

2. **Tony R. Kuphaldt.** Lessons In Electric Circuits, Volume II – AC, Sixth Edition, 2007. - 561 с.
3. **Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С.** Электрические машины и микромашины: Учеб. для электротехн. спец. вузов. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк., 1990. - 528 с.
4. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями. Подобр. ред. **М.Г. Чиликина.** М., «Энергия», 1971. - 624 с.
5. **Ion Boldea.** Electric drives. — Lexington, KY, USA — 2005, - 549 с.
6. **Чиликин М.Г., Сандлер А.С.** Общий курс электропривода: Учебник для вузов. - 6-е изд., доп. и перераб. - М.: Энергоиздат, 1981. - 576 с.
7. Теория электропривода, ч.1: учебное пособие / Сост.: А.Б. **Зеленов** – Алчевск, ДонГТУ, 2005. – 382 с.
8. LM2675 SIMPLE SWITCHER Power Converter High Efficiency 1A Step-Down Voltage Regulator, Texas Instruments Inc., Rev. June 2005
9. L293, L293D PUSH-PULL FOUR CHANNEL DRIVER WITH DIODES STMicroelectronics, July 2003.
10. **Rentyuk Vladimir** «Control stepper motors in both directions» EDN March 18, 2010.
11. **Кенио Такаши.** Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления: Пер. с англ., М.: Энергоатомиздат, 1987 – 199 с.
12. **Белов М.П., Новіков В.А., Розсудів Л. Н.** Автоматизований електропривод типових виробничих механізмів і технологічних комплексів. - 3-е изд., Испр .. - М.: Видавничий центр "Академія", 2007.
13. Мала гірнича енциклопедія. В 3-х т. / За ред. **В. С. Білецького.** — Донецьк: Донбас, 2004.

Рукопись поступила в редакцию 14.04.17

УДК 621.316.001.57

М.Л. БАРАНОВСЬКА, канд. техн. наук, доц., А.С. КУЗЬМЕНКО, старший викладач
Криворізький національний університет

АНАЛІЗ ТЕОРІЙ РІВНІВ ПЕРЕНАПРУГ ПРИ ЗАМИКАННІ ФАЗИ НА ЗЕМЛЮ ТА ЇХ ДОСЛІДЖЕННЯ НА ФІЗИЧНІЙ МОДЕЛІ

Мета. Метою даної роботи є виконання аналізу теорій і механізмів розвитку перенапруг при однофазних дугових замиканнях на землю (ОДЗ). Проаналізовано відомі теорії перенапруги Петерсена, Петерса і Слепяна, Белякова. Однофазні замикання на землю (ОЗЗ), що виникають у розподільчих мережах 6-10 кВ з ізолюваною нейтраллю, є переважним видом uszkodжень і складають більше 75% від загального числа uszkodжень. Перенапруги, що виникають при ОЗЗ, знижують електричну міцність ізоляції живильних кабелів, приводять до їхнього пробою та руйнування, багатомісним uszkodженням, подвійним замиканням на землю, дво- і трифазним коротким замиканням. Це пов'язано з відмовами в роботі електрообладнання, тривалими простоями технологічного устаткування, додатковими витратами на його відновлення та, в кінцевому рахунку, до зменшення продуктивності підприємства.

Методи. При виконанні теоретичних досліджень прийнято метод математичного моделювання розподільчих мереж напругою 6-10 кВ з ізолюваною нейтраллю при ОЗЗ. Розроблено і вдосконалено математичні моделі розподільчих мереж та обґрунтовано основні і малозначимі параметри, що впливають на перенапруги при замиканні фази на землю. При виконанні експериментальних досліджень прийнято метод замикання на землю однієї з штучно пошкоджених фаз зразка кар'єрного кабелю. Вимірювались навантажувальні параметри: рівні напруг в фазах, нейтралі і струм в пошкодженій фазі.

Наукова новизна. Докладно вивчено питання теорії дуги, зроблено висновок про те, що на розвиток перехідних процесів при ОЗЗ впливають умови виникнення дуги, середовище, в якому вона горить, швидкість зміни струму при переході через нуль, індуктивність фази мережі L , ємності фаз відносно землі C та величина опору кола замикання на землю. При ОЗЗ величина опору кола замикання на землю змінюється в широких межах.

Практична значимість. Розглянуто залежність рівнів перенапруг від величини опору кола замикання на землю. Виконано дослідження рівнів перенапруг, що виникають в розподільчих мережах 6-10 кВ з ізолюваною нейтраллю, на фізичній моделі.

Результати. З результатів експеримента видно, що комплексне використання в розподільчій мережі струмообмежувального резистора в нейтралі і нелінійних обмежувачів перенапруг (ОПН) дозволило знизити перенапруги до нормованих значень в межах 1,7-1,8 від номінальної напруги.

Ключові слова: розподільча мережа, дуга, однофазні замикання на землю (ОЗЗ), опір кола замикання на землю, рівень перенапруг, нелінійний обмежувач перенапруг (ОПН).

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Однофазні замикання на землю (ОЗЗ) в розподільчих мережах 6-10 кВ - переважний вид uszkodжень, який становить понад 75 % від загального числа uszkodжень. ОЗЗ представляють значну небезпеку для людей, установок і розподільчих мереж. При дугових замиканнях на землю (ОДЗ) виникають перенап-

руги, які можуть бути причиною пошкоджень ізоляції мереж, електрообладнання та подвійних замикань на землю. Високі рівні перенапруг при ОЗЗ викликані повторним запалюванням дуги, які можна виключити шляхом гасіння дуги (відключенням місця пошкодження) або компенсацією ємнісного струму.

Аналіз досліджень і публікацій. Перенапругам при дугових замиканнях на землю присвячена велика кількість робіт. Основоположником теорії перенапруг був Петерсен, який в 1916 р. пояснив фізичну сутність процесу виникнення перенапруг. Петерс і Слепян в 1923 р запропонували теорію перенапруг, відмінну від теорії Петерсена [1]. У 1957 р. Беляков М.М. запропонував теорію виникнення перенапруг при дугових замиканнях на землю, яка займає проміжне положення між теоріями Петерсена та Петерса і Слепяна [2-4].

Постановка задачі. Провести теоретичні дослідження рівнів перенапруг за основними відомими теоріями. Використовуючи твердження про те, що на рівні перенапруг значно впливає величина опору кола замикання на землю та параметри мережі, шляхом експериментів перекопати в виникненні перенапруг та оцінити їх рівні. Використовуючи в якості обмежувача перенапруг ОПН-КР/TEL-6 знизити рівні перенапруг при ОЗЗ до нормованих значень - 1,7-1,8 номінальної фазної напруги.

Викладення матеріалу та результати. Сутність вище вказаних теорій і механізми розвитку перенапруг полягає в наступному.

За теорією Петерсена [1]:

горіння дуги триває півперіоду вільних коливань;

значення кутової частоти вільних коливань при горінні дуги $\omega_k = 1/\sqrt{3LC}$ (C - ємність фази щодо землі, L - індуктивність розсіювання трансформаторів живлення);

при першому проходженні струму коливань через нуль дуга згасає;

значення частоти при відновленні $\omega_g = 1/\sqrt{LC}$;

повторне запалювання дуги настає через півперіоду промислової частоти при максимальній напрузі на пошкодженій фазі;

час горіння дуги при кожному повторному запалюванні дорівнює напівперіоду вільних коливань;

після кожного гасіння дуги зростає напруга зсуву нейтралі;

відновлення напруги на пошкодженій фазі має коливальний характер з піком, що перевищує величину фазної напруги;

діелектрична міцність місця пошкодження наростає швидше, ніж величина напруги, що відновлюється;

з урахуванням обмежуючого впливу міжфазних ємностей і загасання коливань рівні перенапруги досягають $U_{\max} = 3,6U_{\phi}$.

За теорією Петерса і Слепяна [1]:

горіння дуги триває до переходу через нуль струму промислової частоти;

гасіння дуги відбувається без перехідного процесу, тобто, відсутні піки відновленої напруги;

після кожного гасіння дуги напруга зсуву нейтралі залишається постійною і рівною U_{ϕ} ;

повторні запалювання дуги відбуваються регулярно через кожен період при максимальній напрузі на пошкодженій фазі;

тривалість горіння дуги при кожному повторному запалюванні дорівнює напівперіоду промислової частоти;

відновлення напруги на пошкодженій фазі після гасіння дуги відбувається плавно з промисловою частотою;

перенапруги на «здорових» фазах не перевищують значень $(3,0 \dots 3,1)U_{\phi}$.

За теорією Белякова [1]:

гасіння дуги відбувається при кожному проходженні струму через нуль;

повторне запалювання дуги відбувається через малу частку періоду власних коливань при малих напругах відновлення ($U_{кр} = 0,37U_{\phi}$ для мережі 6 кВ і $U_{кр} = 0,22U_{\phi}$ для мережі 10 кВ);

гасіння дуги на тривалий час має місце в тих випадках, коли високочастотний максимум напруги, що відновлюється, досить малий і стає менше величини діелектричної міцності ізоляції в місці ушкодження за час відновлення;

максимально можливі перенапруги з урахуванням загасання і міжфазних ємностей дорівнюють $3,2U_{\phi}$.

Надалі ці теорії корегувалися різними авторами на підставі даних теоретичних, лабораторних і експериментальних досліджень. Експерименти, проведені в мережах і лабораторних умовах [5], показали, що в дійсності ОЗЗ не протікають в чистому вигляді відповідно до якої-небудь однієї з існуючих теорій, що дуга може загасати як при першому або наступних переходах через нуль високочастотного струму, так і при переході через нуль струму промислової частоти.

За даними автоматичної реєстрації перенапруг в діючих кар'єрних мережах 6 кВ [6, 7] в одному циклі запалювання-гасіння дуги, крім часто повторюваних одиничних коливань, спостерігаються також коливання з двох, трьох і чотирьох напівхвиль.

Для аналізу перенапруг, що виникають при дугових замиканнях на землю, використовуються різні моделі. У зазначених моделях при оцінці перенапруг враховують найбільш очевидні параметри: ємності фаз відносно землі C ; ємності між фазами C_m ; індуктивності розсіювання трансформаторів живлення L ; активні опори ізоляції мереж $R_{\text{із}}$ та ін.

У роботі [1] досліджено вплив опору кола замикання на землю на перехідні процеси при ОДЗ, який складається з опору дуги R_d та опору шляху зворотного струму в оболонках кабелів (або в землі) R_0 . Опір дуги в процесі горіння змінюється нелінійно і залежить від струму $R_d = f(i_d)$. Практично опір в дузі зменшується дуже швидко до усталеного значення, що дозволяє розглядати перехідний процес в мережі з опором R , рівним сумі усталеного опору дуги і опору кола замикання на землю.

Таким чином, дуга є комутатором і замикає фазу на землю через усталений опір R . У [8] наведено інтегральний розподіл опорів в місці замикання в мережах залізничних кар'єрів, з якого випливає, що ймовірність виникнення ОЗЗ через різні опори неоднакова. Найбільша вірогідність виникнення ОЗЗ з перехідним опором 0-200 Ом. В [9] проводилося експериментальне вимірювання опору каналів дуги при пробоях або перекритті ізоляції. При цьому встановлені залежності між опором дуги і ємністю мережі та зроблено висновок про те, що в характері протікання перехідного процесу визначним фактором є величина значення активного опору в колі ОЗЗ. Опір в колі ОЗЗ обумовлює загасання амплітуд струмів і напруг пошкоджених і непошкоджених фаз, а також визначає повноту замикання фази на землю [1].

Час горіння дуги може бути різним. Вільно палаючі у відкритій атмосфері розтягнуті дуги горять тривалий час і гасіння відбувається тільки тоді, коли дуга під впливом теплових потоків повітря або вітру досягне критичної довжини. Закриті не розтягнуті дуги горять у вузьких каналах, що призводить до виникнення ударних тисків і поздовжньо-поперечного обдування дуги, що, в свою чергу, призводить до примусового обриву струму. З цього випливає, що час одного циклу горіння-гасіння може бути різним при одних і тих же параметрах мережі [9].

Процес гасіння дуги починається раніше переходу струму замикання через нуль - з того моменту, коли напруга на дуговому проміжку стає менше напруги, при якій можливе стійке горіння дуги. Основною умовою гасіння дуги є порушення балансу в електричній дузі між енергією, споживаною з мережі, і енергією, що віддається в навколишнє середовище. Вільно палаюча відкрита дуга [1] обривається при нульовому значенні струму промислової частоти, в зв'язку з чим відновлення напруги на пошкодженій фазі відбувається плавно від нульового значення.

Механізм повторного запалювання дуги при ОЗЗ полягає в наступному: після гасіння дуги відновлюється діелектрична міцність дугового проміжку і одночасно відновлюється напруга на пошкодженій фазі. Повторне запалювання дуги залежить від співвідношення між швидкостями відновлення електричної міцності дугового проміжку і напруги на ньому. Якщо провідність дугового проміжку наростає швидше, ніж напруга на ньому, то замикання самоусувається; якщо повільніше - то відбувається повторне запалювання. Для відкритих ємнісних дуг повторне запалювання відбувається через малу частку періоду власних коливань [1]. Оскільки швидкість наростання відновленої напруги значно перевищує швидкість відновлення процесів електричної міцності проміжку, то пробій відбувається задовго до досягнення відновленою напругою свого першого максимуму. Горіння дуги в кабелях і пазах електричних машин характеризується більш низьким і стабільним значенням, яке змінюється в процесі горіння, однак це відноситься до «розігрітого» каналу дуги в кабелі, тобто, при значному часі горіння дуги. При моде-

люванні перехідних процесів дослідниками приймалися напруги в межах $(0,4-2,5)U_{\phi}$, при яких відбувалися повторні запалювання дуги.

Число замикань, що самоусуваються, значно перевищує число стійких замикань [5]. Частота чергування самоусунених замикань залежить від причини, що їх спричинила. При локальному зниженні електричної міцності ізоляції час чергування замикань становить 5,6-17 хв. [5]; початок появи замикань передує повному пробую за 40-50 хв. при часі загального зниження електричної міцності ізоляції протягом десятків-сотень хвилин. З викладеного випливає, що при переході самоусунених ОЗЗ до стійких постійно знижується електрична міцність дугового проміжку при відновленні напруги на ньому. Настає такий момент, коли електрична міцність проміжку порівнюється з максимальною напругою відновлення та знижується по мірі розігріву каналу при наступних запалюваннях дуги.

За результатами реєстрації в діючих мережах рівні перенапруг при ОЗЗ в окремих випадках досягають значень, що перевищують чотирикратну величину [9-12, 16-18]. У мережах з малими струмами замикання, в яких існує велика кількістю самоусунених ОЗЗ, перенапруги виявляються вищими, ніж в мережах з великими струмами [3]. В мережах напругою 6-10 кВ досить часто спостерігаються випадки, коли заземлювальна дуга горить стійко при струмах замикання на землю менше 5 А. Високі рівні перенапруг при ОДЗ викликані повторним запалюванням дуги.

Напруга в ушкодженій фазі при ОЗЗ змінюється за законом [13-15]

$$u(t) = \varphi_{\infty} \sin(\omega t + \psi_{\infty}) + A_1 e^{pt} + A_2 e^{\delta t} \sin(\omega_k t + \nu). \quad (1)$$

Значення амплітуд A_1, A_2 залежать від R_* і визначаються за виразами [13-15]

$$A_1 = \frac{\varphi_0'' - 2\delta\varphi_0' + \omega_0^2\varphi_0}{\omega_0^2}; \quad (2)$$

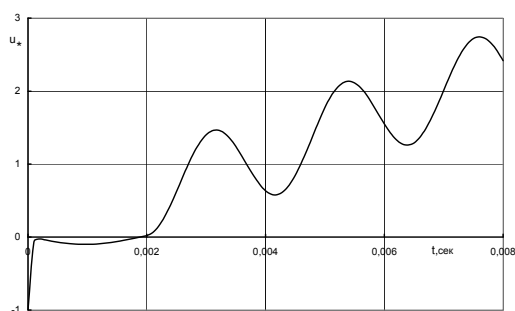
$$A_2 = \frac{-\varphi_0 p \delta + 2\delta\varphi_0' - \varphi_0''}{\omega_0^2 \sin \nu}; \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \nu = \frac{2\delta\varphi_0' - p\delta\varphi_0 - \varphi_0''}{\omega_0(p\varphi_0 + \varphi_0')}; \quad (4)$$

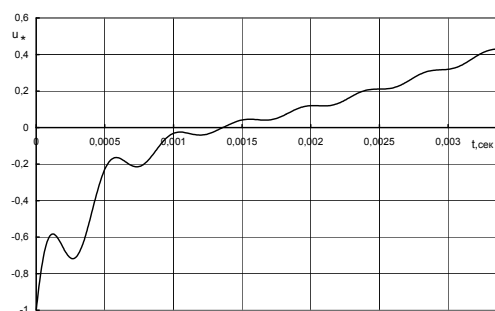
де $\varphi_0, \varphi_0', \varphi_0''$ - значення вільних величин та їхніх похідних для відповідних потенціалів до моменту відновлення.

Залежно від величини опору R_* перехідні процеси можуть протікати з одним або декількома височастотними переходами струму ОЗЗ через нуль за час півперіоду мережі $T_0/2$.

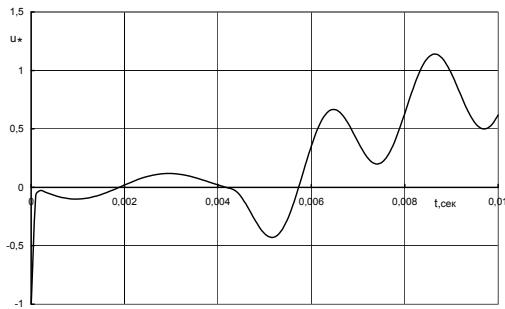
Графіки процесу горіння дуги і відновлення напруги на пошкодженій фазі показані на рис. 1.



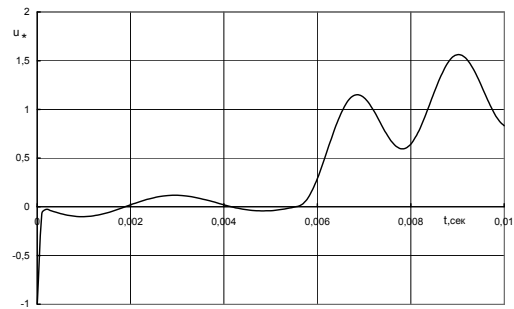
а - відновлення після першого переходу струму ОЗЗ через нуль



б - відновлення після першого переходу струму ОЗЗ через нуль



а - відновлення після другого переходу струму ОЗЗ через нуль



б - відновлення після третього переходу струму ОЗЗ через нуль

Рис. 1. Графіки процесу горіння дуги і відновлення напруги на пошкодженій фазі

Розрахункові рівні перенапруг максимальні при $R_* \rightarrow 0$ і складають: в випереджальній фазі при горінні дуги - $4,56U_\phi$, в випереджальній фазі в процесі відновлення - $4,89U_\phi$, в пошкодженій фазі в процесі відновлення - $5,87U_\phi$. Отримані розрахункові рівні перенапруг є максимальними [13-15].

Дослідження, проведені на математичній моделі [13-15], показали, що після 3-5 циклів горіння-відновлення зростання перенапруг припиняється і кумулятивний ефект зникає при значеннях опору кола замикання на землю $R_* = \sqrt{3}/2$. Якщо дуга при першому переході струму ОЗЗ через нуль не гасне, а горить тривалий час, то до моменту гасіння при деякому n-му переході перехідний процес загасає швидше і рівні перенапруг при малих R_* будуть нижче. Автори провели експериментальні дослідження перенапруг на фізичній моделі. При виконанні експериментальних досліджень в мережі 6 кВ при ОЗЗ використано цифровий осцилограф RECON з відповідними погоджувальними пристроями, що дозволяють реєструвати напругу в фазах і струм в пошкодженій фазі.

Основним методом при випробуваннях прийнято метод замикання на землю однієї з штучно пошкодженої фази зразка кар'єрного кабелю живлення типу КРГ довжиною до 400 мм і контролю навантажувальних параметрів: рівнів напруг в фазах, нейтралі і струму в пошкодженій фазі при змінах індуктивності і ємності в колі, які імітують реальний характер навантаження.

У програму випробувань входили досліди:

замикання фази С на землю через повітря за допомогою заземлювальної штанги і контроль напруги в фазах, нейтралі і струму в пошкодженій фазі (масштаби вимірюваних величин встановлювали за допомогою узгоджувальних пристроїв);

наступні досліди № 2, 3 виконувалися при включеному в нейтраль резисторі опором 200 Ом і фазної ємності відповідно 3,7 мкФ (дослід № 2), 2,25 мкФ (дослід № 3). Дослід №4 виконувався при додатковому включенні в кожен фазу нелінійного обмежувача перенапруг ОПН типу КР/ТЕЛ-6/6,0 УХЛ 1.

При виконанні дослідів контролювали: перенапруги в пошкодженій, випереджаючій, відстаючій фазах і в нейтралі по відношенню до номінальних значень, а також стум в пошкодженій фазі. Крім того, реєстрували час горіння дуги, інтервали повторного запалювання дуги при різних параметрах розподільчої мережі і засобів обмеження перенапруг в перехідних режимах.

При горінні дуги через повітря (дослід №1) рівень перенапруг знаходиться в межах 2,4-2,8 фазної напруги. Це обумовлено параметрами випробуваної мережі і відсутністю в ній обмежувачів засобів. Ємність фази мережі в цьому випадку прийнята 1,6 мкФ.

У дослідях № 2, 3 в коло нейтралі включений струмообмежуючий резистор опором 150 Ом, при якому знизився струм в пошкодженій фазі в 1,7-2,4 рази відповідно при зміні ємності фази з 1,6 до 3,7 мкФ. Час горіння дуги становив 2-3,5 мс і зростав зі збільшенням ємності фази. При зазначених змінах ємності повторні запалювання дуги після її гасіння виникали через 8-19 мс, максимальний час до повторного запалювання був при варіанті горіння дуги в повітрі.

Результати експериментальних досліджень наведені на осцилограмах рис.2.

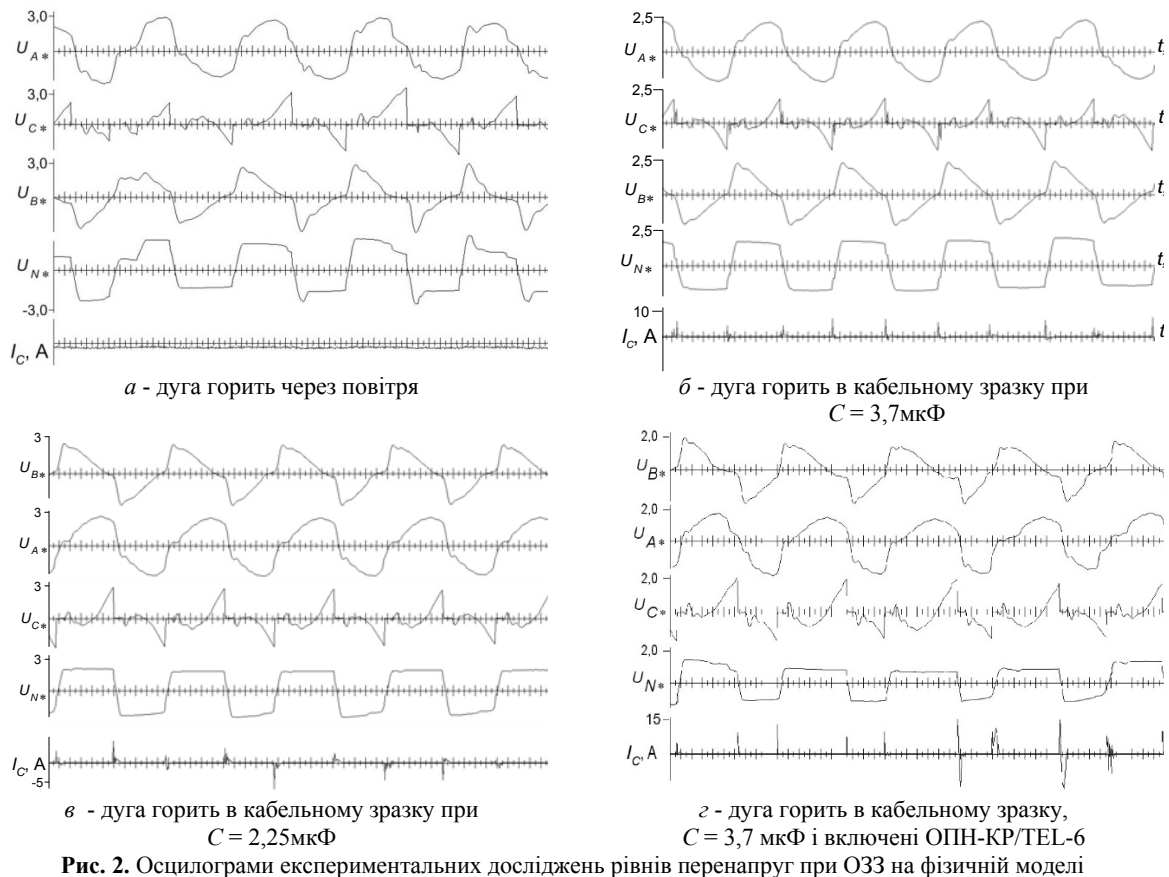


Рис. 2. Осцилограми експериментальних досліджень рівнів перенапруг при ОЗЗ на фізичній моделі

Висновки та напрямок подальших досліджень. Виходячи з факту, що час переходу від струмів замикання до струмів пробою становить мікросекунди, дугу, що перемежається, можна розглядати як комутатор, який замикає пошкоджену фазу на землю через опір, величина якого дорівнює установленому значенню опору кола замикання на землю.

При ОЗЗ величина опору кола замикання на землю змінюється в широких межах.

На процес гасіння дуги впливають численні фактори, обумовлені середовищем, в якому горить дуга, і швидкістю зміни струму при переході його через нульове значення.

На процес відновлення напруги на пошкодженій фазі впливає передісторія горіння дуги. Вона визначає характер перехідного процесу при горінні дуги; момент початку її руйнування; тривалість проміжку часу, при якому неможливе стійке горіння дуги до переходу струму через нуль; тривалість проміжку часу при відновленні напруги до критичної величини, при якій відбувається повторне запалювання.

Максимальні значення рівнів перенапруг при ОЗЗ виникають при малих значеннях опору кола замикання на землю і повторному запалюванні дуги в процесі її горіння та відновленні напруги на пошкодженій фазі.

Експериментальні дослідження показали, що комплексне використання струмообмежувального резистора в нейтралі та нелінійних обмежувачів перенапруг дозволило знизити рівні перенапруг до нормованих значень, що лежать в межах $(1,7-1,8)U_{\phi}$.

Список літератури

1. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. - М.: Энергия, 1971. - 152 с.
2. Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С. Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 464 с.
3. Зархи И.М., Мешков В.Н., Халилов Ф.Х. Внутренние перенапряжения в сетях 6 - 35 кВ. - Л.: Наука, 1986. - 128с.
4. Техника высоких напряжений. Под ред. М.В. Костенко. - М.: Высшая школа, 1973. - 464 с.
5. 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.

6. **Самойлович И.С.** Защита от перенапряжений мобильных электроустановок карьеров. - М.: Недра, 1980. - 160 с.
7. **Самойлович И.С.** Защита от перенапряжений электроустановок открытых горных работ. - М.: Недра, 1992. - 128 с.
8. **Самойлович И.С.** К оценке переходных сопротивлений при однофазных замыканиях на землю в сетях 6-10 кВ // Проблемы технической электродинамики. - 1972. - вып.37. - С. 55-60.
9. **Щуцкий В.И., Жидков В.О., Ильин Ю.Н.** Защитное шунтирование однофазных повреждений электроустановок. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 152 с.
10. **Дергилев М.П., Обабков В.К.** К вопросу о перенапряжениях в сетях 6-10 кВ горных предприятий // Промышленная энергетика. - 1992. - №6. - С. 46-48.
11. **Дударев Л.Е., Волошек И.В.** Особенности дуговых замыканий на землю в сетях с нейтралью, заземленной через резистор // Электричество. - 1993. - №8. - С. 26-31.
12. **Халилов Ф.Х.** Анализ характера внутренних перенапряжений в сетях 35 кВ // Промышленная энергетика. - 1972. - №11. - С.38-40.
13. **Барановская М.Л., Тытюк В.К.** Математическое моделирование переходных процессов при ОЗЗ в распределительных сетях 6-35 кВ // ДВНЗ «Криворізький національний університет», Гірничий вісник. – Кривий Ріг. - 2014. - № 98 – С.174-178.
14. **Барановская М.Л., Кузьменко А.С.** Анализ математических моделей распределительных сетей при ОЗЗ // ДВНЗ «Криворізький національний університет», Гірничий вісник. – Кривий Ріг. - 2015. - № 99. - С. -133-139.
15. **М. Baranovskaya, Tytyuk V., Nevzlin B., Zagirnyak V.** Branched circuit of 6 kV operation with insulated neutral under phase-to-earth fault // Електромеханічні і енергозберігаючі системи Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського. - Кременчук, 2015. - № 1(29). - С. 67-73.
16. Distribution - class arresters offers strength, durability. - Transmiss. and Distrib., 1984. - №7. - P.60.
17. **Niebuhr W.D.** Metal - oxide - varistor surge arrestors : Technology and application concepts. CIREN, 1983; 7th Int. Conf. Elec. Distrib., Liege, 25-29 Apr., 1983. Pt 1. Liege, 1983. - P. 13/1 - 13/6.
18. **Walsh Gorge W.A.** review of lightning protection and grounding practices. - TEEE Trans. Ind. Appl., 1979. -P. 133-138.

Рукопись поступила в редакцию 14.04.17

УДК 622.271.33

А.В. БОЛОТНИКОВ, канд. техн. наук, член.-корр. Академии горных наук Украины
Коллективное предприятие «Академический дом»
А.А. РОМАНЕНКО, начальник службы движения,
ЧАО «Центральный горнообогатительный комбинат»

АНАЛИЗ И СИСТЕМАТИЗАЦИЯ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРОВ

Цель. Целью данной работы является анализ литературных источников на предмет имеющихся мировых практик оценки устойчивости бортов карьеров и естественных откосов. Рассмотрение теории предельного равновесия сыпучей среды и вариантов ее применения при определении предельной или за предельной степени устойчивости массива горных пород. Понятие коэффициента запаса устойчивости и коэффициента надежности откоса.

Методы исследования. Для решения поставленных задач применен комплексный метод исследований, который включал: анализ научной литературы по рассматриваемым вопросам, систематизацию и классификацию исходной информации. Факторный анализ расчетных методов, оценка учета факторов при определении коэффициента запаса устойчивости, коэффициента надежности массива горных пород. Методы математического анализа, Методы механики грунтов и твердого деформируемого тела для аналитического описания процессов разрушения горных пород.

Научная новизна. Решение поставленной задачи позволяет на основании систематизации и классификации математических и графоаналитических методов оценки устойчивости бортов карьеров в виде коэффициента запаса устойчивости или коэффициента надежности, выявить факторы имеющие достаточную степень влияния (вес) на устойчивость откосов, однако слабо учитываемые в использующихся в настоящий момент методах.

Практическое значение. Железородная и металлургическая отрасли являются одними из ведущих в промышленности Украины. В связи с этим развитие открытой добычи полезных ископаемых карьерами с одновременным обеспечением безопасных и экономически эффективных, обеспечивающих оптимальный режим горных работ, углов наклона бортов является одной из наиболее важных научно-практических задач в области открытой разработки полезных ископаемых. Особенно актуальны данные вопросы в регионе Криворожского железородного бассейна.

Результаты. В настоящий момент разработано более 100 методов расчета запаса устойчивости породных откосов, обзор и анализ наиболее известных из них показывает, что большинство методов базируется на теории Кулона-Мора и в качестве исходных данных при расчетах используют прочностные характеристики горных пород такие как сцепление и угол внутреннего трения.