

УДК 621.317.61:622.012.2

**К.М. Маренич (канд. техн. наук, доц.)**  
ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Донецьк  
кафедра «Гірнична електротехніка і автоматика ім. Р.М. Лейбова»,  
E-mail: [gea@dgtu.donetsk.ua](mailto:gea@dgtu.donetsk.ua); [kmarenych@i.ua](mailto:kmarenych@i.ua)

## **ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМІНУ ПРОХОДЖЕННЯ СТРУМОМ ДВОХ ФІКСОВАНИХ РІВНІВ ЯК СПОСІБ ПРИСКОРЕННЯ ФУНКЦІЇ МАКСИМАЛЬНОГО СТРУМОВОГО ЗАХИСТУ**

*Досліджені і проаналізовані параметри електричної мережі при виникненні трифазного короткого замикання в електротехнічному комплексі шахтної дільниці, визначений можливий інформаційний параметр, що дозволить підвищити швидкість виявлення процесу короткого замикання.*

**Ключові слова:** шахта, електротехнічний комплекс, коротке замикання, електричний струм, параметр, вимірювання, пристрій захисту.

### **Загальна постановка проблеми**

Коротке замикання – один з найбільш небезпечних процесів, який може виникати під час експлуатації електротехнічного устаткування. Підвищення потужності споживачів обумовлює необхідність: застосування обладнання з більш низькими величинами опорів (трансформатори підвищеної потужності, кабелі підвищеного перерізу), запровадження в електромережах напруги наступного за величиною номінального рівня (1140 В у порівнянні з 660 В). Все це обумовлює підвищення струмів короткого замикання і, як наслідок, збільшення термічного навантаження на елементи ланцюга проходження струму к.з. Отже, умовою запобігання спалаху ушкодженого електроустаткування є підвищення швидкодії визначення стану к.з. і знеструмлення силового приєднання. Тому задача підвищення швидкодії виявлення стану короткого замикання є актуальною.

### **Постановка задачі дослідження**

Існуючі засоби максимального струмового захисту (МСЗ), якими комплектується рудникова силова комутаційна апаратура. Функціонують на основі порівняння фактичного струму в захищеному приєднанні з уставкою (завданою максимально припустимою величиною струму) [1]. В цьому разі спрацьовування МСЗ супроводжується затримкою в у часі, що обумовлена тривалістю досягнення струмом приєднання обраної уставки спрацьовування захисту. Крім того, не виключена ймовірність похибки персоналу при розрахунку або встановлення уставки спрацьовування захисту. Поряд з цим, параметрами, якими супроводжується коротке замикання в приєднанні з активно-індуктивним (кабельна мережа, асинхронний двигун) навантаженням є швидкість збільшення струму і суттєве зменшення фазового кута  $\varphi$  між струмом та напругою відповідної фази [2]. Тому практичний інтерес являє дослідження характеру зміни цих параметрів в умовах експлуатації шахтних дільничних електротехнічних комплексів з метою уточнення діапазону зміни їхніх величин (у залежності від реальних факторів впливу) та обґрунтування способу підвищення швидкодії виявлення режиму (стану короткого замикання).

### Основний матеріал дослідження

Дослідження особливостей зміни інформаційних параметрів, що характеризують виникнення процесу короткого замикання в приєднання шахтного дільничного електротехнічного комплексу доцільно виконувати, використовуючи схему заміщення (рис.1). Вона узгоджується з принциповими положеннями у відношення подібних об'єктів [2] і найбільш повно враховує активно-індуктивні параметри трансформатора підстанції електроживлення, кабельної мережі до та після точки к.з., асинхронного двигуна (АД) споживача, включаючи його фазні ЕРС обертання. Останнє, зокрема, дозволяє врахувати дію зворотних енергетичних потоків асинхронного двигуна на точку к.з., що дозволяє виконати комплексне дослідження процесу з урахуванням всіх можливих факторів впливу.

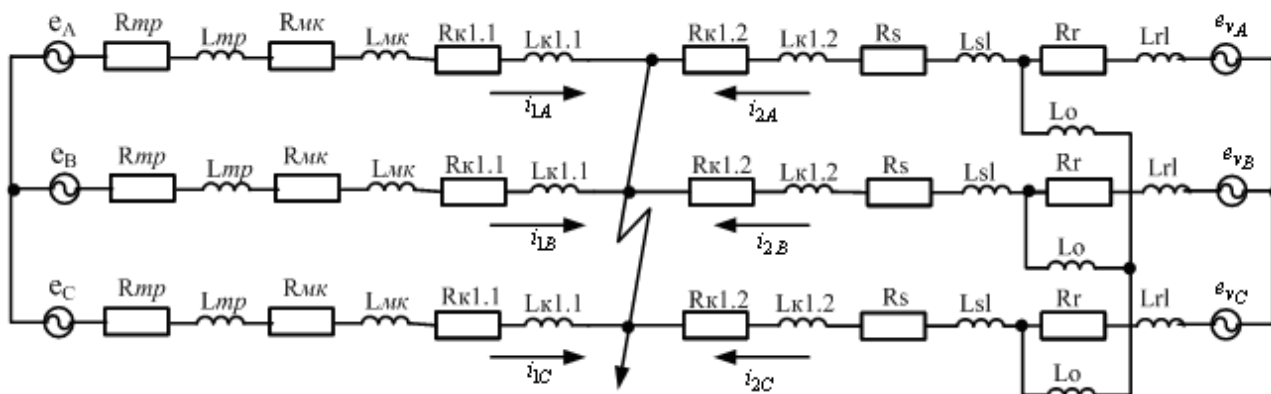


Рисунок 1 - Схема заміщення приєднання в електротехнічному комплексі дільниці шахти при виникненні в ньому трифазного короткого замикання

На схемі вказані:  $e_A, e_B, e_C$  - миттєві значення фазних напруг на виході трансформаторної підстанції; активні опори  $R_{mp}$ ;  $R_{mk}$  та індуктивності  $L_{mp}$ ;  $L_{mk}$ , відповідно, трансформатора підстанції живлення та магістрального кабеля; активні опори  $R_{kl.1}$ ;  $R_{kl.2}$  та індуктивності  $L_{kl.1}$ ;  $L_{kl.2}$ , відповідно, ділянок гнучкого кабеля до та після точки к.з.;  $e_{vA}, e_{vB}, e_{vC}$  - миттєві значення ЕРС обертання асинхронного двигуна (АД);  $i_{1A}, i_{1B}, i_{1C}$  та  $i_{2A}, i_{2B}, i_{2C}$  - миттєві значення фазних струмів, обумовлених, відповідно, напругою мережі та ЕРС обертання АД.

Таким чином, розрахункова схема силового приєднання дільничного електротехнічного комплексу в стані короткого замикання має структуру, відповідно до рис. 2 і передбачає наявність двох струмів до точки к.з.: з боку комплектної трансформаторної підстанції (КТП) та струм з боку статора асинхронного двигуна споживача аварійного приєднання. Ознакою перехідного процесу виникнення короткого замикання в мережі з активними ( $R$ ) та індуктивними ( $L$ ) елементами (струм з боку КТП) є наявність аперіодичної  $i_a$  і періодичної  $i_n$  складових струму к.з.  $i_k$ :

$$i_k = i_n + i_a = \sqrt{2}I_n \cdot \sin(\omega t - \varphi + \alpha_k) + i_{a0} \cdot e^{-t/T_a} \quad (1)$$

де  $I_n$  - діюче значення періодичної складової струму к. з.;  $i_{a0}$  - аперіодична складова струму к. з. у початковий момент виникнення;  $\omega = 2\pi f$  - кутова частота;  $\varphi$  - кут фазового зсуву струму в ланцюзі к. з.;  $\alpha_k$  - фаза включення к. з.;  $T_a$  - постійна часу ланцюга к. з.;  $f$  - частота мережі.

Зворотний струм від АД на ділянці між статором двигуна і точкою к.з. обумовлюється зворотною ЕРС обертання асинхронного двигуна:

$$e_{об} = \frac{L_0}{L_r} j(1-S)\omega_0 \psi_{op} e^{-\frac{t}{T_p}} e^{j\omega_0(1-S)t} \quad (2)$$

де  $L_0$  – індуктивність головного потоку АД;  $L_r$  – повна індуктивність ротора;  $S$  и  $\omega_0$  – ковзання та синхронна частота обертання ротора.

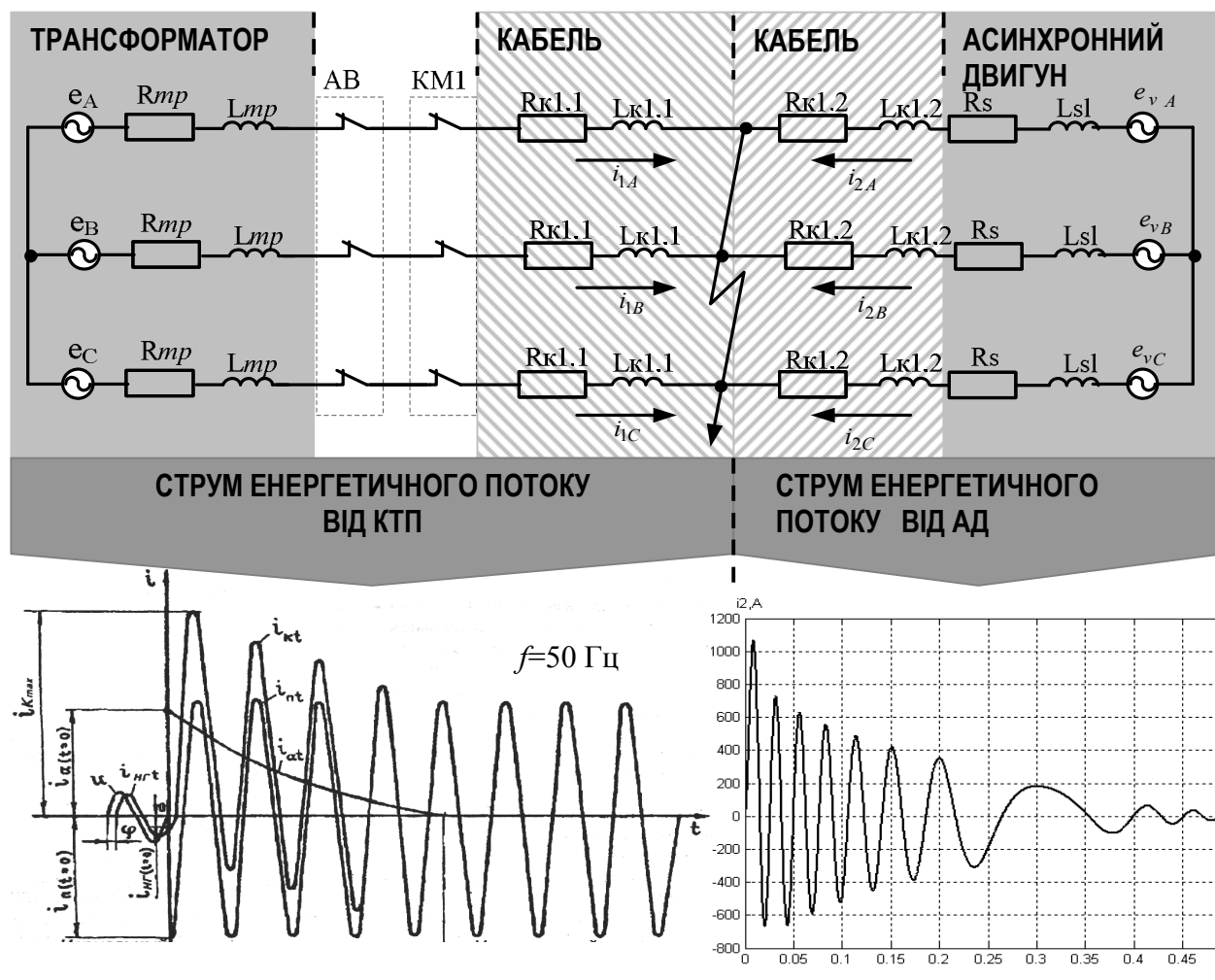


Рисунок 2 – Розрахункова схема силового приєднання дільничного електротехнічного комплексу в стані виникнення к.з. в кабелі живлення асинхронного двигуна і діаграми фазного струму к.з., обумовлене енергетичними потоками КТП і АД

Постійна затухання вільного струму ротора, що обумовлює характер зменшення ЕРС обертання АД, визначається виразом:

$$T_r = (L_r / R_r) = U_\phi \cdot K_n / I_0 R_r \omega_0, \quad (3)$$

де  $U_\phi$  – фазна напруга статора двигуна в режимі неробочого ходу;  $K_n = 1,1$  (для АД з повітряним охолодженням) – коефіцієнт, що враховує насичення магнітної системи АД;  $I_0$  – струм неробочого ходу АД.

Дослідження процесів в даній схемі може бути виконане засобами комп'ютерного моделювання з урахуванням припущень, що у вихідному стані в електромережі діє трифазна

система номінальних напруг ( $e_A, e_B, e_C$ ) промислової частоти; АД споживача навантажений номінальним моментом опору; коротке замикання в гнучкому кабелі трифазне, симетричне.

Практичний інтерес являє визначення величин фазового кута  $\varphi$  між струмом та напругою відповідної фази і швидкості збільшення струму в процесі при варіюванні довжини гнучкого кабелю до точки замикання з урахуванням параметрів опору вторинної обмотки трансформатора підстанції живлення типу КТПВ конкретної потужності та гнучкого кабелю марки КГЕШ відповідного перерізу при величині номінальної лінійної діючої напруги мережі 660 В та 1140 В.

З урахуванням існуючих тенденцій облаштування схем електропостачання технологічних дільниць вугільних шахт, для дослідження є припустимим прийняти: підстанції КТПВ-1000 та КТПВ-630; гнучкі кабелі КГЕШ 3×70, КГЕШ 3×50, КГЕШ 3×35, довжина яких до точки короткого замикання змінюється від 1 м до 300 м; магістральний кабель марки ЕВТ 3×120 довжиною 10 м з паспортними параметрами активних і індуктивних опорів провідників [3].

Результати комп'ютерного моделювання (рис. 3; рис. 4) дають реальне уявлення про характер зміни параметрів к.з. з урахуванням конкретних параметрів мережі і дозволяє зробити висновок про прийнятність використання  $di/dt$  у якості інформаційного про початок короткого замикання з урахуванням конкретного діапазону величин цього параметру за умови:  $\varphi_{min} < \varphi < \varphi_{max}$ .

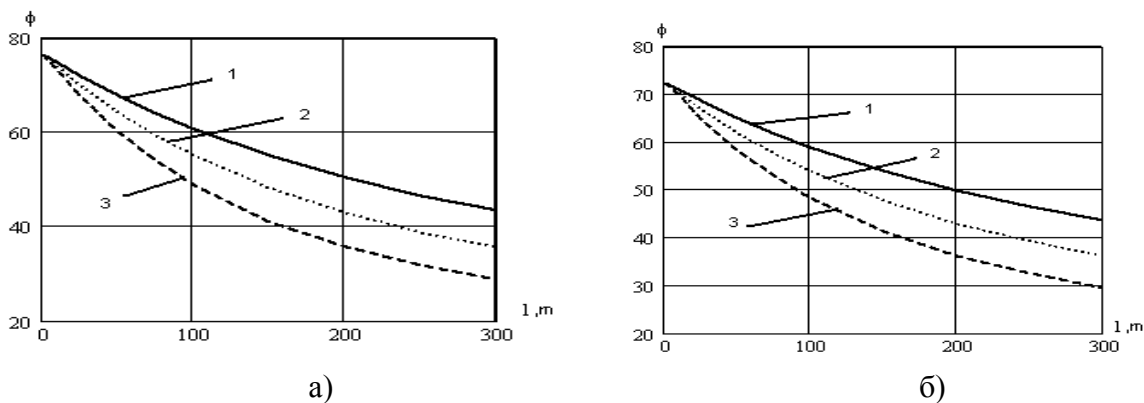


Рисунок 3 – Діаграми залежності кута  $\varphi$  від довжини гнучкого кабелю при напрузі на дільниці 1140 В: а) КТПВ-1000-6/1,2; б) КТПВ-630-6/1,2; (1 - КГЕШ 3×70, 2 - КГЕШ 3×50, 3 - КГЕШ 3×35)

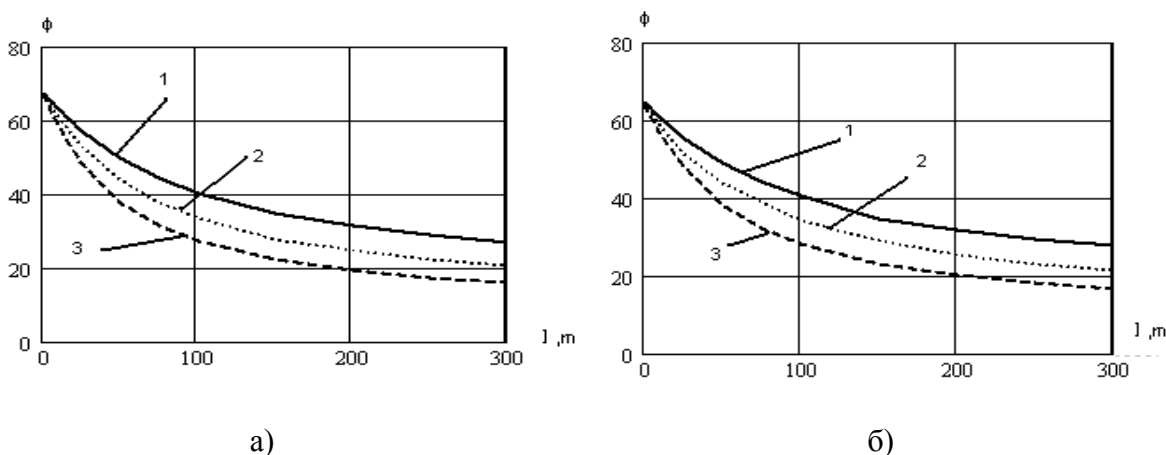


Рисунок 4 – Діаграми залежності кута  $\varphi$  від довжини гнучкого кабелю при напрузі на дільниці 660 В: а) КТПВ-1000-6/0,69, б) КТПВ-630-6/0,69, (1 - КГЕШ 3×70, 2 - КГЕШ 3×50, 3 - КГЕШ 3×35)

Моделюванням встановлено, що із збільшенням довжини ділянки кабелю до точки короткого замикання кут  $\varphi$  зсуву струму відносно фазної напруги експоненційно зменшується (що пояснюється збільшенням співвідношення «активний опір / індуктивність» ділянки мережі до точки к.з.). Попереднє значення  $\varphi$  є залежним від параметрів застосованої підстанції та магістрального кабелю. На рисунку 5 наведені діаграми зміни швидкості збільшення струму (А/с), що відповідає фазовому куту  $\varphi$  при варіюванні довжини гнучкого кабелю до точки замикання з урахуванням застосування кабелів різних перерізів.

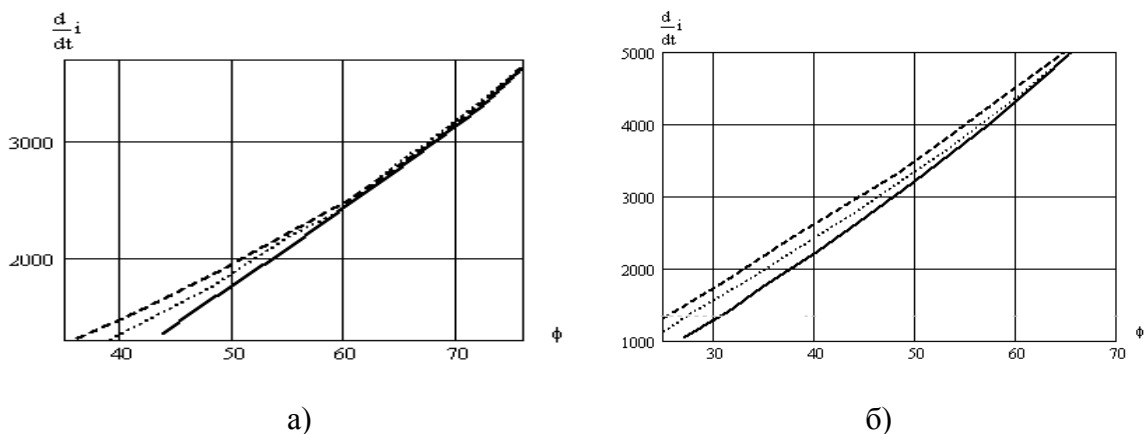


Рисунок 5 – Діаграми швидкості збільшення струму к.з., що відповідає величині кута  $\varphi$ : а) підстанція дільниці КТПВ-1000-6/1,2; б) підстанція дільниці КТПВ-1000-6/0,69; (1 – кабель КГЭШ 3×70; 2 – кабель КГЭШ 3×50; 3 – кабель КГЭШ 3×35)

Із зменшенням довжини гнучкого кабелю точки к.з. відповідно зменшуються струмообмежуючі властивості мережі, що призводить до підвищення параметра  $di/dt$ , супроводжуваному підвищенням фазового кута  $\varphi$ . Останнє пояснюється значним зменшенням співвідношення «активний опір / індуктивність» короткозамкненої ділянки з наближенням точки к.з. до затисків трансформаторної підстанції електроживлення.

Із зменшенням довжини гнучкого кабелю точки к.з. відповідно зменшуються струмообмежуючі властивості мережі, що призводить до підвищення параметра  $di/dt$ , супроводжуваному підвищенням фазового кута  $\varphi$ . Останнє пояснюється значним зменшенням співвідношення «активний опір / індуктивність» короткозамкненої ділянки з наближенням точки к.з. до затисків трансформаторної підстанції електроживлення.

Виявлення початку к.з. в дільничному електротехнічному комплексі може бути оснований на визначенні параметрів  $di/dt$  та  $\varphi$ , а також, їх співвідношення, що пояснюється рис. 6 і рис. 7 [4]. Зокрема, виявлення малої величини кута  $\varphi$  може бути виконано в результаті зіставлення часового інтервалу півхвилі напруги, пропорційної фазному струму ( $U4$ ) і часового інтервалу існування імпульсу обмеженої тривалості ( $U3$ ), сформованого в момент початку півхвилі напруги тієї ж фази і полярності. Співпадіння у часі імпульсів  $U4$  і  $U3$  (імпульс  $U5$ ) засвідчуватиме про не нормально низьку величину фазового кута  $\varphi$  і може розглядатися як умова виміру параметра  $di/dt$  на фіксованому інтервалі часу (імпульс  $U6$ , сформований переднім фронтом імпульсу  $U5$ ). Велике значення параметра  $di/dt$  на інтервалі імпульсу  $U6$  (що співпадає з малою величиною фазового кута  $\varphi$ ) засвідчуватиме про початок режиму к.з.

Визначення величини параметру  $di/dt$  може бути виконано на основі контролю часового проміжку проходження напругою, пропорційною фазному струму (миттєве значення) захищеної мережі двох віддалених рівнів  $U_{on1}$  та  $U_{on2}$  (рис. 7). Підвищена інтенсивність зростання струму відповідає співпадінню у часі інтервалів існування імпульсу  $U9$  (перевищення напругою  $U7$ , пропорційною струму мережі, порогового рівня  $U_{on2}$ ) та імпульса  $U11$  обмеженої тривалості, сформованого в момент рівності напруг  $U7$  і  $U_{on1}$ .

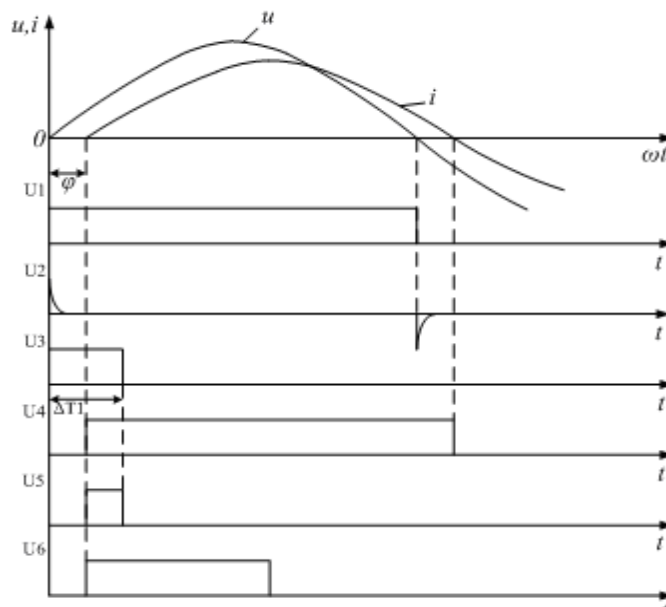


Рисунок 6 – Діаграма параметрів пристрою виявлення малого кута  $\varphi$  між напругою і струмом фази мережі

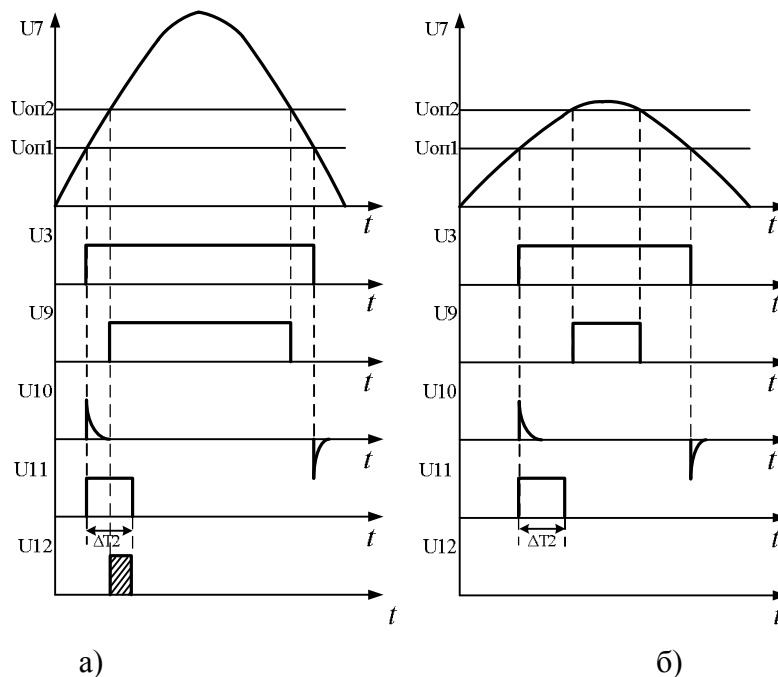


Рисунок 7 – Часові діаграми визначення інтенсивності підвищення миттєвого значення струму мережі

### Висновки

Запропонована розрахункова схема і обґрунтовані припущення дозволили в результаті комп'ютерного моделювання встановити характер зміни швидкості збільшення струму короткого замикання і фазового кута між струмом к.з. і напругою відповідної фази з урахуванням параметрів опорів елементів електротехнічного комплексу технологічної дільниці шахти. Інформаційним параметром початку процесу короткого замикання може вважатися спів падіння параметрів  $di/dt$  та  $\varphi$  в певних діапазонах величин. Запропонований спосіб виявлення величини вказаних параметрів.

**Список використаної літератури**

1. Справочник энергетика угольной шахты Т.2. / [В.С. Дзюбан, И.Г. Ширнин, Б.Н. Ванеев, В.М. Гостищев]; под общ. ред. Б.Н. Ванеева. – [2-е изд.]. – Донецк: ООО «Юго-Восток Ltd.», 2001. – С. 404-418.
2. Переходные процессы в системах электроснабжения: учебник [для студентов высших учебных заведений] / [Г.Г. Пивняк, В.Н. Винославский, А.Я. Рыбалко, Л.И. Незен]; под ред. академика НАН Украины Пивняка Г.Г. - [3-е изд.]. - М. Энергоатомиздат; Днепропетровск. НГУ, 2003. - 548 с.
3. Риман Я.С. Защита подземных электрических установок угольных шахт / Я.С. Риман. - М.: Недра, 1977. - 206 с.
4. Електрообладнання технологічних установок гірничих підприємств: підручник [для студентів вищих навч. закл.] / [К.М. Маренич, В.В. Калінін, Ю.В. Товстик и др.]. – Донецьк: ДонНТУ, Харків: УПА, 2009. – 371 с.
5. Спосіб захисту від струмів короткого замикання в мережі живлення асинхронного двигуна: патент на корисну модель 50773 (UA), МПК (2009) H02H3/00 / К.М. Маренич, І.В. Ковальова. – заявл. 14.12.2009; опубл. 25.06.2010, Бюл. № 12.

Надійшла до редакції:  
19.03.2013

Рецензент:  
д-р техн. наук, проф. Ковальов Є.Б.

**К.Н. Маренич**

**ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»**

**Определение времени прохождения током двух фиксированных уровней как способ ускорения функции максимальной токовой защиты.** Исследованы и проанализированы параметры электросети при возникновении трехфазного короткого замыкания в электротехническом комплексе участка шахты, определен возможный информационный параметр, позволяющий повысить быстродействия выявления аварийного процесса короткого замыкания.

**Ключевые слова:** шахта, электротехнический комплекс, короткое замыкание, электрический ток, параметр, измерение, устройство защиты.

**K.N. Marenych**

**Donetsk National Technical University**

**Estimation of the Time of Current Travelling through Two Fixed Levels as a Way of Accelerating the Functions of Overcurrent Protection.** A modern mine is an energy-intensive enterprise in which all the processes are electrified. The modern protection against short circuits is based on the method of measuring a parameter proportional to the electric current in the consumer's cable, comparing this value with the maximum allowed and turning off the network, if the measured value is higher than the maximum parameter. The short circuit in the power supply has a high risk of fire or methane-air mixture explosion in the atmosphere. Improvement of technological equipment is a prerequisite for increasing cross sections of cables, increasing the power transformers. Therefore, the properties of the power to limit the short circuit current are reduced. The problem of limiting the thermal overload in case of short circuit can be solved by reducing the duration of identifying and disabling this dangerous process. From here follows the need for high-speed methods of detecting short circuits in electric power networks. An analysis of electric system, based on the measurement of the phase between the current and voltage, the speed of current increase in a mine electrical system and the combination of these methods is interesting.

**Keywords:** mine; electrotechnical complex, electrical short circuit, electrical current, parameter measurement. device of protection.