

УДК 622.647.1: 621.316.1

Ю.В. Товстик (канд. техн. наук, ст. науч. сотр., доц.)

ГП «Донецкий экспертно-технический центр
«Госгорпромнадзора»

К.Н. Маренич (канд. техн. наук, проф.)

ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»

УТОЧНЕНИЕ МЕТОДОЛОГИИ ОЦЕНКИ ОПАСНОСТИ ПОРАЖЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ В ШАХТНОЙ УЧАСТКОВОЙ ЭЛЕКТРОСЕТИ С УЧЕТОМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭДС ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ

Уточнена методика оценки электропоражающих факторов в шахтной участковой электросети, обоснованы и экспериментально подтверждены электропоражающие параметры обратных ЭДС асинхронных двигателей.

Ключевые слова: шахта, электрическая сеть, электропоражение, защита, ЭДС, асинхронный двигатель, методика.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Электробезопасность эксплуатации низковольтной шахтной электрической сети обусловлена применением организационных и технических мероприятий, наиболее эффективными из которых является защитное отключение, реализуемое с помощью аппаратов защиты от утечек тока на землю [1]. Однако, потенциальная опасность поражения человека электрическим током этим не устраняется, поскольку сохраняется активное состояние источника электродвижущей силы - генерация ЭДС вращения ранее включенных асинхронных двигателей (АД) электрического привода машин и механизмов участка (рис. 1).

Анализ диаграммы позволяет сделать вывод о целесообразности исследований и разработок в области принудительного подавления обратных энергетических потоков АД в процессе защитного отключения рудничных электроустановок.

Анализ исследований и публикаций. Проблематика обоснования параметров и структуры технических средств подавления обратных энергетических потоков АД освещена в монографиях [1, 2]. В развитие этой проблематики актуальным представляется уточнение методики оценки опасности поражения человека электрическим током в шахтной участковой электросети с учетом воздействия ЭДС вращения АД.

© Товстик Ю.В., Маренич К.Н., 2013

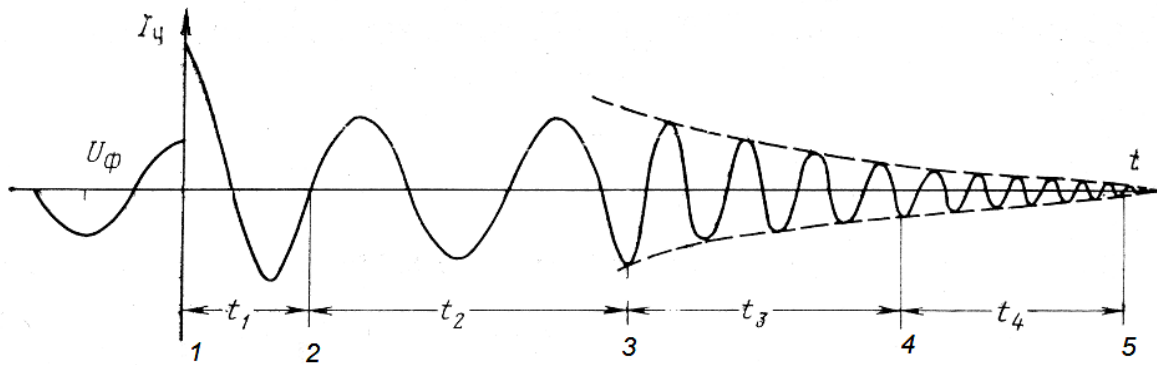


Рис. 1. Диаграмма тока, протекающего через человека при его прикосновении к фазе сети с учетом ЭДС АД:

t_1 – продолжительность воздействия свободной составляющей тока на величину тока в цепи утечки; t_1+t_2 – продолжительность тока в цепи утечки до момента отключения АВ участка; t_3 – интервал формирования тока обратной ЭДС вращения АД

Основной материал и результаты исследования. Расчетная схема замещения участкового электротехнического комплекса (рис. 2) представлена структурными составляющими, существенно влияющими на величины электрических параметров в цепи утечки тока на землю. К ним относятся: АЗО – аппарат защитного отключения; Т – вторичная обмотка трансформатора комплектной трансформаторной подстанции (КТП) участка; ИНТ – искусственная нулевая точка; $r'_A, r'_B, r'_C, C'_A, C'_B, C'_C, r''_A, r''_B, r''_C, C''_A, C''_B, C''_C$ – активные сопротивления изоляции и емкости фаз относительно земли участков кабельных линий от трансформаторной подстанции Т до магнитного пускателя МП (I'_K) и от магнитного пускателя до асинхронного электродвигателя АД (I''_K); $r'''_A, r'''_B, r'''_C, C'''_A, C'''_B, C'''_C$ – активные сопротивления изоляции и емкости фаз относительно земли обмоток статора АД.

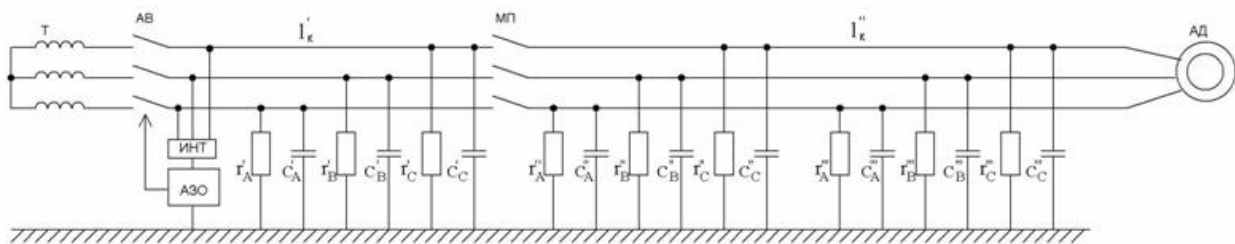


Рис. 2. Расчетная схема замещения защищаемого участкового электротехнического комплекса

С целью упрощения принято, что участки кабельных линий до МП и после него, до АД равны, т.е. $r'_A = r''_A$, $r'_B = r''_B$, $r'_C = r''_C$, $C'_A = C''_A$, $C'_B = C''_B$, $C'_C = C''_C$, а активные и емкостные сопротивления изоляции фаз относительно земли симметричны.

Начальная величина ЭДС вращения составляет $0,85 < K_l < 0,95$ от величины напряжения сети. Она снижается с постоянной времени $T_э = U_1 K_\mu / (I_0 R_{э1\omega})$, обусловленной параметрами двигателя [4]:

$$e_v = K_1 U_{1me} - t / T_э \cos((1-s)\omega t + \psi); \quad (1)$$

где I_0 – ток холостого хода АД; $R_{э1}$ – эквивалентное активное сопротивление основного контура АД с учетом параллельно включенных сопротивлений контура, образованных пусковой и рабочей клетками АД; K_μ – коэффициент, учитывающий насыщение магнитной цепи АД ($1, 0 < K_\mu < 1,1$).

На основании использования операторного метода установлено, что ток через человека, прикоснувшегося к фазе сети (рис. 2) определяется суммой принужденной (i_{np}) и свободной ($i_{св}$) составляющих:

$$i_u(t) = i_{np} + i_{св} = \frac{U_m}{Z} \cdot \sin(\omega t + \psi - \varphi) + \frac{U_m}{Z} \cdot \frac{Z_1}{R_y} \cdot \sin(\psi + \nu) e^{p_2 t} \quad (2)$$

где U_m – амплитуда фазного напряжения сети; ω – угловая частота сети; ψ – начальная фаза напряжения сети; p_2 – коэффициент затухания параметра $i_{св}$; Z и Z_1 – модули полных сопротивлений соответственно, всей цепи с учетом сопротивления тела человека R_y и разветвленной ее части; $\varphi = \arctg \frac{R_c \omega}{R_y p_2 - \omega^2 C_c R_y R_c}$ – фазовая характеристика общего сопротивления цепи;

$$\nu = \arctg(\omega / p_2) \quad p_2 = -\frac{R_y + R_c}{R_c C_c R_y} = -\frac{1}{R_\Sigma C_c}; \quad R_\Sigma = \frac{R_c R_y}{R_c + R_y};$$

$$Z = \sqrt{\frac{(\omega C_c R_c R_y)^2 + (R_y + R_c)^2}{(\omega C_c R_c)^2 + 1}}; \quad Z_1 = \sqrt{\frac{R_c^2}{(\omega C_c R_c)^2 + 1}}$$

Максимум свободная составляющая тока через человека имеет место при условии, что $\psi + \nu = \pm \pi/2$.

Тогда

$$i_{св} = \frac{U_m}{Z} \cdot \frac{Z_1}{R_y} = I_m \frac{Z_1}{R_y} \quad (3)$$

Из полученного выражения следует, что максимальная амплитуда свободной составляющей переходного тока через человека

больше амплитуды установившегося тока в число раз, равное отношению полного сопротивления разветвленной части цепи к сопротивлению тела человека R_q . В том случае, когда $\psi + \nu = 0$ свободная составляющая переходного тока через тело человека равна нулю ($i_{ce}=0$), т.е переходной процесс отсутствует и ток через человека сразу становится равным принужденной составляющей $i_q(t) = i_{np}(t)$.

Максимум переходного тока через тело человека имеет место тогда, когда момент прикосновения совпадает с максимумом напряжения сети ($\psi = \pm \pi/2$). В этом случае исходя из уравнения (3) получим:

$$i_q(t) = \frac{U_m}{Ze^{j\varphi}} + \frac{U_m e^{j\Theta} Z_1}{Ze^{j\omega} R_q} = \frac{U_m (R_q + Z_1 e^{j\Theta})}{Ze^{j\omega} R_q}, \quad (4)$$

где $\Theta = \arctg \omega C_c R_c$ – фазовая характеристика сопротивления Z_1 .

После отключения сети автоматическим выключателем АВ, вызванного срабатыванием АЗО, но при включенном некоторое время магнитном пускателе, через человека будет протекать ток, обусловленный ЭДС вращающегося по инерции АД. Для этого случая следует учитывать продолжительность протекания тока через человека с учетом собственного времени срабатывания АЗО (t_1); АВ (t_2) и времени отпадания контактора магнитного пускателя МП (t_3) при затухании ЭДС вращающегося по инерции электродвигателя.

Таким образом, электропоражающий фактор – количество электричества Q , воздействующего на человека, определяется действующим значением тока $I_q(t)$ и его продолжительностью t и может быть рассмотрена как совокупность составляющих, обусловленных энергетическим потоком трансформаторной подстанции (Q_1) на интервале времени $t_4 = t_1 + t_2$ и энергетическим потоком вращающегося по инерции АД (Q_2) на интервале t_3 :

$$Q_1 = \frac{U_\phi}{Z} \cdot t_4 = \frac{U_a \cdot t_4}{\sqrt{\frac{(\omega C_c R_c R_r)^2 + (R_r + R_c)^2}{(\omega C_c R_c)^2 + 1}}} \quad (5)$$

$$Q_2 = \int_0^{t_3} I_q' \cdot dt = \int_0^{t_3} I_{q(t=0)} \cdot e^{-\frac{t}{T_3}} \cdot dt, \quad (6)$$

где $I_q' = I_{q(t=0)}$ – действующее значение тока через человека в момент отключения контактов автоматического выключателя.

В случае прикосновения к фазе на участке от МП до АД продолжительность действия тока через человека в данном случае обусловлена совокупностью интервалов времени: выявления утечки; формирования команды на отключение напряжения; срабатывания АВ КТП. В суммарном количестве электричества следует учитывать третью составляющую Q_3 :

$$Q_3 = \int_0^{t_4} I_q'' \cdot dt = \int_0^{t_4} I_{q(t=0)} \cdot e^{-\frac{t}{T_э}} \cdot dt, \quad (7)$$

где $I_q'' = I_{q(t=0)}$ - действующее значение тока через человека в момент отпадания контактов контактора магнитного пускателя.

При определении Q_2 и Q_3 необходимо принять во внимание, что в процессе затухания ЭДС выбега АД значения тока через человека в моменты отключения АВ (I_q') контактора МП (I_q'') будут так же уменьшаться по отношению к первоначальному их значению в данном интервале времени. Пользуясь выражениями (4, 6, 7) можно рассчитать допустимую продолжительность затухания ЭДС АД из условия обеспечения допустимого количества электричества 50 мА·с, и допустимого тока через человека, равного максимальному отпускающему току (6 мА).

Экспериментальная проверка электропоражающих свойств обратной ЭДС АД выполнена на стенде, реализующем схему (рис. 2) и содержащем: КТП типа ТСВП-160 со встроенным АЗО типа АЗУР-1; пускатель ПРН-80, коммутирующий АД типа 2АИУС160L2 мощностью 25 кВт (напряжение сети 660 В, сопротивление однофазной утечки 1 кОм). Вторая серия опытов распространялась на сеть с двигателем ЭДКО4-2М мощностью 120 кВт.

Экспериментами установлено, что при возникновении утечки тока до пускателя продолжительность затухания его не зависит от величины емкости сети и определяется мощностью АД и среднее значение ее составляет 0,9 и 0,45 с., соответственно, для двигателя 120 и 25 кВт. Компенсация емкости сети позволяет поддерживать $Q \leq 50$ мА·с независимо от мощности электродвигателя и емкости сети (рис. 3, зависимости 2 и 4).

При отсутствии компенсации емкости сети при мощности АД, равной 120 кВт, критерий электробезопасности обеспечивается при условии, что цепь утечки образовалась непосредственно на выходных клеммах автоматического выключателя, когда емкость сети предельно мала (зависимость 1).

В случае, если точка касания человека к фазе сети находится после магнитного пускателя (рис. 4), продолжительность затухания тока в цепи утечки также не зависит от величины емкости сети, а определяется только мощностью отключаемого электродвигателя.

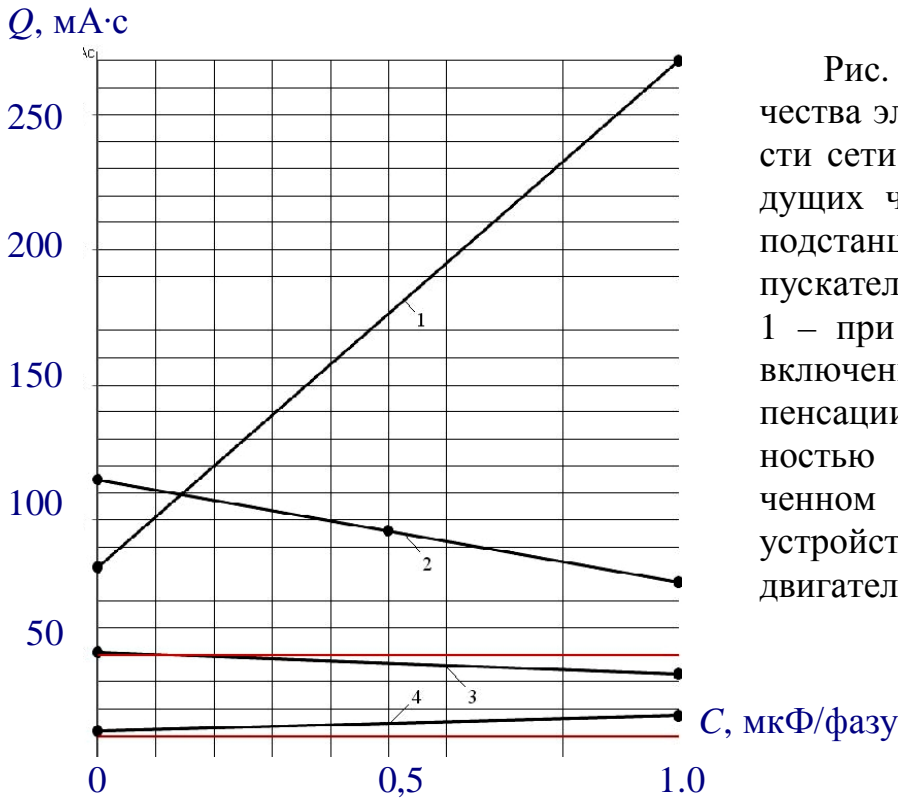


Рис. 3. Зависимости количества электричества от емкости сети при касании токоведущих частей на участке от подстанции до магнитного пускателя:

1 – при отключенном и 2 – включенном устройстве компенсации для двигателя мощностью 120 кВт; 3 – отключенном и 4 – включенном устройстве компенсации для двигателя мощностью 25 кВт

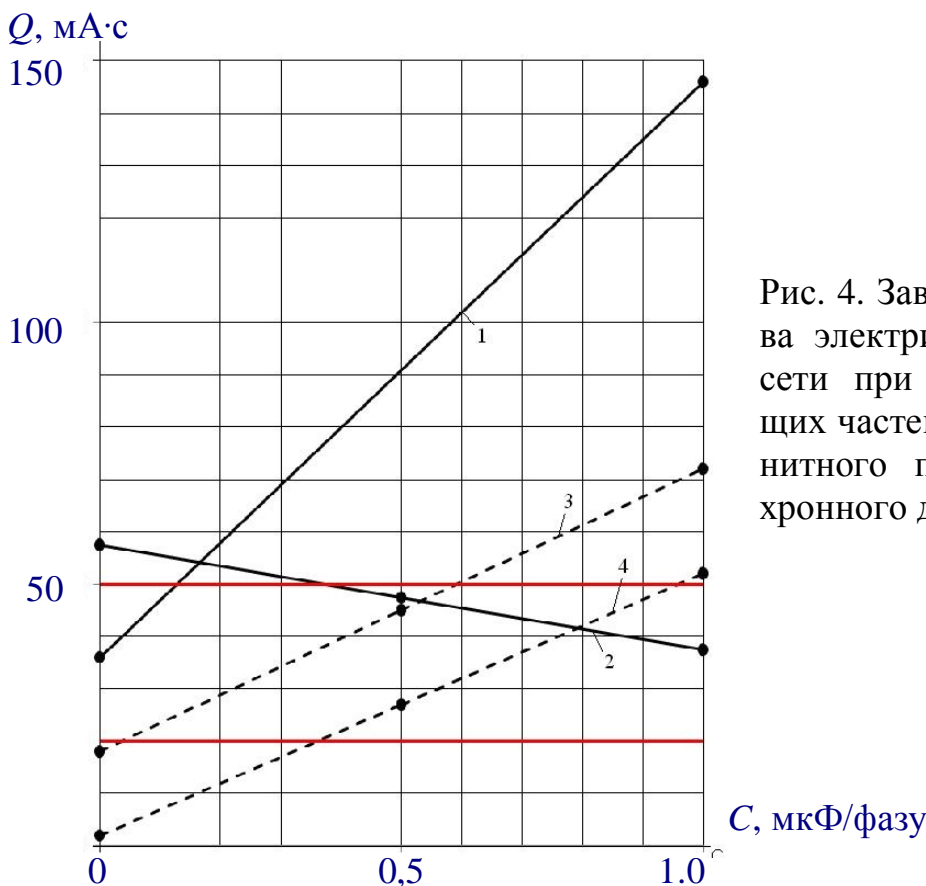


Рис. 4. Зависимости количества электричества от емкости сети при касании токоведущих частей на участке от магнитного пускателя до асинхронного двигателя

Среднее значение продолжительности затухания составляет 2,9 с и 0,46 с., соответственно для двигателя 120 кВт и 25 кВт. Что же касается количества электричества, воздействующего на человека, то оно существенно в 2÷5 раз превышает допустимое значение для двигателя мощностью 120 кВт, соответственно, при емкости сети 1 мкФ/фазу, наличии и отсутствии устройства компенсации (зависимости 1 и 2). Вместе с тем, при мощности электродвигателя 25 кВт среднее значение количества электричества во всем диапазоне соответствует предельно допустимому нормируемому значению и не превышает 45 мА·с при наличии и отсутствии устройства компенсации (зависимости 4 и 3).

Следовательно, при значении мощности отключаемого электродвигателя до 25 кВт и напряжении сети 660 В условия электробезопасности человека, прикоснувшегося к токоведущим частям, находящимся под напряжением обеспечиваются.

Таким образом, случайные прикосновения человека к токоведущим частям, находящимся под напряжением 660 В, на участке сети от магнитного пускателя до электродвигателя мощностью свыше 25 кВт представляют опасность смертельного травмирования его электрическим током даже при срабатывании защитного отключения.

Минимизация количества электричества в цепи утечки тока на землю может быть реализована:

- параметр Q_1 – путем сокращения времени защитного отключения и увеличения полного сопротивления сети;
- параметр Q_2 – уменьшением тока через человека (цепь утечки) и ускорением отключения контактора магнитного пускателя;
- параметр Q_3 – уменьшением продолжительности действия обратного энергетического потока АД.

Выводы и направления дальнейших исследований.

Обоснованы и экспериментально подтверждены электропоражающие параметры обратных ЭДС АД в структуре шахтного участкового электротехнического комплекса в функции емкости изоляции сети, мощности асинхронных двигателей потребителей с учетом места возникновения утечки тока на землю.

Направлением дальнейших исследований является проблематика обоснования параметров и структуры средств ускоренного подавления обратных ЭДС асинхронных двигателей.

Список літератури

1. Колосюк В.П. Защитное отключение рудничных электроустановок / В.П. Колосюк. – М.: Недра, 1980. – 334 с.
2. Маренич К.М. Зворотні енергетичні потоки асинхронних двигунів як фактор небезпеки в електромережі шахти: монографія / К.М. Маренич, С.В. Василюк. – Донецьк: ДонНТУ, 2012. – 206 с.
3. Маренич К.М. Наукові основи впровадження автоматичного захисного двобічного знеструмування шахтної дільничної електромережі: монографія / К.М. Маренич, І.В. Ковальова. – Донецьк: ДонНТУ, 2012. – 125 с.
4. Ковач К.П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К.П.Ковач, И.Рац. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.

Стаття надійшла до редакції 23.10.2013

Ю.В. Товстик, ДП «Донецький експертно-технічний центр «Держпромнадзору»; К.М. Маренич, ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Уточнення методології оцінки небезпеки ураження людини електричним струмом в шахтній дільничній електромережі з урахуванням впливу ЕРС обертання двигуна

Уточнена методика оцінки електроуражаючих факторів в шахтній дільничній електромережі, обґрунтовані та експериментально підтверджені електроуражуючі параметри зворотних ЕРС асинхронних двигунів.

Ключові слова: шахта, електрична мережа, електроураження, захист, ЕРС, асинхронний двигун, методика.

Yu. Tovstyk, Donetsk Expert and Technical Center of State Service of Mining Supervision and Industrial Safety of Ukraine; K. Marenych, Donetsk National Technical University

More Precise Definition of Methodology of Estimating Electroshock Danger in Mine Local Electrical System Taking into Account Back-to-network Power Generation Produced by Induction Motor

This paper provides a more precise definition of methodology of estimating electroshock danger in mine local electrical systems taking into account back-to-network power generation produced by induction motor. The paper concerns further development and improvement of the research into the engine electrotechnical complex of a mine based on the use of mathematical methods different from the others by covering the behavior of variables and other important factors, such as earth leakages; factors causing back-to-network power generation produced by induction motors, including its conditions before and after protective disconnection of power supply occurs. We defined the correlation of electricity amount in the earth-leakage circuit with cable insulation conductivity and considered the coordination of autonomous devices for cable states identification with other devices for current and leakage protection.

Keywords: mine, electrotechnical complex, electrical shock, protection, electromotive force, induction motor, methodology.