиться, перевищує критичне значення. Такому явищу дали назву пробою діелектрика або порушення його електричної міцності та втрати діелектричних властивостей, з наступним утворенням каналу пробою з високою електричною провідністю.

У більшості випадків виникнення процесу пробою залежить від таких факторів, як частота електричного поля, умови охолодження ізоляції, температура навколишнього середовища, ступінь забрудненості району, наявність грибка або колоній грибів на поверхні, наближеність до магістральних шляхів, на яких періодично проводять обробку хімічними реагентами. Як результат, у діелектричному матеріалі виникає хімічна реакція руйнування зв'язків атомів карбону та водню та утворення каналу пробою.

Список літератури

1. Application and suitability of polymeric materials as insulators in electrical equipment / S. K. M. Haque et al. *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 10. 2758. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14102758>.
2. Кирик В. В. Особливості використання полімерної ізоляції в електричних мережах. *Гідроенергетика України*. 2018. № 1-2. С. 52–57.
3. Yamada H., Kimura S., Sato T. Electro-optical measurement of prebreakdown current and breakdown time lag in polyethylene using nano-second rectangular pulse voltage. *Proceedings of the 3rd International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics*, Trondheim, Norway, 3–6 July 1989. P. 87–91. DOI: <https://doi.org/10.1109/icsd.1989.69167>.
4. Zakrevskii V. A., Pakhotin V. A., Sudar' N. T. Effect of the voltage pulse front steepness on the electric strength of polymers. *Technical Physics*. 2018. Vol. 63, no. 12. P. 1814–1819. DOI: <https://doi.org/10.1134/s1063784219010262>.
5. Zhao L., Su J. C., Liu C. L. Review of developments on polymers' breakdown characteristics and mechanisms on a nanosecond time scale. *AIP Advances*. 2020. Vol. 10, no. 3. 035206. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5110273>.
6. Refined dielectric breakdown model for crystalline organic insulators: electro-thermal instability coupled to interband impact ionization / A. M. N. Lima et al. *2010 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC)*, Atlanta, GA, USA, 23–27 May 2010. P. 63–68. DOI: <https://doi.org/10.1109/ipmhvc.2010.5958296>.
7. Kulikov V. Electrical breakdown of polymer materials. *Norwegian Journal of development of the International Science*. 2021. No. 62(1). P. 51–54.
8. Kulikov V., Yakovlev V., Bobkova L. Model of a streamer discharge channel in monocrystalline CdS. *Norwegian Journal of development of the International Science*. 2020. No. 44(1). P. 21–24.
9. Benha University Faculty of Engineering at Shoubra Electrical Engineering Department. Chapter 4. Breakdown in solid dielectrics. *High Voltage Engineering Course*. 2014.

- URL: <https://www.bu.edu.eg/portal/uploads/Engineering,%20Shoubra/Electrical%20Engineering/3103/crs-8705/Files/BREAKDOWN%20in%20SOLID%20DIELECTRICS1.pdf> (дата звернення: 23.08.2024).
- Liu D., Kao K. C. High-field hole injection, conduction, and breakdown in polyethylene films fabricated by plasma polymerization. *Journal of Applied Physics*. 1991. Vol. 69, no. 4. P. 2489–2496. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.348966>.
 - Zakrevskii V. A., Pakhotin V. A., Sudar' N. T. Pulsed electric strength of polypropylene film. *Technical Physics*. 2017. Vol. 62, no. 2. P. 276–281. DOI: <https://doi.org/10.1134/s1063784217020281>.
 - Kao K. C. New theory of electrical discharge and breakdown in low-mobility condensed insulators. *Journal of Applied Physics*. 1984. Vol. 55, no. 3. P. 752–755. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.333133>.
- References**
- S. K. M. Haque *et al.*, “Application and suitability of polymeric materials as insulators in electrical equipment”, *Energies*, vol. 14, no. 10, May 2021, Art. no. 2758, doi: <https://doi.org/10.3390/en14102758>
 - V. V. Kyryk, “Osoblyvosti vykorystannia polimernoї izolatsii v elektrychnykh mrezhakh [Features of the use of polymeric insulation in electrical networks]”, *Hidroenerhetyka Ukrainy*, no. 1-2, pp. 52–57, 2018. (in Ukrainian)
 - H. Yamada, S. Kimura, and T. Sato, “Electro-optical measurement of prebreakdown current and breakdown time lag in polyethylene using nano-second rectangular pulse voltage”, in *Proceedings of the 3rd International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics*, Trondheim, Norway, Jul. 3–6, 1989. pp. 87–91, doi: <https://doi.org/10.1109/icds.1989.69167>
 - V. A. Zakrevskii, V. A. Pakhotin, and N. T. Sudar', “Effect of the voltage pulse front steepness on the electric strength of polymers”, *Technical Physics*, vol. 63, no. 12, pp. 1814–1819, Dec. 2018, doi: <https://doi.org/10.1134/s1063784219010262>
 - L. Zhao, J. C. Su, and C. L. Liu, “Review of developments on polymers' breakdown characteristics and mechanisms on a nanosecond time scale”, *AIP Advances*, vol. 10, no. 3, Mar. 2020, Art. no. 035206, doi: <https://doi.org/10.1063/1.5110273>
 - A. M. N. Lima, A. G. S. B. Neto, H. Neff, and E. U. K. Melcher, “Refined dielectric breakdown model for crystalline organic insulators: Electro-thermal instability coupled to interband impact ionization”, in *2010 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC)*, Atlanta, GA, USA, May 23–27, 2010. pp. 63–68, doi: <https://doi.org/10.1109/ipmhvc.2010.5958296>
 - V. Kulikov, “Electrical breakdown of polymer materials”, *Norwegian Journal of Development of the International Science*, no. 62(1), pp. 51–54, 2021.
 - V. Kulikov, V. Yakovlev, and L. Bobkova, “Model of a streamer discharge channel in monocrystalline CdS”, *Norwegian Journal of Development of the International Science*, no. 44(1), pp. 21–24, 2020.
 - Benha University Faculty of Engineering at Shoubra Electrical Engineering Department, “Chapter 4. Breakdown in solid dielectrics”, in *High Voltage Engineering Course*. Benha Univ., 2014. Accessed: Aug. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.bu.edu.eg/portal/uploads/Engineering,%20Shoubra/Electrical%20Engineering/3103/crs-8705/Files/BREAKDOWN%20in%20SOLID%20DIELECTRICS1.pdf>
 - D. Liu and K. C. Kao, “High-field hole injection, conduction, and breakdown in polyethylene films fabricated by plasma polymerization”, *Journal of Applied Physics*, vol. 69, no. 4, pp. 2489–2496, Feb. 1991, doi: <https://doi.org/10.1063/1.348966>
 - V. A. Zakrevskii, V. A. Pakhotin, and N. T. Sudar', “Pulsed electric strength of polypropylene film”, *Technical Physics*, vol. 62, no. 2, pp. 276–281, Feb. 2017, doi: <https://doi.org/10.1134/s1063784217020281>
 - K. C. Kao, “New theory of electrical discharge and breakdown in low-mobility condensed insulators”, *Journal of Applied Physics*, vol. 55, no. 3, pp. 752–755, Feb. 1984, doi: <https://doi.org/10.1063/1.333133>

Hadziura (received) 10.09.2024

UDC 621.316.13

MYKOLA NIKONOV ✉ – Postgraduate Student of the Department of Electric Power Transmission, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Department of Electric Power Transmission; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0542-7594>; e-mail: mykola.nikonov@ieee.khpi.edu.ua

SERGIY SHEVCHENKO – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Electric Power Transmission, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9658-7787>; e-mail: Sergii.Shevchenko@khpi.edu.ua

POLYMER INSULATION BREAKDOWN TYPES ANALYSIS

The paper investigates the theory of electrical breakdown channel formation in polymeric dielectrics. The process of operating electrical networks is quite complex, since dielectric materials lose their insulating properties under the influence of electric field intensity, which causes the destruction of molecular bonds. This phenomenon is called dielectric breakdown, or a violation of its electrical strength and loss of dielectric properties, followed by the formation of a breakdown channel with high electrical conductivity. Additional factors, such as insulation cooling conditions, external mechanical stress, ultraviolet radiation, ambient temperature, air humidity, proximity to main roads where chemicals are periodically treated, the degree of contamination of the area, the presence of a fungal colony on the surface, accelerate the process of destruction of the insulating properties of the dielectric. The paper considers the classification of polymer insulation breakdown types according to the physical nature of their occurrence, such as electrical breakdown, electromechanical breakdown, and electrochemical breakdown. The study of these processes has a significant impact, because the process of diagnosing some types of breakdown with the naked eye is complicated due to the process occurring in the middle of the insulation and not causing damage to the entire insulation, unlike classical porcelain or glass. An example of such a process is an electrothermal breakdown. It is caused by a disturbance in the thermal equilibrium in the dielectric between the processes of heat generation and heat transfer. An increase in the temperature of the dielectric increases its electrical conductivity, leakage currents, and heat generated in the insulation. An increase in temperature increases the electrical conductivity of the dielectric, which also generates additional heat and creates an avalanche-like process of dielectric heating and subsequent breakdown.

Keywords: polymeric insulation; electrical breakdown; electrothermal breakdown; electromechanical breakdown; electrochemical breakdown.