

УДК 622.012.2:621.311.1

С.А. Руссіян (канд. техн. наук)

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

**ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ КОЛА ВИТОКУ СТРУМУ
НА ЗЕМЛЮ В ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ ДІЛЬНИЦІ ШАХТИ
НАПРУГОЮ 3 (3,3) КВ**

На основі аналізу особливостей побудови та використання перспективних шахтних дільничних електромереж напругою 3(3,3) кВ шляхом комп'ютерного моделювання досліджені процеси при виникненні витоку струму на землю. Встановлена властивість впливу ЕРС вибігу двигунів, що обертаються за інерцією після захисного відключення напруги живлення, на експлуатаційні параметри електробезпеки мережі 3(3,3) кВ.

Ключові слова: струм витоку, апарат захисту, трансформаторна підстанція, електромережа, модель, розрахунок, дільниця шахти, відключення, електроураження.

Актуальність проблеми та її зв'язок з прикладними задачами. Дільничні електромережі вугільних шахт розвиваються в напрямку підвищення напруги живлення. Протягом 1980-90х років високопродуктивні дільниці переводилися на номінальну напругу 1140 В, що до останніх років дозволяло впроваджувати нову високопродуктивну видобувну техніку, підвищувати вуглевидобуток. На сьогоднішній день у вугільній промисловості України розпочато процес переведення систем електропостачання дільниць з 1140 В на 3(3,3) кВ [1-3]. Це дозволить підвищити техніко-економічні показники за рахунок: зменшення відмов завдяки більш стабільній роботі гірничих машин; підвищення одиничної потужності їх електроприводів; зниження перерізів вживаних кабелів; зменшення пускових та робочих струмів електродвигунів та ін.

Проте підвищення рівня напруги та техніко-економічних показників функціонування гірничих машин має супроводжуватися дотриманням нормованих показників безпеки експлуатації дільничних електромереж [4]. Для цього необхідно удосконалювати засоби захисту від аварійних режимів (зокрема – від витоків струму на землю) на основі всебічного теоретичного дослідження аварійних процесів в електромережі напругою 3(3,3) кВ.

Відомі дослідження та публікації. Для дільничних електромереж напругою 3(3,3) кВ розроблена вибухобезпечна комплектна

трансформаторна підстанція ВСТП-КРУ-1000-6/3(3,3) УХЛ5 [1, 5], структурна схема якої наведена на рис. 1. Основною особливістю такої підстанції, порівняно з підстанціями класичної структури на напругу 660/1140 В, є застосування на стороні високої напруги силового трансформатора *TV* високовольтного вимикача-контактора *Q2* (типу Rollarc 400D, номінальна напруга 7,2 кВ) та відсутність автоматичного вимикача на виході підстанції. Вимикач-контактор, у сукупності з трансформаторами струму *ТА1-ТА3* та блоком максимального струмового захисту *МТЗ*, забезпечує захист від коротких замикань та перевантажень як високовольтних кіл, так і силових приєднань. Силовий роз'єднувач *Q1* дозволяє зняти напругу з силової частини підстанції, забезпечуючи видимий розрив фазних кіл. Керування вимикачем-контактором забезпечується блоком дистанційного керування БДУ, який приймає керуючі сигнали від пульта дистанційного керування ПДУ та системи автоматичного газового захисту АГЗ. Вказана структура силової частини підстанції дозволяє зняти обмеження на кількість таких підстанцій, які можна підключити до одного високовольтного розподільчого пристрою КРУВ-6 центральної підземної підстанції, оскільки вимикач-контактор *Q2* надійно захищає як трансформатор, так і силові приєднання підстанції.

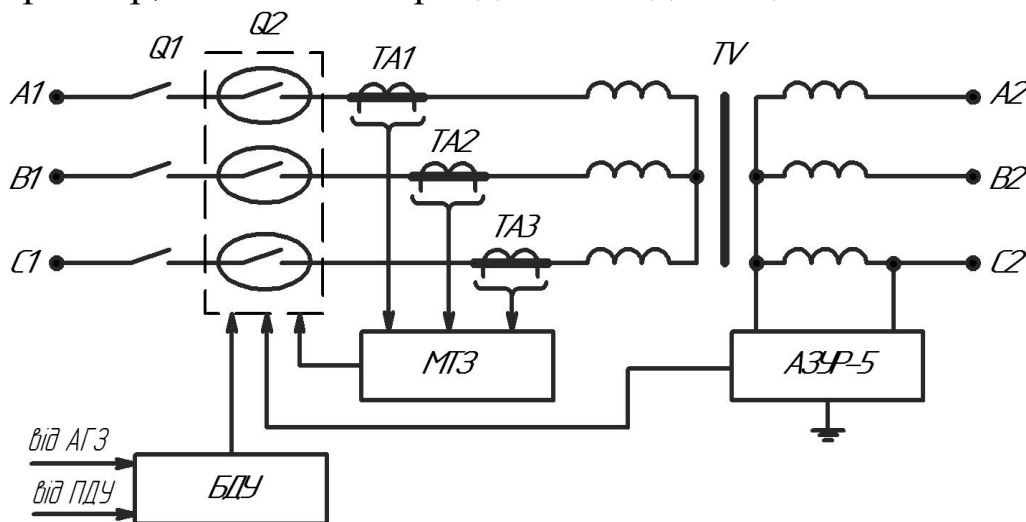


Рис. 1. Структурна схема вибухобезпечної шахтної трансформаторної підстанції типу ВСТП-КРУ-1000-6

Захист від витоків струму на землю забезпечується апаратом захисту АЗУР-5 [6, 7], який видає команду на відключення високовольтного вимикача-контактора *Q2*. Використання вимикача-контактора на стороні високої напруги трансформатора для захисного відключення мережі дозволило підключити вимірювальне коло апарата

АЗУР-5 між нульовою точкою вторинної обмотки трансформатора та заземлювачем, уникаючи використання характерного для апаратів попередніх модифікацій (АЗУР-1,2,3,4 та ін.) активно-індуктивного фільтра приєднання.

Чутливість вимірювальної схеми апарата АЗУР-5 є достатньою для забезпечення необхідної швидкодії спрацювання (50 мс) при виникненні витоку струму на землю. Однак після захисного відключення вимикача-контактора напруга у мережі та у колі витоку деякий час підтримується від ЕРС вибігу асинхронних двигунів споживачів, яка з часом знижується за частотою та амплітудою. Процеси формування перехідної складової струму витоку, яка підтримується ЕРС вибігу, були докладно розглянуті для дільничних електромереж напругою до 1140 В [8]. Встановлено, що для таких мереж ЕРС вибігу становить суттєву небезпеку електроураження людини. Були запропоновані технічні рішення щодо нейтралізації її дії в мережах до 1140 В [9]. Однак до цього часу не встановлені умови та особливості впливу ЕРС вибігу двигунів на стан кола витоку струму на землю (зокрема, через опір тіла людини) в мережі напругою 3(3,3) кВ, що є актуальним.

Постановка задачі. Задачею роботи є дослідження особливостей формування струму витоку на землю в електромережі дільниці шахти напругою 3(3,3) кВ з урахуванням впливу зворотних ЕРС асинхронних двигунів споживачів.

Основний матеріал та результати досліджень. Розглянемо дільничну електромережу шахти напругою 3 кВ, яка включає (рис. 2) джерело живлення 1, до якого через високовольтний вимикач-контактор 2 підключено первинну обмотку силового трансформатора 3, вторинна обмотка якого живить асинхронний двигун 4. Між нульовою точкою вторинної обмотки силового трансформатора 3 та землею підключено компенсуючий дросель 5 апарата АЗУР-5 з активним опором R_k та індуктивністю L_k . Ємності ізоляції фаз кабельної мережі відносно землі враховано активно-ємнісними опорами $R_A, X_A - R_C, X_C$. Розглядається випадок виникнення витоку струму на землю між фазою С та землею через коло 7 опором R_g . Комп'ютерна модель асинхронного двигуна 4 складена в нерухомій відносно статора системі координат α, β з урахуванням припущень про відсутність насичення машини та ефекту витіснення струму в роторі [10]. Для трансформатора 3 насичення магнітної системи також не враховано.

Параметри силового трансформатора підстанції ВСТП-КРУ-1000-6/3(3,3) УХЛІ5 обраховані за паспортними даними [1] згідно відомої методики [11] (табл. 1).

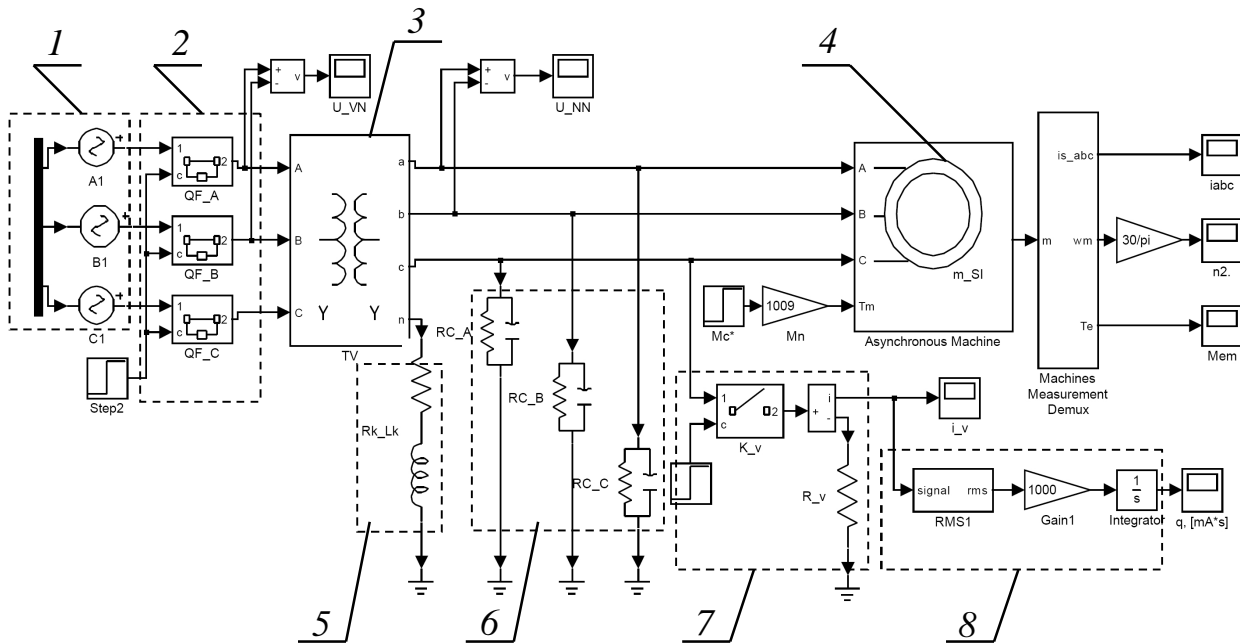


Рис. 2. Структурна схема комп'ютерної моделі електромережі ділянки шахти з одним асинхронним двигуном напругою 3 кВ

Табл. 1. Параметри силового трансформатора вибухозахищеної підстанції ВСТП-КРУ-1000-6/3 УХЛІ5

Параметр	Значення
<i>Паспортні дані</i>	
Номінальна потужність S_n , кВА	1000
Номінальна висока напруга U_{1n} , В	6000
Номінальна низька напруга U_{2n} , В	3000
Схема та група з'єднання обмоток	Y/Y-0
Напруга короткого замикання U_k , %	6,5
Струм неробочого ходу I_{xx} , %	1,1
Втрати короткого замикання ΔP_{k3} , кВт	7,7
Втрати неробочого ходу ΔP_{xx} , кВт	2,3
<i>Параметри схеми заміщення</i>	
Активний опір обмотки високої напруги R_1 , Ом	$1,386 \cdot 10^{-1}$
Індуктивність розсіяння обмотки високої напруги L_1 , Гн	$3,698 \cdot 10^{-3}$
Активний опір обмотки низької напруги R_2 , Ом	$3,465 \cdot 10^{-2}$
Індуктивність розсіяння обмотки низької напруги L_2 , Гн	$9,24 \cdot 10^{-4}$
Індуктивність намагнічування L_m , Гн	10,187

Параметри асинхронного електродвигуна номінальною напругою 3 кВ у вибухобезпечному виконанні обчислені згідно методики [12] відповідно до каталожних даних [13] (табл. 2). Крім того, прийняті наступні значення параметрів елементів системи:

- опір кола витoku струму на землю $R_g = 1$ кОм;
- ємність ізоляції кабельної мережі відносно землі $C_A = C_B = C_C = C = 0,5$ мкФ/фаза;
- активний опір ізоляції кабельної мережі відносно землі $R_A = R_B = R_C = R = 1$ МОм;
- активний опір компенсуючого дроселя $R_k = 146$ Ом, індуктивність компенсуючого дроселя $L_k = 6$ Гн;
- механічний момент навантаження двигуна («сухе тертя») $M_c^* = 1$ в.о., коефіцієнт інерції механізму $k_J = 1,2$ в.о.

Табл. 2. Параметри асинхронного двигуна у вибухобезпечному виконанні

Параметр	Значення
Тип асинхронного двигуна	1MA4350-2CN30 (Siemens)
<i>Паспортні дані</i>	
Номінальна лінійна напруга U_H , В	3000
Схема з'єднання обмотки статора	зірка
Номінальна потужність P_H , кВт	315
Номінальне ковзання s_H , %	0,6
Номінальна частота обертання n_H , об/хв	3000
Коефіцієнт корисної дії η , в.о.	0,962
Коефіцієнт потужності $\cos \varphi$, в.о.	0,9
Кратність пускового струму I_n / I_H , в.о.	5,5
Кратність пускового моменту M_n / M_H , в.о.	0,7
Кратність максимального моменту, M_{\max} / M_H , в.о.	2,4
Момент інерції ротора J , кг·м ²	5,5
<i>Параметри схеми заміщення</i>	
Активний опір обмотки статора R_1 , Ом	$1,475 \cdot 10^{-1}$
Приведений активний опір обмотки ротора R'_2 , Ом	$1,770 \cdot 10^{-1}$
Індуктивність розсіювання статора L_{sl} , Гн	$8,667 \cdot 10^{-3}$
Приведена індуктивність розсіювання ротора L_{rl} , Гн	$8,667 \cdot 10^{-3}$
Індуктивність намагнічування L_m , Гн	$3,278 \cdot 10^{-1}$

В ході моделювання двигун запускався з нерухомого стану, працював в усталеному режимі, в момент t_1 мав місце виток струму на землю (виникнення якого імітується замиканням ключа K_v підсистеми 7 структурної схеми моделі, рис. 2). В момент $t_2 = t_1 + \Delta t$ відбулося спрацювання апарата захисту та відключення електромережі, при цьому час відключення мережі становив $\Delta t = 50$ мс. Після цього двигун переходив до режиму вибігу, який тривав до зупинки ротора у момент t_3 .

Графіки, отримані в результаті моделювання, наведено на рис. 3, причому момент t_1 суміщено з початком координат, тобто прийнято $t_1 = 0$. Аналіз графіків дозволяє встановити наступне. Вибіг асинхронного двигуна прийнятого типу при номінальному рівні навантаження триває близько 2 с (рис. 3, *a*), що суттєво перевищує припустимий час відключення електромережі від джерела живлення. Під час вибігу в роторі протікають вільні складові струмів, величини яких знижуються із часом за експонентою (рис. 3, *b*). Оскільки ротор обертається за інерцією, ці струми наводять в статорі синусоїдальну ЕРС обертання, амплітуда якої знижується експоненціально відповідно до затухання струмів ротора, а частота – лінійно, відповідно до уповільнення швидкості ротора (рис. 3, *c*). Оскільки після захисного відключення вимикача-контактора на стороні ВН трансформатора двигун лишається електрично з'єднаним із вторинною обмоткою, то у високовольтних обмотках трансформатора наводиться ЕРС, яка за частотою відповідає ЕРС вибігу двигуна, а за амплітудою – більше останньої на коефіцієнт трансформації, який в даному випадку становить 2 (рис. 3, *d*). Амплітуда струму витoku на землю на інтервалі (t_1, t_2) визначається, окрім рівня напруги мережі та ємності ізоляції кабелів відносно землі, значенням індуктивності компенсуючого дроселя. Після захисного відключення мережі, через зміну частоти напруги на колі витoku, відбувається розбаланс компенсуючого дроселя, який налаштований для роботи на промисловій частоті 50 Гц. Тому на інтервалі (t_2, t_3) амплітуда струму витoku змінюється нелінійно (рис. 3, *e*).

Аналогічні результати для струму витoku можна отримати з аналізу схеми заміщення кола витoku струму на землю в мережі напругою 3 кВ розглянутої структури (рис. 4).

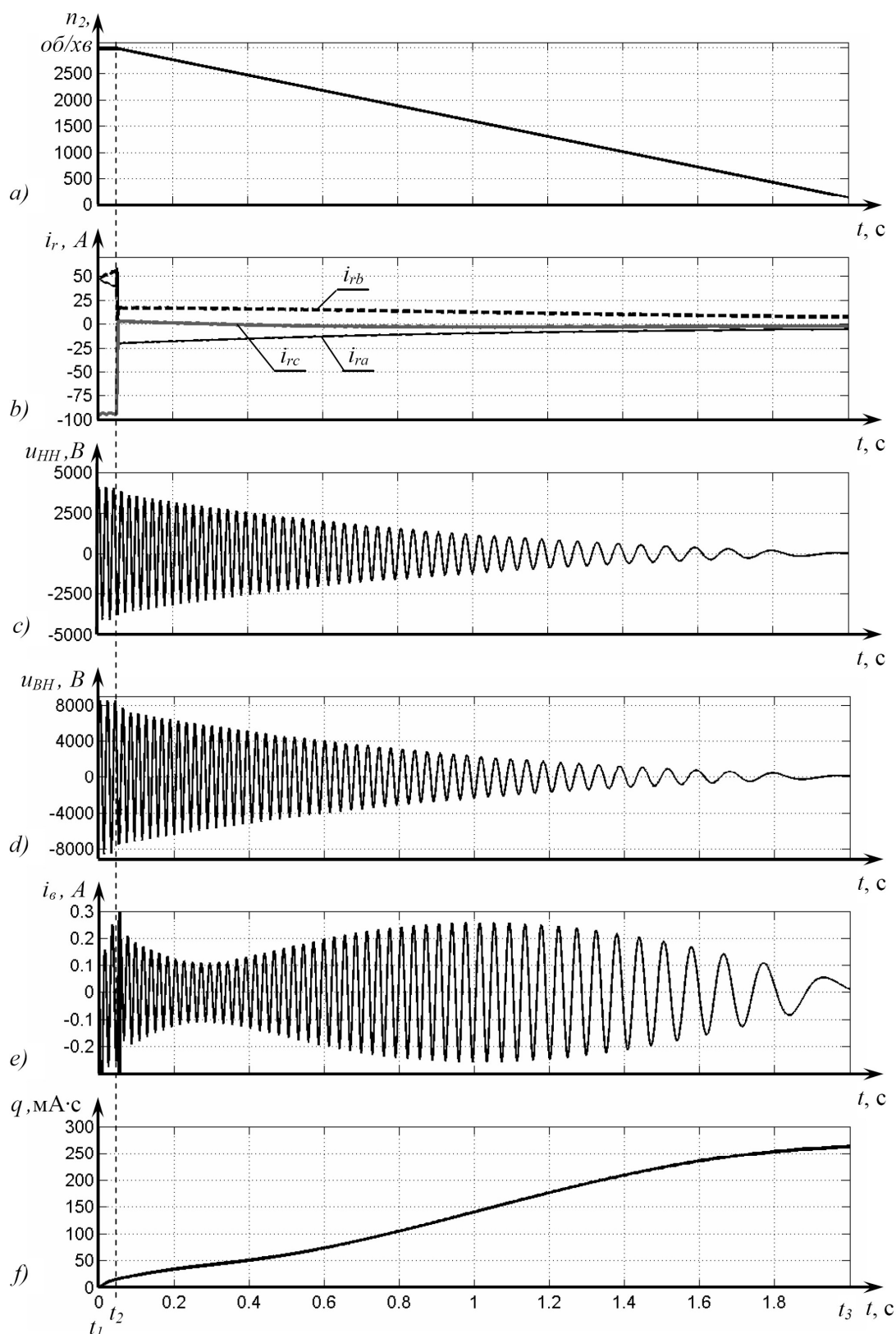


Рис. 3. Графіки, отримані в результаті моделювання витoku струму на землю в електромережі напругою 3 кВ: *a* – частота обертання двигуна; *b* – фазні струми ротора в системі координат ротора; *c* – лінійна напруга статора двигуна; *d* – лінійна напруга первинної обмотки трансформаторної підстанції; *e* – струм витoku через опір 1 кОм; *f* – кількість електрики, що пройшла через опір кола витoku струму на землю

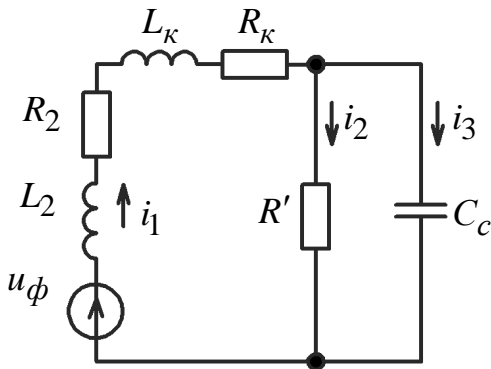


Рис. 4. Схема кола виток
струму на землю в мережі
напругою 3 кВ

На схемі заміщення позначено:

u_ϕ – фазна напруга в місці виникнення
виток;

$$R' = \frac{R_6 R_c}{R_6 + R_c}; \quad R_c = \frac{R}{3}, \quad C_c = 3C - \text{акти-}$$

вний опір та ємність ізоляції мережі.

Обираючи в якості змінних стану напру-
гу u_c на ємності C_c та струм i_1 через ін-
дуктивність, складемо диференційні рів-
няння, що описують стан кола виток:

$$\begin{cases} \frac{du_c}{dt} = -\frac{u_c}{C_c R'} - \frac{i_1}{C_c}; \\ \frac{di_1}{dt} = \frac{u_c}{L_2 + L_k} - \frac{R_2 + R_k}{L_2 + L_k} i_1 + \frac{u_\phi}{L_2 + L_k}. \end{cases} \quad (1)$$

Переходячи до матричної форми, маємо:

$$\frac{d}{dt} \bar{X} = \bar{A} \cdot \bar{X} + \bar{B}(t), \quad (2)$$

$$\text{де } \bar{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_c R'} & -\frac{1}{C_c} \\ \frac{1}{L_2 + L_k} & -\frac{R_2 + R_k}{L_2 + L_k} \end{bmatrix} - \text{матричний коефіцієнт;}$$

$$\bar{B}(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{u_\phi}{L_2 + L_k} \end{bmatrix} - \text{вектор зовнішніх впливів, який залежить від часу.}$$

$$\bar{X} = [u_c \quad i_1]^T - \text{вектор змінних стану.}$$

Розв'язуючи матричне диференційне рівняння (2) числовим ме-
тодом, можна обчислити напругу u_c та струм i_6 через опір кола ви-
току. Кількість електрики, що пройшла через опір кола виток за ін-
тервал часу (t_1, t_2) , становить 15 мА·с, що є меншим від гранично
припустимого значення 50 мА·с. Проте за інтервал (t_2, t_3) через опір
кола виток проходить 248 мА·с, що становить небезпеку електро-
ураження людини.

Висновки та напрямок подальших досліджень.

1. Розміщення високовольтного вимикача-контактора на стороні

первинної обмотки силового трансформатора шахтної підстанції 6/3(3,3) кВ дозволяє виконати підключення вимірювальної схеми апарата захисту від витоків струму на землю типу АЗУР-5 між нульовою точкою вторинної обмотки трансформатора та землею без використання фільтра приєднання.

2. Вплив ЕРС вибігу асинхронних двигунів споживачів на стан кола витоків в мережі 3(3,3) кВ є більш суттєвим, ніж це мало місце в мережах до 1140 В.

3. Підвищення електробезпеки експлуатації дільничних електромереж напругою 3(3,3) кВ можливе шляхом застосування технічних рішень із нейтралізації впливу ЕРС вибігу двигунів на опір кола витоків струму на землю.

В ході подальших досліджень доцільно адаптувати відомі технічні рішення із захисту кола витоків струму на землю від впливу ЕРС вибігу двигунів до експлуатації в шахтних мережах напругою 3(3,3) кВ.

Список літератури

1. Новое направление в создании рудничных взрывозащищенных трансформаторных подстанций на низшее напряжение до 3300 В / [Басов Н.М., Дзюбан В.С., Кардаш В.В. и др.] // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. трудов УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2010. – С. 61-71.
2. Дзюбан В.С. Требования к взрывозащищенному электрооборудованию и системам электроснабжения горных машин на напряжение 3(3,3) кВ / В.С. Дзюбан, Н.М. Басов // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. трудов УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2009. – С. 209-213.
3. Требования к изготовлению рудничного взрывозащищенного электрооборудования на напряжение 3(3,3) кВ. – Макеевка: МакНИИ, 2007. – 30с.
4. Dhillon V.S. Mine safety. A modern approach / V.S. Dhillon. – Springer-Verlag London Limited, 2010. – 193p.
5. ОАО «ДЭТЗ» – шахтам Украины / [Филатов Ю.В., Басов Н.М., Дзюбан В.С. и др.] // Уголь Украины. – 2011. – Январь. – С.11-14.
6. Дзюбан В.С. Переходные процессы в измерительных цепях аппаратов защиты от токов утечек на напряжение 3 кВ / В.С. Дзюбан, А.В. Горохов // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. трудов УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2010. – С. 45-49.
7. Дзюбан В.С. Вплив параметрів дільничної електромережі шахти на стійкість роботи апарата АЗУР-5 при комутації кабельного відгалуження / В.С. Дзюбан, А.В. Горохов, С.А. Руссиян // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Гірничо-електромеханічна. – 2011. – Вип. 21(189). – С.59-64.
8. Маренич К.М. Зворотні енергетичні потоки асинхронних двигунів як фактор небезпеки в електромережі шахти: монографія / К.М. Маренич, С.В. Василець. – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2012. – 206 с.
9. Маренич К.М. Наукові основи впровадження автоматичного захисного двобічного знеструмування шахтної дільничної електромережі / К.М. Маренич, І.В. Ковальова. - Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2012. - 125 с.
10. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288с.

11. Вольдек А.И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: Учебник для вузов / А.И. Вольдек, В.В. Попов. – СПб.: Питер, 2008. – 320с.
12. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И.А. Сыромятников; под ред. Л.Г. Мамиконянца. – 4-е изд., перераб и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240с.
13. Three-phase Induction Motors / Catalog D84.1-2009. – Siemens AG, 2009. – 364 p.

Стаття надійшла до редакції 20.09.2013

С.А. Руссиян, ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»

Дослідження стану кола витoku струму на землю в електромережі дільниці шахти напругою 3 (3,3) кВ

На основе анализа особенностей построения и использования перспективных шахтных участковых электросетей напряжением 3(3,3) кВ путем компьютерного моделирования исследованы процессы при возникновении утечки тока на землю. Установлена особенность влияния ЭДС выбега двигателей, вращающихся по инерции после защитного отключения напряжения питания, на эксплуатационные параметры электробезопасности сети 3(3,3) кВ.

Ключевые слова: ток утечки, аппарат защиты, трансформаторная подстанция, электросеть, модель, расчет, участок шахты, отключение, электропоражение.

S. Russijan , Donetsk National Technical University

Research Into the State of Current Leakage Circuit in Mine Section Power Network 3(3.3) kV

In the coal industry of Ukraine the process of transferring power stations from 1140V up to 3(3.3) kV is started. This will improve the technical and economic indicators of coal mining equipment, reduce accident rate by more stable operation of mining machines, increase individual capacity of mining machine up to 1000 kW, lower cables cross section and power losses in them, and reduce the starting current of motors. In this case it is necessary to improve protection from current leakage to the ground. Protection is provided by AZUR-5, which gives the command to trip high-voltage circuit breaker of complete transformer substation. The measuring circuit of AZUR-5 is connected between the zero point of the secondary winding of the transformer and earthing conductor, avoiding the use of active-inductive connection filter as distinct from previous versions (AZUR-1,2,3,4). The sensitivity of the measuring system of AZUR-5 is sufficient to provide the necessary operating speed (50 ms) in case of current leakage to the ground. However, after turning off the high-voltage circuit breaker, voltage in the network is supported by induction motor EMF, its frequency and amplitude is eventually reduced. In this paper, the characteristics of mine power network 3 kV was grounded and the parameters of equivalent circuit were calculated. The computer model of the power network was found and the current leakage through the resistance of the human body was calculated. The influence of induction motors back EMF on leakage current in network 3(3.3) kV is more significant, then in networks up to 1140 V.

Keywords: leakage current, protection device, transformer substation, power network, model, calculation, mine section, tripping, electrical shock.