

ОЦІНКА ШВИДКОСТІ СТАРІННЯ ПОЛІМЕРНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВОГО КАБЕЛЮ ПІД ДІЄЮ ПЕРИОДИЧНОЇ НЕСИНУСОЇДНОЇ НАПРУГИ

О.Д. Подольцев*, докт. техн. наук, М.О. Ломко, канд. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.
E-mail: podol@ied.org.ua

У роботі запропоновано методику оцінки швидкості проростання водних триїнгів у полімерній ізоляції силового кабелю із врахування наявності вищих гармонік напруги. Методика дає змогу прогнозувати строк служби кабелю, що використовується в електромережі із спотвореною формою напруги в залежності від частотного спектру цієї напруги, а також здійснювати на етапі проектування кабельної лінії вибір розрахункового значення номінальної напруги кабелю, що залежить від частотного спектру напруги та за якого строк служби кабелю буде такий самий, як і під час роботи у штатному режимі. Задля реалізації цієї методики розроблено комп'ютерну програму в пакеті Matlab/Simulink, яка дає змогу за попередньо визначеною формою спотвореної напруги в електромережі провести відповідні розрахунки та оцінити строк служби ізоляції кабелю. Для розглянутої, як приклад, осцилограми напруги, що характеризується значенням $THD_U = 23,4\%$, показано, що значення відносної швидкості проростання триїнгу дорівнює $V_{Tr} = 1,62$, а строк служби кабелю буде складати 0,62 від його строку служби під час роботи у штатному режимі. Бібл. 6, рис. 4.

Ключові слова: розподілена генерація, вищі гармоніки напруги, кабельна лінія, полімерна ізоляція, водний триїнг, строк служби силового кабелю.

Вступ. Світовими тенденціями у галузі сучасного розвитку кабельної техніки є застосування високовольтних силових кабелів із ізоляцією зі зшитого поліетилену, вдосконалення способів спорудження кабельних ліній, виконаних на основі таких кабелів, та забезпечення високого рівня техніко-екологічної безпеки кабельних систем [1, 2]. На теперішній час силові кабелі широко застосовуються в системах із розподіленою генерацією електричної енергії, що використовують енергію сонця та вітру. Кабельні лінії, що використовуються в структурі таких систем, під'єднуються до потужних напівпровідникових перетворювачів – інверторів – та забезпечують передавання енергії в енергосистему. Особливістю роботи кабельних ліній в таких системах є наявність періодичної несинусоїдної напруги в лінії [3], що обумовлено роботою інвертора. Отже, наявність вищих гармонік в нарузі, яку прикладено до полімерної ізоляції кабелю, є особливістю роботи кабелів в таких системах. Звідси, вивчення процесів прискореного старіння полімерної ізоляції силових кабелів під дією напруги, що містить вищі гармоніки, є актуальною задачею, враховуючи безперервне зростання обсягу електричної енергії, яка генерується відновлюваними джерелами енергії.

Один із домінуючих механізмів старіння полімерної ізоляції силових кабелів пов'язаний із виникненням водних триїнгів [4, 5]. При цьому переважну більшість досліджень проведено для випадку гармонічної напруги промислової частоти. В той же час вплив вищих гармонік напруги на процес виникнення та проростання водних триїнгів в об'ємі полімерної ізоляції кабелів є недостатньо вивченим. При цьому відомо, що з ростом частоти швидкість проростання таких триїнгів збільшується. Отже можна припустити, що наявність вищих гармонік напруги потенційно призводить до прискореного старіння ізоляції кабелів, що повинно враховуватися на етапі проектування кабельних ліній.

Враховуючи актуальність задачі – попередньої оцінки на етапі проектування строку служби високовольтних кабельних ліній, що використовуються в системах із розподіленою генерацією, **метою** даної роботи є розробка методики, що дає змогу оцінити швидкість проростання водних триїнгів в полімерній ізоляції силового кабелю під дією періодичної несинусоїдної напруги, а також, на основі цих даних, швидкість старіння ізоляції кабелю, спираючись на інформацію щодо попередньо встановленого частотного спектра напруги в системі електроживлення.

Методика розрахунку швидкості проростання водного триїнгу в полімерній ізоляції кабелю. Початковою інформацією для визначення швидкості проростання водного триїнгу є існуюча на практиці форма кривої напруги між жилою та екраном силового кабелю $u(t)$, яка у випадку, що до-

сліджується, є періодичною несинусоїдною функцією. Необхідну інформацію щодо форми напруги можна отримати або за допомогою комп'ютерного розрахунку процесів в системі живлення із кабельною лінією, або за допомогою експериментальних даних у вигляді осцилограм напруги кабелю у діючій лінії. У даній роботі реалізовано саме другий підхід.

Запропонована методика передбачає послідовне виконання наступних етапів.

1. Визначення залежності у часі напруги на кабелі (жила – екран) у вигляді періодичної несинусоїдної функції $u(t)$ та розкладання її у ряд Фур'є

$$u(t) = \operatorname{Re} \sum_{h=1}^H U_h e^{j\omega_0 h t},$$

де H – номер найвищої у спектрі гармоніки, що враховується, який вибирається із попереднього аналізу частотного спектру напруги $u(t)$.

2. Оцінка швидкості проростання водного триїнгу V , виходячи з того, що ця швидкість залежить від час дії синусоїдної напруги від її амплітуди U_m та частоти f (а також інших факторів, які в даній роботі не розглядаються). При цьому залежність швидкості від частоти, згідно стандарту [6], можна апроксимувати наступним чином:

$$V \cong (f / 50)^\alpha, \quad (1)$$

де $\alpha = 0,6 \div 0,7$. В цьому виразі знаком « \cong » позначено пропорційність.

Залежність швидкості проростання водного триїнгу V від амплітуди синусоїдної напруги також приймається як ступенева функція виду

$$V \cong (U_m / U_{ном})^\beta, \quad (2)$$

де $U_{ном}$ – амплітудне значення номінальної напруги для даного кабелю (його паспортне значення). Значення показника ступеня β залежить від багатьох факторів, але в першому наближенні його значення можна визначити із результатів роботи [4], де наведено експериментальні дані щодо довжини триїнга, який зростає із часом за різних значеннях напруги. Ці результати показано на рис. 1, а та за якими на рис. 1, б побудовано залежність довжини триїнга від напруги у момент часу 6 годин. Із апроксимації цієї залежності отримуємо значення показника $\beta \approx 1,5$.

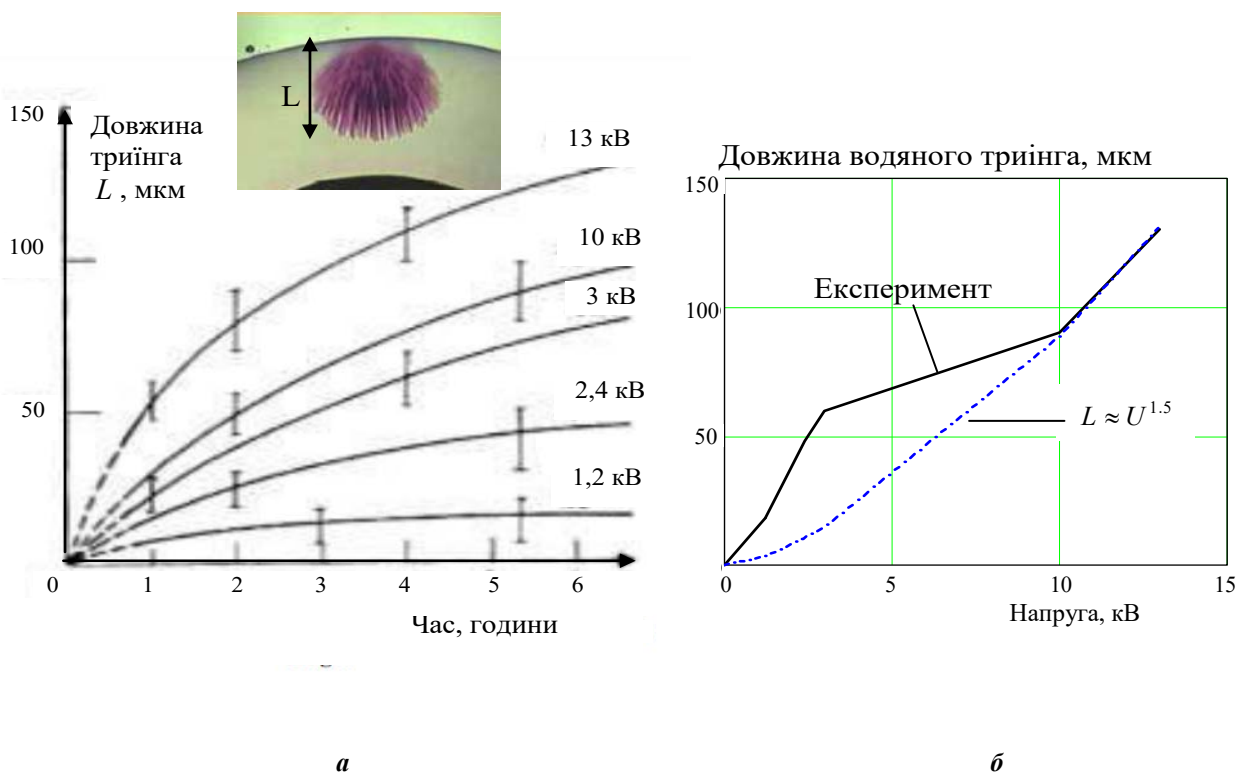


Рис. 1

3. Маючи окремо залежність швидкості V від частоти (вираз (1)) та від напруги (вираз (2)), в роботі припускається, що узагальнену залежність швидкості проростання водного триїнгу V для синусоїдної напруги та з врахуванням цих виразів можна записати як

$$V = K(f / 50)^\alpha (U_m / U_{ном})^\beta, \quad (3)$$

де K – розмірний масштабний коефіцієнт, що дорівнює швидкості при частоті 50 Гц та номінальній напрузі.

Згідно з (3), якщо на ізоляцію діє гармоніка напруги із номером $h = 1, 2, \dots, H$, що має частоту $f \cdot h$ та напругу u_h , то під дією такої гармоніки в цій ізоляції буде проростати триїнг зі швидкістю

$$V_h = K(fh / 50)^\alpha (U_h / U_{ном})^\beta.$$

4. На наступному етапі припускається, що за одночасного впливу всіх гармонік напруги загальна швидкість руху триїнгу дорівнює сумі швидкостей по всім гармонікам, тобто ця швидкість розраховується як

$$\sum_h V_h = \sum_h K(fh / 50)^\alpha (U_h / U_{ном})^\beta.$$

Таке припущення спирається на найпростіший механізм адитивної дії гармонік, і його справедливості планується перевірити у подальших експериментальних дослідженнях.

Далі вводиться поняття відносної швидкості проростання водного триїнгу

$$V_{Tr} = \sum_h V_h / V_0 = \sum_h (fh / 50)^\alpha (U_h / U_{ном})^\beta, \quad (4)$$

де $V_0 = K$ – швидкість проростання триїнгу за синусоїдної напруги із частотою $f = 50$ Гц та напрузі, що дорівнює номінальній. Отримане значення (4) для оцінки інтегральної швидкості проростання триїнгу в ізоляції дає змогу, маючи спектральний склад напруги та знаючи паспортне значення напруги кабелю $U_{ном}$, оцінити величину V_{Tr} .

Далі, припускаючи, що старіння ізоляції кабелю здійснюється переважно внаслідок виникнення та проростання водних триїнгів, вводиться поняття відносного значення часу старіння полімерної ізоляції кабелю

$$\tau_{Tr} = 1 / V_{Tr}, \quad (5)$$

тобто відношення часу старіння ізоляції через дію вищих гармонік до часу старіння через дію тільки першої гармоніки із амплітудним номінальним значенням напруги $U_{ном}$. Розрахунок введених величин V_{Tr} за виразом (4) та τ_{Tr} за виразом (5) є головним результатом застосування даної методики.

Результати комп'ютерних розрахунків. У роботі використовувалися осцилограми напруги на підземній кабельній лінії напругою 110 кВ. Ці осцилограми оцифровувалися і у вигляді таблиці використовувалися потім в розробленій Simulink-моделі – блок 1 на рис. 2, а. Далі ця напруга розкладалася в ряд Фур'є, при цьому вибиралося 20 перших гармонік напруги (див. блок 2, структуру якого показано на рис. 2, б), і проводився розрахунок значень V_{Tr} та τ_{Tr} , використовуючи, відповідно, вирази (4) та (5).

На рис. 3 наведено один із варіантів форми напруги на вході кабельній лінії та її частотний спектр. Розрахункове значення коефіцієнта гармонік складає $THD_U = 23,4\%$. Для напруги такої форми розраховане значення відносної швидкості V_{Tr} за умови $U_{ном} = U_1$ дорівнює 1,62. Припускаючи, що наявність триїнгів є домінуючим механізмом старіння ізоляції кабелю, можна стверджувати, що внаслідок дії вищих гармонік напруги строк служби кабелю буде знижено відповідно у 1,62 раз, тобто величина $\tau_{Tr} = 1/1,62 = 0,62$ і складає 0,62 від часу старіння ізоляції кабелю, що працює у штатному режимі.

Відомо, що якщо вибрати кабель з більш високою номінальною напругою $U_{ном}$, то його строк служби через роботу в зазначених умовах збільшиться. Для кількісної оцінки цього фактору проводилися розрахунки значення швидкості V_{Tr} за різних відносних значеннях розрахункової номінальної напруги кабелю $U_{ном} / U_1$ – результати наведено на рис. 4. З наведених результатів видно, що у разі збільшення розрахункової номінальної напруги до значення $U_{ном} / U_1 = 1,4$ величина $V_{Tr} = 1$ та строк служби кабелю буде таким, як і у штатному режимі його роботи (але при цьому збільшується вартість кабелю за рахунок збільшення товщини його ізоляції).

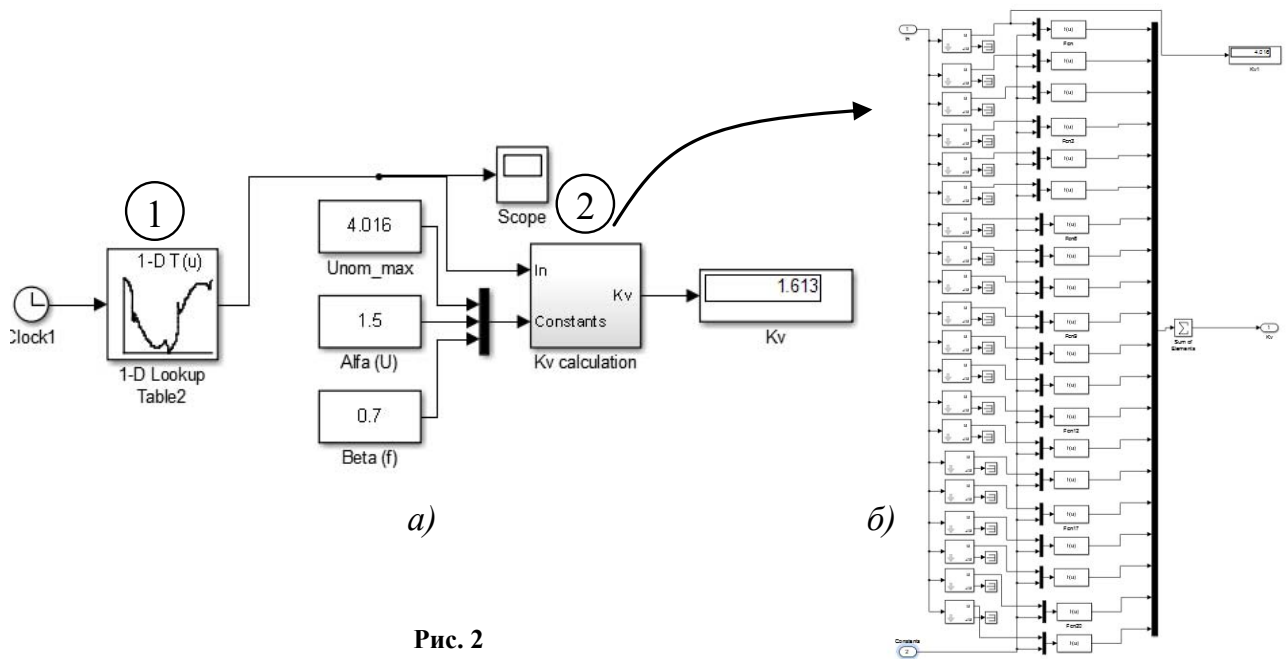


Рис. 2

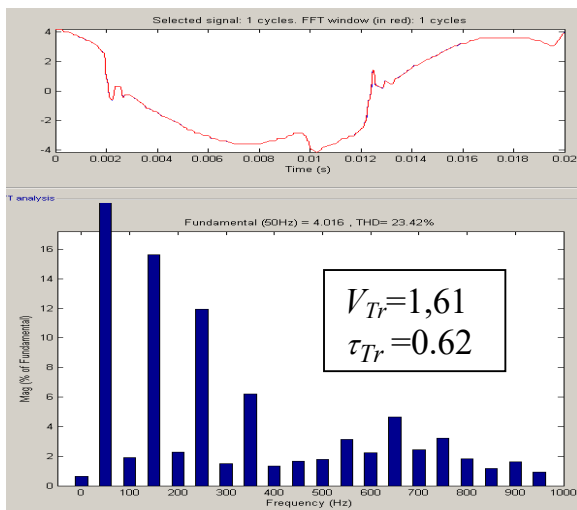


Рис. 3

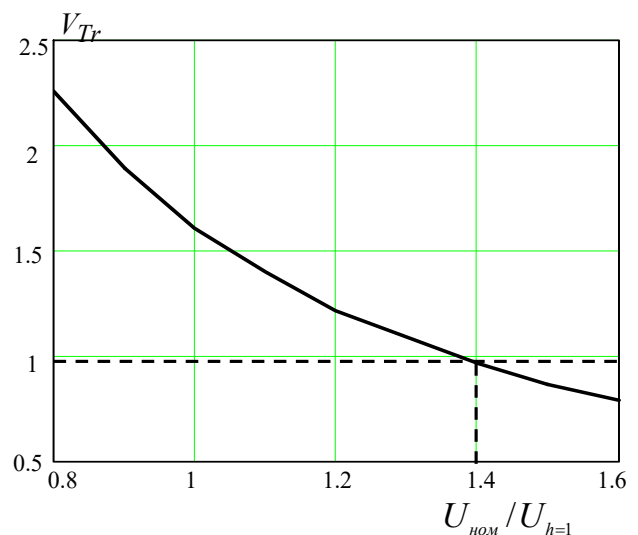


Рис. 4

Таким чином, описана методика дає змогу, по-перше, прогнозувати строк служби кабелю, що вже використовується в лінії, в залежності від частотного спектру напруги на ньому та розраховувати для цього спектру значення V_{Tr} і τ_{Tr} , та, по-друге, здійснювати на етапі проектування кабельної лінії вибір такого розрахункового значення номінальної напруги кабелю (що залежить від частотного спектру напруги в електромережі), за якого значення швидкості буде дорівнювати $V_{Tr}=1$, тобто строк його служби буде такий ж самий, як і під час роботи у штатному режимі.

Висновки. 1. У роботі запропоновано методику оцінки швидкості проростання водних триїнгів у полімерній ізоляції силового кабелю із врахування наявності вищих гармонік напруги. Методика дає змогу прогнозувати строк служби кабелю, що вже використовується в електромережі, в залежності від частотному спектру напруги на ньому, а також здійснювати на етапі проектування кабельної лінії вибір розрахункового значення номінальної напруги кабелю, яке буде залежати від частотного спектру напруги в електромережі та за якого строк служби кабелю буде дорівнювати цьому показнику у штатному режимі роботи.

2. Задля реалізації цієї методики розроблено комп'ютерну програму в пакеті Matlab/Simulink, що дає змогу за попередньо визначеною формою спотвореної напруги в електромережі, де розміщено

кабельну лінію (ця форма може бути задана у вигляді, наприклад, pdf-файлу), провести відповідні розрахунки та оцінити строк служби ізоляції кабелю, що знаходиться під дією цієї напруги. Для розглянутої як приклад осцилограми напруги, що характеризується значенням $THD_U = 23,4\%$, показано, що значення відносної швидкості проростання триїнгу дорівнює $V_{Tr} = 1,62$, а строк служби кабелю буде складати 0,62 від його строку служби під час роботи у штатному режимі.

Роботу виконано за рахунок бюджетної теми "Розвинути теорію імпульсних і високочастотних перехідних електромагнітних процесів у енергетичних і технологічних резонансних установках та високовольтних кабельних лініях електропередачі" (Шифр "ЕЛКАБ"), КПКВК 6541030.

1. Peschke E., Von Olshausen R. Cable Systems for High and Extra-High Voltage. MCD Verlag, 1999. 296 p.
2. 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.
3. F.C. De La Rosa. Harmonics, Power Systems, and Smart Grids. CRC Press, 2015, 274 p.
4. Jaghannath K. Water treeing in polyethylene cables. *International Journal of Advances in Science Engineering and Technology*. 2017. Vol. 5. Issue 1. Pp. 51-60.
5. Dissado L.A., Fothengill J.C. Electric Degradation and Breakdown in Polymers. The Institute of Engineering and Technology, 2008. 624 p.
6. D6097-16. Standard Test Method for Relative Resistance to Vented Water-Tree Growth in Solid Dielectric Insulating Materials. 2016.

EVALUATION OF THE AGING RATE OF POLYMER INSULATION OF POWER CABLE UNDER THE ACTION OF PERIODIC NON-SINUSOIDAL VOLTAGE

O.D. Podoltsev, M.O. Lomko
Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.
E-mail: podol@ied.org.ua

The paper proposes a method for estimating the rate of water treeing growth in the polymer insulation of the power cable, taking into account the presence of higher voltage harmonics. The technique allows to predict the service life of a cable used in a power grid with a distorted voltage, depending on the frequency spectrum of this voltage, as well as to select at the design stage of the cable line the calculated value of the nominal voltage of the cable the service life of the cable will be the same as when operating normally. To implement this technique, a computer program in the Matlab/Simulink package has been developed, which allows to perform appropriate calculations and estimate the service life of the cable insulation according to a predetermined form of distorted voltage in the power grid. For the voltage oscillogram considered as an example, characterized by the value of $THD_U = 23.4\%$, it is shown that the value of the relative water treeing growth is equal 1.62, and the service life of the cable will be 0.62 of its service life when operating normally. References 6, figures 4.

Key words: distributed generation, higher voltage harmonics, polymer insulation, water treeing, power cable life.

1. Peschke E., Von Olshausen R. Cable Systems for High and Extra-High Voltage. MCD Verlag, 1999, 296 p.
2. Shidlovski A.K., Shcherba A.A., Zolotarev V.M., Podoltsev A.D., Kuchertava I.M. Ultra-high voltage polymer insulated cables. Kyiv: Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, 2013. 550 p. (Rus)
3. F.C. De La Rosa. Harmonics, Power Systems, and Smart Grids. CRC Press, 2015. 274 p.
4. Jaghannath K. Water treeing in polyethylene cables. *International Journal of Advances in Science Engineering and Technology*. 2017. Vol. 5. Issue1. Pp. 51-60.
5. Dissado L.A., Fothengill J.C. Electric Degradation and Breakdown in Polymers. The Institute of Engineering and Technology, 2008. 624 p.
6. D6097-16. Standard Test Method for Relative Resistance to Vented Water-Tree Growth in Solid Dielectric Insulating Materials.

Надійшла 30.06.2022
Остаточний варіант 12.09.2022