

element of which is a discharge pulse generator, the power part of which is built on a thyristor element base. As a storage device, capacitors of 50 ... 600 μF are used. The charging voltage of the capacitor was 110 ... 190 V, the frequency of the discharge pulses was 0.025 ... 0.5 kHz.

Processing of the research results is carried out using mathematical statistics using the "Statistika" software package (version 10.0).

The results of the study show that the highest concentration of colloidal fraction is achieved at instantaneous values of voltage 160 V and frequency 0,1 kHz.

Keywords: *electrotechnological complex, volumetric-electrospark processing of materials, powder dispersion, colloid fraction, nanocomposites*

УДК 536.21

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ТЕРМІЧНОГО УРАЖЕННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ОПОР СТРУМАМИ ОДНОФАЗНОГО ЗАМИКАННЯ НА ЗЕМЛЮ

А. О. КВІЦИНСЬКИЙ, кандидат технічних наук, доцент

О. В. ШЕЛІМАНОВА, кандидат технічних наук, доцент

**Національний університет біоресурсів і природокористування
України**

В. Г. САНТОЦЬКИЙ, інженер НПЦР ОЕС України

Анотація. Допустиму тривалість однофазних замикань на землю (ОЗЗ) у мережах з ізольованою нейтраллю і струмами замикання на землю до 10 А в пострадянських країнах не встановлено. Мета даного дослідження – унормувати допустиму тривалість режиму ОЗЗ, яка не порушує термічної стійкості опор. Експериментальні дослідження виконувалися на полігонах інституту «Укрсільенергопроект». Показано, що ізольовану нейтраль мережі 6–20 кВ зі струмами ОЗЗ до 10 А не слід заземлювати через високоомний резистор. У мережах 20 кВ слід застосовувати компенсацію ємнісних струмів і обмежувати час існування ОЗЗ чотирма годинами. З метою зменшення кількості випадків ОЗЗ, на проміжних опорах повітряних ліній 20 кВ слід встановлювати стрижньові ізолятори, а на анкерних – підвісні.

Ключові слова: *залізобетонна опора, термічне ураження заземлювача, струм однофазного замикання на землю*

Актуальність. За протяжністю повітряні лінії (ПЛ) напругою 10 кВ у сільській місцевості на залізобетонних опорах зі струмами ОЗЗ до 10 А перевищують протяжність усіх разом узятих ПЛ напругою понад 1 кВ.

Режим заземлення нейтралі таких електричних мереж є одним з питань, що активно обговорюються фахівцями впродовж останніх 10–15 років [1]. Допустиму тривалість ОЗЗ в мережах з ізольованою нейтраллю і струмами замикання на землю до 10 А в пострадянських країнах не встановлено.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Відповідно до [2], у мережах з ізольованою нейтраллю можна допускати роботу повітряних і кабельних ліній електропередавання із замиканням на землю до ліквідації пошкодження. У такому випадку, до пошуку місця пошкодження персонал повинен приступати негайно і усунути його в найкоротший термін.

Час «найкоротшого терміну» не обумовлено. Іноді ОЗЗ існує в мережі набагато довше, ніж це допустимо за часом термічного ураження заземлювача опори. Це призводить до таких явищ, як термічне ураження природних заземлювачів залізобетонних опор на ПЛ, перегорання арматури в підземній частині опори, падіння опори, загибель людей. Поодинокі падіння залізобетонних опор, і через це загибель людей, виникають в Україні щорічно. Останніми роками вони були: у Гадяцькій філії ПАТ «Полтаваобленерго» (15.05.2015); Свердловському РЕМ ТОВ «Луганське енергетичне об'єднання» (08.05.2013 р.); Борщівському РЕМ ВАТ «Тернопільобленерго» (13.05.2013 р.); Каховському РЕМ ВАТ «Херсонобленерго»; Калинівських електромережах ВАТ «Вінницяобленерго»; ПАТ ЕК «Житомиробленерго».

Мета дослідження – залежно від опору заземлення і сили струму ОЗЗ унормувати допустиму тривалість режиму ОЗЗ, яка не порушує термічної стійкості опор.

Матеріали і методи дослідження. Розподіл ємнісних струмів замикання на землю в мережах 10 кВ у сільській місцевості визначено за даними 85 проектів, виконаних інститутом «Укрсільенергопроект». Процеси термічного ураження заземлювачів залізобетонних опор ПЛ 10 кВ експериментально досліджено на полігонах інституту «Укрсільенергопроект» в Іванківському і Кагарлицькому районах Київської області. Вимірювання опору заземлення залізобетонних опор в ненаселеній місцевості було виконано співробітниками інституту «Укрсільенергопроект».

Результати дослідження та їх обговорення. Розподіл ємнісних струмів замикання на землю таких ПЛ наведено на рис. 1.

У 78% випадків струми ОЗЗ в мережах становлять до 5 А. Це, як правило, мережі з повітряними лініями і незначними за довжиною кабельними вставками. Збільшення струмів ОЗЗ від 6 А до 10 А відбувається за рахунок кабельних вставок і окремих, незначних за довжиною, кабельних ліній.

Вимірюванням опору заземлення залізобетонних опор в ненаселеній місцевості встановлено, що він може бути від 20 Ом до 3000 Ом. Так, одностоякові проміжні опори, встановлені в піщаних ґрунтах Полісся (в районі сіл Коленці і Блідча) мали влітку опір заземлення ($R_{оп}$) від 400 до 1200 Ом на рівнинах і до 3000 Ом на піщаних косогорах і

штучних насипах, а в чорноземній зоні (Кагарлицький район) – від 25 до 45 Ом. Розрахункове значення опору природних заземлювачів (залізобетонних стояків) проміжних опор ПЛ напругою 6 – 20 кВ становить від $0,45\rho$ до $0,5\rho$, де ρ – розрахунковий питомий опір ґрунту, Ом·м.

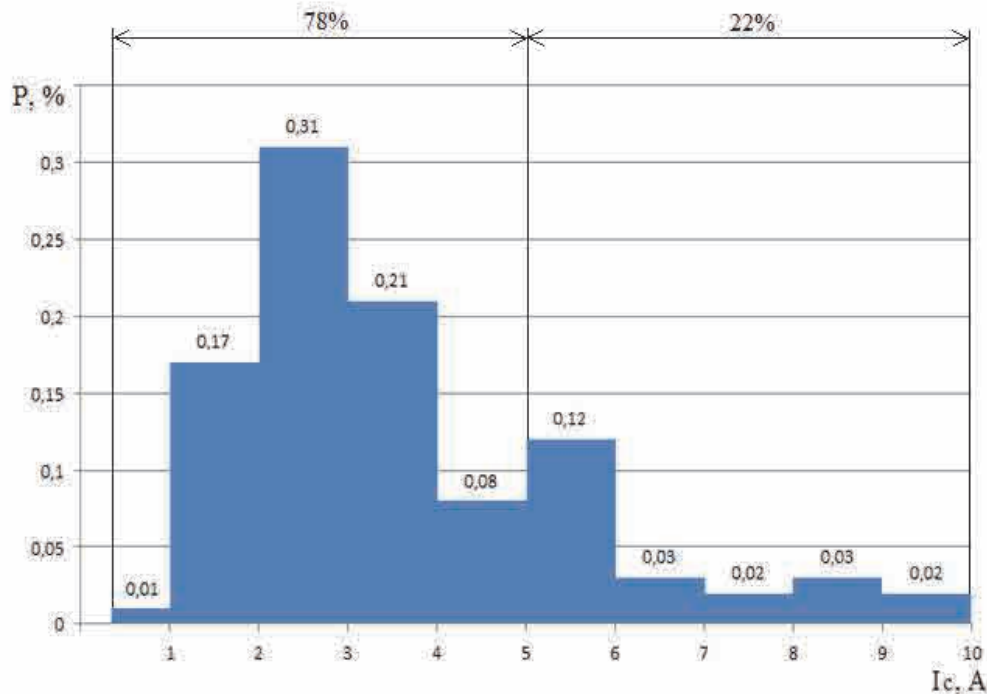


Рис. 1. Розподіл ємнісних струмів замикання на землю в мережах 10 кВ у сільській місцевості

За нашими дослідженнями, мінімальна початкова потужність, з якої може починатися і тривати до завершення процес термічного ураження підземної частини залізобетонної опори в мережах 6–20 кВ, становить:

а) 1,5–1,8 кВт – у разі встановлення опори в ґрунтах з $\rho_3 \leq 50$ Ом·м (чорноземи з вологістю 16%);

б) 4,5–5,0 кВт – у разі встановлення опори в ґрунтах з ρ_3 – від 1000 Ом·м до 1500 Ом·м (пісок з вологістю 3–4%).

За результатами експериментальних досліджень у процесі термічного ураження підземної частини опори виділено два етапи (рис. 2).

На першому етапі опір заземлення і напруга на опорі поступово зменшуються на 20–50%, а температура ґрунту безпосередньо біля опори підвищується до 50–70 °С. Наприкінці цього етапу опір заземлювача і напруга на опорі знову підвищуються до величин близьких до початкових, а температура ґрунту біля опори підвищується до 80–90 °С. З цього починається другий етап – опір заземлення і напруга на опорі по відношенню до землі починають стрімко підвищуватися і процес завершується повним термічним ураженням заземлювача – опора з ОЗЗ отримує потенціал близький до фазного.

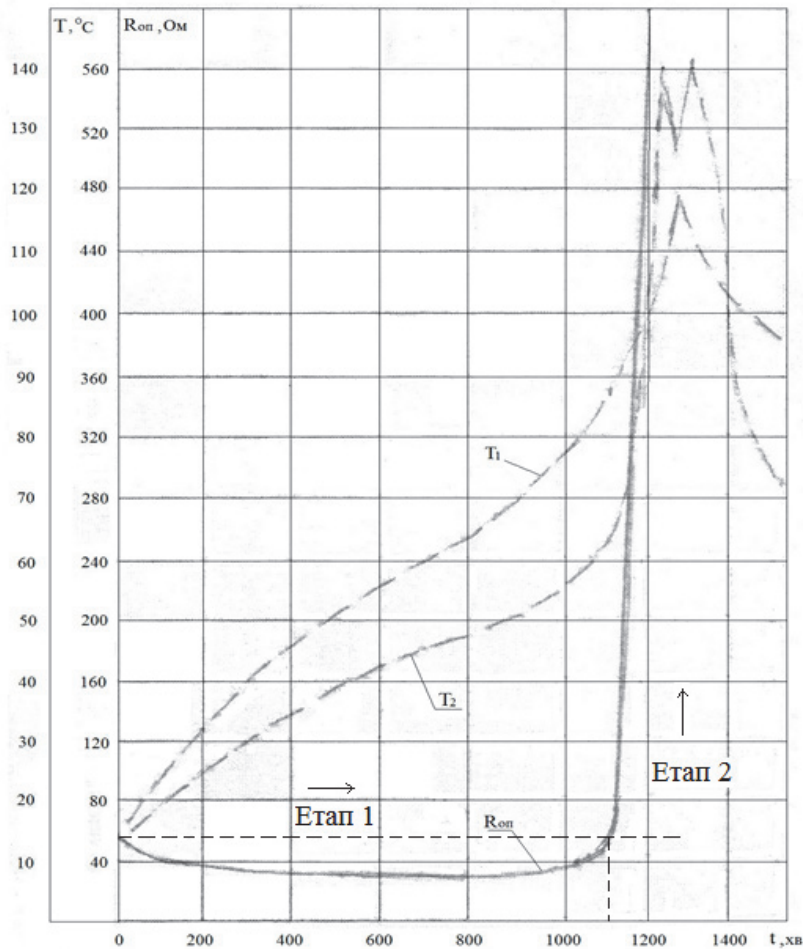


Рис. 2. Етапи термічного ураження заземлювача залізобетонної опори:

T_1 – температура ґрунту біля опори на глибині 32 см;
 T_2 – температура ґрунту на відстані 20 см від опори на глибині 22 см;
 $R_{оп}$ – опір заземлення

Час існування першого етапу буде найдовшим, якщо ОЗЗ відбувається з повнотою замикання близькою до одиниці, тобто через малий опір і найкоротшим, якщо ОЗЗ відбувається на опорі, опір заземлення якої критичний для мережі

$$R_{кр.} = \frac{U_{\phi}}{I_c}. \quad (1)$$

За критичного опору в підземній частині опори в землю виділяється максимальна потужність, яка визначається за формулою

$$P_{оп.мах} = 0,5 \cdot U_{\phi} \cdot I_c. \quad (2)$$

Для мереж напругою 6, 10, 15 і 20 кВ зі струмом замикання на землю $I_c = 10$ А величина критичного опору $R_{кр.}$ буде, відповідно, 380, 635, 950 і 1270 Ом, а максимальна потужність $P_{оп.мах}$ – 19,5; 31,7; 45,4 і 63,5 кВт (рис. 3).

На рис. 3 видно, що зі збільшенням номінальної напруги мережі в підземній частині опори суттєво збільшується потужність, яка виділяється в землю за одних і тих самих значень I_c і $R_{оп}$, що призводить до скорочення часу термічного ураження і суттєвого обмеження допустимого часу, протягом якого ОЗЗ необхідно вимикати.

З використанням даних експериментальних досліджень, які проводилися в різні часи (з кінця 60-х років минулого століття до сьогодні) визначено допустимий час існування ОЗЗ в мережі 10 кВ сільських районів за умовою недопущення термічного ураження підземної частини опори (рис. 4).

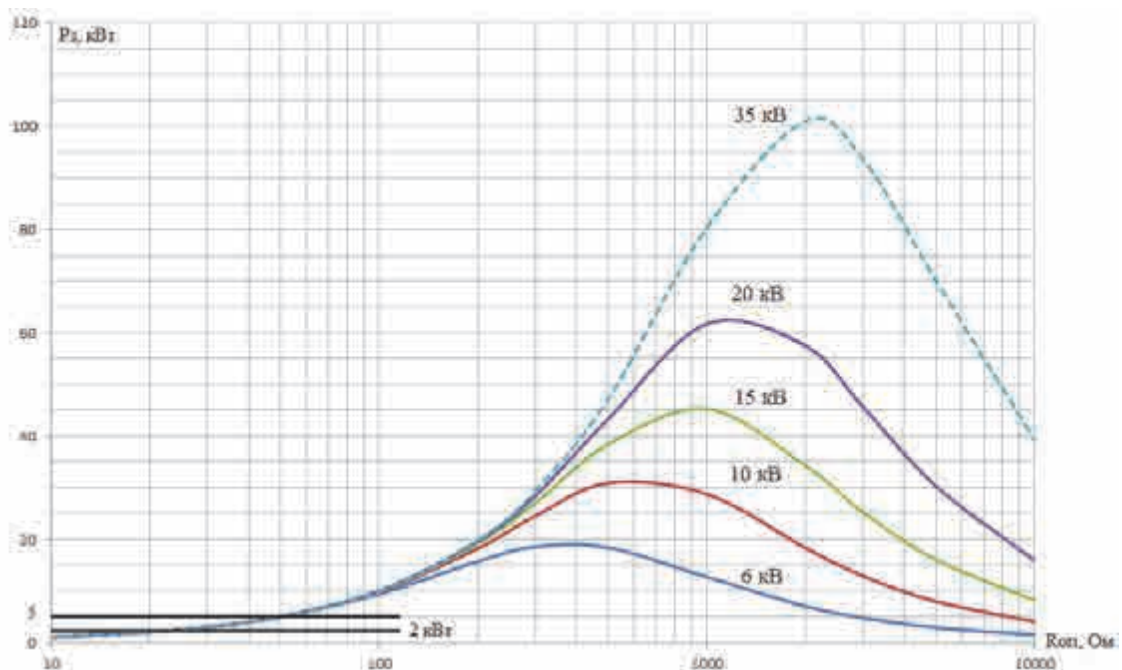


Рис. 3. Залежність потужностей, які виділяються в підземній частині залізобетонної опори з ОЗЗ, від опору розтікання струму з опори в землю для мереж напругою 6, 10, 15, 20 кВ зі струмом $I_c = 10A$

Допустимий час існування ОЗЗ в мережі визначається за кривими 1, 2, 3 залежності від струму I_c і величини опору заземлення проміжних опор в ненаселеній місцевості (I_c і $R_{оп}$ повинні бути відомими). Так, за струму $I_c \leq 2,0$ А час існування ОЗЗ в мережі може бути необмеженим за умови термічного ураження підземної частини опори, але обмежений до максимально-можливого за вимогами другого абзацу п.12.12.9 ГКД 34.20.507-2003.

За струму $I_c = 10$ А ОЗЗ в мережі може бути добу (крива 1) у разі, якщо опір природних заземлювачів не буде перевищувати 30 Ом, а це дуже малоймовірно.

За струму $I_c = 5$ А ОЗЗ може бути 5 годин (крива 2) за відсутності в мережі опор, опір заземлення яких перевищує 300 Ом, а за наявності опор з опором заземлення понад 600 Ом – не більше 3 годин (крива 3).

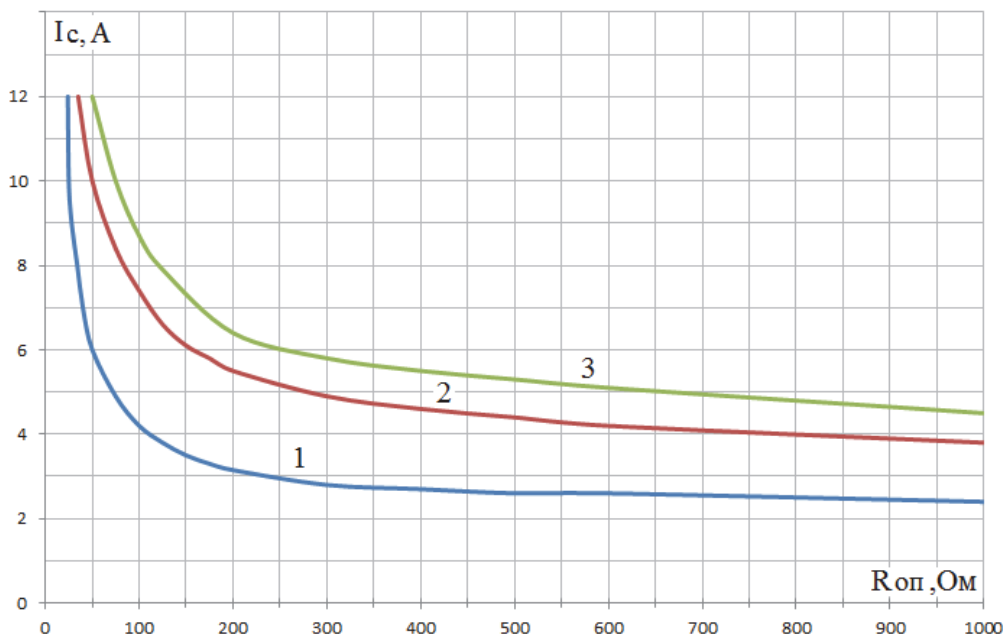


Рис. 4. Допустимий час існування ОЗЗ в мережі напругою 10 кВ з ізолюваною нейтраллю залежно від струму замикання на землю I_c і опору заземлення залізобетонної опори із ОЗЗ за умови недопущення термічного ураження її підземної частини:

1 – до 24 годин; 2 – до 5 годин; 3 – до 3 годин

Зі збільшенням струму I_c до 6–10 А та існування в мережі опор, опір заземлення яких понад 400 Ом, допустимий час існування ОЗЗ може бути менше за годину.

У разі реконструкції мереж 6–10 кВ з переводом їх на напругу 20 кВ у багатьох випадках протяжність ПЛ 20 кВ в мережі буде такою самою, як і протяжність ПЛ 10 кВ, а струм I_c мережі 20 кВ зросте удвічі, порівняно з мережею 10 кВ. Тому доцільно порівняти такі мережі в частині безпеки в режимі роботи з ОЗЗ. Порівняння зроблено для мережі 10 кВ зі струмом $I_c = 5$ А і для мережі 20 кВ зі струмом $I_c = 10$ А.

Порівняння зроблено для двох випадків:

- опір опор з ОЗЗ однаковий – від 20 до 50 Ом, у ґрунтах з $\rho_{екв.}$ від 40 до 100 Ом·м (див. таблицю);
- 500 Ом у ґрунтах з $\rho_{екв.}$ 1000 Ом·м (рис. 5).

У мережі 10 кВ термічного ураження заземлювачів з опором 20, 30 і 50 Ом не відбувається. У цих мережах потужність, яка виділяється в підземній частині опори, менша від потужності, з якої починається і за якої триває процес термічного ураження.

У мережі 20 кВ термічне ураження заземлювачів відбувається за всіх значень опору заземлення, і якщо воно не буде локалізовано на першому етапі термічного ураження (рис. 2), то другий етап його пройде дуже швидко з виділенням максимальної потужності $P_{оп.макс.} = 63,5$ кВт (рис. 5). За таких умов, підвищення напруги на опорі до фазної (12,7 кВ) може призвести до перегорання арматури в підземній частині опори.

Потужність, яка виділяється в підземній частині залізобетонної опори з ОЗЗ ПЛ напругою 11 кВ ($I_c = 5$ А) і 22 кВ ($I_c = 10$ А) в електричній мережі однакової довжини залежно від опору розтікання струму

Номинальна напруга, кВ	Потужність (кВт), у разі опору розтікання струму, Ом							
	20	30	50	75	100	150	200	250
11	0,5	0,75	1,25	1,869	2,5	3,7	4,9	6,0
22	2,0	3,0	5,0	7,5	9,9	14,8	19,5	24,0

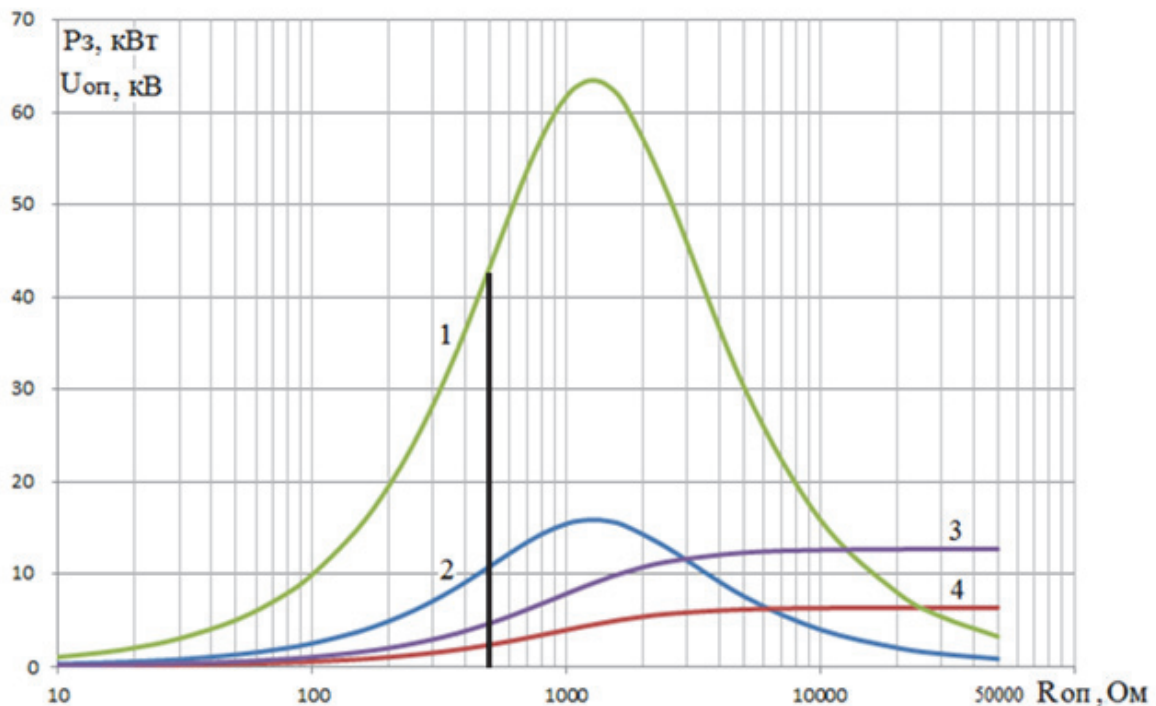


Рис. 5. Потужність і напруга опор ПЛ номінальної напруги 11 і 22 кВ зі струмами ОЗЗ $I_c = 5$ А і $I_c = 10$ А відповідно:

- 1 – потужність у підземній частині опори ПЛ 20 кВ;
- 2 – потужність у підземній частині опори ПЛ 10 кВ;
- 3 – напруга на опорі ПЛ 20 кВ; 4 – напруга на опорі ПЛ 10 кВ

У разі ОЗЗ в мережі 10 кВ, на опорах з опором заземлення 500 Ом перший етап процесу термічного ураження буде проходити за початковою потужністю $P_{оп} = 11$ кВт і триватиме близько 4 годин, що достатньо для локалізації пошкодження.

У мережі 20 кВ перший етап процесу термічного ураження буде проходити за початковою потужністю 45 кВт і триватиме не більше 10–15 хв, що недостатньо для локалізації пошкодження. Другий етап термічного ураження також закінчиться дуже швидко та з перегоранням арматури опори. Отже, небезпека в мережі 20 кВ буде значно вищою.

Висновки і перспективи. 1. Ізольовану нейтраль мережі 6–20 кВ зі струмами ОЗЗ до 10 А не слід заземлювати через високоомний резистор у разі, якщо мережа має повітряні лінії на залізобетонних опорах зі

встановленими на них штирьовими ізоляторами і опори, опір яких не нормують, а забезпечують природною провідністю підземної частини опори.

Встановлення високоомного резистора в нейтралі таких мереж призведе до прискорення термічного ураження підземної частини опори з ОЗЗ і обмеження часу для локалізації пошкодження, що в кінцевому результаті погіршить безпеку в мережі.

2. Для мереж 6–20 кВ необхідно розробити НД з визначення допустимого часу існування ОЗЗ для недопущення термічного ураження підземної частини опори та внести відповідні зміни в п.12.12.9 ГКД 34.20.507-2003 «Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила».

3. У мережах 20 кВ слід застосовувати компенсацію ємнісних струмів починаючи з 5 А і обмежувати час існування ОЗЗ чотирма годинами (на підставі досвіду експлуатації ПЛ 20 кВ Чехії).

4. З метою зменшення кількості випадків ОЗЗ, на проміжних опорах ПЛ 20 кВ слід встановлювати стрижньові ізолятори, а на анкерних – підвісні.

Список літератури

1. Квіцинський А. О. Розрахунок процесу термічного ураження залізобетонних опор струмами однофазного замикання на землю / А. О. Квіцинський, О. В. Шеліманова. – Науковий вісник НУБіП України. – 2016. – № 242. – С. 204–210.

2. ГKD 34.20.507-2003 Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила. – Х. : Форт, 2006. – 536 с.

References

1. Kvitsynskiy, A. O., Shelimanova, O. V. (2016). Rozrakhunok protsesu termichnoho urazhennia zalizobetonnykh opor strumamy odnofaznoho zamykannia na zemliu [Calculation of thermal shock of reinforced concrete pillars by currents single-phase ground fault]. Naukovyi visnyk NUBiP Ukrainy, 242, 204–210.

2. HKD 34.20.507-2003 Tekhnichna ekspluatatsiia elektrychnykh stantsii i merezh. Pravyla (2006). [Technical operation of electric power stations and networks. Rules]. Kharkiv: Fort, 536.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОГО ПОРАЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОПОР ТОКАМИ ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

**А. А. Квицинский,
А. В. Шелиманова,
В. Г. Сантоцкий**

Аннотация. Допустимая продолжительность однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в сетях с изолированной нейтралью и токами замыкания на землю до 10 А в постсоветских странах не установлена. Цель данного исследования – нормировать допустимую продолжительность режима ОЗЗ, не нарушающую термической устойчивости опор. Экспериментальные исследования выполнялись на

полигонах института «Укрсельэнергопроект». Показано, что изолированную нейтраль сети 6–20 кВ с токами ОЗЗ до 10 А не следует заземлять через высокоомный резистор. В сетях 20 кВ следует применять компенсацию емкостных токов и ограничивать время существования ОЗЗ четырьмя часами. С целью уменьшения количества случаев ОЗЗ, на промежуточных опорах воздушных линий 20 кВ следует устанавливать стержневые изоляторы, а на анкерных – подвесные.

Ключевые слова: железобетонная опора, термическое поражение заземлителя, ток однофазного замыкания на землю

EXPERIMENTAL STUDY OF THERMAL SHOCK OF REINFORCED CONCRETE PILLARS BY CURRENTS SINGLE-PHASE GROUND FAULT

A. O. Kvitsynsky,
O. V. Shelimanova,
V. G. Santosky

Abstract. *The permissible duration of single-phase earth faults (SEF) in networks with isolated neutral and grounding currents up to 10 A in post-Soviet countries is not established. The purpose of the research is to normalize the permissible duration of the regime of ultrasound, which does not violate the thermal stability of the supports. The research was carried out by the staff of the UkrSilEnergoProject Institute. It is shown that the isolated neutral of the 6-20 kV network with the currents of the SEF to 10 A should not be grounded through a high-resistance resistor. In networks of 20 kV, capacitive currents compensation should be used starting from 5 amperes and the limitation of the lifetime of the SEF for four hours. In order to reduce the number of cases of ultrasound in the intermediate supports of a 20 kV overhead line, rod insulators shall be installed, and anchor-pendant on anchors.*

Keywords: *reinforced concrete pillar, earthing switch's thermal shock, the current of single-phase ground fault*

UDC 514.18

MAPLE-MODELS OF MOVEMENT OF PARTS ON SURFACE SPHERE

A. V. NESVIDOMIN, candidate of technical sciences, senior lecturer
National University of life and environmental sciences of Ukraine

Abstract. *The main results of modeling the motion of a particle on a rough surface of a sphere in the function of an independent parameter are given t – time. In contrast to the line surfaces, analytical calculations of the motion of a particle on non-linear surfaces of rotation of the 2nd order are*

© A. V. Nesvidomin, 2017