

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВИСОКОЧАСТОТНИХ СКЛАДОВИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ,
ЩО ВИНИКАЮТЬ НА ІЗОЛЯЦІЇ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ****Шевченко С. Ю., Довгальок О. М., Піротті О. Є., Єрмоленко Б. Ф.***Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"*

Проведено експериментальні та теоретичні дослідження особливостей виникнення високочастотних електромагнітних коливань на лініях електропередачі та їх вплив на перекриття гірлянди ізоляторів.

Постановка проблеми. Відключення або пошкодження повітряних ліній електропередачі (ЛЕП) високої і надвисокої напруги виникає внаслідок різних причин, серед яких не останнє місце займають як природні фактори (вплив блискавок і вітрових навантажень, обмерзання і забруднення ізоляторів в регіонах з несприятливими екологічними умовами), так і випадкові або навмисні дії людини з пошкодження підвісної ізоляції. Для України з її протяжними лініями, що в значній частині вичерпали свій ресурс, усунення аварійних ситуацій, викликаних подібними випадками, завдає відчутної економічної шкоди. Крім цього кожне аварійне відключення ЛЕП вимагає аналізу обставин його виникнення, що досить часто зробити практично неможливо в силу відсутності видимих причин перекриття ізоляції. У цьому зв'язку важливого значення набувають методи ранньої оперативної діагностики технічного стану високовольтних ліній і, зокрема, стану проводів та ізоляції ЛЕП.

Останнім часом при діагностиці стану високовольтної ізоляції значна увага приділяється появі високочастотних складових електромагнітних коливань, що свідчать про погіршення її стану. Поява таких коливань свідчить про наявність в конструкції ЛЕП ослаблених, з точки зору електричної міцності, ділянок. Це в свою чергу призводить до активізації іонізаційних і розрядних процесів на ослаблених ділянках, які і є джерелом високочастотних електромагнітних коливань. Такими джерелами можуть бути пошкоджені елементарні провідники, які в сукупності складають провід, дефекти підвісної арматури, дефектні ізолятори. Подібні дефекти визначити візуально, враховуючи розміри ЛЕП, практично неможливо. З іншого боку відомо, що високочастотні імпульси, які впливають на ізоляцію, призводять до погіршення її діелектричних характеристик, так званого старіння. Поява високочастотних сигналів істотно прискорює процес старіння ізоляції. Крім того швидкість старіння ізоляції залежить від напруженості поля в ізоляційному матеріалі.

Таким чином, дослідження високочастотних складових електромагнітних полів, що виникають на ізоляції повітряних ліній (ПЛ), є важливим завданням, що має практичний інтерес для енергетики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Протягом значного часу дослідженню природи виникнення, методам дослідження та наслідкам впливу високочастотних електричних коливань на енергетичні об'єкти приділялось багато уваги. Так в роботі [1] поява високочастотних коливань зв'язується з наявністю в ізоляторах часткових розрядів, що призводить до передчасного старіння ізоляції. Виконані в [2] дослідження показали, що джерелом високочастотних коливань можуть бути як ізолятори ПЛ, так і проводи при наявності корони. В [3] розглядаються способи діагностики

стану ізоляторів. Проте недостатньо досліджень проведено щодо кількісного аналізу впливу високочастотних електричних коливань на пошкодження гірлянд ізоляторів, а отже й аварійне відключення ПЛ.

Мета статті. Головною метою цієї роботи є експериментальне і теоретичне дослідження високочастотних електромагнітних коливань на ЛЕП.

Основні матеріали дослідження. Розглянемо виникнення таких коливань під час дії високої напруги на підвісний ізолятор. Відомо, що основними діелектричними матеріалами при виготовленні ізоляторів є скло і порцеляна. Дефекти порцелянових ізоляторів виявляються за тепловими аномаліями за наявності розвиненої поздовжньої тріщини в умовах підвищеного зволоження або забруднення поверхні ізолятора чи дефектів цементного закладення, а також утворення коронного розряду в зонах з підвищеним рівнем напруженості поля при пробіі окремих секцій гірлянд. Скляні ізолятори, на відміну від порцелянових, завжди вважалися "самодефектуючимися", тобто загартоване скло при пошкодженнях руйнується під дією механічних напруг. Однак можливе істотне погіршення ізолюючих властивостей скляних ізоляторів при появі на їх поверхні ковзних розрядів. Джерелом ковзних розрядів, в цьому випадку, може бути ізоляційна конструкція між стрижнем і шапкою тарілчастого ізолятора, яка складається з послідовного електричного з'єднання елементів: цементне закладення стрижня – тіло діелектрика (скла) – цементне закладення шапки. Останню не прийматимемо до уваги, оскільки напруженість електричного поля в ній практично на порядок менша порівняно із цементним закладенням стрижня.

Як було відзначено вище, ізолятори можуть бути джерелом високочастотних коливань на ЛЕП, які сприяють аварійним відключенням. Для підтвердження цього були виконані експериментальні дослідження. При проведенні експериментів увага була приділена використанню двох ізоляторів з гірлянди ділянки ПЛ 330 кВ, яка "перекривається", з них ізолятор з умовним номером 1 є першим в гірлянді від траверси, а з номером 2 – це наступний за ним в гірлянді. Були використані ізолятори типу ПС 120Б.

Для 1-го ізолятора характерним є наявність стійкого поверхневого забруднення іржею, яке, вочевидь, пояснюється стіканням іржі з поверхонь траверси. Поверхня 2-го ізолятора є порівняно чистою. Зовнішній огляд видимого краю цементного закладення стрижня показує наявність в ньому великих пор і відсутність захисного покриття. Було проведено осцилографування струму, що протікає через ізолятор при підключенні до стрижня високої змінної напруги. У ланцюг заземлюючого провідника, підключеного до шапки, включався резистор опором 110 Ом, з виходу якого напруга надходила на вхід осцилографа.

Було проведено кілька серій осцилографування, при цьому запис результатів проводився на цифрову відеокамеру, що дозволяло вибрати характерні осцилограми режимів. Всього отримано понад 1000 кадрів осцилограм, найбільш характерні з яких (рис. 1-3) розглянемо нижче.

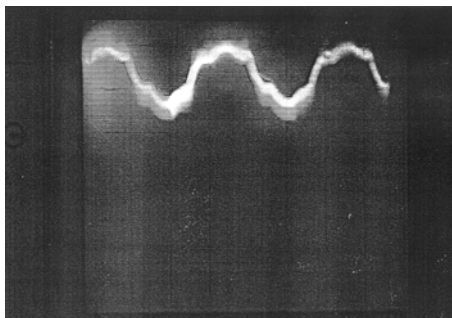


Рисунок 1 – Осцилограма електричного струму при напрузі на ізоляторі 28 кВ

На рис. 1 показано осцилограму електричного струму 2-го ізолятора при напрузі 28 кВ (тут і далі використовується середньоквадратичне значення напруги). Масштаб складає по вертикальній осі 0,1 В на 1 ділення, по горизонтальній осі – 5 мс на 1 ділення. Осцилограма демонструє близьку до синусоїдної форму ємнісного струму, що протікає через ізолятор.

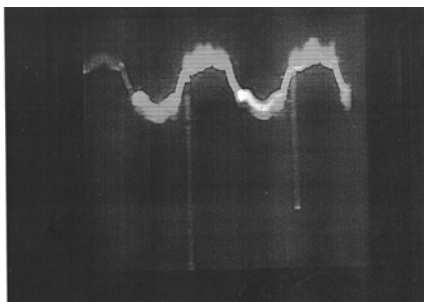


Рисунок 2 – Осцилограма електричного струму при напрузі на ізоляторі 30 кВ

На рис. 2 показано осцилограму того ж струму при напрузі 30 кВ (масштаби за осями такі самі, як і для рис.1). Характерним в даній осцилограмі є поява високочастотних коливань струму, амплітуда яких в 5 і більше разів перевищує амплітуду сигналу частоти 50 Гц. Дані коливання пояснюються пробоем по товщі або поверхневим перекриттям цементного закладення стрижня. Цементне закладення стрижня знаходиться в електричному полі, напруженість якого в 3-4 рази перевищує напруженість поля в склі. Це пов'язано з тим, що ізолятор представляє собою конденсатор з багаточисловою ізоляцією, напруженість полів в такому конденсаторі відносяться зворотно пропорційно до діелектричної проникності відповідних шарів конденсатора. При цьому на межі розділу шарів діелектриків, в силу безперервності силових ліній електричного поля, скупчується заряд. Подібне явище, при наявності повітряних включень на межі розділу шарів діелектриків, може істотно знижувати розрядні напруженості в області переходу з одного шару ізоляції в інший. При цьому властивості цементу, як високовольтного діелектрика, набагато гірші в порівнянні зі склом. Такі "пари" діелектриків в техніці ви-

соких напруг характеризуються швидким (електричним) старінням гіршого діелектрика при перенесенні основного електричного навантаження, в даному випадку на скло. Найгірший діелектрик в цій парі служить постачальником додаткових електричних коливань, які поступово руйнують основний елемент пари.

Візуальні спостереження в темряві показують, що на одиночному тарілчастому ізоляторі виникають дві іскри, які служать джерелом високочастотних коливань. Перша з них, іскра між краєм шапки і складдеталі, є джерелом дрібномасштабної структури – високочастотних коливань (рис. 2), оскільки обумовлена ковзним розрядом на поверхні складдеталі. Друга, іскра між пестиком і складдеталлю, є джерелом великомасштабного викиду струму (рис. 2). Така відмінність амплітуд першої і другої іскри обумовлені розподілом електричного поля по конструкції ізолятора (рис. 3). У проміжку пестик – складдеталь діє в основному тангенціальна складова поля, а в проміжку шапка – складдеталь нормальна складова поля, що істотно полегшує розвиток ковзного розряду в другому проміжку. Оскільки конструктивно ізолятор є конденсатором, то його щодо подібних іскор можна вважати генератором напруги, який підтримує процес іскроутворення. В деяких випадках, при досить великій напрузі, такі розряди можуть досягати довжин порядку сантиметрів.

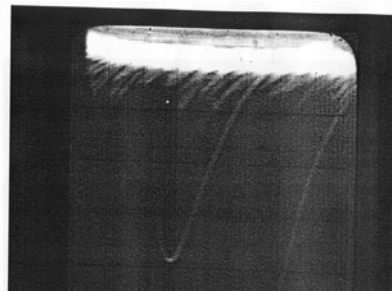


Рисунок 3 – Осцилограма електричного струму при напрузі на ізоляторі 30 кВ у збільшеному масштабі

Осцилограма на рис. 3 дозволяє більш точно визначити амплітуду великомасштабного викиду струму (пік в нижній частині осцилограми), яка більше ніж в 10 разів перевищує амплітуду струму частоти 50 Гц (сигнал даної частоти знаходиться в розмитих кордонах у верхній частині осцилограми). Масштаб по вертикальній осі є таким же, як на попередніх осцилограмах, а по горизонтальній осі – 10 мкс на 1 ділення. Тривалість напівперіоду великомасштабного викиду становить за осцилограмою близько 40 мкс. Осцилограма також показує наявність дрібномасштабної структури – високочастотні коливання з амплітудою, яка в кілька разів перевищує сигнал частоти 50 Гц, і частотою близько 250 кГц. Осцилограми струму 1-го і 2-го ізоляторів показують практично співпадаючі результати.

Також були виконані дослідження нових ізоляторів того ж типу, які не використовувалися на ЛЕП. Осцилограми струму, отримані для цих ізоляторів при напрузі 30 кВ, показують відсутність великомасштабних викидів. Дрібномасштабна структура коливань присутня, її амплітуда практично дорівнює амплітуді сигналу частоти 50 Гц. Це свідчить про те, що в процесі експлуатації ізоляційні властивості ізолятора істотно змінюються в сторону погіршення. Для підтве-

рдження цього явища було також проведено випробування нового ізолятора при напрузі 45 кВ протягом 5 діб. Після даного випробування ізолятор фактично став еквівалентним (відносно великомасштабних коливань струму) двом ізоляторам з гірлянди "перекритої" ділянки ПЛ 330 кВ. Для напруги 30 кВ його термін "життя" може бути орієнтовно визначений:

$$T_{життя} \approx 5 \text{ діб} \cdot (45 \text{ кВ}/30 \text{ кВ})^5 = 37,95 \text{ діб}, \quad (1)$$

тобто близько 40 діб. Таким чином, встановлені на ПЛ нові ізолятори можуть швидко втрачати свої первинні властивості.

Для кількісного аналізу рівня електричного поля в об'ємі ізолятора виконувалося чисельне моделювання поля методом кінцевих елементів [4]. На рис. 4 показано розрахункову область з ізолятором. Через існуючу осьову симетрію розрахунок виконувався в циліндричній системі координат в площині. Тут вказані такі основні елементи: 1 – стрижень; 2 – цементне закладення стрижня (відносна діелектрична проникність становить $\epsilon = 6$); 3 – скляний діелектрик ($\epsilon = 10$); 4 – цементне закладення шапки ізолятора ($\epsilon = 6$); 5 – шапка ізолятора.

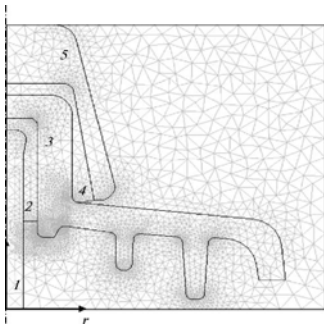


Рисунок 4 – Розрахункова область, яка містить тарілчастий скляний ізолятор ПС 120Б, із зазначенням кінцево-елементної сітки

Диференційне рівняння, що описує розподіл електричного потенціалу в сталому синусоїдному режимі, має наступний вигляд:

$$\nabla \cdot ((\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r)\nabla\phi) = 0, \quad (2)$$

де σ, ϵ_r – електропровідність і відносне значення діелектричної проникності середовища, відповідно; $\omega = 314,16$ рад/с – кутова частота.

Для вирішення цього диференційного рівняння в роботі використовувався чисельний метод кінцевих елементів, реалізований в пакеті COMSOL [4]. Результати розрахунку напруженості електричного поля в об'ємі ізолятора при напрузі 30 кВ представлені на рис. 5.

Максимального значення напруженості поля досягає на поверхні стрижня. Найбільш небезпечні значення напруженості поля існують на поверхні цементного закладення стрижня (рис. 6), де вона становить 3,0 кВ/мм. При таких значеннях напруженості поля може відбуватися поверхневий розряд, що і спостерігалось в проведеному експерименті.

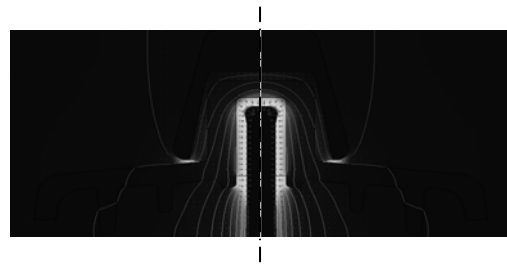


Рисунок 5 – Розподіл напруженості електричного поля і ліній рівного потенціалу в середньому перерізі тарілчастого ізолятора ПС 120Б при напрузі 30 кВ

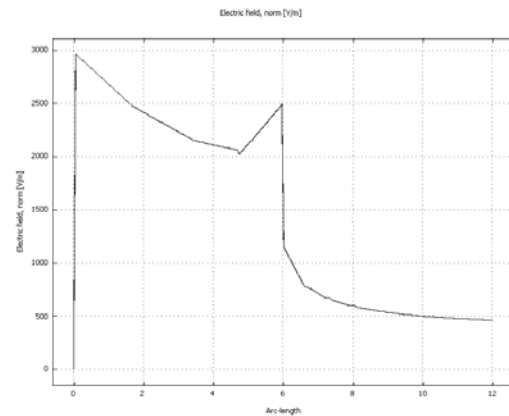


Рисунок 6 – Розподіл напруженості електричного поля на поверхні цементного закладення стрижня тарілчастого ізолятора ПС 120Б при напрузі 30 кВ

Результати проведених експериментальних і розрахункових досліджень свідчать про те, що при появі падіння напруги на ізоляторі на рівні 30 кВ в ньому виникають поверхневі розряди, які можуть ініціювати перекриття гірлянди в цілому. Виникає питання, чи можлива поява напруги 30 кВ на одному з ізоляторів гірлянди ПЛ 330 кВ при середньому значенні напруги на ізоляторі $U_{із.сер.}$? При цьому середнє значення напруги становить

$$U_{із.сер.} = \frac{1,03 \cdot 330}{\sqrt{3 \cdot 19}} \approx 10,3 \text{ кВ}, \quad (3)$$

де 1,03 – коефіцієнт перевищення напруги на лінії та 19 – кількість ізоляторів в гірлянді.

Поява такої напруги цілком можлива за умови вкрай нерівномірного розподілу напруги по гірлянді, в першу чергу, для середньої фази. Це пов'язано з тим, що ізолятори середньої фази найбільш навантажені з електричної точки зору, тобто ємності ізоляторів гірлянди на опорі будуть максимальними саме для середньої фази. Величину даної ємності збільшують натяжні металеві канати, застосовувані для підвищення вітростійкості опор [5].

Хвилі високочастотних коливань, що генеруються ізоляторами, мають кілька напрямків впливу. По-перше, вони, як вже зазначалося вище, впливають на процес старіння ізоляції. По-друге, можуть призводити до перекриття гірлянди, в якій знаходиться ізолятор під впливом напруги вище порогового значення. Враховуючи випадковий характер виникнення високочастотних ко-

ливань, можна припустити, що на картину розрахункового розподілу напруги частоти 50 Гц за елементами гірлянди накладається значна високочастотна складова, яка також має випадковий характер. У цьому випадку різко знижується напруга появи ковзного розряду на крайніх ізоляторах гірлянди. Крім цього, протікання високочастотної складової струму в ланцюзі гірлянд призводить до появи на проводах ПЛІ 330 кВ відповідних високочастотних перенапруг, що також мають випадковий характер. Таке припущення може пояснити причину відсутності перекриття гірлянд поблизу станцій (підстанцій), оскільки вони внаслідок великої потужності пригнічують високочастотні коливання на шинах. Однак посилення високочастотних коливань може відбуватися, орієнтовно, на довжині їх напівхвилі. Оцінка такої довжини для осцилограми на рис. 2 дає:

$$L_{\text{напівхвилі}} \approx 40 \text{ мкс} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} = 12 \text{ км}, \quad (4)$$

де $3 \cdot 10^8$ м/с – швидкість поширення електромагнітної хвилі.

По-третіх, хвилі високочастотних коливань можуть вільно поширюватися по проводах ЛЕП, використовуючи їх в якості направляючої структури. В останньому випадку при потраплянні на здорову ізоляцію кількох подібних хвиль їх амплітуди будуть складатися, що є причиною виникнення досить великих за величиною перенапруг, які можуть привести до пошкодження здорової ізоляції на відстані декількох кілометрів від джерела високочастотних коливань. Цим можна пояснити переважну відсутність перекриттів гірлянд в холодну половину року, коли наявність паморозі або довгостроково непросихаючої вологи на струмопроводах призводить до виникнення додаткових втрат, що перешкоджають поширенню високочастотних коливань по проводам ПЛІ.

Виникнення високочастотних перенапруг на ізоляції енергетичного обладнання надвисокої напруги, пов'язаних з наявністю конструктивних елементів, які в певних режимах роботи можуть бути їх джерелами, вимагає уточнення механізму виникнення умов для поширення подібних явищ на ЛЕП і підстанціях надвисокої напруги та розробки засобів захисту від них.

Висновки. Таким чином, проведені експериментальні і теоретичні дослідження високочастотних електромагнітних коливань на ЛЕП дозволяють зробити наступні висновки:

1. При діагностиці стану високовольтної ізоляції значну увагу необхідно приділяти появі високочастотних складових електромагнітних коливань, що свідчать про погіршення її стану.

2. Доведено, що при напрузі 30 кВ на внутрішній поверхні ізолятора виникають поверхневі розряди, які можуть ініціювати перекриття всієї гірлянди ізоляторів.

3. На картину розрахункового розподілу напруги частоти 50 Гц за елементами гірлянди може накладатися значна високочастотна складова, яка також має випадковий характер.

4. Результати розрахунку напруженості електричного поля в об'ємі ізолятора при напрузі 30 кВ показали, що максимального значення напруженість поля досягає на поверхні стрижня. Найбільш небезпечні значення поля існують на поверхні цементного закла-

дення стрижня і можуть призводити до появи високочастотних перенапруг на ізоляції ПЛІ.

5. Необхідна розробка математичних моделей виникнення високочастотних електромагнітних коливань та їх поширення по довжині ЛЕП високої і надвисокої напруги.

6. Виникнення високочастотних перенапруг на ЛЕП може призводити до їх відключення, що обумовлює необхідність розробки засобів і способів захисту від них.

Список використаних джерел

1. Кириленко В. М. Частичные разряды как основной фактор разрушения твердых диэлектриков (основы теории) / В. М. Кириленко // Электрофизическая аппаратура и электрическая изоляция: сб. докл. межвуз. научно-практ. конф. по вопросам создания и методам испытания высоковольтной электрофизической аппаратуры. – М.: Энергия, 1967. – С. 447-455.

2. Журавлев Э. Н. Радиопомехи от коронирующих линии электропередачи / Э. Н. Журавлев. – М.: Энергия, 1971. – 198 с.

3. Матяев Ю. С. Методы определения источника радиопомех / Ю. С. Матяев // Автоматика, телемеханика и связь. – № 9. – 1997. – С. 23–24.

4. Шевченко С. Ю., Окунь А. А. Моделирование электрического поля стеклянного изолятора ВЛ 110 кВ / С. Ю. Шевченко, А. А. Окунь // Вісник НТУ «ХП». – Тем. вип.: Енергетика: надійність і енергоефективність. – № 3. – 2011. – С. 136-143.

5. Шевченко С. Ю., Ганус А. И. Високочастотные колебания, возникающие на изоляции воздушных линий электропередачи / С. Ю. Шевченко, А. И. Ганус // Вісник НТУ «ХП». – Тем. вип.: Проблеми удосконалення електричних машин та апаратів. – № 36. – 2010. – С. 127-130.

Аннотация

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ НА ИЗОЛЯЦИИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ

Шевченко С. Ю., Довгальук О. Н., Пиротти А. Е., Ермоленко Б. Ф.

Проведены экспериментальные и теоретические исследования особенностей возникновения высокочастотных электромагнитных колебаний на линиях электропередачи и их влияния на перекрытие гирлянды изоляторов.

Abstract

RESEARCH OF HIGH-FREQUENCY COMPONENTS OF THE ELECTROMAGNETIC FIELDS CREATED ON THE INSULATION OF OVERHEAD LINES

S. Shevchenko, O. Dovgalyuk, A. Pirrotti, B. Ermolenko

Experimental and theoretical research of features occurrence of high-frequency electromagnetic waves on electric power lines and their effect on the overlap of the insulator string.