

УДК 622:621.3

К.М.МАРЕНИЧ, канд.техн.наук, С.В.ВАСИЛЕЦЬ (ДВНЗ "Донецький національний технічний ун-т", Донецьк)

Обґрунтування ефективності нейтралізації зворотної ЕРС двигунів як способу підвищення безпеки експлуатації електротехнічного комплексу дільниці шахти

На основі теоретичного аналізу стану кола однофазного витоку струму на землю протягом аварійного процесу в умовах електротехнічного комплексу технологічної дільниці вугільної шахти обґрунтовано ефективність нейтралізації зворотної ЕРС двигунів споживачів як способу підвищення безпеки.

На основании теоретического анализа состояния цепи однофазной утечки тока на землю при аварийном процессе в условиях электротехнического комплекса технологического участка угольной шахты обоснована эффективность нейтрализации обратной ЭДС двигателей потребителей как способа повышения безопасности.

Постановка проблеми та її зв'язок з прикладними задачами. В електротехнічному комплексі технологічної дільниці вугільної шахти (ЕТК ДШ) безпека експлуатації електричних установок підтримується функціонуванням апарату захисного відключення (АЗ). Такий апарат здатен з високою швидкістю виявити факт торкання людиною елементів електромережі, що знаходяться під напругою. Більшість сучасних АЗ додатково обладнані пристроєм автоматичної компенсації ємнісної складової струму витоку на землю. Незважаючи на широке впровадження цих засобів, дільничні ЕТК продовжують становити небезпеку електроураження. Це обумовлено дією зворотної ЕРС асинхронних двигунів (АД) споживачів на коло витоку після захисного відключення мережі.

Стан питання. Основи теорії електробезпеки при експлуатації дільничних ЕТК були закладені Р.М.Лейбовим, який обґрунтував ефективність захисного відключення мережі та статичної компенсації ємнісної складової струму витоку. В роботах Дзюбана В.С. та Колосюка В.П. був запропонований принцип контролю витоку струму на землю шляхом порівняння оперативного та еталонного струмів, а також автоматична компенсація ємнісної складової струму витоку на землю. Задачі удосконалення схем АЗ та підвищення їхніх експлуатаційних властивостей вирішуються і зараз.

В контексті пошуку шляхів підвищення електробезпеки при експлуатації ЕТК ДШ в матеріалах досліджень вказується на можливість електроураження людини від зворотної ЕРС АД споживачів

після захисного відключення мережі. Нейтралізація дії вказаної ЕРС розглядається як один із можливих шляхів підвищення електробезпеки стану кола однофазного витоку струму на землю [1,4,6, 7].

Невирішені частини загальної проблеми. Ефективність застосування АЗ в значній мірі визначається ступенем компенсації ємнісної складової струму витоку на землю, в тому числі, і після захисного відключення мережі [4, 6, 7]. Згасання ЕРС обертання двигунів призводить до самовільного відключення комутаційних апаратів (КА) відгалужень через зниження напруги на їхніх котушках керування. Відбувається стохастична реконфігурація мережі, а отже — зміна параметрів її ізоляції. Виникають умови для перестроювання автокомпенсуючого пристрою, що погіршує його захисні характеристики. Після відключення КА аварійного відгалуження подальша компенсація ємнісної складової струму витоку є неможливою. Зараз процеси, що обумовлені дією зворотніх ЕРС АД споживачів щодо проблематики електробезпеки експлуатації ЕТК ДШ, досліджені недостатньо.

Постановка задачі. Задачею дослідження є обґрунтування ефективності нейтралізації зворотної ЕРС двигунів після захисного відключення мережі в контексті підвищення безпеки експлуатації електротехнічного комплексу технологічної дільниці шахти.

Результати досліджень. Теоретичний аналіз стану кола витоку на землю в умовах ЕТК дільниці шахти передбачає обґрунтування відповідної математичної моделі. Приймаються наступні припу-

щення: номінальний рівень лінійної напруги мережі — 660 В; компенсація ємнісної складової струму витoku на землю не враховується; спрацювання комутаційних апаратів відбувається миттєво за відсутності електричної дуги. До складу типового ЕТК ДШ (рис. 1) входить загальна частина мережі, що складається з дільничного трансформатора ТР, автоматичного вимикача АВ та магістрального кабеля МК, а також n відгалужень. Кожне з відгалужень включає АД споживача, що під'єднується до відповідного комутаційного апарату відгалуження КА за допомогою гнучкого кабеля ГК. Процеси у k -му відгалуженні ($k = \overline{1, n}$) до моменту захисного відключення АВ описуються системою диференціальних рівнянь [3]:

$$\begin{aligned} d\bar{\psi}_{1k} / dt &= \bar{u}_1 - \bar{i}_k R_{1k}; \\ d\bar{\psi}_{rk} / dt &= j\omega_k \bar{\psi}_{rk} - \bar{i}_{rk} R_{rk}; \\ d\omega_k / dt &= (M_k - M_{ck}) / J_k, \end{aligned} \quad (1)$$

де $\bar{\psi}_{1k}, \bar{\psi}_{rk}$ — просторові вектори потокозчеплення статорного кола та ротора k -го двигуна; $\bar{u}_{sk}, \bar{i}_k, \bar{i}_{rk}$ — просторові вектори напруги на затискачах статора k -го двигуна, струму у k -му відгалуженні та роторного струму k -го двигуна відповідно; $R_{1k} = R_{Kak} + R_{kk} + R_{sk}, R_{rk}$ — активні опори фази статорного кола та ротора k -го АД відповідно; M_k, M_{ck}, J_k — моменти: обертаючий, опору та інерції відповідно; ω_k — частота обертання ротора k -го двигуна. Крім того, на рис. 1 позначено: \bar{u}_1 — просторовий вектор напруги на вході КА відгалужень; L_{kk} — індуктивний опір фази k -го ГК.

Процеси в загальній частині мережі до відключення АВ описуються диференціальним рівнянням

$$\bar{u}_1 = \bar{u} - (R_{mp} + R_{AB} + R_{MK}) \bar{i}_\Sigma - (L_{mp} + L_{MK}) d\bar{i}_\Sigma / dt, \quad (2)$$

де $\bar{u}, \bar{i}_\Sigma = \sum \bar{i}_k$ — просторові вектори ЕРС, що вводиться у вторинній обмотці ТР головним потоком, та струму у загальній частині мережі відповідно; R_{mp}, R_{AB}, R_{MK} — активні опори фази вторинної обмотки ТР, автоматичного вимикача та МК; L_{mp}, L_{MK} — відповідно індуктивності вторинної обмотки ТР та магістрального кабеля.

Відключення комутаційних апаратів моделюється стрибкоподібною зміною їх опору (R_{AB} або R_{Kak}) від перехідного опору у замкненому стані (для однієї фази прийнято $R_{ABmin} = R_{Kakmin} = 10^{-3}$ Ом) до значення, що відповідає опору ізоляції між розімкненими контактами комутаційного апарату (приймається $R_{ABmax} = R_{Kakmax} = 10^6$ Ом).

Стохастичне самовільне відключення КА відгалужень під час вибігу двигунів може бути враховано встановленням функціональної залежності опору R_{Kak} від двох параметрів: $R_{Kak} = f(\bar{u}_1, X_k)$. Перший з них (просторовий вектор \bar{u}_1) визначає напругу на вході комутаційних апаратів, другий — випадкова безперервна нормально розподілена величина X_k , реалізації якої визначають відносні значення напруги самовільного відключення КА k -го відгалуження. До досягнення напругою на вході КА рівня самовільного відключення виконувалася умова $R_{Kak} = R_{Kakmin}$, після чого опір R_{Kak} дорівнює R_{Kakmax} .

Моделювання перехідних процесів в ЕТК ДШ при стрибкоподібній зміні коефіцієнтів диференціальних рівнянь (1) та (2), а саме опорів R_{AB} та R_{Kak} — проводилося за допомогою Simulink-моделі, структурну схему якої показано на рис. 2. Прийнято припущення про незмінність моментів опору та інерції на валах двигунів споживачів під час вибігу.

Струм витoku i_Σ через опір кола однофазного витoku R_{Σ} визначається із системи рівнянь, що складені за відповідною заступною схемою (рис. 3) [2]:

$$i_\Sigma = i_1 + i_2;$$

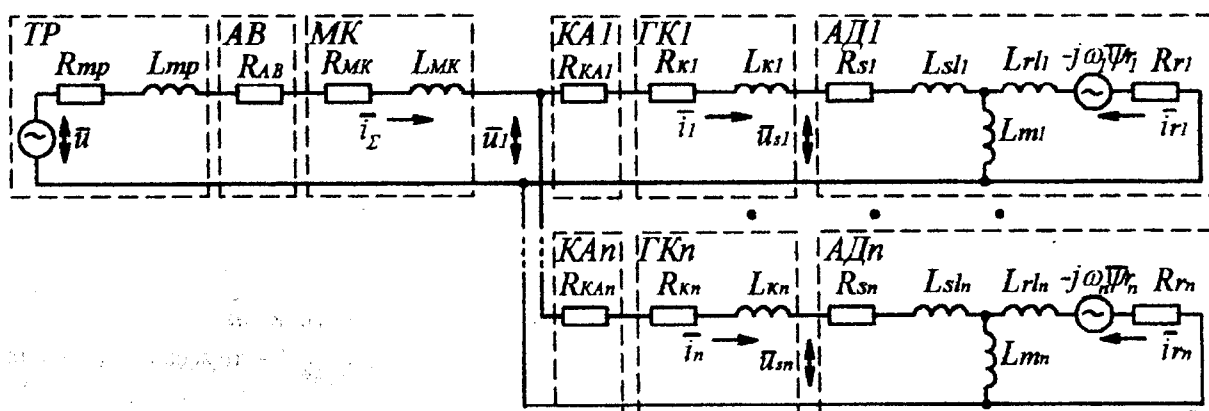


Рис. 1

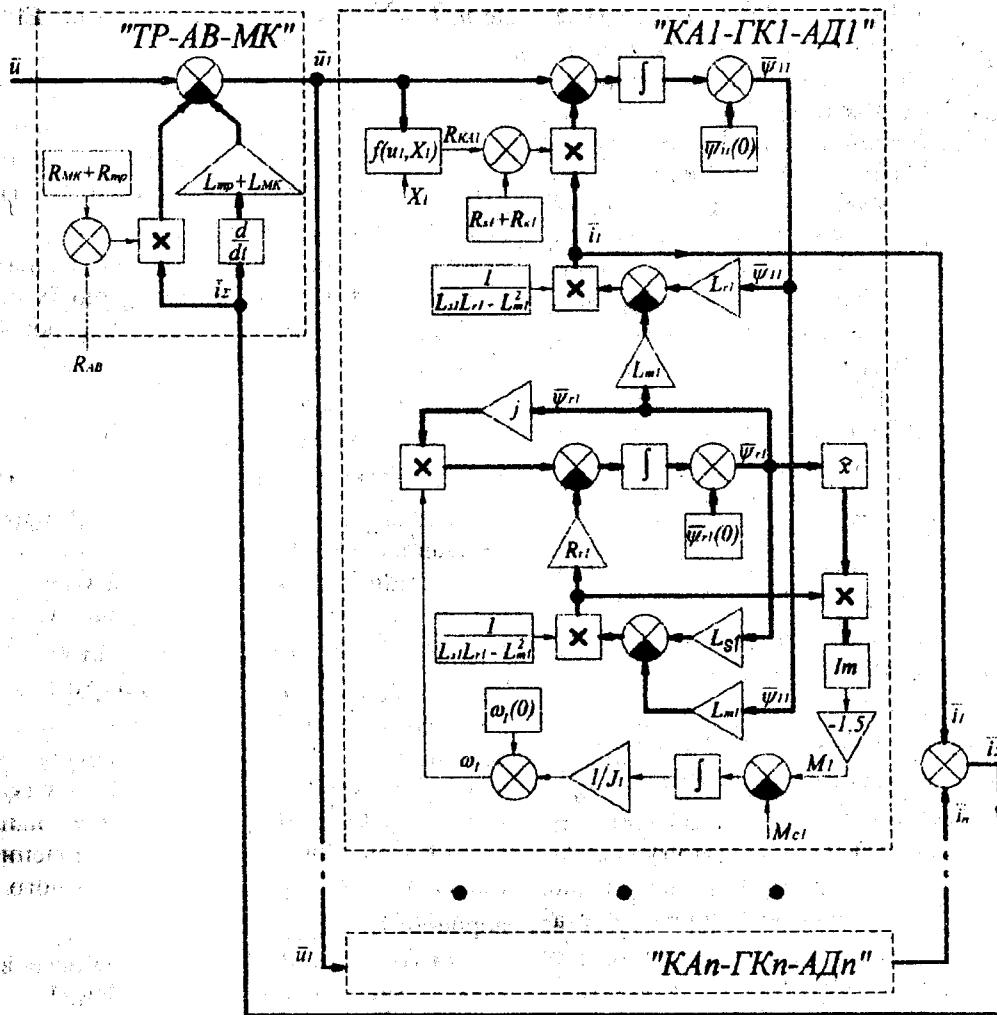


Рис. 2

$$i_2 = [u_\phi - i_1 (R_{лв} + R_{і3})] / R_{лв}; \quad (3)$$

$$i_1 = \frac{1}{R_{лв}} \left(u_\phi - i_2 R_{лв} - \frac{1}{C_{і3}} \int i_2 dt \right),$$

де $u_\phi = \text{Re}(\bar{u}_{sk})$ — фазна напруга в аварійній точці, припускаючи виникнення витоку струму на землю з фази А k-го відгалуження в місці під'єднання гнучкого кабелю до двигуна та нехтуючи асиметрією мережі; $C_{і3} = 3C_{і3,\phi}$, $R_{і3} = R_{і3,\phi} / 3$ — сукупна ємність та активний опір ізоляції (відносно землі) трьох фаз кабелів, що мають електричний зв'язок із колом витоку; $C_{і3,\phi}$, $R_{і3,\phi}$ — те ж саме для однієї

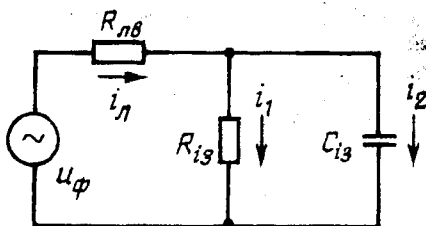


Рис. 3

фази.

Через стохастичний характер самовільного відключення КА відгалужень значення $C_{і3,\phi}$ та $R_{і3,\phi}$ не лишаються сталими під час вибігу двигунів. Обчислити вказані величини у довільний момент перебігу аварійної ситуації можна за допомогою виразів

$$C_{і3,\phi} = \beta_m \left(C_{і3,\phi}' + \sum_{k=1}^n \beta_k C_{і3,\phi k}'' \right) + \beta_m C_{і3,\phi m}''; \quad (4)$$

$$R_{і3,\phi} = \left[\beta_m \left(\frac{1}{R_{і3,\phi}'} + \sum_{k=1}^n \frac{\beta_k}{R_{і3,\phi k}''} \right) + \frac{\beta_m}{R_{і3,\phi m}''} \right]^{-1}, \quad (5)$$

де β_k — інверсована змінна стану k-го КА ($\beta_k = 1$ — контакти розімкнені; $\beta_k = 0$ — замкнені); m — номер відгалуження, в якому стався виток струму; $C_{і3,\phi}'$, $R_{і3,\phi}'$ — ємність та активний опір ізоляції фази МК; $C_{і3,\phi k}''$, $R_{і3,\phi k}''$ — те ж саме ГК k-го відгалуження.

Кількість електрики, що пройшла через опір кола витоку за інтервал часу $[t', t'']$, обчислюється згідно з залежністю:

$$q = \int_{t'}^{t''} I_{\text{л}} dt, \quad (6)$$

де $I_{\text{л}}$ — ефективне значення струму витoku через опір кола витoku.

Складена комп'ютерна модель була використана при моделюванні аварійного процесу відповідно до схеми електротехнічного комплексу однієї з технологічних дільниць шахти "Новодонецька" ДХК "Добропіллявугілля" [5]. До розгляду було взято ту частину електромережі, яка живиться від однієї з двох наявних ТП типу КТПВ-630/6-0,69 (таблиця). Отримані в результаті моделювання діаграми дозволяють проаналізувати стан відгалужень споживачів (на рис. 4 показано діаграми стану відгалужень № 1, 2 та 6) та кола витoku (рис. 5) протягом аварійного процесу. Навантаження двигунів встановлене на рівні 10% від номінального, коефіцієнти інерції навантаження для кожного АД прийнято тотожними 2.

№ відгалуж.	Двигун		Гнучкий кабель		Машина, механізм
	Тип	Потужн., кВт	Тип	Довжина, м	
1	ЭДКОФВ 315М4	160	КГЭШЗх50	210	конвейер СПЦ-230
2	ЭДКОФВ 315М4	160	КГЭШЗх50	210	
3	ЭДКОФВ 315М4	160	КГЭШЗх50	50	
4	АИУМ 225М4	55	КГЭШЗх35	50	насосна станція СНТ-32
5	АИУМ 225М4	55	КГЭШЗх35	20	насосна станція СНТ-32
6	ЗВ180М4	30	КГЭШЗх16	50	кріплення "Глінік"
7	ЗВ180М6	18,5	КГЭШЗх35	50	лебідка ЛКГН

Доторкання людини, опір тіла якої прийнято $R_{\text{лв}} = 1$ кОм, до оголеної фази А гнучкого кабеля першого відгалуження в місці його під'єднання до двигуна М1 відбувається в момент t_1 . Струм витoku $i_{\text{л}}$ від моменту t_1 до моменту t_2 захисного відключення АВ підтримується напругою мережі та визначається сукупними параметрами ізоляції МК та ГК. Відповідна кількість електрики при прийнятих припущеннях є не випадковою величиною та для даних параметрів системи складає $q_1 = 14,3$ мА·с (рис. 5).

Режим групового вибігу двигунів, який триває від моменту t_2 до моменту t_3 самовільного відключення комутаційного апарату аварійного відгалуження, супроводжується стохастичною реконфігурацією мережі у моменти $t_{\text{КАк}}$, які визначаються реалізаціями випадкових величин X_k . Це ілюструє діаграма зміни стану КАк (рис. 4). Затухаючі ЕРС обертання $\bar{u}_{\text{ск}}$ електрично з'єднаних з аварійним відгалуженням двигунів підтримують струм витoku

ку $i_{\text{л}}$. Через відмінність параметрів двигунів у відгалуженнях протікають зрівнювальні струми \bar{i}_k , які обумовлюють наявність відповідних електромагнітних моментів M_k . Сtribкоподібну зміну параметрів ізоляції мережі $C_{\text{із.ф}}$ та $R_{\text{із.ф}}$ на інтервалі $[t_2, t_3]$ ілюструють діаграми, показані на рис. 4.

Починаючи з моменту t_3 стан кола витoku струму на землю визначається параметрами елементів аварійного відгалуження. В момент t_4 амплітуда зворотної ЕРС двигуна вказаного відгалуження становить 3% від початкової — аварійний процес закінчується.

Кількість електрики q_2 , що пройшла через опір кола витoku струму на землю протягом інтервалу $[t_2, t_4]$ внаслідок дії зворотної ЕРС АД, за прийнятих припущень є випадковою величиною. Відповідно, загальна кількість електрики $q_{\text{уст}} = q_1 + q_2$ носить імовірнісний характер. Проведення паралельних дослідів на моделі системи, що розглядається, дозволило отримати вибірку зі 100 значень q_2 . Застосування критерія згоди Колмогорова-Смирнова дало можливість встановити відсутність підстав відкидати гіпотезу про нормальне розподілення даних за рівня значущості 0,05.

Імовірність того, що загальна кількість електрики через опір тіла людини ($q_{\text{уст}}$) перевищує граничну величину $Q_{\text{прип}} = 50$ мА·с (ГОСТ 12.1.038-82, ГОСТ 22929-78), розраховується згідно з виразом:

$$P(q_{\text{уст}} > Q_{\text{прип}}) = 0,5 - \Phi\left(\frac{Q_{\text{прип}} - \bar{q}_{\text{уст}}}{s_{\text{уст}}}\right), \quad (7)$$

де $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-z^2/2} dz$ — функція Лапласа; $\bar{q}_{\text{уст}}, s_{\text{уст}}$ — відповідно вибіркові значення математичного очікування та середнього квадратичного відхилення загальної кількості електрики через опір тіла людини.

Для прийнятих параметрів ЕТК ДШ вказана імовірність складає 0,99. Моделюванням встановлено, що за умови забезпечення гасіння зворотної ЕРС двигунів після моменту захисного відключення мережі через опір тіла людини пройде кількість електрики q_1 , яка для даних умов не буде перевищувати 30% від граничної величини $Q_{\text{прип}}$.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Обґрунтована математична модель дозволяє досліджувати параметри електробезпеки експлуатації ЕТК ДШ з урахуванням дії зворотної ЕРС АД після захисного відключення мережі. Результатами моделювання підтверджується доцільність гасіння зворотної ЕРС двигунів споживачів. В ході подальших досліджень є доцільним визначити вплив ЕРС обертання двигунів на стан кола витoku за різної конфігурації ЕТК дільниць, уточнити обґрунтовану математичну модель шляхом врахування процесів

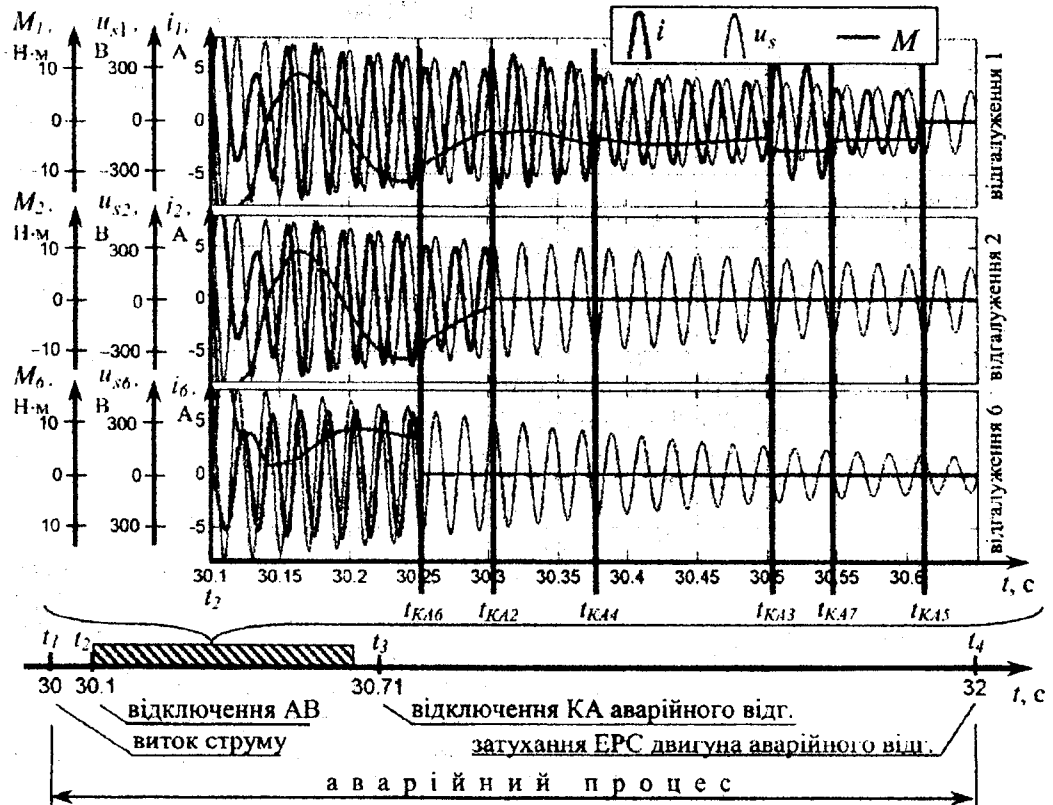


Рис. 4

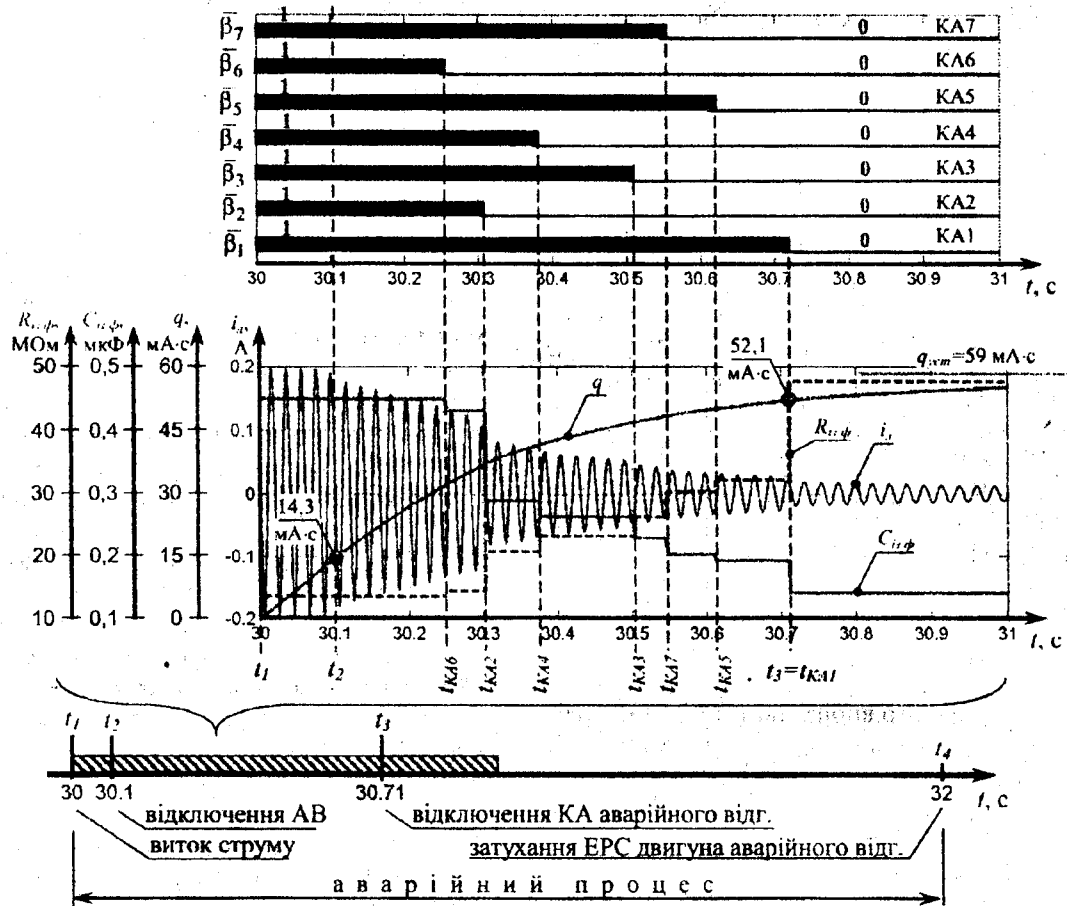


Рис. 5

перестроювання автокомпенсатора при стохастичній реконфігурації схеми ЕТК в процесі захисного відключення.

1. Вареник Є.О., Випанасенко С.І., Дзюбан В.С., Шидловська Н.А., Шкрабець Ф.П. Забезпечення безпеки та ефективності шахтних електроустановок / За ред. акад. Півняка Г.Г. — Дніпропетровськ: Нац. гірничий ун-т, 2004. — 334 с.

2. Дзюбан В.С. Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях. — М.: Недра, 1982. — 152 с.

3. Ковач К.П., Рац. И. Переходные процессы в машинах переменного тока. — М.—Л.: Госэнергоиздат, 1963. — 744 с.

4. Колосюк В.П. Защитное отключение рудничных электроустановок. — М.: Недра, 1980. — 334 с.

5. Чернов И.Я., Ландкоф Л.Б. и др. Энергоснабжение высокопроизводительных угледобывающих комплексов // Уголь Украины. — 2002. — №9.

6. Шкрабець Ф.П., Шидловская Н.А., Дзюбан В.С., Вареник Е.А. Анализ параметров и процессов в шахтных электрических сетях. — Днепропетровск: Нац. горный ун-т, 2003. — 151 с.

7. Язудаев Б.М., Шишкин Н.Ф., Назаров В.В. Защита от электропоражения в горной промышленности. — М.: Недра, 1982. — 152 с.

Надійшла 04.06.2008

УДК 621.313.17

К.П.АКИНИН, канд.техн.наук (Ин-т электродинамики НАН України, Київ)

Особенности и принципы построения электроприводов на базе бесконтактных магнитоэлектрических двигателей

Рассмотрены тенденции развития, особенности и принципы построения регулируемых электроприводов на базе бесконтактных магнитоэлектрических двигателей.

Розглянуто тенденції розвитку, особливості та принципи побудови регульованих електроприводів на базі безконтактних магнітоелектричних двигунів.

Введение. История развития электроприводов на базе так называемых вентильных двигателей исчисляется уже многими десятилетиями. В [25] отмечено, что вентильные двигатели с дискретной коммутацией (тиратронные моторы) появились в 1930-х годах. Наиболее динамичный этап развития таких электроприводов во второй половине XX века был связан с появлением высококоэрцитивных постоянных магнитов и дальнейшим совершенствованием транзисторов и интегральных микросхем.

За это время трудами уже нескольких поколений исследователей и разработчиков накоплен огромный теоретический и практический материал [7, 10, 12, 13, 23, 25]. Однако, на каждом этапе развития электроприводов появляются новые возможности для их технической реализации, становится возможным получение новых, недоступных ранее регулировочных и эксплуатационных

характеристик двигателей, а это, в свою очередь, расширяет области возможного практического использования электроприводов, например, в медицине и приборостроении. Таким образом, всегда имеется основание для осмысления современного состояния вопроса о рассматриваемых электроприводах.

В настоящее время тенденции развития электроприводов на базе бесконтактных магнитоэлектрических двигателей определяют такие факторы:

1. Повышение энергоемкости постоянных магнитов.
2. Улучшение свойств материалов для магнитопроводов.
3. Совершенствование технологии и повышение качества изготовления подшипников и других конструктивных элементов двигателей.
4. Появление многократно- и внутрисхемно программируемых микроконтроллеров, мощных