

УДК 621.647.1

К.М. МАРЕНИЧ (канд. техн. наук, доц.)
Державний вищий навчальний заклад
«Донецький національний технічний університет»
gea@dgtu.donetsk.ua

ЗАХИСТ ВІД ЕЛЕКТРОУРАЖЕННЯ В ПРИЄДНАННІ ВІДКЛЮЧЕНОГО СТАТОРА ПРАЦЮЮЧОГО ДВОШВИДКІСНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Розкрито проблематика небезпеки електроураження в приєднанні відключеної обмотки статора працюючого двошвидкісного асинхронного двигуна, представлені і проаналізовані результати досліджень електричних параметрів в ланцюгах силового приєднання відключеної обмотки статора, обґрунтована структура засобу захисту від електроураження при виникненні кола витоку на землю в приєднанні відключеної обмотки статора двошвидкісного асинхронного двигуна.

Ключові слова: двошвидкісний асинхронний двигун, статор, відключена обмотка, кабельне приєднання, коло витоку струму на землю, електрорушійна сила, електроураження, захист.

Постановка проблеми. В гірничій промисловості широко застосовуються двошвидкісні асинхронні двигуни (АД) в складі електроприводу скребкових конвеєрів, що дозволяє отримати номінальний та зменшений фіксовані рівні кутової швидкості. Однак, наявність двох відокремлених обмоток на одному магнітопроводі створює трансформаторний ефект при включенні однієї з обмоток, що може призвести до виникнення такого небезпечного стану, як електроураження людини в разі торкання фази відключеної обмотки статора. Цей вид небезпеки має місце, незважаючи на наявність в шахтній дільничній електромережі засобів захисту від витоків струму на землю, оскільки дія цих засобів не розповсюджується на контроль стану відключеної обмотки статора двошвидкісного двигуна через відсутність електричного зв'язку між обмотками його статора (рис. 1). Отже, актуальним є визначення рівня небезпеки електроураження людини від трансформаторної ЕРС відключеної обмотки статора двошвидкісного АД.

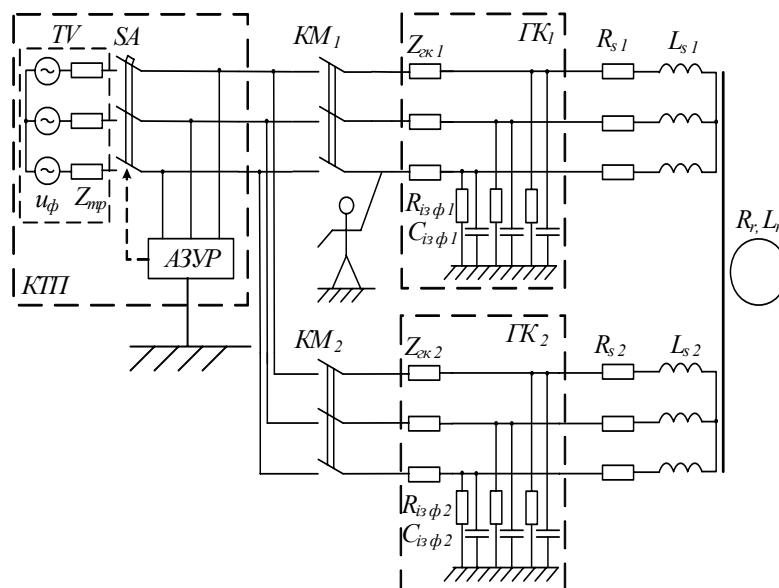


Рисунок 1 – Утворення витоку струму на землю в приєднанні статора двошвидкісного АД

Аналіз попередніх досліджень і публікацій. Властивості двошвидкісного асинхронного двигуна стосовно утворення впливу на елементи живлячої мережі висвітлені в науковій літературі окремими публікаціями, що вказують на принципову можливість електроураження людини в електромережі приєднання відключеної обмотки статора і потребують додаткового аналізу. Зокрема, експериментальними дослідженнями [1] отримані діаграми зміни ЕРС АД типу ЕКВФ-355L12/4 (рис. 2) у відключеній обмотці статора при електроживленні іншої. Так, при роботі двигуна з номінальною кутовою швидкістю в обмотці зниженої швидкості (ОЗШ) генерується трифазна ЕРС, яка представляється двома складовими: високочастотною з частотою $f_1 = 1650$ Гц та

амплітудою $U_{m1} \approx 100$ В, та несучою з частотою $f_2 = 143$ Гц та амплітудою $U_{m2} \approx 142$ В (рис. 2 а). При підключенні ОЗШ до живлячої мережі в обмотці номінальної швидкості (ОНШ) генерується ЕРС частотою $f = 650$ Гц (рис. 2 б) Визначені діючі значення індуктованих ЕРС у фазах відключених від мережі живлення обмоток статора є наступними: в обмотці зниженої швидкості $E_{ОЗШ} = 145$ В; в обмотці номінальної швидкості $E_{ОНШ} = 33$ В. З урахуванням цих даних встановлюються середні величини діючого струму в колі витoku на землю (з опором $R_{вит} = 1$ кОм), параметри кабельної мережі, провідність ізоляції якої створює умови підвищення струму витoku на землю до небезпечної величини (більш, ніж 25 мА).

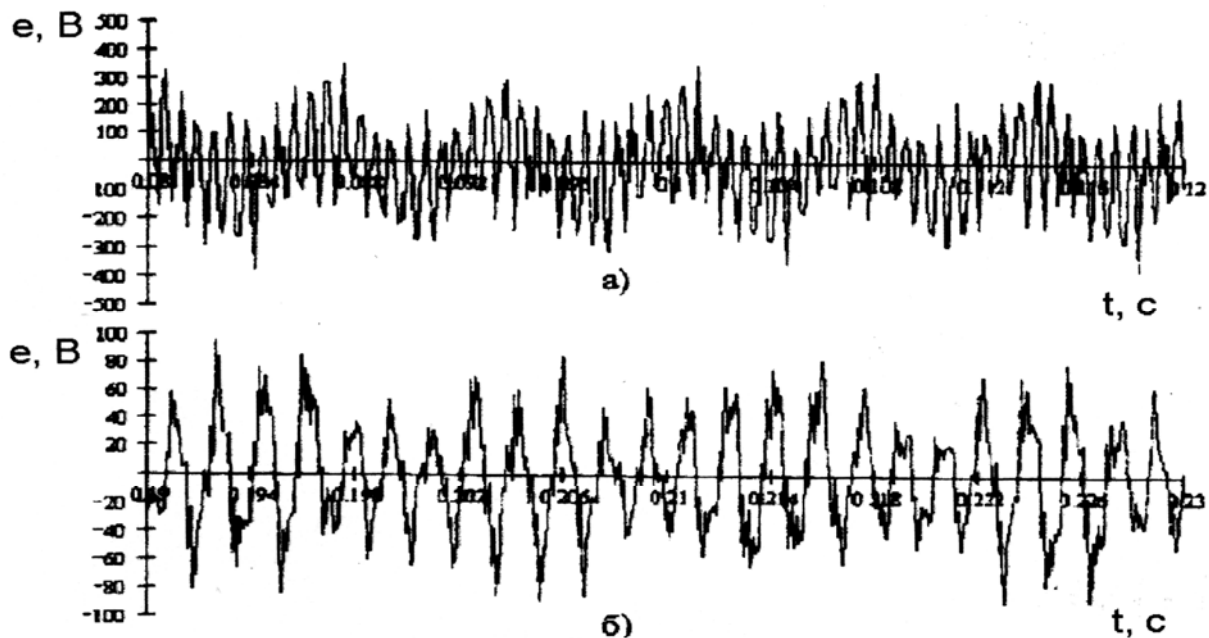


Рисунок 2 - Осцилограми вторинних ЕРС АД в обмотках зменшеної (а) та номінальної (б) швидкостей

Постановка задачі досліджень. Враховуючи на встановлену попередніми дослідженнями потенційну небезпеку двошвидкісного АД утворювати умови електроураження людини в мережі приєднання відключеної обмотки статора, актуальними є питання уточнення даних стосовно впливу працюючого двошвидкісного АД на параметри струму в колі витoku на землю і обґрунтування прийнятних захисних заходів від електроураження в приєднання відключеної обмотки статора.

Основний матеріал дослідження. Електричні параметри у приєднанні відключеної обмотки статора працюючого двошвидкісного АД можуть бути визначені дослідженням моделі, утвореної структурою силового кабельного приєднання з активними опорами ізоляції в межах значень, реальних для шахтного дільничного електротехнічного комплексу і ємнісними опорами ізоляції, відповідними до перерізу і довжини кабелю, опором витoku на землю ($R_{вит} = 1$ кОм) та трифазним джерелом електроживлення, в кожній фазі якого послідовно підключені джерела ЕРС високої ($f_в$) та несучої ($f_н$) частоти з параметрами, що визначені як результат аналізу осцилограм експерименту.

Стан кола однофазного витoku струму на землю досліджується за схемою заміщення, наведеною на рис. 3,а де позначено: $u_в$; $u_н$ – складові фазної напруги (високої та несучої частоти) в колі витoku (в разі представлення всієї системи у вигляді трифазного джерела, утвореного складовими напруги високої та несучої частоти – $U_{нА}$, $U_{вА}$; $U_{нВ}$, $U_{вВ}$; $U_{нС}$, $U_{вС}$); $R_в$ – опір кола витoku; $C_{із}$, $R_{із}$ – відповідно, сукупна ємність та активний опір ізоляції трьох фаз мережі ($C_{із \phi}$, $R_{із \phi}$ – відповідно, сукупна ємність та активний опір ізоляції фази кабелів, що мають електричний зв'язок із місцем виникнення витoku струму на землю); $i_в$ – струм витoku. Для наведеної еквівалентної схеми заміщення виконуються наступні співвідношення [1]:

$$C_{із} = 3C_{із \phi}; \quad R_{із} = R_{із \phi} / 3 \quad (1)$$

Зв'язок між фактичними та питомими параметрами ізоляції кабелів з урахуванням їх довжини має бути встановлений за наступними залежностями:

$$C_{із \phi} = \frac{l \cdot C_{із \phi \text{ ном}}}{1000} \quad (2)$$

$$R_{i3 \phi} = \frac{1000 \cdot R_{i3 \phi \text{ num}}}{l} \quad (3)$$

де $C_{i3 \phi \text{ num}}$ – питома ємність ізоляції кабелю даного типу, мкФ/км; $R_{i3 \phi \text{ num}}$ – питомий активний опір ізоляції кабелю даного типу, Ом/км; l – довжина кабелю, км.

Відповідно до наведеної еквівалентної схеми заміщення (рис. 3,б) згідно законів Кірхгофа запишемо рівняння, що описують процеси в системі:

$$\begin{cases} i_1 = \frac{1}{R_{i3} C_{i3}} \int i_2 dt \\ i_2 = \frac{1}{R_6} (u_\phi - R_{i3} i_1) - i_1 - i_3 \\ i_3 = \int i_n dt \\ i_n = \frac{1}{L_{op} C_{i3}} \int i_2 dt \\ i_6 = i_1 + i_2 + i_3 \end{cases} \quad (4)$$

де $u_\phi = u_{nm} \sin \omega_n t + u_{em} (\sin \omega_6 t + \varphi_6)$ – фазна напруга в колі витoku струму на землю; φ_6 – кут зсуву складової напруги високої частоти. u_{nm} ; u_{em} – амплітуди складових фазних напруг несучої та високої частоти.

Кількість електрики, що пройшла через опір кола однофазного витoku струму на землю з моменту виникнення аварійного стану t' і до моменту зникнення ЕРС обертання АД t'' , обчислюється згідно залежності:

$$q = \int_{t'}^{t''} I_6(t) dt \quad (5)$$

де $I_6(t)$ – ефективне значення струму витoku через опір тіла людини, що змінюється з перебігом існування аварійного стану мережі (торкання людиною струмоведучих елементів, що є під напругою).

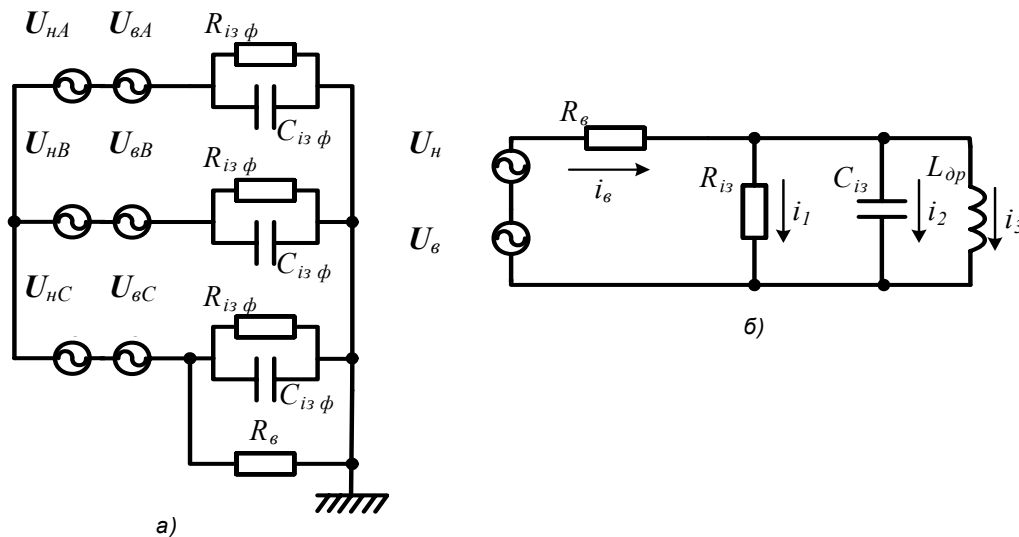


Рисунок 3 - Схема заміщення системи (а) та еквівалентна схема заміщення (б) кола однофазного витoku струму на землю в приєднанні відключеної обмотки статора працюючого двошвидкісного АД

На рис. 4 представлені величини струму в колі витoku на землю у відключеному приєднанні обмотки зменшеної швидкості за умови електроживлення обмотки номінальної швидкості АД типу ЕКВФ-355L12/4 у залежності від довжини та перерізу кабелю живлення, отримані шляхом моделювання.

Таким чином, встановлена властивість працюючого двошвидкісного асинхронного двигуна утворювати небезпеку електроураження в силовому приєднанні відключеної обмотки статора. Зокрема, небезпечно висока (понад 50 мА*с) кількість електрики в приєднанні відключеної обмотки зменшеної швидкості за умови застосування в її силовому приєднанні кабелю перерізом 70 мм² довжиною 300 м матиме місце при тривалості струму в колі витoku 0,52 с. Для кабелю перерізом 35 мм² ця тривалість – 0,62 с.

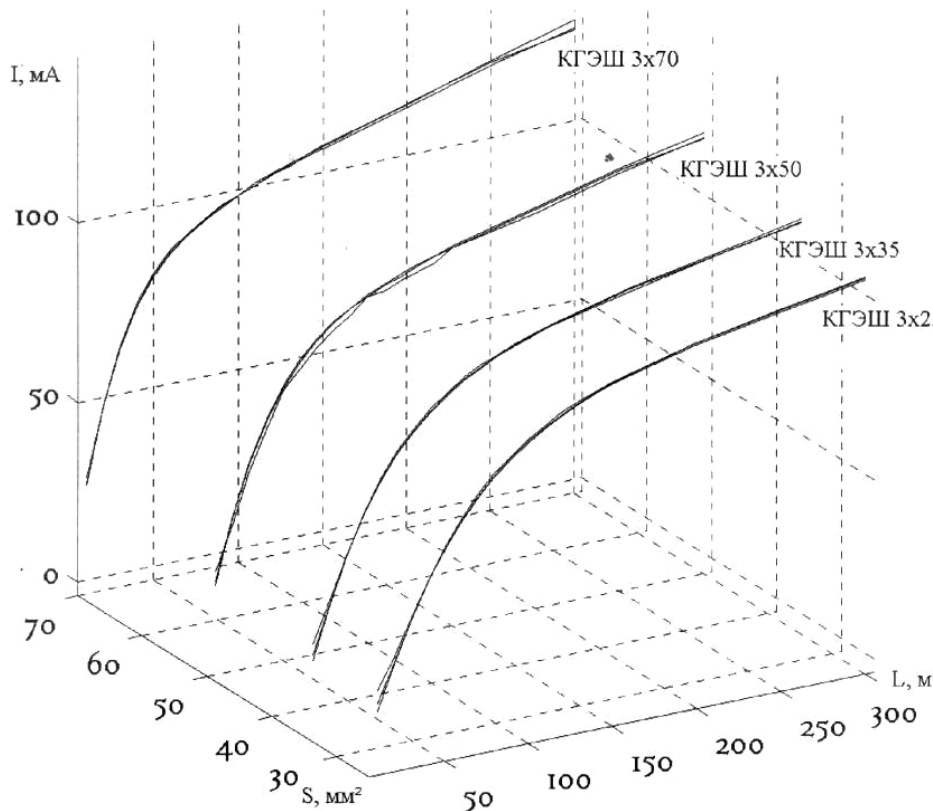


Рисунок 4 – Діаграми струму витоку на землю у приєднанні відключеної ОЗШ двошвидкісного АД типу ЕКВФ-355L12/4 при електроживленні обмотки номінальної швидкості, у залежності від довжини і перерізу кабеля, отримані моделюванням [1]

Принцип захисту від електроураження в силовому приєднанні відключеної обмотки статора двошвидкісного АД полягає в створенні шляху проходження оперативного струму дільничного апарата захисту від витоку струму на землю (АЗ) на ланцюги відключеної обмотки статора та у створенні ланцюга короточасної провідності в реагуючому органі в момент утворення кола витоку струму на землю в силовому приєднанні статорної обмотки (рис. 5). Так постійний оперативний струм АЗ надходить в приєднання відключеної обмотки статора (наприклад, «Статор1») через первинну обмотку трансформатора $TV2$. Тому в разі торкання людиною фазного провідника приєднання цієї обмотки (утворення кола струму витоку на землю $R_{\text{вум}}$) має відбутись спрацювання АЗ, що призведе до відключення автоматичного вимикача SA комплектної трансформаторної підстанції (КТП) дільниці

Поряд з цим, визначення моменту утворення кола витоку струму на землю у відключеній обмотці статора виконується шляхом створення ланцюга короточасної провідності через частину первинної обмотки трансформатора $TV2$, конденсатор $C1$, діод $VD1$, контур заземлення, коло $R_{\text{вум}}$ витоку струму на землю і відповідну фазу відключеної від мережі статорної обмотки. В цьому разі на виході вторинної обмотки трансформатора $TV2$ створюватиметься імпульсний сигнал, який призводитиме до спрацювання реагуючого органу (РО), задіяного як елемент управління комутаційним засобом захисного відокремлення від кола $R_{\text{вум}}$ витоку струму на землю енергетичного потоку відключеної від мережі обмотки АД.

Визначення стану витоку струму на землю у відключеній обмотці статора матиме місце і в разі, якщо цей стан відбувся, коли двигун знаходився в режимі вільного вибігу після відключення від джерела електроживлення. В цьому разі джерелом імпульсу в колі короточасної провідності, утвореної підключенням конденсатора $C1$ та діода $VD1$ між виводом «А» обмотки трансформатора $TV2$ та затиском заземлення виступатиме трифазна зворотна ЕРС, що наводиться в обмотках статора АД обертаючимся полем його ротора на інтервалі вільного вибігу.

Схема приєднання конденсатора $C1$ послідовно у коло визначення інформаційного параметру і підключення діода $VD1$ катодом до затиску заземлення виключає вплив захисного засобу на роботу дільничного апарата захисту (АЗ) від витоку струму на землю.

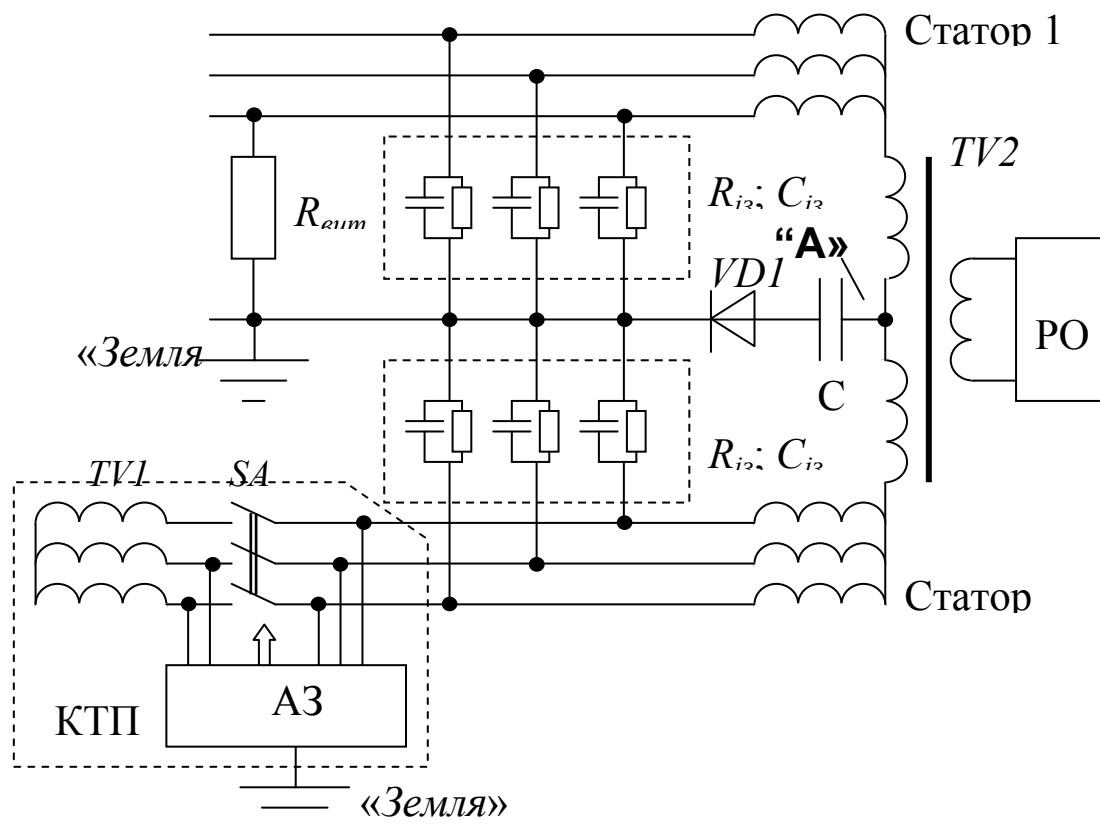


Рисунок 5 - Схема пристрою визначення витоку струму на землю в приєднанні відключеної обмотки статора двошвидкісного асинхронного двигуна

Висновки. 1. Дослідженнями доведена властивість працюючого двошвидкісного асинхронного двигуна утворювати небезпеку електроураження в силовому приєднанні відключеної обмотки статора, що обумовлено генерацією в цій обмотці системи трифазних ЕРС, амплітудні і частотні параметри яких достатні для створення небезпечних за фактором електроураження струмів в колі витоку на землю.

2. Запропонований засіб визначення стану витоку струму на землю поширює функції захисту від витоку струму на землю на силові приєднання відключеної від мережі живлення обмотки статора двошвидкісного асинхронного двигуна як під час електроживлення іншої статорної обмотки, так і після відключення асинхронного двигуна від джерела електроживлення на інтервалі перебування в стані вільного вибігу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. 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.

REFERENCES

1. Marenych K.M., Kovaljova I.V. Naukovi osnovy vprovadzennja avtomatycznogo zahysnogo dvobichnogo znestrumlennja schahтноj dalnychnоj electromerezhi [Scientific bases of application of an automatic protective two-end power supply disconnection of a mine local electric network]. Donetsk: DVNZ "DonNTU", 2012. 125 p.

Надійшла до редакції 12.03.2013

Рецензент: Є.Б. Ковальов

К.Н. МАРЕНИЧ

Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет»

Защита от электропоражения в присоединении отключенного статора работающего двухскоростного асинхронного двигателя. Раскрыта проблематика опасности электропоражения в присоединении отключенной обмотки статора работающего двухскоростного асинхронного двигателя, представлены и проанализированы результаты исследований электрических параметров в цепях силового присоединения отключенной обмотки статора, обоснована структура устройства защиты от электропоражения при возникновении цепи утечки на землю в присоединении отключенной обмотки статора двухскоростного асинхронного двигателя.

Ключевые слова: двухскоростной асинхронный двигатель, статор, отключенная обмотка, кабельное присоединение, цепь утечки тока на землю, электродвижущая сила, электропоражение, защита.

K. MARENICH

State Institution of Higher Education "Donetsk National Technical University"

Protection Against Electroshock in Accession of the Disconnected Stator of the Working 2-Speed Induction Motor. Use of the 2-speed induction engine allows to expand considerably functions of the electric drive of the mine scraper conveyor. The design of the 2-speed induction electric motor provides existence of two windings of a stator on one magnetic conductor. Therefore the electromotive force of the working engine is generated on the winding of a stator disconnected from a network. The voltage and frequency of this electromotive force define high level of current in a leak chain on the earth in accession of the disconnected winding of a stator. This level constitutes danger of an electroshock. Its parameters are established as a result of researches. Existing devices of protection against an electroshock in a mine electric network do not allow eliciting the fact of a touch of the person to power accession of the disconnected winding of a stator of the 2-speed working induction engine. Therefore improvement of this type of protection is actual. As the result of researches it is offered to connect both windings of a stator among themselves by means of primary winding of the transformer and to attach an average conclusion of this winding to a contour "earth" via the capacitor and the diode. Such scheme will give the chance to transfer operating current of the device of protection to the disconnected winding of a stator and to reveal the moment of emergence of leakage of current on the earth in accession of this winding as a result of creations of short-term unilateral conductivity between a stator and a contour "earth".

Key words: 2-speed induction engine, stator, disconnected winding, cable accession, chain of leakage of current on the earth, electromotive force, electroshock, protection.