

УДК 622.012.2:621.311.1

С.А. Руссіян (канд. техн. наук)ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Донецьк
кафедра вищої математики
e-mail: st_russ@mail.ru**ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАМИКАННЯ ПОШКОДЖЕНОЇ ФАЗИ МЕРЕЖІ НА ЗЕМЛЮ ЯК ЗАСОБУ ПІДВИЩЕННЯ ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКИ ДІЛЬНИЧНОЇ МЕРЕЖІ ШАХТИ НАПРУГОЮ 3 (3,3) кВ**

Проаналізовано ефективність замикання пошкодженої фази мережі на землю в контексті пошуку шляхів підвищення показників електробезпеки експлуатації дільничної електромережі напругою 3(3,3) кВ. Доведено доцільність примусового утримування комутаційних апаратів відгалужень у ввімкненому стані протягом затухання ЕРС асинхронних двигунів. Обґрунтовано універсальну однолінійну схему заміщення дільничної електромережі, що відображає всі етапи аварійного процесу при виникненні витоку струму на землю.

Ключові слова: шахта, електромережа, виток струму на землю, безпека, пошкоджена фаза, ЕРС вибігу, напруга, замикання, моделювання, розрахунок.

Актуальність проблеми та її зв'язок з прикладними задачами

Одним з основних факторів, яким визначається продуктивність вуглевидобувної дільниці шахти, є потужність технологічного обладнання [1]. До останнього часу більшість механізованих комплексів високопродуктивних дільниць вугільних шахт розраховувалися на напругу живлення 1140 В. Однак такий рівень напруги не дозволяє збільшувати одиничну потужність гірничих машин відповідно до потреб підвищення продуктивності підприємств. Причина полягає в недоцільності застосування кабелів завеликих перетинів за економічними та технічними показниками. Це обумовлює необхідність переведення дільничних електромереж на напругу 3(3,3) кВ [2, 3]. Однак збільшення рівня напруги живлення підвищує імовірність негативних наслідків аварійних ситуацій в дільничних електротехнічних комплексах [4]. Для захисту від витоків струму на землю в мережах 1140 В використовуються апарати серії АЗУР, які виконують функції: виявлення витоку струму на землю, компенсації ємнісної складової струму витоку, автоматичного захисного відключення напруги живлення мережі та замикання на землю пошкодженої фази [5, 6]. Враховуючи на суттєве збільшення струму витоку в мережі напругою 3(3,3) кВ порівняно з мережею 1140 В, актуальною є задача аналізу особливостей реалізації вказаних захисних функцій апарата захисту від витоків струму на землю в мережі напругою 3(3,3) кВ.

Аналіз відомих досліджень та публікацій

Відомі способи виявлення пошкодженої фази мережі на землю розроблялися для мереж напругою 6 кВ або 1140 В. Аналіз граничної довжини відгалуження, що захищається, для мереж напругою 1140 В дозволив встановити, що струми навантаження двигунів, довжини та перетини жил кабельного відгалуження не обмежують ефективність використання захисного закорочування [7]. На основі попередніх досліджень сформульовані вимоги до пристроїв захисту з функцією автоматичного закорочування на землю пошкодженої фази: припустимий час спрацювання для мереж напругою 1140 В не має перевищувати 0,1 с, для мереж 6 кВ – 0,01 с; чутливість до опору витоку струму на землю має бути не меншою від 10÷12 кОм/фазу. Відомі пристрої визначення пошкодженої фази за принципом побудови класифікуються на пристрої, що реагують на: зниження абсолютних значень напруг

пошкодженої фази; суму (різницю) абсолютних значень фазних напруг та напруги нульової послідовності; зниження випрямленої оперативної напруги пошкодженої фази, що вимірюється в мережі; кут зсуву між фазними напругами та напругою нульової послідовності; різницю між абсолютними значеннями фазних напруг мережі (пошкодженої та випереджаючої фаз) [5, 6]. Відомі методи виявлення пошкодженої фази в мережі 1140 В можуть бути використані в мережі 3(3,3) кВ. Однак необхідно визначити ефективність та доцільність замикання пошкодженої фази мережі 3(3,3) кВ.

Постановка задачі

Задачею дослідження є аналіз технічних рішень із підвищення безпеки експлуатації дільничної мережі шахти напругою 3 (3,3) кВ шляхом виявлення особливостей замикання пошкодженої фази на землю.

Основний матеріал та результати досліджень

Розглянемо електромережу дільниці вугільної шахти (рис. 1), яка включає трифазне симетричне джерело ЕРС 1, що, через високовольтний комутаційний апарат (QF_A-QF_C) живить трансформатор 2 дільничної підстанції. До вторинної обмотки вказаного трансформатора підключено магістральний кабель, який характеризується активним опором R_0 та ємністю C_0 ізоляції відносно землі (позиція 3). Нульова точка силового трансформатора під'єднана до кола заземлення через компенсуючий дросель 4 з активним опором R_k та індуктивністю L_k , який є складовою частиною апарату захисту від витoku струму на землю (на схемі не вказаний). Закорочувач 5 пошкодженої фази мережі на землю включає три ключа $K_{zA}-K_{zC}$, один полюс кожного з яких під'єднано до відповідної фази мережі, а інший - заземлено. Розподільчий пункт дільниці представлений комутаційними апаратами (КА) 6 та 7 двох відгалужень. До складу кожного відгалуження входить гнучкий кабель з активним опором R_1 (R_2) та ємністю C_1 (C_2) ізоляції відносно землі 8 (9), який живить асинхронний двигун 10 (11). До фази А першого відгалуження через ключ K під'єднано опір R_e кола витoku струму на землю (позиція 12).

Дослідження процесів в системі при виникненні витoku струму на землю проводиться з використанням комп'ютерної моделі, що дозволяє обраховувати електричні параметри (рис. 1) [8, 9]: вимірювати миттєві значення лінійної напруги u на виході дільничної трансформаторної підстанції (віртуальний вольтметр PV) та в місці виникнення витoku струму на землю (віртуальний вольтметр PV1); частоти обертання електродвигунів відгалужень (блоки n1 та n2); струм через опір кола витoku на землю (віртуальний амперметр PA); кількість електрики, що пройшла через опір кола витoku (блок q). Модель імітує функціонування електромережі в нормальному режимі до виникнення витoku струму на землю (шляхом замикання ключа K) в момент t_1 (всі комутації забезпечено одноіменними блоками), після чого має місце закорочування на землю пошкодженої фази (шляхом замикання ключа KzA) в момент t_2 , захисне відключення високовольтного КА (шляхом розмикання ключів QF_A-QF_C) в момент t_3 , відключення КА 6 та 7 відгалужень через зниження напруги на їх котушках керування в момент t_4 . Моделювання здійснювалося при наступних значеннях параметрів елементів мережі: дільнична трансформаторна підстанція – типу ВСТП-КРУ-1000-6/3(3,3) ($S_H=1000$ кВА; $U_{1H}=6$ кВ; $U_{2H}=3$ кВ; Y/Y-0); активний опір компенсуючого дроселя $R_k=146$ Ом, індуктивність компенсуючого дроселя $L_k=6$ Гн; параметри ізоляції кабелів: $R_0=R_1=R_2=0,5$ МОм, $C_0=C_1=0,3$ мкФ/фаза, $C_2=0,2$ мкФ/фаза; $R_e=1$ кОм. Перше відгалуження живить асинхронний двигун 1МА4350-2CN30 ($U_H=3$ кВ, $P_H=315$ кВт), друге – двигун 1МА4354-2CN30 ($U_H=3$ кВ, $P_H=400$ кВт) [10].

В результаті моделювання отримано графіки, які дозволяють оцінити ефективність замикання пошкодженої фази мережі на землю.

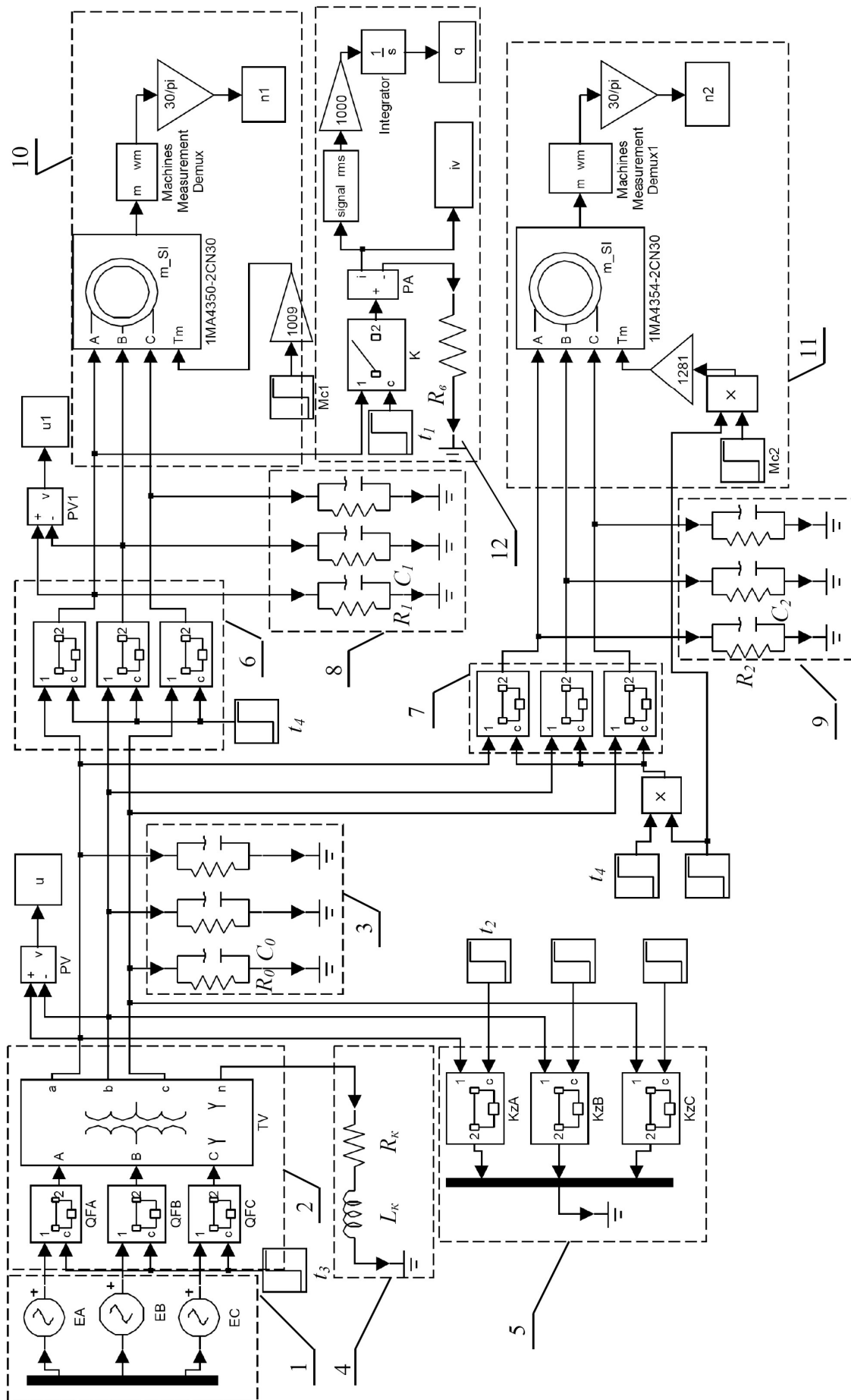


Рисунок 1 - Схема комп'ютерної моделі електромережі ділянки шахти напругою 3 кВ

Напруга u на виході дільничної трансформаторної підстанції до моменту t_3 захисного відключення високовольтного КА визначається напругою на шинах центральної підземної підстанції та змінюється синусоїдально зі сталою амплітудою (рис. 2, *a*), а після вказаного моменту - підтримується ЕРС групового вибігу асинхронних двигунів відгалужень (рис. 2, *б*), амплітуда та частота якої знижуються з часом. При цьому частота обертання двигунів зменшується за близьким до лінійного законом (рис. 2, *в*). В момент t_4 відключаються КА відгалужень (через зниження напруги на котушках керування), що від'єднує силовий трансформатор від електродвигунів, відповідно, напруга u знижується до нуля.

Припустимо, що замикання пошкодженої фази мережі на землю не виконується (апарат захисту від витоків струму на землю здійснює лише автоматичне захисне відключення високовольтного КА та компенсацію ємнісної складової струму витoku). Тоді на інтервалі $t_1 - t_3$ струм витoku підтримується напругою мережі, на інтервалі $t_3 - t_4$ - ЕРС групового вибігу двигунів, а після моменту t_4 - ЕРС вибігу двигуна аварійного відгалуження (рис. 3, *a*). Ємнісна складова струму витoku зменшується компенсатором до моменту t_4 , а після відключення КА аварійного відгалуження компенсатор не впливає на стан кола витoku струму на землю. Кількість електрики, що пройшла через опір кола витoku за час аварійного процесу при відсутності замикання пошкодженої фази мережі на землю, становить близько 500 мА·с (рис. 3, *в*, крива 1), що суттєво перевищує припустимий рівень 50 мА·с та становить небезпеку смертельного електроураження людини або займання метано-повітряної суміші в шахті.

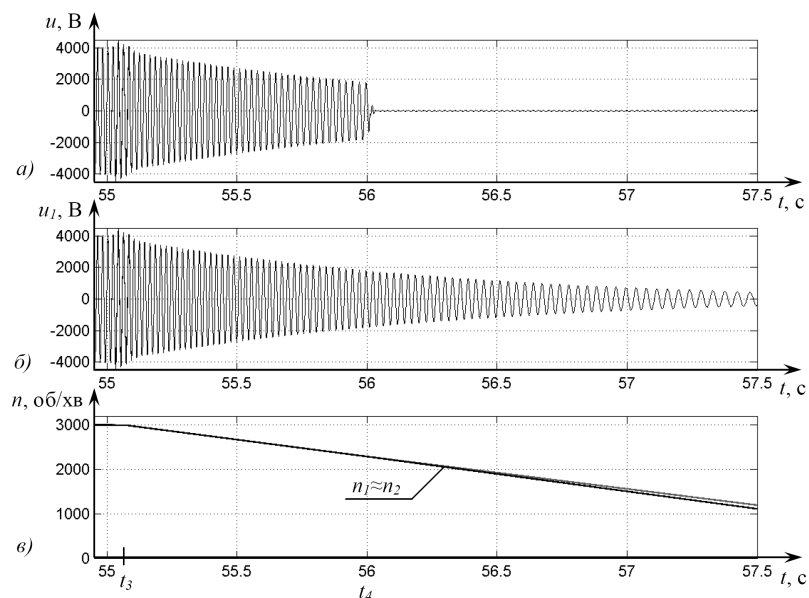


Рисунок 2 - Графіки, отримані в результаті моделювання, миттєвих значень лінійної напруги на виході дільничної трансформаторної підстанції (*a*), лінійної напруги в місці виникнення витoku струму на землю (*б*) та частот обертання двигунів (*в*)

Закорочування пошкодженої фази мережі на землю в момент t_2 дозволяє зменшити до нуля струм через опір кола витoku (рис. 3, *б*). Проте захисна дія закорочувача обмежена знаходженням КА відгалуження у ввімкненому стані, тобто інтервалом $t_2 - t_4$. Після моменту t_4 закорочувач не впливає на стан кола витoku струму на землю, оскільки є електрично від'єднаним від нього, і струм в колі витoku на землю підтримується ЕРС вибігу відповідного двигуна. На інтервалі $t_2 - t_4$ крива накопичення кількості електрики через опір кола витoku залишається сталою (рис. 3, *в*, крива 2). Сукупна кількість електрики через опір кола витoku становить 120 мА·с, що недостатньо для підтримання електробезпеки.

Для покращення параметрів електробезпеки пропонується примусово утримувати КА відгалужень у ввімкненому стані протягом затухання ЕРС асинхронних двигунів. В цьому

випадку струм через коло витоку протікає тільки протягом інтервалу $t_1 - t_2$. Закорочувач ефективно знижує струм витоку після моменту t_2 до затухання ЕРС двигуна відгалуження з витоком струму. Загальна кількість електрики через опір кола витоку в цьому випадку становить близько 25 мА·с (рис. 3, в, крива 3), що відповідає вимогам електробезпеки експлуатації дільничних електромереж.

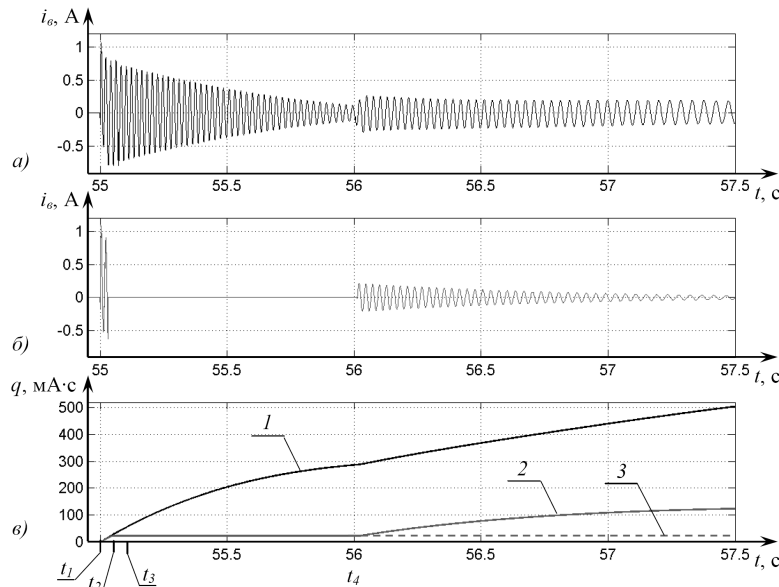
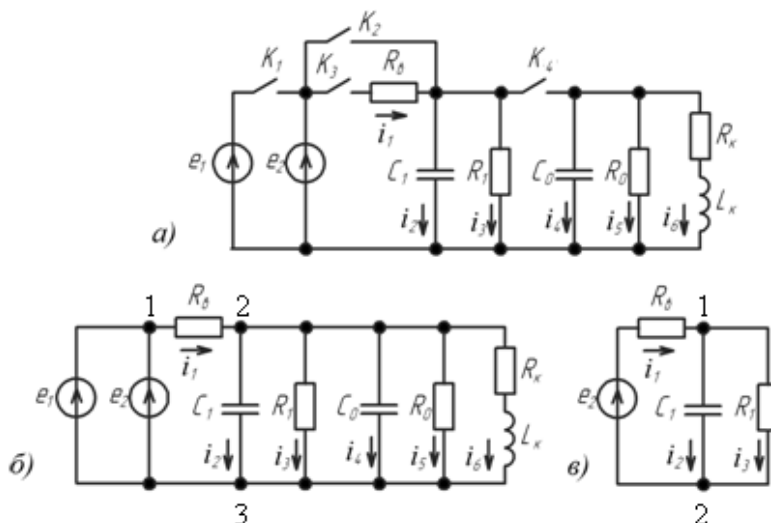


Рисунок 3 - Графіки, отримані в результаті моделювання, що відображають миттєві значення струму витоку на землю за відсутності (а) та наявності (б) закорочування пошкодженої фази мережі на землю та накопичення кількості електрики через опір кола витоку (в) при відсутності (крива 1) закорочування, за наявності закорочування при відключенні контактора відгалуження (крива 2) та при його ввімкненому стані (крива 3)

Оцінку ефективності захисного закорочування на землю пошкодженої фази мережі напругою 3(3,3) кВ можливо проводити за однофазною схемою заміщення (рис. 4, а).



Таблиця 1 - Стан ключів схеми заміщення

Часовий інтервал	Стан ключів			
	K_1	K_2	K_3	K_4
$t < t_1$	1	1	0	1
$t_1 < t < t_2$	1	0	1	1
$t_2 < t < t_3$	1	1	1	1
$t_3 < t < t_4$	0	1	1	1
$t > t_4$	0	0	1	0

Рисунок 4 - Схеми заміщення мережі: а – універсальна для всіх етапів аварійного процесу; б – в момент виникнення витоків струму на землю; в – після відключення контактора відгалуження з витоком

На рис. 4 прийняті наступні позначення: e_1 – джерело ЕРС, що відповідає фазній напрузі вторинної обмотки дільничного силового трансформатора; e_2 – фазна ЕРС обертання асинхронного двигуна аварійного відгалуження; R_g – опір кола витоку струму на землю; C_1 , R_1 – ємність та активний опір фаз кабелю аварійного відгалуження; C_0 , R_0 – те ж для загальної частини мережі та кабелів інших відгалужень; R_k , L_k – активний опір та індуктивність компенсуючого дроселя. Стан ключів, що відповідають станам мережі при виникненні витоку струму на землю, пояснює табл. 1. На інтервалі $t_1 < t < t_2$ (від виникнення витоку струму на землю до захисного замикання на землю пошкодженої фази мережі) струм витоку обраховується згідно залежності (рис. 4, б):

$$i_1 = [e(t) - u_1] / R_g, \quad (1)$$

де $e(t)$ - фазна напруга мережі в місці виникнення витоку (між вузлами 1 та 3 схеми заміщення); u_1 - напруга між вузлами 2 та 3, яка обраховується шляхом розв'язання системи диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} du_1 / dt = [(e(t) - u_1) / R_g - u_1(R_0 + R_1) / R_0 R_1 - i_6] / (C_0 + C_1), \\ di_6 / dt = (u_1 - R_k i_6) / L_k. \end{cases} \quad (2)$$

На інтервалі $t_2 < t < t_4$ опір кола витоку зашунтований закорочувачем, і струм в колі витоку на землю дорівнює нулю. Після моменту t_4 відключення контактора струм в колі витоку на землю визначається згідно залежності:

$$i_1 = (e_2 - u_1) / R_g, \quad (3)$$

де напруга u_1 обраховується шляхом розв'язання диференціального рівняння:

$$du_1 / dt = (i_1 - u_1 / R_1) / C_1. \quad (4)$$

Висновки та напрямок подальших досліджень.

Встановлено можливість зниження кількості електрики через опір кола витоку на землю в електромережі дільниці шахти напругою 3(3,3) кВ до припустимих значень шляхом виконання захисного закорочування пошкодженої фази мережі на землю за умови примусового утримання контактора аварійного відгалуження у ввімкненому стані до повного затухання ЕРС вибігу двигунів. В ході подальших досліджень мають бути запропоновані варіанти технічної реалізації вказаного способу захисту.

Список використаної літератури

1. Плащанский Л.А. Основы электроснабжения горных предприятий: учебник для вузов / Л.А. Плащанский. – [2-е изд., испр.]. – М.: Изд-во Московского госуд. горного ун-та, 2006. – 499 с.
2. Дзюбан В.С. Требования к взрывозащищенному электрооборудованию и системам электроснабжения горных машин на напряжение 3(3,3) кВ / В.С. Дзюбан, Н.М. Басов // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. трудов УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2009. – С. 209-213.
3. Требования к изготовлению рудничного взрывозащищенного электрооборудования на напряжение 3(3,3) кВ. – Макеевка: МакНИИ, 2007. – 30с.
4. Маренич К.М. Зворотні енергетичні потоки асинхронних двигунів як фактор небезпеки в електромережі шахти: монографія / К.М. Маренич, С.В. Василець. – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2012. – 206 с.
5. Анализ параметров и процессов в шахтных электрических сетях / [Ф.П. Шкрабец, Н.А. Шидловская, В.С. Дзюбан, Е.А. Вареник]. - Днепропетровск: Нац. горный ун-т, 2003. - 151 с.

6. Забезпечення безпеки та ефективності шахтних електроустановок / [Є.О. Вареник, С.І. Випанасенко, В.С. Дзюбан, Н.А. Шидловська, Ф.П. Шкрабець]; за ред. Г. Г. Півняка. – Дніпропетровськ: Нац. гірничий ун-т, 2004. – 334 с.
7. Ягудаев Б.М. Защита от электропоражения в горной промышленности / Б. М. Ягудаев, Н. Ф. Шишкин, В. В. Назаров. - М.: Недра, 1982. – 152 с.
8. Dhillon B.S. Mine Safety. A Modern Approach / B.S Dhillon. – London: Springer-Verlag London Limited, 2010. – 186p.
9. Murthy P.S.R. Power system analysis – Hyderabad: BS Publications, 2007. – 321p.
10. Three-phase Induction Motors / Catalog D84.1-2009. – Siemens AG, 2009. – 364 p.

References

1. Plashchanskiy, L.A. (2006), *Osnovy elektrosnabzheniya gornikh predpriyatiy* [Fundamentals of mine power supply], Izd-vo Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo yuniversiteta, Moscow, Russia.
2. Dziuban, V.S. and Basov, N.M. (2009) “Requirements of explosion-proof electrical equipment and power supply networks of mining machines 3(3.3) kV voltage”, *Explosion-proof electrical equipment*, pp. 209-213.
3. Makeevka research institute (2007), *Trebovaniya k izgotovleniyu vzrivozashchishchennogo electrooborudovaniya na napryazhenie 3(3.3) kV* [Requirements of mine explosion-proof electrical equipment 3(3.3) kV production], MRI, Makeevka, Ukraine.
4. Marenich, K.M. and Vasylets, S.V. (2012), *Zvorotni energetychni potoky asinkhronnykh dviguniv yak faktor nebezpeky v elektromerezhi shakhty* [Back power flow of induction motor as danger factor in mine power net], DonNTU, Donetsk, Ukraine.
5. Shkrabets, F.P., Shydlovskaya, N.A., Dziuban, V.S. and Varenik, Y.A. (2003), *Analiz parametrov i protsesov v shakhtnikh elektricheskikh setiakh* [Parameters and processes analysis in mine power network], Natsionalnyi gornyi universitet, Dnepropetrovsk, Ukraine.
6. Varenik, Y.A., Vypanasenko, S.I., Dziuban, V.S., Shydlovskaya, N.A. and Shkrabets, F.P. (2004), *Zabezpechennya bezpeky ta effectyvnosti shakhtnykh elektroustanovok* [Safety and effectiveness on mine electrical installations providing], NGU, Dnipropetrovsk, Ukraine.
7. Yagudaiev, B.M., Shishkin, N.F. and Nazarov, V.V (1982), *Zashita ot elektroporazheniya v gornoj promishlennosti* [Protection from current injury in mine industry], Nedra, Moskva, USSR.
8. Dhillon, B.S. (2010), *Mine Safety. A Modern Approach*, Springer-Verlag London Limited, London, UK.
9. Murthy, P.S.R. (2007), *Power system analysis*, BS Publications, Hyderabad, India.
10. Three-phase Induction Motors (2009), *Catalog D84.1-2009*, Siemens AG.

Надійшла до редакції:
25.03.2014

Рецензент:
канд. техн. наук, проф. Маренич К.М.

С.А. Руссиян

ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»

Оценка эффективности замыкания поврежденной фазы сети на землю как средства повышения электробезопасности участковой сети шахты напряжением 3(3,3) кВ.
Проанализирована эффективность замыкания поврежденной фазы сети на землю в контексте поиска путей повышения показателей электробезопасности эксплуатации участковых электросетей напряжением 3(3,3) кВ. Доказана целесообразность принудительного удержания коммутационных аппаратов ответвлений во включенном состоянии до затухания ЭДС асинхронных двигателей. Обоснована однолинейная схема

замещения участковой электросети, которая отображает все этапы аварийного процесса при возникновении утечки тока на землю.

Ключевые слова: шахта, электросеть, утечка тока на землю, безопасность, поврежденная фаза, ЭДС выбега, напряжение, замыкание, моделирование, расчет.

S. Russijan

Donetsk National Technical University

Evaluation of damaged network phase circuit to earth as a means to improve electrical safety of a precinct network of a mine with voltage 3 (3.3) kV. The need of using 3 (3.3) kV equipment in coal mine section is determined by coal production increasing. Increasing the supply voltage from 1140V up to 3 (3.3) kV increases the probability of negative consequences of accidents in the electrical complexes of mine sections. Existing automatic protective devices of AZUR series for 1140V networks reveal earth leakage, compensate the capacitive components of leakage current, provide automatic safety shutdown of voltage of the network and ground fault of the damaged network phase. Taking into account the significant increase of leakage current values in the network with voltage 3 (3.3) kV as compared to the network 1140, the task of identifying relevant features of the implementation of these protective functions in higher voltage networks is significant. Today there are effective ways to identify the faulty phase in isolated neutral power network, many of which are used in networks of 1140 V. It is necessary to determine the characteristics of the use of such methods in the networks of 3 (3.3) kV. Study of transients in the system in case of current leakage to the ground is made using a computer model of the section power network, which allows calculating the instantaneous values of the current leakage to the ground and the total amount of electricity through the resistance of the leakage circuit. The simulation produced graphics that allow estimating the effectiveness of ground-fault faulted network phase as a way to improve electrical safety of 3 (3.3) kV power network. Several computational experiments were held, which resulted in conclusion, that in the absence of the faulted phase circuit closure on the ground total amount of electricity through the resistance of the circuit leakage is about 10 times greater than the maximum value, which is unacceptable. In the case of short-circuiting of the faulted phase on the ground the total amount of electricity is approximately 2 times greater than the maximum. To improve the efficiency of the faulty phase shorting it is offered to hold switchgear branches in the "on" state, thus reducing the total amount of electricity to 50% of the maximum allowable, that is reasonable. We also provided a single-phase equivalent circuit, which allows evaluating the effectiveness of faulted phase short-circuiting to earth in 3(3.3) kV net.

Key words: leakage current, protection device, transformer substation, power network, model, calculation, mine section, tripping, electrical shock.



Руссиян Станіслав Анатолійович, Україна, закінчив Донецький національний університет, канд. техн. наук, доцент кафедри вищої математики ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (вул. Артема, 58, м. Донецьк, 83001, Україна). Основний напрямок наукової діяльності – дослідження питань електробезпеки експлуатації дільничних електромереж шахт.