

УДК 621.647.1

**С.А. Руссіян (канд. техн. наук)**ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Донецьк  
кафедра «Вища математика ім. В.В. Пака»  
E-mail: [st\\_russ@mail.ru](mailto:st_russ@mail.ru)**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАХИСНОЇ ФУНКЦІЇ АПАРАТА АЗУР-4 ПРИ  
ЗНЕСТРУМЛЕННІ УШКОДЖЕНОГО КАБЕЛЬНОГО ПРИЄДНАННЯ  
ВІДКЛЮЧЕНОЇ ОБМОТКИ ДВОШВИДКІСНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА**

*Шляхом комп'ютерного моделювання встановлена можливість розповсюдження захисної дії загальномережевого апарата захисту від витоків струму на землю АЗУР-4 на кабельне приєднання відключеної обмотки двошвидкісного асинхронного двигуна за рахунок з'єднання нульових точок обмоток вказаного двигуна.*

**Ключові слова:** шахта, дільниця, електромережа, двошвидкісний асинхронний двигун, виток струму, електроураження, апарат захисту.

**Актуальність проблеми та її зв'язок з прикладними задачами**

На сьогоднішній день у вугільній промисловості все більше використання знаходять двошвидкісні асинхронні двигуни (АД), основною особливістю яких є наявність двох незалежних статорних обмоток з різною кількістю пар полюсів. Підключення однієї з цих обмоток до мережі забезпечує роботу електроприводу гірничої машини на номінальній або зниженій швидкості. Типовими машинами цього класу є двошвидкісні АД серій ЭКВФ(Т)315 (розробка УкрНДІВЕ), розрахованих на напругу 1140 В та 660 В з синхронною частотою обертання 500/1500 об/хв АДКВ (НВО ЕЛСІВ) та ін. Такими двигунами комплектуються, зокрема, приводні блоки шахтних скребкових конвеєрів КСД-26 (електродвигуни 2x55/160 кВт), КСД27 (2-3x65/200), КСД29 (2x120/360) виробництва «Донецькгірмаш». Відключений стан однієї з обмоток під час функціонування двошвидкісного двигуна призводить до наведення в ній другою обмоткою трансформаторної ЕРС, яка є причиною наявності напруги на кабельному приєднанні відключеної обмотки. При пошкодженні ізоляції вказаного кабельного приєднання можливе виникнення витoku струму на землю, зокрема через опір тіла людини [1]. Незважаючи на наявність загальномережевого апарата захисту від витоків струму на землю (реле витoku), такий стан може призвести до смертельного електроураження людини, оскільки кабельне приєднання відключеної обмотки не має електричного зв'язку з мережею, отже не підпадає під захисну дію реле витoku. Таким чином, актуальним є питання дослідження процесу витoku струму на землю у кабельному приєднанні відключеної обмотки з метою підвищення безпеки експлуатації дільничної електромережі шахти.

**Аналіз досліджень та публікацій**

Відомі дослідження стосуються, в основному, визначення закону зміни трансформаторної ЕРС відключеної обмотки двошвидкісного асинхронного двигуна. Зокрема, у [2] отримані експериментальні осцилограми зміни ЕРС у відключеній обмотці двигуна типу ЭКВФ-355L12/4: при функціонуванні останнього з номінальною швидкістю в обмотці зниженої швидкості наводиться ЕРС, яка складається з високочастотної (частота  $f_1=1650$  Гц, амплітуда  $U_{m1}=100$  В) та низькочастотної ( $f_2=143$  Гц,  $U_{m2}=142$  В) складових.

Прикладання ЕРС такої величини до кола витoku струму на землю становить потенційну загрозу смертельного електроураження людини. Відомим є також підхід до математичного моделювання електропривода скребкового конвеєра з двошвидкісними двигунами [3], який враховує електромагнітні перехідні процеси в приводних електродвигунах, характер зміни моментів опору на валах двигунів при запуску конвеєра, ряд інших факторів. Такий підхід може бути використаний для підвищення точності моделювання навантаження двигуна гірничої машини, що суттєво впливає на характер трансформаторної ЕРС, що наводиться у відключеній обмотці.

#### Постановка задачі

Потенційна небезпека електроураження людини, яку становить кабельне приєднання відключеної обмотки працюючого двошвидкісного двигуна, обумовлює актуальність обґрунтування доцільності розповсюдження захисної дії загальномережевого апарата захисту від витоків струму на землю на вказане кабельне приєднання.

#### Основний матеріал та результати досліджень

Розглянемо схему приєднання двошвидкісного двигуна у складі шахтної дільничної електромережі (рис. 1), яка вміщує вторинну обмотку трансформатора ТР комплектної підстанції (КТП) дільниці, автоматичний вимикач QF та апарат захисту від витоків струму на землю типу АЗУР-4, що розміщені у розподільчому пристрої низької напруги КТП, комутаційні апарати КА1 та КА2, до яких гнучкими кабелями ГК1 та ГК2 під'єднані статорні обмотки W1 (обмотка номінальної швидкості) та W2 (обмотка зменшеної швидкості), відповідно, двошвидкісного АД з ротором R. Для гнучких кабелів враховуються активні опори ( $R_{i3 \text{ ГК}}$ ) та ємності ( $C_{i3 \text{ ГК}}$ ) ізоляції відносно землі.

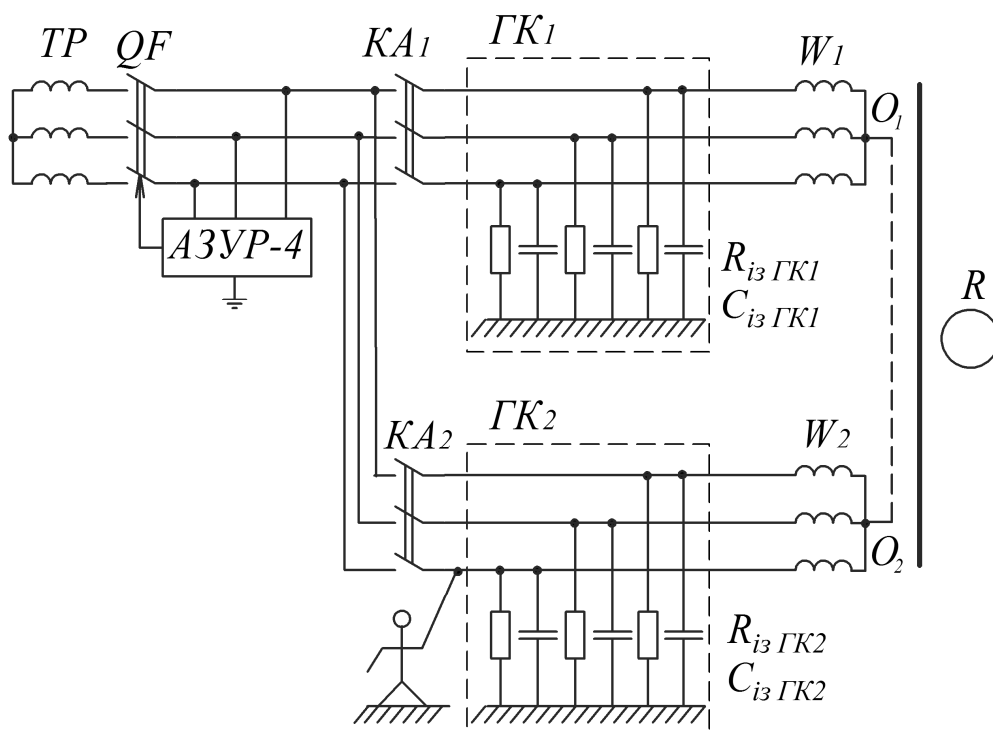


Рисунок 1 – Принципова схема приєднання двошвидкісного двигуна у складі дільничної електромережі шахти

Припустимо, що до моменту  $t_1$  двигун функціонував на номінальній швидкості, тобто автоматичний вимикач QF та комутаційний апарат КА1 були ввімкнені, а КА2 –

відключений. У момент  $t_1$  в кабелі КА2 відключеної обмотки W2 виникає виток струму на землю. Для виявлення цього стану апаратом АЗУР-4 з подальшим відключенням двигуна від джерела живлення необхідно розширити захисну дію вказаного апарата на кабель КА2, тобто забезпечити електричний зв'язок між обмотками W1 та W2. Для цього пропонується з'єднати нульові точки „O1” та „O2” обмоток W1 та W2. Це забезпечить шлях протікання оперативного струму апаратом АЗУР-4 за колом: фільтр приєднання АЗУР-4 до фаз мережі, ввімкнений комутаційний апарат КА1, жили гнучкого кабелю ГК1, обмотка W1 двигуна, нульова точка „O1” обмотки W1, нульова точка „O2” обмотки W2, жили гнучкого кабелю ГК2, опір тіла людини, земля, основний заземлювач апарата АЗУР-4.

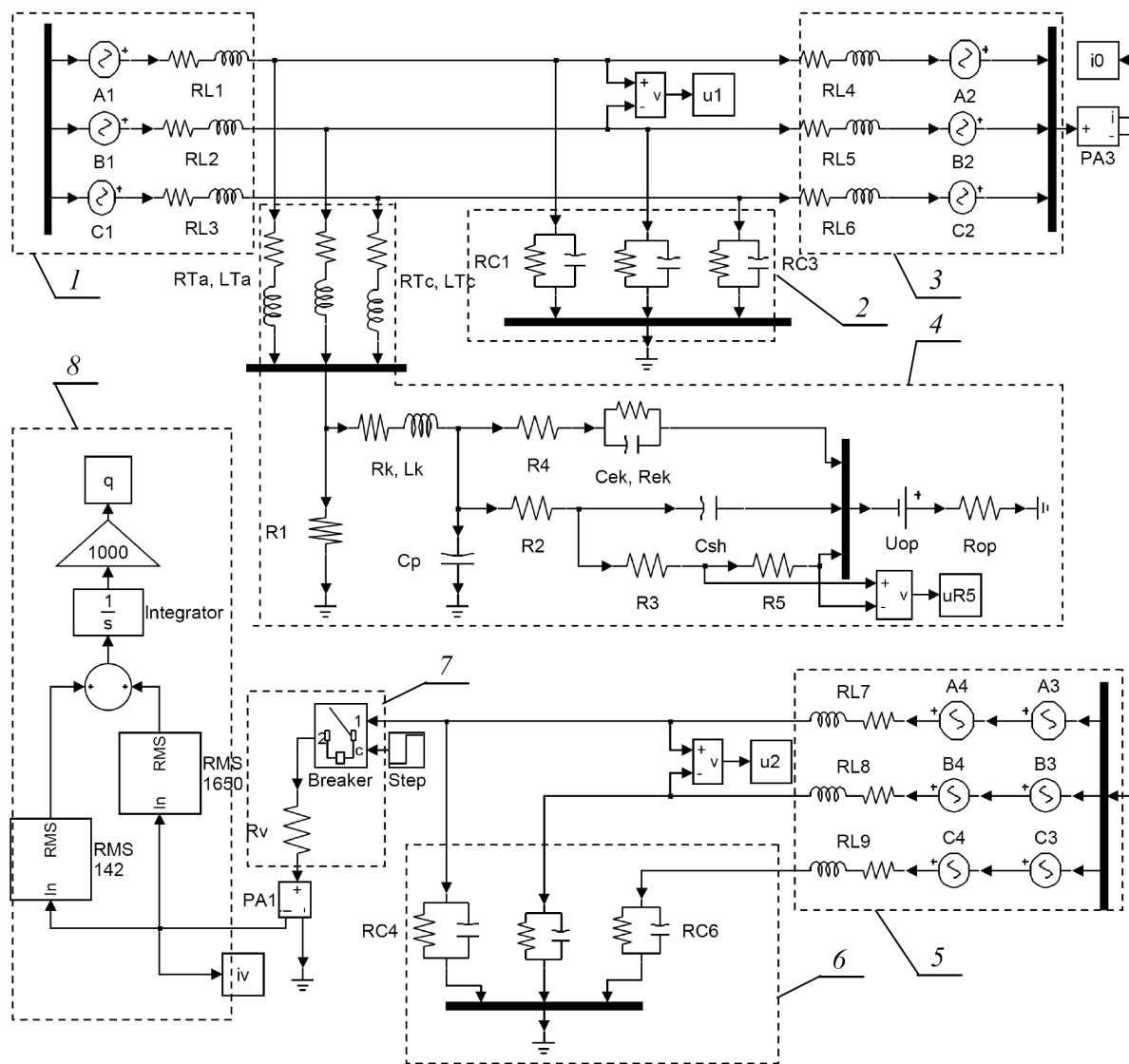


Рисунок 2 – Структурна схема комп’ютерної моделі приєднання двохшвидкісного асинхронного двигуна при виникненні витoku струму на землю в кабелі відключеної обмотки

З метою моделювання стану кола витoku струму на землю у мережі розглянутої конфігурації (рис. 1) скористаємося комп’ютерною моделлю, структурна схема якої зображена на рис. 2. Модель складається з наступних блоків: 1 – вторинна обмотка

трансформатора дільничної КТП (A1-C1 – джерела ЕРС взаємоіндукції, RL1-RL3 – активні опори та індуктивності обмотки); 2 – активно-ємнісні опори ізоляції кабеля ГК1 відносно землі; 3 – обмотка W1 номінальної швидкості АД (A2-C2 – джерела ЕРС взаємоіндукції, RL4-RL6 – активні опори та індуктивності обмотки); 4 – схема заміщення вимірювального кола апарата АЗУР-4, до складу якої входить активно-індуктивний фільтр приєднання RTa, LTa - RTc, LTc, джерело оперативного струму Uop та опір вимірювального елемента R5; 5 - обмотка W2 зменшеної швидкості АД (A3-C3, A4-C4 – джерела трансформаторної ЕРС, RL7-RL9 – активні опори та індуктивності обмотки); 6 - активно-ємнісні опори ізоляції кабеля ГК2 відключеної обмотки відносно землі; 7 – модель кола витoku струму на землю ( $R_v$  – опір тіла людини, замикання ключа „Breaker” імітує доторкання людини до фази мережі); 8 – блок вимірювання кількості електрики, яка пройшла через опір тіла людини. Трансформаторна ЕРС відключеної обмотки моделюється послідовним ввімкненням двох джерел ЕРС у кожен фазу схеми заміщення обмотки (блок 5), що дозволяє врахувати високочастотну та низькочастотну складові вказаної ЕРС згідно залежності:

$$u = U_{m1} \sin(2\pi f_1 t) + U_{m2} \sin(2\pi f_2 t). \quad (1)$$

Вимірювання кількості електрики через опір тіла людини в блоці 8 передбачає визначення діючих значень струму витoku на частотах  $f_1$  (блок RMS1650) та  $f_2$  (блок RMS142) та інтегрування їх суми. Модель побудована за умови ввімкненого стану автоматичного вимикача QF, комутаційного апарата КА1 та відключеного стану КА2 (рис. 1), однак самі ці апарати на структурній схемі комп'ютерної моделі (рис. 2) не показані. Модель дозволяє реєструвати миттєві значення наступних величин: лінійної напруги  $u_1$  на затискачах ввімкненої обмотки двошвидкісного АД (блок u1); лінійної напруги  $u_2$  на затискачах відключеної обмотки (u2); струму витoku  $i_g$  через опір тіла людини (амперметр PA1); струму у провіднику між нульовими точками „O1” та „O2” обмоток W1 та W2 двошвидкісного АД ( $i_0$ ); напруги  $u_{R5}$  на реагуючому органі (резисторі R5) апарата АЗУР-4 ( $u_{R5}$ ); кількості електрики  $q$  через опір кола витoku ( $q$ ) на землю. Для здійснення моделювання прийняті наступні параметри елементів системи: тип двошвидкісного двигуна ЭКВФ-355L12/4; ємність ізоляції кабеля ГК1  $C_{i3 \text{ ГК1}}=1$  мкФ; активний опір ізоляції кабеля ГК1  $R_{i3 \text{ ГК1}}=1$  МОм; ємність ізоляції кабеля ГК2  $C_{i3 \text{ ГК2}}=1$  мкФ; активний опір ізоляції кабеля ГК2  $R_{i3 \text{ ГК2}}=1$  МОм; активний опір вторинної обмотки трансформатора 0,1 Ом, індуктивність – 1 мГн; параметри джерел трансформаторної ЕРС  $f_1=1650$  Гц,  $U_{m1}=100$  В,  $f_2=143$  Гц,  $U_{m2}=142$  В; опір кола витoku 1 кОм. Моделювання здійснювалося за наступних параметрів: момент витoku струму на землю становить  $t_1=0,1$  с; максимальне значення кроку інтегрування  $1 \cdot 10^{-3}$  с; відносна точність 0,1%.

Аналіз отриманих діаграм (рис. 3) дозволяє встановити, що до моменту  $t_1$  виникнення витoku струму на землю напруга, що прикладається до ввімкненої обмотки двигуна, є синусоїдальною (рис. 3, а), у відключеній обмотці наводиться трансформаторна ЕРС, що складається з високо- та низькочастотної складових (рис. 3, б), напруга  $u_{R5}=0,9$  В на реагуючому органі АЗУР-4 є нижчою від уставки ( $u_{lim}=2,4$  В), тобто апарат не спрацьовує. Після моменту  $t_1$  через опір тіла людини протікає струм витoku (рис. 3, в), який, містить постійну оперативну складову та, відповідно до трансформаторної ЕРС, дві гармонійні складові, амплітуда низькочастотної складової становить близько 0,2 А. Між нульовими точками ввімкненої та відключеної обмоток АД також протікає струм складного гармонійного складу загальної амплітуди близько 0,2 А. Напруга на реагуючому органі АЗУР-5 аперіодично зростає та стає більшою від уставки у момент  $t_2=0,118$  с, тобто

тривалість спрацювання АЗУР-4 становить  $t_2 - t_1 = 0,018$ с. Для оцінки кількості електрики, що пройде через опір тіла людини (1 кОм), необхідно врахувати тривалість відключення автоматичного вимикача. Для мереж напругою 1140 В сумарна тривалість спрацювання АЗУР-4 та відключення автоматичного вимикача не може перевищувати 0,07с. За такий час через опір тіла людини пройде кількість електрики, яка дорівнює 17,6 мА·с, що є меншим від максимально припустимого значення (50 мА·с). Це підтверджує принципову можливість розповсюдження захисної функції АЗУР-4 на кабельне приєднання відключеної обмотки двошвидкісного АД.

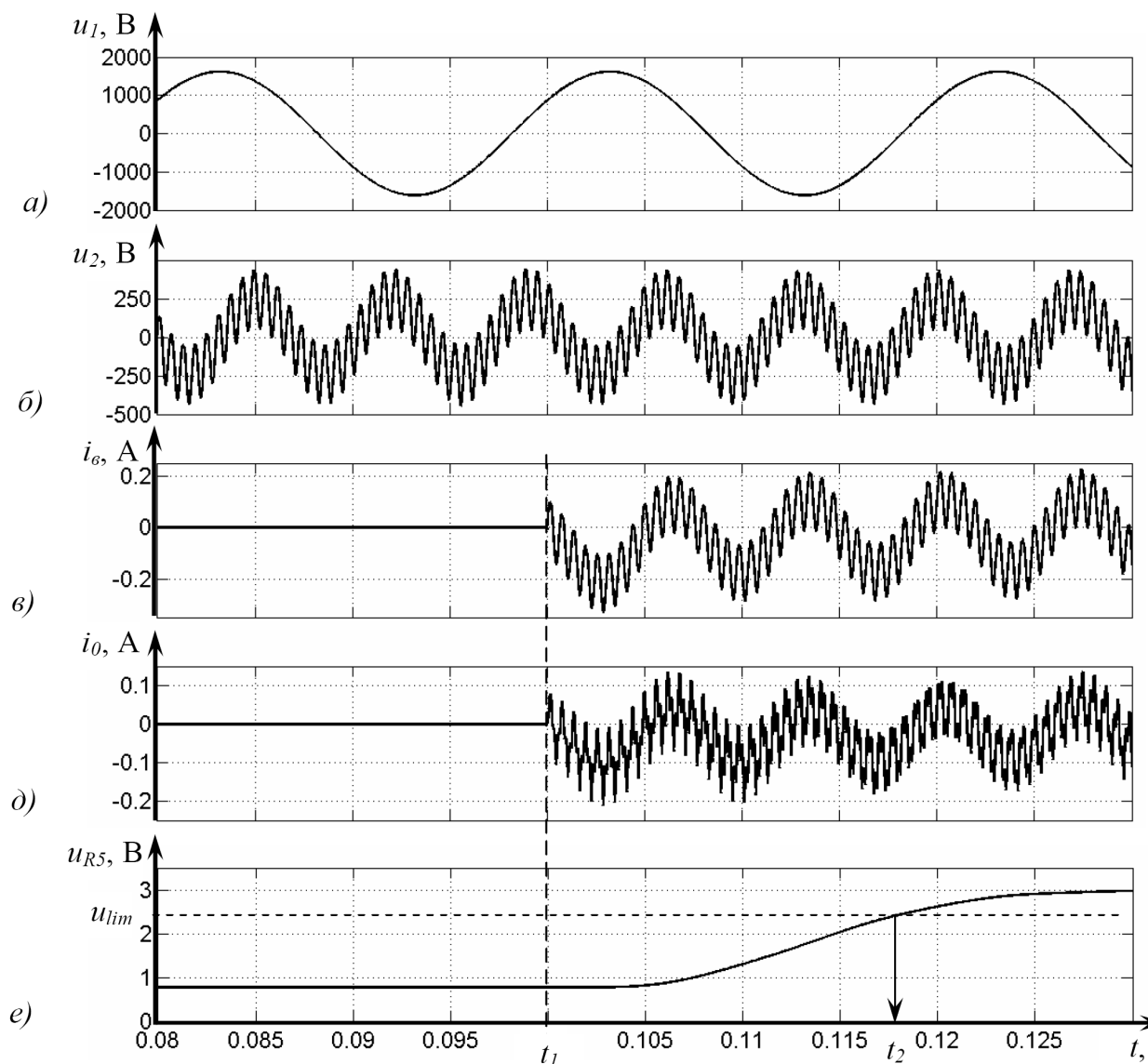


Рисунок 3 – Діаграми миттєвих значень наступних величин, отримані в результаті комп'ютерного моделювання: а – лінійної напруги на затискачах ввімкненої обмотки двошвидкісного двигуна; б – лінійної напруги на затискачах відключеної обмотки; в – струму витоку через опір тіла людини; д – струму у провіднику між нульовими точками  $O_1$  та  $O_2$  обмоток  $W1$  та  $W2$  двошвидкісного двигуна; е – напруги на реагуючому органі (резисторі  $R5$ ) апарата АЗУР-4

Моделюванням встановлена залежність кількості електрики (рис. 4), що проходить через опір тіла людини за час знеструмлення мережі 0,07 с, при зміні ємності ізоляції кабеля

відключеної обмотки двигуна від 0,1 до 1 мкФ та для опорів тіла людини 500 Ом (крива 1), 1 кОм (крива 2) та 2 кОм (крива 3). Графіки підтверджують збереження захисної функції АЗУР-4 при зміні робочих параметрів у вказаних межах.

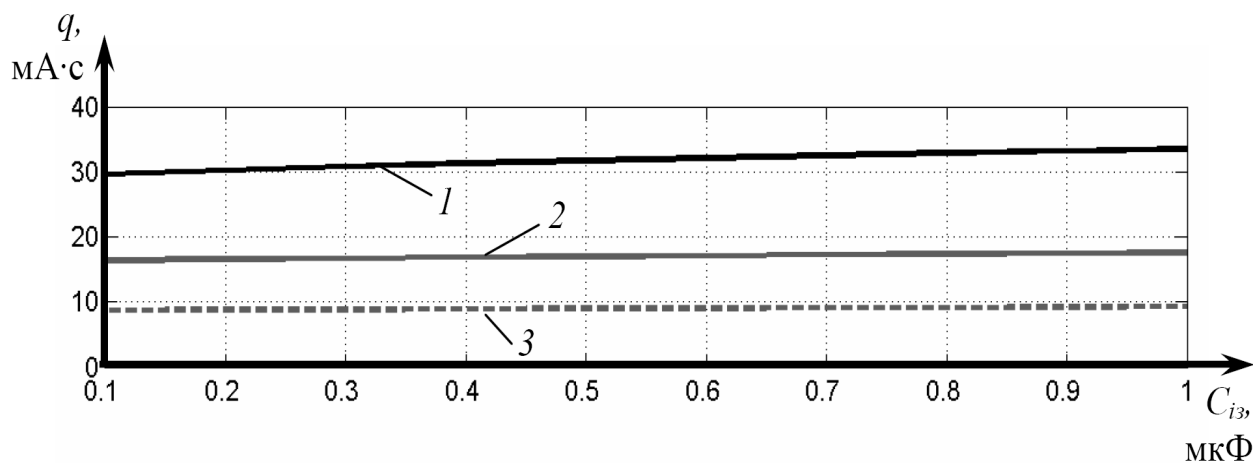


Рисунок 4 – Залежність кількості електрики через опір тіла людини від ємності ізоляції кабеля відключеної обмотки двигуна для опорів тіла людини 500 Ом (крива 1), 1 кОм (крива 2) та 2 кОм (крива 3)

#### Висновки і напрямок подальших досліджень

Встановлена принципова можливість розповсюдження захисної функції апарата АЗУР-4 на кабельне відгалуження відключеної обмотки двошвидкісного асинхронного двигуна за рахунок з'єднання між собою нульових точок обмоток вказаного двигуна. Це дає змогу за допомогою постійного оперативного струму апарата захисту із задовільною швидкістю виявляти витoki струму на землю у кабельному приєднанні відключеної обмотки двигуна. Комп'ютерним моделюванням підтверджено збереження захисної дії АЗУР-4 при зміні ємності ізоляції вказаного приєднання від 0,1 до 1 мкФ. Подальші дослідження мають стосуватися врахування впливу ЕРС вибігу відключеної двошвидкісного двигуна на стан кола витoku струму на землю.

#### Список використаної літератури

1. Анализ параметров и процессов в шахтных электрических сетях / [Ф.П. Шкрабец, Н.А. Шидловская, В.С. Дзюбан, Е.А. Вареник]. – Днепропетровск: НГУ, 2003. – 151 с.
2. Маренич К.М. Наукові основи впровадження автоматичного захисного двобічного знеструмлення шахтної дільничної електромережі: монографія / К.М. Маренич, І.В. Ковальова. – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2012. – 125 с.
3. Математическая модель для исследования нагрузок в двухскоростном многодвигательном приводе и тяговом органе скребкового забойного конвейера / [Кондрахин В.П., Мельник А.А., Косарев В.В. та ін.] // Наукові праці ДонНТУ. Серія "Гірничо-електромеханічна". – 2008. - №16(142). – С. 132-140.

Надійшла до редакції  
01.04.2013

Рецензент:  
д-р техн. наук, проф. Ковальов Є.Б.

**С.А. Руссиян**

**ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»**

**Математическая модель защитной функции аппарата АЗУР-4 при обесточивании поврежденного кабельного присоединения отключенной обмотки двухскоростного асинхронного двигателя.** Путем компьютерного моделирования установлена возможность распространения защитного действия общесетевого аппарата защиты от утечек тока на землю АЗУР-4 на кабельное присоединение отключенной обмотки двухскоростного асинхронного двигателя за счет соединения нулевых точек обмоток указанного двигателя.

**Ключевые слова:** шахта, участок, электросеть, двухскоростной асинхронный двигатель, утечка тока, электропоражение, аппарат защиты.

**S.A. Russijan**

**Donetsk National Technical University**

**Mathematical Model of Safety Function of Apparatus AZUR-4 during Tripping of Damaged Cable Connection of Double-Speed Induction Motor Disconnected Winding.** Today in coal mining two-speed induction motors are widely used. The main feature of these motors - two independent stator windings with different numbers of poles. This allows the motor to operate at two different speeds. Disabled state of one winding leads to induction to the other winding transformer EMF, which causes a voltage applied to cable connection of disconnected winding. Insulation damage of such cable connection can lead to current leakage, in particular, through the resistance of the human body. This can lead to a fatal electrocution. Despite the presence of network-wide protection device AZUR-4 cable connection of disconnected winding does not fall under its protective effect. The cause is that there are no electrical connection between the network and disconnected winding. To improve the operational safety of the mine section network it is actual to research into the process of current leakage in the cable connection of double-speed induction motor disconnected winding. To identify by AZUR-4 the current leakage to earth in the cable connection of disconnected winding it is proposed to interconnect the zero points of both motor windings. This will provide the electrical connection between the windings and allow using DC control device to control the insulation resistance to earth of cable connection of disconnected motor winding. To calculate the leakage current through the resistance of the human body in a power network with two-speed motor according to the equivalent circuit the computer model is composed. The model includes the secondary winding of section transformer, to which by flexible cable the nominal speed winding of two-speed motor is connected. To the disconnected winding the second flexible cable is connected, in which a leakage current appears. The model allows to calculate instantaneous values of leakage current and the amount of electricity which got through resistance of human body. Also the model contains measuring part of AZUR-4. There is a possibility to track the change of voltage on the reactive organ of AZUR-4. By a computer simulation the possibility of protective function distribution of AZUR-4 on the cable joining of disconnected winding of two-speed asynchronous motor was ascertained due to connection of both windings zero points of winding motor.

**Keywords:** mine, section, power network, current leakage, two-speed induction motor, electrical shock, protective device.