

## ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.311

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.6-1/03>

**Кирик В.В.**

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### НЕЛІНІЙНІ ОБМЕЖУВАЧІ ПЕРЕНАПРУГИ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ НАПРУГОЮ 10 КВ

*У роботі розроблено рекомендації по визначенню оптимальних місць встановлення нелінійних обмежувачів перенапруги для захисту повітряних ліній електропередавання від впливу грозових перенапруг на основі моделі електричної мережі номінальною напругою 10 кВ. В основу роботи покладено імітаційне математичне моделювання процесів виникнення грозових перенапруг в повітряних лініях електропередавання номінальною напругою 10 кВ.*

*Обробка результатів дослідження виконувалася з використанням сучасного прикладного програмного забезпечення: MathCAD та середовища SimPowerSystem пакету програм MATLAB. Імітаційна модель містить 10 субмодулів «Лінія 1...10», кожний з яких імітує 10 прогонів довжиною по 70 м одноланцюгової повітряної лінії довжиною 0,7 км.*

*Проведено дослідження розподілу індукованої перенапруги в часі вздовж траси лінії електропередавання. Виконано імітаційне математичне моделювання варіантів розміщення нелінійних обмежувачів перенапруги вздовж траси повітряної лінії електропередавання номінальною напругою 10 кВ. Визначено оптимальні відстані, через які необхідно встановлювати нелінійні обмежувачі перенапруги, для забезпечення захисту електричної мережі номінальною напругою 10 кВ від індукованої грозової перенапруги.*

*Установка нелінійних обмежувачів перенапруги на всіх опорах на кожній з трьох фаз забезпечує надійний захист мережі 10 кВ від індукованої перенапруги при грозових розрядах. Захист на рівні допустимого забезпечує встановлення нелінійних обмежувачів перенапруги через одну опору по трасі на кожній з трьох фаз, тобто на опорах через два прогони. Значення перенапруги в фазах залежить від сторони локації розряду відносно напрямку траси.*

**Ключові слова:** нелінійний обмежувач перенапруги, грозові перенапруги, блискавкозахист, наведена напруга, імітаційна математична модель.

**Постановка проблеми.** Однією з причин низької якості електропостачання в розподільних електричних мережах Об'єднаної Енергосистеми України (ОЕС) є відключення повітряних ліній електропередавання (ЛЕП) внаслідок грозових перенапруг та, в ряді випадків, пошкодження ізоляції електрообладнання. Грозові перенапруги можуть бути викликані як прямими влученнями блискавки в лінію, так і наведеними потенціалами при грозовому розряді в навколишні об'єкти, які заходяться вздовж траси лінії електропередавання. Перенапруга прямого розряду є більш небезпечною для ізоляції, ніж індукована перенапруга. Однак імовірність прямого розряду блискавки в ПЛ залежить від багатьох факторів і в деяких випадках може виявитися, що індуковані перенапруги можуть бути причиною перекриття ізоляції при грозових розрядах. Це є характерним

для електричних мереж 6 кВ та 10 кВ, де висота опори знаходиться в межах 10–15 м, і траса лінії з більшою ймовірністю може екрануватися рельєфом місцевості, насадженнями та будівлями від прямих влучень блискавки.

На теперішній час захист повітряних ЛЕП напругою 10 кВ виконується приблизно в 95 % випадків вентильними розрядниками тільки по кінцях лінії перед трансформатором, а лінійна ізоляція по трасі лінії не захищена від перенапруг. Тому важливим моментом є оцінка наведених грозових перенапруг в розподільних електричних мережах напругою 10 кВ та визначення місць встановлення навісних нелінійних обмежувачів перенапруги на опорах по трасі повітряної ЛЕП.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Грозозахист повітряних ЛЕП розподільних мереж може виконуватися різними засобами: установ-

ленням на кінцях електропередачі вентилях та трутчатих розрядників, зменшення опорів заземлення опор, посилення ізоляції [1, 2]. Реальний стан розподільних мереж їх зношеність, наднормативна довжина ліній, практична відсутність автоматичних засобів захисту та секціонування [3] вимагають рішучих дій до впровадження сучасних світових досягнень та технічних рішень для підвищення ефективності функціонування електричних мереж.

На теперішній час найбільш ефективним способом підвищення грозостійкості лінії електропередавання є установка на опорах повітряних ЛЕП нелінійних обмежувачів перенапруги (ОПН). Відповідно до нормативних документів для забезпечення захисту електричних мереж рекомендовано розміщувати ОПН на кожній опорі паралельно ізоляторам [4, 5]. Проте така установка призводить до зростання в декілька разів вартості спорудження нових ліній електропередавання та реконструкції існуючих. На сьогодні таке технічне рішення не нашло підтримки в експлуатаційників.

**Постановка завдання.** Метою роботи є визначення алгоритму вибору опор для установки нелінійних обмежувачів перенапруги та їх кількості на кожній з них по трасі лінії електропередавання.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Стохастичні дослідження на основі статистичних даних по одному з підрозділів ПрАТ «Київобленерго» показали, що за грозовий період 2019 року кількість індукованих перенапруг в повітряних ЛЕП напругою 10 кВ перевищила більше ніж в 20 разів кількість перенапруг від прямих грозових попадань блискавки в провoda лінії.

Поява наведеного заряду на провodaх лінії електропередавання перед розрядом блискавки в об'єкти на землі викликана формуванням заряду лідерного каналу. В лінії формуються зв'язані між собою заряди протилежного знаку до заряду каналу. При малих швидкостях розвитку лідера вільні заряди починають розтікатися в провodi, рухаючись відносно зони впливу самого лідерного каналу. Поле лідера зв'язані заряди в лінії врівноважують, тому потенціал провoda на даній стадії блискавки є близький до нуля (без врахування власної напруги лінії). Після початку стадії головного розряду поле даного каналу нейтралізується і при цьому зв'язані заряди починають вивільнюватися, що призводить до збільшення потенціалу провoda і відповідно до перенапруги.

Оцінка та аналіз такої перенапруги проводились в програмному середовищі MATLAB

на імітаційній математичній моделі мережі 10 кВ довжиною 7 км, схема якої наведена на рис. 1. Дана модель містить 10 субмодулів «Лінія 1...10», кожний з яких імітує 10 прогонів довжиною по 70 м одноланцюгової повітряної лінії довжиною 0,7 км. Лінія виконана на залізобетонних опорах СВ105-5 з трикутним розташуванням фаз. Прогони ЛЕП представлені в моделі трифазною RLC-ланкою розрахункових параметрів лінії. Схема модуля «Лінія» наведена на рис. 2.

Імітаційна модель опори введена в місця з'єднання прогонів повітряної лінії електропередавання і представлена комбінацією індуктивностей та активного опору (рис. 3). Значення індуктивностей розраховано на основі геометрії опори та погонних індуктивностей її елементів. Кожна опора, при цьому, має заземлюючий пристрій, який змодельовано активним опірком. У вигляді набору ємностей представлено в моделі гірлянди ізоляторів, які на кожній із опор відокремлюють фазні провodi від арматури траверс.

Модель мережі 10 кВ також включає в себе два модулі трансформаторів Т1 (ТМН-6300/110) та Т2 (ТМ-63/10), модулі вимірювання напруги  $U$  та  $U_m$ , модуль «джерело» живлення промислової частоти напругою 115 кВ, модуль «джерело індукованої перенапруги» (рис. 4) та «навантаження».

Значення індукованої перенапруги розраховано за виразом [6]:

$$U_0 = 12,5 \cdot I_m \cdot \ln \left[ \frac{z_0 + h + \sqrt{(z_0 + h)^2 + r^2}}{z_0 - h + \sqrt{(z_0 - h)^2 + r^2}} \right],$$

де  $I_m$  – значення струму блискавки, кА (прийнято на рівні 30 кА);  $z_0$  – висота між нижньою точкою розряду блискавки і землею, м;  $h$  – середня висота підвішування провoda, м;  $r$  – відстань між точкою проекції розряду блискавки на землю і трасою лінії, м.

Оцінка значення перенапруги виконувалась для випадків розряду блискавки в землю та в об'єкт на висоті 10 м над землею на відстані 50 м від траси повітряної лінії на початку лінії і через кожні 700 метрів до кінця лінії. На рис. 5, а подано графік розподілу напруги вздовж траси повітряної лінії при розряді блискавки в землю поблизу середини траси ЛЕП на відстані 50 м від неї, а на рис. 5, б подано графік розподілу напруги вздовж траси повітряної лінії при розряді блискавки в об'єкт, що знаходиться на висоті 10 м над землею поблизу середини траси ЛЕП на відстані також 50 м від неї.

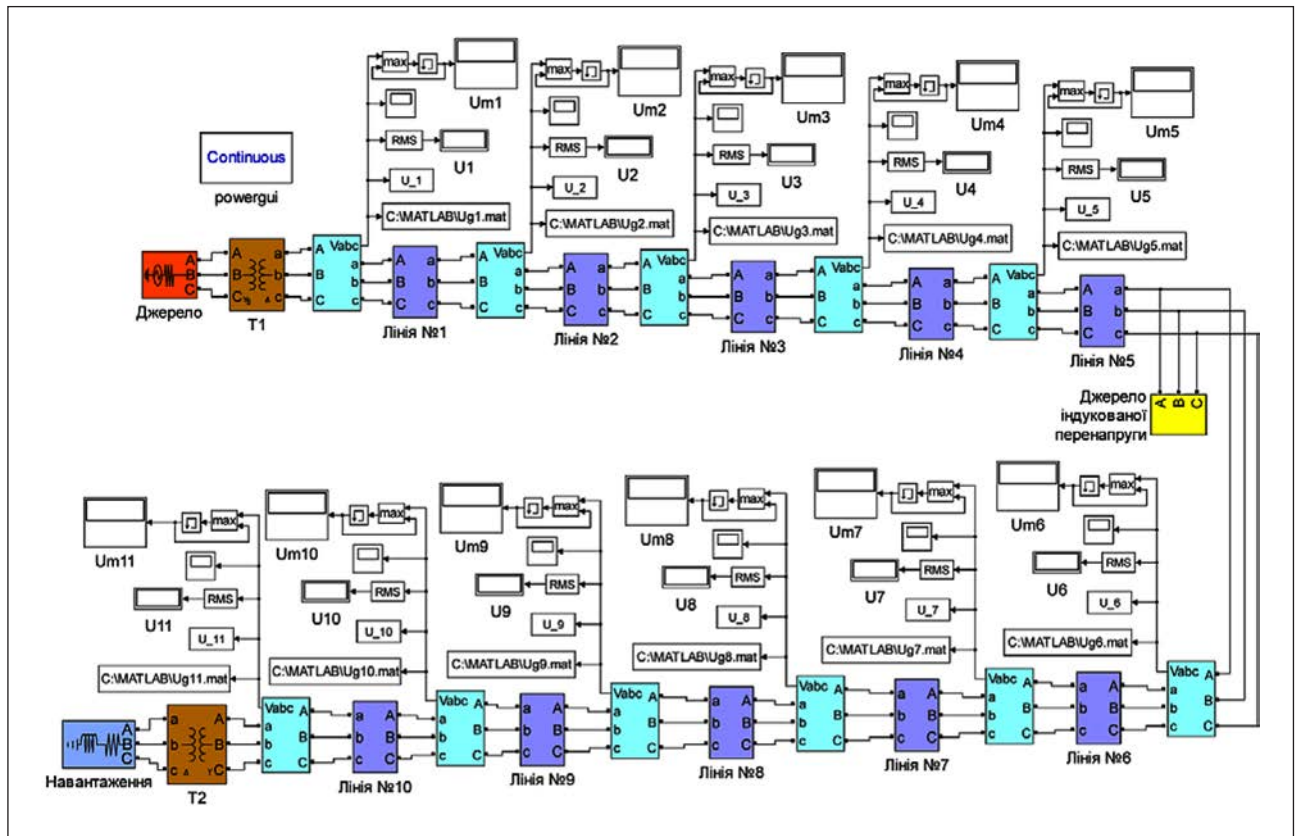


Рис. 1. Імітаційна модель мережі номінальною напругою 10 кВ

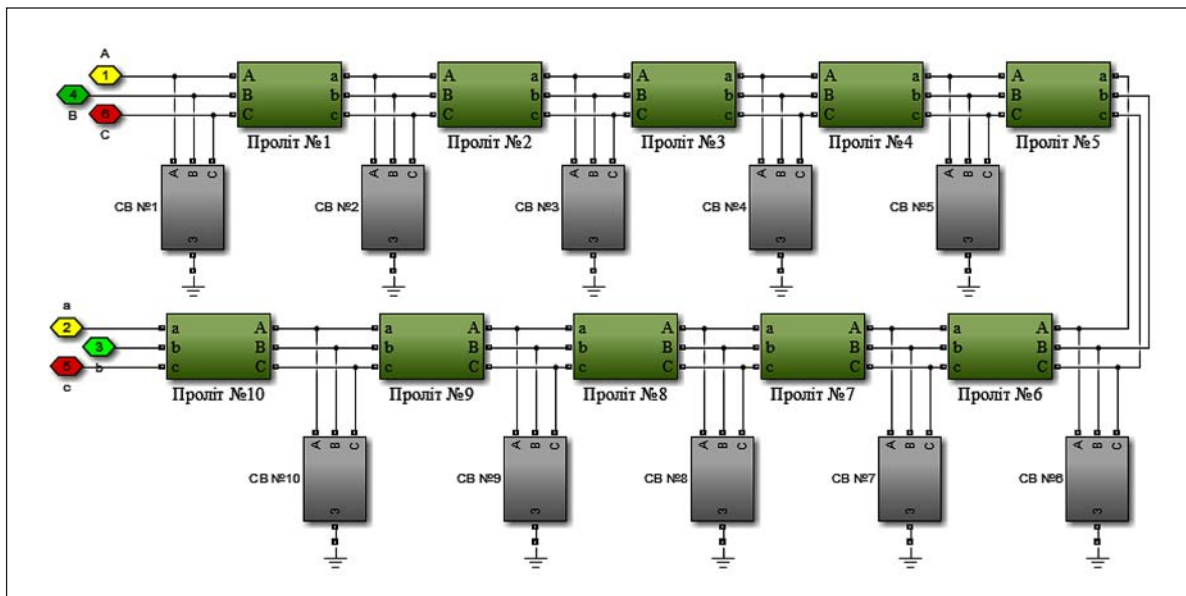


Рис. 2. Схема модуля «Лінія»

Наведена перенапруга у всіх випадках розряду блискавки перевищує допустиме значення 82 кВ [7] для мережі 10 кВ.

Для прийняття рішення щодо установки на опорах підвісних нелінійних обмежувачів перенапруги проведено моделювання та аналіз рівня

перенапруги при використанні ОПН. На рис. 6 наведено графік розподілу індукованої напруги вздовж траси повітряної лінії при розряді блискавки в землю всередині ЛЕП на відстані 50 м від траси при встановленні ОПН на кожній опорі та відповідно на трьох фазах.

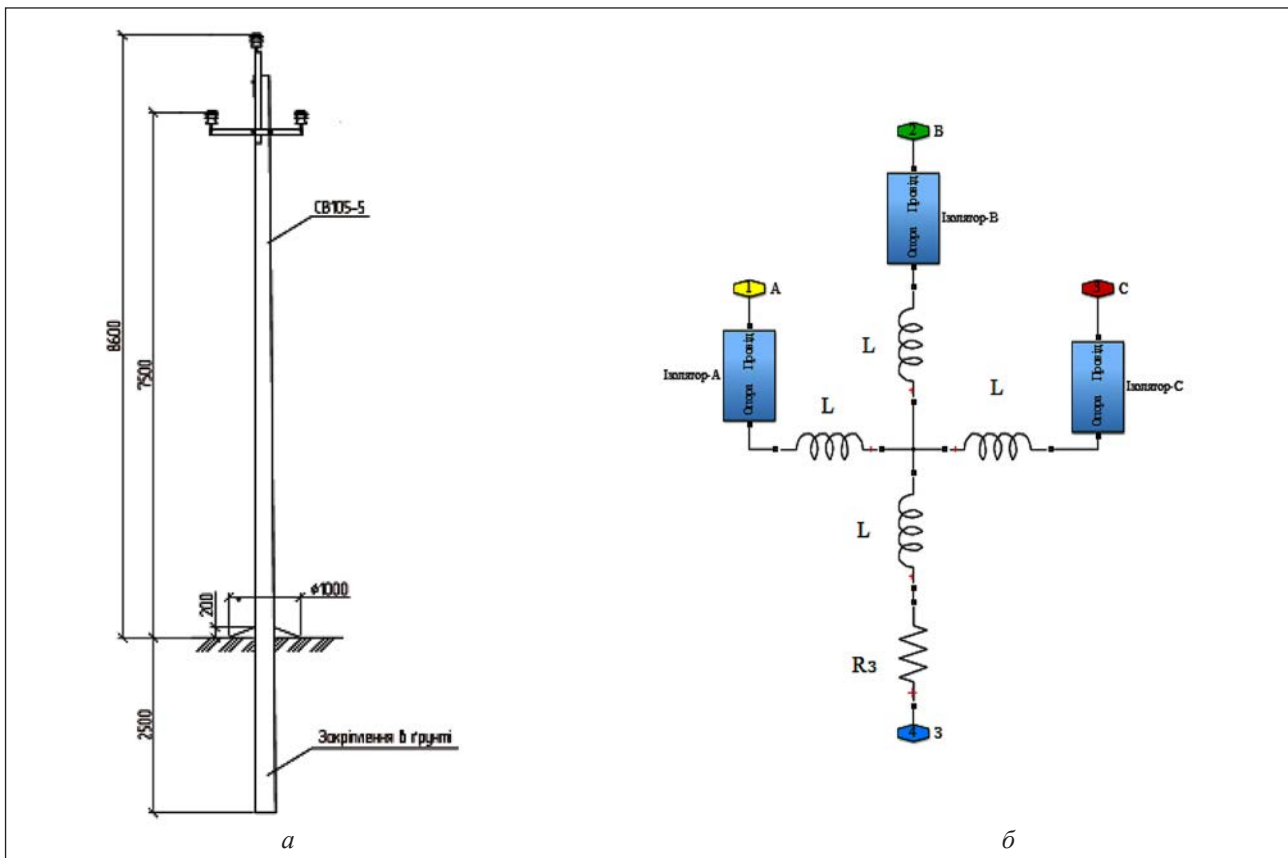


Рис. 3. Опора повітряної лінії електропередавання 10 кВ:  
 а – монтажна схема опори СВ105-5; б – імітаційна модель опори

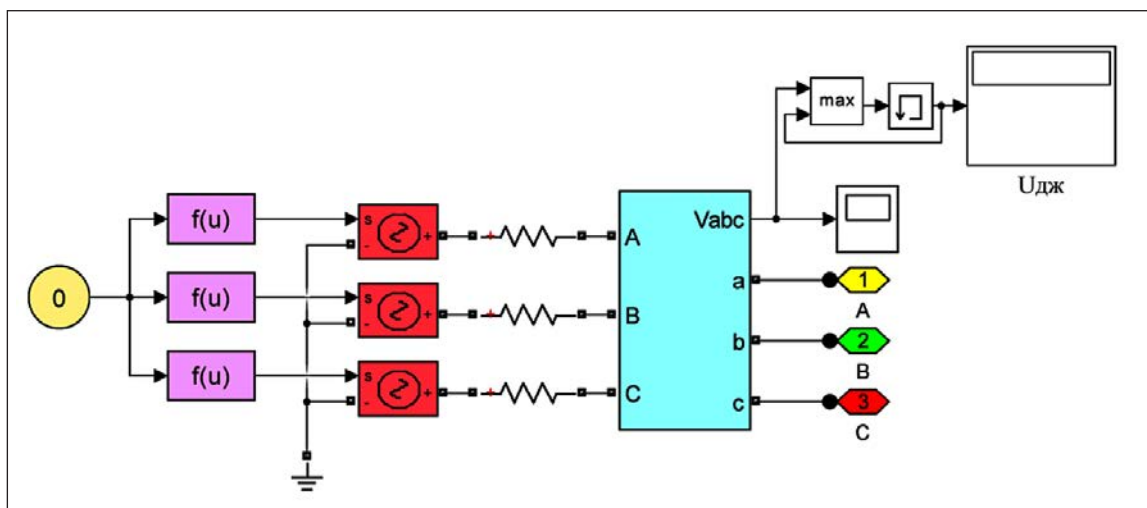


Рис. 4. Модель джерела індукованої перенапруги

Виявлено, що встановлення нелінійних обмежувачів перенапруги на всіх опорах забезпечує надійний захист мережі 10 кВ від індукованої перенапруги при грозових розрядах. Захист на рівні допустимого забезпечує їх установа на одній опорі, тобто на опорах через два прогони. На рис. 7 представлено осцилограми напруги за розряду блискавки в землю поблизу

середини лінії на відстані 50 м від траси ЛЕП при встановленні ОПН через 140 м. Максимальне значення перенапруги в лінії знаходиться на межі допустимого 82 кВ.

**Висновки.** Установка нелінійних обмежувачів перенапруги на всіх опорах на кожній із трьох фаз забезпечує надійний захист мережі 10 кВ від індукованої перенапруги при грозових розрядах.

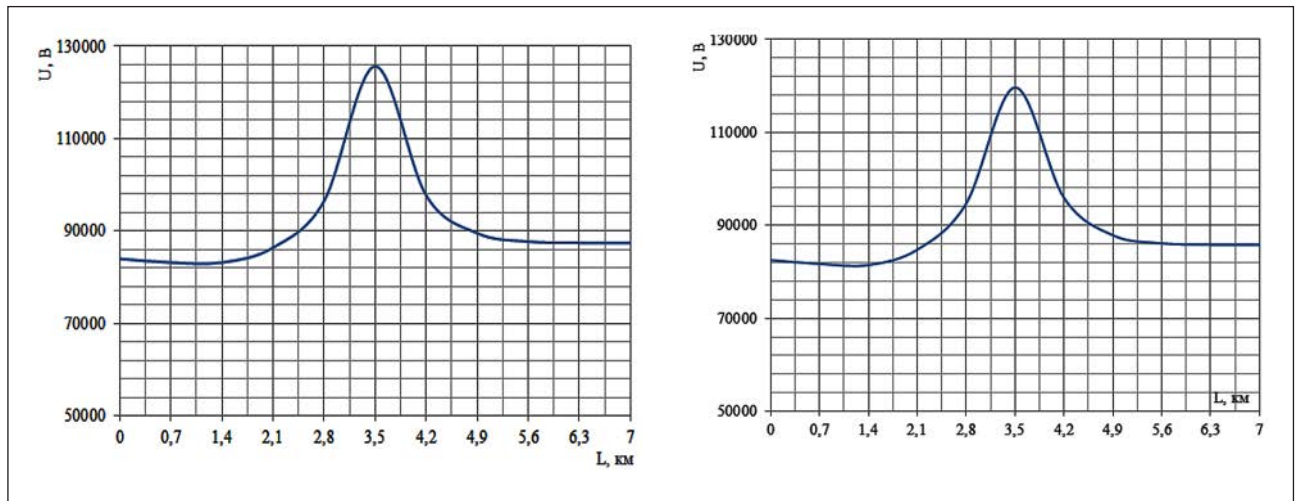


Рис. 5. Розподіл напруги вздовж траси повітряної лінії за розряду блискавки в середині траси ЛЕП на відстані 50 м: *a* – безпосередньо в землю; *б* – в об’єкт на висоті 10 м над землею

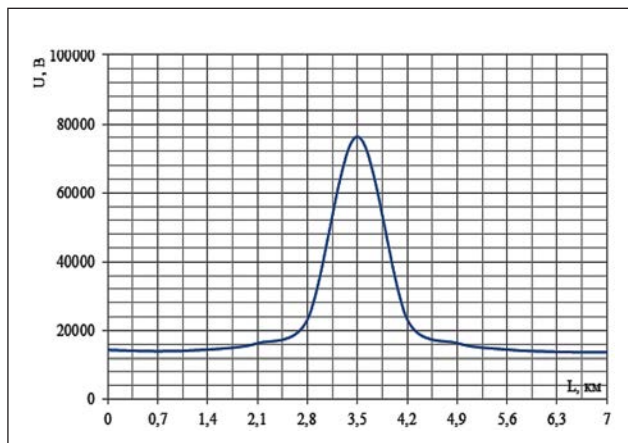


Рис. 6. Розподіл напруги вздовж траси повітряної лінії за розряду блискавки в землю в середині ЛЕП на відстані 50 м від траси при встановленні ОПН на кожній опорі на трьох фазах

Захист на рівні допустимого забезпечує їх установлення через одну опору по трасі на кожній із трьох фаз, тобто на опорах через два прогони (140 м).

Значення перенапруги в фазах залежить від сторони локації розряду відносно напрямку траси. Провода фаз частково знижують перенапругу за рахунок екранування більш віддалених фаз. Окрім цього, має місце суттєве зниження (затухання) перенапруги з часом по довжині траси лінії.

Допустимий рівень захисту, аналогічний захисту за розміщення ОПН на опорах на кожній

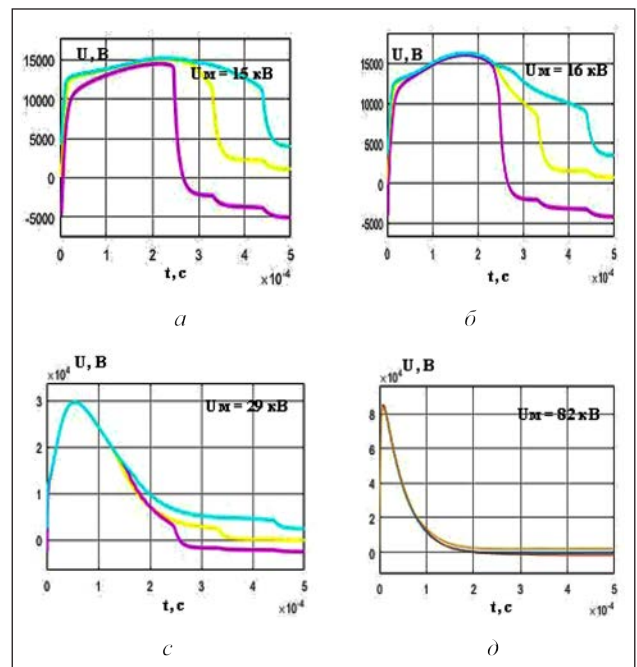


Рис. 7. Осцилограми напруги за розряду блискавки в землю поблизу середини лінії на відстані 50 м від траси ЛЕП при встановленні ОПН через 140 м: *a* – на відстані 0,7 км від початку лінії; *б* – на відстані 1,4 км від початку лінії; *в* – на відстані 2,8 км від початку лінії; *д* – на відстані 3,5 км від початку лінії

із трьох фаз через два прогони, забезпечує також установлення нелінійних обмежувачів перенапруги на кожній опорі по трасі, але на одній фазі почергово.

#### Список літератури:

1. Zanetty L.C. Evaluation of line surge arrester failure rate for multiphase lightning stresses // IEEE Transactions on Power Delivery. 2003. Vol. 18. № 3. P. 796–801.

2. Wang Lei, Lin Fuchang, Yan Fei. Calculation and analysis of induced overvoltage on a transmission line caused by lightning strike to the tower // Power System Technology. 2006. № 30. P. 271–274.
3. Кирик В.В. Розподільні електричні мережі напругою 20 кВ та ефективність їх роботи / В.В. Кирик, Б.В. Циганенко, О.С. Яндульський. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2018. 228 с
4. ГНД 34.20.177-2004 «Вимоги до проектування повітряних ліній електропередачі напругою 6-35 кВ з проводами із захисним покриттям», затверджений наказом Мінпаливенерго України від 02.03.2004 № 130. К. : Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, 2004. 24 с.
5. Кирик В.В., Абдулаєв С.А. Захист повітряних ліній електропередавання напругою 35 кВ від наведених грозових перенапруг // Електротехніка та електроенергетика. 2018. № 1. с. 81–92.
6. Ping Liu, Xiao Yi, Xu Wang, Yongling Lu, Jianhui Yu, Wenjun Zhou. Calculation on Induced Overvoltage on Low-voltage Overhead Lines // IEEE Power Engin and Autom. Conf. (PEAM). 2011. Vol. 2. P. 68–72.
7. Халилов Ф.Х., Евдокунин Г.А., Поляков В.С. Защита сетей 6–35 кВ от перенапряжений. СПб., 2002. 260 с.

### **Kyryk V.V. NONLINEAR SURGE ARRESTER IN 10 kV DISTRIBUTION ELECTRIC NETWORKS**

*In this work the recommendations for the optimal installation locations determining of the nonlinear surge arresters to protect overhead power lines from the effects of lightning surges based on a model of an electrical network with the rated voltage of 10 kV were developed. The work is based on mathematical simulation of lightning overvoltage in 10 kV overhead lines. The processing of the results of the research was carried out using modern applied software: MathCAD and environment SimPowerSystems of the MATLAB software package. The simulation model contains 10 submodules “Line 1... 10”, each of which simulates 10 runs with a length of 70m on a single-link air line with a length of 0.7 km. The distribution of induced overvoltage in time by the run of the power line was studied. Simulated mathematical modeling of the non-linear surge arresters placement variants by the run of the overhead power line with a rated voltage of 10 kV was performed.*

*The optimal distances for the non-linear surge arresters installation to ensure the induced lightning overvoltage protection of the electrical network with the rated voltage of 10 kV were determined. The installation of nonlinear surge arresters on all supports on each of the three phases provides reliable protection of the 10 kV network against induced surges during lightning discharges. The permissible level protection provides for the installation of nonlinear surge arresters through one track support at each of the three phases, that is, at two track runs.*

*The value of the overvoltage in the phases depends on the side of the discharge location relative to the direction of the route. There is a significant reduction (wave attenuation) of the overvoltage over time along the line route.*

**Key words:** *nonlinear surge arrester; lightning overvoltages, lightning protection, induced voltage, electrical network, simulation model*