

ТЕОРЕТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОФІЗИКА

УДК 621.315.2

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.64.053>**ЧИННИКИ НАДІЙНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУЧАСНИХ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ ІЗ ТВЕРДОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ**

І.М. Кучерява, докт. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: rB.irinan@gmail.com

У роботі представлено огляд і проаналізовано основні складові надійності силових кабелів зі зшито-поліетиленовою ізоляцією. Визначено та узагальнено основні умови довготривалої експлуатації ізоляції, типові дефекти в її структурі та причини їхнього виникнення, що з часом призводить до виходу ізоляції з ладу. За сучасними науковими джерелами описано вплив різних електричних режимів роботи кабелів із поліетиленовою ізоляцією на роботу кабельних ліній, а також вплив вищих гармонійних складових, несиметрії та несинусоїдальності напруги на стан ізоляції, її прискорене старіння, зростання температури кабелів, а отже, необхідність коректування їхнього навантаження за струмом. Такі наслідки здатні призводити до підвищення ризику відмови кабелів, збоїв у роботі електричної мережі, додаткових економічних витрат. Представлено нові інтелектуальні засоби контролю електричних, теплових, механічних характеристик та рівня часткових розрядів у кабельних лініях для автоматичного контролю стану ізоляції, регулювання режимів роботи кабельних ліній, захисту від аварійно небезпечних ситуацій у режимі реального часу. Бібл. 53, рис. 3, табл. 2.

Ключові слова: силові кабелі, кабельні лінії, зшито-поліетиленова ізоляція, старіння ізоляції, вищі гармоніки, несиметрія, несинусоїдальна напруга, часткові розряди, температура, струмове навантаження, моніторинг технічного стану кабелів

Вступ. Силові кабелі є важливим складовим елементом систем передачі та розподілу електроенергії [1, 2]. У світі активно впроваджуються силові кабелі з полімерною ізоляцією на основі зшитого поліетилену (ЗПЕ) та термопластичних еластомерів [1–7].

Надійність силових кабелів у процесі тривалої експлуатації визначається багатьма факторами, основними з яких є якість електроенергії в мережі живлення, умови й режими роботи кабелів, якість і пов'язана з нею швидкість старіння ізоляції, досконалість використовуваних матеріалів і технологічного процесу виготовлення. За даними високовольтної лабораторії КЕМА (Нідерланди) інтенсивність відмов кабелів, що мають ЗПЕ ізоляцію, становить 18 % від причин виходу з ладу всіх кабельних ліній [8]. Аналогічна статистика представлена в [9] для кабелів із ЗПЕ ізоляцією на високу напругу – 7,7 % відмов і для кабелів на надвисоку напругу – 16,7 % збоїв у роботі кабельних ліній.

На сьогодні в Україні внаслідок воєнних дій існує загроза пошкоджень та руйнувань об'єктів електроенергетики, зокрема кабельних ліній, а одними з основних стратегічних завдань є збереження, якісне обслуговування та зміцнення критично важливої енергетичної інфраструктури, забезпечення енергетичної безпеки країни. Це передбачає серед іншого повне відновлення й суттєве підвищення якості та надійності кабельних мереж як у воєнний, так і повоєнний періоди, особливо таких, що складаються із силових кабелів на основі сучасної полімерної ізоляції, зокрема зшито-поліетиленової.

У зв'язку з відзначеним актуальною є практична задача забезпечення високої надійності силових кабелів, зокрема шляхом детального аналізу та узагальнення причин, що впливають на пошкодження й призводять до виходу з ладу кабелів.

Мета даної роботи складається з вивчення та узагальнення чинників впливу на надійність та термін служби силових кабелів, причин ушкодження й відмов у роботі, а також

представлення сучасних технологій безперервного моніторингу стану ізоляції та експлуатаційних характеристик кабельних ліній для їхньої безперебійної роботи та подовження строку експлуатації.

Умови надійності поліетиленової ізоляції силових кабелів [1, 9–15]. До технологічного процесу виробництва кабелів висуваються вимоги щодо однорідності структури, наявності й розмірів дефектів і забруднень, внутрішніх (механічних) напруг в ізоляції [16–18], що визначає їхню електричну міцність і насамперед важливо для кабелів високої та надвисокої напруги. Такі ключові складові якості силових кабелів і відповідні технологічні заходи контролю проаналізовано, наприклад, у роботах [16–18].

Надійність кабелів у процесі тривалої експлуатації (до 30 років і більше) перш за все пов'язана з інтенсивністю старіння полімерної ізоляції. Причини деградації ЗПЕ ізоляції розділяються на зовнішні (до них відносяться й електричні фактори) та пов'язані з ними внутрішні, до яких належать теплові та механічні причини, а також умови навколишнього середовища (табл. 1).

Таблиця 1

Причини старіння поліетиленової ізоляції			
Зовнішні фактори	Внутрішні / зовнішні фактори		
Електричні	Термічні	Механічні	Навколишнє середовище
– напруга (змінного / постійного струму, імпульсна напруга); – частота; – електричний струм	– максимальна температура; – низька / висока температура навколишнього середовища; – температурні градієнти; – циклічність змінення температури	– вигини; – натяг; – стиск; – скручування; – вібрація	– вода / вологість; – газоподібне середовище (повітря, кисень та ін.); – наявність корозійних хімічних сполук; – радіація

Основні пошкодження ЗПЕ ізоляції силових кабелів і причини їхнього виникнення подано в табл. 2 [9, 11].

Таблиця 2

Пошкодження	Процес старіння ЗПЕ ізоляції (у наведеній послідовності)	Типові причини
Електричного характеру	Часткові розряди, пробій / ерозія ізоляції, електричні триїги, зниження електричної міцності ізоляції	Наявність неоднорідності структури та дефектів виготовлення
Термічного характеру	Утворення продуктів реакції у разі окислювання, розкладання, випаровування матеріалу внаслідок високих або низьких значень температури, в результаті цього збільшення тангенса кута діелектричних втрат, зменшення опору ізоляції та зниження її електричної міцності	Перевищення навантаження кабелю за струмом за умови заданих зовнішніх умов і робочих режимів, неправильний вибір арматури
Триїгові утворення	Процеси забруднення й окислювання, деградація ізоляції, збільшення тангенса кута діелектричних втрат, зниження електричної міцності	Структурні дефекти, проникнення вологи ззовні в об'єм кабелів
Хімічного характеру	Змінення товщини, зм'якшення, розтріскування матеріалу, сульфатні відкладення, внаслідок чого збільшення тангенса кута діелектричних втрат і зниження електричної міцності ізоляції	Хімічні забруднення (витікання трансформаторного масла, контакт із хімічними продуктами, добривами для кабелів підземного прокладання та ін.)

Як показано в табл. 2, причини порушення роботи кабелів можуть бути різноманітними. Дефекти їхніх елементів, що призводять до пошкоджень, а з часом й до виходу з ладу кабелів, підрозділяються на групи:

1) дефекти проектування й технологічні недоліки (забруднення, тріщини, нещільне прилягання елементів кабелю один до одного, занижений перетин жил кабелю, відхилення розмірів і нерівності поверхні елементів та ін.);

2) дефекти прокладання, неякісні монтажні роботи й пов'язані з ними механічні пошкодження (механічні напруги, утворення тріщин, неприпустимі вигини, надрізи, вм'ятини, злами; зовнішні пошкодження кабелів підземної прокладки під час проведення будівельних робіт у зоні кабельних трас та ін.);

3) експлуатаційні дефекти, які пов'язані:

– з умовами навколишнього середовища (волога, хімікати, температура й тепловий опір ґрунту для підземних кабелів, корозія елементів кабелів під впливом хімічних реагентів у ґрунті, ультрафіолетове випромінювання та ін.);

– з умовами функціонування в складі енергосистеми, до яких відносяться:

а) електричні умови (якість електроенергії, тривалість перевантажень за струмом і перегрівом; форма змінення, час наростання струму й напруги в системі; частота, систематичні й тривалі струмові перевантаження, перенапруги, перевищення часу короткого замикання та ін.);

б) термічні умови (температурні градієнти, циклічність змінення температури, робоча температура, перегріву та їхня тривалість).

Перші дві групи пошкоджень впливають на кабелі протягом усього строку їхньої експлуатації, а третя група може бути пов'язана з обмеженням і зміною зовнішніх факторів, а також часом їхнього впливу.

Результатом спільного впливу наведених вище дефектів і умов є розтріскування ізоляції, розриви, змінення структури, механічні напруги, змінення діелектричної проникності, діелектричних втрат, питомого опору, механічної міцності, джоулевий нагрів, теплове розширення, розшаровування границь елементів, трекінг (ушкодження поверхні пробоем) та інше і, як загальний результат, – змінення властивостей і стану ізоляції кабелів, її руйнування і вихід з ладу. У схематичному вигляді фактори впливу на стан ЗПЕ ізоляції відображено на рис. 1.

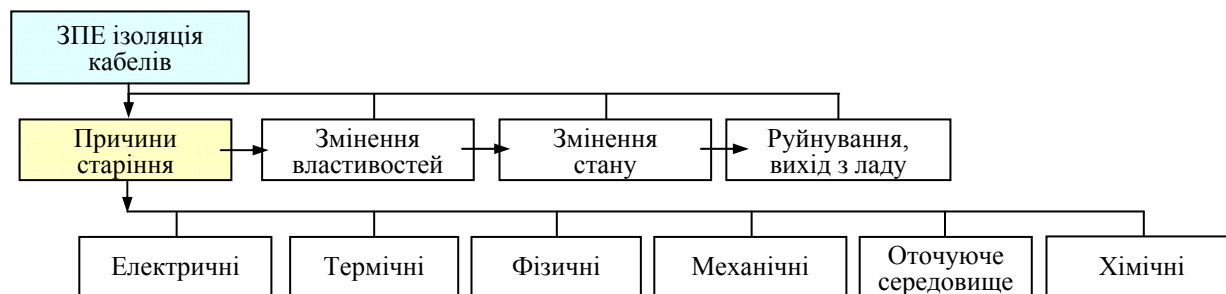


Рис. 1

Електричні режими роботи кабелів із ЗПЕ ізоляцією. У роботах [19, 20] детально описано вплив електричних перехідних процесів, перенапруг, перевантажень за струмом, коротких замикань (КЗ), кількості комутацій на ресурс ЗПЕ ізоляції й безаварійну роботу кабельних ліній.

У статті [19] на прикладі дослідження сучасної кабельної лінії електропередачі 330 кВ виявлено, що однофазні КЗ у лінії небезпечні для ізоляції екрана кабелю. Несприятливими можуть бути й віддалені КЗ, якщо вони трапляються на іншому кабелі, включеному на загальні шини (за відносно малої вхідної ємності підстанції). КЗ здатні викликати значні високочастотні перенапруги на ізоляції екрана кабелю – із значеннями в десятки кВ і частотою декілька кГц. У той же час значні перенапруги на ізоляції екран–земля можуть призводити до пошкодження ізоляції й бути причиною пробоем основної ізоляції кабелю [19].

У [21] повідомляється, що переважна більшість ушкоджень кабельних ліній припадає не на сам кабель, а на кінцеві та з'єднувальні муфти. Перенапруги на жилах кабелів здатні призводити до розвитку аварій і пошкодження транспозиційних муфт кабельних ліній 110...500 кВ, а перенапруги на екранах невеликі й не можуть викликати КЗ.

Для змішаних ліній з кабельними й повітряними ділянками має місце вплив грозових перенапруг на ділянці переходу з повітряної лінії електропередачі на кабельну. Зокрема, у статті [22] описано модель розрахунку високочастотних процесів і перенапруг у повітряній лінії електропередачі напругою 330 кВ у разі прямого впливу грозового розряду в струмопровідний провід. Розроблена електрична модель розрядного струму блискавки призначена для розрахунку грозових перенапруг у підземних кабельних лініях.

У загальному випадку ефективна експлуатація кабелів із ЗПЕ ізоляцією припускає зниження високочастотних перенапруг і обмеження часу впливу на ізоляцію перенапруг промислової частоти в сталих і перехідних режимах, включаючи режими КЗ, відключення вимикачів у електричній мережі, удари блискавки та ін. Дослідження перехідних режимів передбачає визначення змінення струмів і напруги в мережі.

Показники якості електроенергії та силові кабелі в низьковольтних мережах.

Якість електричної енергії обумовлена відповідністю її параметрів – напруги, частоти, кривої струму – встановленим нормативними документами значенням і характеристикам і є складовою електромагнітної сумісності, що може оцінюватися за несиметрією та несинусоїдальністю напруги [23, 24].

Невідповідність показників якості електроенергії нормативним значенням призводить до додаткових (відносно номінального режиму) втрат електроенергії, що може виникати, наприклад, у разі несиметричного навантаження та несинусоїдальної напруги. Так, рівень 2...4 % втрат за несинусоїдальної напруги характерний для кабельних ліній (як і для трансформаторів, двигунів, генераторів) [25]. У [25] зазначається, що несиметрія не має істотного впливу на роботу кабельних ліній, проте у випадку порушення синусоїдальності напруги відбувається прискорене старіння ізоляції силових кабелів.

Однією з основних проблем під час транспортування електроенергії є вплив вищих гармонік напруги й струму (через наявність нелінійних навантажень) на елементи систем електропостачання [26–30]. Несинусоїдальні струми в елементах електричної мережі викликають додаткові втрати потужності та електроенергії. Величина цих втрат залежить від ступеня відхилення від синусоїдальності й визначається гармонійним складом і величиною струмів вищих гармонік [29]. Несинусоїдальність напруг і струмів призводить, з одного боку, до збільшення втрат напруги й потужності в мережах, зменшення їхньої пропускної здатності, а з іншого боку, – до порушення нормальної роботи й зниження терміну служби електроустаткування мережі [26–30]. Зокрема, у роботі [31] виявлено вплив несинусоїдальності напруги на показники надійності кабельних ліній в енергосистемах 6 і 0,4 кВ; побудовано характеристики змінення показників надійності систем залежно від рівня навантаження; надано пояснення зниження показників надійності устаткування, зокрема кабелів 6 кВ з полівінілхлоридною (ПВХ) ізоляцією, залежно від низької якості електроенергії в системі. У використаній методиці враховано перегрів кабельних ліній внаслідок наявності вищих гармонік.

У статті [32] досліджено механізми теплового та електричного старіння ізоляції кабелів через протікання струмів вищих гармонік у розподільній мережі 380 В. Під час оцінювання терміну служби ізоляції кабельних ліній напругою до 3 кВ виявлено, що в несинусоїдальних режимах під впливом вищих гармонік термін служби кабелів скорочується за експонентною залежністю. Теплове старіння ізоляції силових кабелів марки АСБ (з алюмінієвою жилою, у паперовій ізоляції) відбувається через додатковий нагрів від струмів вищих гармонік, а електричне старіння ізоляції обумовлено викривленням форми кривої напруги внаслідок протікання цих струмів. Визначено, що на пропускну здатність кабельних ліній 380 В істотний вплив мають гармоніки струму, кратні трьом. З метою врахування впливу струмів вищих гармонік на етапі проектування та експлуатації запропоновано вводити понижувальний коефіцієнт для тривалоприпустимих струмів, що протікають у фазних жилах кабелів.

Електричний розрахунок ланцюга силового кабелю 0,4 кВ з ПВХ ізоляцією та несинусоїдальним навантаженням проведено в статті [33], де показано, що значну частину

втрат активної потужності становлять втрати від струмів вищих гармонік, які прискорюють зношення ізоляції й зменшують термін служби кабелю. Це необхідно враховувати під час визначення тривалоприпустимого струмового навантаження кабелів та задля зниження аварійності в електричних мережах.

Авторами роботи [34] виконано дослідження впливу гармонік на енерговтрати в низьковольтних (0,6/1,0 кВ) силових кабелях з ПВХ ізоляцією. Для різних типових конфігурацій таких кабелів і характерних несинусоїдальних навантажень визначено коефіцієнт зниження струмового навантаження кабелів.

У статті [35] повідомляється, що в лініях електропередачі додаткові втрати активної потужності пов'язані з несинусоїдальністю та асиметричністю струмів і напруги. У повітряній лінії це знижує ефективність передачі електроенергії, а в кабельних лініях призводить до прискореного теплового старіння ізоляції внаслідок змінення діелектричних втрат і підвищеного нагріву оболонок кабелів через скін-ефект і ефект близькості. Скорочення терміну служби кабельних ліній відбувається через інтенсифікацію теплового та електричного старіння ізоляції кабелів.

Проблему збільшення активного опору кабельних ліній за несинусоїдальних режимів досліджено в роботі [36], де розглядаються кабелі з ПВХ ізоляцією в діапазоні поперечних перетинів 16...240 мм² за умови варіації сумарного коефіцієнта гармонічного викривлення (гармонічних спотворень) – THD у межах 32...98 %.

Вищі гармоніки в мережах та силові кабелі зі ЗПЕ ізоляцією. У статті [37] проводиться аналіз додаткових втрат від вищих гармонік у кабельних лініях, а також у трансформаторах за різних значень сумарного коефіцієнта гармонічних спотворень.

Методику визначення припустимого температурного режиму кабелів зі ЗПЕ ізоляцією та їхньої пропускної здатності за наявності вищих гармонік у розподільних мережах середньої напруги розроблено в статті [38]. Обґрунтовано вплив гармонік і незбалансованих навантажень на збільшення рівня нагріву кабелів і пропускну здатність кабельних ліній.

У [39] представлено аналогічні результати відносно підвищення температури кабелів, їхніх перевантажень, а також зниження терміну служби в умовах несинусоїдальності струму й циклічності денного навантаження.

Роботи [40, 41] присвячено вивченню впливу гармонік у розподільних мережах на підвищення температури й скорочення терміну служби силових кабелів зі ЗПЕ ізоляцією. Вивчено сім кабелів з алюмінієвими й мідними жилами перетином від 70 до 1000 мм². Строк їхньої служби оцінено за допомогою рівняння Ареніуса, що визначає швидкість процесу теплового старіння залежно від рівня нагріву кабелів. У [41] розглянуто випадки 30,68 % гармонічного викривлення, включаючи всі непарні гармонічні складові до 49-го порядку. За допомогою комп'ютерного моделювання зроблено висновки про прискорене старіння кабелів внаслідок підвищення їхньої температури за наявності гармонік в електричних мережах. На додаток до цього в [42] для підземних ЗПЕ кабелів 35 кВ з мідною жилою експериментально та шляхом чисельного моделювання показано, що п'ята гармоніка підвищує температуру на ~4,4 °С у разі 25 % THD, а термін служби кабелю скорочується приблизно на 15 % на рівні 15 % THD за міжнародним стандартом IEEE.

У статті [43] виявлено вплив несинусоїдальної напруги на прискорене старіння ізоляційних матеріалів кабелів і конденсаторів – ЗПЕ і поліпропілену, а саме: переважний вплив збільшення піка напруги і водночас нахилу кривої напруги та її ефективного (середньоквадратичного) значення. Обґрунтовано висновок про те, що проектування ізоляційних систем для умов наявності гармонік необхідно проводити з оцінкою кількості й типу гармонічних викривлень та з урахуванням форми й пікових значень напруги.

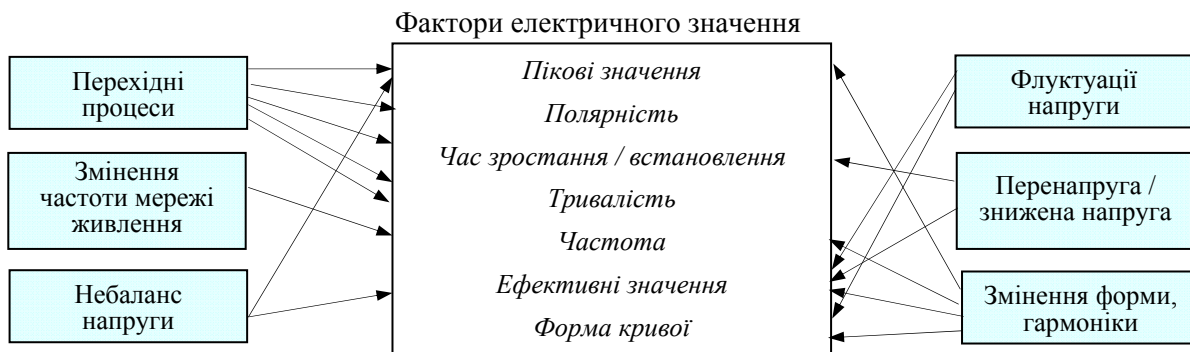
Механізми деградації ізоляції кабелів у разі впливу вищих гармонік досліджено в роботах [44, 45]. За допомогою



Рис. 2

експериментального вивчення отримано висновок щодо впливу гармонік на утворення часткових розрядів у твердій ізоляції і через це на можливе поширення в ній електричних триїнгів і виникнення електричного пробою, що зі свого боку призводить до зниження якості ізоляції та скорочення робочого ресурсу кабелів. Суттєве змінення стану й руйнування ЗПЕ ізоляції внаслідок часткових розрядів показано на рис. 2 [46].

Зв'язок між порушеннями якості електроенергії та факторами електричного впливу на умови роботи кабелів відображено в схематичному вигляді на рис. 3 [47, 48].



Таким чином, наявність вищих гармонік і несинусоїдальність напруги в мережі призводять до додаткових втрат енергії в провідних і ізоляційних матеріалах кабелів; підвищення температури, що зумовлює необхідність коректування пропускну здатності кабельних ліній; до прискореного старіння ізоляції; втрати надійності системи; додаткових економічних витрат; можуть бути причиною передчасного виходу кабелів з ладу.

Моніторинг технічного стану силових кабелів та кабельних ліній. Суттєве зниження аварійності роботи кабельних ліній можливе за рахунок впровадження в експлуатацію систем безперервного моніторингу, що забезпечують контроль стану ізоляції кабельних ліній у реальному часі.

Для досягнення тривалого терміну служби кабелів у світі розробляються та активно впроваджуються інтелектуальні системи постійного контролю експлуатаційних характеристик кабельних ліній, зокрема температури, струму навантаження, часткових розрядів в ізоляції, діелектричних втрат, а саме: системи моніторингу температури DTS (distributed temperature sensing); акустичні системи DAS (distributed acoustic sensing) для вимірювання температури та деформації; системи дистанційного корегування струму навантаження кабелів DCR (dynamic cable rating); системи визначення механічного стану та деформацій DSS (distributed strain sensing); інтелектуальні системи захисту кабелів середньої напруги Smart Cable Guard (SCG) з моніторингом і визначенням місця появи часткових розрядів [49–53]. Такі нові технології здатні своєчасно виявляти дефекти ізоляції на ранніх стадіях, надають можливості оперативного запобігати аварійним ситуаціям і з кабельними лініями, вживати заходів для підвищення надійності силових кабелів і стабільної роботи енергосистеми.

Висновки. Проблема забезпечення високої якості, надійності й тривалого терміну експлуатації силових кабелів є комплексною. Вирішення її можливо у разі врахування всебічних умов:

- з боку розробників і виробників – використання сучасних технологій, якісних матеріалів, удосконалених конструкцій кабелів; проектування з урахуванням можливих несприятливих умов і режимів експлуатації кабелів;

- з боку експлуатуючих організацій – забезпечення високої якості електроенергії в мережі, дотримання належних електричних і теплових режимів роботи з метою збереження цілісності ізоляції протягом тривалого часу (тим самим запобігання аварійним режимам і відмовам у роботі кабелів), а крім того, використання інтелектуальних технологій

моніторингу стану кабелів для динамічного визначення їхньої температури, оперативного корегування струмового навантаження, контролю механічного стану та рівня часткових розрядів у поліетиленовій ізоляції.

Вивчення й урахування багатофакторних причин, що супроводжують старіння та призводять до пробою й виходу з ладу полімерної ізоляції силових кабелів, дає змогу передбачити технологічні та практичні заходи для виявлення порушень та початкових дефектів, збереження якості й подовження ресурсу, визначення оптимального терміну експлуатації та своєчасної заміни обладнання, а отже, для підвищення надійності функціонування силових кабелів, що є особливо актуальним в нинішніх умовах воєнного часу. Крім того, впровадження сучасних інтелектуальних систем моніторингу стану кабельних ліній у режимі реального часу відповідає потребам сучасності, має важливе значення для забезпечення стабільної роботи діючих та нових повоєнних кабельних ліній.

Роботу виконано за темою «Розробка основ теорії і методів дослідження впливу несинусоїдних напруг і струмів та виникаючих електротермодинамічних процесів на надійність і ресурс сучасних кабельних ліній електропередачі та на енергоефективність електротехнічних установок резонансного типу» (Шифр "Елрес", Державний реєстраційний номер: 0123U100693), КПКВК 6541030

1. Шидловский А.К., Щерба А.А., Золотарев В.М., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Кабели с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения. К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2013, 550 с.
2. Electrical power cable engineering. Third Edition. Ed. by W.A. Thue, CRC Press, 2011, 460 p.
3. Strategic research agenda for Europe's electricity networks of the future. Smart Grids Strategic Research Agenda 2035. March, 2012, 74 p. <https://www.etip-snet.eu/wp-content/uploads/2017/04/sra2035.pdf>
4. Руководство по сооружению, испытаниям и эксплуатации современных кабельных линий сверхвысокого напряжения. Харьков: Майдан, 2017, 64 с.
5. Золотарев В.М. Завод "Южкбель": вехи пути (75 лет заводу "Южкбель"). *Електротехніка і Електромеханіка*, 2018. № 5. С. 12–16.
6. Wire and cable market (type – wire and cable; voltage type - low voltage, medium voltage, and high and extra high voltage; applications – power transmission and distribution, transport, data transmission, infrastructure): global industry analysis, trends, size, share and forecasts to 2024, November 2018. <https://www.infiniumglobalresearch.com/ict-semiconductor/global-wire-and-cable-market>
7. Huang X., Zhang J.; Jiang P. Thermoplastic insulation materials for power cables: history and progress. *High Voltage Engineering*, May 2018. Vol. 44. No. 5. Pp. 1377–1398. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20180430001.
8. Верхувен Б. Международная практика испытаний кабелей. *Кабели и провода*. 2006. № 1 (296). С. 10–14.
9. Hampton N. HV and EHV cable system aging and testing issues. Chapter 3. University System of Georgia, Institute of Technology NEETRAC – National Electric Energy Testing, Research and Application Center. Georgia Tech Research Corporation, February 2016, 19 p. www.neetrac.gatech.edu > CDFI > 3-HV-Issues-7_with-Copyright
10. Densley J. Ageing mechanisms and diagnostics for power cables – an overview. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2001. Vol. 17. No. 1. Pp. 14–22.
11. Hampton N. Medium voltage cable system issues. Chapter 2. University System of Georgia, Institute of Technology NEETRAC – National Electric Energy Testing, Research and Application Center. Georgia Tech Research Corporation, February 2016, 29 p.
12. Steennis E.F., Kreuger F.H. Water treeing in polyethylene cables. Review. *IEEE Trans. on Electrical Insulation*. 1990. Vol. 25. No. 5. Pp. 989–1028.
13. Teysse G., Laurent C. Advances in high-field insulating polymeric materials over the past 50 years. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2013. Vol. 29. No. 5. Pp. 26–36.
14. Кучерявая И.Н. Факторы качества и надежности сшитого-полиэтиленовой изоляции силовых кабелей. *Праці. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2017. Вип. 48. С. 94–104. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2017.48.094>
15. Kucheriava I.M. Power cable defects and their influence on electric field distribution in polyethylene insulation. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 2. С. 19–24. DOI: <https://doi.org/10.15407/techne2017.02.019>
16. Гук Д.А., Каменский М.К., Макаров Л.Е., Образцов Ю.В., Овсиенко В.Л., Шувалов М.Ю. Новый высоковольтный испытательный центр ОАО "ВНИИКП". Опыт испытаний и исследований силовых кабелей, арматуры и материалов для их производства. *Кабели и провода*. 2014. № 5(348). С. 35–42.
17. Щерба А.А., Гуринов А.Г., Ольшевский А.М., Карпушенко В.П., Науменко А.А. Новая технология пероксидной сшивки полиэтиленовой изоляции – основа производства высоконадежных силовых кабелей на напряжение 6–500 кВ. *Електропанорама*. 2012. № 4. С. 16–21.
18. Шувалов М.Ю., Ромашкин А.В., Овсиенко В.Л. Анализ дефектов в изоляции силовых высоковольтных кабелей методами видеомикроскопии и микроэксперимента. *Електричество*. 2000. № 5. С. 49–57.

19. Бурлаков Е., Евдокунин Г., Карпов А., Шатилов Д. Высоковольтные линии с однофазными кабелями. Переходные процессы и перенапряжения. *Новости Электротехники*. 2016. № 5 (101).
20. Дмитриев М.В. Проектирование и строительство кабельных линий 6–500 кВ. Актуальные проблемы. *Новости Электротехник*. 2016. № 4 (100).
21. Дмитриев М.В. Высоковольтные линии с однофазными кабелями. Защита от перенапряжений. *Новости Электротехники*. 2016. № 6 (102).
22. Подольцев А.Д. Компьютерное моделирование грозовых перенапряжений в высоковольтной воздушной линии электропередачи. *Праці. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2017. Вип. 46. С. 94–106.
23. Кузнецов В.Г., Куренный Э.Г., Лютый А.П. Электромагнитная совместимость. Несимметрия и несинусоидальность напряжения. Донецк: Норд-Пресс, 2005, 250 с.
24. Driesen J., Craenenbroeck V. T. Введение в несимметричность. Dr Johan Driesen & Dr Thierry Van Craenenbroeck, Katholieke Universiteit Leuven. *Энергосбережение*. 2004. № 6. http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=2699
25. Герасимов В.Г. Электротехнический справочник. Том 3. Производство и распределение электрической энергии. 9-е издание. М.: МЭИ, 2004, 964 с.
26. Арриллага Дж., Брэдли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах. М.: Энергоатомиздат, 1990, 320 с.
27. Grady W.M., Surya Santoso. Understanding power system harmonics. *IEEE Power Engineering Review*. 2001. Vol. 21(11). Pp. 8–11.
28. Шидловский А.К., Жаркин А. Ф. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях. К: Наукова думка, 2005. 210 с.
29. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. М: Энергоатомиздат, 2000, 331 с.
30. Pinyol R. Harmonics: causes, effects and minimization. Salicru white papers. August 2015. [www.salicru.com > files > pagina](http://www.salicru.com/files/pagina)
31. Papaika Yu.A., Lysenko O.H., Koshelenko Ye.V., Olishevskiy I. H. Mathematical modeling of power supply reliability at low voltage quality. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2021. №. 2. Pp. 97–103. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/097>
32. Тульский В.Н., Каргашов И.И., Насыров Р.Р., Симуткин М.Г. Влияние высших гармоник на режимы работы кабелей распределительной сети 380 В. *Промышленная энергетика*. 2013. № 5. С. 39–44.
33. Васильева О.А., Шахова М.А., Шейко А.Е., Марковский Н.А. Оценка влияния несинусоидальной нагрузки на потери мощности и пропускную способность силового кабеля. *Автоматизация и ИТ в энергетике*. 2021. № 4(141). С. 2–11.
34. Demoulias C., Labridis D.P., Dokopoulos P.S., Gouramanis K. Ampacity of low-voltage power cables under nonsinusoidal currents. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2007. Vol. 22. No. 1. Pp. 584–594.
35. Tarasov Ev.V., Bulyga L.L., Ushakov V.Ya., Kharlov N.N. Additional energy losses from asymmetric and non-sinusoidal current in an electrical facility and methods of their reduction. *MATEC Web of Conferences*, Published online 2015. Vol. 37. Smart Grids 2015. 4 p. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20153701057>
36. Senra R., Boaventura W.C., Mendes E.M. Assessment of the harmonic currents generated by single-phase nonlinear loads. *Electric power systems research*. 2017. Vol. 147. Pp. 272–279. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.02.028>
37. Tofoli F.L., Sanhueza S.M.R., de Oliveira A. On the study of losses in cables and transformers in nonsinusoidal conditions. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2006. Vol. 21. Is. 2. Pp. 971–978. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2006.870986>
38. Yong J., Xu W. A method to estimate the impact of harmonic and unbalanced currents on the ampacity of concentric neutral cables. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2016. Vol. 31. Is. 5. Pp. 1971–1979. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2014.2331852>
39. Rasoulpoor M., Mirzaie M., Mirimani S.M. Thermal assessment of sheathed medium voltage power cables under non-sinusoidal current and daily load cycle. *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 123. Pp. 353–364. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.070>
40. Patil K.D., Gandhare W.Z. Effects of harmonics in distribution systems on temperature rise and life of XLPE power cables. *2011 International Conference on Power and Energy Systems*, 22–24 December 2011, 6 p. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICPES.2011.6156680>
41. Gandhare W.Z., Patil K.D. Effects of harmonics on power loss in XLPE cables. *Energy and Power Engineering*. 2013. Vol. 5. Pp. 1235–1239, DOI: <https://doi.org/10.4236/epe.2013.54B234>
42. Sahin Yu.G., Aras F. Investigation of harmonic effects on underground power cables. *Proceedings of International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG 2007)*, 12–14 April 2007, Setubal, Portugal, pp. 589–594. DOI: <https://doi.org/10.1109/POWERENG.2007.4380123>
43. Montanari G.C., Fabiani D. The effect of nonsinusoidal voltage on intrinsic aging of cable and capacitor insulating materials. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. Vol. 6. No. 6. Pp. 798–802, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1109/94.822018>

44. Bahadoorsingh S., Rowland S.M. Investigating the impact of harmonics on the breakdown of epoxy resin through electrical tree growth. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2010. Vol. 17. Is. 5. Pp. 1576–1584. DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2010.5595560>
45. Bahadoorsingh S., Rowland S.M. An investigation of the harmonic impact on electrical tree growth. *2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 6–9 June 2010, San Diego, USA. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELINSL.2010.5549819>
46. Копченков Д. Диагностика высоковольтных кабельных линий. Опыт внедрения. *Кабель-news*. 2012. № 3.
47. Bahadoorsingh S., Rowland S.M. A Framework linking knowledge of insulation ageing to asset management. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2008. Vol. 24. Is. 3. Pp. 38–46. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEI.2008.4591433>
48. International standard IEC 60505. Evaluation and qualification of electrical insulation systems, edition 4.0, 2011/07.
49. Кириленко О.В., Щерба А.А., Кучерява І.М. Інтелектуальні технології моніторингу технічного стану сучасних високовольтних кабельних ліній електропередачі. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 6. С. 29–40. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.06.029>
50. Щерба А.А., Подольцев О.Д., Кучерява І.М. Система дистанційного моніторингу стану високовольтної кабельної лінії. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2020. Вип. 57. С. 10–14. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.57.010>
51. Chen K., Yue Yi, Tang Yu. Research on temperature monitoring method of cable on 10 kv railway power transmission lines based on distributed temperature sensor. *Energies*, 21 Jun 2021. Vol. 14 (12). 3705 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14123705> – <https://www.mdpi.com/journal/energies>
52. Cherukupalli S., Anders G.J. Distributed fiber optic sensing and dynamic rating of power cables. –IEEE Press Series on Power Engineering. Wiley-IEEE Press, October 1, 2019. 240 p.
53. Enescu D., Colella P., Russo A., Porumb R.F., Seritan G.C. Concepts and methods to assess the dynamic thermal rating of underground power cables. *Energies*. 2021. No 14. 2591 p.. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14092591> – <https://www.mdpi.com/journal/energies>

FACTORS FOR RELIABLE OPERATION OF MODERN POWER CABLES WITH SOLID INSULATION

I.M. Kucheriava

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine
e-mail: rB.irinan@gmail.com

The paper presents a review and analyzes of the principal factors for reliable operation of the power cables with polymer insulation. The basic conditions for long-term operation of the insulation, typical defects in its structure and the causes of their occurrence, which eventually lead to insulation failure, are defined and summarized. According to scientific data, the influence of different electrical modes of the cable operation on cable line service is described, the effects of the higher harmonics, asymmetry and non-sinusoidal voltage on the state of the insulation, its accelerated aging, the increase in cable temperature, and therefore the need to correct the current loading are studied. Such impacts can cause the risk of failure of the cables, their operation and the breakdowns of the electrical network as well as additional economic costs. The new intelligent systems for on-line control of electrical, thermal and mechanical characteristics and partial discharges in power cable lines are presented. These systems are intended to control automatically the insulation state and cable line operation, to protect power cable lines against emergency situations. Ref. 53, fig. 3, tables 2.

Key words: power cables, cable lines, cross-linked polyethylene insulation, insulation aging, higher harmonics, asymmetry, non-sinusoidal voltage, partial discharges, temperature, current loading, monitoring of technical state.

1. Shidlovskii A.K., Shcherba A.A., Zolotaryov V.M., Podoltsev A.D., Kucheriava I.M. Extra-high voltage cables with polymer insulation. Kyiv: Institute of Electrodynamics, Ukrainian Academy of Sciences. 2013. 550 p. (Rus)
2. Electrical power cable engineering. Third Edition. Ed. by W.A. Thue, CRC Press, 2011, 460 p.
3. Strategic research agenda for Europe’s electricity networks of the future. Smart Grids Strategic Research Agenda 2035. March, 2012, 74 p. <https://www.etip-snet.eu/wp-content/uploads/2017/04/sra2035.pdf>
4. Guiding technical material on the construction, testing and operation of modern extra-high-voltage power cable lines. Kharkiv. Maidan, 2017, 64 p. (Rus)
5. Zolotaryov V.M. Plant «Yuzhcable works»: milestones of the road (75 years to Plant «Yuzhcable works»). *Elektrotehnika I Elektromekhanika*. 2018. No. 5. Pp. 12–16. (Rus) DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.5.02>
6. Wire and cable market (type – wire and cable; voltage type - low voltage, medium voltage, and high and extra high voltage; applications – power transmission and distribution, transport, data transmission, infrastructure): global industry analysis, trends, size, share and forecasts to 2024, November 2018. <https://www.infiniumglobalresearch.com/ict-semiconductor/global-wire-and-cable-market>
7. Huang X., Zhang J.; Jiang P. Thermoplastic insulation materials for power cables: history and progress. *High Voltage Engineering*, May 2018. Vol. 44. No. 5. Pp. 1377–1398. DOI: <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20180430001>

8. Verhuven B. International practice of cable testing. *Kabeli i provoda*. 2006. No 1 (296). Pp. 10–14. (Rus)
9. Hampton N. HV and EHV cable system aging and testing issues. Chapter 3. University System of Georgia, Institute of Technology NEETRAC – National Electric Energy Testing, Research and Application Center. Georgia Tech Research Corporation, February 2016, 19 p. www.neetrac.gatech.edu > CDFI > 3-HV-Issues-7_with-Copyright
10. Densley J. Ageing mechanisms and diagnostics for power cables – an overview. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2001. Vol. 17. No. 1. Pp. 14–22. DOI: <https://doi.org/10.1109/57.901613>
11. Hampton N. Medium voltage cable system issues. Chapter 2. University System of Georgia, Institute of Technology NEETRAC – National Electric Energy Testing, Research and Application Center. – Georgia Tech Research Corporation, February 2016, 29 p.
12. Steennis E.F., Kreuger F.H. Water treeing in polyethylene cables. Review. *IEEE Trans. on Electrical Insulation*. 1990. Vol. 25. No. 5. Pp. 989–1028. DOI: <https://doi.org/10.1109/14.59869>
13. Teyssedre G., Laurent C. Advances in high-field insulating polymeric materials over the past 50 years. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2013, Vol. 29, No. 5, Pp. 26–36. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEI.2013.6585854>
14. Kucheriava I.M. The factors affecting quality and reliability of XLPE insulation of power cables. *Pratsi Institutu Elektrodynamiki NAN Ukrainy*. 2017. Iss. 48. Pp. 94–104. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2017.48.094> (Rus)
15. Kucheriava I.M. Power cable defects and their influence on electric field distribution in polyethylene insulation. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 2. Pp. 19–24. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.02.019>
16. Guk D.A., Kamensky M.K., Makarov L.E., Obratsov Yu.V., Ovsienko V.L., Shuvalov M.Yu. New high-voltage testing center of Public Company "VNIIPK". Experience in testing and studying the power cables, accessories and materials for their production. *Kabeli i provoda*. 2014. No 5(348). Pp. 35–42. (Rus)
17. Shcherba A.A., Gurin A.G., Olshevsky A.M., Karpushenko V.P., Naumenko A.A. The new technology of peroxide cross-linking of polyethylene insulation as a basis for the production of highly reliable 6–500 kV power cables. *Electropanorama*. 2012. No. 4. Pp. 16–21. (Rus)
18. Shuvalov M.Yu., Romashkin A.V., Ovsienko V.L. Analysis of defects in the insulation of high-voltage power cables by videomicroscopy and microexperiment. *Electrichestvo*. 2000. No. 5. Pp. 49–57. (Rus)
19. Burlakov E., Yevdokunin G., Karpov A., Shatilov D. High-voltage lines with single-phase cables. Transient processes and overvoltages. *Novosti Elektrotekhniki*. 2016. No. 5(101). (Rus)
20. Dmitriev M.V. Design and construction of 6–500 kV cable lines. Actual problems. *Novosti Elektrotekhniki*. 2016. No. 4(100). (Rus)
21. Dmitriev M.V. High-voltage lines with single-phase cables. Overvoltage protection. *Novosti Elektrotekhniki*. 2016. No. 6(102). (Rus)
22. Podoltsev A.D. Computer simulation of lightning overvoltage in high voltage overhead transmission line. *Pratsi Institutu Elektrodynamiki NAN Ukrainy*. 2017. Iss. 46. Pp. 94–106. (Rus) DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2017.46.094>
23. Kuznetsov V.G., Kurennyi E.G., Lyutyj A.P. Electromagnetic compatibility. Asymmetry and non-sinusoidal voltage. Donetsk: Nord-Press, 2005, 250 p. (Rus)
24. Driesen J., Craenenbroeck V. T. Введение в несимметричность / Dr Johan Driesen & Dr Thierry Van Craenenbroeck, Katholieke Universiteit Leuven. Energoberezhenie. 2004. No 6. http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=2699
25. Gerasimov V.G. Electrotechnical reference book. Vol. 3. Production and distribution of electrical energy. 9th edition. Moskva: MEI, 2004, 964 p. (Rus)
26. Arrillaga Jos, Bradley D.A., Bodger P.S. Power System Harmonics. Moskva: Energoatomizdat, 1990, 320 p. (Rus)
27. Grady W.M., Surya Santoso. Understanding power system harmonics. *IEEE Power Engineering Review*. 2001. Vol. 21(11). Pp. 8–11. DOI: <https://doi.org/10.1109/MPER.2001.961997>
28. Shidlovskii A.K., Zharkin A.F. Higher harmonics in low-voltage electrical networks. Kyiv: Naukova Dumka, 2005. 210 p. (Rus)
29. Zhezhelenko I.V. Higher harmonics in industrial power supply systems. Moskva: Energoatomizdat, 2000, 331 p. (Rus)
30. Pinyol R. Harmonics: causes, effects and minimization. Salicru white papers. August 2015. www.salicru.com > files > pagina
31. Papaika Yu.A., Lysenko O.H., Koshelenko Ye.V., Olishkevskiy I. H. Mathematical modeling of power supply reliability at low voltage quality. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. No. 2. Pp. 97–103. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/097>
32. Tul'skij V.N., Kartashov I.I., Nasyrov R.R., Simutkin M.G. Influence of higher harmonics on the operating modes of 380 V cable distribution networks. *Promyshlennaia energetika*. 2013. No. 5. Pp. 39–44. (Rus)
33. Vasil'eva O.A., Shakhova M.A., Shejko A.E., Markovskij N.A. Evaluation of the impact of non-sinusoidal load on the power losses and power cable capacity. *Avtomatizatsiia i IT v energetike*. 2021. No. 4(141). Pp. 2–11. (Rus)

34. Demoulias C., Labridis D.P., Dokopoulos P.S., Gouramanis K. Ampacity of low-voltage power cables under nonsinusoidal currents. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2007. Vol. 22. No. 1. Pp. 584–594. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.881445>
35. Tarasov Ev.V., Bulyga L.L., Ushakov V.Ya., Kharlov N.N. Additional energy losses from asymmetric and nonsinusoidal current in an electrical facility and methods of their reduction. *MATEC Web of Conferences*, Published online 2015. Vol. 37. Smart Grids 2015, 4 p. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20153701057>
36. Senra R., Boaventura W.C., Mendes E.M. Assessment of the harmonic currents generated by single-phase nonlinear loads. *Electric power systems research*. 2017. Vol. 147. Pp. 272–279. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.02.028>
37. Tofoli F.L., Sanhueza S.M.R., de Oliveira A. On the study of losses in cables and transformers in nonsinusoidal conditions. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2006. Vol. 21. Is. 2. Pp. 971–978. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwr.2006.870986>
38. Yong J., Xu W. A method to estimate the impact of harmonic and unbalanced currents on the ampacity of concentric neutral cables. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2016. Vol. 31. Is. 5. Pp. 1971–1979. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwr.2014.2331852>
39. Rasoulpoor M., Mirzaie M., Mirimani S.M. Thermal assessment of sheathed medium voltage power cables under non-sinusoidal current and daily load cycle. *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 123. Pp. 353–364. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.070>
40. Patil K.D., Gandhare W.Z. Effects of harmonics in distribution systems on temperature rise and life of XLPE power cables. *2011 International Conference on Power and Energy Systems*, 22–24 December 2011, 6 p. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICPES.2011.6156680>
41. Gandhare W.Z., Patil K.D. Effects of harmonics on power loss in XLPE cables. *Energy and Power Engineering*. 2013. Vol. 5. Pp. 1235–1239. DOI: <https://doi.org/10.4236/epe.2013.54B234>
42. Sahin Yu.G., Aras F. Investigation of harmonic effects on underground power cables. *Proceedings of International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG 2007)*, 12–14 April 2007, Setubal, Portugal. Pp. 589–594. DOI: <https://doi.org/10.1109/POWERENG.2007.4380123>
43. Montanari G.C., Fabiani D. The effect of nonsinusoidal voltage on intrinsic aging of cable and capacitor insulating materials. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. Vol. 6. No. 6. Pp. 798–802, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1109/94.822018>
44. Bahadoorsingh S., Rowland S.M. Investigating the impact of harmonics on the breakdown of epoxy resin through electrical tree growth. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2010. Vol. 17. Is. 5. Pp. 1576–1584. DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2010.5595560>
45. Bahadoorsingh S., Rowland S.M. An investigation of the harmonic impact on electrical tree growth. *2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 6–9 June 2010, San Diego, USA. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELINSL.2010.5549819>
46. Kopchenkov D. Diagnostics of high-voltage cable lines. Experience of application. *Kabel-news*. 2012. No. 3. (Rus)
47. Bahadoorsingh S., Rowland S.M. A Framework linking knowledge of insulation ageing to asset management. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2008. Vol. 24. Is. 3. Pp. 38–46. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEI.2008.4591433>
48. International standard IEC 60505. Evaluation and qualification of electrical insulation systems, edition 4.0, 2011/07.
49. Kyrylenko O.V., Shcherba A.A., Kucheriava I.M. Intellectual technologies for monitoring of technical state of up-to-date high-voltage cable power lines. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2021. No. 6. Pp. 29–40. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.06.029> (Ukr)
50. Shcherba A.A., Podoltsev A.D., Kucheriava I.M. System for remote monitoring of high-voltage cable line state. *Pratsi Institutu Elektrodynamiki NAN Ukrainy*. 2020. Is. 57. Pp. 10–14. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.57.010> (Ukr)
51. Chen K., Yue Yi, Tang Yu. Research on temperature monitoring method of cable on 10 kv railway power transmission lines based on distributed temperature sensor. *Energies*, 21 Jun 2021. Vol. 14 (12). 3705 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14123705> . <https://www.mdpi.com/journal/energies>
52. Cherukupalli S., Anders G.J. Distributed fiber optic sensing and dynamic rating of power cables. *IEEE Press Series on Power Engineering*. Wiley-IEEE Press, October 1, 2019. 240 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119487739>
53. Enescu D., Colella P., Russo A., Porumb R.F., Seritan G.C. Concepts and methods to assess the dynamic thermal rating of underground power cables. *Energies*. 2021. No. 14. 2591 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14092591> . <https://www.mdpi.com/journal/energies>

Надійшла: 09.03.2023

Прийнята: 05.04.2023

Submitted: 09.03.2023

Accepted: 05.04.2023