

УДК 622.012.2:621.311.1

С.В. Василюк (канд. техн. наук)
Донецький національний технічний університет

УТОЧНЕННЯ ОЦІНКИ СТАНУ КОЛА ВИТОКУ СТРУМУ НА ЗЕМЛЮ В ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ ШАХТИ

Стан кола витоків струму на землю в електромережі дільниці шахти оцінено за загальною кількістю електрики, яка пройшла через опір тіла людини за час аварійного процесу, причому запропоновані аналітичні залежності враховують зміну частоти ЕРС вибігу асинхронних двигунів споживачів, що дозволило підвищити точність розрахунків

Ключові слова: шахта, дільниця, електромережа, виток струму на землю, кількість електрики, асинхронний двигун, захист

Актуальність проблеми та її зв'язок з прикладними задачами. Згідно статистичних даних, протягом 2001-2007 років електрострумом на шахтах України було смертельно травмовано 46 чоловік. Електрообладнання стало причиною 8 з 14 вибухів газу та вугільного пилу та 16 спалахів метано-повітряної суміші [1]. З метою захисту від електроураження електрична мережа дільниці шахти обладнується апаратом захисту від витоків струму на землю (наприклад, типу АЗУР), який здійснює захисне відключення напруги живлення мережі в разі торкання людиною елемента мережі, що знаходиться під напругою. Після захисного відключення мережі струм в колі витоків деякий час підтримується затухаючою ЕРС вибігу асинхронних двигунів споживачів. Характер впливу вказаної ЕРС на результат електроураження залежить від напруги живлення мережі та потужності електродвигунів [2]. Підвищенням рівня номінальної напруги дільничних електромереж до 3 (3,3) кВ [3], збільшення одиничної потужності електродвигунів вимагають створення наукової бази для розробки апаратів захисту від витоків струму на землю для мереж вказаного класу напруги [4], що обумовлює актуальність удосконалення оцінки стану кола витоків струму на землю в дільничній мережі шахти.

Аналіз досліджень та публікацій. Попередніми дослідженнями [2, 5] встановлено, що при торканні людиною фази дільничної електромережі, струм через її тіло має наступні складові: 1) перехідна складова, що виникає при торканні людиною струмопровідного еле-

мента; 2) усталена складова, що підтримується ЕРС вторинної обмотки дільничної трансформаторної підстанції; 3) перехідна складова, що підтримується ЕРС групового вибігу двигунів від моменту захисного відключення мережі до моменту відключення контакторів пускачів; 4) перехідна складова, що підтримується ЕРС вибігу двигуна того відгалуження мережі, в якому стався виток струму на землю. Небезпеку, яку становить затухаючий струм витoku після захисного відключення мережі, пропонується оцінювати по дії струму витoku, що має місце до відключення мережі за еквівалентний час $0,3с$ [6]. Також відомо залежності, що описують кількість електрики, яка протікає через тіло людини від моменту відключення мережі до моменту відключення контакторів магнітних пускачів [5]:

$$Q_3 = t_3 \sqrt{\frac{1}{t_3} \int_0^{t_3} I_{um}^2 e^{-2t/T_2} dt} \approx 0,76 I_u t_3, \quad (1)$$

та кількість електрики, що проходить через тіло людини після відключення магнітних пускачів:

$$Q_4 = (T_o - t_3) \sqrt{\frac{1}{T_o - t_3} \int_{0,7T_o}^{\infty} (\sqrt{2} I'_u)^2 e^{-2t/T_o} dt} \approx 0,19 I_u T_o, \quad (2)$$

де I_u, I'_u - діючі значення струмів ураження відповідно до та після відключення пускачів; t_3 - час, за який ЕРС двигунів знижується до $0,5U_n$; T_2, T_o - сталі часу затухання ЕРС обертання групи двигунів та двигуна аварійного відгалуження.

До недоліків наведених, а також інших відомих залежностей [2], відноситься неврахування зміни частоти ЕРС вибігу асинхронних двигунів із часом через зменшення частоти обертання роторів останніх, що знижує точність оцінок загальної кількості електрики через опір тіла людини за час аварійного процесу.

Постановка задачі. Уточнення оцінки стану кола витoku струму на землю через опір тіла людини в електромережі дільниці вугільної шахти шляхом врахування зміни частоти ЕРС вибігу асинхронних двигунів споживачів.

Основний матеріал та результати досліджень. Схема заміщення кола витoku струму на землю через тіло людини в електромережі дільниці шахти, яка враховує активні опори шкіри R_s в місці торкання та тіла R_b людини, взуття та землі R_g , ізоляції мережі R_{ins} , а також ємності шкіри людини C_s та ізоляції мережі C_{ins} (рис. 1) [7, 8],

складена за наступних припущень: 1) трифазна дільнична електромережа є симетричною; 2) людина доторкнулася до однієї з фаз мережі; 3) струм через тіло людини протікає за колом «права рука - ноги»; 4) активні опори та ємності ізоляції фаз мережі є зосередженими та симетричними. За законами Кірхгофа для схеми заміщення (рис. 1) складені диференціальні рівняння:

$$\begin{cases} du_s / dt = (i_3 - u_s / R_s) / C_s; \\ du_{ins} / dt = (i_3 - u_{ins} / R_{ins}) / C_{ins}, \end{cases} \quad (3)$$

причому струм витоку i_3 через тіло людини дорівнює:

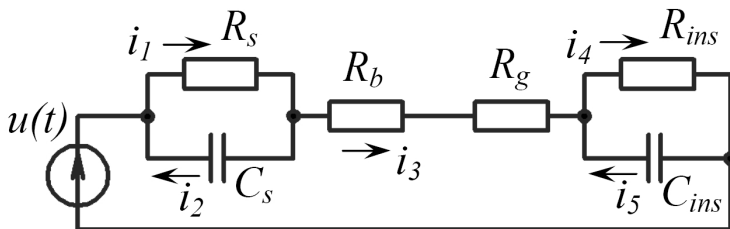
$$i_3 = [u(t) - u_s - u_{ins}] / (R_b + R_g), \quad (4)$$

де u_s , u_{ins} - напруги на ємностях C_s та C_{ins} відповідно; $u(t)$ - фазна напруга мережі, що прикладається до кола витоку струму на землю.

Напруга $u(t)$ підпорядковується синусоїдальному закону, причому амплітуда та частота є функціями часу:

$$u(t) = U_m(t) \cdot \sin[\omega(t) \cdot t + \alpha]. \quad (5)$$

Залежність амплітуди $U_m(t)$ та частоти $\omega(t)$ напруги $u(t)$ від часу пояснюється зменшенням амплітуди (за експоненціальним законом) та частоти (за лінійним законом при моментах навантаження



двигунів типу «різання»), відповідно, ЕРС вибігу двигунів дільниці, яка підтримує напругу в мережі після захисного відключення трансформаторної підстанції. Вказані залежності можуть бути описані наступним чином:

$$U_m(t) = \begin{cases} U_{ms}, & t_{st} \leq t < t_{QF}; \\ U_{ms} \cdot e^{-(t-t_{QF})/T_{c1}}, & t_{QF} \leq t < t_{sw}; \\ U_{ms} \cdot e^{-(t_{sw}-t_{QF})/T_{c1}} \cdot e^{-(t-t_{sw})/T_{c2}}, & t_{sw} \leq t < t_{end}; \end{cases} \quad (6)$$

$$\omega(t) = \begin{cases} \omega_s, & t_{st} \leq t < t_{QF}; \\ \omega_s - k_1(t - t_{QF}), & t_{QF} \leq t < t_{sw}; \\ \omega_s - k_1(t_{sw} - t_{QF}) - k_2(t - t_{sw}), & t_{sw} \leq t < t_{end}, \end{cases} \quad (7)$$

де U_{ms} - амплітуда фазної вихідної напруги дільничної трансформаторної підстанції; $t_{st}=0$, t_{end} - відповідно моменти торкання людиною фази електромережі та зниження ЕРС вибігу двигуна відгалуження з виток до безпечного рівня; t_{QF} , t_{sw} - моменти захисного відключення автоматичного вимикача та відключення контакторів магнітних пускачів; T_{c1} , T_{c2} - сталі часу затухання ЕРС вибігу групи двигунів та двигуна відгалуження з виток відповідно; ω_s - колова частота напруги мережі живлення; k_1 , k_2 - коефіцієнти, що характеризують зниження частоти ЕРС вибігу групи двигунів та двигуна відгалуження з виток відповідно.

Для розв'язання системи диференціальних рівнянь (3) з урахуванням залежностей (4)-(7) чисельним способом пропонується комп'ютерна модель, структурна схема якої подана на рис. 2. Підсистеми 1 та 2 моделі реалізують залежності (6) і (7) відповідно та для кожного моменту часу обраховують амплітуду і частоту напруги $u(t)$, їх виходи підключені до відповідних входів підсистеми 3 обрахування згідно (5) миттєвих значень напруги, яка прикладається до кола виток струму на землю. Значення $u(t)$ подаються до підсистеми 4, яка, згідно (4), обраховує миттєві значення струму виток i_3 через опір тіла людини та зв'язана з підсистемами 5 та 6 розв'язання, відповідно, першого та другого диференціальних рівнянь системи (3).

Загальна кількість електрики Q , що проходить через тіло людини за час аварійного процесу, визначається залежністю:

$$Q = \int_{t_{st}}^{t_{end}} I(t) dt, \quad (8)$$

де t_{st} - момент торкання людиною фази електромережі ($t_{st}=0$); t_{end} - момент закінчення перехідного процесу вибігу двигунів (теоретично $t_{end} = \infty$, на практиці t_{end} можна вважати моментом зниження напруги на колі виток до безпечної величини); $I(t)$ - діюче значення струму виток як функція часу.

Якщо розбити криву миттєвих значень струму виток на m періодів, то загальна кількість електрики може бути виражена наступним чином (рис. 3):

$$Q = \sum_{j=1}^m Q_j = \sum_{j=1}^m I_j \cdot T_j, \quad (9)$$

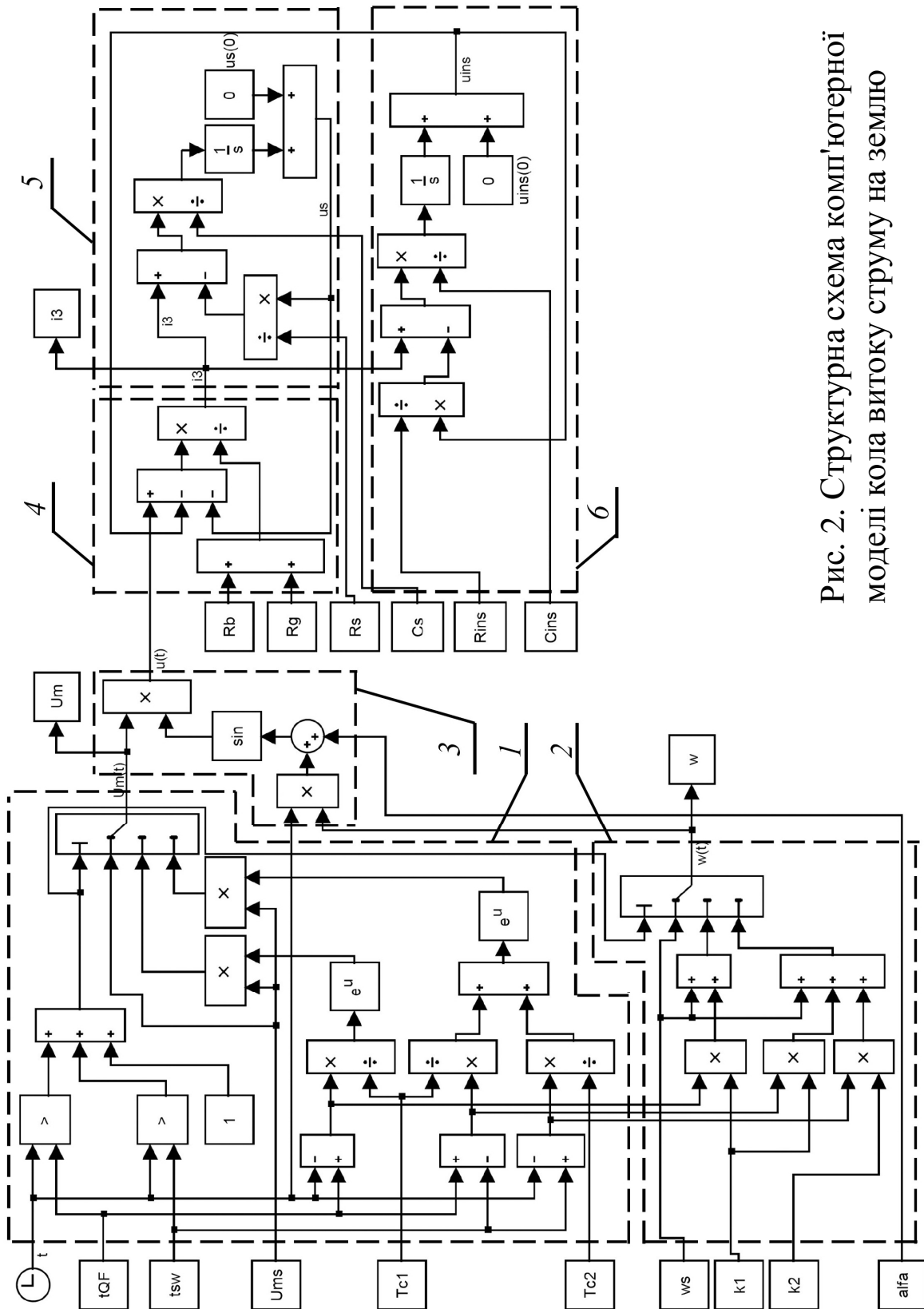


Рис. 2. Структурна схема комп'ютерної моделі кола витoku струму на землю

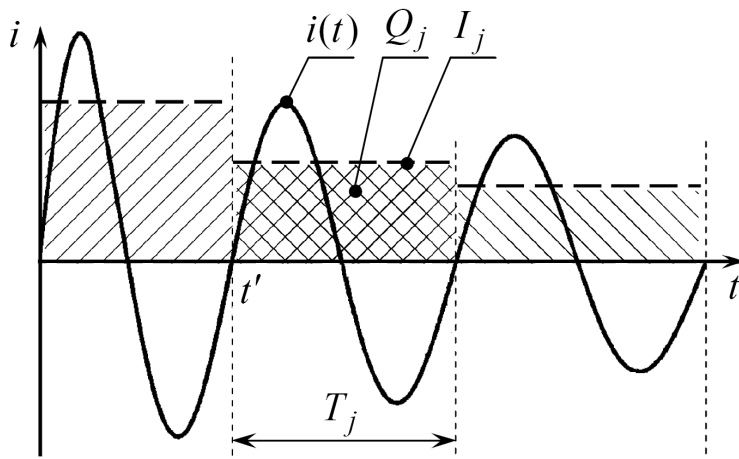


Рис. 3. Стилзований графік струму витоку через опір тіла людини після захисного відключення мережі

початковий момент періоду T_j .

Припустимо, що миттєві значення струму витоку задані $k = \overline{1, N}$ відліками i_k , тоді:

$$I_j = \sqrt{\frac{1}{T_j} \sum_{k=N'_j}^{N''_j} (i_k^2 \cdot \Delta t)} = \sqrt{\frac{\Delta t}{T_j} \sum_{k=N'_j}^{N''_j} i_k^2}, \quad (11)$$

де N'_j , N''_j - відповідно початкові та кінцеві номери відліків струму витоку, що відповідають j -му періоду, які можна відшукати за переходом кривої струму з від'ємної у додатну напівплощину, тобто при виконанні умов $\text{sign}(i_k) = -1$ та $\text{sign}(i_{k+1}) = 1$.

Враховуючи останній вираз у залежності (9), маємо:

$$Q = \sum_{j=1}^m \left[T_j \sqrt{\frac{\Delta t}{T_j} \sum_{k=N'_j}^{N''_j} i_k^2} \right] = \sum_{j=1}^m \sqrt{T_j \Delta t \sum_{k=N'_j}^{N''_j} i_k^2}. \quad (12)$$

Оскільки тривалість j -го періода становить:

$$T_j = \Delta t \cdot (N''_j - N'_j), \quad (13)$$

то загальна кількість електрики, що проходить через тіло людини за час аварійного процесу, визначається залежністю:

$$Q = \Delta t \sum_{j=1}^m \sqrt{(N''_j - N'_j) \sum_{k=N'_j}^{N''_j} i_k^2}. \quad (14)$$

де $Q_j = I_j \cdot T_j$ - кількість електрики, що пройшла через опір тіла людини за j -й період T_j ; I_j - діюче значення струму витоку за період T_j , яке визначається залежністю:

$$I_j = \sqrt{\frac{1}{T_j} \int_{t'}^{t'+T_j} i^2(t) dt}, \quad (10)$$

причому $i(t)$ - миттєві значення струму витоку протягом періоду; t' - по-

Користуючись останнім виразом, можна обраховувати накопичення кількості електрики $q(r)$, що проходить через опір тіла людини за r періодів, для чого сума в (14) має обраховуватися від $j=1$ до r .

З використанням розробленої моделі (рис. 2) розраховано миттєві значення струму витoku на землю (рис. 4) за наступних умов: $t_{st}=0$ с; $t_{QF}=0,07$ с; $t_{sw}=0,5$ с; $t_{end}=0,83$ с; $T_{c1}=0,9$ с; $T_{c2}=0,3$ с; $U_{ms}=660\sqrt{2}$ В; $R_b=500$ Ом; $R_g=50$ Ом; $R_s=500$ Ом; $C_s=0,22$ мкФ; $R_{ins}=100$ кОм; $C_{ins}=3$ мкФ; $\alpha=0$ рад; $\omega_s=314$ рад/с; $k_1=120$ рад/с²; $k_2=180$ рад/с². Отримані миттєві значення струму витoku через опір тіла людини розбиті на $N=831$ відліки з кроком $\Delta t=1$ мс, складаються з $m=27$ періодів, що дозволило за залежністю (14) обрахувати загальну кількість електрики через опір тіла людини, яка становить $Q=195,3$ мА·с. Також обраховано накопичення кількості електрики $q(r)$ при $r=1, m$ (рис. 4).

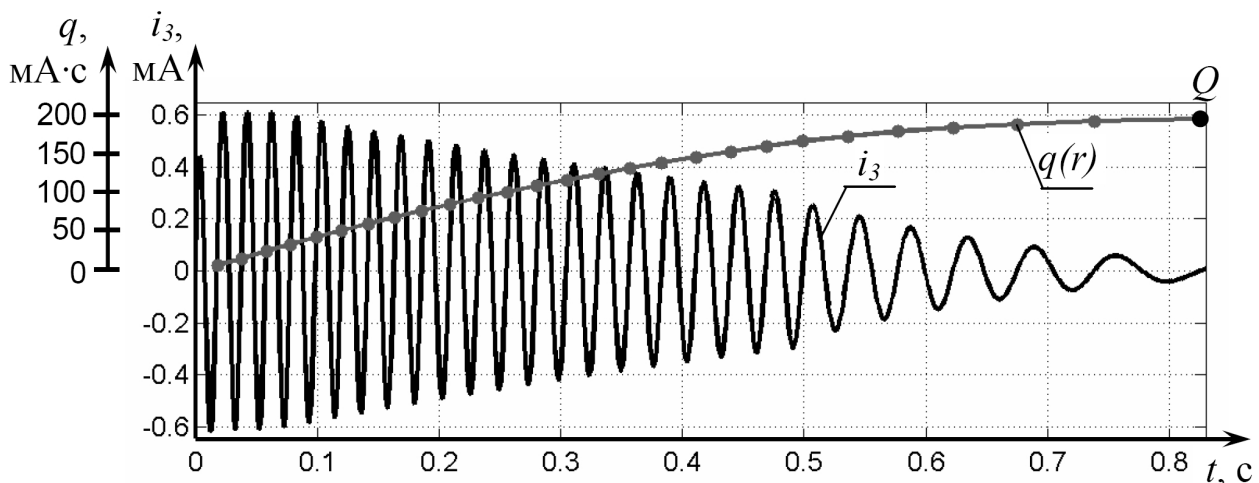


Рис. 4. Графіки струму витoku i_3 та накопичення кількості електрики $q(r)$ через опір тіла людини

Висновки і напрямок подальших досліджень. Актуальність удосконалення оцінки стану кола витoku струму на землю в дільничній електромережі шахти обумовлена необхідністю розробки апаратів захисту від витоків струму на землю для мереж підвищеного рівня напруги живлення. Стан кола витoku струму на землю в електромережі дільниці шахти оцінено за загальною кількістю електрики, яка пройшла через опір тіла людини за час аварійного процесу, причому запропоновані аналітичні залежності враховують зміну частоти ЕРС вибігу асинхронних двигунів споживачів, що дозволило підвищити точність розрахунків. В ході подальших досліджень доцільно врахувати випадкові фактори, що впливають на стан кола витoku струму на

землю, та оцінити імовірність смертельного електроураження людини.

Список літератури

1. Анализ причин травматизма на шахтах Украины / [Кашуба О.И., Левкин Н.Б., Спиридонов Е.А., Ковчужный М.С.] // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво». – 2008 – №17. – С. 172-177.
2. Анализ параметров и процессов в шахтных электрических сетях / [Шкрабец Ф.П., Шидловская Н.А., Дзюбан В.С., Вареник Е.А.]. – Днепропетровск: НГУ, 2003. – 151 с.
3. 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.тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «АИР», 2009. – С. 209-213.
4. 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.тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «АИР», 2010. – С. 45-49.
5. Ягудаев Б.М. Защита от электропоражения в горной промышленности / Б. М. Ягудаев, Н.Ф. Шишкин, В.В. Назаров. – М.: Недра, 1982. – 152 с.
6. Колосюк В.П. Защитное отключение рудничных электроустановок / В. П. Колосюк. – М.: Недра, 1980. – 334 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 токовременных параметров устройств защитного отключения / Ю.В. Товстик // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Обчислювальна техніка та автоматизація». – 2010. – Вип. 18 (169). – С. 152-158.

Стаття надійшла до редакції 21.10.2012

S.V. Vasylets. Donetsk National Technical University

Уточнение оценки состояния цепи утечки тока на землю в электросети шахты

Состояние цепи утечки тока на землю в электросети участка шахты оценено по общему количеству электричества, которое прошло через сопротивление тела человека за время аварийного процесса, причем предложенные аналитические зависимости учитывают изменение частоты ЭДС выбега асинхронных двигателей потребителей, что позволило повысить точность расчетов.

Ключевые слова: шахта, участок, электросеть, утечка тока на землю, количество электричества, асинхронный двигатель, защита

S. Vasylets. Donetsk National Technical University

Specifying the Estimation of Leakage Current Circuit State in Mine Power Network.

The state of leakage current circuit in mine power network was estimated by total amount of electricity, that passes through a human body resistance in case of emergency. Moreover, we suggest analytical dependences, which take into account frequency variation of induction motors EM, thus helping to achieve a higher calculation accuracy.

Keywords: mine, section, power network, leakage current, amount of electricity, induction motor, protection.