

УДК 621.314.057

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.60.038>

## ПЕРЕНАПРУГИ ПІД ЧАС ДУГОВИХ ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ 35 КВ

М.С. Сегеда\*, докт. техн. наук, О.М. Равлик\*\*, докт. техн. наук, З.М. Бахор\*\*\*, канд. техн. наук, А.Я. Яцейко\*\*\*\*, канд. техн. наук, Н.Б. Дьяченко\*\*\*\*\*, канд. техн. наук  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
вул. Ст. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна e-mail: [mseheda@ukr.net](mailto:mseheda@ukr.net)

*Наведено результати дослідження перенапруг під час дугових однофазних замикань на землю переривчастого характеру в електричній мережі 35 кВ з ізольованою нейтраллю. Комп'ютерним моделюванням перехідних процесів у електричній мережі отримано максимальні кратності перенапруг у місці виникнення дугових однофазних замикань на землю, які перевищують теоретично очікувані за відомими теоріями виникнення та розвитку перенапруг. Показано зміну рівня перенапруг на шинах 35 кВ підстанцій мережі, електрично зв'язаних із місцем виникнення однофазного замикання на землю, та вплив кабельної лінії на кратність перенапруг. Бібл. 12, рис. 3, таблиця.*

**Ключові слова:** перенапруга, однофазне замикання, електрична мережа, комп'ютерне моделювання.

**Вступ.** В Україні для живлення споживачів електроенергії в сільській місцевості використовують електричні мережі (ЕМ) напругою 35 кВ. Здебільшого ці мережі є замкнені або з двостороннім живленням, але нормально функціонують за радіальним принципом. Переважно ці мережі сформовані повітряними лініями (ПЛ). Кабельні лінії (КЛ) 35 кВ із кабелів з паперово-оливною ізоляцією будувалися винятково за необхідності і зазвичай у містах та промислових зонах.

За останні роки в сільській місцевості з'явилися нові підприємства (нові споживачі електроенергії), що спричинило розвиток ЕМ 35 кВ. Будуються нові ЛЕП із використанням кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену (ЗПЕ). Структура ЕМ 35 кВ змінюється: з повітряних вони перетворюються у повітряно-кабельні.

Електричні мережі 35 кВ можуть працювати як з ізольованою нейтраллю, так і з нейтраллю, заземленою через дугогасний реактор. Дугогасні реактори використовують у мережах 35 кВ з ємнісним струмом замикання на землю понад 10 А. Якщо ж електрична мережа 35 кВ обладнана пристроями селективного захисту від однофазного замикання на землю (ОЗЗ), що діють на вимикання пошкодженого приєднання, то компенсацію ємнісного струму можна не виконувати [1].

В електричних мережах середньої напруги виникають дугові ОЗЗ переривчастого характеру, які супроводжуються значними тривалими перенапругами, діючими на ізоляцію електрообладнання, що має електричний зв'язок з місцем виникнення замикання. Дугові перенапруги є небезпечними для ізоляції електрообладнання мережі, прискорюють її старіння, призводять до пробиття ослаблених місць ізоляції в мережі та до появи одно- чи багатofазних коротких замикань у мережі, що знижує надійність електропостачання споживачів електроенергії.

Дослідженню дугових перенапруг в ЕМ напругою 6...35 кВ присвячено значну кількість робіт [2–11]. Відомі теорії Петерсена, Петерса-Слепяна та Беякова-Джуварли описують виникнення та розвиток перенапруг під час дугових ОЗЗ в електричних мережах і обґрунтовують теоретичний рівень перенапруг [2, 3]. Кожна з цих теорій має місце в мережах, за

© Сегеда М.С., Равлик О.М., Бахор З.М., Яцейко А.Я., Дьяченко Н.Б., 2021

ORSID ID: \* <https://orcid.org/0000-0001-8459-5758>, \*\* <https://orcid.org/0000-0001-5155-6795>,

\*\*\* <https://orcid.org/0000-0002-2497-4809>, \*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0002-4621-0762>,

\*\*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0001-6991-4458>

певних умов їхнього функціонування, що підтверджено експериментальними дослідженнями [2]. Із появою можливості цифрового моделювання перехідних процесів у електричних мережах питання перенапруг набуло нового якісного формату щодо дослідження рівня та розвитку перенапруг в ЕМ [5–10]. Водночас увага приділялася особливостям моделювання дугових ОЗЗ у мережі, адекватності моделювання елементів ЕМ, впливу параметрів мережі на рівень перенапруг [5, 9].

**Актуальність та доцільність роботи.** Розподільні ЕМ 35 кВ у сільській місцевості, які мають значні довжини ПЛ, розвиваються завдяки будівництву нових КЛ із кабелів з ізоляцією зі ЗПЕ, що впливає на параметри мережі та протікання в ній дугових електромагнітних перехідних процесів. Тому проблема перенапруг, їхніх кратностей для кожної конкретної електричної мережі з урахуванням її конфігурації та розгалуженості є актуальною, оскільки результати дослідження перенапруг дають змогу розробити ефективні заходи захисту ізоляції електрообладнання мережі.

**Метою та задачами дослідження** перенапруг під час дугових ОЗЗ у діючій розгалуженій електричній мережі 35 кВ ПрАТ «Львівобленерго» є оцінка максимального очікуваного рівня дугових перенапруг, їхнього поширення у мережі та впливу нової КЛ на кратності перенапруг.

**Матеріали і результати досліджень.** Дослідження перенапруг під час дугових ОЗЗ було виконано для ділянки електричної мережі 35 кВ ПрАТ «Львівобленерго», схема якої наведена на рис. 1. Повітряно-кабельна мережа живиться від секції шин 35 кВ підстанції (ПС) «Любінь-Т» 110/35/10 кВ. ПС «Оліяр» має зв'язок з електричною мережею 35 кВ кабельною лінією «Любінь-Т–Оліяр» довжиною 16 км, яка виконана кабелем типу АПвЕгаПУ-1×120.

Загальна довжина повітряних ліній ЕМ 35 кВ становить 63 км та кабельних ліній – 16 км. Ємнісний струм замикання на землю в ЕМ 35 кВ без КЛ дорівнює 5,8 А. Ємнісний струм замикання на землю ЕМ 35 кВ з КЛ «Любінь-Т–Оліяр» дорівнює 56,1 А.

Для дослідження дугових перенапруг під час ОЗЗ в електричній мережі 35 кВ було використано цифровий комплекс REC [12].

Схема ЕМ 35 кВ у трифазному виконанні сформована з цифрових моделей елементів електричної мережі: джерела живлення, силових трансформаторів, розподільних шин, повітряних і кабельних ліній (встановленою кількістю комірок від довжини лінії), навантаженням ТП. Оскільки досліджувана схема електричної мережі є громіздкою, то на рис. 2 зображено її фрагмент.

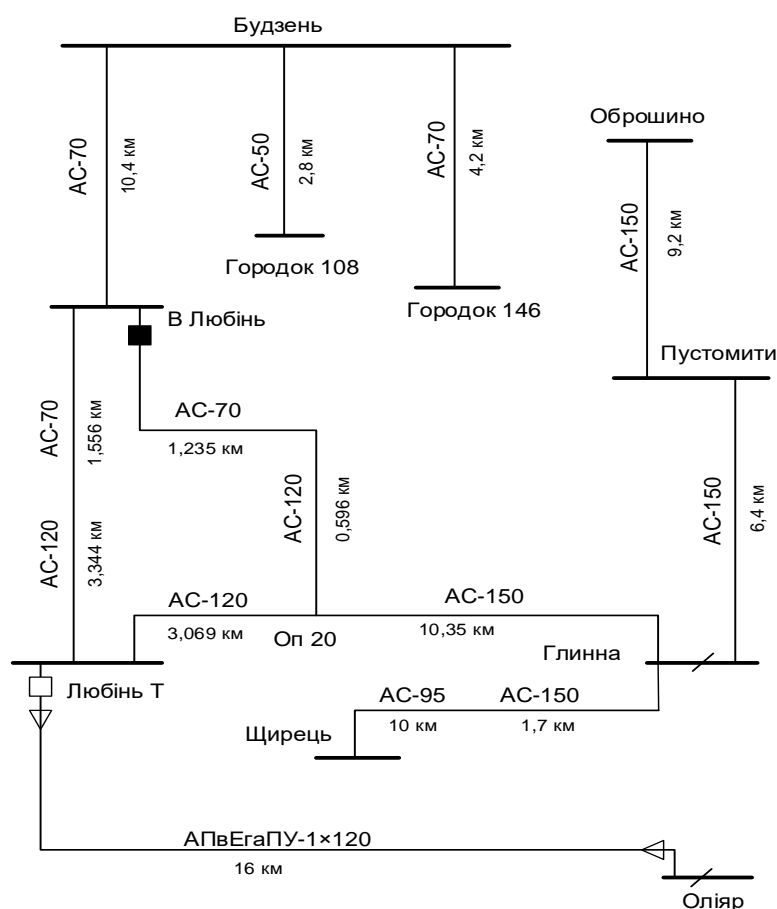


Рис. 1

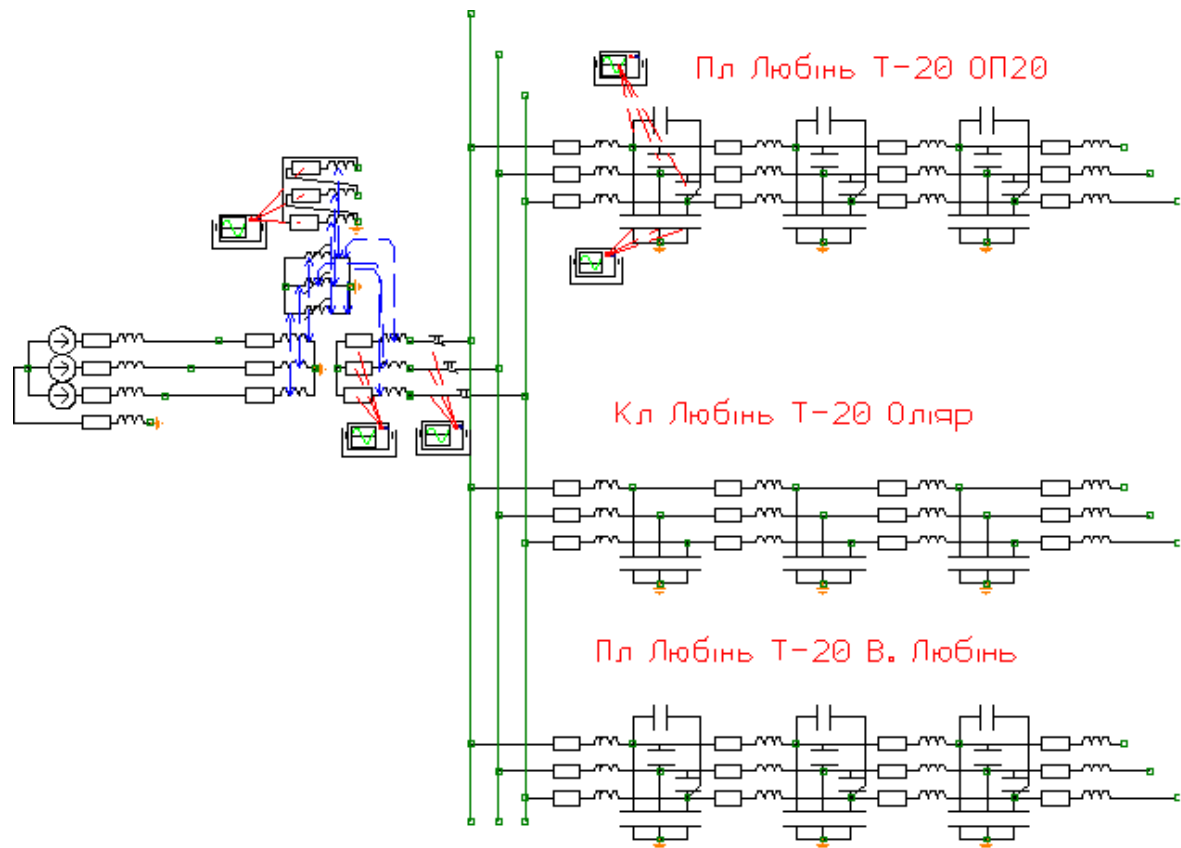


Рис. 2

Указані елементи електричної мережі були представлені параметрами, обчисленими відповідно до їхнього типу та конструктивного виконання. Для отримання адекватної картини перехідного процесу та рівня перенапруг було детально враховано активні опори струмопроводів з урахуванням поверхневого ефекту, ємності фаз і міжфазні ємності, провідності току та параметри трансформаторів напруги.

Із відомих теорій виникнення та розвитку перенапруг під час ОЗЗ в ЕМ Петерсена, Петерса-Слепяна та Белякова-Джуварли, теорія Петерсена дає найбільші теоретичні значення перенапруг, які перевищують  $4U_{тф}$  [3, 6, 7]. Авторами була отримана кратність дугових перенапруг за теорію Петерсена  $4,67U_{тф}$ . Тому під час комп'ютерного моделювання дугових перехідних процесів у досліджуваній мережі для отримання можливих максимальних кратностей перенапруг використовувалася теорія Петерсена.

Дослідження дугових перехідних процесів у ЕМ 35 кВ виконано без КЛ «Любінь-Т-Оліяр» та з КЛ за умови виникнення ОЗЗ у різних місцях мережі: на 34-й опорі ПЛ «В.Любінь-Будзень» (зафіксовано експлуатацією) та на шинах 35 кВ підстанцій мережі. У таблиці наведено результати отриманих максимальних перенапруг та їхні кратності відносно номінальної фазної напруги  $U_{тф ном}$  за ОЗЗ на 34-й опорі ПЛ «В.Любінь-Будзень».

У місці дугового ОЗЗ на 34-й опорі ПЛ «В.Любінь-Будзень» було отримано кратність перенапруги 4,3. Було виявлено, що значення перенапруг на шинах всіх підстанцій досліджуваної електричної мережі перевищувало значення перенапруги в місці ОЗЗ. Так, на шинах 35 кВ підстанцій «Городок 108» і «Городок 146» було отримано значення найбільшої кратності перенапруги 5,4, яке на 25 % перевищує кратність перенапруги в місці ОЗЗ.

ПС	без КЛ		з КЛ	
	$u(t)_{\max ф}$	$K_U$	$u(t)_{\max ф}$	$K_U$
Будзень	135,53	4,7	160,25	5,6
Глинна	126,71	4,4	130,16	4,6
Городок 108	155,61	5,4	162,94	5,7

Городок 146	153,64	5,4	175,05	6,1
В.Любінь	133,98	4,7	148,24	5,2
Любінь-Т	133,87	4,7	141,5	5,0
Щирець	144,84	5,1	131,6	4,6
Пустомити	129,87	4,5	131	4,6
Оброшино	136,32	4,8	132,8	4,6
Оліяр	0,0	0,0	142,13	5,0
місце ОЗЗ	123,13	4,3	123,13	4,3

На рис. 3 наведено розраховані миттєві значення фазних напруг на підстанції «Глин-

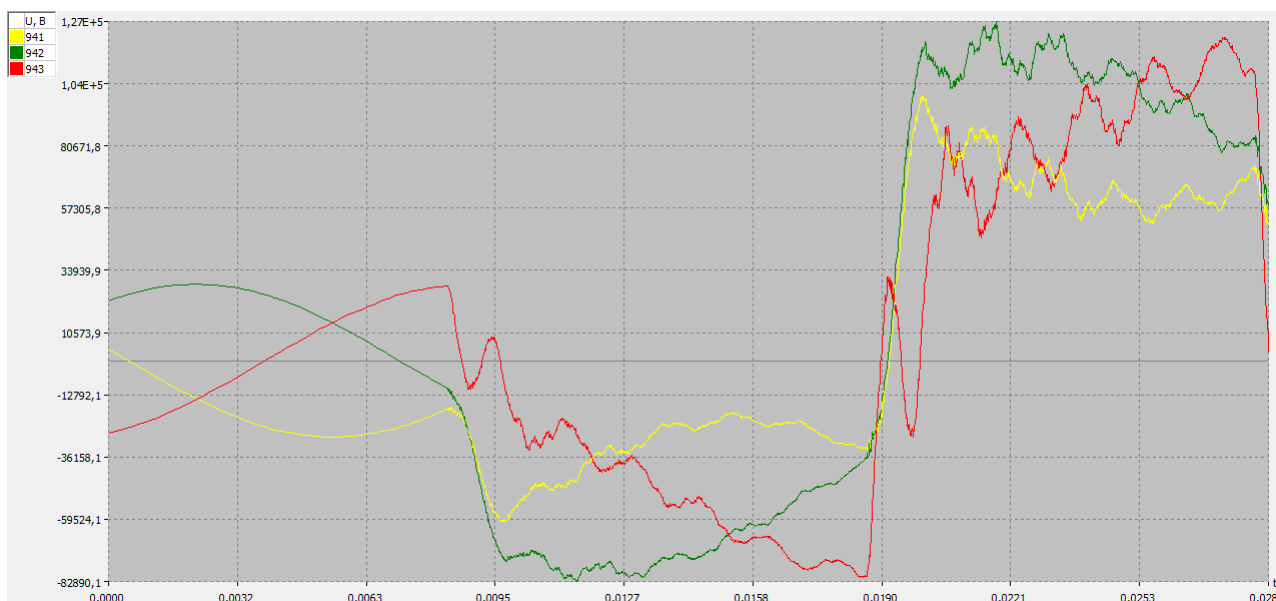


Рис. 3

на» за розвитку ОЗЗ на 34-й опорі ПЛ «В.Любінь–Будзень» з КЛ «Любінь-Т–Оліяр».

Збільшення ємнісного струму замикання на землю в електричній мережі завдяки приєднанню КЛ «Любінь-Т–Оліяр» призводить до такого результату: кратність перенапруги в місці ОЗЗ не змінилася,  $K_U = 4,3$ ; поширення перенапруги в лініях мережі від місця ОЗЗ до шин підстанцій супроводжується збільшенням її рівня. Максимальна кратність перенапруги 6,1 була зафіксована на шинах 35 кВ ПС «Городок 146», що на 42 % перевищує кратність перенапруги в місці ОЗЗ. Кабельна лінія впливає на поширення перенапруги в мережі. На шинах групи підстанцій мережі спостерігалось підвищення рівня напруги порівняно з мережею без КЛ, а на інших підстанціях – зниження (таблиця).

Дослідження дугових ОЗЗ у різних місцях мережі (шини 35 кВ підстанцій) показали, що кратність перенапруг у місцях ОЗЗ може перевищувати значення 4,3, а на шинах 35 кВ підстанцій мережі, віддалених від місця ОЗЗ, може перевищувати 6. Так, у разі дугового ОЗЗ на шинах 35 кВ ПС «Глинна» з урахування КЛ «Любінь-Т–Оліяр» (за ємнісного струму замикання мережі 56,1 А) у місці виникнення ОЗЗ було отримано кратність перенапруги 4,8. Водночас рівень перенапруг на шинах 35 кВ підстанцій мережі відрізнявся від рівня перенапруги в місці ОЗЗ. Були отримані кратності перенапруг на шинах підстанцій мережі в межах від -5 % до 37 % відносно  $K_U = 4,8$ .

**Висновки.** Перенапруги під час дугових ОЗЗ переривчастого характеру в ЕМ 35 кВ з ізолюваною нейтраллю можуть перевищувати відомий теоретично обґрунтований рівень перенапруги за теорією Петерсена. Кратність перенапруги, отримана під час комп'ютерного моделювання, перевищила 6, що корелюється із результатами досліджень інших авторів [5, 6].

Поширення перенапруги в мережі від місця виникнення дугового ОЗЗ супроводжується як зростанням, так і зниженням її кратності відносно кратності перенапруги в місці виникнення ОЗЗ. Підсилення й ослаблення рівня перенапруг в електричній мережі залежить від схеми мережі та місця ОЗЗ у мережі, тому для отримання якісної картини про максимально можливий рівень перенапруг в електричній мережі з ізольованою нейтраллю необхідно враховувати поширення перенапруги від місця виникнення ОЗЗ.

Будівництво нових кабельних ліній в повітряних ЕМ 35 кВ з ізольованою нейтраллю можуть призводити до підвищення рівня перенапруг та змінювати характер їхнього поширення в мережі під час дугового ОЗЗ.

1. Правила улаштування електроустановок. Видання офіційне. Міненерговугілля України. Х.: Форт, 2017. 760 с.
2. Беляков Н.Н. Исследование перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6 и 10 кВ с изолированной нейтралью. *Электричество*. 1957. № 5. С. 31–36.
3. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостного тока. М.: Энергия, 1971. 152 с.
4. Сабарно Л.Р., Кошман В.І., Севастюк І.М. Дослідження дугових перенапруг у випадку одно- і двофазних замикань на землю у розподільній мережі з ізольованою нейтраллю. *Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК*. 2017. № 1(6). С. 17–21.
5. Varetsky Y., Bakhor Z., Ravlyk A. Transients in 10-35 kV electric networks with ungrounded neutrals under earth faults. Proc. of VII Int. Symp. *Short Circuit Currents in Power Systems*, Warsaw, 1996. Pp. 1.20.1-1.20.4.
6. Кротенок В.В. Расчет перенапряжений в распределительной сети при прерывистых дуговых замыканиях на землю с различными режимами заземления нейтрали. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-perenapryazheniy-v-raspredelitelnoy-seti-pri-preryvistykh-dugovykh-zamykaniyah-na-zemlyu-s-razlichnymi-rezhimami-zazemleniya/viewer>. (дата звернення: 10.08.2021).
7. Шуин В. Расчет перенапряжений при дуговых прерывистых замыканиях на землю. URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2009/58/09.php> (дата звернення: 10.08.2021).
8. Сегеда М.С., Бахор З.М., Равлик Н.О., Бакало Г.Ш. Внутрішні перенапруги в електричних мережах 6...10 кВ та захист від перенапруг. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2006. № 1 (13). С. 23–30.
9. Равлик Н.О., Равлик О.М., Сегеда М.С. Перенапруги в електричних мережах власних потреб електростанцій, що виникають під час комутацій вакуумними вимикачами, та їх обмеження. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 1. С. 63–67. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.01.063>
10. Сегеда М.С., Равлик Н.О. Обмеження внутрішніх перенапруг в електричних мережах власних потреб електростанцій під час однофазних замикань на землю. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2014. № 6. С. 116–119.
11. Варецький Ю.О., Равлик О.М., Бахор З.М. Особливості моделювання процесів при замиканнях на землю у мережах з ізольованою нейтраллю. *Технічна електродинаміка*. 1994. № 2. С. 61–63
12. O. Ravlyk, N. Ravlyk. Digital Complex for Modeling Processes in Electric Circuits with Protection and Automatic Devices. *Energy Engineering and Control Systems*. 2017. Vol. 3. No 1. Pp. 23–28. DOI: <https://doi.org/10.23939/jeecs2017.01.023>

## OVERVOLTAGE DURING ARC SINGLE-PHASE EARTH FAILURES IN 35 KV ELECTRICAL NETWORKS

M.S. Sehedra, O.M. Ravlyk, Z.M. Bakhor, A.Ya. Yatseyko, N.B. Diachenko

Lviv Polytechnic National University,

S. Bandera str., 12, Lviv, 79013, Ukraine

e-mail: [msehedra@ukr.net](mailto:msehedra@ukr.net), [Ravlyk.OM@gmail.com](mailto:Ravlyk.OM@gmail.com)

*The study results of overvoltages during arc single-phase earth faults of intermittent nature in the 35 kV electric network with isolated neutral are presented. With the help of computer simulations of transients in the electrical network, the maximum multiplicities of overvoltages at the point of occurrence of single-phase arc earth faults have been obtained. According to known theories of the occurrence and development of overvoltages, it exceeds theoretically expected. The change of the overvoltage level on the 35 kV busbars of the network substations, electrically connected to the place of occurrence of the single-phase earth fault, has been shown. The influence of the cable line on the overvoltage multiplicity is shown. Ref. 12, fig. 3, table.*

**Keywords:** overvoltage, single-phase circuit, electrical network, computer simulation.

1. Rules of arrangement of electrical installations. The publication is official. Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine. Kharkiv: Fort Publishing House, 2017. 760 p. (Ukr)
2. Belyakov N.N. Investigation of overvoltage at arc earth faults in 6 and 10 kV networks with isolated neutral. *Elektrichestvo*. 1957. No 5. Pp. 31–36. (Rus)
3. Likhachev F.A. Earth faults in networks with isolated neutral and capacitive current compensation. Moscow: Energiya, 1971. 152 p. (Rus)
4. Sabarno L.R., Koshman V.I., Sevastyuk I.M. Investigation of arc overvoltages in the case of single- and two-phase earth faults in a distribution network with isolated neutral. Energy and computer-integrated technologies in agriculture. 2017. No 1 (6). Pp. 17–21. (Ukr)
5. Varetsky Y., Bakhor Z., Ravlyk O. Transients in 10-35 kV electric networks with ungrounded neutrals under earth faults. Proc. of VII Int. Symp. *Short Circuit Currents in Power Systems*, Warsaw, 1996. Pp. 1.20.1-1.20.4.
6. Krotenok V.V. Calculation of overvoltage in the distribution network with intermittent arc earth faults with different modes of neutral grounding URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-perenapryazheniy-v-raspredelitelnoy-seti-pri-preryvistyh-dugovyh-zamykaniyah-na-zemlyu-s-razlichnymi-rezhimami-zazemleniya/viewer>. (accessed: 10.08.2021). (Rus)
7. Shuin V. Calculation of overvoltage at arc intermittent earth faults. URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2009/58/09.php> (accessed: 10.08.2021). (Rus)
8. Sehedra M.S., Bakhor Z.M., Ravlyk N.O., Bakalo G.S.H. Internal overvoltages in 6...10 kV electrical networks and overvoltage protection. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2006. No 1(13). Pp. 23–30. (Ukr)
9. Ravlyk N.O., Ravlyk O.M., Sehedra M.S. Overvoltages in electric networks of own needs of power plants during the commutations of vacuum switches, and their limitations. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2019. No 1. Pp. 63–67. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.01.063> (Ukr)
10. Sehedra M.S., Ravlyk N.O. Limitation of internal overvoltages in electric networks of own needs of power plants during single-phase earth faults. *Naukovyy visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*. 2014. No 6. Pp. 116–119. (Ukr)
11. Varetsky Yu.O., Ravlyk O.M., Bakhor Z.M. Features of modeling of processes at short circuits to the earth in networks with the isolated neutral. *Tekhnichna elektrodynamika*. 1994. No 2. Pp. 61–63. (Ukr)
12. O. Ravlyk, N. Ravlyk. Digital Complex for Modeling Processes in Electric Circuits with Protection and Automatic Devices. *Energy Engineering and Control Systems*. 2017. Vol. 3. No 1. Pp. 23–28. DOI: <https://doi.org/10.23939/jeecs2017.01.023>

Надійшла: 30.08.2021

Received: 30.08.2021