

## ВДОСКОНАЛЕННЯ ЗАСОБІВ ПРОТИАВАРІЙНОЇ АВТОМАТИКИ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ КАР'ЄРІВ

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

*Запропоновано комбіновану систему протиаварійної автоматики, що дозволяє виявити пошкодження на ранній стадії його виникнення та швидко відключити пошкоджену ділянку мережі в разі виникнення обриву проводу в системах електропостачання кар'єрів.*

**Ключові слова:** комбінована система, пошкодження, обрив проводу.

### Вступ

Будова системи електропостачання залізрудних кар'єрів повинна враховувати надійність кар'єрних пересувних повітряних та кабельних ліній, експлуатованих кабелів, пунктів перемикальних і пересувних кар'єрних трансформаторних підстанцій.

Питання безпеки гірничих промислових підприємств є особливо гострими. Рівень електротравматизму на таких підприємствах сягає 47 % від загальної кількості нещасних випадків. Основними причинами такого рівня електротравматизму є нездатність існуючих засобів захисту та автоматики вчасно виявляти та ліквідовувати пошкоджені елементи [1, 2].

Однофазні замикання на землю (ОЗЗ) є найрозповсюдженішим видом пошкоджень. Причинами ОЗЗ, як правило, є пошкодження ізоляції в системах електропостачання залізрудних кар'єрів (СЕПК). Виявлення пошкодження ізоляції на ранній стадії їх розвитку є складною задачею.

Обрив проводу часто призводить до ОЗЗ. У разі виникнення такого пошкодження захист повинен миттєво відключати пошкоджений елемент. В місці падіння проводу на землю виникає поле розтікання струму, що загрожує життю людей. У разі обриву проводу за першим, або наступними відгалуженнями струму на початку лінії можуть бути близькі до струмів нормального режиму роботи. Існуючі методи та засоби захисту від ОЗЗ в більшості випадків через значний перехідний опір не реагують на такий вид пошкодження. Тому існує необхідність у створенні нових та вдосконалені існуючих методів і засобів захисту від ОЗЗ та контролю за станом ізоляції, що дозволять вчасно виявити пошкодження на ранній стадії розвитку.

*Метою роботи* є підвищення рівня надійності та безпеки експлуатації СЕП кар'єрів шляхом вдосконалення комбінованої системи протиаварійної автоматики, створеної на основі сучасних методів технічної діагностики, які забезпечують неперервний контроль ізоляції і захист від обриву проводу.

### Результати дослідження

До засобів протиаварійного управління СЕПК відносяться: автоматичне увімкнення резерву, автоматичне повторне увімкнення, захист від міжфазних к. з., однофазних замикань на землю, обриву фази проводу. Існуючі засоби автоматичного вводу резерву, автоматичного повторного увімкнення, засоби захисту від міжфазних к. з. [1, 2] забезпечують ефективність функціонування. Проблемним залишаються засоби захисту від ОЗЗ та обриву проводу лінії електропередач.

Можливість використання активного опору як контрольованого показника, доведена в [3, 4]. Використання як обмежень гранично допустимих рівнів напруги дотику і струмів протікання через тіло людини дозволяє задати умови роботоздатності ізоляції мережі у вигляді залежності гранично допустимого рівня активного опору ізоляції СЕПК від загального опору ізоляції до утворення шунтувального зв'язку, якщо напруга джерела струму та ємність мережі постійні.

В СЕПК трифазного струму з ізольованою нейтраллю природною вхідною величиною є фазна (лінійна) напруга джерела живлення, а найінформативнішою ознакою, що характеризує зміну ста-

ну параметрів ізоляції, є струм витоку через шунтвний зв'язок між фазою мережі і землею.

Розрахункова схема для наведених обмежень показана на рисунку, де  $C_A, C_B, C_C$  — ємність фаз мережі відносно землі;  $r_A, r_B, r_C$  — активний опір відповідної фази мережі відносно землі. Миттєві значення напруг джерела живлення задані рівняннями:  $u_{\Phi A} = U_{m\Phi} \sin(\omega t + \varphi)$ ;

$u_{\Phi B} = U_{m\Phi} \sin\left(\omega t + \varphi - \frac{2\pi}{3}\right)$ ;  $u_{\Phi C} = U_{m\Phi} \sin\left(\omega t + \varphi - \frac{4\pi}{3}\right)$ , де  $\varphi$  — початкова фаза коливання.

Для оцінки множини станів параметрів ізоляції як вихідну величину будемо розглядати струм  $i_3(t)$  через шунтвний зв'язок, який утворюється між фазою  $A$  та землею (рис. 1).

Визначаючи  $i_3(t)$ , обмежимо кількість станів параметрів ізоляції. Будемо розглядати два граничних стани параметрів ізоляції до моменту виникнення шунтвного зв'язку: параметри ізоляції симетричні, тобто  $r_A = r_B = r_C = r$ ;  $C_A = C_B = C_C = C$ , та випадок граничної несиметрії параметрів ізоляції  $r_A \rightarrow \infty$ ;  $r_B = r_C = r$ ;  $C_A = C_B = C_C = C$ .

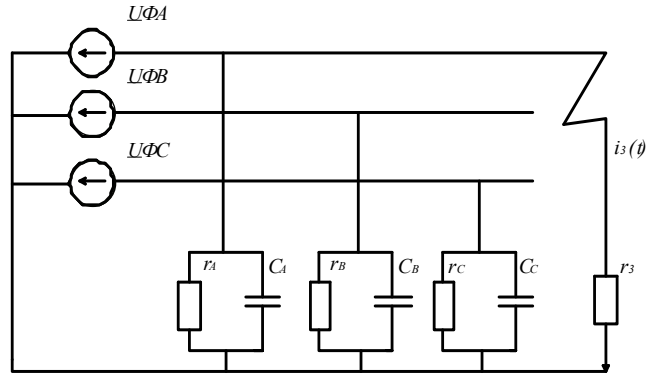


Рис. 1. Розрахункова схема мережі

Для випадку симетричного стану ізоляції

$$i_3(t) = \frac{U_m \sqrt{\left(r_3 + r_0 + \omega^2 C_0^2 r_0^2 r_3\right)^2 + \omega^2 C_0^2 r_0^4}}{\left(r_3 + r_0\right)^2 + \omega^2 C_0^2 r_0^2 r_3^2} \sin(\omega t + \varphi - \phi) - \frac{U_m \left(1 + \frac{r_3 + r_0}{r_3}\right)}{\sqrt{\left(r_3 + r_0\right)^2 + \omega^2 C_0^2 r_0^2 r_3^2}} \sin(\varphi - \phi_1) \exp\left[\frac{-r_3 + r_0}{C_0 r_0 r_3} t\right], \tag{1}$$

де  $r_0 = r/3$ ;  $C_0 = 3C$ ;  $\phi = \arctg \frac{\omega C_0 r_0^2}{r_3 + r_0 + \omega^2 C_0^2 r_0^2 r_3}$ ;  $\phi_1 = \arctg \frac{\omega C_0 r_0 r_3}{r_3 + r_0}$ .

В випадку граничної несиметрії

$$i_3'(t) = \frac{U_m \sqrt{\left(1,5 + 9\omega^2 C_0^2 r_0^2\right)^2 + 2,25\omega^2 C_0^2 r_0^2}}{1 + \omega^2 C_0^2 r_0^2} \left[ \frac{\sqrt{\left(r_3 + r_0 + \omega^2 C_0^2 r_0^2 r_3\right)^2 + \omega^2 C_0^2 r_0^4}}{\left(r_3 + r_0\right)^2 + \omega^2 C_0^2 r_0^2 r_3^2} \sin(\omega t + \varphi - \phi_1 - \phi) - \frac{\left(1 + \frac{r_3 + r_0}{r_3}\right)}{\sqrt{\left(r_3 + r_0\right)^2 + \omega^2 C_0^2 r_0^2 r_3^2}} \sin(\varphi - \phi_1 - \phi) \exp\left(\frac{-r_3 + r_0}{C_0 r_0 r_3} t\right) \right], \tag{2}$$

де  $\phi_1 = -\arctg \frac{\omega C_0 r_0}{1,5 + 9\omega^2 C_0^2 r_0^2}$ .

З рівнянь (1), (2) видно, що струм перехідного процесу відрізняється від струму усталеного режиму вільною складовою, величина та тривалість якої залежить від параметрів ізоляції та значення опору в місці пошкодження. У разі металевого замкнення ( $r_3 \rightarrow 0$ ) на основну гармоніку струму накладається високочастотний струм власної частоти контуру замкнення та вищі гармоніки джерела напруги, що існують в реальних мережах. Наявність  $r_3 > 0$  різко знижує вплив струму власної частоти коливань на основну гармоніку.

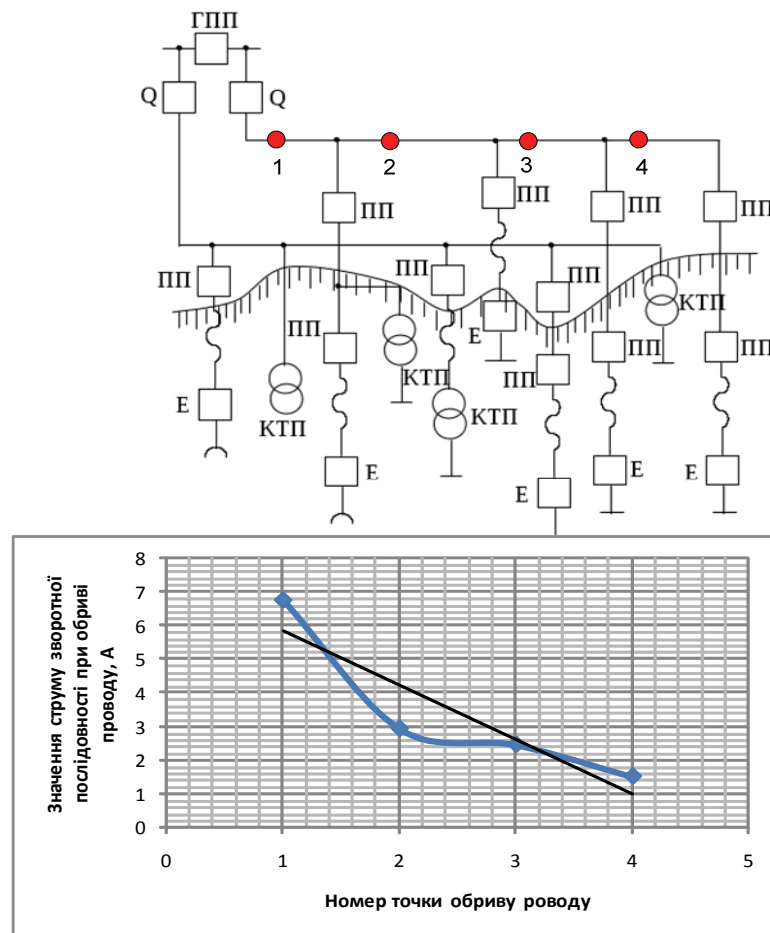


Рис. 2. Графік зміни струму зворотної послідовності після обриву проводу

Результати досліджень для визначення реальних характеристик параметрів ізоляції [5] показали, що виникненню стійкого ОЗЗ передують поступове зниження активного опору ізоляції, або серія імпульсних пробів ізоляції, які відновлюються з поступовим зниженням активного опору ізоляції. Симетричне зниження активного опору ізоляції зумовлене наявністю шунтв'язків та їх поступовим зволоженням. Наприклад, поступове зниження опору ізоляції регулярно спостерігається в нічний час доби або під час опадів. Імпульсні проби ізоляції зумовлені наявністю шунтв'язків та комутаційної перенапруги. В цих випадках ізоляція відновлюється зі зникненням перенапруги або після спрацювання релейного захисту та АПВ. Стійке замкнення на землю виникає зі зниженням активного опору ізоляції мережі до рівня 3...5 кОм. Вимірювання активного опору ізоляції в місці пошкоджень після відключення мережі показали, що для повітряної мережі напругою 6 кВ він знаходився в межах 0,25...4 кОм. Результати експериментальних досліджень інших авторів підтверджують поступовість розвитку пошкоджень в мережах. Це створює умови для своєчасного виявлення дефектів ізоляції та їх усунення шляхом профілактичних дій.

З метою виявлення параметрів та величин, чутливих до обриву проводу, виконано розрахунки аварійного режиму роботи СЕПК за максимального та мінімального навантаження. На рис. 2, 3, для прикладу, показано графіки зміни струму зворотної послідовності та напруги нульової послідовності за режиму максимальних навантажень.

Результати дослідження показали, що найчутливішими до обриву проводу виявилися струм зворотної послідовності до моменту падіння проводу на землю та напруга нульової послідовності після падіння проводу на землю [6].

З метою підвищення точності розрахунку напруги нульової послідовності запропоновано математичну модель для визначення перехідного опору в місці падіння проводу на землю, яка враховує кліматичні умови, довжину проводу, що лежить на землі, та параметри ЛЕП.

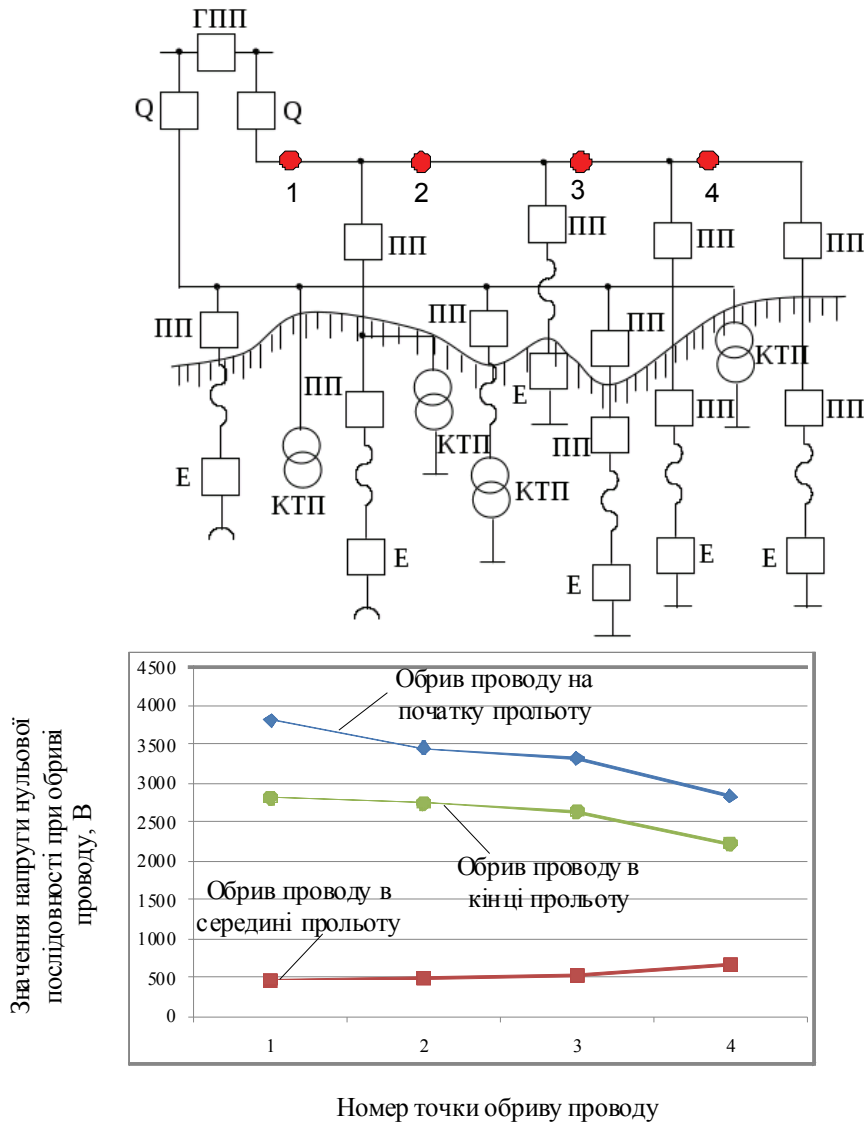


Рис. 3. Графік зміни напруги нульової послідовності після обриву проводу

Повна (3) та спрощена (4) математичні моделі для визначення перехідного опору в місці падіння проводу на землю мають вигляд

$$R_3 = \frac{1}{\pi l} \left( \rho_0 + \frac{(\rho_T - \rho_0) \cos\left(\frac{I\sqrt{L}}{2\lambda d}\right)}{T_0 \left(1 - \cos\left(\frac{I\sqrt{L}}{2\lambda d}\right)\right) + \rho_T \frac{I^2}{k_T p S_p}} \right) \ln \left[ \frac{1,778 l^5 E}{P \left( D^2 - \left( D - \frac{2P}{E\pi D} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right] + \rho_e \Delta / S; \quad (3)$$

$$R_3 = \frac{\rho}{\pi l} \ln \left[ \frac{1,778 l^5 E}{P \left( D^2 - \left( D - \frac{2P}{E\pi D} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right] + \rho_e \Delta / S, \quad (4)$$

де  $\rho_e$  — середній питомий опір матеріалу провідника;  $\Delta$  — товщина плівки;  $S$  — поверхня дотику;  $l$  — довжина проводу, що контактує з землею;  $E$  — модуль пружності землі;  $d$  — діаметр утвореної лунки;  $D$  — діаметр кульки;  $P$  — навантаження;  $\rho_0$  — питомий опір ґрунту за температури навколишнього середовища  $T_0$ ;  $\rho_T$  — питомий опір при нагріві перехідного опору до температури  $T$ ;

$\lambda$  — коефіцієнт теплопровідності;  $p$  і  $S_p$  — периметр і площа поперечного перерізу провідника зануреного в землю;  $k_T$  — коефіцієнт тепловіддачі з поверхні провідника;  $L$  — постійна Лоренца;  $I$  — струм замикання.

Таким чином, пропонується протиаварійна система, що ґрунтується на методі в якому плавна зміна активного опору ізоляції фаз мережі відносно землі фіксується шляхом накладення на контрольовану мережу тестового сигналу, наприклад, випрямленої напруги і контролю реакції мережі на його вплив, а стрибкоподібна зміна активного опору ізоляції фіксується шляхом використання перехідного процесу в колі попередньо зарядженого конденсатора до напруги, пропорційної активному опору ізоляції РМ відносно землі, підсистема БКІ (рис. 4). З метою забезпечення селективності захисту системи та підвищення чутливості до такого виду пошкодження як обрив проводу, пропонується застосування методу виявлення обриву проводу в розподільних електричних мережах напругою 6—35 кВ, що ґрунтується на контролі значення струму зворотної послідовності до моменту падіння проводу на землю і напруги нульової послідовності після падіння проводу на землю, підсистема ЗОП (рис. 4).

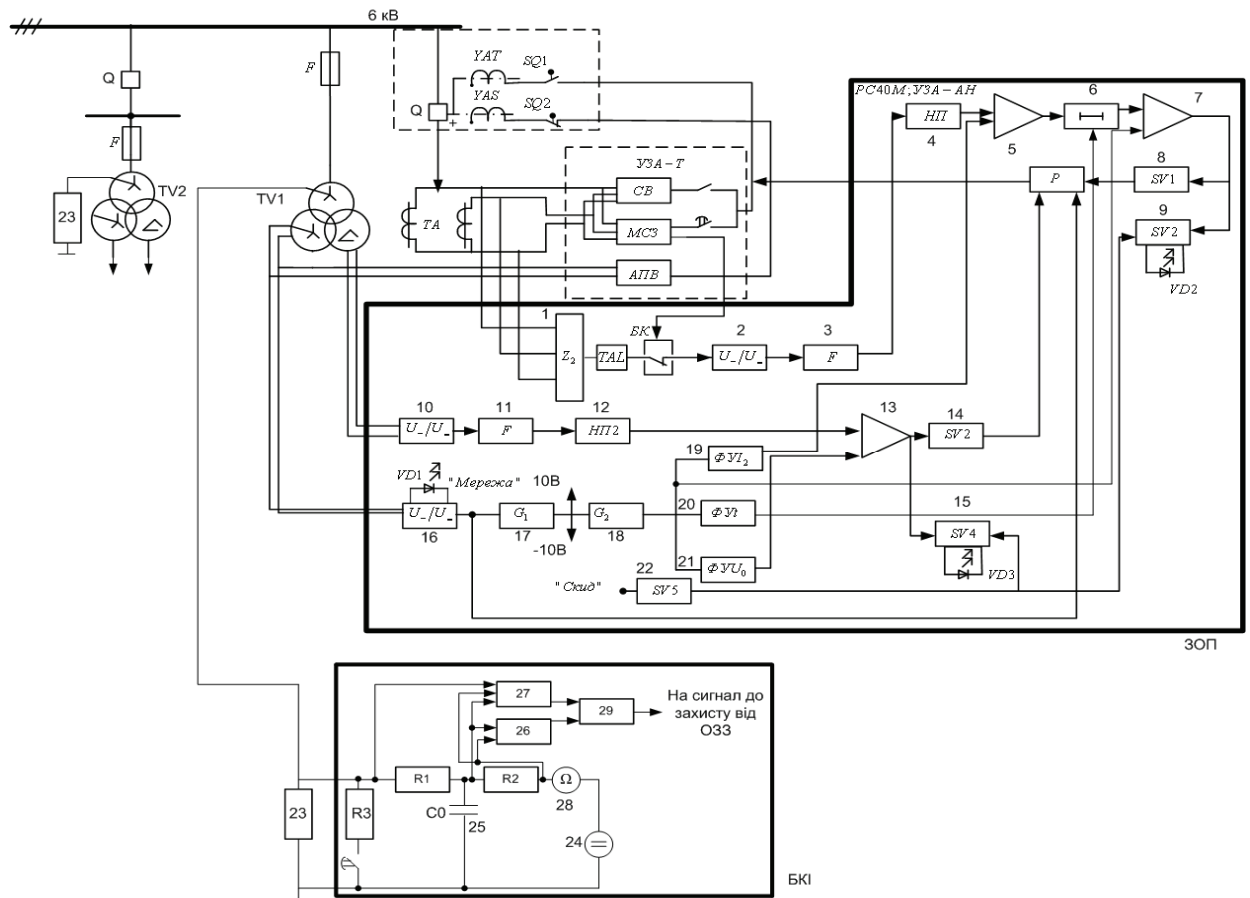


Рис. 4. Функціональна схема комбінованої системи протиаварійної автоматики

Принципова схема системи показана на рис. 4. Підсистема ЗОП отримує живлення від трансформаторів струму ТА та трансформатора напруги TV. Вхідна напруга від вторинної обмотки трансформатора напруги TV через випрямляч 16 потрапляє на джерело живлення 17, яке формує напругу живлення схеми +10 В і -10 В. Джерело 18 формує стабільну опорну напругу -2 В. Світлодіод VD1 сигналізує про наявність напруги джерела живлення.

У разі обриву фазного проводу сигнал від ТА через фільтр зворотної послідовності 1, проміжний трансформатор ТАL, розмикаючий контакт БК вихідного реле захисту від міжфазних к. з. УЗА-Т, випрямляч 2, фільтр нижніх частот 3, нормувач-перетворювач 4 потрапляє на перший вхід компаратора 5, на другий вхід якого подається сигнал від формувача уставки за струмом зворотної послідовності захисту 19. У випадку перевищення уставки, на виході компаратора 5 з'являється сигнал, який подається на перший вхід інтегратора 6, на другий вхід якого подається сигнал від

формувача уставки за часом 20. Швидкість зростання напруги на інтеграторі залежить від заданої уставки за часом.

З виходу інтегратора сигнал потрапляє на вхід компаратора 7, де порівнюється з сигналом від джерела оперативного струму 18, який пропорційний часу падіння проводу на землю. Після спрацювання компаратора 7, замикаються ключі 8 і 9, спрацьовує світлодіод VD2. Після падіння проводу на землю виникає однофазне замикання на землю, і на вторинній обмотці TV, з'єднаній в розімкнутий трикутник, виникає напруга нульової послідовності, яка випрямляється через випрямляч 10, фільтрується через фільтр нижніх частот 11, і через нормувач-перетворювач 12 подається на перший вхід компаратора 13, на другий вхід якого подається сигнал від формувача уставки за напругою нульової послідовності 21. У випадку перевищення уставки, компаратор спрацьовує, замикає ключі 14 і 15, світиться світлодіод VD3, та спрацьовує реле Р і подає сигнал через блок-контакт вимикача SQ1 на котушку YAT, вимикач Q вимикає лінію. Формувачі уставок 19, 20, 21 отримують живлення від джерела опорної напруги 18.

Після вимикання пошкодженої ділянки, схема захисту автоматично повертається у вихідне положення.

В разі виникнення міжфазного к. з., дія підсистеми ЗОП блокується за допомогою розмикаючого контакту БК (рис. 4). Скидання індикації спрацювання здійснюється за допомогою ключа 22 з передньої панелі. Також схема містить підсистему контролю ізоляції БКІ, вихід якого вмикається між нейтральною точкою первинної обмотки вимірювального трансформатора TV1 напруги та землею, паралельно ємнісному фільтру 23. Оскільки на підстанції та в розподільних пристроях споживачів можуть бути встановлені додаткові трансформатори напруги, то для запобігання шунтування сигналу від джерела накладання сигналу в їх нейтраль вмикають аналогічні фільтри. Блок контролю ізоляції містить джерело випрямленого струму 24; попередньо заряджений конденсатор 25 (C<sub>0</sub>); обмежувальні резистори R1 та R2, пристрій 26, що реагує на плавне зниження опору ізоляції; пристрій 27, що реагує на раптову зміну опору ізоляції; омметр 28 для контролю величини активного опору ізоляції фаз мережі відносно землі; коло R3, SB1, яке дозволяє перевіряти пошкодження елементів пристрою; блок сигналізації 29, який подає сигнал в разі плавного зниження опору ізоляції до граничної величини і пуск захисту від ОЗЗ. Фільтр приєднання містить конденсатор C1 та розрядник F. До комплекту також додається засіб АПВ.

### Висновок

Підвищення надійності СЕПК можна забезпечити шляхом оптимізації процесу керування технічним станом СЕПК в процесі експлуатації на основі технічної діагностики. Тому запропоновано комбіновану систему, в якій плавна зміна активного опору ізоляції фаз мережі відносно землі фіксується шляхом накладання на контрольовану мережу тестового сигналу, наприклад, випрямленої напруги і контролю реакції мережі на його вплив, а стрибкоподібна зміна активного опору ізоляції фіксується шляхом використання перехідного процесу в колі попередньо зарядженого конденсатора шляхом вимірювання максимального значення струму розряду конденсатора, який обернено пропорційний активному опору ізоляції в місці пошкодження, та метод захисту від обриву проводу, що ґрунтується на контролі значення струму зворотної послідовності до моменту падіння проводу на землю і напругу нульової послідовності після падіння проводу на землю.

Впровадження системи дозволяє значно підвищити надійність СЕПК, реалізувати систему технічного обслуговування по фактичному технічному стану ізоляції мережі та зменшить недовідпуск електроенергії, витрати на ремонтно-відновлювальні роботи, а також зменшить час пошуку місця пошкодження СЕПК.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Андриевский В. Н. Эксплуатация воздушных линий электропередачи / В. Н. Андриевский, А. Т. Головань, А. С. Зеличенко. — Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1989. — 208 с.
- 2 Андреев В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учеб. для вузов по спец. «Электроснабжение» / В. А. Андреев. — М.: Высш. Шк. — 1991. — 496 с.
- 3 Кутін В. М. Комбінована система керування технічним станом розподільних мереж / В. М. Кутін, С. В. Матвієнко, М. В. Кутіна // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2007. — № 1. — С. 37—41.
- 4 Кутін В. М. Комбінований принцип діагностування технічного стану систем електропостачання / В. М. Кутін, М. О. Ілюхін, М. В. Кутіна // Наукові вісті. Інститут менеджменту та економіки «Галицька академія» — 2007. — № 1 (11) — С. 62—66.

- 5 Пасынков В. В. Материалы электронной техники / В. В. Пасынков. — 2-е изд. — М. : Высш. шк, 1986. — 367 с.  
6. Кутіна М. В. Захист від аварійних режимів розподільних мереж зі складною топологією / М. В. Кутіна // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Остроградського. — 2007. — № 3 (44). — С. 129—131.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 27.11.2015

**Кутіна Марина Василівна** — канд. техн. наук, старший викладач кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, e-mail: mkytina@gmail.com;

**Свіргун Микола Юрійович** — студент факультету електроенергетики та електромеханіки, e-mail: k.svirgun@mail.ru

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

**M. V. Kutina<sup>1</sup>**  
**M. Yu. Svirgun<sup>1</sup>**

## Improvement of Emergency Automation in Power Systems of Quarries

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University

*There has been suggested the combined emergency automation system that allows detecting damage at an early stage of its emergency and quickly turning off the damaged area network in the event of wire breakage in power systems of quarries.*

**Keywords:** combined system, damage, wire breakage.

**Kutina Maryna V.** — Cand. Sc. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Electrical Power Consumption and Power Management, e-mail: mkytina@gmail.com;

**Svirgun Mykola Yu.** — Student of the Department of Electricity and electrical engineering, e-mail: k.svirgun@mail.ru

**М. В. Кутіна<sup>1</sup>**  
**М. Ю. Свіргун<sup>1</sup>**

## Совершенствования средств противоаварийной автоматики в системах электроснабжения карьеров

<sup>1</sup>Винницкий национальный технический университет

*Предложенная комбинированная система противоаварийной автоматики позволяет выявить повреждения на ранней стадии его возникновения и быстро отключить поврежденный участок сети при возникновении обрыва провода в системах электроснабжения карьеров.*

**Ключевые слова:** комбинированная система, повреждения, обрыв провода.

**Кутіна Марина Васильевна** — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента, e-mail: mkytina@gmail.com;

**Свіргун Николай Юрьевич** — студент факультета электроэнергетики и электромеханики, e-mail: k.svirgun@mail.ru