

ОЦІНКА ПАДІННЯ НАПРУГИ В ІНДУКТИВНОМУ ОПОРІ З'ЄДНУВАЛЬНИХ ПРОВІДІВ НЕЛІНІЙНИХ ОБМЕЖУВАЧІВ ПЕРЕНАПРУГ**Є. О. Троценко, А. Б. Нестерко, В. В. Чижевський**

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

ORCID: 0000-0001-9379-0061; 0000-0001-7488-4214; 0000-0002-1224-1798**М. М. Діксіт**

Інститут управління підприємництвом та інженерних технологій Вішванікетана

ORCID: 0000-0003-1959-7815

Наведено результати дослідження падіння напруги в індуктивному опорі з'єднувальних проводів нелінійних обмежувачів перенапруг, встановлених на відкритих розподільних установках. З метою розрахунку електричних кіл з нелінійними параметрами використано вільне програмне забезпечення для схемо-технічного моделювання. З метою врахування відмінностей імпульсів струму негативної та позитивної блискавки із застосуванням вільного спеціалізованого програмного забезпечення оцифровано та досліджено осцилограми реальних струмів блискавки. Тривалість фронту імпульсу (як і загальна тривалість імпульсу) позитивної блискавки суттєво перевищує відповідні параметри струму негативної блискавки, тому заряд, який переносить позитивна блискавка, суттєво перевищує заряд, який переноситься негативною блискавкою. З цих причин, позитивні блискавки представляють більшу небезпеку, ніж негативні блискавки, хоча і відбуваються набагато рідше за них. В роботі встановлено, що через більш пологий фронт імпульсу, падіння напруги в індуктивному опорі з'єднувальних проводів нелінійних обмежувачів перенапруг у випадку позитивних блискавок у 8-11 разів менші, ніж у випадку негативних блискавок. Аналітичні формули для обчислення індуктивності з'єднувальних проводів, які враховують геометричні розміри проводів, забезпечують більш точні результати, ніж наведене в літературних джерелах усереднене значення індуктивності 1,3 мкГн/м. Запропонований підхід враховує відмінності між імпульсами струмів блискавки негативної та позитивної полярності, чого не можна досягти за використання апроксимації струмів блискавки спрощеними математичними виразами. Встановлено, що падіння напруги в індуктивному опорі будуть більш небезпечними за умови великої довжини проводів та імпульсах струму негативної блискавки з крутим фронтом. Подальший розвиток запропонованого підходу вбачається в використанні його для аналізу схем захисту електроустаткування високовольтних електричних мереж від грозових перенапруг за допомогою нелінійних обмежувачів перенапруг.

Ключові слова: нелінійний обмежувач перенапруг, з'єднувальний провід, падіння напруги в індуктивному опорі, струм блискавки.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Метал-оксидні варистори сьогодні застосовують в пристроях для обмеження перенапруг в широкому діапазоні пристроїв – від мікроелектроніки до електро-енергетичних систем. В конструкції нелінійних обмежувачів перенапруг (ОПН) застосовують варистори, що виготовлені на основі оксиду цинку. Захисна дія ОПН базується на різко нелінійній вольт-амперній характеристиці (ВАХ) варисторів, завдяки чому за робочої напруги ОПН майже не пропускає струм (крізь ОПН протікає лише незначний ємнісний струм витіку), що дає змогу приєднувати ОПН безпосередньо до електричної мережі паралельно високовольтному електро-устаткуванню, яке необхідно захистити. За відхилень рівнів напруги від значень нормального робочого режиму (зокрема, за грозових або комутаційних перенапруг) ОПН починає пропускати струм, який зростає відповідно до вольт-амперної характеристики варисторів, в результаті чого весь небезпечний розрядний струм протікає крізь ОПН, захищаючи таким чином високовольтне електроустаткування. У відкритих розподільних установках (ВРУ) номінальною напругою 110-750 кВ ОПН встановлюють на спеціальних конструкціях – опорних стійках [1]. За допомогою з'єднувальних проводів ОПН приєднують до лінії електропередачі (ЛЕП) та контуру заземлення.

Однією з характеристик ОПН є захисний рівень, який за грозового імпульсу струму визначають як максимальну напругу між затискачами ОПН під час

проходження розрядного струму. Протікання розрядного струму спричиняє падіння напруги в індуктивному опорі з'єднувальних проводів, в результаті чого напруга на електроустаткуванні буде вищою, ніж на затискачах ОПН, на величину падіння напруги в з'єднувальних проводах, за допомогою яких ОПН приєднують до лінії електропередачі та контуру заземлення. У разі, якщо довжина проводів є великою, а імпульс струму має крутий фронт, напруга на обладнанні може виявитися зависокою та представляти загрозу для ізоляції обладнання. Отже, падіння напруги в з'єднувальних проводах необхідно додавати до залишкової напруги ОПН при вирішенні питань координації ізоляції. На даний час для обчислення індуктивності прямого з'єднувального провідника головним чином застосовують питоме значення 1,3 мкГн/м [2, 3]. Також відомі випадки застосування інших питомих значень 0,9 мкГн/м або 1,0 мкГн/м [4]. Разом з тим, індуктивність прямого проводу не залежить лінійно від довжини проводу, оскільки до виразу для обчислення індуктивності проводу (як буде показано далі) довжина проводу також входить під знаком логарифму. Очевидно, що використання наведених вище значень погонної індуктивності має на меті спрощення інженерних розрахунків, оскільки не потребує знання, наприклад, діаметру з'єднувального проводу. Разом з тим, ОПН різних класів напруги приєднують до лінії також різними способами. Наприклад, до обладнання з номінальною напругою 110-220 кВ приєднання

ОПН здійснюють із застосуванням одного проводу на кожну фазу, а до обладнання з номінальною напругою 330 кВ з метою забезпечення більшої однорідності електромагнітного поля приєднання ОПН здійснюють із застосуванням двох паралельних проводів на кожну фазу. Очевидно, що індуктивність двох паралельних проводів буде меншою за індуктивність одного суцільного проводу. Отже, застосування в розрахунках значень питомої індуктивності в зазначеному вище діапазоні від 0,9 мкГн/км до 1,3 мкГн/м для обладнання номінальною напругою 330 кВ буде призводити до дещо завищеного значення захисного рівня ОПН. Ці питання вже частково розглядалися в [5], де було запропоновано вираз для обчислення індуктивності з'єднувальних проводів ОПН, призначених для встановлення у ВРУ 330-345 кВ. Довжина з'єднувальних проводів ОПН, встановлених у ВРУ 110 кВ і вище, може досягати декількох метрів, тому для більш ґрунтовного аналізу доцільно провести дослідження падіння напруги в індуктивному опорі з'єднувальних проводів ОПН з використанням осцилограм реальних струмів блискавок різної полярності.

Мета роботи – подальший розвиток досліджень режимів роботи ОПН з використанням динамічних моделей ОПН та осцилограм реальних струмів блискавки позитивної та негативної полярності.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Згідно з [6], для області високих частот індуктивність прямого проводу визначається так:

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

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

В свою чергу, згідно з [5], для області високих частот індуктивність двох паралельних прямих проводів визначається як:

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

де: d – відстань між паралельними проводами.

Використовуючи запропоноване в [2] значення питомої індуктивності 1,3 мкГн/м, формулу для обчислення індуктивності (Гн) прямого проводу можна записати як:

$$L = 1,3 \cdot 10^{-6} \cdot l. \quad (3)$$

Падіння напруги в індуктивному опорі з'єднувального проводу визначається як:

$$V = L \cdot \frac{di}{dt}, \quad (4)$$

де: L визначається за формулою (1) або (2) залежно від того, яким проводом приєднано ОПН, або за формулою (3), якщо тип проводу та, відповідно, його діаметр невідомі; i – розрядний струм, що протікає в з'єднувальному проводі.

Формулу (1) можна використовувати, наприклад, для визначення падіння напруги в індуктивному опорі з'єднувальних проводів ОПН для класу номінальної напруги 110 кВ (рис. 1).



Рисунок 1 – Приєднання ОПН до повітряної ЛЕП номінальною напругою 110 кВ одним проводом

В свою чергу, вираз (2) можна використовувати, наприклад, для визначення падіння напруги в індуктивному опорі з'єднувальних проводів ОПН для класу номінальної напруги 330 кВ (рис. 2).



Рисунок 2 – Приєднання ОПН до повітряної ЛЕП номінальною напругою 330 кВ двома паралельними проводами

З метою оцінки результатів, які дають спрощена та аналітичні формули обчислення індуктивності з'єднувальних проводів, можна прийняти, що ОПН приєднані до ЛЕП проводом такого ж діаметра, що і фазний провід ЛЕП. Наприклад, на ЛЕП 110 кВ може використовуватися провід типу АС 120/19, який має діаметр 15,2 мм [7]. Графіки залежності індуктивності одного суцільного проводу типу АС 120/19 від довжини, отримані із застосуванням формул (1) та (3), наведено на рис. 3 (значення індуктивності перераховано в мкГн).

Як видно з рис. 3, формула (3) дає дещо завищений результат індуктивності з'єднувального проводу, причому зі збільшенням довжини з'єднувального проводу ця різниця зменшується. Так, за довжини проводу 0,5 м значення індуктивностей відрізняються в 1,67 рази, а за довжині 6,0 м ця різниця складає лише 1,02 рази.

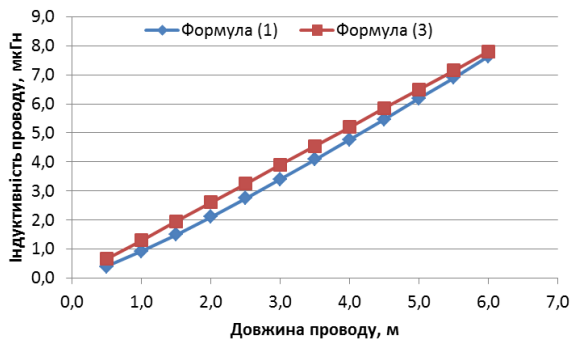


Рисунок 3 – Порівняння значень індуктивності одного проводу

В ЛЕП з номінальною напругою 330 кВ фазу виконують із застосуванням двох проводів, при цьому можуть бути застосовані проводи типу АС 300/67, які мають діаметр 24,5 мм [7]. Графіки залежності індуктивності розщепленої фази, створеної із застосуванням двох проводів типу АС 300/67 з відстанню між ними 0,4 м, від довжини, отримані із застосуванням формул (1) та (3), наведено на рис. 4 (значення індуктивності перераховано в мкГн).

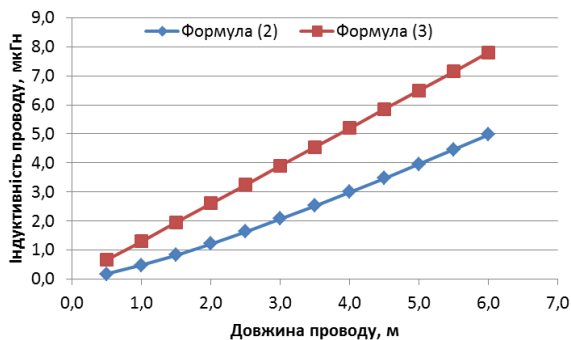


Рисунок 4 – Порівняння значень індуктивності розщепленої фази

Як видно з рис. 4, формула (3) дає суттєво завищений результат у випадку розщепленого проводу. Так, за довжини проводу 0,5 м розраховані значення індуктивностей відрізняються в 3,92 рази, а за довжини 6,0 м ця різниця складає вже 1,56 рази.

Отримані результати показують, що формули (1) і (2) дають змогу більш точно обчислити значення індуктивності з'єднувальних проводів ОПН та, відповідно, падіння напруги в їх індуктивному опорі в режимі обмеження грозових перенапруг.

За результатами багатьох вимірювань на різних вежах [8, 9] встановлено, що струми блискавок негативної та позитивної полярності суттєво відрізняються за своєю формою. Зокрема, струми зворотного удару позитивних блискавок тривають значно довше, ніж у випадку розряду негативних блискавок, та мають більшу тривалість фронту імпульсу. Тому доцільно провести дослідження падіння напруги в індуктивному опорі з'єднувальних проводів ОПН з використанням осцилограм реальних струмів

блискавок як негативної, так і позитивної полярності.

З метою оцінки впливу індуктивності з'єднувальних проводів проведено схемотехнічне моделювання з використанням динамічної моделі ОПН, що запропонована в [10]. Дана модель зображена на рис. 5.

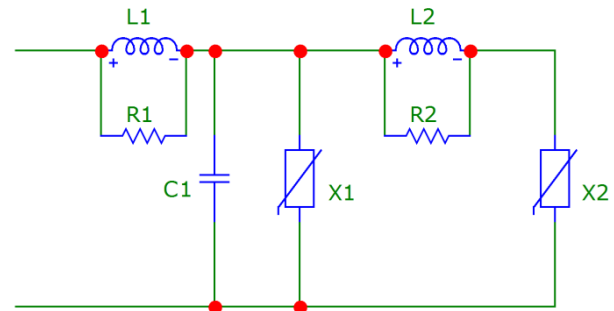


Рисунок 5 – Динамічна (частотно-залежна) модель метал-оксидного ОПН

Процедура розрахунку значень лінійних (R_1 , R_2 , L_1 , L_2 і C_1) та нелінійних (X_1 і X_2) параметрів схеми заміщення ОПН наведена в [10]. Основна схема дослідження зображена на рис. 6.

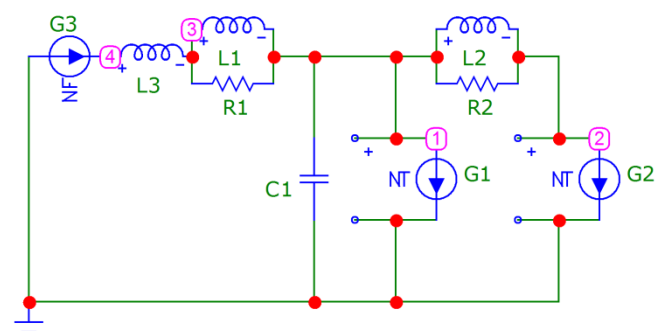


Рисунок 6 – Схема для визначення індуктивного падіння напруги в з'єднувальному проводі ОПН

Для моделювання схеми на рис. 6 використано програму «Micro-Cap 12» [11]. Моделювання нелінійних елементів G_1 і G_2 на рис. 6 виконано за допомогою моделі джерела струму, керованого напругою, відповідно до методики, запропонованої в [12]. Індуктивність L_3 на рис. 6 представляє зосереджену індуктивність з'єднувального проводу. З метою моделювання розрядного струму блискавки, який протікає в з'єднувальному проводі, в моделі використано джерело струму G_3 . Падіння напруги в індуктивному опорі з'єднувальних проводів, за допомогою яких ОПН приєднують до контуру, заземлення в даній роботі не розглядається.

Для проведення моделювання було оцифровано деякі осцилограми реальних струмів блискавки, що наведені в одній з фундаментальних праць з експериментальних вимірювань струмів блискавки [8]. З метою перетворення растрового зображення осцилограми струму в масив точок було використано програму WebPlotDigitizer 4 [13].

Для дослідження було обрано типовий ОПН, призначений для використання в мережах напругою 330 кВ. В рамках дослідження прийнято, що довжина з'єднувальних проводів ОПН становить 4,0 м.

Деякі результати проведених досліджень наведено нижче. В усіх наведених нижче кривих збережено форму струму, але перший пік струму зведено до значення +10 кА для струму позитивної блискавки та до значення -10 кА для струму негативної блискавки. Приклади струмів негативної блискавки та падіння напруги, яке ці струми спричиняють в з'єднувальних провадах, зображено на рис. 7 та рис. 8.

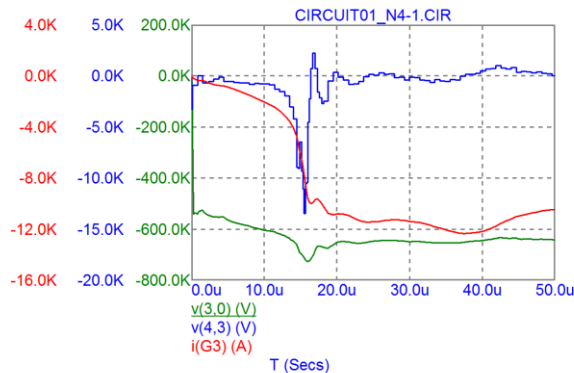


Рисунок 7 – Приклад №1 струму зворотного удару негативної блискавки та падіння напруги в з'єднувальних провадах ОПН

Тут і далі на графіках червоним кольором зображено графік струму, а синім кольором – графік напруги в з'єднувальних провадах ОПН. Зеленим кольором зображено залишкову напругу на ОПН. На рис. 7 падіння напруги на з'єднувальних провадах ОПН досягає значення 13,465 кВ.

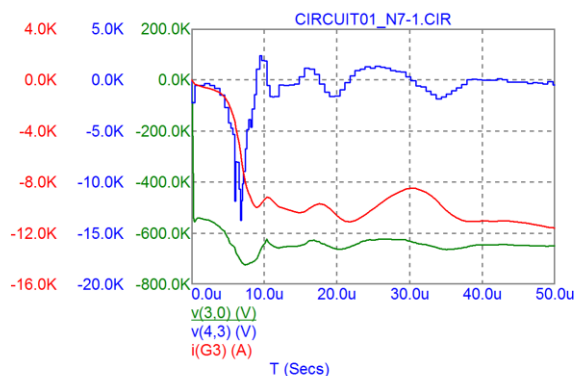


Рисунок 8 – Приклад №2 струму зворотного удару негативної блискавки та падіння напруги в з'єднувальних провадах ОПН

На рис. 8 падіння напруги на з'єднувальних провадах ОПН досягає значення 13,728 кВ.

Падіння напруги в індуктивному опорі з'єднувальних проводів досягають максимальних значень, коли швидкість зміни di/dt є найбільшою, тобто на фронті імпульсу струму. На рис. 9 та рис. 10 зображено форму струмів позитивної блискавки та падіння напруги, яке ці струми спричиняють в з'єднувальних провадах.

У порівнянні зі струмами негативної блискавки струми позитивної блискавки більш повільно зростають до максимуму, тому падіння напруги в індуктивному опорі з'єднувальних проводів в останньому випадку мають суттєво менші значення.

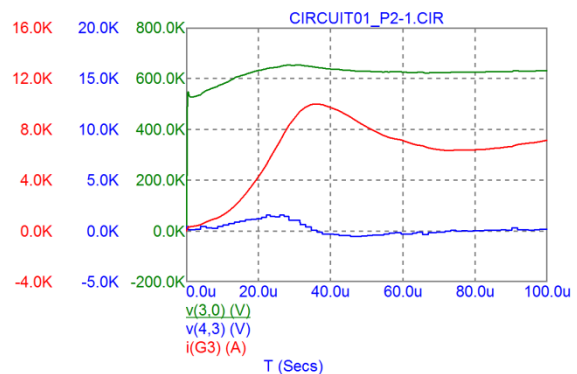


Рисунок 9 – Приклад №1 струму зворотного удару позитивної блискавки та падіння напруги в з'єднувальних провадах ОПН

Зокрема, на рис. 9 падіння напруги на з'єднувальних провадах досягає становить лише 1,594 кВ.

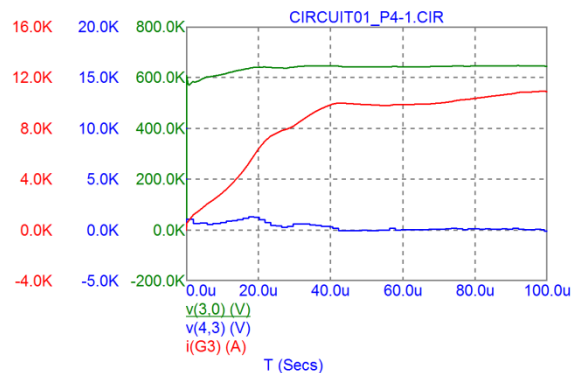


Рисунок 10 – Приклад №2 струму зворотного удару позитивної блискавки та падіння напруги в з'єднувальних провадах ОПН

На рис. 10 падіння напруги на з'єднувальних провадах становить лише 1,276 кВ.

Тривалість імпульсу струму позитивної блискавки може в 10 та більше разів перевищувати тривалість імпульсу струму негативної блискавки [8], тому позитивні розряди є більш деструктивними та небезпечними [14, 15] і потребують детального вивчення. Разом з тим, через значно менші значення di/dt , падіння напруги в індуктивному опорі з'єднувальних проводів ОПН у випадку позитивних блискавок суттєво менші, ніж у випадку негативних блискавок.

ВИСНОВКИ. Продовжено дослідження впливу на ОПН струмів блискавки різної полярності шляхом схематичного моделювання. Актуальність досліджень підкреслює факт того, що ОПН набули статусу основних апаратів для первинного захисту обладнання від грозових та комутаційних перенапруг. Запропоновано підхід, що враховує наявні відмінності між осцилограмами імпульсів струму зво-

ротного удару блискавки негативної та позитивної полярності, чого не можна досягти за умови апроксимації струмів блискавки за допомогою спрощених математичних виразів. Зазначений підхід використано для дослідження падіння напруги в індуктивному опорі з'єднувальних проводів ОПН класу напруги 330 кВ. Показано, що аналітичні формули для обчислення індуктивності з'єднувальних проводів, які враховують геометричні розміри проводів, дають більш точні результати, ніж відоме з літературних джерел значення погонної індуктивності 1,3 мкГн/м. Зазначено, що заряд, який переносить позитивна блискавка, суттєво перевищує заряд, який переносить негативна блискавка, оскільки тривалість фронту імпульсу (як і загальна тривалість імпульсу) позитивної блискавки суттєво перевищує відповідні параметри струму негативної блискавки, тому позитивні блискавки представляють більшу небезпеку, ніж негативні. Встановлено, що через більш пологий фронт імпульсу падіння напруги в індуктивному опорі з'єднувальних проводів ОПН у випадку позитивних блискавок у 8-11 разів менші, ніж у випадку негативних блискавок. В цілому, падіння напруги в індуктивному опорі з'єднувальних проводів будуть більш небезпечними за великої довжини проводів та імпульсах струму негативної блискавки з крутим фронтом.

Подальший розвиток запропонованого підходу вбачається в використанні його для аналізу схем захисту електроустановки високовольтних електричних мереж від перенапруг за допомогою ОПН.

ЛІТЕРАТУРА

- Li S., Tsang H. H., Cheng Y., Lu Z. Considering seismic interaction effects in designing steel supporting structure for surge arrester. *Journal of Constructional Steel Research*. 2017. Vol. 132. P. 151-163. doi: 10.1016/j.jcsr.2017.01.012
- 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
- Kershaw S. S., Clinkenbeard C. R. Discharge Voltage of Arrester Connecting Lead Wires. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 1974. Vol. PAS-93. No. 1. P. 226-232. doi: 10.1109/TPAS.1974.293936
- Miguel P. M. Comparison of Surge Arrester Models. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2014. Vol. 29. No. 1. P. 21-28. doi: 10.1109/TPWRD.2013.2279835
- 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
- Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. *Расчёт индуктивностей: Справочная книга*. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986, 488 с.
- 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.
- 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.
- Hussein A. M., Janischewskij W., Milewski M., Shostak V., Rachidi F., Chang J. S. Comparison of current 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
- 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
- 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>
- 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
- Rohatgi A. WebPlotDigitizer. Version 4.4. November, 2020. Pacifica, California, USA. [Електронний ресурс]: <https://automeris.io/WebPlotDigitizer>
- 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.
- 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

ESTIMATION OF VOLTAGE DROP IN INDUCTIVE REACTANCE OF CONNECTING WIRES OF SURGE ARRESTERS

Y. Trotsenko, A. Nesterko, V. Chyzhevskiy

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

ORCID: 0000-0001-9379-0061; 0000-0001-7488-4214; 0000-0002-1224-1798

M. Dixit

Vishwaniketan Institute of Management Entrepreneurship and Engineering Technology

ORCID: 0000-0003-1959-7815

Purpose. The results of studying the voltage drop in the inductive reactance of the connecting wires of surge arresters installed in open switchgear are presented. **Methodology.** Free software for circuit simulation was used to solve electrical circuits with nonlinear parameters. To take into account the differences between the negative and positive lightning current impulses, the oscillograms of real lightning currents were digitized using free specialized software. **Results.** The duration of the impulse front (as well as the total impulse duration) of the positive lightning significantly exceeds the corresponding parameters of the negative lightning current, so the charge carried by the positive lightning significantly exceeds the charge carried by the negative lightning. For these reasons, positive lightning, although less common than

negative lightning, is more dangerous. It is found that due to the slower front of the impulse, the voltage drop in inductive reactance of connecting wires of the surge arresters in the case of positive lightning is 8-11 times less than in the case of negative lightning. Analytical formulas for calculating the inductance of the connecting wires, which take into account the geometric dimensions of the wires, provide more accurate results than the average inductance value of 1.3 $\mu\text{H/m}$ given in the literature. **Originality.** The approach takes into account the differences between impulses of lightning currents of negative and positive polarity, which cannot be achieved with use of the approximation of lightning currents by simplified mathematical expressions. **Practical value.** It is found that voltage drops in the inductive reactance will be more dangerous in case of long wire lengths and negative lightning current impulses with a steep front. **Conclusions.** Further development of the proposed approach is seen in its use for the analysis of circuits for protection of electrical equipment of high-voltage electrical networks from lightning overvoltages using surge arresters. References 15, figures 10.

Key words: surge arrester, connecting wire, voltage drop in inductive reactance, lightning current.

REFERENCES

- Li, S., Tsang, H. H., Cheng, Y., Lu, Z. (2017), "Considering seismic interaction effects in designing steel supporting structure for surge arrester", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 132, pp. 151-163. doi: 10.1016/j.jcsr.2017.01.012
- 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
- Kershaw, S. S., Clinkenbeard, C. R. (1974), "Discharge Voltage of Arrester Connecting Lead Wires," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-93, No. 1, pp. 226-232. doi: 10.1109/TPAS.1974.293936
- Miguel, P. M. (2014), "Comparison of Surge Arrester Models", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 29, No. 1, pp. 21-28. doi: 10.1109/TPWRD.2013.2279835
- 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
- Kalantarov P. L., Tseytlin L. A. (1986), *Calculation of inductances: Reference book*. 3rd edition, revised and enlarged. L.: Energoatomizdat. Leningrad. department, 488 p.
- 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.
- 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.
- 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
- 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
- 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>
- 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
- Rohatgi, A. (2020), Web Plot Digitizer. Version 4.4. November, 2020. Pacifica, California, USA. [Available]: <https://automeris.io/WebPlotDigitizer>
- 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.
- 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

Стаття надійшла 07.07.2021.