

УДК 621.313.333.2

В.Ф. СИВОКОБИЛЕНКО (д-р техн. наук, проф.), **Я.О. ЛЯШОК** (канд. техн. наук, доц.)

Державний вищий навчальний заклад
«Донецький національний технічний університет»
svf1934@gmail.com

ОЦІНКА ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ДВОШВИДКІСНИХ ДВИГУНІВ У СКЛАДІ ДІЛЬНИЧНИХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖ ШАХТ

Запропоновано методику оцінки кількості електрики, що пройшла через опір кола витoku струму на землю в кабелі відключеної обмотки двошвидкісного асинхронного двигуна в складі дільничної електромережі, яка передбачає визначення залежності взаємної індуктивності між підключеною обмоткою статора та ротором від кута повороту останнього, розв'язання матричного диференційного рівняння стану двигуна, обчислення розподілення магнітної індукції у повітряному зазорі двигуна, визначення ЕРС, що наводяться в фазах відключеної обмотки, розрахунок миттєвих значень струму витoku та оцінку електробезпеки експлуатації двигуна.

Ключові слова: електромережа шахти, двошвидкісний двигун, обмотка, комутаційний апарат, електробезпека, виток струму, електрорушійна сила, індукція, кількість електрики, матриця, перехідний процес, диференційне рівняння, змінна стану

Актуальність проблеми та її зв'язок з прикладними задачами. При експлуатації шахтних скребкових та стрічкових конвеєрів доволі часто з технологічних причин виникає необхідність зміни швидкості переміщення тягового органу з робочої на маневрову. Зокрема, робоча швидкість переміщення тягового органу скребкового конвеєра (наприклад, серій СП330, СП251 та ін.) – від 1,12 м/с до 1,24 м/с, маневрова – від 0,37 м/с до 0,41 м/с. Це досягається використанням двошвидкісних асинхронних двигунів у вибухобезпечному виконанні, на статорі яких розміщені дві роздільні обмотки з різною кількістю пар полюсів. Типова кількість пар полюсів для обмотки високої швидкості – 2, низької швидкості – 6. Такі двигуни випускає, зокрема, «Першотравневий електромеханічний завод ім. К. Маркса». Наприклад, двигун типу ЭДКВ400L12/4 (120/360 кВт) призначено для приводу скребкових конвеєрів КСД27 в шахтах, небезпечних за газом та пилом. Двошвидкісні двигуни серії ЭДКВФ (наприклад: ЭДКВФ315M12/4 (65/200 кВт), ЭДКВФ355LA12/4 (185/530 кВт), ЭДКВФ355M12/4 (132/400 кВт) та ін.) призначені для приводу скребкових, стрічкових конвеєрів та інших шахтних механізмів. Також двошвидкісні двигуни для потреб гірничої промисловості випускає компанія ЕМІТ S.A. (Польща), що входить до складу The Cantoni Group. Зокрема, випускаються наступні вибухозахищені двигуни: dSKgwp355M12/4 (65/200 кВт), dSKgwp355L12/4 (85/250 кВт), dSKgwp500X12/4V (105/315 кВт) та ін.

Розглянемо схему фрагмента дільничної електромережі за наявності асинхронного двошвидкісного двигуна (рисунок 1), що включає вторинну обмотку 1 силового трансформатора дільничної трансформаторної підстанції з автоматичним вимикачем 2, на виході від якого живиться електромережа дільниці. Апарат 3 захисту від витоків струму на землю (реле витoku, наприклад, серії АЗУР) під'єднано до фаз мережі в місці підключення магістрального броньованого кабелю 4 до виходу автоматичного вимикача 2.

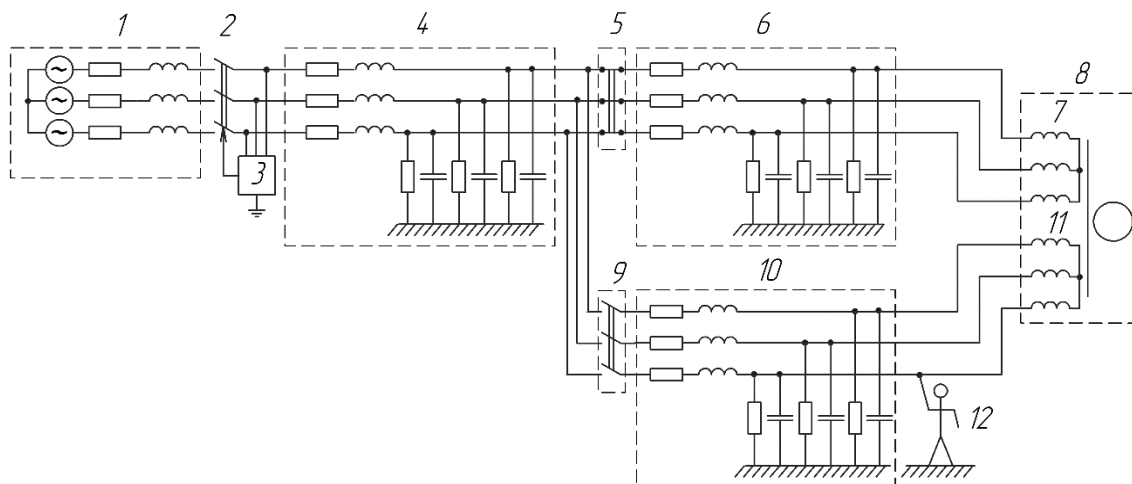


Рисунок 1 – Схема фрагмента дільничної електромережі за наявності асинхронного двошвидкісного двигуна

Магістральний кабель 4 живить низьковольтний розподільчий пункт, до складу якого входять комутаційні апарати 5 та 9, які за допомогою гнучких кабелів 6 та 10, відповідно, з'єднуються з обмотками 7 та 11 двошвидкісного асинхронного двигуна (рисунок 1). При цьому тільки один з комутаційних апаратів 5 або 9 може знаходитися у замкненому стані, оскільки одночасна подача напруги до обох обмоток 7 та 11 статора двошвидкісного двигуна заборонена. Припустимо, що у ввімкненому стані знаходиться апарат 5, тобто обмотка 7 двигуна живиться через кабель 6. При цьому у відключеній обмотці 11 наводиться ЕРС, яка є причиною знаходження кабеля 10 під напругою та може спричинити електроураження людини 12 при торканні фази кабеля 10. Оперативний струм реле витоку 3 накладається на всю мережу за виключенням відключеної обмотки 7 двигуна та кабеля 10, які виявляються гальванічно відділеними від основної частини мережі. Тому захисна функція реле витоку 3 не розповсюджує на приєднання відключеної обмотки двошвидкісного двигуна.

Важкі умови експлуатації гірничого обладнання обумовлюють високу імовірність пошкодження кабелів та, як наслідок, виникнення коротких замикань та витоків струму на землю [1]. Оскільки стан ізоляції кабельного приєднання відключеної обмотки двошвидкісного двигуна не контролюється загальномеревим апаратом захисту від витоків струму на землю, актуальним є питання оцінки електробезпеки стану вказаного приєднання та визначення необхідності застосування додаткових заходів для запобігання електроураження людини.

Відомі дослідження та публікації. Характерною особливістю двошвидкісних двигунів у вибухобезпечному виконанні привода шахтних конвеєрів є розміщення на статорі двох електрично нез'язаних між собою обмоток. Почергове підключення обмоток до джерела живлення дозволяє регулювати швидкість обертання на двох рівнях. Існують регульовані електроприводи з двошвидкісними двигунами, які передбачають підключення кожної обмотки до власного автономного інвертора напруги, що дозволяє економічно регулювати швидкість у широкому діапазоні [2, 3]. Відомі випадки розміщення на статорі трьох незалежних обмоток [4]. На загальнопромислових підприємствах найбільш розповсюджені двигуни з перемиканням кількості пар полюсів, для яких складена універсальна математична модель, що дозволяє аналізувати перехідні процеси при різних схемах обмотки статора з урахуванням спектра просторових гармонік магніторушійної сили, несиметрії та нелінійності параметрів [5]. Визначення ЕРС, що наводиться у відключеній обмотці машини, можливо на основі інформації про розподілення індукції у повітряному зазорі машини в кожний момент часу, для чого можуть бути використані відомі залежності [6]. Для розрахунку миттєвих значень однофазного витоку струму на землю, окрім ємності та активного опору ізоляції відповідного кабеля, необхідно врахувати повний опір тіла людини, для чого можна скористатися результатами відповідних досліджень [7, 8]. Електробезпека стану кабельного приєднання відключеної обмотки двошвидкісного двигуна може бути оцінена за кількістю електрики, яка пройшла через опір кола витоку за час аварійного процесу [9].

Таким чином, відомі дослідження є достатньою базою для оцінки електробезпеки експлуатації двошвидкісних асинхронних двигунів у складі дільничних електромереж шахт.

Постановка задачі. Задачею роботи є розробка методики оцінки електробезпеки експлуатації двошвидкісних асинхронних електродвигунів у складі електромережі дільниці шахти.

Основний матеріал та результати досліджень. Оцінку електробезпеки функціонування двошвидкісного асинхронного двигуна пропонується здійснювати за кількістю електрики Q , яка пройде через опір тіла людини при торканні фази кабеля відключеної обмотки двигуна. Згідно вимогам ГОСТ 22929–78 [10], який на сьогоднішній день діє в Україні, кількість електрики, що проходить через опір однофазного витоку струму на землю за час аварійного процесу, не має перевищувати $Q_{max}=50$ мА·с. Вихідними даними для оцінки величини Q є: паспортні та обмоточні дані двошвидкісного двигуна, значення режимних параметрів функціонування двигуна, параметрів електромережі, зокрема – величини ємностей та активних опорів ізоляції кабеля відключеної обмотки, та значення параметрів схеми заміщення тіла людини. Пропонується наступна загальна послідовність визначення величини Q :

- a) визначення взаємної індуктивності між підключеною обмоткою статора та ротором в функції кута повороту ротора;
- b) чисельне розв'язання матричного диференційного рівняння стану двигуна для умов заданого режиму роботи, в результаті чого визначаються миттєві значення струмів фаз підключеної обмотки статора та ротора;
- c) обчислення розподілення магнітної індукції у повітряному зазорі двигуна як функції часу на основі інформації про миттєві значення струмів;
- d) розрахування ЕРС пазових провідників відключеної обмотки;
- e) визначення ЕРС, що наводиться в кожній фазі відключеної обмотки, шляхом підсумовування ЕРС пазових провідників з урахуванням схеми з'єднання обмотки;
- f) обчислення миттєвих значень струму витоку з урахуванням параметрів ізоляції кабеля відключеної обмотки та кола витоку струму на землю;
- g) оцінка величини Q .

Визначення взаємної індуктивності обмоток статора та ротора передбачає розрахунок індукції магнітного поля у повітряному зазорі машини. Для цього загальна індукція в повітряному зазорі машини розглядається як сума індукцій статора та ротора. Індукція результуючого поля в області кожного паза представляється у вигляді накладення індукцій двох полів: індукції непарного поля від струму паза (при припущенні про відсутність

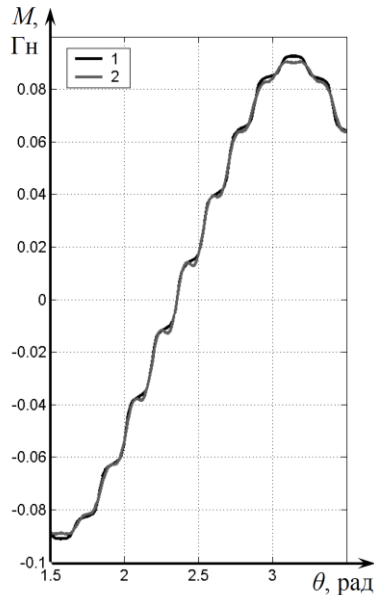


Рисунок 2 – Графік взаємної індуктивності $M(\theta) = \psi_{ra} / i_{sa}$ в функції кута θ повороту ротора: 1 – розрахована залежність; 2 – залежність, отримана за рівнянням (1)

потокосцеплення кожної котушки статора для кожного моменту часу. Потокосцеплення фазних обмоток статора визначається шляхом обрахування суми потокосцеплень відповідних котушок. Аналогічно обчислюються потокосцеплення фаз ротора. Шукану залежність $M(\theta)$ взаємної індуктивності від кута повороту ротора ілюструє рис. 2, крива 1.

Величина $M(\theta) = \psi_{ra} / i_{sa}$ є парною функцією, для якої постійна складова тригонометричного ряду Фур'є дорівнює нулю $a_0 = 0$ та амплітуди синусоїдальних складових є нульовими $b_k = 0$, тобто при аналізі можна обмежитися визначенням тільки амплітуд a_k косинусоїдальних складових. Для залежності $M(\theta)$, графік якої наведено на рис. 2 (крива 1), найбільші абсолютні величини коефіцієнти a_k мають для 2, 6, 34, 38 гармонік, а саме: $a_2 = 8,57 \cdot 10^{-2}$ Гн; $a_6 = 4,12 \cdot 10^{-3}$ Гн; $a_{34} = 2,66 \cdot 10^{-3}$ Гн; $a_{38} = -2,95 \cdot 10^{-3}$ Гн, амплітуди інших гармонік є на два порядки меншими, тобто несуттєво малими. Це дозволяє описати залежність $M(\theta)$ для параметрів двигуна, що розглядається, залежністю (рис. 2, крива 2):

$$M(\theta) = 8,57 \cdot 10^{-2} \cdot \cos(2\theta) + 4,12 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(6\theta) + 2,66 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(34\theta) - 2,95 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(38\theta). \quad (1)$$

Відхилення отриманих згідно (1) значень взаємної індуктивності $M(\theta)$, при врахуванні тільки 2, 6, 34, 38 гармонік, від значень, обрахованих за кривою індукції, не перевищує 3% (рис. 2), що є припустимим для інженерних розрахунків. Це дозволяє спростити подальші розрахунки врахуванням тільки вказаних гармонік для аналізу кривої взаємної індуктивності статора та ротора.

Матричне диференціальне рівняння, що описує перехідні процеси в асинхронному короткозамкненому двигуні відносно складових потокосцеплень з урахуванням кута повороту ротора θ , є наступним:

$$d\bar{\Psi}_{AD} / dt = \bar{F}_{AD} \cdot \bar{\Psi}_{AD} + \bar{G}_{AD} \bar{S}_{AD} + \bar{H}_{AD} \cdot \bar{U}_{AD}, \quad (2)$$

де $\bar{\Psi}_{AD} = [\psi_{sa} \ \psi_{sb} \ \psi_{ra} \ \psi_{rb} \ \omega \ \theta]^T$ - вектор змінних стану; $\bar{G}_{AD}, \bar{H}_{AD}$ - матричні константи; $\bar{S}_{AD} = [-\omega\psi_{rb} \ \omega\psi_{ra} \ (M_e - M_c)/J]^T$ - вектор нелінійних співвідношень між змінними стану; $\bar{U}_{AD} = [u_{AB} \ u_{BC} \ u_{CA}]^T$ - вектор лінійних напруг статора; $\bar{F}_{AD} = \bar{R} \cdot \bar{M}^{-1}(\theta)$, причому \bar{R} - матриця, що враховує опори контурів статора та ротора, $\bar{M}^{-1}(\theta)$ - матриця, зворотня до матриці індуктивностей $\bar{M}(\theta)$ двигуна:

$$\bar{M}(\theta) = \begin{bmatrix} L_1 & 0 & M_3 & M_4 & 0 & 0 \\ 0 & L_1 & -M_4 & M_3 & 0 & 0 \\ \hline M_3 & -M_4 & L_1 & 0 & 0 & 0 \\ M_4 & M_3 & 0 & L_1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \bar{M}^{-1}(\theta) = \begin{bmatrix} L_1/M_{10} & 0 & -M_3/M_{10} & -M_4/M_{10} & 0 & 0 \\ 0 & L_1/M_{10} & M_4/M_{10} & -M_3/M_{10} & 0 & 0 \\ \hline -M_3/M_{10} & M_4/M_{10} & L_1/M_{10} & 0 & 0 & 0 \\ -M_4/M_{10} & -M_3/M_{10} & 0 & L_1/M_{10} & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

причому $M_{10} = L_1^2 - M_3^2 - M_4^2$; $M_3 = M(\theta) - \frac{M(\theta - \rho)}{2} - \frac{M(\theta + \rho)}{2}$; $M_4 = \frac{\sqrt{3}}{2} [M(\theta + \rho) - M(\theta - \rho)]$;

$L_1 = L_\sigma + \frac{3}{2}L$; L - власна індуктивність обмотки статора (ротора); $L_{\sigma s} = L_{\sigma r} = L_\sigma$ - індуктивності розсіяння статора та ротора (в припущенні про їх тотожність); $\rho = 2\pi/3$; $M(\theta)$ - взаємодуктивність між фазами статора та ротора в функції кута повороту ротора.

Враховуючи у виразі для визначення \bar{F}_{AD} зворотню матрицю індуктивностей $\bar{M}^{-1}(\theta)$, отримаємо:

$$\bar{F}_{AD} = \begin{bmatrix} b_1 & 0 & b_3 & b_4 & 0 & 0 \\ 0 & b_1 & -b_4 & b_3 & 0 & 0 \\ \hline b_5 & -b_6 & b_2 & 0 & 0 & 0 \\ b_6 & b_5 & 0 & b_2 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де

$$b_i = \begin{cases} -R_x \frac{L_1}{M_{10}}, & i = 1, 2; \\ R_x \frac{M_j}{M_{10}}, & i = 3 \div 6, \end{cases} \quad (4)$$

причому R_x та M_j визначаються з табл. 1.

Таблиця 1 – Значення величин R_x та M_j для виразу (4)

$i =$	1	2	3	4	5	6
$R_x =$	R_s	R_r	R_s	R_s	R_r	R_r
$M_j =$	-	-	M_3	M_4	M_3	M_4

Рівняння (2) може бути розв'язано одним з чисельних методів, в результаті чого отримуємо залежності проєкцій потокозчеплень двигуна в функції часу. Миттєві значення струмів фаз підключеної обмотки статора та ротора розраховуються з використанням співвідношення:

$$\bar{I}_{\alpha\beta} = \bar{M}^{-1}(\theta) \cdot \bar{\Psi}_{AD}, \quad (5)$$

де $\bar{I}_{\alpha\beta} = [i_{s\alpha} \ i_{s\beta} \ i_{r\alpha} \ i_{r\beta} \ \omega \ \theta]^T$ - вектор проєкцій струмів двигуна.

Для визначення таким чином значень струмів згідно методики [6, 11] визначається розподілення магнітної індукції у повітряному зазорі двигуна для кожного моменту часу. Розглянемо випадок розміщення в пазах статора двигуна ВАО 41-4 другої одношарової концентричної обмотки при $2p=6$, $m=3$, $z=36$, $q=2$, $a=1$, $W_{c2}=40$, яка відключена від джерела живлення. З урахуванням схеми відключеної обмотки статора розраховується ЕРС провідників кожного паза згідно залежності:

$$e_{паза}(t) = W \cdot B(t) \cdot L \cdot R \cdot \omega, \quad (6)$$

де W - кількість провідників в пазу; B - індукція поля, що відповідає положенню паза; L - активна довжина провідника; R - радіус обертання провідника; ω - кругова швидкість відносного обертання поля та провідника.

Визначені таким чином ЕРС пазових провідників підсумовуються з використанням схеми з'єднання обмотки, в результаті чого отримуємо ЕРС, що наводиться в кожній фазі відключеної обмотки. Для двигуна ВАО 41-4 (660 В), статор якого обладнано додатковою обмоткою, графік миттєвих значень ЕРС відключеної додаткової обмотки наведено на рис. 3.

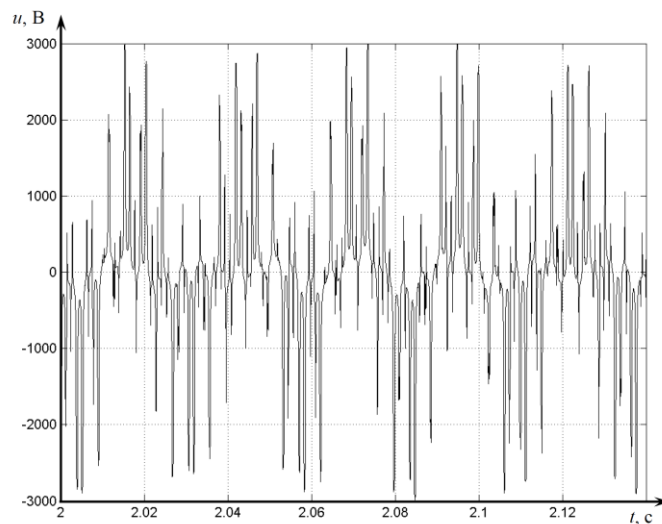


Рисунок 3 – ЕРС, що наводиться в обмотці фази А відключеної обмотки статора двошвидкісного двигуна

Для визначення струму витоку на землю через тіло людини, яка доторкнулася до фази А кабеля відключеної обмотки, скористаємося схемою заміщення тіла людини, яка враховує активні опори шкіри $R_s = 500$ Ом в місці торкання та тіла $R_b = 500$ Ом людини, взуття та землі $R_g = 50$ Ом, а також ємність шкіри людини $C_s = 0,22$ мкФ (рис. 4) [7, 8], причому передбачається, що струм через тіло людини протікає за колом «права рука - ноги».

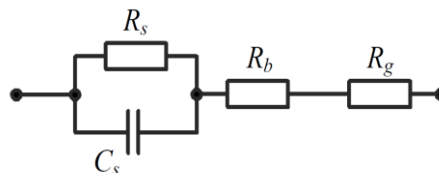


Рисунок 4 – Уточнена схема заміщення тіла людини

Миттєві значення струму витоку через тіло людини, розраховані при активному опорі ізоляції 100 кОм/фаза та ємності ізоляції відносно землі 0,2 мкФ/фаза кабеля відключеної обмотки, наведені на рис. 5.

Оскільки кабель відключеної обмотки двошвидкісного двигуна не має електричного з'єднання з дільничною електромережею, то виникнення витоку струму на землю у вказаному кабелі не буде виявлено загальномеревим апаратом захисту від витоків струму на землю і тривалість протікання струму через коло витоку буде обмежене лише тривалістю ввімкненого стану двигуна. Оцінка стану кола витоку струму на землю в таких умовах може бути проведена за характером накопичення кількості електрики $q(t)$, що проходить через тіло людини, з часом.

Кількість електрики, що пройшла через опір кола однофазного витоку струму на землю за інтервал часу $[t', t'']$, обчислюється згідно залежності:

$$q = \int_{t'}^{t''} I(t) dt \quad (7)$$

де $I(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} i^2(t) dt}$ - середнє квадратичне значення струму витоку за період T основної гармоніки.

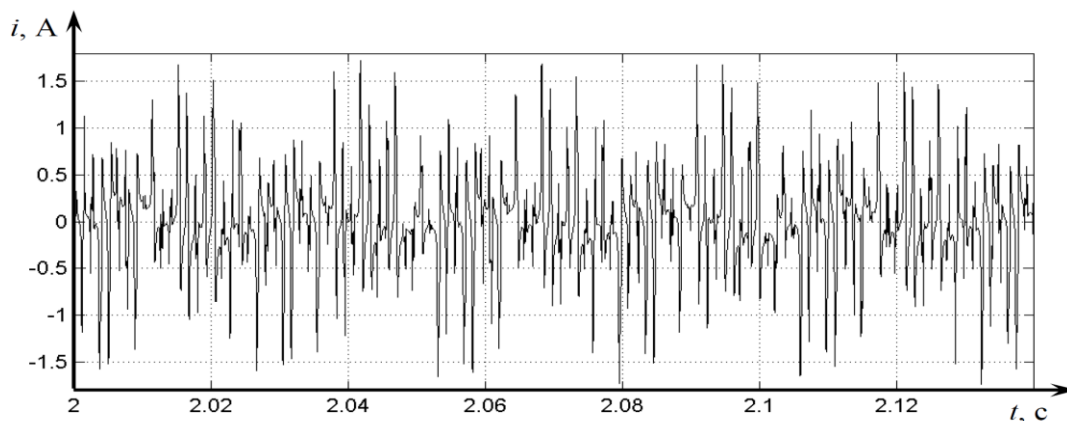


Рисунок 5 – Миттєві значення струму витoku через тіло людини, яка доторкнулася до жили кабеля відключеної обмотки двошвидкісного двигуна

Для кривої струму витoku (рис. 5) крива $q(t)$ накопичення кількості електрики через тіло людини наведена на рис. 6. За 114 мс від моменту торкання людиною фази мережі через її тіло проходить критична величина кількості електрики $Q_{max}=50 \text{ мА}\cdot\text{с}$. Подальше протікання струму витoku через тіло людини може призвести до її смерті. Це доводить небезпеку виникнення витoku струму на землю в кабелі відключеної обмотки двошвидкісного двигуна та обумовлює актуальність розробки додаткових технічних рішень із захисту від витokів струму на землю при експлуатації вказаних двигунів. Одним з можливих варіантів підвищення електробезпеки експлуатації двошвидкісних двигунів в умовах електромережі дільниці шахти є з'єднання нульових точок обмоток статора, що дозволить реле витoku, за допомогою оперативного струму, контролювати стан ізоляції кабеля відключеної обмотки двошвидкісного двигуна.

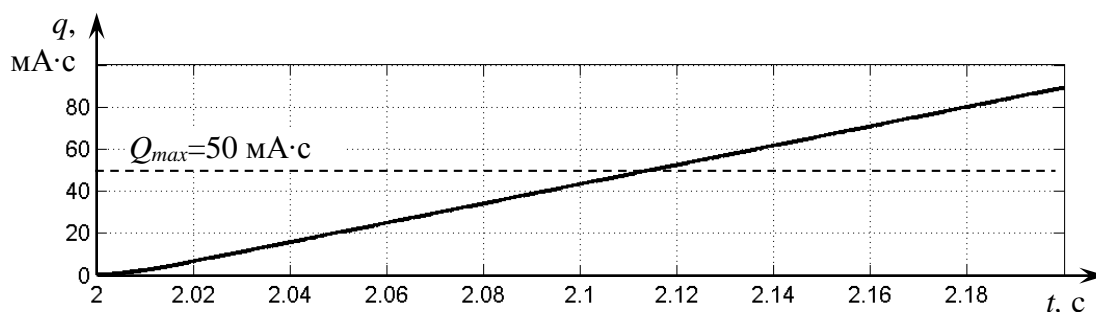


Рисунок 6 – Крива $q(t)$ накопичення з часом кількості електрики через опір тіла людини

Висновки та напрямок подальших досліджень. Запропонована методика оцінки ЕРС, що наводиться у відключеній обмотці двошвидкісного асинхронного електродвигуна, яка базується на визначенні індукції у повітряному зазорі машини. Встановлена небезпека виникнення витoku струму на землю в кабелі відключеної обмотки такого двигуна. В ході подальших досліджень доцільно проаналізувати можливість розширення захисної дії реле витoku на кабель відключеної обмотки шляхом з'єднання нульових точок обмоток статора двошвидкісного двигуна.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Електрифікація гірничих робіт: Підручник. - Вид. 2-е, допрац. та доп. / [Г.Г. Півняк, М.М. Белий, Л.П. Ворохов та ін.]; За ред. академіка НАН України Г.Г. Півняка. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2005. - 615 с.
2. Lipo Thomas A. Dual Stator Winding Induction Machine Drive / Thomas A. Lipo, Alfredo R. Muñoz // IEEE Transactions on Industry Applications. – Vol. 36, No. 5, september/october 2000. – P. 1369-1379.
3. Partent US 6242884, H02P 5/28 Dual Stator Winding Induction Machine Drive / [Thomas A. Lipo, Alfredo Rodolfo Muñoz-Garcia]; Wisconsin Alumni Research Foundation, Madison, WI (USA). – Appl. No.: 09/274164; Filed: Mar. 22, 1999; Pub. Date: Jun. 5, 2001.
4. Chandrasekaran V. Design and Development of Three Stator Winding Induction Motor / V. Chandrasekaran, T. Manigandan // International Journal of Electrical Engineering. – Vol. 4, No. 3 (2011). – P. 341-351.
5. Войтех А.А. Моделирование переходных процессов в полюсопереключаемых асинхронных двигателях / Войтех А.А., Попович А.Н. – Киев: Наук. думка, 1989. – 152с.
6. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: [учебник для вузов]: в 2х томах / А.В. Иванов-Смоленский. – [3-е изд., стереот.]. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. –

Т.1. – 2006. – 652 с.

7. IEC 60990:1999 Methods of measurement of touch current and protective conductor current

8. Товстик Ю.В. Моделирование сопротивления тела человека при определении токо-временных параметров устройств защитного отключения / Ю.В. Товстик // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Обчислювальна техніка та автоматизація», вип. 18 (169). - Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2010. – с.152-158.

9. Анализ параметров и процессов в шахтных электрических сетях / [Шкрабец Ф.П., Шидловская Н.А., Дзюбан В.С., Вареник Е.А.]. – Днепропетровск: Нац. горный ун-т, 2003. – 151 с.

10. Апараты защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В. Общие технические условия: ГОСТ 22929–78. С изменениями согласно ИУС 11–80, 7–81, 11–83. Соответствует СТ СЭВ 2309–80. – [Вступил в силу 01.01.1979]. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 13с. – (Межгосударственный стандарт).

11. Сивокобыленко В.Ф. Динамічна модель асинхронного двигуна з урахуванням зубчатості магнітопроводів / Сивокобыленко В.Ф., Василюк С.В. // Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація». – 2015. – Вип. №1(28)'2015. – С 6-15.

12. Лихачев В.Л. Справочник обмотчика асинхронных электродвигателей / Лихачев В.Л. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 240 с

REFERENCES

1. Pivnyak, G.G., Byelyj, M.M., Voroxov, L.P., Zayika, V.T., Zrazhevs'kyu, Yu.M., Razumnyy, Yu.T., Rybalko, A.Ya., Teslenko, V.I. and Shkrabets', F.P. (2005), *Elektryfikaciya girnychyx robit* [Electrification of mining], 2d ed., Nacionalnyj girnychyj universytet, Dnipropetrovsk, Ukraine.

2. Lipo, T.A. and Muñoz, A.R. (2000), “Dual Stator Winding Induction Machine Drive”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 36, No. 5, pp. 1369-1379.

3. Lipo, T.A. and Muñoz, A.R. (2001), *Dual Stator Winding Induction Machine Drive*, US Partent 6242884

4. Chandrasekaran, V. and Manigandan, T. (2011), “Design and Development of Three Stator Winding Induction Motor”, *International Journal of Electrical Engineering*, Vol. 4, No. 3, pp. 341-351.

5. Voyteh, A.A. and Popovich, A.N. (1989), *Modelirovanie perehodnyh processov v polyusopereklyuchaemyh asinhronnyh dvigatelyah* [Modelling of transients in pole-switch induction motors], Naukova dumka, Kiev, USSR.

6. Ivanov-Smolenskiy, A.V. (2006), *Elektricheskie mashiny* [Electrical machines], Izdatelsyi dom MEI, Moscow, Russia.

7. IEC 60990:1999 Methods of measurement of touch current and protective conductor current

8. Tovstik, Yu.V. (2010), “Modeling of human body’s resistance for determine parameters of current and time of devises for defense disconnection”, *Naukovi praci Doneczkogo nacionalnogo texnichnogo universytetu. Seriya «Obchyslyvalna texnika ta avtomatyzaciya»*, No. 18(169), pp. 152-158.

9. Shkrabets, F.P., Shydlovskaya, N.A., Dziuban, V.S. and Varenik Y.A. (2003), *Analiz parametrov i protsesov v shakhtnikh elektricheskikh setiakh* [Parameters and processes analysis in mine power network], National Mining University, Dnepropetrovsk, Ukraine.

10. Standards USSR 22929-78 (1987), *Aparaty zaschity ot tokov utechki rudnichnye dlya setey napryazheniem do 1200 V. Obschie tehniccheskie usloviya* [Leakage current mine-type protective devices for voltages up to 1200 V. General technical conditions].

11. Sivokobylenko, V.F. and Vasylets, S.V. (2015), “Dynamic model of the induction motor considering magnetic circuit serration”, *Naukovi praci Doneczkogo nacionalnogo texnichnogo universytetu, seriya: «Obchyslyvalna texnika ta avtomatyzaciya»*, No. 1(28), pp. 6-15.

12. Lihachev, V.L. (2004), *Spravochnik obmotchika asinhronnyh elektrodvigateley* [Hand-book of induction motors windings], SOLON-Press, Moscow, Russia.

Надійшла до редколегії 01.12.2015

Рецензент: Гребченко М.В.

В.Ф. СИВОКОБЫЛЕНКО, Я.А. ЛЯШОК

Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет»

Оценка электробезопасности эксплуатации двухскоростных двигателей в составе участковых электросетей шахт. Предложена методика оценки количества электричества, которое прошло через сопротивление цепи утечки на землю в кабеле отключенной обмотки двухскоростного асинхронного двигателя в составе участковой электросети, которая предусматривает определение зависимости взаимной индуктивности между подключенной обмоткой статора и ротором от угла поворота последнего, решение матричного дифференциального уравнения состояния двигателя, вычисление распределения магнитной индукции в воздушном зазоре двигателя, определение ЭДС, которая наводится в фазах отключенной обмотки, расчет мгновенных значений тока утечки и оценка электробезопасности эксплуатации двигателя.

Ключевые слова: *электросеть шахты, двухскоростной двигатель, обмотка, коммутационный аппарат, электробезопасность, утечка тока, электродвижущая сила, индукция, количество электричества, матрица, переходный процесс, дифференциальное уравнение, переменная состояния.*

V. SIVOKOBYLENKO, I. LIASHOK

State Institution of Higher Education «Donetsk National Technical University»

Evaluation of operational safety of two-speed electric motors in mine section power network. During the mine scraper and belt conveyors operating it is necessary, for technological reasons, to change the working speed. This is achieved by using two-speed induction motors in explosion-proof performance, on the stator of which two separate windings are located with different numbers of pole pairs. According to the safety regulations all mine power networks are equipped with apparatus for preventing the leakage current to ground. This device monitors the insulation resistance to earth by using direct operational current. Since the stator windings of two-speed electric motor have no mutual electrical connection, then the connection of one winding to the power network remains the other winding not protected against leakage current to ground. Heavy conditions of mining equipment operation causing high probability of damage to cables and, consequently, the occurrence of short circuits and leakage current to ground. Since the state of isolation of disconnected winding cable of two-speed motor is not controlled by apparatus for preventing the leakage current to the ground, the question of assessment of the state of said electrical connection and determine the need for additional measures to prevent electrical shock is relevant. Assessment of electrical safety of two-speed induction motor is proposed to implement by the amount of electricity that passes through the human body resistance in case of contact to cable phase of disconnected winding. The amount of electricity passing through the resistance of single-phase leakage current to earth during the emergency process, shall not exceed 50 mA·s, according to the requirements of security. Initial data to estimate the quantity of electricity are: passport data and winding characteristic of two-speed motor, the value of operating parameters of the motor, parameters of power network, in particular - the value of insulation capacities and resistances of the cable of disconnected winding, and the parameters of body equivalent circuit. The following sequence is proposed for determination of the total quantity of electricity: defining mutual inductance between the connected stator winding and rotor as a function of the angle of rotation of the rotor; numerical solution of differential matrix equation of state for the specified conditions, resulting in a determined instantaneous phase currents connected stator winding and rotor; calculating the distribution of magnetic induction in the motor air gap as a function of time based on information about instantaneous currents; calculating EMF of slot wires for winding disconnected; EMF in each phase of disconnected winding definition; calculating the instantaneous values of leakage current; estimate of quantity of electricity.

Key words: *mine power network, dual-speed motor, winding, switching unit, electrical safety, current leakage, electromotive force, induction, quantity of electricity, matrix, transient, differential equation, state variable*