

УДК 537.212:621.3.048

Малюшевська А. П.¹, Топоров С. О.², Гунько В. І.³¹Канд. техн. наук, доцент, старш. наук. співроб. Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України, E-mail: dphc@ijpt.com.ua²Пров. інженер Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України³Зав. сектором Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України

ДОВГОТРИВАЛА ЕЛЕКТРИЧНА МІЦНІСТЬ ПОЛІМЕРНИХ ПЛІВОК ПІД ДІЄЮ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ

Мета роботи – вивчення довговічності полімерних плівок в усталеному електричному полі постійного струму, визначення характеру процесу електричного руйнування полімерних плівок за умов заглишення часткових розрядів.

Методи досліджень – експериментальні з обробкою результатів засобами математичної статистики.

Отримані результати – встановлено, що електрична довговічність полімерних плівок мікронної товщини експоненціально зменшується при збільшенні середньої напруженості поля. Оцінка електричної міцності досліджених полімерних плівок на підставі визначення їхньої довговічності дозволяє розглядати плівку поліпропілену, як найбільш електрично міцну в даних умовах випробувань.

Наукова новизна – експериментально визначені кінетичні закономірності електричного старіння різних плівкових полімерних діелектриків у постійному електричному полі в умовах обмеження часткових розрядів.

Практична значимість – дані з пробивної напруженості і довговічності плівкових полімерних діелектриків корисні для оцінювання працездатності силових конденсаторів та інших пристроїв з полімерними діелектричними плівками, прогнозування термінів збереження їх працездатного стану.

Ключові слова: електрична міцність, полімерні електроізоляційні плівки, напруженість електричного поля.

ВСТУП

Вивчення електричної міцності полімерних діелектриків під впливом електричного поля налічує багато десятиліть. Зміни під впливом електричного поля механічних і електричних властивостей полімерів детально вивчалися в умовах, коли не приймалося спеціальних заходів для обмеження часткових розрядів, тобто розрядів у газових включеннях всередині ізоляції, проміжках між зразком і електродами, а також поверхневих розрядів. Загальновідомо, що в результаті ерозії, що виникає в полімерному матеріалі під впливом часткових розрядів, відбувається поступове руйнування досліджуваних зразків, що і призводить до пробою. Закономірності електричного старіння полімерних діелектриків в умовах часткових розрядів були узагальнені і систематизовані в ряді монографій вчених зі світовим ім'ям: Г. С. Кучинського [1], А. Н. Цікіна [2], Б. І. Сажіна [3], L. A. Dissado, J. C. Fothergill [4]. Разом з тим давно існував інтерес і до вивчення електричної міцності органічних діелектричних матеріалів в умовах виключення часткових розрядів, тобто в умовах дії суто електричного поля на полімер [5], тим більше, що вдосконалення технологій виготовлення полімерних ізоляційних матеріалів, просочуючих рідин для плівкових діелектричних систем і виробів з цих компонентів дозволили істотно зменшити можливість виникнення часткових розрядів у діелектрику в процесі експлуатації. Цей факт також пояснює зростання інтересу до електричного руйнування полімеру, не пов'язаного з впливом часткових розрядів. Дані наукових робіт [6–8] дозволяють припустити, що при практично повному обме-

женні часткових розрядів в полімерах під дією електричного поля також відбувається поступова зміна структури і властивостей матеріалу, що закінчується пробоєм.

Вивчення руйнування полімерних діелектричних плівок в результаті дії електричного поля представляє не тільки науковий, але й великий практичний інтерес. Такі плівки знаходять широке застосування як високовольтна ізоляція в різних електротехнічних пристроях, наприклад, у високовольтних імпульсних конденсаторах. Розвиток техніки пред'являє все більші вимоги до її надійності і довговічності електротехнічних пристроїв [9], оскільки часто полімерна електроізоляція експлуатується в досить жорстких умовах, наприклад, у високовольтних імпульсних конденсаторах робоча напруженість підвищується до 200 МВ/м при обмеженому ресурсі. Таким чином, дані з пробивної напруженості і довговічності плівкових полімерних діелектриків корисні для оцінювання працездатності силових конденсаторів та інших пристроїв з полімерними діелектричними плівками, прогнозування термінів збереження їх працездатного стану і для розробки технології виготовлення плівкової полімерної ізоляції з підвищеною електричною міцністю.

МЕТА ДОСЛІДЖЕНЬ

Метою роботи є вивчення довговічності полімерних плівок в усталеному електричному полі постійного струму за умов заглишення часткових розрядів, визначення характеру процесу електричного руйнування полімерних плівок.

Під довговічністю розуміється властивість елемента або системи довгостроково зберігати працездатність до

настання граничного стану. У цій роботі під працездатністю полімерної плівки мається на увазі виконання нею електроізолюючих функцій, а під граничним станом розуміємо настання конкретної події – пробую зразка. Під пробом тут в свою чергу розуміється різке (лавиноподібне) зростання величини електричного струму, що протікає крізь зразок, яке, як правило, призводить до його механічного руйнування.

ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Як характеристика електричної міцності полімерних діелектриків використовується величина їхньої пробивної напруженості ($E_{пр}$, МВ/м), яку ще називають короткочасною електричною міцністю, та електрична довговічність (τ , с), яка, в свою чергу, отримала також назву довготривала електрична міцність. Закономірності електричного старіння полімерів вивчають, досліджуючи залежність довговічності зразка від величини середньої напруженості електричного поля або, при визначенні $E_{пр}$, від швидкості зростання напруги. Тому, у процесі проведення вимірів, необхідно було створити однорідний або близький до такого розподіл електричного поля в міжелектродному просторі. Тільки в цьому випадку як характеристику електричного поля можна використати його середню напруженість, що дорівнює відношенню напруги, прикладеної до електродів, до ширини міжелектродного проміжку.

При проведенні випробувань тонких діелектричних шарів (наприклад, полімерних плівок) як електроди широко використовуються сфера й площина за умови, що радіус сфери набагато більше товщини плівки. У такій електродній системі розподіл поля в області мінімальної відстані між електродами близький до однорідного. Якщо діелектрик перебуває в середовищі з набагато меншою електричною міцністю, наприклад, у повітрі, то можливо виникнення розрядів біля країв електродів, що призводить до спотворення однорідного розподілу поля. Для усунення крайових розрядів рекомендується проводити випробування в середовищі, що має більш високе значення електричної міцності в порівнянні з електричною міцністю повітря й діелектричну проникність близьку до діелектричної проникності полімерного діелектрика, і в

той же час значно більш високу провідність, наприклад, поміщати зразок у конденсаторне масло або кремнійорганічну рідину [10]. У даній роботі при електричних випробуваннях як середовище використовувалося трансформаторне масло марки Т-1500 - неполярна рідина з діелектричною проникністю 2,2 і питомим об'ємним електричним опором $5 \cdot 10^{11}$ Ом·м.

Висока швидкість руйнування полімерів в результаті дії часткових розрядів, у всякому разі в постійному полі, може мати місце тільки при наявності досить великих пор або значних просвітів між електродами і досліджуванім зразком. Тому, виключити часткові розряди в обсязі матеріалу або, принаймні, значно зменшити їхню інтенсивність простіше всього, використовуючи як об'єкти випробування плівкові полімерні діелектрики товщиною в кілька мікрометрів. Далі істотно зменшити ймовірність потрапляння пори в міжелектродний проміжок можна, якщо зменшити площу поверхні сферичного електроду. Відповідно, малим буде і обсяг полімеру, у якому можливий пробій, тому мала й ймовірність потрапляння великої пори або дефекту плівки в цей «небезпечний» обсяг. Занурюючи таку електродну систему, із установленим у неї зразком плівки, у діелектричну рідину (що задовольняє вищезазваним вимогам) можна повністю усунути крайові розряди.

Довговічність і короткочасна електрична міцність зразків полімерної плівки під дією електричного поля визначалася за допомогою високовольтного апарата АИИ-70 ТУ 25-06-1769-76, що забезпечує лінійний підйом напруги, реєстрація значення напруги пробую ($U_{пр}$) проводилася за допомогою кіловольтметра електростатичного С196 ТУ 25-04-130-79, довговічність (час життя зразків полімерної плівки до пробую) фіксувався за допомогою секундоміра механічного СОСпр-26-2-00 ТУ 67-03-186-82. Об'єктами цих досліджень були полімерні діелектричні плівки товщиною від 10 до 70 мкм, були обрані плівкові матеріали, що знайшли широке використання в електротехніці, в тому числі і при виготовленні силових конденсаторів. Досліджувалися поліетилентерефталатна (ПЕТФ), полікарбонатна (ПК), поліамідна (ПШ), поліпропіленова (ПП), поліетиленова (ПЕ), політетрафторетиленова (ПТФЕ) плівки. Деякі фізичні й електричні властивості полімерів, з яких виготовлені досліджувані плівки, представлені у табл. 1 [11].

Таблиця 1 – Фізичні й діелектричні властивості полімерів

Найменування полімеру	П - полярний; Н - неполярний	А - аморфний; К - кристалічний	Діелектрична проникність	Тангенс кута діелектричних втрат	Максимальна робоча температура, °С
ПЕТФ	П	К	3,2	0,0050	130
ПК	П	К	3,0	0,0020	140
ПШ	П	К	3,5	0,0030	240
ПП	Н	К	2,2	0,0002	110
ПЕ	Н	А	2,2	0,0003	85
ПТФЕ	Н	К	2,0	0,0003	260

Зразки плівок являли собою квадратні фрагменти зі стороною 100 мм. Товщина сухих зразків плівки визначалася відповідно до ГОСТ 17035-86 «Пластмассы. Методы определения толщины пленок и листов» по вибірці 10 зразків з 100.

Електрична міцність діелектриків (у тому числі полімерів і полімерних плівок), яка характеризується пробивною напруженістю або електричною довговічністю, піддається статистичному розкиду і її варто розглядати як випадкову величину. Тобто, результати випробувань довготривалої і короточасної електричної міцності полімерних діелектриків через значний розкид експериментальних значень пробивної напруженості й довговічності мають потребу в статистичній обробці. Середнє значення величини Y , що визначається, (у якості Y виступають середні значення довговічності τ або пробивної напруженості $E_{пр}$), її середньоквадратичне відхилення σ і коефіцієнт варіації v , розраховувалися за формулами:

$$Y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i ;$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y)^2}{n}} ;$$

$$v = \sigma / Y ,$$

де n - число випробувань, Y_i - довговічність (або пробивна напруженість) при i -ому випробуванні.

На рис. 1 в напівлогарифмічних координатах представлені залежності $\tau(E)$ досліджених плівок. Кожна точка на графіку відповідає середній довговічності партії зразків (15 штук) при заданій напруженості поля. Наве-

дені дані вказують на помітне розходження міцнісних властивостей плівок різних типів. У той же час, для всіх досліджених плівок характерна чітко виражена залежність $\tau(E)$.

У розглянутому діапазоні зміни середньої напруженості електричного поля всі залежності близькі до лінійного виду, тобто електрична довговічність плівки експоненціально залежить від напруженості електричного поля. Отримані дані вказують на помітну відміну міцнісних властивостей плівок різних полімерів, але, варто зауважити, що відрізки прямих, що характеризують довговічність, мають приблизно однаковий нахил. Тому, оцінка електричної міцності досліджених полімерних плівок на підставі визначення їх довговічності дозволяє розглядати поліпропіленову плівку, як найбільш електрично міцну у даних умовах випробувань.

Слід зазначити, що в тих випадках, коли яким-небудь шляхом вдається позбутися від макродефектів у діелектрику або істотно зменшити ймовірність потрапляння їх у міжелектродний проміжок, електрична міцність його різко зростає. Був проведений спеціальний порівнювальний експеримент: отримано залежності довговічності полімерної електроізоляційної плівки від напруженості електричного поля в умовах, коли не вживалося жодних заходів щодо обмеження часткових розрядів. Залежності були зняті для поліетилентерефталатної плівки товщиною 15 мкм і поліпропіленової плівки товщиною 10 мкм, як для таких, що широко використовуються в діелектричних системах високовольтних імпульсних конденсаторів, спроектованих Інститутом імпульсних процесів і технологій НАН України. Довготривала електрична міцність зразків знизилася, особливо при високих напругах. На рис. 2 зіставлені результати дослідження довговічності ПП та ПЕТФ плівок за умов заглушення часткових розрядів (ЧР) і без нього.

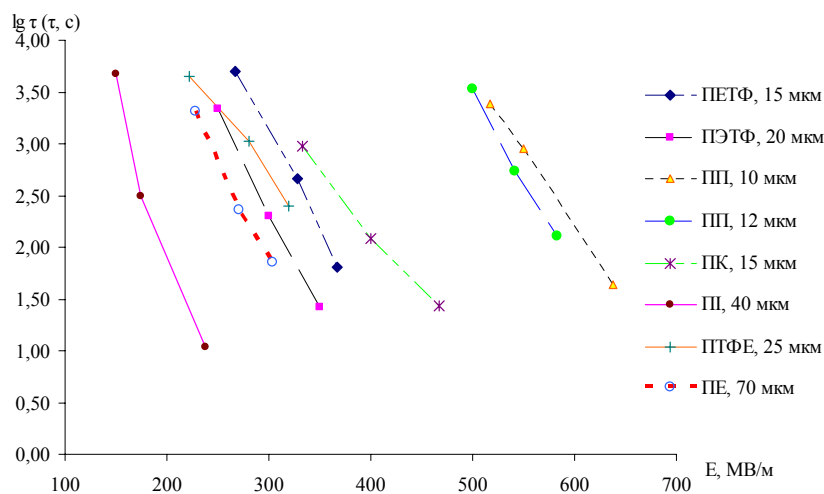


Рисунок 1 – Залежність довговічності полімерних плівок від середньої напруженості електричного поля

Таким чином, при експериментальному встановленні електричної міцності і довговічності полімерних плівок вкрай важливими є методика проведення вимірювань і урахування (або вибіркоче нівелювання) комплексу явищ, що виникають при пробіі твердих полімерних діелектриків. Крім того, оцінка міцнісних властивостей полімерної плівки лише за пробивною напруженістю, без урахування характеру залежності довговічності від напруженості електричного поля виявляється хибною.

При старінні полімерних діелектричних плівок мікронної товщини в електричному полі можна виділити дві стадії: стадію, пов'язану з накопиченням в матеріалі плівок дефектів, і стадію, на якій відбувається швидке руйнування зразка [12]. Якщо інтенсивність часткових розрядів на першій стадії залежить від умов експерименту (і її можливо зменшити майже до нуля), то друга стадія завжди супроводжується інтенсивними розрядами, що викликають швидке руйнування. Приймемо, що довговічність визначається часом, необхідним для утворення в результаті розриву макромолекул полімеру досить великого каналу (або пори), в якій можуть виникнути розряди значної потужності. Нехай для цього має розірватися N зв'язків у макромолекулі полімеру. Тоді довговічність ϕ визначатиметься із співвідношення

$$N = V_{nop} \int_0^{\tau} v(t) dt, \quad (1)$$

де V_{nop} – об'єм пори; $v(t)$ – швидкість розпаду макромолекули в електричному полі на одиницю її об'єму.

Тобто, швидкість розриву макромолекул визначає довговічність полімерної плівкової ізоляції. Розгляд різних гіпотез про руйнування макромолекул полімерів під впливом електричного поля [5–13] дозволяє зв'язати їх розрив з протіканням двоступеневого процесу, на першій стадії якого відбувається польова іонізація макромолекули, а на другій – термофлуктуаційний розпад ослабленого зв'язку в макроіоні, що утворився. Кожна із стадій цього процесу характеризується певною константою швидкості (k_1, k_2 , відповідно), яка залежить від напруже-

ності електричного поля. За розглянутою гіпотезою, якщо швидкість розпаду макромолекул лімітується швидкістю розпаду молекулярних іонів, залежність довговічності полімерного плівкового зразка від напруженості буде носити експоненціальний характер, у всякому разі, при температурах нижче температури плавлення полімеру. Швидкість розпаду макромолекул описується відомою системою кінетичних рівнянь для процесу, що складається з двох послідовних мономолекулярних реакцій [16]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dn^0(t)}{dt} &= -k_1 n^0(t) \\ \frac{dn^+(t)}{dt} &= k_1 n^0(t) - k_2 n^+(t) \\ C &= n^0(t) + n^+(t) + n^b(t) \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

де $n^0(t)$ - концентрація зв'язків, що не розірвалися;

$n^+(t)$ - концентрація іонізованих зв'язків; $n^b(t)$ - концентрація розірваних зв'язків; C - концентрація зв'язків, що складають кістяк макромолекул і орієнтованих уздовж поля; t - час.

Перше рівняння системи визначає швидкість зменшення концентрації зв'язків, що не розірвалися, друге - швидкість зміни в часі концентрації іонізованих зв'язків, а третє є рівнянням балансу. При константах швидкостей реакції, що не змінюються з часом, дана система допускає аналітичне рішення. В нестационарному випадку, коли константи швидкості є функціями часу, система диференціальних рівнянь, що описує процес розриву макромолекул, в загальному випадку може бути вирішена тільки чисельно. Вирішення вищенаведеної системи диференціальних рівнянь для визначення виду аналітичних виразів, що встановлюють взаємозв'язок між пробивним напруженістю, швидкістю зростання напруги на зразку і

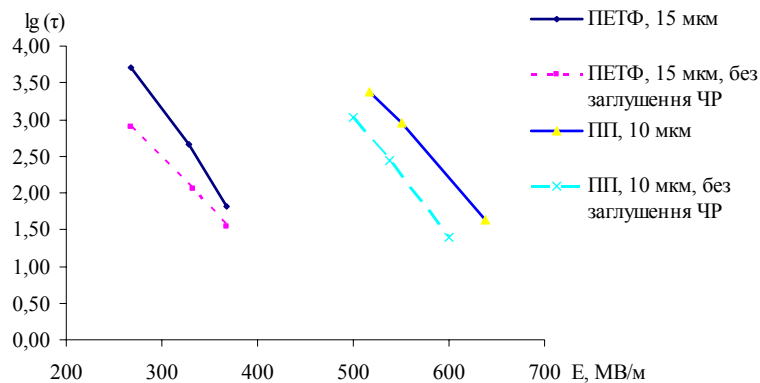


Рисунок 2 – Залежність довговічності від середньої напруженості поля для плівок ПЕТ, ПП

його температурою, електричної довговічністю і напруженістю електричного поля є важливим завданням подальших досліджень.

ВИСНОВКИ

Визначені кінетичні закономірності електричного старіння різних плівкових полімерних діелектриків у постійному електричному полі в умовах обмеження часткових розрядів. Встановлено, що електрична довговічність полімерних плівок мікронної товщини експоненціально зменшується при збільшенні середньої напруженості поля. Оцінка електричної міцності досліджених полімерних плівок на підставі визначення їхньої довговічності дозволяє розглядати плівку поліпропілену, як найбільш електрично міцну в даних умовах випробувань.

Кінетичний характер пробою полімерних діелектричних плівок мікронної товщини обумовлений існуванням підготовчої стадії, що визначає довговічність зразка в електричному полі. На цій стадії в локальних областях зразка полімерної плівки, де напруженість електричного поля перевищує середні значення, відбувається розпад макромолекул полімеру, ініційований електричним полем.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кучинский Г. С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – М.: Энергия, 1979. – 224 с.
2. Койков С. Н., Цикин А. Н. Электрическое старение твердых диэлектриков и надежность диэлектрических деталей. Л.: Энергия, 1968. – 186 с.
3. Электрические свойства полимеров. Под. ред. Б. И. Сажина. – Л.: Химия, 1977. – 192 с.
4. Dissado L. A., Fothergill J. C. Electrical Degradation and Breakdown in Polymers. – London: Peter Peregrinus, 1992. – 456 p.
5. Weber W. Durchschlad von Paraffin. //Archiv fur Elektrotechnik. – 1933. – В. 27, № 7. – S. 511–522.
6. Борисова М. Э. Закономерности электрического старения полиэтиленовой кабельной изоляции при отсуствии частичных разрядов / М. Э. Борисова, С. Н. Койков, Я. Орос // Электричество. – 1982. – №12. – С. 58-59.
7. Бережанский В. Б. Предельные характеристики емкостных накопителей энергии с пленочными полимерными диэлектриками / В. Б. Бережанский, В. В. Городов, В. А. Закревский, В. И. Рудь // Электротехника. – 1990. – №7. – С. 27–30.
8. Ушаков В. Я. Закономерности разрушения полимеров при длительном нагружении электрическим полем / В. Я. Ушаков, А. Л. Робежко, Г. В. Ефремова // ФТТ. – 1984. – Т.26, №1. – С. 45–49.
9. Малюшевська А. П. Вплив складу і морфології конденсаторних полімерних плівок на термостабільність їх короткочасної електричної міцності / А. П. Малюшевська, С. О. Топоров // – Электротехника та електроенергетика. – 2016. – № 1. – С. 18–24. DOI 10.15588/1607-6761-2016-1-3
10. Лушейкин Г. А. Методы исследования электрических свойств полимеров / Г. А. Лушейкин. – М.: «Химия», 1988. – 160 с.
11. Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. – В 3 т. – Т.2. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 467 с.
12. Ушаков В. Я. Электрическое старение и ресурс монолитной полимерной изоляции / В. Я. Ушаков. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 152 с.
13. Кауш Г. Разрушение полимеров / Г. Кауш. – М.: Мир, 1981. – 440 с.
14. Artbauer J. Electric strength of polymers / J. Artbauer / Journal of Physics (D). – 1996. – Vol. 29. – P. 446–456.
15. Kao K. C. New Theory of electrical discharge and breakdown in low-mobility condensed insulators / K.C. Kao // Journal of Applied Physics. – 1984. – Vol. 55, № 3. – P. 752-755.
16. Еммануель Н. М. Курс хімічної кінетики / Н. М. Еммануель, Д. Р. Кнорре. – М.: Вища школа, 1984. – 201 с.

Стаття надійшла до редакції 16.03.17

Малюшевская А. П.¹, Топоров С. О.², Гунько В. И.³

¹Канд. техн. наук, доцент, старш. научн. сотр. Института импульсных процессов и технологий НАН Украины

²Вед. инженер Института импульсных процессов и технологий НАН Украины

³Зав. сектором Института импульсных процессов и технологий НАН Украины

ДОЛГОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Цель работы – изучение долговечности полимерных пленок в электрическом поле постоянного тока, определение характера процесса электрического разрушения полимерных пленок в условиях подавления частичных разрядов

Методы исследований – экспериментальные с обработкой результатов средствами математической статистики.

Полученные результаты – установлено, что электрическая долговечность полимерных пленок микронной толщины экспоненциально уменьшается при увеличении средней напряженности поля. Оценка электрической прочности исследованных полимерных пленок на основании определения их долговечности позволяет рассматривать пленку полипропилена, как наиболее электрически прочную в данных условиях испытаний.

Научная новизна – экспериментально определены кинетические закономерности электрического старения различных диэлектрических пленок в электрическом поле постоянного тока в условиях ограничения частичных разрядов.

Практическая значимость – данные о пробивной напряженности и электрической долговечности диэлектрической пленки полезны для оценки предельной работоспособности силовых конденсаторов и других устройств с полимерными диэлектрическими пленками, прогнозирования продолжительности их работоспособного состояния.

Ключевые слова: электрическая прочность, полимерные электроизоляционные пленки, напряженность электрического поля

Malyushevska A. P.¹, Toporov S. O.², Gunko V. I.³

¹Ph.D., associate professor, senior staff scientist of Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine

²Senior engineer of Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine

³Sector chief of Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine

LONG-TERM ELECTRICAL STRENGTH OF POLYMER FILMS UNDER THE ELECTRICAL FIELD INFLUENCE

Purpose – to study the durability of polymer films in electric field of direct current, define the type of the process of polymer films' electric destruction under conditions of partial discharge suppression.

Research methods – experimental, results were processing by means of mathematical statistics.

The results – the electrical durability of micron thickness polymer films exponentially decreases with increasing of average field strength. Evaluation of studied polymer films' electric strength based on the definition of their longevity allow to considered polypropylene film as the most electrically strong in these testing conditions.

Scientific novelty – experimentally was determined kinetic type of various polymeric dielectrics films' electrical aging in electric field of direct current in terms of partial discharge suppression.

The practical significance – data on breakdown strength and durability of polymeric insulating films are useful for evaluating the efficiency limit of power capacitors and other devices with polymer dielectric films, forecasting the duration of their operability.

Key words: electrical strength, polymer insulating films, electric field intensity

REFERENCES

1. Kuchinskij, G. S. (1979). Chastichnye razryady v vysokovol'tnyh konstrukciyah. Moscow, ENergiya, 224.
2. Kojkov, S. N., Cikin, A. N. (1968). Elektricheskoe starenie tverdyh dielektrikov i nadezhnost' dielektricheskikh detalej, Sankt-Peterburg, ENergiya, 186 s.
3. Elektricheskije svojstva polimerov. (2007). Pod. red. B. I. Sazhina, Sankt-Peterburg, Himiya, 192.
4. Dissado, L. A., Fothergill, J. S. (1992). Electrical Degradation and Breakdown in Polymers. London, Peter Peregrinus, 456.
5. Weber, W. (1933). Durchschlad von Paraffin. Archiv fur Elektrotechnik, 27, 7, 511–522.
6. Borisova, M. E., Koykov, C. H., Opoc, Ya. (1982). Zakonomernosti elektricheskogo stareniya polietilenovoy kabelnoy izolyatsii pri otsutstvii chastichnyh razryadov. Elektrichestvo, 12, 58–59.
7. Berezhanskiy, V. B., Gorodov, V. V., Zakrevskiy, V. A., Rud, V. I. (1990). Predelnyie karakteristiki emkostnyh nakopiteley energii s plenochnyimi polimernymi dielektrikami. Elektrotehnika, 7, 27–30.
8. Ushakov, V. Ya., Robezhko, A. L., Efremova, G. V. (1984). Zakonomernosti razrusheniya polimerov pri dlitelnom nagruzenii elektricheskim polem. FTT, 26, 1, 45–49.
9. Malyushevs'ka, A. P., Toporov, S. O. (2016). Vpliv skladu i morfologii kondensatornih polimernih plivok na termostabil'nist' ih korotkochasnoï elektrichnoï micnosti. Elektrotehnika ta elektroenergetika. 1, 18–24. DOI 10.15588/1607-6761-2016-1-3
10. Lusheykin, G. A. (1988). Metodyi issledovaniya elektricheskikh svoystv polimerov. Moscow, «Himiya», 160.
11. Koritskogo, Yu. V., Pasyinkova, V. V., Tareeva, B. M. (1987). Spravochnik po elektrotehnicheskim materialam. V 3t, Moscow, Energoatomizdat, 2, 467.
12. Ushakov, V. Ya. (1988). Elektricheskoe starenie i resurs monolitnoy polimernoy izolyatsii. Moscow, Energoatomizdat, 152.
13. Kaush, G. (1981). Razrushenie polimerov. Moscow, Mir, 440.
14. Artbauer, J. (1996). Electric strength of polymers. Journal of Physics (D), 29, 446–456.
15. Kao, K. C. (1984). New Theory of electrical discharge and breakdown in low-mobility condensed insulators. Journal of Applied Physics, 55, 3, 752–755.
16. Emmanuel, N. M., Knorre, D. R. (1984). Kurs himicheskoy kinetiki. Moscow, Vischa shkola, 201.