

УДК 621.316.925.4

**В.Ф. Сивокобиленко** (д-р техн. наук, проф.),**С.В. Василюк** (канд. техн. наук)

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

## РОЗШИРЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ЗАХИСТУ ВІД КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ ВУГІЛЬНОЇ ШАХТИ

*Функціональні можливості захисту від короткого замикання електромережі шахти пропонується розширити шляхом визначення відстані до місця короткого замикання за активним та реактивним опорамі електромережі.*

**Ключові слова:** коротке замикання, захист, відстань, шахта, електромережа, фаза, струм, напруга.

*Актуальність проблеми та її зв'язок з прикладними задачами.* Специфічні умови експлуатації електромереж вугільних шахт визначають високу імовірність пошкодження гнучких кабелів гострими кусками вугілля або породи, елементами вугледобувного обладнання, робочим інструментом, внаслідок переміщення кабелів по ґрунту виробок услід за гірничими машинами, через вплив суттєвих зусиль, що розтягують, багатократні вигини та кручення, ушкодження кріпленням. Це призводить до порушення цілісності ізоляції кабелів та, як наслідок, виникнення коротких замикань, які є причиною спалахів метану, пожеж, вибухів у шахті. Згідно даних розслідувань 108-и вибухів на шахтах України за період 1976-2000 рр., 50 вибухів (46%) сталися через запалення метано-повітряної суміші електрострумом [1]. В 2001-2007 роках на вітчизняних шахтах сталося 14 вибухів та 24 спалахи метано-повітряної суміші, причиною 45% з яких було іскріння в кабелях, в результаті чого 705 людей постраждало, з них 267 загинули [2]. За вказаний період 38 чоловік загинуло і більше 500 отримали травми в результаті 46 ендогенних та 139 екзогенних пожеж. Одною з основних причин виникнення останніх є загоряння оболонки кабелів від струмів короткого замикання (31% випадків).

На сьогоднішній день існують апарати захисту від коротких замикань, що відключають живлення пошкодженої ділянки електромережі (наприклад, ПМЗ, БКЗ-ЗМК), які, однак, не дозволяють визначити відстань до місця короткого замикання, що здійснюється персоналом вручну. Велика протяжність та обмежений розмір гірничих виробок

бок, відсутність освітлення, висока запиленість ускладнюють пошук місця короткого замикання, що призводить до простоїв гірничого обладнання та зниження вуглевидобутку. Це обумовлює актуальність розширення функціональних можливостей захисту від короткого замикання електромережі шахти шляхом визначення відстані до місця короткого замикання.

**Відомі дослідження та публікації.** Відомо способи визначення місця короткого замикання поверхневих силових кабельних ліній, що живлять промислові та комунальні об'єкти, які поділяються на дистанційні (імпульсний, петлевий способи та спосіб коливального розрядка) та топографічні (індукційний та акустичний способи) [3]. Спільним недоліком цих способів є необхідність попереднього зниження перехідного опору в місці короткого замикання, яке виконується шляхом прожигання вказаного місця струмом суттєвої величини (десятки ампер) при напрузі до декількох кіловольт, що не може бути виконано в шахтних умовах, оскільки не відповідає вимогам вибухобезпеки та може спровокувати запалення метано-повітряної суміші або займання вугільного пилу.

Відомо спосіб визначення відстані до місця ушкодження в кабельній лінії [4], який полягає у тому, що на вхід об'єкта вимірювання впливають зондуючими імпульсами, приймають відбиті імпульси, піддають їх посиленню, що безперервно змінюється в часі за законом, який є зворотнім до закону затухання імпульсів, фіксують час приходу імпульса, відбитого від місця пошкодження, розімкнутого або короткозамкнутого кінця лінії та визначають відстань до місця пошкодження або до кінця лінії за інтервалом часу між моментом зондування та моментом приходу відбитого імпульсу. Недоліком способу є погіршення параметрів вибухобезпеки шахтної електромережі через необхідність накладання на мережу зондуючих імпульсів, які, при протіканні через місце короткого замикання після захисного відключення мережі, збільшують імовірність спалаху метану.

Також відомо спосіб дистанційного захисту лінії електропередачі [5], який передбачає цифрову фільтрацію миттєвих значень струмів та напруг (отриманих за допомогою аналого-цифрового перетворення сигналів з аналогових датчиків струмів та напруг лінії електропередачі на інтервалі, який дорівнює періоду промислової частоти) для формування комплексних значень фазних струмів та напруг з використанням алгоритма дискретного перетворення Фур'є, отримання значень активних та реактивних опорів на основі комплексних вели-

чин фазних струмів та напруг, для чого використовується один з відомих способів побудови цифрових багатофазних дистанційних органів релейного захисту, визначення відстані між місцем встановлення захисту та місцем короткого замикання на основі поточних вимірів активних та реактивних опорів, для чого виконується ділення вимірених активних та реактивних опорів на питомі активні та реактивні опори конкретної лінії електропередачі, обчислення результуючих оцінок відстаней шляхом зваженого усереднювання оцінок відстані, що отримані на основі вимірювань активного та реактивного опорів з урахуванням відповідних коефіцієнтів (оцінки останніх формуються на основі імітаційного моделювання лінії електропередачі та статистичної обробки даних), порівняння результуючих оцінок відстаней з уставками, в результаті чого забезпечується відключення пошкодженого елемента електромережі та реєстрація даних.

До недоліків вказаного способу відноситься низька точність, оскільки для формування комплексних значень фазних струмів та напруг необхідно виконувати цифрову фільтрацію миттєвих значень струму та напруг (алгоритм дискретного перетворення Фур'є), що характеризується наявністю похибок при значному обсязі обчислень. Також точність способу знижується через необхідність імітаційного моделювання лінії електропередачі для одержання оцінок коефіцієнтів, які використовуються для обчислення результуючих оцінок відстаней між місцем встановлення захисту та місцем короткого замикання, оскільки при імітаційному моделюванні неможливо врахувати всі фактори впливу на лінію електропередачі, а параметри тих факторів, що враховуються моделлю, завжди оцінюються з деякою похибкою. Іншим недоліком вказаного способу є зниження вибухобезпеки шахтних мереж, оскільки тривалість цифрової фільтрації миттєвих значень струмів та напруг, яка дорівнює періоду промислової частоти (20 мс для частоти 50 Гц), суттєво перевищує час захисного відключення мережі (2,5 мс), за якого забезпечується вибухобезпека при механічних пошкодженнях кабелю.

Таким чином, відомі способи визначення відстані до місця короткого замикання характеризуються недоліками, які перешкоджають їх застосуванню в умовах підземної частини шахтної електромережі.

**Постановка задачі.** Задачею роботи є вдосконалення захисту від короткого замикання електромережі вугільної шахти за рахунок визначення відстані до місця короткого замикання.

**Основний матеріал та результати досліджень.** Просторовий вектор лінійних напруг електромережі визначається миттєвими значеннями лінійних напруг наступним чином:

$$\bar{u} = 2/3 \cdot (u_{12} + a \cdot u_{23} + a^2 \cdot u_{31}), \quad (1)$$

де  $u_{12}$ ,  $u_{23}$ ,  $u_{31}$  – лінійні напруги відповідно між першою-другою, другою-третьою та третьою-першою фазами електромережі;  $a = e^{j2\pi/3}$  – комплексний оператор поворота.

Просторовий вектор лінійних струмів електромережі визначається миттєвими значеннями лінійних струмів згідно залежності:

$$\bar{i} = 2/3 \cdot (i_1 + a \cdot i_2 + a^2 \cdot i_3), \quad (2)$$

де  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$  – лінійні струми першої, другої та третьої відповідно фаз електромережі.

Активний опір електромережі до місця короткого замикання визначається як дійсна частина відношення просторового вектора лінійних напруг до просторового вектора лінійних струмів електромережі:

$$R = \operatorname{Re}[\bar{u} / \bar{i}]. \quad (3)$$

Реактивний опір електромережі до місця короткого замикання визначається наступним чином:

$$X = \operatorname{Im}[\bar{u} / \bar{i}]. \quad (4)$$

Сигнал на відключення електромережі передається при зменшенні кореня з суми квадратів активного та реактивного опорів електромережі до місця короткого замикання нижче уставки, тобто при виконанні умови:

$$\sqrt{R^2 + X^2} < |Z_{уст}|, \quad (5)$$

де  $|Z_{уст}| = l_m \cdot |Z_n|$  – уставка за модулем комплексного опору електромережі;  $l_m$  – довжина електромережі;  $|Z_n|$  – модуль питомого комплексного опору електромережі.

Відстань  $l_k$  від місця встановлення захисту до місця короткого замикання пропорційна кореню з суми квадратів активного та реактивного опорів електромережі до місця короткого замикання:

$$l_k = \sqrt{R^2 + X^2} / |Z_n|. \quad (6)$$

На рис. 1 зображена трифазна електромережа вугільної шахти з функціональними блоками пристрою захисту, що визначає відстань до місця короткого замикання [6]. Електромережа складається з першої 1, другої 2 та третьої 3 фаз та призначена для передачі електроенергії від джерела 4 через комутаційний апарат 5 та гнучкий кабель 6 до навантаження 7. Пристрій, що дозволяє визначити відстань 8 до місця 9 короткого замикання в гнучкому кабелі 6 з активними 10 та реактивними 11 опорами до місця короткого замикання, містить вимірювальні трансформатори струму 12, 13 та 14, які включені у фази 1, 2 та 3 електромережі відповідно, причому до виходів вказаних трансформаторів підключені входи аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) 15, 16 та 17 відповідно, та вимірювальний трифазний трансформатор напруги 18, перший, другий та третій виводи первинної обмотки якого підключені до фаз 1, 2 та 3 електромережі відповідно, а перший та другий виводи вторинної обмотки підключені до АЦП 19, другий та третій виводи - до АЦП 20, третій та перший виводи - до АЦП 21.

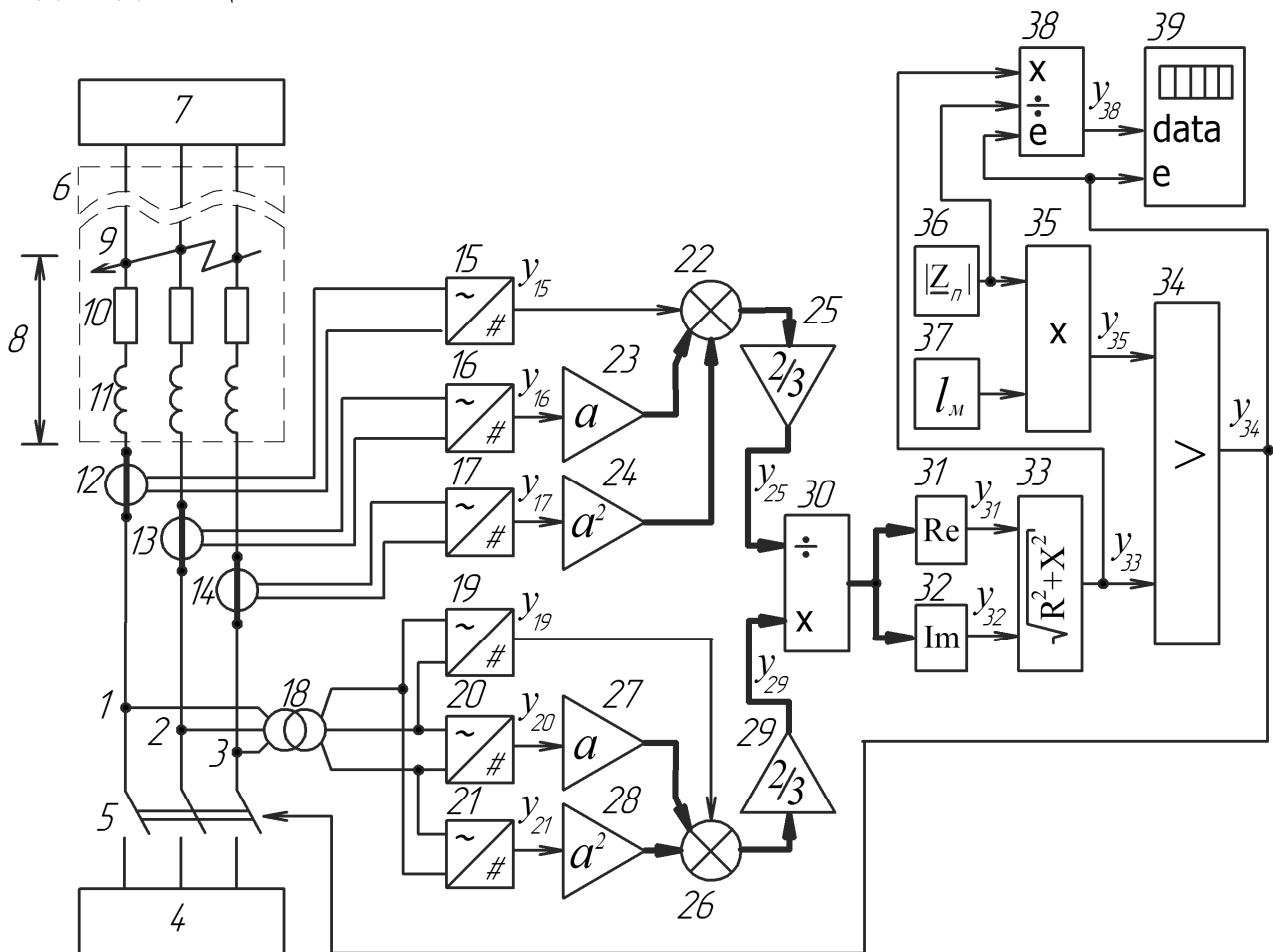


Рис. 1. Мережа вугільної шахти з функціональними блоками пристрою захисту, що визначає відстань до місця короткого замикання

Вихід АЦП 15 підключено до першого входу суматора 22, вихід АЦП 16 через підсилювач 23, коефіцієнт підсилення якого дорівнює комплексному оператору поворота  $a$ , підключений до другого входу суматора 22, а вихід АЦП 17 через підсилювач 24, коефіцієнт підсилення якого становить  $a^2$ , підключений до третього входу суматора 22, причому вихід останнього підключений до входу підсилювача 25 з коефіцієнтом підсилення  $2/3$ . Вихід АЦП 19 підключений до першого входу суматора 26, вихід АЦП 20 через підсилювач 27, коефіцієнт підсилення якого дорівнює  $a$ , підключений до другого входу суматора 26, а вихід АЦП 21 через підсилювач 28, коефіцієнт підсилення якого становить  $a^2$ , підключений до третього входу суматора 26, вихід якого підключений до входу підсилювача 29 з коефіцієнтом підсилення  $2/3$ .

Виходи підсилювачів 25 та 29 підключені відповідно до першого та другого входів блока ділення 30, який виконує ділення сигналу, що присутній на другому вході, на сигнал, що присутній на першому вході. Комплексний сигнал з вихода блока 30 подається на блоки 31 та 32 обчислення відповідно дійсної та уявної частин комплексного сигналу, тобто активного та реактивного опорів відповідно до місця короткого замикання. Вихід блока 31 підключено до першого входу блока 33, а вихід блока 32 – до другого входу блока 33, який обчислює корінь з суми квадратів сигналів на першому та другому входах. Вихід блока 33 підключено до другого входу блока порівняння 34, до першого входу якого підключено вихід блока множення 35, причому на перший вхід останнього подається сигнал від задатчика 36 модуля питомого комплексного опору електромережі, а на другий вхід блока множення 35 подається сигнал від задатчика 37 довжини електромережі, причому блок 35 виконує множення першого та другого вхідних сигналів. Вихід блока 33 також підключено до першого входу блока ділення 38, другий вхід якого підключено до виходу задатчика 36, а третій вхід – до вихода блока порівняння 34, причому блок ділення 38, за наявності одиничного сигналу на своєму третьому вході, виконує ділення сигналу, що подається на перший вхід, на сигнал, що подається на другий вхід, а вихід вказаного блоку ділення 38 підключено до першого входу (входу даних) індикатора 39, другий вхід якого (вхід дозволу роботи) підключено до виходу блока порівняння 34. За наявності одиничного сигналу на другому вході індикатора 39, він відображає інформацію, що подається за допомогою цифрового сигналу на перший вхід. Вихід блока порівняння 34 також підключено до

кола керування комутаційного апарата 5, який виконує відключення електромережі за наявності короткого замикання.

В разі виникнення в момент  $t_1$  трифазного короткого замикання в місці 9 електромережі, яка живить навантаження 7 при ввімкненому комутаційному апараті 5, від джерела 4 через активні 10 та реактивні 11 опори кабеля 6 буде протікати струм короткого замикання, який для фази 1 (струм  $i_1$ ) вимірюється вимірювальним трансформатором струму 12 та перетворюється в цифровий сигнал  $y_{15}$  АЦП 15, для фази 2 (струм  $i_2$ ) вимірюється вимірювальним трансформатором струму 13 та перетворюється в цифровий сигнал  $y_{16}$  АЦП 16, а для фази 3 (струм  $i_3$ ) вимірюється вимірювальним трансформатором струму 14 та перетворюється в цифровий сигнал  $y_{17}$  АЦП 17. Цифрові сигнали  $y_{15}$ ,  $y_{16}$ ,  $y_{17}$  змінюються синусоїдально з промисловою частотою (рис. 2, а), причому до момента  $t_1$  їх амплітуда відповідає амплітуді струму мережі в нормальному режимі, а після вказаного момента – амплітуді струму короткого замикання. Вимірювання лінійних напруг електромережі за допомогою вимірювального трансформатора 18 та перетворення вторинних напруг вказаного трансформатора в цифрові сигнали за допомогою АЦП 19, 20, 21 дозволяє отримати на виході АЦП 19 цифровий сигнал  $y_{19}$ , що відповідає лінійній напрузі  $u_{12}$ , на виході АЦП 20 цифровий сигнал  $y_{20}$ , що відповідає лінійній напрузі  $u_{23}$ , а на виході АЦП 21 цифровий сигнал  $y_{21}$ , що відповідає лінійній напрузі  $u_{31}$ , причому вказані цифрові сигнали змінюються синусоїдально (рис. 2, б). Множення цифрових сигналів  $y_{16}$  та  $y_{17}$  на  $a$  та  $a^2$  відповідно за допомогою підсилювачів 23 та 24 відповідно та складання отриманих комплексних цифрових сигналів з цифровим сигналом  $y_{15}$  за допомогою суматора 22, а також множення результату сумування на  $2/3$  за допомогою підсилювача 25 дозволяє отримати на виході останнього комплексний цифровий сигнал  $y_{25}$ , що відповідає значенням просторового вектора  $\vec{i}$  лінійних струмів електромережі, оскільки блоки 22-25 реалізують залежність (2).

На комплексній площині просторовий вектор лінійних струмів електромережі обертається за годинниковою стрілкою, описуючи, до момента  $t_1$ , траєкторію  $n$ , а після вказаного момента -  $m$ , причому перехід здійснюється за кривою АВ, що відповідає підвищенню амплітуди струмів мережі при короткому замиканні (рис. 3, а). Множення цифрових сигналів  $y_{20}$  та  $y_{21}$  на  $a$  та  $a^2$  відповідно за допомогою підсилювачів 27 та 28 відповідно та складання отриманих комплексних цифрових сигналів з цифровим сигналом  $y_{19}$  за допомогою сума-

тора 26, а також множення результату сумування на  $2/3$  підсилювачем 29 дозволяє отримати на виході останнього комплексний цифровий сигнал  $y_{29}$ , що відповідає значенням просторового вектора  $\bar{y}$  лінійних напруг електромережі, оскільки блоки 26-29 реалізують залежність (1), та описується на комплексній площині траєкторією у вигляді кола, оскільки амплітуда напруги є незмінною (рис. 3, а).

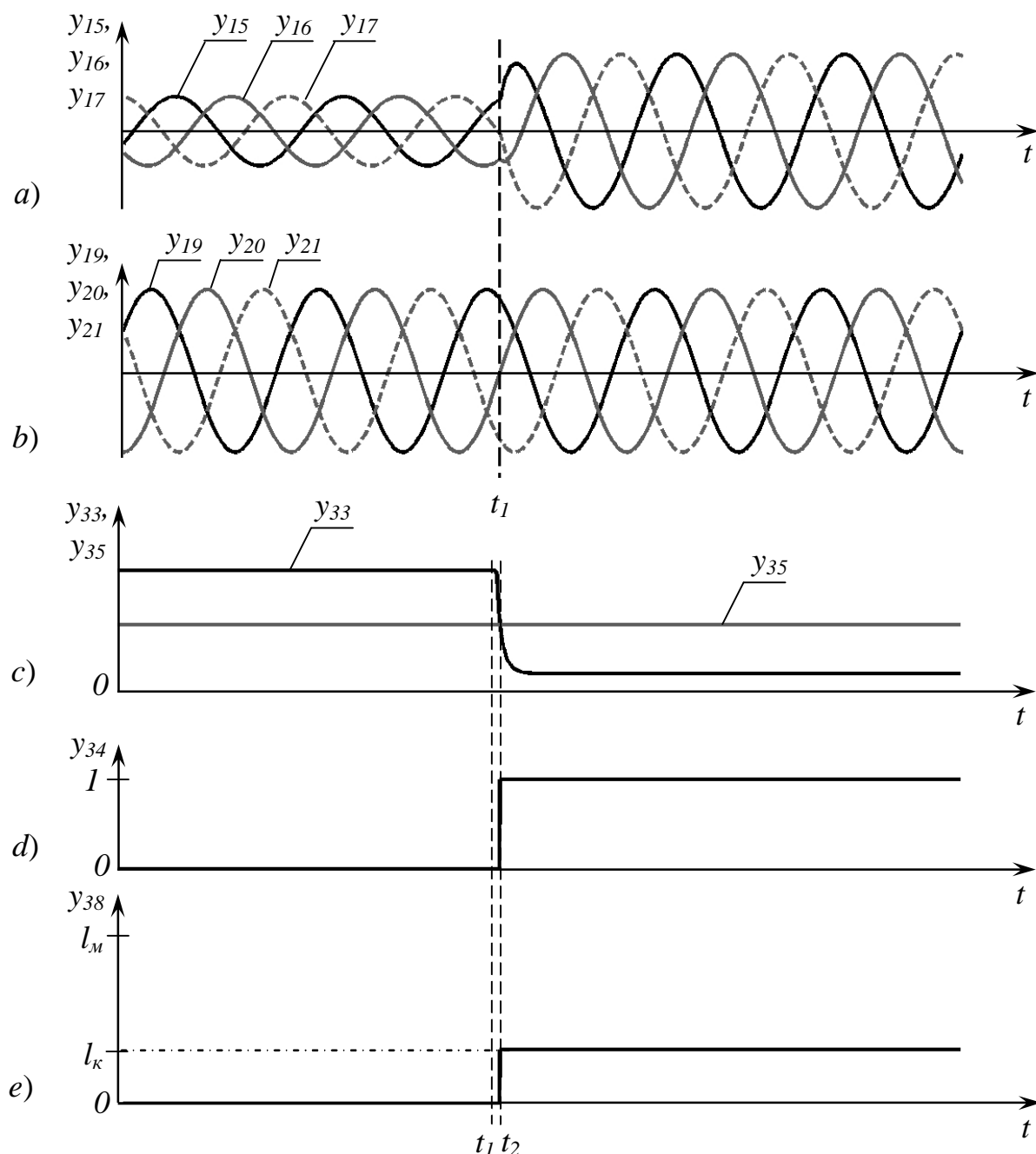


Рис. 2. Графіки сигналів пристрою при виникненні короткого замикання



Блоки 30 та 31 реалізують залежність (3) обчислення активного опору електромережі до місця короткого замикання, а блоки 30 та 32 – залежність (4) обчислення реактивного опору електромережі до місця короткого замикання. На площині активних та реактивних опорів сигнали  $y_{31}$  та  $y_{32}$  до моменту  $t_1$  відповідають точці С, а після  $t_1$ , в режимі короткого замикання, – точці D, причому перехід з точки С в точку D здійснюється за кривою CD (рис. 3, b). Корінь із суми квадратів активного та реактивного опорів електромережі до місця короткого замикання, якому відповідає цифровий сигнал  $y_{33}$  на виході блока 33, до моменту  $t_1$  відповідає довжині відрізка OC (рис. 3, b), а після вказаного моменту – довжині відрізка OD, що відображає діаграму зміни в момент  $t_1$  величини сигналу  $y_{33}$  в функції часу на рис. 2, c.

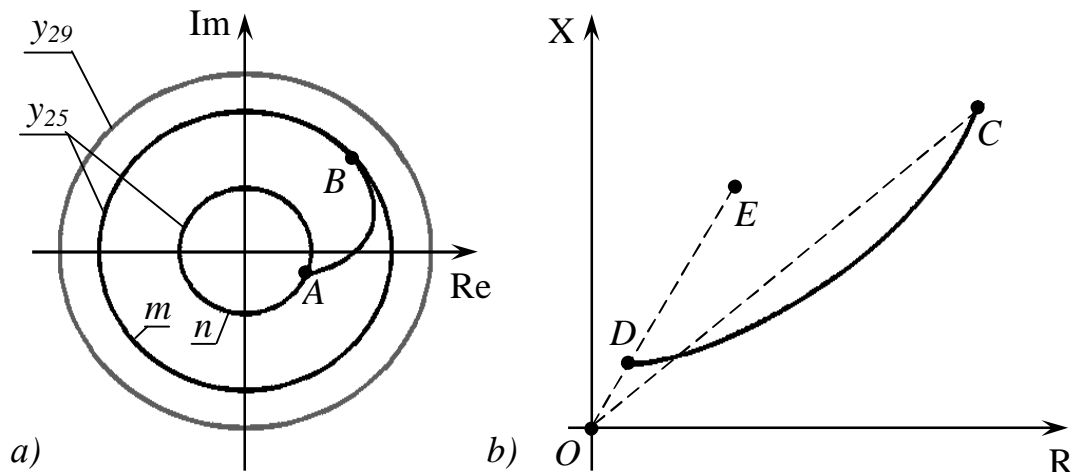


Рис. 3. Траєкторії просторових векторів лінійних струмів  $y_{25}$  та напруг  $y_{29}$  (a) та переміщення робочої точки на площині активних та реактивних опорів (b)

В момент  $t_2$  величина сигналу  $y_{33}$  стає меншою від сигналу  $y_{35}$ , значення якого відповідають уставці  $|\underline{Z}_{уст}|$  за модулем комплексного опору електромережі та обчислюються блоком 35 як добуток довжини електромережі (задатчик 37) та модуля питомого комплексного опору електромережі (задатчик 36). Зменшення сигналу  $y_{33}$  нижче  $y_{35}$  виявляється блоком порівняння 34, який, перевіряючи виконання умови (5), в момент  $t_2$  видає одиничний сигнал  $y_{34}$  (рис. 2, d), що впливає на коло керування комутаційним апаратом 5, який відключає електромережу. Одиничний рівень сигналу  $y_{34}$  дозволяє роботу блока ділення 38 та індикатора 39, причому цифровий сигнал  $y_{38}$  на виході блока 38, який реалізує залежність (6), відповідає відстані  $l_k$  від місця

встановлення захисту до місця короткого замикання (рис. 2, *e*), а індикатор 39 відображає інформацію про відстань 8 до місця короткого замикання.

При зменшенні або збільшенні відстані 8 до місця короткого замикання корінь із суми квадратів активного та реактивного опорів електромережі до місця короткого замикання буде відповідно зменшуватися або збільшуватися, чому відповідає збільшення або зменшення амплітуд струмів мережі та сигналів  $y_{15}$ - $y_{17}$  після моменту  $t_1$  (рис. 2, *a*), збільшення або зменшення абсолютної величини просторового вектора лінійних струмів електромережі та, відповідно, комплексного цифрового сигналу  $y_{25}$ , що на комплексній площині відповідає збільшенню або зменшенню радіуса траєкторії  $m$  (рис. 3, *a*), переміщення точки D на площині активних та реактивних опорів по лінії OE відповідно до точки O або до точки E (рис. 3, *b*), зменшення або збільшення величин сигналів  $y_{33}$  та  $y_{38}$  після моменту  $t_1$  (рис. 2, *c*, *e*) та відображення меншої або більшої величини на індикаторі 39.

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Запропоновано спосіб визначення відстані до місця короткого замикання в електромережі вугільної шахти за активним та реактивним опорами, які обчислюються як дійсна та уявна частини, відповідно, відношення просторового вектора лінійних напруг, що визначається миттєвими значеннями напруг між першою-другою, другою-третьою та третьою-першою фазами електромережі, до просторового вектора лінійних струмів, що визначається миттєвими значеннями струмів першої, другої та третьої фаз електромережі, і при зменшенні кореня з суми квадратів вказаних активного та реактивного опорів нижче уставки передають сигнал на відключення електромережі та відображають інформацію про відстань до місця короткого замикання. Використання запропонованого способу забезпечить підвищення рівня автоматизації вугледобичі, зменшить обсяг ручної праці з пошуку місця ушкодження кабеля та знизить час простоїв вугледобувного обладнання. В ході подальших досліджень необхідно розглянути можливі варіанти практичної реалізації запропонованого способу засобами мікропроцесорної техніки.

#### Список літератури

1. Брюханов О.М. Розвиток теорії і вдосконалення практики попередження та локалізації вибухів у глибоких шахтах: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук: спец. 05.26.01 «Охорона праці» / О.М. Брюханов. – Дніпропетровськ, 2007. – 33 с.
2. Анализ причин травматизма на шахтах Украины / О.И. Кашуба, Н.Б. Левкин, Е.А. Спиридонов, М.С. Ковчужный ] // Вісник Національного технічного університету

- України «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво». – 2008. – №17. – С. 172-177. – Режим доступу до журн.: [mining.kpi.ua/17\\_Kashuba.pdf](http://mining.kpi.ua/17_Kashuba.pdf).
3. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита / Э.М. Шнеерсон. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.
  4. Патент 2098838 (RU), G01R 31/11 Способ определения расстояния до места повреждения и длины проводов и кабелей линий электропередачи и связи и устройство для его осуществления / Н.А. Тарасов, Ю.А. Кириллов, И.А. Голуб. – 96102639/07. Заявл. 13.02.1996. Оpubл. 10.12.1997.
  5. Патент 2447454 (RU), G01R 31/08, H02H 3/40 Способ дистанционной защиты линии электропередачи / А.Л. Куликов. – 2010144803/28. Заявл. 01.11.2010. Оpubл. 10.04.2012.
  6. Патент на КМ 79147 (UA), G01R 31/08 Спосіб визначення відстані до місця короткого замикання в електромережі вугільної шахти / В.Ф. Сивокобыленко, С.В. Васи́лец. – u201212527. Заявл. 02.11.2012. Оpubл. 10.04.2013, Бюл. № 7.

Стаття надійшла до редакції 23.10.2013

**В.Ф. Сивокобыленко, С.В. Васи́лец. ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»**

### **Расширение функциональных возможностей защиты от короткого замыкания электросети угольной шахты**

*Функциональные возможности защиты от короткого замыкания электросети шахты предлагается расширить путем определения расстояния до места короткого замыкания по активным и реактивным сопротивлениям электросети.*

**Ключевые слова:** короткое замыкание, защита, расстояние, шахта, электросеть, фаза, ток, напряжение.

**V. Sivokobylenko, S. Vasylets. Donetsk National Technical University**

### **Short Circuit Protection of Mine Power Network Functionality Enlargement.**

*Existing protection devices in case of short circuit trip the damaged part of the mine power network from the power source. These devices do not allow to determining the distance to the fault point, it is done manually by personnel. Considerable extension of headings, lack of illumination, high dustiness complicate the search for the fault location. This leads to mining equipment downtime and lower coal output. A method for determining the distance to a short circuit in the mine power network according to the values of resistance and reactance to the fault was proposed. Resistance and reactance are calculated as real and imaginary parts of the relationship of two space vectors: the line voltages vector and line currents vector of the network. If the value of root-sum-square indicated resistances decreases below the predetermined level, the trip signal is produced and the distance to the fault is displayed. The functional diagram of a device that calculates the distance to a fault in the network is proposed. Using the proposed method will increase the level of mining automation, reduce the amount of manual labor to find a fault in cable and reduce equipment downtime. During further research it is necessary to consider options for practical implementation of the proposed method using microprocessor technology.*

**Key words:** short circuit, protection, distance, mine, power network, phase, current, voltage.