

ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ЕЛЕКТРОУСТАТКУВАННЯ

УДК 622:621.316.9

*В.Ф. Сивокобиленко, д-р техн. наук, С.В. Василець, канд. техн. наук
(Україна, Донецьк, ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»)*

ВДОСКОНАЛЕННЯ ЗАХИСТУ ВІД ВИТОКІВ СТРУМУ НА ЗЕМЛЮ В УМОВАХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ ДІЛЬНИЦІ ШАХТИ

Актуальність проблеми та її зв'язок з прикладними задачами

Електромережа дільниці вугільної шахти обов'язково обладнується апаратом захисту від витоків струму на землю (наприклад, серії АЗУР), який безперервно контролює активний опір ізоляції мережі відносно землі шляхом накладання на дільничну електромережу постійного оперативного струму i , у разі недопустимого зниження величини вказаного опору, видає сигнал на захисне відключення групового автоматичного вимикача розподільного пристрою низької напруги дільничної підстанції [1]. Для зниження величини струму витоку, що підтримується до захисного відключення мережі вторинною напругою трансформаторної підстанції, а в подальшому – ЕРС вибігу асинхронних двигунів, такі апарати оснащуються схемами компенсації ємнісного струму витоку та замикання на землю пошкодженої фази мережі. Ефективність застосування компенсатора ємнісного струму витоку, що настроєний на промислову частоту, знижується зі зменшенням частоти напруги, яка підтримується ЕРС вибігу двигунів. Також надійність захисту та електробезпеку знижує можливе помилкове закорочення на землю непошкодженої фази, у разі чого величина струму витоку збільшується. Крім того, захисна дія існуючих засобів захисту на коло витоку, що знаходиться в одному з відгалужень мережі, обмежується часом підтримання ЕРС вибіга контактора відповідного пускача у ввімкненому стані, оскільки після його відключення неможливо, за допомогою існуючих апаратів захисту, знизити струм через коло витоку, який може досягати суттєвих величин та становити небезпеку смертельного електроураження людини або виникнення пожеж, вибухів метано-повітряної суміші, що є недоліком відомих реле витоку.

Статистичні дані свідчать, що електротравмування зі смертельними наслідками на підприємствах вугільної галузі України за 1992–2001 рр. складає 6,2% (211 випадків) загального числа летальних виробничих травм усіх видів [2]. Для підземних електроустановок цей показник становить 5,4%. Причиною 97% смертельних електротравм стало доторкання до струмопровідних частин під напругою. В підземних електроустановках сталося 40 випадків електротравмування, з них у низьковольтних мережах змінного струму – 72. Кабельні мережі стали причиною 53 нещасних випадків, комутаційні апарати до 1000 В – 22. На гірничих підприємствах США в період 1990–1999 рр. сталося 1926 випадків електротравмування людей, 75 з яких були летальними (70 людей загинуло від струму витоку, 5 – через опіки). Тривалого лікування потребували 57 % постраждалих від електричного струму [3]. Згідно з даними розслідувань 108-ми вибухів на шахтах України за період 1976 – 2000 рр., 50 вибухів (46%) сталися через запалення метано-повітряної суміші електрострумом [4]. У 2001 – 2007 роках на вітчизняних шахтах сталося 14 вибухів та 24 спалахи метано-повітряної суміші, причиною 45% з яких було іскріння в кабелях, у наслідок чого 705 людей постраждало, з них 267 загинули [5]. 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 оболонок кабелів від електроструму (31,2% випадків).

Таким чином, удосконалення існуючих засобів захисту від витоків струму на землю в електромережі дільниці шахти є актуальним.

Відомі дослідження та публікації

Відомо спосіб захисту людини від ураження електричним струмом [6], який полягає у відключенні мережі груповим вимикачем за струмом витоку, яке супроводжується додатковим відключенням усіх відгалужень, причому під час захисного відключення, в момент зникнення струму в кожному відгалуженні фази такого відгалуження з боку виходу відповідного комутаційного апарата з'єднують між собою та під'єднують до кола заземлення через дросель. Недоліком такого технічного рішення є визначення моменту захисного відключення автоматичного вимикача опосередковано за зникненням струмів у відгалуженнях, оскільки після відключення мережі між двигунами відгалужень протікають зрівнювальні струми, величини яких відповідають значенням струмів ненавантаженого режиму, що може викликати неспрацьованість пристрою реалізації вказаного способу та знижує надійність останнього. Крім того, видача помилкової команди на спрацьовування фазного короткозамикача призведе до штучного короткого замикання, а це погіршує електробезпеку та є неприпустимим.

Існує спосіб захисту людини від ураження електричним струмом [7], який полягає у відключенні дільничної електромережі автоматичним вимикачем при виникненні витoku струму з одночасним відключенням усіх силових відгалужень. При застосуванні такого способу ємнісна складова струму витoku знижується за рахунок дроблення мережі на окремі відгалуження із задовільною швидкістю. Однак цей спосіб не передбачає усунення впливу ЕРС вибігу двигуна відповідного відгалуження на коло витoku, що не забезпечує достатній рівень електробезпеки. Крім того, подача команди від реле витoku на відключення пускачів відгалужень вимагає прокладання додаткових сигнальних ліній, що знижує надійність захисту.

Відомо спосіб струмового захисту в мережі живлення асинхронного двигуна у складі дільничного електротехнічного комплексу [8], що включає визначення струму двигуна за допомогою трансформаторів струму, які під'єднані до випрямляча, а, за наявності у вихідній напрузі останнього імпульсів підвищеної амплітуди передбачає формування команди на роз'єднання трифазної схеми обмоток статора та під'єднання однієї з них до заземленого металевого корпусу асинхронного двигуна через резистор. Недоліки такого способу:

- можливість застосування тільки при з'єднанні статорної обмотки двигуна за схемою «зірка»;
- при роз'єднанні трифазної схеми обмоток статора жили кабелю лишаються під потенціалом ЕРС вибігу двигуна, що при низькому рівні опору ізоляції статора нівелює захисну дію пристрою;
- підключення між нульовою точкою статорної обмотки, з'єднаною за схемою «зірка», та заземлювачем додаткових елементів може призвести до підвищення величини струму витoku на землю, що погіршує електробезпеку, та до помилкового спрацьовування загальномережевого реле витoku при комутаціях силових відгалужень, що знижує надійність реалізації способу.

Таким чином, відомі способи не вирішують у повній мірі задачу підвищення електробезпеки дільничної мережі, однак можуть служити базою при вдосконаленні захисту від витokів струму на землю.

Постановка задачі

Вдосконалення захисту від витokів струму на землю в умовах дільничної електромережі шахти за рахунок зниження напруги у колі витoku струму на землю при переході двигунів до режиму вибігу.

Основний матеріал та результати досліджень

Розглянемо дільничну електромережу шахти (рис. 1), що складається з трансформаторної підстанції 1, яка включає силовий трансформатор 2, автоматичний вимикач 3 та апарат 4 захисту від витokів струму на землю (реле витoku), комутаційні апарати 5 (рудникові пускачі) силових відгалужень, до яких гнучкими кабелями 6 з активними опорами 7 та індуктивностями 8 жил, активними опорами 9 та ємностями 10 ізоляції відносно землі, підключаються асинхронні двигуни 11 споживачів. У разі виникнення витoku струму на землю через опір тіла людини 12 або неприпустимого зниження активного опору 9 ізоляції кабелю спрацьовує реле витoku 4, яке подає команду на захисне відключення автоматичного вимикача 3, який від'єднує мережу від трансформатора 2, після чого двигуни 11 переходять до режиму вибігу з миттєвим зниженням частоти напруги мережі до 97 – 99% від промислової частоти, що визначається ковзанням двигунів у попередньому робочому режимі. Напруга в мережі підтримується ЕРС вибігу двигунів, яка знижується за амплітудою (через затухання вільних струмів роторів асинхронних двигунів), та частотою (через гальмування роторів двигунів механічним навантаженням) [9]. Вказана напруга та ємність 10 ізоляції кабелів відносно землі визначають величину струму витoku на землю.

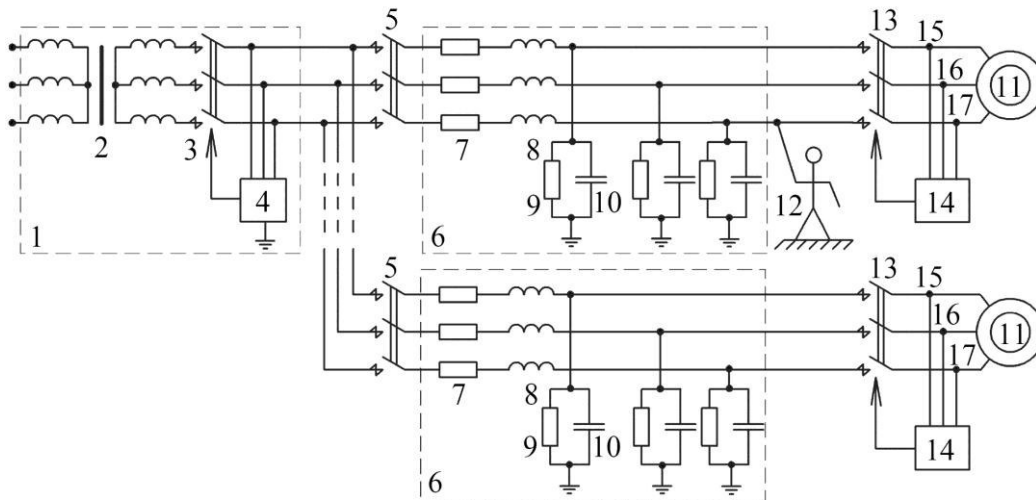


Рис. 1. Принципова схема дільничної електромережі шахти з блоками контролю частоти приєднань

Для вдосконалення захисту від витоків струму на землю пропонується [10] кожне відгалуження мережі обладнати додатковими силовими комутаційними апаратами 13, які включені між виводами статорних обмоток асинхронних двигунів 11 та гнучкими кабелями 6 силових відгалужень, та реле частоти 14, які приєднуються вимірювальними колами до фаз відгалуження з боку виходів додаткових силових комутаційних апаратів 13. Кожне реле частоти 14 виявляє факт зниження частоти напруги в мережі нижче встановленого рівня, що має місце при відключенні мережі та переході двигунів до режиму вибігу, та видає команду на відключення відповідного комутаційного апарата 13, який від'єднує відповідний двигун 11 від мережі. Це дозволяє за найкоротший час знизити до нуля напругу між фазами від'єднаних, з одного боку, від силового трансформатора 2, а з іншого, – від асинхронних двигунів 11 гнучких кабелів 6 та, відповідно до нуля струм витoku на землю через опір тіла людини 12 або знижений активний опір ізоляції 9, що підвищує електробезпеку мережі. Визначення моменту від'єднання мережі від джерела живлення зі зниженням частоти напруги, яка підтримується ЕРС вибігу двигунів, дозволяє безпомилково та в найкоротший термін сформувати команду на відключення додаткового комутаційного апарата.

Час спрацьовування реле зниження частоти 14 впливає на тривалість протікання струму через опір тіла людини, тому має бути меншим періоду напруги мережі. Відомі реле частоти, зокрема, РЧ-1, РЧ-2, РСГ-11, БМАЧР-М, БММРЧ, які призначені для використання в схемах автоматичного частотного розвантаження енергосистем загальнопромислового призначення [11], не задовольняють такій вимозі, оскільки їх час спрацьовування перевищує тривалість періоду напруги мережі. Тому в основу роботи реле зниження частоти 14 пропонується покласти спосіб [12] вимірювання частоти енергосистеми як модуля похідної за часом від кута повороту просторового вектора лінійних напруг енергосистеми відносно дійсної осі комплексної площини. При цьому просторовий вектор

$$\bar{u} = \frac{2}{3} \left(u_{ab} + e^{j120^\circ} \cdot u_{bc} + e^{j240^\circ} \cdot u_{ca} \right), \quad (1)$$

де u_{ab} , u_{bc} , u_{ca} – лінійні напруги між першою – другою, другою – третьою та третьою – першою фазами енергосистеми відповідно.

Частота напруги енергосистеми розраховується за виразом

$$\omega = |d\varphi/dt|, \quad (2)$$

де φ – кут повороту просторового вектора відносно дійсної осі комплексної площини, який визначається так:

$$\varphi = \max\{\varphi_{ab}, \varphi_{bc}, \varphi_{ca}\}, \quad (3)$$

де $\varphi_{ab} = \arccos(u_{ab}/|\bar{u}|)$; $\varphi_{bc} = \arccos(u_{bc}/|\bar{u}|)$; $\varphi_{ca} = \arccos(u_{ca}/|\bar{u}|)$.

Модуль просторового вектора визначається як квадратний корінь суми квадратів його дійсної $\text{Re}[\bar{u}] = u_{ab}$ та уявної $\text{Im}[\bar{u}] = (u_{bc} - u_{ca})/\sqrt{3}$ частин:

$$|\bar{u}| = \sqrt{(\text{Re}[\bar{u}])^2 + (\text{Im}[\bar{u}])^2} = \sqrt{u_{ab}^2 + (u_{bc} - u_{ca})^2/3}. \quad (4)$$

Для визначення просторового вектора, за допомогою якого розраховується частота напруги енергосистеми та відповідно його модуля за формулою (4) і кута повороту відносно дійсної осі комплексної площини за виразом (3) достатньо однократного вимірювання лінійних напруг мережі.

Реле частоти (рис. 2), що реалізує спосіб вимірювання частоти енергосистеми [12], підключається до фаз відгалуження у вузлах 15 – 17 та містить вимірювальні перетворювачі 18 – 20, які вимірюють лінійні напруги u_{ab} , u_{bc} , u_{ca} відповідно, до виходів яких підключено функціональний блок 21 обчислення модуля просторового вектора згідно з (4) та перші входи функціональних блоків 22, 23 та 24, які обчислюють відношення відповідно лінійних напруг u_{ab} , u_{bc} та u_{ca} до модуля $|\bar{u}|$ просторового вектора \bar{u} , що був обчислений у блоці 21. Сигнали $u_{22} - u_{24}$ з виходів блоків 22 – 24 відповідно подаються на входи функціональних блоків 25 – 27 обчислення \arccos . Сигнали $u_{25} - u_{27}$ з виходів блоків 25 – 27, що відповідають кутам φ_{ab} , φ_{bc} та φ_{ca} подаються на перший, другий та третій входи блока 28 віднайдення максимальної величини згідно (3), сигнал u_{28} на виході якого сигнал відповідає куту φ повороту просторо-

вого вектора \bar{u} відносно дійсної осі комплексної площини. До виходу блока 28 під'єднано функціональний блок 29 обчислення похідної за часом, сигнал u_{29} з виходу якого подається на вхід функціонального блока 30 обчислення модуля. Блоки 29 та 30 у сукупності реалізують залежність вимірювання частоти напруги мережі (2) як модуля похідної за часом від кута повороту просторового вектора, при цьому виміряна частота напруги ω відповідає сигналу u_{30} на виході блока 30. Сигнал u_{31} з виходу блока 31 заданої частоти, подається на перший вхід блока порівняння 32, на другий вхід якого надходить сигнал u_{30} . Сигнал u_{32} на виході блока порівняння 32 передається на блок керування додатковим комутаційним апаратом 13, причому вказаний сигнал дорівнює нулю, якщо сигнали u_{30} та u_{31} однакові (комутаційний апарат 13 знаходиться у замкненому стані), та є ненульовим, якщо сигнал u_{30} та u_{31} не є однаковими (додатковий комутаційний апарат 13 – у розімкненому стані).

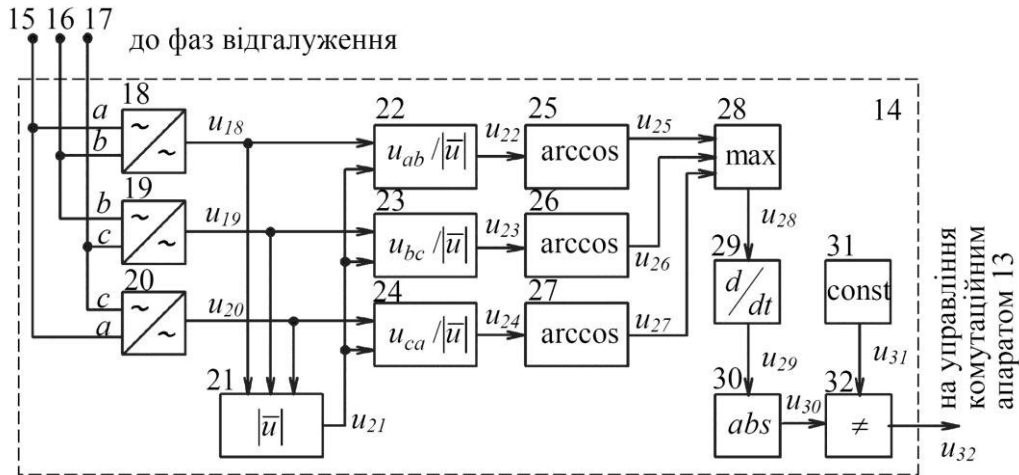


Рис. 2. Функціональна схема реле частоти

Реалізація вказаного способу вимірювання частоти енергосистеми пояснюється діаграмами (рис. 3). Припускаємо, що у момент часу t_1 виникає витік струму на землю через опір 12 тіла людини (внаслідок доторкання фази електромережі), а в момент часу t_2 за команду апарата захисту від витоків струму на землю 4 відключився автоматичний вимикач 3, причому до моменту часу t_2 асинхронні двигуни 11 споживачів працюють в усталеному режимі. На виходах вимірювальних перетворювачів 18 – 20 наявні сигнали $u_{18} - u_{20}$ відповідають трифазній системі лінійних напруг (рис. 3, a). Сигнали $u_{22} - u_{24}$ на виходах блоків 22 – 24 відповідно змінюються гармонійно з частотою напруги мережі та одиничною амплітудою (рис. 3, b). Сигнали $u_{25} - u_{27}$ на виході блоків 25 – 27 змінюються пилоподібно від 0 до π з частотою напруги мережі (рис. 3, c). Похідна за часом від пилоподібного сигналу u_{28} (рис. 3, d) на виході блока 28 визначається в блоці 29. Додатне значення сигналу u_{29} (рис. 3, e) на виході функціонального блока 29 дорівнює швидкості зростання сигналу u_{28} , а від'ємне – швидкості зниження сигналу u_{28} . Обчислення модуля від сигналу u_{29} в блоці 30 дозволяє поєднати додатні та від'ємні значення похідної та отримати сигнал u_{30} , що відповідає частоті напруги мережі (рис. 3, f).

При відключенні автоматичного вимикача 3 за сигналом реле витoku 4 в момент часу t_2 двигуни 11 переходять до режиму вибігу, частота напруги на статорах, яка підтримується ЕРС вибігу, знижується, що призводить відповідно до зниження частоти сигналів $u_{22} - u_{24}$, $u_{25} - u_{27}$ та u_{28} , зменшення додатних та від'ємних амплітуд похідної сигналу u_{29} та до зниження сигналу u_{30} кожного реле частоти. До моменту часу t_3 сигнали u_{30} та u_{31} є однаковими (рис. 3, f), що визначає нульовий рівень сигналу u_{32} (рис. 3, g) і замкнений стан комутаційного апарата 13. Оскільки після моменту часу t_3 сигнали u_{30} та u_{31} не є однаковими через зниження сигналу u_{30} (рис. 3, f), то сигнал u_{32} є ненульовим (рис. 3, g), що призводить до відключення комутаційного апарата 13. Це дозволяє знизити до нуля напругу на опорі кола витoku струму, завдяки чому струм витoku i'_{12} через опір 12 тіла людини знижується в момент часу t_3 до нуля (рис. 3, h). У той же час за відсутності запропонованих засобів захисту (додаткових комутаційних апаратів 13 та реле частоти 14) струм i_{12} через опір 12 тіла людини після захисного відключення мережі підтримується ЕРС вибігу двигунів (рис. 3, i).

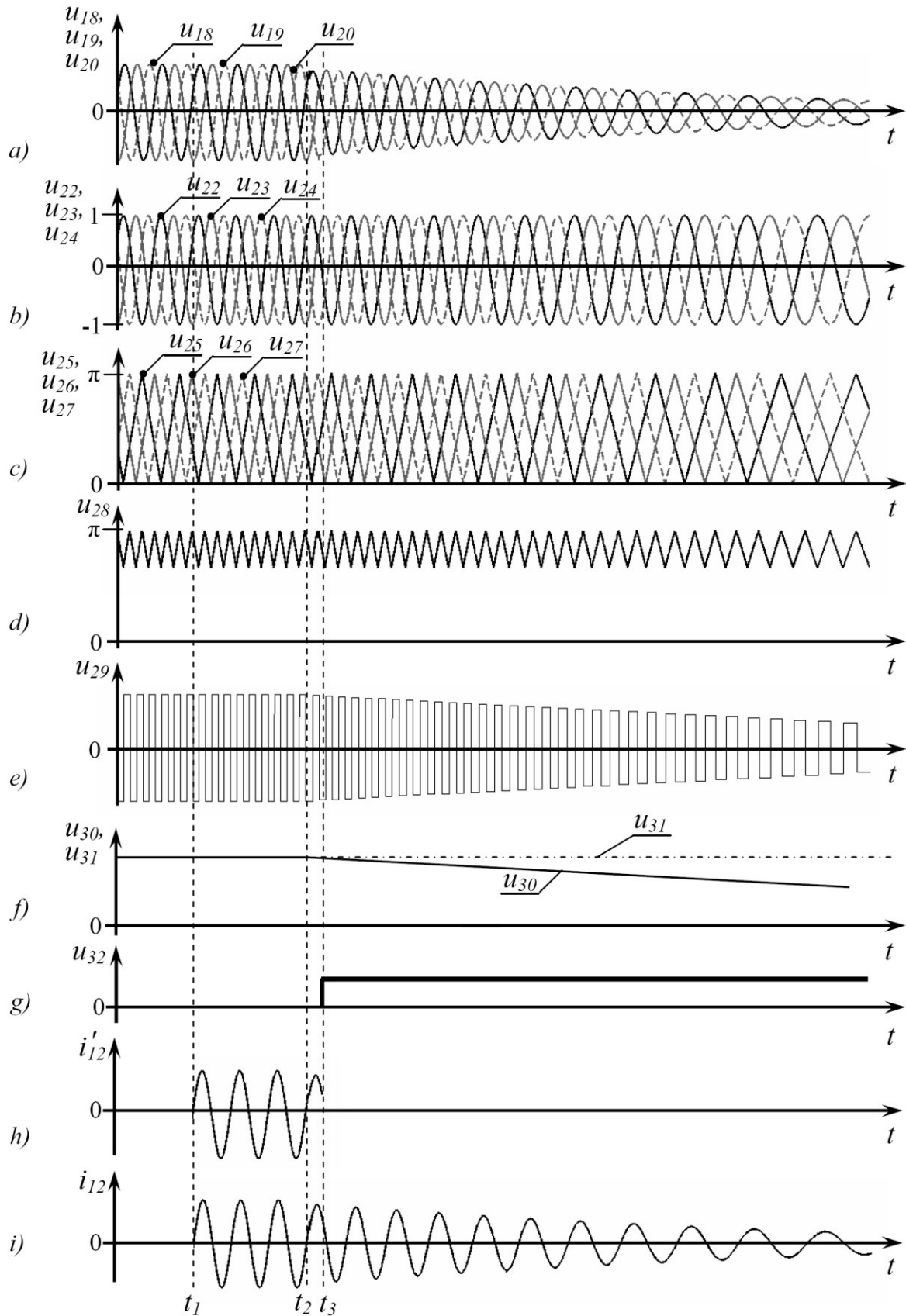


Рис. 3. Діаграми, що ілюструють функціонування реле частоти (a-g) та стан кола витоку струму на землю (h, i)

Висновки та напрямок подальших досліджень

Актуальність удосконалення існуючих засобів захисту від витоків струму на землю в електромережі ділянки шахти обумовлена наявністю ЕРС вибігу асинхронних двигунів споживачів, яка підтримує струм витоку на землю деякий час після захисного відключення мережі, що недостатньою мірою враховується існуючими захисними апаратами та збільшує ймовірність смертельного електроураження людини, виникнення пожеж та вибухів у шахті. Вдосконалити захист від витоків струму на землю пропонується шляхом зниження напруги в колі витоку струму на землю при переході двигунів до режиму вибігу за рахунок від'єднання їх від мережі у момент зниження частоти напруги відгалужень нижче заданого рівня, чим досягається підвищення електробезпеки мережі та надійності захисту.

Частоту напруги мережі пропонується вимірювати як модуль похідної за часом від кута повороту просторового вектора лінійних напруг енергосистеми відносно дійсної осі комплексної площини. Реле зниження частоти, яке контролює частоту напруги приєднання, та додатковий силовий комутаційний апарат, що від'єднує від електромережі обмотку двигуна за командою реле зниження частоти, пропонується розміщувати в кожному відгалуженні мережі, що дозволяє виконувати загальномережевий захист від витоків струму на землю незалежно від місця пошкодження ізоляції та підвищувати надійність захисту, оскільки це не потребує прокладання додаткових сигнальних ліній.

В ході подальших досліджень, шляхом математичного моделювання, має бути з'ясована доцільність оснащення додатковими силовими комутаційними апаратами всіх відгалужень мережі або відгалужень з найбільш потужними двигунами.

Список літератури

1. Анализ параметров и процессов в шахтных электрических сетях / [Ф.П. Шкрабец, Н.А.Шидловская, В.С. Дзюбан, Е.А. Вареник]. – Д.: Нац. горн. ун-т, 2003. – 151 с.
2. Корнеева А.Н. Состояние электротравматизма на угольных предприятиях Украины и пути его снижения / А.Н. Корнеева // Уголь Украины. – 2003. – №5. – С. 37 – 39.
3. James C. Cawley Electrical Accidents in the Mining Industry, 1990-1999 / James C. Cawley //IEEE Transactions on Industry Applications. – Pittsburgh, PA, USA, 2003. – Vol. 39, No. 6, Nov/Dec. – P. 1570-1577. – Access mode: <http://www.cdc.gov/niosh/mining/pubs/pubrefeence/outputid96.htm>.
4. Брюханов О.М. Розвиток теорії і вдосконалення практики попередження та локалізації вибухів у глибоких шахтах: автореф. дис. д-ра техн. наук: спец. 05.26.01 / О.М. Брюханов. – Д., 2007. – 33с.
5. Анализ причин травматизма на шахтах Украины / [О.И.Кашуба, Н.Б.Левкин, Е.А.Спиридонов, М.С.Ковчужный] // Вісн. Нац. техн. ун-ту України «Київський політехнічний інститут»: сер. «Гірництво». – 2008. – №17. – С. 172 – 177. – Режим доступу до журн.: mining.kpi.ua/17_Kashuba.pdf.
6. Патент на винахід 82111 (UA), МПК (2006) H02H 3/16 Спосіб захисту людини від ураження електричним струмом в мережі з ізолюваною нейтраллю / К.М. Маренич, С.В. Василець. – а 2006 00387. Заявл. 16.01.2006. Опубл. 11.03.2008. Бюл. №5
7. А. с. 1691917 СССР, H02H3/16. Способ защиты человека от поражения электрическим током в сети с изолированной нейтралью / В.С. Прудников (СССР). – № 4031519/63; заявл. 03.03.86; опубл. 15.11.91, Бюл. №42.
8. Патент на КМ 62399 (UA), МПК (2011.01) H02H 3/00 Спосіб струмового захисту в мережі живлення асинхронного двигуна в складі гірничого дільничного електротехнічного комплексу / К.М. Маренич, І.В. Ковальова, С.В. Василець. - u201101693. Заявл. 14.02.2011. Опубл. 25.08.2011. Бюл. №16.
9. Андрищенко О.А. Анализ процессов отключения от сети и выбега асинхронного двигателя / О.А. Андрищенко, А.А. Бойко // Електромашинобудування та електрообладнання. – 2007. – Вип. 69. – С. 28 – 31.
10. Патент на КМ 72351 (UA), МПК (2006.11) H02H 3/16 Спосіб захисту людини від ураження електричним струмом в мережі з ізолюваною нейтраллю / В.Ф. Сивокобиленко, С.В. Василець. – u201202866. Заявл. 12.03.2012. Опубл. 10.08.2012. Бюл. №15.
11. Цифровые устройства частотной разгрузки / [В.Ф.Александров, В.Г.Езерский, О.Г.Захаров, В.С.Мальшев]. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2005. – 80 с.
12. Патент на КМ 74075 (UA), МПК(2006.01) G01R 23/02 Спосіб вимірювання частоти напруги енергосистеми / В.Ф. Сивокобиленко, С.В. Василець. – u201205972. Заявл. 17.05.2012. Опубл. 10.10.2012, Бюл.№ 19.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Ковальовим С.Б.