

**ВПЛИВ СТРУМІВ БЛИСКАВКИ НЕГАТИВНОЇ ТА ПОЗИТИВНОЇ ПОЛЯРНОСТІ НА ПАРАЛЕЛЬНЕ З'ЄДНАННЯ НЕЛІНІЙНИХ ОБМЕЖУВАЧІВ ПЕРЕНАПРУГ****Є. О. Троценко, В. О. Бржезицький, О. С. Яндутьський, А. Б. Нестерко**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**ORCID: 0000-0001-9379-0061; 0000-0002-9768-7544; 0000-0002-0362-7947; 0000-0001-7488-4214****М. М. Діксіт**

Інститут управління підприємництвом та інженерних технологій Вішванікетана

**ORCID: 0000-0003-1959-7815**

Дослідження впливу неідентичності захисних характеристик нелінійних обмежувачів перенапруг на ефективність паралельного з'єднання декількох обмежувачів. Для розрахунку електричних кіл з нелінійними параметрами використано вільне програмне забезпечення для схемотехнічного моделювання. Для імітації впливу найбільш близького до реальних умов, використано осцилограми реальних струмів блискавки, оцифровані за допомогою вільного спеціалізованого програмного забезпечення. Проведено дослідження паралельного з'єднання двох типових обмежувачів перенапруг, призначених для високовольтної мережі класу напруги 110 кВ. Для аналізу впливу неідентичності захисних характеристик залишкова напруга одного з обмежувачів варіювалася у відсотках від залишкової напруги іншого. Було встановлено, що коли різниця між залишковими напругами обмежувачів перенапруг перевищує 6%, розподілення струмів крізь обмежувачі перенапруг може досягати пропорції 1:4. Цілеспрямоване паралельне з'єднання обмежувачів перенапруг це ефективне рішення для збільшення енергоємності, за умови, якщо залишкові напруги обмежувачів перенапруг є максимально близькими. Показано, що невелика різниця в залишкових напругах більш небезпечна у випадку позитивних блискавок, які характеризуються більшою тривалістю імпульсу струму, ніж негативні блискавки. Показано, що за однакової амплітуди струмів блискавки, при ураженні позитивною блискавкою обмежувач перенапруг має поглинути енергію в 10 разів більшу, ніж при ураженні негативною блискавкою. Підхід враховує відмінності між імпульсами струмів блискавки негативною та позитивною полярністю, чого не можна досягти при використанні апроксимації струмів блискавки спрощеними математичними виразами. Використання запропонованого підходу дозволяє проводити більш глибокий аналіз різних схем захисту електричних мереж від перенапруг, оскільки він враховує фактичні особливості кривої струму блискавки. Подальший розвиток запропонованого підходу вбачається в використанні його як при виборі нелінійних обмежувачів перенапруг для захисту електроустановок високовольтних електричних мереж, так і в навчальному процесі.

**Ключові слова:** нелінійний обмежувач перенапруг, паралельне з'єднання, залишкова напруга, поглинута енергія, струм блискавки.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Нелінійні обмежувачі перенапруг (ОПН) призначені для первинного захисту високовольтного електроустановки в мережах змінного струму від грозових і комутаційних перенапруг. Для обмеження перенапруг ОПН встановлюють паралельно високовольтному електроустановці, яке необхідно захистити. Захисна дія ОПН базується на різко нелінійній вольт-амперній характеристиці (ВАХ) його нелінійних резисторів (варисторів) на основі оксиду цинку. В нормальному робочому режимі при номінальній напрузі високовольтної електричної мережі опір варисторів всередині ОПН є достатньо великим і струм крізь ОПН не протікає. При грозових або комутаційних перенапругах, коли напруга між виводами ОПН зростає вище за найбільшу робочу напругу мережі, опір варисторів всередині ОПН різко знижується. В результаті при небезпечних перенапругах весь розрядний струм протікає крізь ланку з найменшим опором, тобто крізь ОПН в землю, і, відповідно, не протікає крізь високовольтне електроустановки. Окремий ОПН за умови правильного вибору та встановлення є повноцінним захисним апаратом. Разом з тим, наприклад, для збільшення енергоємності можна встановлювати декілька ОПН паралельно. Ідея цілеспрямованого з'єднання декількох ОПН паралельно не нова, але вона недостатньо висвітлена в наукових публікаціях. Ефективність встановлення додаткового ОПН паралельно до основного для унеможливлення ви-

ходу з ладу останнього при ураженні розподільних ліній електропередачі (ЛЕП) зимовими блискавками показана в [1]. В свою чергу, в роботі [2] показано ефективність встановлення декількох ОПН паралельно для захисту розподільного трансформатора. Разом з позитивним ефектом таке технічне рішення має також певні обмеження, які обумовлені певними технологічними факторами.

Оскільки, як вже було зазначено вище, варистори ОПН мають різко нелінійну ВАХ, то не однакові ВАХ одразу призведуть до нерівномірного розподілу струму між декількома ОПН, що цілеспрямовано з'єднані паралельно. Тому виробники ОПН в каталогах своєї продукції зазначають, що покупець повинен проінформувати виробника в разі паралельного з'єднання ОПН [3]. В такому випадку виробник підбирає ОПН з максимально близькими ВАХ. Моделювання та дослідження розподілення струму блискавки між двома паралельними ОПН з різними захисними характеристиками проведено в [4]. Дослідження проводилися на динамічних (частотно-залежних) моделях ОПН з використанням оцифрованих осцилограм реальних струмів блискавки однієї полярності. Зокрема було показано, що навіть за невеликої різниці між залишковими напругами двох ОПН достатньо для суттєвого порушення рівномірного розподілення розрядного струму крізь ОПН, що з'єднані паралельно.

Серед усіх розрядів блискавок негативні розряди складають переважну кількість, але позитивні роз-

ряди потенційно є більш деструктивними та небезпечними [5, 6]. Апроксимація струму блискавки різними математичними формулами, які в переважній більшості представляють собою різні комбінації експоненціальних виразів суттєво відрізняється від форми струмів реальних блискавок різної полярності. На найближчі роки ОПН залишатимуться основним засобом первинного захисту високовольтного електрообладнання в мережах змінного струму від перенапруг. Оскільки, встановлення декількох ОПН паралельно в одній точці мережі залишається одним з очевидних способів підвищення ефективності захисту, виникає необхідність дослідження такого технічного рішення. Тому, для більш ґрунтовного аналізу, доцільно використовувати осцилограм реальних струмів блискавок різної полярності для дослідження впливу неідентичності захисних характеристик ОПН на ефективність паралельного з'єднання ОПН.

Мета роботи – подальший розвиток досліджень динамічних моделей ОПН з використанням осцилограм реальних струмів блискавок та врахуванням полярності блискавки.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.**

Оцінити чи має місце нерівномірне розподілення струмів, а отже і перенавантаження одного з декількох ОПН, можна за допомогою динамічних (частотно-залежних) моделей. До теперішнього часу найбільш широко вживаною залишається модель, запропонована в [7], схема якої зображена на рис. 1.

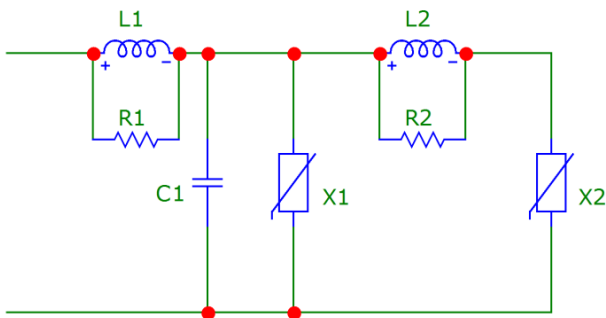


Рисунок 1 – Частотно-залежна модель металооксидного ОПН

Модель виконана так, щоб всі електричні параметри в схемі на рис. 1 можна було обчислити знаючи тільки ті характеристики ОПН, які фірми-виробники вказують в каталогах своєї продукції. Процедура розрахунку усіх параметрів наведена в [1], тому автори не будуть зупинятися на цьому. Варто лише зазначити, що числові значення  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $L_1$ ,  $L_2$  і  $C_1$  в моделі на рис. 1 залежать від геометричних розмірів ОПН (висота) та його конструктивного виконання (одна чи декілька колонок з варисторами). ВАХ нелінійних резисторів  $X_1$  і  $X_2$  представляють собою криві узагальненої форми, значення яких по осі ординат (напруга) залежать від значення залишкової напруги для конкретного ОПН при грозовому імпульсі струму амплітудою 10 кА та формою 8/20 мкс з каталогу фірми-виробника. Таким чином, схема дозволяє варіювати значення залишкової напруги конкретного ОПН, що може бути використано для

дослідження впливу неідентичності захисних характеристик ОПН на ефективність паралельного з'єднання ОПН. Для даної задачі призначена схема на рис. 2.

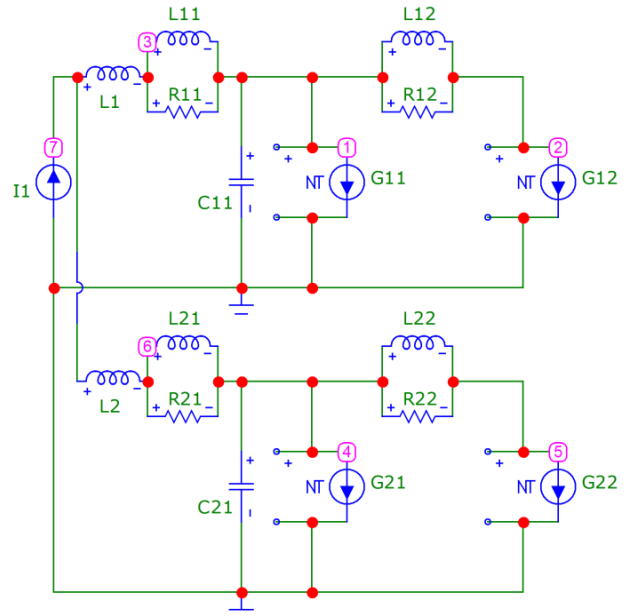


Рисунок 2 – Схема заміщення паралельного з'єднання двох ОПН

Для моделювання схеми на рис. 2 було використано програму для аналогового і цифрового моделювання електричних та електронних схем Micro-Cap 12 [8], яка у вільному доступі розміщена на сайті розробника. В даній схемі:  $R_{11}$ ,  $R_{12}$ ,  $L_{11}$ ,  $L_{12}$ ,  $C_{11}$ ,  $G_{11}$  і  $G_{12}$  – параметри першого ОПН;  $R_{21}$ ,  $R_{22}$ ,  $L_{21}$ ,  $L_{22}$ ,  $C_{21}$ ,  $G_{21}$  і  $G_{22}$  – параметри другого ОПН;  $I_1$  – інжектований в схему струм блискавки. Моделювання нелінійних елементів  $G_1$  і  $G_2$  в моделі ОПН на рис. 2 було виконано за допомогою моделі джерела струму, керованого напругою (NTIofV), відповідно до методики, запропонованої в [9].

Дослідження полягало в схемотехнічному моделюванні відповідно до схеми на рис. 2 двох типових ОПН, призначених для електричної мережі класу напруги 110 кВ. Залишкова напруга першого ОПН становить 255,0 кВ при грозовому імпульсі струму амплітудою 10 кА та формою 8/20 мкс. Для того щоб проаналізувати вплив неідентичності захисних характеристик ОПН залишкова напруга другого ОПН варіювалася у відсотках від залишкової напруги першого ОПН. Електричні параметри в схемі на рис. 2 було обчислено згідно з [1]. Розраховані значення складають:  $R_{11} = R_{21} = 109,474$  Ом;  $R_{12} = R_{22} = 71,158$  Ом;  $L_{11} = L_{21} = 0,219$  мкГн;  $L_{12} = L_{22} = 16,421$  мкГн;  $C_{11} = C_{21} = 91,346$  пФ.

Відповідно до [10], для області високих частот, індуктивність прямого відрізка проводу (Гн) обчислюється наступним чином:

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \cdot \left( \ln \frac{2l}{r} - 1 \right), \quad (1)$$

де:  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  Гн/м – магнітна стала;  $l$  – довжина провідника, м;  $r$  – радіус провідника, м.

Для прикладу будемо вважати, що ОПН з'єднані відрізками проводу марки АС 120/19 довжиною 2 м. Згідно з [11] діаметр проводу даної марки становить 15,2 мм. Тоді, згідно з (1) в схемі на рис. 2 індуктивності з'єднувальних провідників дорівнюють  $L_1 = L_2 = 2,106$  мкГн.

Для проведення дослідження були оцифровані осцилограми реальних струмів блискавки, наведені в роботі [12], яка є однією з фундаментальних праць з дослідження блискавки негативної і позитивної полярності. Для перетворення растрового зображення осцилограми струму в масив точок було використано програму Web Plo tDigitizer 4 [13], яка у вільному доступі знаходиться на сайті розробника.

На рис. 3 наведено форма струму негативної блискавки з піковим значенням -10 кА.

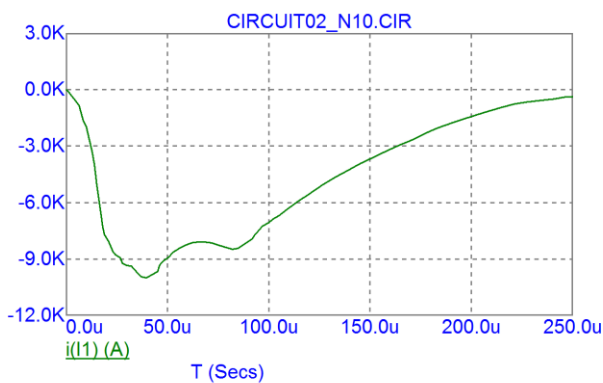


Рисунок 3 – Оцифрований імпульс струму негативної блискавки

На рис. 4 наведено результати розподілення струму негативної блискавки між двома ОПН в залежності від неідентичності одного з них.

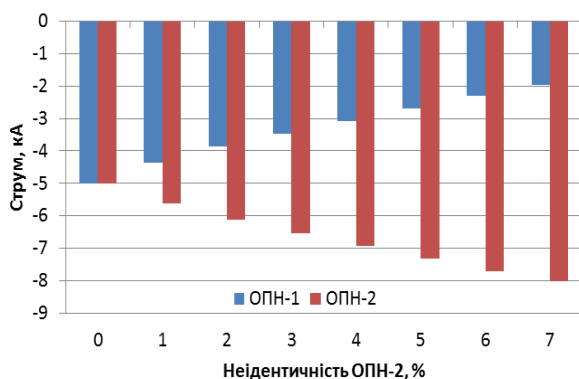


Рисунок 4 – Розподілення струму негативної блискавки між двома ОПН з різними залишковими напругами

Тут і далі під неідентичністю будемо розуміти різницю між залишковими напругами двох ОПН. Наприклад, неідентичність 3% означає, що залишкова напруга другого ОПН на 3% менша від залишкової напруги першого.

На рис. 5 наведено форма струму позитивної блискавки з піковим значенням +10 кА.

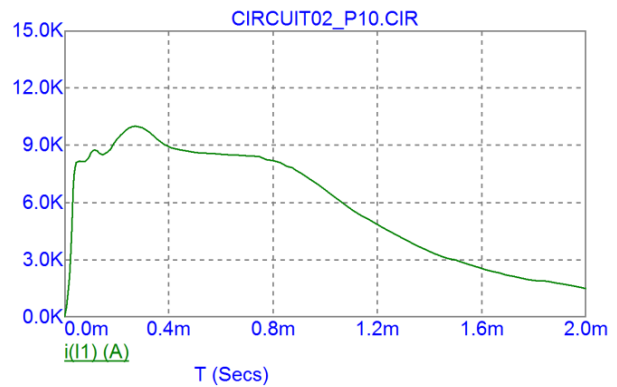


Рисунок 5 – Оцифрований імпульс струму позитивної блискавки

На рис. 6 наведено результати розподілення струму позитивної блискавки між двома ОПН в залежності від неідентичності одного з них.

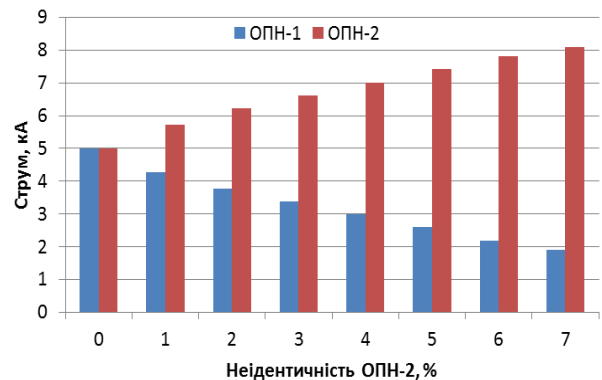


Рисунок 6 – Розподілення струму позитивної блискавки між двома ОПН з різними залишковими напругами

Коли залишкова напруга ОПН однакова, розрядний струм рівномірно розподіляється між двома ОПН зі співвідношенням 1:1. Різниця між залишковими напругами призводить до порушення рівномірного розподілення струму при струмах блискавки як негативної, так і позитивної полярності (згідно з рис. 4 та рис. 6). Зі збільшенням цієї різниці нерівномірність розподілення струму швидко збільшується, при цьому для струму позитивної блискавки цей процес відбувається дещо швидше. Наприклад, у випадку імпульсу струму негативної полярності, розподілення струмів крізь ОПН в пропорції 1:4 відбувається при різниці між залишковими напругами ОПН 6,83%. При позитивній полярності розподілення струмів крізь ОПН з тим самим співвідношенням відбувається при дещо меншому значенні 6,55%. Графіки струмів крізь кожен ОПН, що відповідають останньому випадку при негативній полярності імпульсу наведено на рис. 7.

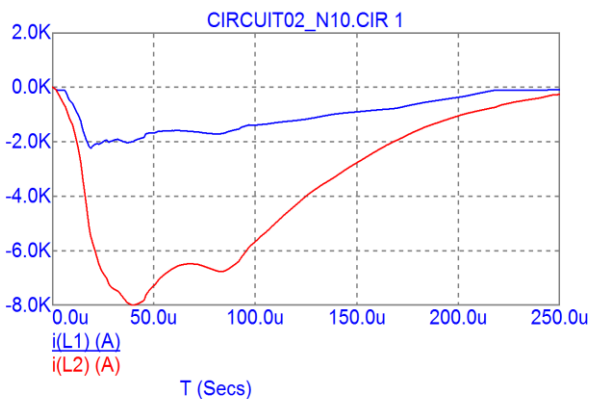


Рисунок 7 – Розподілення струму негативної блискавки між двома ОПН у співвідношенні 1:4

Тут і далі, синій колір відповідає першому ОПН, залишкова напруга якого незмінна, а червоний колір відповідає другому ОПН, залишкова напруга якого варіюється. В свою чергу, аналогічні графіки струмів, що протікають крізь кожен ОПН у випадку позитивної полярності імпульсу наведено на рис. 8.

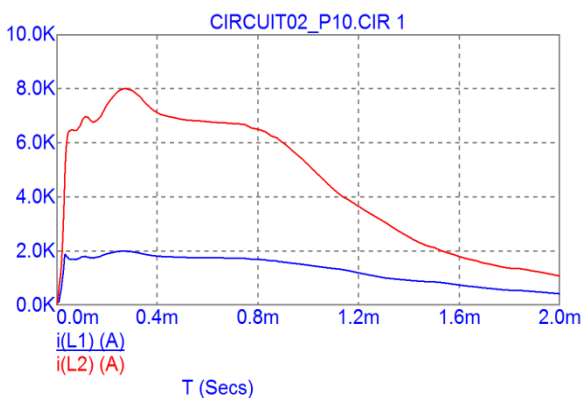


Рисунок 8 – Розподілення струму позитивної блискавки між двома ОПН у співвідношенні 1:4

Як захисний електричний апарат, ОПН має поглинати енергію імпульсу і розсіювати її в навколишній простір у вигляді тепла. Тому важливим питанням є розрахунок енергії, що поглинається в апаратах протягом перехідного процесу. Енергія поглинута в ОПН може бути розрахована за формулою:

$$W(t) = \int_{t_0}^t u(t)i(t)dt, \quad (2)$$

де:  $W(t)$  – енергія (Дж), поглинута ОПН, як функція від часу;  $u(t)$  – залишкова напруга (В), яка виникає між виводами ОПН, як функція від часу;  $i(t)$  – розрядний струм (А), що протікає через ОПН;  $t_0$  – момент часу, в який між виводами ОПН виникає падіння напруги, с;  $t$  – поточний момент часу, с.

Основним призначенням динамічних (частотно-залежних) моделей ОПН від самої їх появи був розрахунок залишкової напруги, яка виникає між виводами ОПН при протіканні крізь нього того або ін-

шого розрядного струму. Електрична схема заміщення ОПН не враховує залежність температури варисторів на основі оксиду цинку від струму, що протікає крізь ОПН. Разом з тим, існує потреба в єдиній схемі, яку можна використовувати як для розрахунку перенапруг, так і енергії. Тому, проводяться дослідження щодо перевірки можливості використання динамічних моделей ОПН для обчислення поглинутої енергії. Наприклад, згідно з [14], при імпульсах струму з відносно пологим фронтом (більше 8 мкс), динамічну модель на рис. 1 можна використовувати для оцінки енергії, яку ОПН поглинає від перехідного процесу в електричній мережі.

На рис. 9 продемонстровано розподілення поглинутої енергії між двома ОПН згідно з формулою (2) в залежності від не ідентичності одного з них при струмі негативної блискавки.

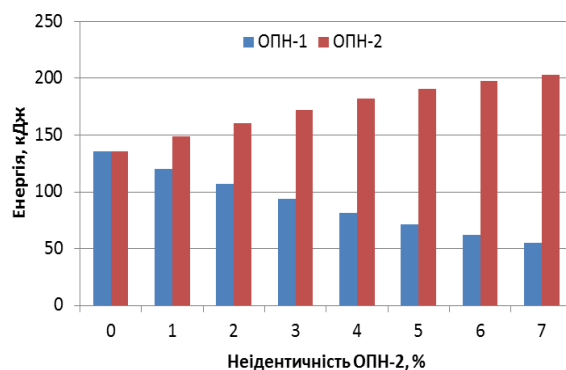


Рисунок 9 – Оцінка розподілення поглинутої енергії між двома ОПН з різними залишковими напругами при струмі негативної блискавки

В свою чергу, аналогічне розподілення для випадку струму позитивної блискавки показано на рис. 10.

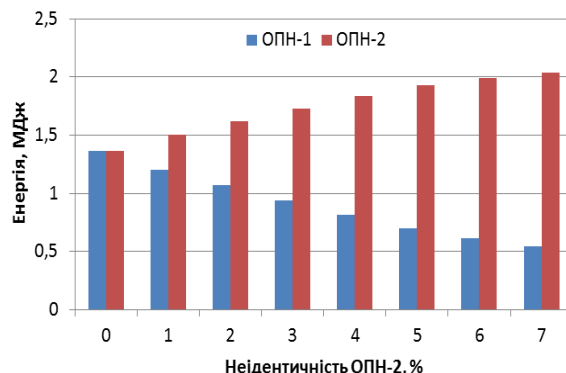


Рисунок 10 – Оцінка розподілення поглинутої енергії між двома ОПН з різними залишковими напругами при струмі позитивної блискавки

Як і у випадку дослідження струмів, зі зростанням не ідентичності залишкових напруг ОПН, порушення рівномірного розподілення поглинутої енергії між двома ОПН швидко збільшується, при цьому для струму позитивної блискавки цей процес

відбувається дещо швидше. Основна відмінність полягає в кількості енергії, яку мають погинути ОПН при ударі негативної та позитивної блискавки.

Розподілення енергій, що відповідає струмам, зображеним на рис. 7, наведено на рис. 11.

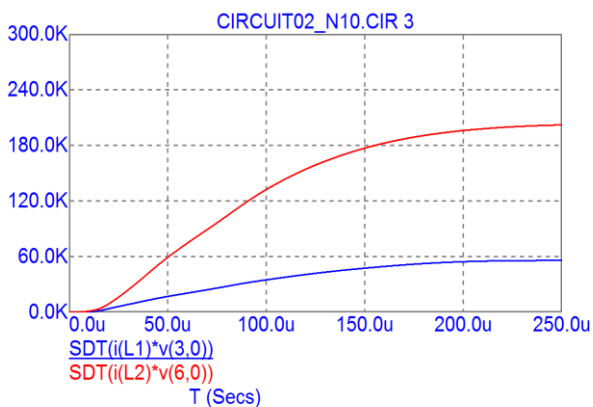


Рисунок 11 – Приклад оцінки поглинутої енергії двома ОПН при ударі негативної блискавки

Згідно з проведеним розрахунком, практично по завершенню зворотного удару негативної блискавки, при різниці між залишковими напругами ОПН 6,83% перший ОПН має поглинути енергію, рівну 56,0 кДж. В свою чергу другий ОПН має поглинути енергію, рівну 202,0 кДж, що є в 3,6 рази більше.

Розподілення енергій, що відповідає струмам, зображеним на рис. 8, наведено на рис. 12.

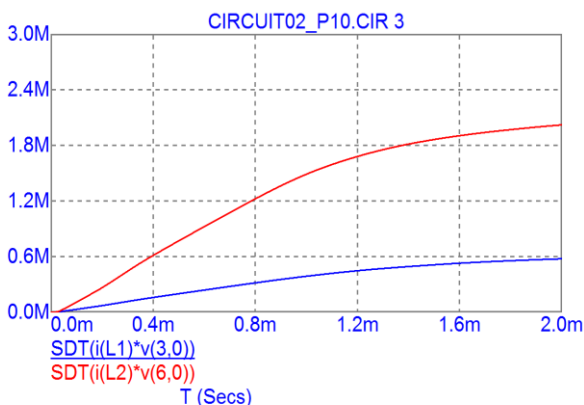


Рисунок 12 – Приклад оцінки поглинутої енергії двома ОПН при ударі позитивної блискавки

Згідно з отриманими результатами, фактично по завершенню зворотного удару позитивної блискавки, при різниці між залишковими напругами ОПН 6,55% перший ОПН має поглинути енергію, рівну 575,86 кДж. В свою чергу другий ОПН має поглинути енергію, рівну 2,02 МДж, що є в 3,5 рази більше.

Можна сказати, що при неідентичності двох ОПН, яка призводить до нерівномірного розподілення струмів між ОПН у співвідношенні 1:4 незалежно від полярності імпульсу струму, один з ОПН має поглинути енергію приблизно в 3,5 рази більше ніж інший. Значення енергій відрізняються одне від одного з дещо меншим коефіцієнтом ніж значення

струмів, тому що залишкова напруга ОПН зменшується зі зростанням неідентичності. При цьому, за однакової амплітуди струмів блискавки, при ураженні позитивною блискавкою ОПН має поглинути енергію в 10 разів більшу, ніж при ураженні негативною блискавкою. Таким чином, невелика різниця в залишкових напругах більш небезпечна у випадку позитивних блискавок. Для дослідження було використано динамічну модель ОПН, високу точність якої неодноразово підтверджено в різних роботах [15, 16].

**ВИСНОВКИ.** Продовжено дослідження впливу на ОПН струмів блискавки різної полярності, який базується на використанні в програмах схемотехнічного моделювання оцифрованих осцилограм струмів реальних блискавок. Підхід враховує відмінності між імпульсами струмів блискавки різної полярності, чого не можна досягти при використанні апроксимації струмів блискавки спрощеними математичними виразами. Даний підхід є актуальним, оскільки позитивна блискавка є більш рідкісним явищем, тому її вплив вивчено менше, ніж вплив негативної блискавки.

Запропонований підхід було використано для дослідження моделей двох типових ОПН, призначених для паралельної роботи у високовольтній мережі класу напруги 110 кВ. Цілеспрямоване паралельне з'єднання ОПН це ефективне рішення для збільшення енергоємності або ж зниження залишкової напруги для більш глибокого обмеження перенапруг. При такому з'єднанні необхідно щоб залишкові напруги ОПН були ідентичні. При такому включенні потрібно, щоб струми, і, отже, енергія, що протікають через обмежники, були рівні, що можливо при рівності їх енергоємностей і ідентичності вольт-амперних характеристик. Аналіз результатів дослідження показав, що в протилежному випадку, навіть при різниці між залишковими напругами ОПН в декілька відсотків, струми, що протікають крізь ОПН, а, отже і енергії будуть розподілені між ОПН різко нерівномірно. В такому випадку при перенапругах ОПН можуть вийти з ладу.

Оскільки тривалість імпульсу струму позитивної блискавки суттєво більша ніж у негативної блискавки, вони представляють більшу небезпеку. Для тих осцилограм струмів, що були використані в даній роботі було встановлено, що за однакової амплітуди струмів блискавки, при ураженні позитивною блискавкою ОПН має поглинути енергію в 10 разів більшу, ніж при ураженні негативною блискавкою. Очевидно, що у випадку ураження позитивною блискавкою порушення рівномірного розподілення струмів між ОПН потенційно є більш небезпечним. Тому вибір ОПН мають здійснювати фахівці в цій області, а покупець повинен проінформувати виробника про намір використовувати ОПН у паралельному з'єднанні.

Подальший розвиток запропонованого підходу вбачається в використанні його як при виборі ОПН для захисту електроустановок високовольтних електричних мереж, так і в навчальному процесі.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Sugimoto H., Asakawa A., Yokoyama S., Nakada K. Effectiveness of installing two pairs of distribution surge arresters in parallel. 1999 Eleventh

*international symposium on high voltage engineering*. 1999. Vol. 2. P. 246-249. doi: 10.1049/cp:19990640

2. Christodoulou C. A., Vita V., Maris T. I. Lightning protection of distribution substations by using metal oxide gapless surge arresters connected in parallel. *International journal of power and energy research*. 2017. Vol. 1, No. 1. P. 1-7. doi: 10.22606/IJPER.2017.11001

3. ABB Switzerland Ltd. Overvoltage protection. Metal-oxide surge arresters in medium-voltage systems. *Application guidelines*. 2018. ID: 1HC0075561.

4. Trotsenko Y., Brzhezitsky V., Mykhailenko V. Estimation of discharge current sharing between surge arresters with different protective characteristics connected in parallel. *2020 IEEE 7th International conference on energy smart systems (ESS)*. 2020. P. 73-78. doi: 10.1109/ESS50319.2020.9160296

5. Heidler F., Zischank W., Flisowski Z., Bouquegneau C., Mazzetti C. Parameters of lightning current given in IEC 62305–Background, experience and outlook. *Proceedings of 29th International conference on lightning protection (ICLP)*. 2008. Vol. 23. P. 1-22.

6. Rakov V. A. Lightning parameters for engineering applications (keynote speech). *2010 Asia-Pacific international symposium on electromagnetic compatibility*, 2010, P. 1120-1123. doi: 10.1109/APEMC.2010.5475697

7. IEEE Working Group 3.4.11. Modeling of metal oxide surge arresters. *IEEE Transactions on power delivery*. 1992. Vol. 7, No. 1. P. 302-309. doi:10.1109/61.108922

8. Spectrum Software. *Micro-Cap 12. Electronic circuit analysis program. Reference manual*. Sunnyvale, CA. 2018. P. 1-1098. [Електронний ресурс]: <http://www.spectrum-soft.com/download/rm12.pdf>

9. Trotsenko Y., Brzhezitsky V., Masluchenko I.

Study of surge arrester model under influence of various current pulses. *Technology audit and production reserves*. 2017. Vol. 1, No. 1 (33). P. 44-48. doi: 10.15587/2312-8372.2017.92244

10. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. *Расчёт индуктивностей: Справочная книга*. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986, 488 с.

11. Макаров Е. Ф. *Справочник по электрическим сетям 0,4-35 кВ и 110-1150 кВ*. Под редакцией И. Т. Горюнова, А. А. Любимова. – М.: Папирус Про, 2003, 640 с.

12. Berger K., Novel observations on lightning discharges: Results of research on Mount San Salvatore. *Journal of the Franklin Institute*. 1967. Vol. 283, No. 6. P. 478-525.

13. Rohatgi A. WebPlotDigitizer. Version 4.4. November, 2020. Pacifica, California, USA. [Електронний ресурс]: <https://automeris.io/WebPlotDigitizer>

14. He Y., Fu Z., Chen J. Experimental validation of MOA simulation models for energy absorption estimation under different impulse currents. *2016 IEEE power and energy society general meeting (PESGM)*, 2016. P. 1-5. doi: 10.1109/PESGM.2016.7741791

15. Meister A., Shayani R. A., Oliveira M. A. G. Comparison of metal oxide surge arrester models in overvoltage studies. *International journal of engineering, science and technology*. 2011. Vol. 3, No. 11. P. 35-45. doi:10.4314/ijest.v3i11.4s

16. Vita V., Mitropoulou A. D., Ekonomou L., Panetsos S., Stathopoulos I. A. Comparison of metal-oxide surge arresters circuit models and implementation on high-voltage transmission lines of the Hellenic network. *IET Generation, transmission & distribution*. 2010. Vol. 4, No. 7. P. 846-853. doi:10.1049/iet-gtd.2009.0424

## EFFECT OF LIGHTNING CURRENTS OF NEGATIVE AND POSITIVE POLARITY ON SURGE ARRESTERS IN PARALLEL CONNECTION

Y. Trotsenko, V. Brzhezitsky, O. Yandulskyy, A. Nesterko

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

ORCID: 0000-0001-9379-0061; 0000-0002-9768-7544; 0000-0002-0362-7947; 0000-0001-7488-4214

M. Dixit

Vishwaniketan Institute of Management Entrepreneurship and Engineering Technology

ORCID: 0000-0003-1959-7815

**Purpose.** Studying the effect of non-identical protective characteristics of surge arresters on the efficiency of several arresters in parallel connection. **Methodology.** Free software for circuit simulation was used to solve electrical circuits with nonlinear parameters. To simulate the effect closest to real conditions, oscillograms of real lightning currents, digitized using free specialized software, were used. **Results.** The study of the parallel connection of two typical surge arresters designed for high-voltage networks of voltage class 110 kV was performed. To analyze the effect of non-identical protective characteristics, the residual voltage of one of the arrester was varied as a percentage of the residual voltage of the other one. It was found that when the difference between the residual voltages of the surge arresters exceeds 6%, the current distribution through the surge arresters can reach a ratio of 1:4. Deliberate parallel connection of surge arresters is an effective solution to increase energy handling capability, provided that the residual voltages of the surge arresters are as close as possible. It was shown that a small difference in residual voltages is more dangerous in the case of positive lightning, which is characterized by a longer current impulse duration than negative lightning. It was shown that at the same amplitude of lightning currents, at struck by a positive lightning the surge arrester should absorb energy 10 times more, than at struck by a negative lightning. **Originality.** The approach takes into account the differences between impulses of lightning currents of negative and positive polarity, which cannot be achieved when using the approximation of lightning currents by simplified mathematical expressions. **Practical value.** The use of the proposed approach allows a more in-depth analyzing the various schemes of protection of electrical networks against overvoltages, because it takes into account the actual features of the lightning current curve. **Conclusions.** Further de-

velopment of the proposed approach is seen in its use both in the selection of surge arresters to protect electrical equipment of high-voltage electrical networks, and in the educational process.

**Key words:** surge arrester, parallel connection, residual voltage, absorbed energy, lightning current.

## REFERENCES

1. Sugimoto H., Asakawa A., Yokoyama S., Nakada K. (1999), "Effectiveness of installing two pairs of distribution surge arresters in parallel". *1999 Eleventh international symposium on high voltage engineering*, Vol. 2, pp. 246-249. doi: 10.1049/cp:19990640
2. Christodoulou C. A., Vita V., Maris T. I. (2017), "Lightning protection of distribution substations by using metal oxide gapless surge arresters connected in parallel". *International journal of power and energy research*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-7. doi: 10.22606/IJPER.2017.11001
3. ABB Switzerland Ltd. (2018), "Overvoltage protection. Metal-oxide surge arresters in medium-voltage systems", *Application guidelines*, ID: 1HC0075561.
4. Trotsenko Y., Brzhezitsky V., Mykhailenko V. (2020), "Estimation of discharge current sharing between surge arresters with different protective characteristics connected in parallel. *2020 IEEE 7th International conference on energy smart systems (ESS)*, pp. 73-78. doi: 10.1109/ESS50319.2020.9160296
5. Heidler, F., Zischank, W., Flisowski, Z., Bouquegneau, C., Mazzetti, C. (2008), "Parameters of lightning current given in IEC 62305–Background, experience and outlook". *Proceedings of 29th International conference on lightning protection (ICLP)*, Vol. 23, pp. 1-22.
6. Rakov, V. A. (2010), "Lightning parameters for engineering applications (keynote speech)", *2010 Asia-Pacific international symposium on electromagnetic compatibility*, pp. 1120-1123. doi: 10.1109/APEMC.2010.5475697
7. IEEE Working Group 3.4.11. (1992), "Modeling of metal oxide surge arresters", *IEEE Transactions on power delivery*, Vol. 7, No. 1, pp. 302-309. doi:10.1109/61.108922
8. Spectrum Software. (2018), *Micro-Cap 12. Electronic circuit analysis program. Reference manual*. Sunnyvale, CA. pp. 1-1098. [Available]: <http://www.spectrum-soft.com/download/rm12.pdf>
9. Trotsenko, Y., Brzhezitsky, V., Masluchenko, I. (2017), "Study of surge arrester model under influence of various current pulses", *Technology audit and production reserves*, Vol. 1, No. 1 (33), pp. 44-48. doi: 10.15587/2312-8372.2017.92244
10. Kalantarov P. L., Tseytlin L. A. (1986), *Calculation of inductances: Reference book*. 3rd edition, revised and enlarged. L.: Energoatomizdat. Leningrad. department, 488 p.
11. Makarov E. F. (2003), *Handbook on electrical networks of 0.4-35 kV and 110-1150 kV*. Edited by I. T. Goryunov, A. A. Lyubimov. M.: Papyrus Pro, 640 p.
12. Berger, K. (1967), "Novel observations on lightning discharges: Results of research on Mount San Salvatore", *Journal of the Franklin Institute*, Vol. 283, No. 6, pp. 478-525.
13. Rohatgi, A. (2020), WebPlotDigitizer. Version 4.4. November, 2020. Pacifica, California, USA. [Available]: <https://automeris.io/WebPlotDigitizer>
14. He, Y., Fu, Z., Chen, J. (2016), "Experimental validation of MOA simulation models for energy absorption estimation under different impulse currents", *2016 IEEE Power and energy society general meeting (PESGM)*, pp. 1-5. doi: 10.1109/PESGM.2016.7741791
15. Meister, A., Shayani, R. A., Oliveira, M. A. G. (2011), "Comparison of metal oxide surge arrester models in overvoltage studies", *International journal of engineering, science and technology*, Vol. 3, No. 11, pp. 35-45. doi:10.4314/ijest.v3i11.4s
16. Vita, V., Mitropoulou, A. D., Ekonomou, L., Panetos, S., Stathopoulos, I. A. (2010), "Comparison of metal-oxide surge arresters circuit models and implementation on high-voltage transmission lines of the Hellenic network", *IET Generation, transmission & distribution*, Vol. 4, No. 7, pp. 846-853. doi:10.1049/iet-gtd.2009.0424

Стаття надійшла 02.07.2021.