

**ВПЛИВ НА НЕЛІНІЙНИЙ ОБМЕЖУВАЧ ПЕРЕНАПРУГ СТРУМІВ БЛИСКАВКИ НЕГАТИВНОЇ ТА ПОЗИТИВНОЇ ПОЛЯРНOSTІ****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**

Отримано подальший розвиток дослідження моделей нелінійних обмежувачів перенапруг з використанням осцилограм реальних струмів блискавок та врахуванням полярності блискавки. Використано методи схемотехнічного моделювання режимів електричних схем, вільне програмне забезпечення для оцифрування растрового графічного зображення осцилограм струму блискавки та перетворення його в масив точок. Проведено дослідження моделі типового нелінійного обмежувача з номінальним розрядним струмом 10 кА, призначеного для використання в мережах класу напруги 10 кВ. Для моделювання нелінійного обмежувача перенапруг було використано відому динамічну (частотно-залежну) модель, запропоновану робочою групою IEEE. Було оцифровано осцилограми струмів реальних блискавок негативної та позитивної полярності, які були зареєстровані на спеціальних вежах. Використовуючи вільну програму схемотехнічного моделювання визначено залишкову напругу на виводах нелінійного обмежувача перенапруг та проведено оцінку енергії, яку має поглинути нелінійний обмежувач перенапруг у випадку протікання крізь нього струмів блискавки різної форми та полярності, але однакової амплітуди 10 кА. Було встановлено, що позитивні розряди блискавки потенційно становлять більшу небезпеку, ніж негативні розряди блискавки. Було показано, що до моменту припинення струму позитивної блискавки, нелінійний обмежувач перенапруг має поглинути енергію більше ніж в 10 разів вищу ніж до моменту припинення струму негативної блискавки такої ж амплітуди. Підхід враховує відмінності між імпульсами струмів блискавки негативної та позитивної полярності, чого не можна досягти при використанні апроксимації струмів блискавки спрощеними виразами. Використання запропонованого підходу дозволяє підвищити точність та наочність досліджень, оскільки він враховує фактичні особливості кривої струму блискавки. Подальший розвиток запропонованого підходу вбачається в використанні його в задачах удосконалення блискавкозахисту повітряних ліній електропередачі та захисту високовольтної ізоляції електрообладнання підстанцій від грозових перенапруг.

**Ключові слова:** нелінійний обмежувач перенапруг, залишкова напруга, поглинута енергія, струм блискавки.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** На даний час обмежувачі перенапруг нелінійні (ОПН), які зараз частіше називають нелінійними обмежувачами перенапруг, стали основним засобом для обмеження грозових перенапруг в електричних мережах, замінивши собою застарілі вентиляльні розрядники. Завдяки різко нелінійній вольт-амперній характеристиці (ВАХ) варисторів на основі оксиду цинку, застосування ОПН дозволило досягти більш глибокого обмеження перенапруг у порівнянні з вентиляльними розрядниками на основі карбїду кремнію.

Максимальне значення напруги на ОПН при протіканні через нього імпульсного струму з певною амплітудою і формою імпульсу називається залишковою напругою ОПН і є однією з головних його характеристик. Але ОПН має не просто нелінійну, а динамічну нелінійну ВАХ. Це означає, що його ВАХ залежить, крім іншого, від тривалості фронту імпульсу розрядного струму. Тому для двох розрядних імпульсів однакової амплітуди, але різної форми (наприклад, стандартного грозового імпульсу струму формою 8/20 мкс та імпульсу струму з крутим фронтом формою 1/20 мкс) залишкова напруга ОПН буде різною.

Розробка динамічної моделі ОПН, яка враховує частотно-залежні властивості його ВАХ була завершена тільки на початку 1990-х [1]. Згодом було розроблено ще декілька динамічних моделей ОПН [2, 3], які є різними варіантами спрощення моделі, яка була запропонована в [1]. Дослідження динамічних

моделей ОПН були проведені в різних публікаціях [4–6], де була підтверджена їх висока точність. Однак, до сих пір, в більшості таких робіт при дослідженні моделей ОПН струм блискавки представлений або стандартизованими імпульсами (8/20 мкс, 30/60 мкс, 2/50 мкс, 10/350 мкс та інші) або різними спрощеними виразами, які представляють собою різні комбінації експоненціальних функцій. Однак, результати вимірювань струмів блискавок в різні роки, як на різних вежах [7, 8], так і в електричних мережах [9, 10] свідчать, що форма струмів реальних блискавок істотно відрізняється від тієї форми, яку їм приписують і апроксимують відносно простими експоненціальними виразами. Крім того, форма імпульсів струмів блискавки негативної та позитивної полярності суттєво відрізняються одна від одної [7]. Неврахування особливостей реальних струмів блискавки, може призвести до перегріву варисторів і виходу ОПН з ладу.

Таким чином, виникає необхідність використання осцилограм реальних струмів блискавок для дослідження динамічних моделей ОПН. Схожі дослідження, що були проведені в [11] показали, що індуктивне падіння напруги в з'єднувальному провіднику ОПН у випадку використання осцилограми реального струму блискавки істотно відрізняється від результатів зі стандартизованими формами струму блискавки. Для поглибленого аналізу механізму впливу струмів блискавки на об'єкти енерге-

тики та удосконалення засобів захисту від блискавки необхідно розвивати подібні дослідження.

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

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Як правило, ОПН використовується як одиничний пристрій, який приєднують паралельно електрообладнанню (трансформатор, автоматичний вимикачі і т.д.), ізоляцію якого необхідно захистити від небезпечного перевищення напруги. Також можна встановлювати декілька ОПН паралельно [12]. ОПН це захисний пристрій, однак, в особливо важких умовах він сам може вийти з ладу. У випадку, якщо через ОПН протікає надмірно великий струм, енергія яка виділяється в ОПН перевищує його енергоємність, він пошкоджується, перестає виконувати свої захисні функції і має бути замінений новим захисним апаратом.

Виконати оцінку впливу струмів блискавки різної форми на ОПН можна за допомогою динамічних (частотно-залежних) моделей. На даний час найбільш широко застосовуваною залишається модель, запропонована в [1]. Ця модель також увійшла до стандарту [13] і рекомендована для застосування при дослідженні грозових перенапруг. Дана модель зображена на рис. 1.

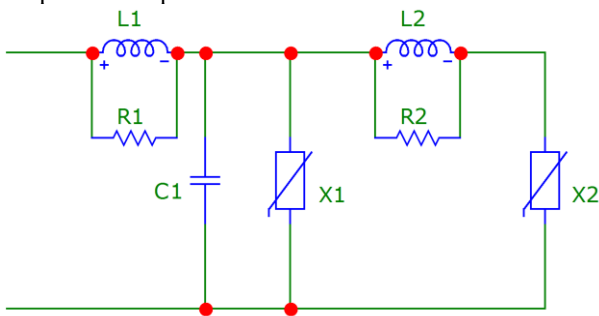


Рисунок 1 – Частотно-залежна модель ОПН

Процедура розрахунку параметрів моделі наведена в [1]. Сильною стороною цієї моделі ОПН є те, що всі електричні параметри схеми можна обчислити знаючи тільки ті характеристики ОПН, які фірми-виробники вказують в каталогах своєї продукції.

Значення  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $L_1$ ,  $L_2$  і  $C_1$  в моделі на рис. 1 залежать від висоти ОПН. ВАХ нелінійних резисторів  $X_1$  і  $X_2$  представлені узагальненими наборами пар точок (напруга, струм). При моделюванні ОПН в програмах схемотехнічного моделювання, ВАХ цих нелінійних резисторів апроксимуються кусково-лінійними функціями, які проходять через задані точки. При моделюванні певного ОПН потрібно помножити ці кусково-лінійні функції на значення залишкової напруги даного ОПН при грозовому імпульсі струму амплітудою 10 кА та формою 8/20 мкс з каталогу фірми-виробника. Таким чином, ця схема дозволяє провести моделювання будь-якого ОПН.

Для моделювання ОПН було використано програму для аналогового і цифрового моделювання електричних та електронних схем Micro-Cap 12 [14],

яка у вільному доступі знаходиться на сайті розробника. В роботі [15] було показано, що при моделюванні ОПН в цій програмі, нелінійні резистори в схемі заміщення ОПН зручно моделювати за допомогою джерела струму, керованого напругою (рис. 2) або за допомогою джерела напруги, керованого струмом (рис. 3).

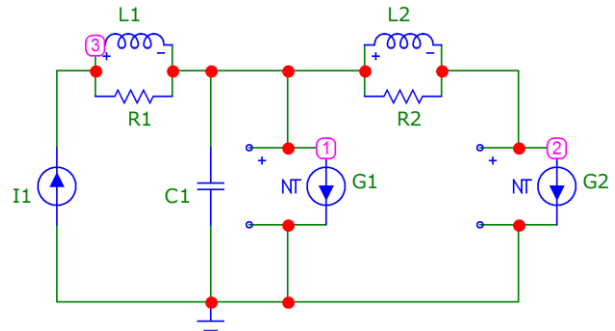


Рисунок 2 – В моделі ОПН нелінійні резистори представлені джерелами струму (NTofV), керованими напругою

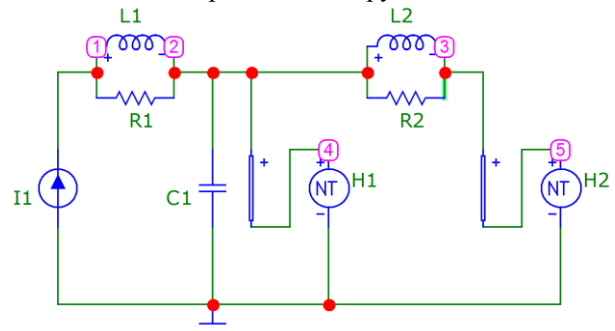


Рисунок 3 – В моделі ОПН нелінійні резистори представлені джерелами напруги (NTVofI), керованими струмом

Обидва способи дають однаковий результат (однаковий розрядний струм, що протікає через ОПН, однакова залишкова напруга між виводами ОПН). Такий підхід зручний, коли ВАХ нелінійного елемента задається у вигляді набору точок. У даній роботі обрано підхід, який використовує джерела струму, керовані напругою (рис. 2). Схеми на рис. 2 і рис. 3 призначені для визначення залишкової напруги на виводах ОПН, при протіканні крізь нього розрядного струму, для моделювання якого використовується джерело струму  $I_1$ .

Дослідження полягає в моделюванні типового ОПН, призначеного для мережі класу напруги 10 кВ. Метою даної статті не є аналіз властивостей ОПН якогось конкретного виробника. Обраний ОПН має типові характеристики для свого класу напруги. Крім того, більшість ОПН різних виробників мають хоча й різні, але в цілому, близькі захисні характеристики. З цих причин, для виключення можливих непорозумінь автори не вказують країну і фірму-виробника ОПН.

Значення всіх параметрів моделі на рис. 2 були розраховані відповідно до методики [1]. За результатами розрахунків було отримано наступні значення параметрів схеми заміщення:  $R_1 = 12,5$  Ом;  $R_2 = 8,125$  Ом;  $L_1 = 0,025$  мкГн;  $L_2 = 1,875$  мкГн;  $C_1 = 800$  пФ. Моделювання нелінійних елементів  $G_1$

і  $G_2$  в моделі ОПН на рис. 2 було виконано за допомогою моделі джерела струму, керованого напругою (NTofV), відповідно до методики, запропонованої в [15]. Результати тестування моделі ОПН при стандартизованій хвилі струму 10кА, 8/20 мкс показано на рис. 4 і рис. 5.

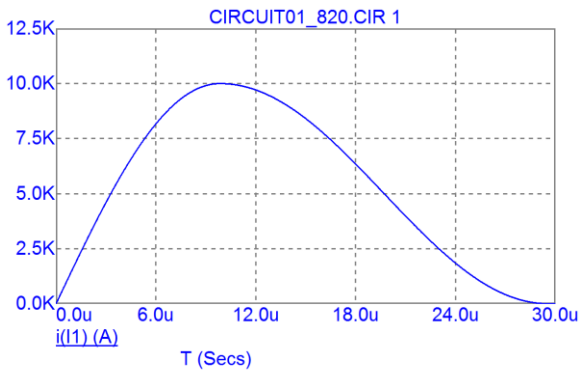


Рисунок 4 – Стандартизований імпульс струму 10 кА, 8/20 мкс

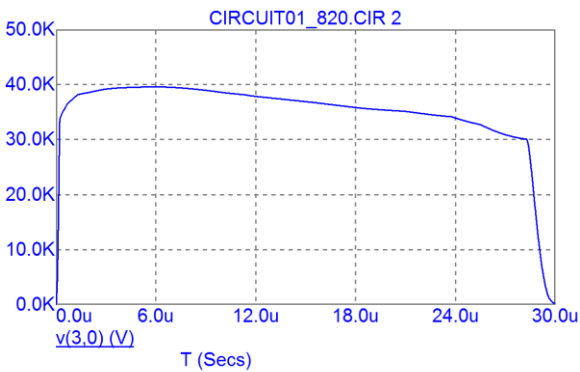


Рисунок 5 – Залишкова напруга на ОПН при протіканні через нього стандартизованого імпульсу струму 10 кА, 8/20 мкс

Тут і далі наведено скріншоти вікон програми Мікро-Сар, відповідно, з позначеннями, що використовуються в цій програмі. Зокрема, літера "К" означає приставку "кіло", літера "u" означає приставку "мікро", літера "m" означає приставку "мілі".

Згідно з рис. 5 максимальне значення залишкової напруги на ОПН становить 39,574 кВ, що практично співпадає з паспортним значенням 39,6 кВ, вказаним у каталозі виробника.

Важливим питанням є визначення енергії, яка поглинається ОПН. Від самого початку, динамічні моделі ОПН розробляли для розрахунку залишкової напруги, яка виникає між виводами захисного апарата. З цієї причини динамічні моделі не враховують температурну залежність матеріалу варисторів, і тому ВАХ таких моделей не залежить від температури. Однак, існують лабораторні дослідження [16] щодо перевірки можливості використання динамічних моделей ОПН для обчислення поглинутої енергії. Згідно з цими дослідженнями, за результатами експерименту та моделювання, стверджується, що динамічні моделі ОПН не можна використовувати для визначення енергії, яка поглинається ОПН при імпульсах струму з крутим фронтом (похибка до –

60% при струмі з фронтом 1 мкс), але можливо при імпульсах з більш пологим фронтом (похибка до  $\pm 5\%$  при струмах з фронтом 8 мкс або 30 мкс). У зв'язку з цим модель на рис. 2 можна використати для оцінки енергії, яка поглинається ОПН при протіканні крізь нього імпульсу струму на рис. 4. Результати визначення енергії, яка поглинається ОПН, що розглядається в даній роботі, показано на рис 6.

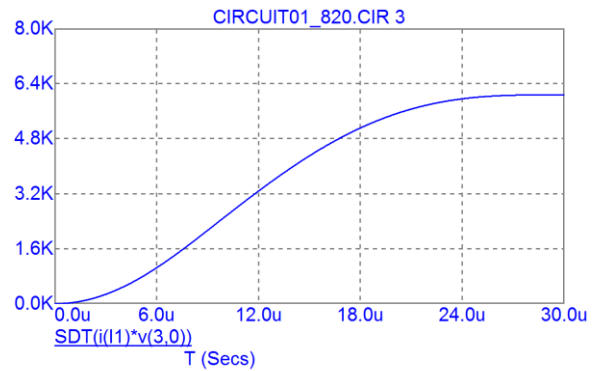


Рисунок 6 – Оцінка енергії, поглинутої ОПН при протіканні через нього стандартизованого імпульсу струму 10 кА, 8/20 мкс

Згідно з графіком на рис. 6 енергія, поглинута ОПН становить 6,072 кДж. Тут і далі значення енергії було визначено за допомогою вбудованої функції SDT програми схемотехнічного моделювання Мікро-Сар 12 [14]. Ця вбудована функція призначена для розрахунку інтегралу від часу і дозволяє обчислити аналітичну функцію:

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

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.

Для оцінки впливу струмів блискавки на ОПН були оцифровані осцилограми реальних струмів блискавки, наведені в роботі [7]. Для перетворення растрового зображення осцилограми струму в масив точок було використано програму WebPlotDigitizer 4 [17], яка у вільному доступі знаходиться на сайті розробника. При цьому було збережено форму струму, але амплітуду приведено до пікового значення +10 кА для струму позитивної блискавки та до -10 кА для струму негативної блискавки. Це зроблено для рівнозначного порівняння результатів моделювання для струмів блискавки протилежної полярності. Оцифрована осцилограма струму першого негативного зворотного удару блискавки показана на рис. 7.

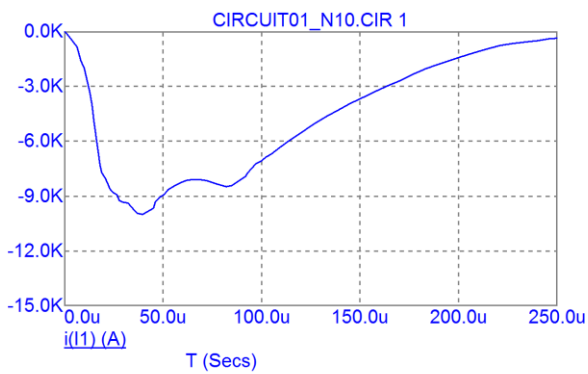


Рисунок 7 – Оцифрований імпульс струму негативної блискавки

Фактично крива на рис. 7 представляє собою кусково-лінійну функцію, в якій сусідні точки з'єднані між собою відрізками прямих. Для дослідження впливу цього струму на ОПН, в схемі на рис. 2 було задано, що джерело струму  $I_1$  змінюється за функціональною залежністю, зображеною на рис. 7. Отриманий графік залишкової напруги, яка виникає на виводах ОПН при протіканні крізь нього такого розрядного струму показано на рис. 8.

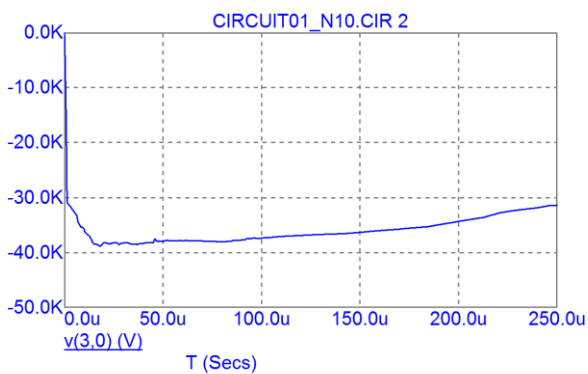


Рисунок 8 – Залишкова напруга на ОПН, при протіканні крізь нього імпульсу струму негативної блискавки

Згідно з рис. 8 пікове значення залишкової напруги на ОПН становить -38,854 кВ. Енергію, яка буде поглинута ОПН, при протіканні крізь нього даного розрядного струму було визначено таким же способом, як і в попередньому випадку. Цей результат показано на рис. 9.

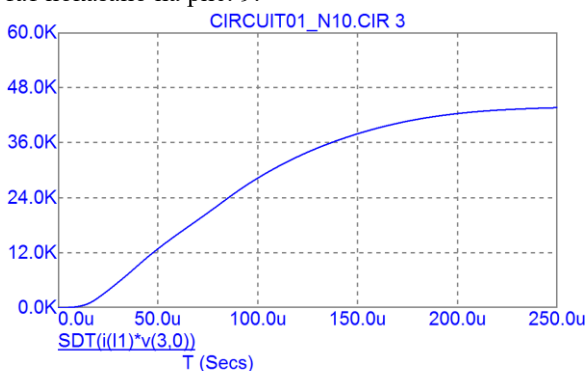


Рисунок 9 – Оцінка енергії, поглинутої ОПН при протіканні через нього імпульсу струму негативної блискавки

Згідно з рис. 9 через 250 мкс після початку протікання через ОПН даного струму негативної блискавки поглинута енергія досягає значення 43,617 кДж.

Подальші дослідження були проведені за тим же самим принципом для струму позитивної блискавки. Оцифрована осцилограма струму першого позитивного зворотного удару блискавки показана на рис. 10.

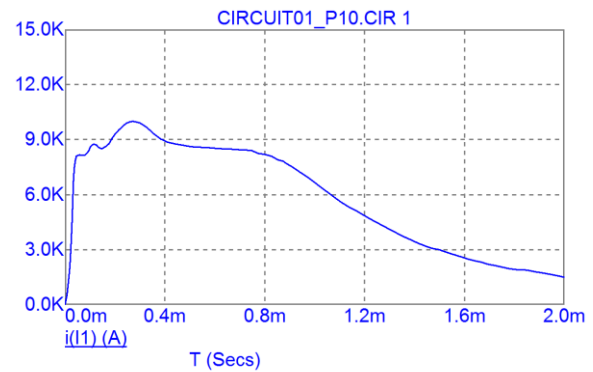


Рисунок 10 – Оцифрований імпульсу струму позитивної блискавки

Отриманий графік залишкової напруги, яка виникає на виводах ОПН при протіканні крізь нього такого розрядного струму показано на рис. 11.

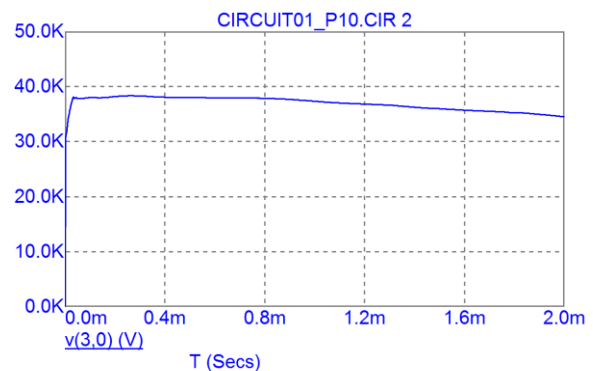


Рисунок 11 – Залишкова напруга на ОПН, при протіканні крізь нього імпульсу струму позитивної блискавки

Згідно з рис. 11 пікове значення залишкової напруги на ОПН становить 38,338 кВ. Енергію, яка буде поглинута ОПН, при протіканні крізь нього даного розрядного струму показано на рис. 12.

Струми позитивних блискавок (як і струм на рис. 10) тривають значно довше ніж струми негативних блискавок.

Графіки на рис. 7 і рис. 10 побудовані на інтервалі часу, коли струм блискавки практично припиняється. В першому випадку цей час становить близько 250 мкс, а в другому близько 2000 мкс.

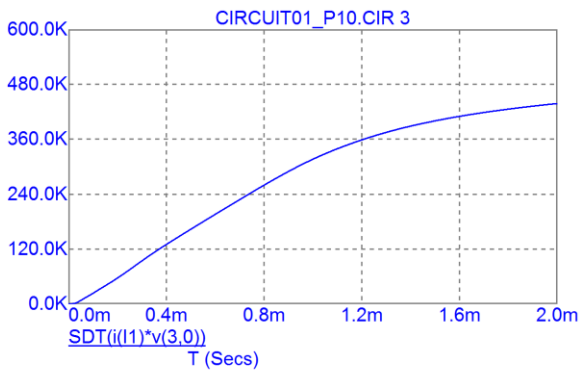


Рисунок 12 – Оцінка енергії, поглинутої ОПН при протіканні через нього імпульсу струму позитивної блискавки

Згідно з рис. 12 через 2000 мкс після початку протікання через ОПН заданого струму позитивної блискавки поглинута енергія може досягти значення 438,017 кДж. Це означає, що до моменту припинення струму позитивної блискавки, ОПН має поглинути енергію більше ніж в 10 разів вищу ніж до моменту припинення струму негативної блискавки такої ж амплітуди. В цьому висока потенційна небезпека позитивних розрядів блискавки.

За знаком заряду на хмарі, який нейтралізується в процесі розряду блискавки їх класифікують як негативні і позитивні. Згідно з результатами вимірювань блискавок на різних вежах, а також за даними систем локації блискавок на позитивні розряди припадає близько 10% від усіх розрядів між хмарами та землею [18]. Оскільки негативні розряди складають переважну кількість серед усіх розрядів блискавок, в літературі та публікаціях увага приділена в основному ним, але позитивні розряди є більш деструктивними та небезпечними, як це показано в даній роботі та інших [18, 19], тому також потребують детального вивчення. Кількість уражень землі, а отже і таких об'єктів енергетики, як наприклад, лінії електропередачі залежить від інтенсивності грозової діяльності в даній місцевості. Для одних і тих же регіонів інтенсивність грозової діяльності може дуже суттєво змінюватися протягом різних сезонів року [20]. Для регіонів з підвищеною грозовою діяльністю небезпека позитивних розрядів блискавки збільшується.

Сучасне програмне забезпечення [14, 17] дозволяє використовувати осцилограми реальних струмів блискавок в задачах захисту ізоляції електрообладнання від перенапруг та блискавки, отримуючи більш деталізовані залежності перехідного процесу. Оскільки предметом дослідження в [16] були лише два типи ОПН, питання використання динамічних моделей ОПН для обчислення енергії, поглинутої ОПН в режимі обмеження перенапруг має бути предметом подальших досліджень.

**ВИСНОВКИ.** Розроблено підхід до визначення впливу на ОПН струмів блискавки негативної та позитивної полярності, який базується на використанні в програмах схемотехнічного моделювання оцифрованих осцилограм струмів реальних блискавок, зареєстрованих на спеціальних вежах. Підхід враховує від-

мінності між імпульсами струмів блискавки негативної та позитивної полярності, чого не можна досягти при використанні апроксимації струмів блискавки спрощеними виразами.

Проведено дослідження моделі типового ОПН з номінальним розрядним струмом 10 кА, призначеного для використання в мережах класу напруги 10 кВ із застосуванням запропонованого підходу. Аналіз результатів дослідження показав, що струми позитивної блискавки потенційно являють більшу небезпеку ніж струми негативної блискавки. До моменту припинення струму позитивної блискавки, ОПН має поглинути енергію більше ніж в 10 разів вищу ніж до моменту припинення струму негативної блискавки такої ж амплітуди. Використання запропонованого підходу дозволяє підвищити точність та наочність досліджень таких характеристик ОПН, як залишкова напруга та поглинута енергія, оскільки враховує фактичні особливості кривої струму блискавки.

Подальший розвиток запропонованого підходу вбачається в використанні його в задачах удосконалення блискавкозахисту повітряних ліній електропередачі та захисту високовольтної ізоляції електрообладнання підстанцій від грозових перенапруг з урахуванням статистичних даних розподілення блискавок негативної та позитивної полярності.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. 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
2. Pinceti P., Giannettoni M. A simplified model for zinc oxide surge arresters. *IEEE Transactions on power delivery*. 1999. Vol. 14, No. 2. P. 393-398. doi:10.1109/61.754079
3. Magro M. C., Giannettoni M., Pinceti P. Validation of ZnO surge arresters model for overvoltage studies. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2004. Vol. 19, No. 4. P. 1692-1695. doi:10.1109/tpwr.2004.832354
4. 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
5. Vita V., Mitropoulou A. D., Ekonomou L., Panetos 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
6. Peppas G. D., Naxakis I. A., Vitsas C. T., Pyrgioti E. C. Surge arresters models for fast transients. *2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. 2012. P. 1-6. doi:10.1109/iclp.2012.6344285
7. 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.
8. Hussein A. M., Janischewskyj W., Milewski M., Shostak V., Rachidi F., Chang J. S. Comparison of cur-



rent characteristics of lightning strokes measured at the CN Tower and at other elevated objects. *2003 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 2003. Vol. 2. P. 495-500. doi: 10.1109/ISEMC.2003.1236651

9. Barker P. P., Mancao R. T., Kvaltine D. J., Parrish D. E. Characteristics of lightning surges measured at metal oxide distribution arresters. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1993. Vol. 8. No. 1. P. 301-310. doi: 10.1109/61.180350

10. Narita T., Yamada T., Mochizuki A., Zaima E., Ishii M. Observation of current waveshapes of lightning strokes on transmission towers. *IEEE Transactions on power delivery*. 2000. Vol. 15. No. 1. P. 429-435. doi: 10.1109/61.847285

11. Trotsenko Y., Brzhezitsky V., Mykhailenko V. Revised effect of inductive voltage drop across line lead on protective level of surge arrester. *2019 IEEE 2nd Ukraine conference on electrical and computer engineering (UKRCON)*. 2019. P. 341-344. doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879939

12. 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*. 2019. Vol. 2. P. 246-249. doi: 10.1049/cp:19990640

13. IEEE Standard C62.22-2009. IEEE Guide for the application of metal-oxide surge arresters for alternating-current systems. 2009. P. 1-142. doi: 10.1109/IEEESTD.2009.6093926

14. 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>

15. 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

16. 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

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

18. 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.

19. 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

20. Yadava P. K., Soni M., Verma S., Kumar H., Sharma A., Payra S. The major lightning regions and associated casualties over India. *Natural hazards*, 2020. Vol. 101. No. 1, P. 217-229. doi: 10.1007/s11069-020-03870-8

## EFFECT OF LIGHTNING CURRENTS OF NEGATIVE AND POSITIVE POLARITY ON SURGE ARRESTER

**Y. Trotsenko, V. Brzhezitsky, O. Yandulsky, 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.** The study of surge arrester models using oscillograms of real lightning currents and taking into account the polarity of lightning has been further developed. **Methodology.** Methods of circuit simulation for electrical scheme modes, free software for digitizing a bitmap graphic image of a lightning current oscillogram and converting it into an array of points are used. **Results.** A studying the model of a typical surge arrester with a nominal discharge current of 10 kA, intended for use in a 10 kV network was carried out. A well-known dynamic (frequency-dependent) model proposed by the IEEE working group was used to simulate the surge arrester. Oscillograms of real lightning currents of negative and positive polarity which were recorded on special towers were digitized. Using a free circuit simulation program, the residual voltage at the terminals of the surge arrester was determined and the energy that the surge arrester should absorb in the event that lightning currents of different waveforms and polarities flow through it, but with the same amplitude of 10 kA. It has been found that positive lightning strikes are potentially more dangerous than negative lightning strikes. It was shown that before the ending of the positive lightning current, the surge arrester have to absorb more than ten times more energy than before the ending of the negative lightning current of the same amplitude. Further development of the proposed approach is seen in its use for the tasks of improving the lightning protection of overhead power lines and protecting the high-voltage insulation of electrical equipment of substations from lightning overvoltage. **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 expressions. **Practical value.** The use of the proposed approach improves the accuracy and visualization of research, since it takes into account the actual features of the lightning current curve. References 20, figures 12.

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

## REFERENCES

1. 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
2. Pinceti, P., Giannettoni, M. (1999), "A simplified model for zinc oxide surge arresters", *IEEE Transactions on power delivery*, Vol. 14, No. 2, pp. 393-398. doi:10.1109/61.754079
3. Magro, M. C., Giannettoni, M., Pinceti, P. (2004), "Validation of ZnO surge arresters model for overvoltage studies", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 19, No. 4, pp. 1692-1695. doi:10.1109/tpwr.2004.832354
4. 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
5. Vita, V., Mitropoulou, A. D., Ekonomou, L., Panetsos, 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
6. Peppas, G. D., Naxakis, I. A., Vitsas, C. T., Pyrgioti, E. C. (2012), "Surge arresters models for fast transients", *2012 International conference on lightning protection (ICLP)*, pp. 1-6. doi:10.1109/iclp.2012.6344285
7. 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.
8. Hussein, A. M., Janischewskyj, W., Milewski, M., Shostak, V., Rachidi, F., Chang, J. S. (2003), "Comparison of current characteristics of lightning strokes measured at the CN Tower and at other elevated objects", *2003 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 2, pp. 495-500. doi:10.1109/ISEMC.2003.1236651
9. Barker, P. P., Mancao, R. T., Kvaltine, D. J., Parrish, D. E. (1993), "Characteristics of lightning surges measured at metal oxide distribution arresters", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, No. 1, pp. 301-310. doi: 10.1109/61.180350
10. Narita, T., Yamada, T., Mochizuki, A., Zaima, E., Ishii, M. (2000), "Observation of current waveshapes of lightning strokes on transmission towers", *IEEE Transactions on power delivery*, Vol. 15, No. 1, pp. 429-435. doi: 10.1109/61.847285
11. Trotsenko, Y., Brzhezitsky, V., Mykhailenko, V. (2019), "Revised effect of inductive voltage drop across line lead on protective level of surge arrester". *2019 IEEE 2nd Ukraine conference on electrical and computer engineering (UKRCON)*, pp. 341-344. doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879939
12. 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
13. IEEE Standard C62.22-2009, "IEEE Guide for the application of metal-oxide surge arresters for alternating-current systems", pp. 1-142. doi: 10.1109/IEEESTD.2009.6093926
14. Spectrum Software. (2018), *Micro-Cap 12. Electronic circuit analysis program. Reference manual*. Sunnyvale, C. A. pp. 1-1098. [Available]: <http://www.spectrum-soft.com/download/rm12.pdf>
15. 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
16. 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
17. Rohatgi, A. (2020), WebPlotDigitizer. Version 4.4. November, 2020. Pacifica, California, USA. [Available]: <https://automeris.io/WebPlotDigitizer>
18. 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.
19. 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
20. Yadava, P. K., Soni, M., Verma, S., Kumar, H., Sharma, A., Payra, S. (2020), "The major lightning regions and associated casualties over India", *Natural hazards*, Vol. 101, No. 1, pp. 217-229. doi: 10.1007/s11069-020-03870-8

Стаття надійшла 20.05.2021.