

DOI: 10.31319/2519-2884.48.2026.12

УДК 658.26:621.315.614

Хмельницький Є.Д., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-8605-4960,
e-mail: khmell2020@gmail.com

Количев С.В., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-1017-5125,
e-mail: kolychev.sergey58@gmail.com

Рафієв Гусейн Іслам огли, здобувач третього (доктор філософії) рівня вищої освіти
e-mail: RafiyevHuseyn@gmail.com

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Khmelnitskyi Evgen, Ph.D., Associate Professor

Kolychev Serhii, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of
Electrical Engineering and Electromechanics

Rafiyev Huseyn, Postgraduate student

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

НАДІЙНІСТЬ І ТЕРМІН СЛУЖБИ ВИСОКОВОЛЬТНИХ КАБЕЛІВ З ПАПЕРОВОЮ ПРОСОЧЕНОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ

Дослідження присвячено аналізу роботи високовольтних кабелів напругою 10 кВ промислового підприємства. Кабелі мають паперову ізоляцію, просочену каніфольно-масляною сумішшю. Наведено результати розрахунків з електричної стійкості ізоляції, залежності її характеристик від температури та частоти напруги. Розраховано швидкість реакції утворення озону, а також втрати целюлози ізоляції за 30 річний термін деструктивної дії озону та оксидів азоту.

Ключові слова: високовольтний кабель; втрати паперово-просоченої ізоляції; напруга пробою ізоляції.

The study is devoted to the analysis of the operation of high-voltage cables with a voltage of 10 kV of an industrial enterprise. The cables have paper insulation impregnated with a rosin-oil mixture. The results of calculations on the electrical resistance of the insulation, the dependence of its characteristics on temperature and voltage frequency are presented. The reaction rate of ozone formation, as well as the loss of cellulose in the insulation over a 30-year period of destructive action of ozone and nitrogen oxides, is calculated.

Keywords: high-voltage cable; paper-impregnated insulation losses; insulation breakdown voltage.

Постановка проблеми

Високовольтні кабелі підприємств відносяться до елементів системи електропостачання, які майже не мають резервування, тому повинні забезпечувати високу надійність. Основним елементом кабелів є ізоляція, у даному випадку паперова, з просоченням компаундом [1].

Ізоляція кабелів відноситься до неоднорідного діелектрика, бо має кілька різних фаз, а саме: тверду (целюлозу), рідинну (компаунд) та газову (повітряні кульки). Дослідження [2] показують, що газові вкраплення є основним чинником, який впливає на характеристики ізоляції й електричну стійкість, втрати потужності та термін безвідмовної служби. Тому визначення кількісних залежностей є предметом даного дослідження.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Фундаментальними працями з теорії та практики діелектриків можна вважати роботи [2, 3], що охоплюють увесь клас діелектриків. Однак, у практиці експлуатації кабельних мереж виникають деякі конкретні питання, на які необхідно дати конкретні відповіді. Наші дослідження [4] з роботи системи електропостачання промислових підприємств охоплювали питання динаміки струмів витоку, вищих гармонік та однофазних замикань на землю. Проте в основі вказаних процесів лежить робота ізоляції кабелів, тому дослідження неоднорідних діелектриків є актуальною задачею.

Формування мети дослідження

Аналіз електрохімічних процесів у ізоляції кабелів, визначення кількісних залежностей та розрахунок електричних характеристик паперової ізоляції. Крім того, актуальним питанням є розрахунки з руйнівних процесів у ізоляції, які впливають на термін служби кабелів.

Виклад основного матеріалу

1. Обґрунтування розрахункової методики.

Розглядаємо роботу високовольтних кабелів на 10 кВ типу ААШВ — (3×185) з алюмінієвими жилами та алюмінієвою оболонкою із захисним покриттям з шару бітуму та полівінілхлоридного пластикату. Вони мають високий рівень протикорозійної та механічної стійкості. Кабелі вказаних типів мають паперову ізоляцію з кабельного паперу та каніфольно-масляне просочення. Кабельний папір марки К-120 (товщина 120 МКМ), щільність паперу 0,7—0,9 г/см³, електрична стійкість у 40—50 кВ/см у залежності від складу просочення, величина тангенса кута втрат $tg\delta$ кабелю не більше 0,14, діелектричний коефіцієнт $\varepsilon = 3,8—4,0$.

Технічні ізолюючі матеріали у більшості конструюються з неоднорідних елементів. Так, кабельна ізоляція складається з декількох шарів паперу. В електричному відношенні окремі елементи ізоляції мають різні електричні характеристики — електро- та теплопровідності γ , діелектричні коефіцієнти ε та тангенси кута втрат $tg\delta$. Під неоднорідним діелектриком будемо вважати механічну суміш електрично різнорідних частин [5].

На особливу увагу заслуговує характеристика $tg\delta = f(U)$ для конструкцій з просоченим папером, яка має максимум у кривій $tg\delta$, що і є доказом наявності іонізації у діелектрика кабелю.

Щоб перевірити реальність великих втрат у кабелях за рахунок іонізації повітряних кульок, розрахуємо їх об'єм, прийнявши наступне значення параметрів: частоти напруги $\omega = 314$ 1/с; $tg\delta = 0,14$; відношення діелектричних коефіцієнтів компонентів ізоляції $\varepsilon = \varepsilon_a/\varepsilon_n$, де $\varepsilon_a = 3,8$ (для паперу), $\varepsilon_n = 1$ (для повітря).

Визначимо кількісне значення компонента μ (газових включень) за формулою [2]

$$tg\delta_{\max} = 0,14 = \frac{3\mu}{2\sqrt{1+3\mu}}, \text{ звідки } \mu = 9,3 \%. \quad (1)$$

Таким чином, для даної величини втрат пустоти (газові включення) займають 9,3 % від об'єму ізоляції.

З конструкції кабелю відомі розміри фазової та поясної ізоляції, тому розрахуємо об'єм ізоляції, що приходить на пустоти (газові вкраплення).

Об'єм фазової ізоляції (розрахунок на 1000 м кабелю):

$$V_{\phi} = \frac{\pi(2,5-1,8)^2}{4} \cdot 1000 \cdot 10^2 = 38,5 \cdot 10^3 \text{ см}^3.$$

Об'єм поясної ізоляції (розрахунок на 1000 м кабелю):

$$V_{\pi} = \frac{\pi(4,2-3,6)^2}{4} \cdot 1000 \cdot 10^2 = 28,3 \cdot 10^3 \text{ см}^3.$$

За даними [2] діаметр газових включень дорівнює близько $1 \cdot 10^{-5}$ см, які під впливом високо-частотних гармонік напруги іонізуються і становляться джерелом руйнівних процесів у діелектрику.

2. Порушення електричної міцності (стійкості) діелектрика.

Порушення електричної стійкості може визначатись нагріванням речовини, що може призвести її у провідний стан. Іншим фактором є напруга, коли під дією високої напруги починаються процеси ударної іонізації. Таким чином, у залежності від того чи іншого фактора розрізняють наступні види пробоїв.

Теплова форма пробою. Струм, що протікає крізь діелектрик, розігріває його. А так як діелектрик, як правило, має негативний температурний коефіцієнт ($dR/dt < 0$), то у цьому разі опір діелектрика зменшується, а струм зростає, що призводить до подальшого розігріву діелектрика. Тобто, наявність температурної залежності, є важливим критерієм теплового пробою.

Електрична форма пробою. Це форма пробою коли енергія електричного поля, — призводить до зростання вільних носіїв електричних зарядів, у результаті чого діелектрик переходить у новий стан, тобто перестає бути діелектриком.

Хімічна форма пробою. Енергія, що передається у діелектрик може здійснити перетворення з появою нової речовини, яка за своїми якостями відрізняється від основного діелектрика. Крім того, до хімічної форми пробою можна віднести і таку подію, коли нова речовина, що виникає під впливом електричних розрядів, руйнує основний діелектрик. Так, у разі дії високо-частотного електричного поля, повітряні включення у ізоляції кабелів перетворюються на озон та окисли азоту, поступово руйнуючи ізоляцію.

Ці процеси отримали назву «старіння ізоляції» — незворотне руйнування діелектрика у електричному полі упродовж тривалого часу.

Розрахуємо величину пробивної напруги для діелектрика за формулою [6]

$$U_{\text{ПР}} = 3,89 \sqrt{\frac{K}{\alpha \cdot \varepsilon \cdot f \cdot \text{tg} \delta}} \cdot \varphi(c) \cdot 10^6 \text{ кВ}, \quad (2)$$

де K — коефіцієнт теплопровідності ізоляції; α — масштабний коефіцієнт; f — частота напруги; ε — діелектричний коефіцієнт; $\text{tg} \delta$ — коефіцієнт втрат; $\varphi(c)$ — функція, що враховує теплопровідність та геометричні розміри об'єкта.

Вихідні дані до розрахунків: $K = 0,0293$ Вт/см·град; $\varepsilon = 4,0$; $\text{tg} \delta = 0,03$ (при $t = 20^\circ\text{C}$); $\text{tg} \delta = 0,14$ (при $t = 60^\circ\text{C}$); $\varphi(c) = 0,131$; $\omega = 50, 250, 650, 1500$ 1/с.

Результати розрахунку при зміні температури:

$t = 20^\circ\text{C}$	$f = 50$ 1/с	$\text{tg} \delta = 0,03$	$U_{\text{ПР}} = 144$ кВ
$t = 40^\circ\text{C}$	$f = 50$ 1/с	$\text{tg} \delta = 0,08$	$U_{\text{ПР}} = 97,5$ кВ
$t = 60^\circ\text{C}$	$f = 50$ 1/с	$\text{tg} \delta = 0,14$	$U_{\text{ПР}} = 74,5$ кВ

Результати розрахунку при зміні частоти напруги:

$$\begin{aligned} f = 50 \text{ 1/с} - U_{\text{ПР}} &= 74,5 \text{ кВ} \\ f = 250 \text{ 1/с} - U_{\text{ПР}} &= 104,3 \text{ кВ} \\ f = 650 \text{ 1/с} - U_{\text{ПР}} &= 64,3 \text{ кВ} \\ f = 1500 \text{ 1/с} - U_{\text{ПР}} &= 42,5 \text{ кВ} \end{aligned}$$

За результатами розрахунків побудований графік залежностей (рис. 1).

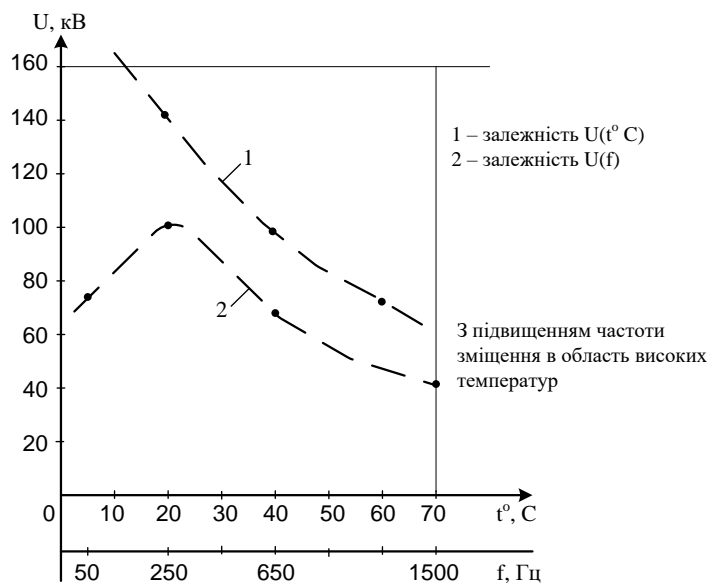


Рис. 1. Графік залежностей напруги пробою

3. Технічні діелектрики і старіння.

Під впливом електричного поля у неоднорідному діелектрику виникають зміни його стану та переміщення окремих елементів, про наявність таких процесів свідчить залежність пробивної напруги від часу впливу. Тобто, чим більше неоднорідність, тим більш різко проходять ці процеси, як можуть бути оберненими та не оберненими. Перші називають — «утомленість», другі — «старінням». Термічні процеси призводять до перегрівання діелектрика з наступним руйнуванням. Хімічне старіння може бути викликане появою агресивних продуктів, що утворились під дією електричного поля.

4. Розрахунок втрати ізоляції емпіричним методом.

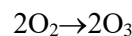
Вказані процеси можуть протікати у діелектрику одночасно, змінюючи швидкість і форму старіння. Форма старіння визначається окремо для кожного випадку та структури діелектрика. Однак руйнування ізоляції електрохімічними процесами має обмеження. У разі загальної товщини ізоляції у 4 мм (це найкоротший шлях від струмопровідної жили до заземленої оболонки) остаточна товщина ізоляції повинна бути у межах (0,5—1,0 мм), інакше настане електричний пробій [3].

Таким чином, об'єм струмопровідного каналця $v_{\text{кан}} = 0,35 \cdot \frac{\pi(1 \cdot 10^{-5})^2}{4} = 0,275 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3$;

що відповідає масі ізоляції у $0,22 \cdot 10^{-10} \text{ г}$ (щільність паперу $0,8 \text{ г/см}^3$). Кількість каналців — $24,3 \cdot 10^{13}$. Маса ізоляції, що пошкоджується, становить: $24,3 \cdot 10^{13} \times 0,22 \cdot 10^{-10} = 5,34 \cdot 10^3 \text{ г} = 5,34 \text{ кг}$.

5. Розрахунок втрати ізоляції за законом Ареніуса [7].

Реакція утворення озону з кисню



має наступні кінетичні характеристики: константа швидкості реакції $k=8 \cdot 10^{-14} \text{ моль/л}$, енергія активації реакції $E=8 \cdot 298000 \text{ кДж/моль}$.

Згідно рівнянню Ареніуса:

$$v = k \cdot e^{-\frac{E}{RT}}, \quad (3)$$

Швидкість утворення озону при температурах 20° (293 К) і 40° С (313 К) становить відповідно:

$$v_{293\text{K}} = 8 \cdot 10^{-14} \cdot e^{-\frac{298000}{8,31 \cdot 293}} = 6,32 \cdot 10^{-66} \text{ моль(л} \cdot \text{с)};$$

$$v_{313\text{K}} = 8 \cdot 10^{-14} \cdot e^{-\frac{298000}{8,31 \cdot 313}} = 1,98 \cdot 10^{-63} \text{ моль(л} \cdot \text{с)}.$$

Утворений озон, в свою чергу, викликає окисну деструкцію целюлози, як основної складової паперової ізоляції кабелю.

Якщо прийняти відомі з літературних джерел кінетичні параметри ланцюгової реакції розпаду целюлози, то можна теоретично оцінити втрати матеріалу внаслідок деструктивної дії озону. Так, при температурі 40° С вони становитимуть $3,16 \cdot 10^{-12} \text{ моль/(л} \cdot \text{с)}$. Для терміну експлуатації матеріалу 30 років (946080000 с) ця кількість складатиме 10^{-4} моль/л . При середній масі целюлози 162140000 г (кількість ланок в полімері — 10000, молекулярна маса однієї пономерної ланки — 162,14 г) втрати целюлози упродовж тридцятирічного терміну експлуатації складатимуть 4860 г, або близько 5,0 кг.

Таким чином, можна вважати, що обидва варіанти дають схожі величини втрат ізоляції.

Висновки

Розраховані величини втрат ізоляції під впливом руйнівної дії озону (розрахунки виконані емпіричним методом та за законом Ареніуса). Отримані дані свідчать, що за тридцятирічний період експлуатації просочена паперова ізоляція кабелів зберігає достатній рівень ізоляційних характеристик, що підтверджує її прийнятну довготривалу стабільність за умови відсутності зовнішніх пошкоджень або надмірного перегріву.

Висновки дослідження можуть бути використані для прогнозування залишкового ресурсу кабельних ліній та оптимізації періодичності діагностичних випробувань.

Список використаної літератури

1. Трегуб М.І., Рубець А.М., Хахула В.С. Електротехнічні матеріали: навчальний посібник, Біла Церква, 2020. 60 с.
2. Поплавко Ю.М. Фізика діелектриків: підручник. К. : НТУУ «КПІ», 2015. 572 с.
3. Поплавко Ю.М., Переверзева Л.П., Воронов С.О., Якименко Ю.І. Фізичне матеріалознавство : Навч. посіб. Ч. 2 : Діелектрики. К.: НТУУ «КПІ», 2007. 392 с.
4. Хмельницький Є.Д., Шрамко Ю.Ю. Дослідження впливу вищих гармонік на надійність кабельних мереж. Збірник наукових праць ДДТУ (Технічні науки). Кам'янське. 2023. Вип. 2 (43). С. 84–89.
5. Лишук В.В.) Електрорадіоматеріали : Навч. посіб. Луцьк : ЛНТУ, 2020.
6. Фізика діелектриків : підручник / Ю. М. Поплавко; за заг. ред. акад. НАН України Ю. І. Якименка. К. : НТУУ «КПІ», 2015. 572 с.
7. Основи хімії біогенних елементів, біохімії і біофізики: практичний курс: навчальний посібник / Ведь М. В. та ін. 2-ге вид., Харків : НТУ «ХПІ», 2016. 310 с.

RELIABILITY AND SERVICE LIFE OF HIGH-VOLTAGE CABLES WITH PAPER IMPREGNATED INSULATION

Abstract

This study is devoted to the analysis of the operational reliability of a cable network with a nominal voltage of 10 kV of an industrial enterprise. The cable network is a critical element of the power supply system with a minimum level of redundancy, which imposes high requirements on its reliability.

The main structural element of the studied cables of the AASHv brand ($3 \times 185 \text{ mm}^2$) is impregnated paper insulation based on a rosin-oil compound. The specificity of such insulation lies in its heterogeneous (non-uniform) structure, consisting of three phases: solid (cellulose paper), liquid (oil-rosin mixture) and gas (microscopic air inclusions formed during the cable manufacturing process).

The presence of gas inclusions significantly reduces the dielectric strength, in particular the breakdown voltage. Air microcavities cause local inhomogeneity of the electric field, which leads to the development of internal partial discharges, gradual destruction of the dielectric and subsequent complete loss of insulating properties.

The article presents the results of calculations of the insulation breakdown voltage for various temperature regimes and variable frequency of the applied voltage (a graphical summary is presented in the corresponding graph).

Under the influence of an electric field, oxygen in air inclusions is partially converted into ozone and nitrogen oxides, which initiates chemical degradation of the cellulose matrix and impregnating compound. The kinetic processes of destruction of paper insulation were estimated by two independent methods: analytical (taking into account physical mechanisms) and based on the Arrhenius equation (thermal activation aging model). Both approaches gave convergent results with a relative error of no more than 10 %. The data obtained indicate that over a thirty-year period of operation, impregnated paper insulation of cables retains a sufficient level of insulation characteristics, which confirms its acceptable long-term stability provided there is no external damage, excessive overheating or moisture. The conclusions of the study can be used to predict the residual resource of cable lines, optimize the frequency of diagnostic tests and justify the transition to modern types of insulation (for example, cross-linked polyethylene) at the stages of network reconstruction.

References

- [1] Trehub M.I., Rubets A.M., Khakhula V.S. (2020) Elektrotekhnichni materialy [*Electrical materials*]: navchalnyi posibnyk, Bila Tserkva. [in Ukrainian].

- [2] Poplavko Yu.M. (2015) Fizyka dielektrykiv: pidruchnyk [*Physics of dielectrics: a textbook*] — K. : NTUU «KPI». [in Ukrainian].
- [3] Poplavko Yu.M., Pereverzieva L.P., Voronov S.O., Yakymenko Yu.I. (2007) Fizychnе materialoznavstvo [*Physical materials science*] : Navch. posib. Ch. 2 : Dielektryky — K.: NTUU «KPI». [in Ukrainian].
- [4] Khmelnytskyi Ye.D., Shramko Yu.Yu. (2023) Doslidzhennia vplyvu vyshchyykh harmonik na nadiinist kabelnykh merezh. [*Research on the impact of higher harmonics on the reliability of cable networks*]. Zbirnyk naukovykh prats. DDTU (Tekhnichni nauky). Kamianske. [in Ukrainian].
- [5] Lyshuk V.V.(2020) Elektroradiomaterialy [*Electrical and radio materials*]: Navch. posib. — Luts'k : LNTU. [in Ukrainian].
- [6] Fizyka dielektrykiv [*Physics of dielectrics*] : pidruchnyk / Yu. M. Poplavko; za zah. red. akad. NAN Ukrainy Yu. I. Yakymenka. [in Ukrainian].
- [7] Osnovy khimii biohennykh elementiv, biokhimii i biofizyky [*Fundamentals of the chemistry of biogenic elements, biochemistry and biophysics*] : praktychnyi kurs: navchalnyi posibnyk / Ved M. V. ta in. 2-he vyd., Kharkiv : NTU «KhPI». [in Ukrainian].

Надійшла до редколегії 18.03.2026
Прийнята після рецензування 24.03.2026
Опублікована 26.03.2026