

УДК622:621.3

К.М. МАРЕНИЧ (канд.техн.наук, доц.), **С.В. ВАСИЛЕЦЬ**

Донецький національний технічний університет

ЗВОРОТНІ ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОТОКИ ДВИГУНІВ ЯК ФАКТОР ПОГІРШЕННЯ БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ДІЛЬНИЦІ ШАХТИ

The level of motor back energy influence on safety is specified by theoretical analysis of state of leakage current circuit in emergency cases in electrotechnical complex of mine technological section.

Актуальність проблеми та її зв'язок з прикладними задачами. До структури електротехнічного комплексу (ЕТК) видобувної дільниці шахти входить дільнична підстанція з трансформатором (ТР) і груповим автоматичним вимикачем (АВ) та пускачі (П) відгалужень, з'єднані з асинхронними двигунами (М) відповідних споживачів гнучкими кабелями (ГК). Існуюча тенденція до підвищення потужності електроприводів технологічної дільниці шахти обумовлює розвинення мережі гнучких кабелів, збільшення їх довжини та перетину жил. Це стосується і магістрального кабеля (МК), що з'єднує підстанцію та розподільчий пункт дільниці. Підвищення довжини та перерізу кабелів мережі обумовлює відповідне зниження ємнісних опорів ізоляції кабелів відносно землі, через що погіршується електробезпека експлуатації дільничних ЕТК. Існуючі схеми апаратів захисту (АЗ) від витоків струму на землю дозволяють надійно та з високою швидкістю виявляти небезпечні величини струмів витоку (через торкання людиною з опором тіла $R_{\text{г}}$ струмопровідних елементів дільничної мережі) та своєчасно відключати напругу живлення ЕТК (рис.1) [1].

Теорія електробезпеки експлуатації дільничних електротехнічних комплексів шахти базується на дослідженнях та розробках Р.М. Лейбова, В.С. Дзюбана, В.П. Колосюка, Ф.П. Шкрабця та інші науковців, які обґрунтували: доцільність застосування в умовах дільниць шахти мереж з ізолюваною нейтраллю трансформатора; способи виявлення витоку струму на землю за величиною постійного оперативного струму, який накладається апаратом захисту на контрольовану мережу; способи статичної та автоматичної компенсації ємнісних складових струму витоку на землю. Сучасні апарати захисту експлуатуються в трифазних дільничних мережах з номінальною лінійною напругою до 1140В. Однак, ефективність застосування цих заходів знижується дією зворотніх енергетичних потоків двигунів споживачів, сукупність яких підтримує струм в колі витоку на землю певний час після захисного відключення мережі. Актуальність дослідження впливу цього фактору на безпеку експлуатації ЕТК обумовлена збільшенням тривалості та початкового значення складової струму витоку, яка підтримується ЕРС вибігу двигунів, через тенденції підвищення потужності двигунів споживачів дільничних ЕТК. Характер процесів, обумовлених дією зворотніх енергетичних потоків в колі витоку струму на землю після захисного відключення ЕТК, на даний час з'ясований недостатньо і потребує детального вивчення.

Відомі дослідження та публікації. При відключенні асинхронного двигуна від джерела живлення

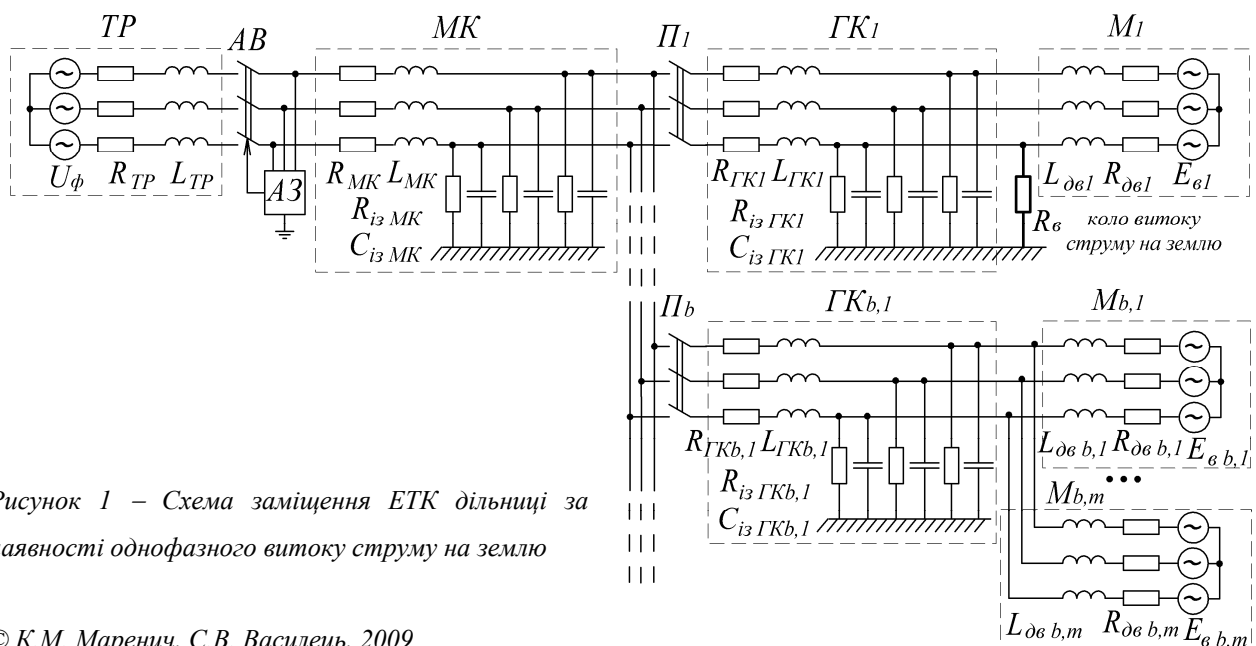


Рисунок 1 – Схема заміння ЕТК дільниці за наявності однофазного витоку струму на землю

миттєві значення зворотної ЕРС описуються синусоїдальною функцією з експоненціально затухаючою амплітудою [2]. Для оцінки величини сталої часу затухання ЕРС одного (T_{∂}) та групи з n двигунів (T_2) мають місце залежності [3]:

$$T_{\partial} = \frac{K \cdot U_{\phi}}{I_0 r_e \omega_1}; \quad T_2 = \sum_{i=1}^n P_{ni} / \sum_{i=1}^n \frac{P_{ni}}{T_i} \quad (1)$$

де I_0 – струм двигуна в ненавантаженому режимі; r_e – еквівалентний активний опір ротора; K – коефіцієнт, що для двигунів з повітряним охолодженням дорівнює $1 \div 1,2$, з водяним – $1,6 \div 1,8$; P_{ni} – номінальна потужність i -го двигуна групи.

Складова струму витоку на землю, яка підтримується зворотніми енергетичними потоками двигунів, визначається функцією [4]:

$$i_{\text{л}} = I_m e^{-t/T_2} \sin \omega t, \quad (2)$$

де I_m – амплітуда струму витоку в момент відключення мережі.

Для визначення кількості електрики через опір кола витоку за час існування групової (Q_2) та одиночної (Q_3) зворотніх ЕРС за умови самовільного відключення контакторів пускачів відгалужень при зниженні напруги до $0,5U_{\text{НОМ}}$ відомі вирази:

– при тривалості ввімкненого стану контактора після захисного відключення мережі $t_3 = 0,6T_2$ [4]:

$$Q_2 = 0,76I_{\text{л}}t_3, \quad Q_3 = 0,19I_{\text{л}}T_{\partial}, \quad (3)$$

– при $T_2 = 1$ с [5]:

$$Q_2 = 0,3I_{\text{л}}, \quad Q_3 = 0,75I_{\text{л}} - 37,5; \quad (4)$$

де $I_{\text{л}}$ – ефективне значення струму витоку.

Таким чином, відомі залежності для оцінки стану кола витоку струму на землю відрізняються приблизним характером та потребують уточнення з метою врахування особливостей стану контакторів відгалужень під час існування зворотної ЕРС двигунів споживачів ЕТК дільниці.

Постановка задачі. Задачею дослідження є уточнення ступеня впливу зворотніх енергетичних потоків двигунів споживачів на безпеку експлуатації електротехнічного комплексу дільниці шахти з урахуванням конфігурації системи.

Основний матеріал та результати досліджень. Кількість електрики Q_1 через опір кола витоку $R_g = 1$ кОм від моменту t_1 виникнення аварійного стану до моменту t_2 захисного відключення мережі (рис. 2, а) становить:

$$Q_1 = I'_{\text{л}} \cdot \Delta t_{3\text{в}}, \quad (5)$$

де $\Delta t_{3\text{в}} = t_2 - t_1$ – тривалість виявлення АЗ аварійного стану та відключення АВ;

$I'_{\text{л}} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3} \sqrt{R_g^2 + (9\omega^2 C_{\text{ізф}}^2)^{-1}}}$ – струм витоку; $U_{\text{л}}$ – лінійна напруга мережі; $\omega = 314$ рад/с; $C_{\text{ізф}}$ –

ємність ізоляції фази мережі відносно землі.

В разі збереження ввімкненого стану контакторів пускачів відгалужень під час вибігу двигунів кількість електрики Q_2 , що пройшла через R_g від моменту t_2 до моменту $t_4 \approx t_2 + 4T$ зниження ЕРС обертання до 3% від початкового значення, дорівнює:

$$Q_2 = \int_{t_2}^{t_4} I'_{\text{л}} e^{-\frac{t-t_2}{T}} dt = I'_{\text{л}} \cdot T \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_2-t_4}{T}} \right) \approx I'_{\text{л}} \cdot T \cdot (1 - e^{-4}) \approx I'_{\text{л}} \cdot T, \quad (6)$$

де T – стала часу затухання зворотної ЕРС двигунів ЕТК.

Загальна кількість електрики Q через опір кола витоку за час аварійного процесу (t_1, t_4) при збереженні ввімкненого стану контакторів пускачів відгалужень становить:

$$Q = Q_1 + Q_2 = I'_l \cdot (\Delta t_{3\phi} + T) = \frac{U_l \cdot (\Delta t_{3\phi} + T)}{\sqrt{3} \sqrt{R_\phi^2 + (9\omega^2 C_{i3\phi}^2)^{-1}}}. \quad (7)$$

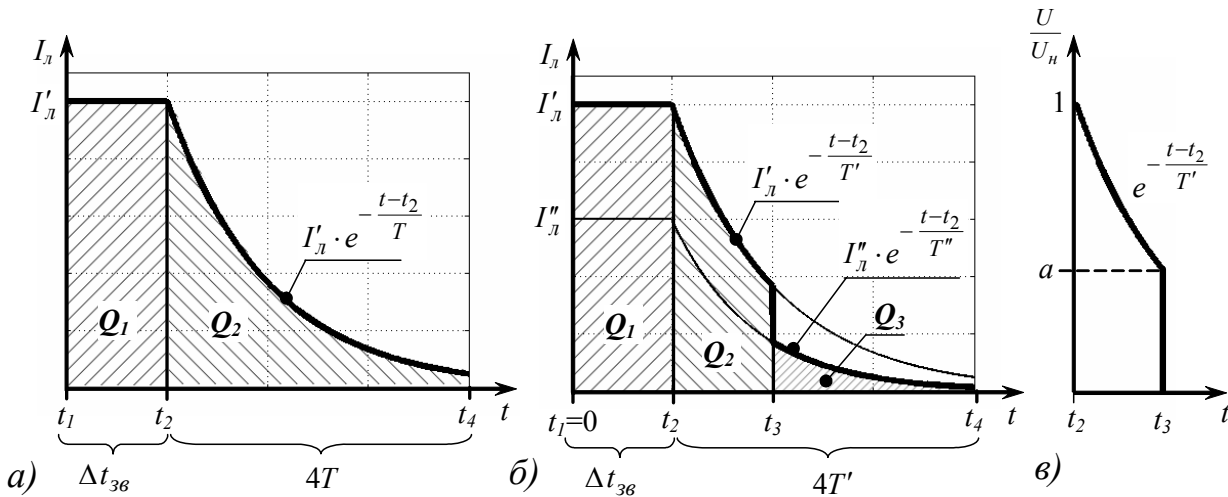


Рисунок 2 – Діаграми зміни ефективного значення струму витоку на землю в ЕТК дільниці при збереженні ввімкненого стану контакторів пускачів відгалужень протягом аварійного процесу (а) та при їх самовільному відключенні (б) в момент t_3 зниження відносного значення ЕРС обертання до рівня a (в)

Останній вираз свідчить про однаковий ступінь впливу на величину Q тривалості захисного відключення мережі $\Delta t_{3\phi}$ та сталої часу затухання ЕРС вибігу T . Розрахунки згідно (7) за максимально припустимих значень $\Delta t_{3\phi}$ (0,1 с при лінійній напрузі 660В та 0,07 при 1140 В – ГОСТ 22929–78) дали змогу побудувати діаграми $Q = f(T, C_{i3\phi})$ при ємностях мережі від 0 до 1мкФ/фазу та сталих часу затухання ЕРС від 0 до 1с (рис.3). Для ємностей ізоляції реальних дільничних ЕТК від 0,8 до 1мкФ/фазу кількість електрики Q не перевищуватиме граничного значення 50 мА·с при сталих часу $T|_{660B} \leq 0,1$ с та $T|_{1140B} \leq 0,05$ с.

Величини T потужних рудникових двигунів перевищують 1с. Зокрема, експериментально встановлено, що стала часу затухання зворотної ЕРС асинхронного двигуна ЭКВФ315LA4 потужністю 250 кВт при напрузі 1140В в процесі вільного вибігу становить 1,56с. Для таких умов при ємності ізоляції дільничної мережі 1 мкФ/фазу через опір кола витоку на землю (1 кОм) за час аварійного процесу згідно (7) пройде 736мА·с, що у 14,7 разів перевищує припустиму величину (50мА·с). За відсутності зворотної ЕРС двигунів ($T=0$ с) ЕТК є безпечним у всьому діапазоні ємностей ізоляції (рис.3). Це підтверджує суттєвий негативний вплив зворотніх енергетичних потоків двигунів на параметри безпеки експлуатації ЕТК дільниці шахти та актуальність обґрунтування заходів щодо нейтралізації дії цього фактору.

В разі самовільного відключення контакторів відгалужень під час вибігу двигунів через зниження відносного значення напруги на котушках їх електромагнітів до рівня a (рис.2в), момент зміни конфігурації мережі t_3 можна обчислити згідно виразу (при $t_1=0$ с; $\Delta t_{3\phi} = t_2$):

$$t_3 = \Delta t_{3\phi} - T' \ln a, \quad (8)$$

де T' – стала часу затухання групової ЕРС двигунів споживачів ЕТК.

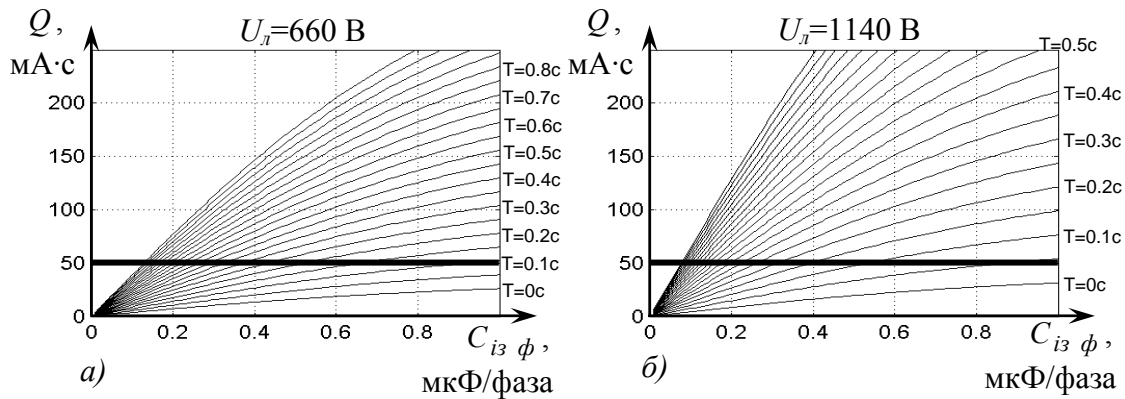


Рисунок 3 – Залежність загальної кількості електрики Q через опір кола витoku $R_6=1$ кОм за час аварійного процесу від ємності ізоляції фази мережі $C_{iz\ \phi}$ та сталої часу T затухання зворотньої ЕРС двигунів при виникненні витoku струму на землю в ЕТК ДШ за умови збереження ввімкненого стану контакторів пускачів відгалужень протягом аварійної ситуації при напрузі мережі 660 В (а) та 1140 В (б)

Кількості електрики через опір кола витoku за часові інтервали (t_2, t_3) та (t_3, t_4) становлять, відповідно (рис. 2, б):

$$Q'_2 = \int_{t_2}^{t_3} I'_l e^{-\frac{t-t_2}{T'}} dt = I'_l T' (1-a); \quad Q'_3 = \int_{t_3}^{t_4} I''_l e^{-\frac{t-t_2}{T''}} dt = I''_l T'' a^{T'/T''} \quad (9)$$

де $I''_l = \frac{U_l}{\sqrt{3} \sqrt{R_6^2 + (9\omega^2 C_{iz\ \phi\ ав}^2)^{-1}}}$ - струм витoku, обумовлений ємністю $(C_{iz\ \phi\ ав})$ кабеля

аварійного відгалуження; T'' - стала часу затухання ЕРС вибігу двигуна відгалуження з витokом.

Загальна кількість електрики через опір кола витoku за час аварійного процесу, за умови одночасного самовільного відключення контакторів пускачів відгалужень при зниженні напруги до рівня a , визначається сумою (5) та (9):

$$Q = Q_1 + Q'_2 + Q'_3 = I'_l [\Delta t_{зв} + T'(1-a)] + I''_l T'' a^{T'/T''} = \frac{U_l}{\sqrt{3}} \left[\frac{\Delta t_{зв} + T'(1-a)}{\sqrt{R_6^2 + \frac{1}{9\omega^2 C_{iz\ \phi}^2}}} + \frac{T'' \cdot a^{T'/T''}}{\sqrt{R_6^2 + \frac{1}{9\omega^2 C_{iz\ \phi\ ав}^2}}} \right] \quad (10)$$

Згідно (10) побудовані залежності $Q = f(a)$ для рівнів напруги мережі 660В та 1140В (рис.4) при $T' = 1,5$ с, $T'' = 1$ с, $C_{iz\ \phi} = 1$ мкФ/фаза, $C_{iz\ \phi\ ав} = 0,1$ мкФ/фаза. Діаграми дозволяють встановити, що величина Q досягає максимальних значень за умови постійно ввімкненого стану контакторів відгалужень під час вибігу двигунів ($a=0$). Зі збільшенням напруги самовільного відключення контакторів значення Q зменшується і у випадку примусового дроблення мережі на окремі відгалуження одночасно із захисним відключенням АВ ($a=1$) досягає найменших значень (для заданих умов: 62мА·с при напрузі мережі 660В, 93 мА·с при 1140В), які, однак, перевищують граничне значення 50мА·с. Це доводить недостатність виконання дроблення мережі на окремі відгалуження одночасно із захисним відключенням, як було запропоновано у [6],

для підтримання безпечного стану ЕТК дільниці та обґрунтовує необхідність примусового гасіння зворотної ЕРС двигунів споживачів під час вибігу.

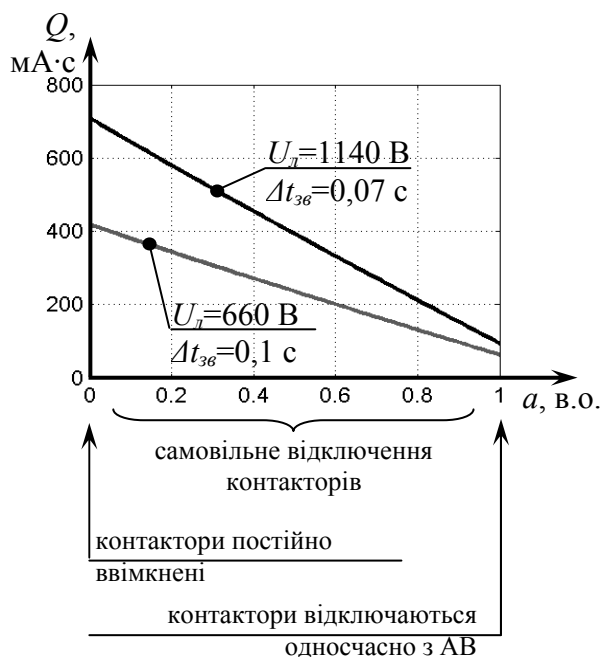


Рисунок 4 – Залежність кількості електрики Q через опір кола витoku за час аварійного процесу від відносного значення напруги самовільного відключення a контакторів відгалужень згідно (10)

Висновки та напрямок подальших досліджень. Для випадку виникнення витoku струму на землю в електротехнічному комплексі дільниці шахти уточнено залежність кількості електрики, що пройшла через опір кола витoku за час аварійного процесу, від сталої часу затухання зворотної ЕРС вибігу асинхронних двигунів, параметрів самовільного відключення комутаційних апаратів відгалужень, ємності ізоляції кабельної мережі відносно землі. Підтверджено суттєвий вплив зворотніх енергетичних потоків двигунів на електробезпеку стану кола витoku струму на землю після захисного відключення мережі. Обґрунтовано актуальність впровадження заходів щодо примусової нейтралізації зворотніх енергетичних потоків асинхронних двигунів споживачів ЕТК дільниці шахти. В ході подальших досліджень має бути перевірена адекватність отриманих аналітичних залежностей експериментальним даним.

Список літератури

1. Колосюк В.П. Защитное отключение рудничных электроустановок / В. П. Колосюк. – М.: Недра, 1980. – 334 с.
2. Ковач К.П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К.П. Ковач, И. Рац. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
3. Дзюбан В.С. Об электромагнитной постоянной времени затухания обратной э. д. с. шахтных электродвигателей / В.С. Дзюбан, Я.С. Римап // Взрывобезопасное электрооборудование. Труды ВНИИВЭ. – М.: Энергия, 1969. – №6. – С. 196–207.
4. Ягудаев Б.М. Защита от электропоражения в горной промышленности / Б. М. Ягудаев, Н. Ф. Шишкин, В. В. Назаров. – М.: Недра, 1982. – 152с.
5. Забезпечення безпеки та ефективності шахтних електроустановок / [Вареник Є.О., Випанасенко С.І., Дзюбан В.С., Шидловська Н.А., Шкрабець Ф.П.]; за ред. Г. Г. Півняка. – Дніпропетровськ: Нац. гірничий ун-т, 2004. – 334 с.
6. А. с. 1691917 СССР, Н 02 Н 3/16. 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.

Надійшла до редколегії: 27.05.2009

Рецензент: С.Б.Ковальов

К. Н. МАРЕНИЧ, С. В. ВАСИЛЕЦ

Донецкий национальный технический университет

Обратные энергетические потоки двигателей как фактор ухудшения безопасности эксплуатации электротехнического комплекса участка шахты.

На основании теоретического анализа состояния цепи однофазной утечки тока на землю при аварийном процессе в условиях электротехнического комплекса технологического участка угольной шахты уточнена степень влияния обратных энергетических потоков двигателей потребителей на безопасность эксплуатации системы.

Электротехнический комплекс, участковая электросеть, утечка тока, обратная ЭДС, выбег двигателей, защитное отключение. Электробезопасность, аварийный процесс, цепь утечки.

К. М. МАРЕНИЧ, С. В. ВАСИЛЕЦ

Донецкий национальный технический университет

Зворотні енергетичні потоки двигунів як фактор погіршення 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 уточнено ступінь впливу зворотніх енергетичних потоків двигунів споживачів на безпеку експлуатації системи.

Електротехнічний комплекс, дільнична електромережа, виток струму, зворотня ЕРС, вибіг двигунів, захисне відключення, електробезпека. аварійний процес, коло витоку.