

Е.А.Вареник

(Украина, г.Донецк, Украинский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного рудничного электрооборудования)

ЗНАЧЕНИЯ ДОПУСТИМЫХ КРАТКОВРЕМЕННЫХ ТОКОВ УТЕЧКИ В РУДНИЧНЫХ УЧАСТКОВЫХ СЕТЯХ

Рост рабочих напряжений и физических параметров рудничных электрических сетей естественным образом приводит к увеличению токов утечки и аварийных токов при нарушениях изоляции. В современных участковых распределительных сетях шахт токи утечки (или длительность их протекания) достигают таких значений, при которых невозможно обеспечить безопасность человека только контролем активного сопротивления изоляции и защитным отключением.

С целью выбора эффективных путей снижения значений кратковременных токов утечки (или длительности их протекания) и обоснования основных параметров срабатывания защитной и коммутационной аппаратуры требуется оценить значения и характер составляющих указанных токов.

В общем случае ток через человека, прикоснувшегося к фазе сети, имеет следующие составляющие:

1) свободную составляющую тока переходного процесса, возникающего при прикосновении человека к фазе сети;

2) установившийся ток, протекающий от момента прикосновения человека к фазе сети до момента отключения сети защитным аппаратом;

3) ток переходного процесса (снижается с постоянной времени $T_{э,с}$), вызванный обратной ЭДС группы электродвигателей горных машин, продолжающих вращаться по инерции после отключения сети защитным аппаратом;

4) ток переходного процесса (снижается с постоянной времени $T_{э,н}$), обусловленный наличием ЭДС электродвигателя той машины, на линии питания которой произошло прикосновение человека к фазе сети.

Поскольку необходимо определить предельно допустимый ток через человека, при расчетах нужно принять наиболее жесткие условия.

Известно, что максимальные значения амплитуды и постоянной времени затухания свободной составляющей тока через человека имеют место в режиме прикосновения его к фазе сети с бесконечно высоким активным сопротивлением изоляции и максимальной емкостью относительно земли в момент перехода мгновенного значения напряжения этой фазы через максимум ($\varphi = \pi/2$).

Поскольку первая и вторая составляющие тока действуют одновременно, то можно утверждать, что ток от момента возникновения утечки до момента отключения сети защитным аппаратом изменяется по следующему закону:

$$i = I_0 + I_{1m} \sin \omega t + I_{2m} e^{-at} + I_{3m} e^{-bt} \sin(\omega_0 t + \alpha), \quad (1)$$

где I_0 – постоянный измерительный ток устройства контроля изоляции сети; I_{1m} – амплитуда установившегося тока утечки в сети; I_{2m}, I_{3m} – амплитуды апериодической колебательной свободных составляющих через однофазную утечку.

Согласно работе [1] допустимый ток через человека определяется соотношением

$$I_{\text{дон}} t \leq Q_{\text{дон}} = 50 \text{ мА}\cdot\text{с}, \quad (2)$$

где $Q_{\text{дон}}$ – допустимое количество электричества, которое может пройти через человека, не вызвав серьезной электротравмы,

$$Q_{\text{дон}} = It, \quad (3)$$

где I и t – действующее (среднеквадратичное) значение тока через тело человека и время его протекания.

Это означает, что допустимое значение тока через человека может быть определено исходя из условия, что количество электричества, прошедшего через тело человека, обусловленное указанными составляющими тока, не превысило допустимого значения (50 мА·с), т.е. необходимо, чтобы

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 \leq Q_{\text{дон}}, \quad (4)$$

где Q_1, Q_2, Q_3 – количество электричества, обусловленное, соответственно, первой, второй и третьей составляющими тока через тело человека.

Из выражения (3) найдем

$$Q = \sqrt{t_0 \int_0^{t_0} i_y^2 dt}, \quad (5)$$

где t_0 – интервал времени от момента возникновения утечки до момента отключения сети защитной аппаратурой.

Тогда, представив свободную составляющую тока как

$$i_{\text{св}} = \frac{U_m}{R_y} \left[A_1 e^{-at} + A_2 e^{-bt} \sin(\omega_0 t + \alpha) \right] \quad (6)$$

и проинтегрировав полученное выражение с учетом того, что процесс затухает значительно раньше отключения сети, получим

$$Q_1 = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_{\text{св}}^2 t_0 / t_0}, \quad (7)$$

где $I_1 = I_m / \sqrt{2}$ – действующее значение установившегося тока; $I_{cs} = U / R_y$ – эквивалентное действующее значение свободной составляющей тока; U – действующее напряжение сети; t_3 – эквивалентное время, в соответствии с [1]

$$t_3 = A_1^2 / a + A_2^2 \left[1/2b + (\omega_0 \sin 2\alpha - b \cos 2\alpha) / 2(b^2 + \omega_0^2) \right]. \quad (8)$$

Нетрудно заметить, что t_3 представляет собой время, в течение которого в теле человека была бы выделена такая же тепловая энергия, как и фактическая, если бы через тело человека протекал постоянный ток, равный $I = U / R_y$.

На рисунке приведены зависимости эквивалентного времени t_3 от емкости разделительного конденсатора. При помощи этих зависимостей и выражению (7) можно определить количество электричества в течение интервала времени до отключения сети исходя из гарантированного времени срабатывания защиты.

После отключения сети защитным аппаратом ее напряжение изменяется по экспоненциальному закону [1]. С учетом этого ток в этом интервале изменяется по закону

$$i_2 = I_0 + K_1 I_{1m} e^{-t/T_{3,2}} \sin \omega t. \quad (9)$$

Для устойчивой работы систем электроснабжения горных машин и комплексов требуется обеспечить удержание пускателей во включенном положении при напряжении сети более 0,6 его номинального значения. Поэтому рудничные взрывозащищенные пускатели на напряжение до 660 В серии ПВИ были спроектированы так, что отключаются с учетом технологического запаса при напряжении $0,5U_{ном}$. В дальнейшем после отключения пускателей сеть распадается на отдельные ответвления.

Присоединение к сети маломощных электродвигателей с небольшими постоянными времени приводит к существенному снижению значения $T_{3,2}$, но, с другой стороны, емкость каждого ответвления сети, к которому присоединен какой-либо из этих электродвигателей, из-за небольших сечений рабочих жил и длин кабелей, как правило, незначительна. Поэтому при определении допустимых кратковременных токов утечки случай присоединения к сети группы маломощных электродвигателей как менее опасный и его можно не учитывать. Как показали исследования, наиболее тяжелым реальным режимом является режим отключения сети с группой электродвигателей, один из которых (как правило, комбайновый) имеет наибольшую мощность, а несколько (например, конвейерных) – среднюю мощность при емкости сети, близкой к максимальной. Исследования показали, что в этом случае $T_{3,2} = 1$ с. Это значение $T_{3,2}$ и следует принять при расчетах:

$$Q_2 = \sqrt{t_3 \int_0^{t_3} (I_0 + K_1 I_{1m} e^{-t/T_{3,2}} \sin \omega t)^2 dt} =$$

$$= \sqrt{t_3 \int_0^{t_3} [I_0^2 + 2I_0 K_1 I_{1m} e^{-t/T_{3,2}} \sin \omega t + K_1^2 I_{1m}^2 e^{-2t/T_{3,2}} \sin^2 \omega t] dt}. \quad (10)$$

Поскольку за каждый период $\int \sin \omega t = 0$, то и $2I_0 K_1 I_{1m} e^{-t/T_{3,2}} \sin \omega t = 0$.

Тогда

$$Q_2 = \sqrt{I_0^2 t_3^2 + t_3 \int_0^{t_3} K_1^2 I_{1m}^2 e^{-2t/T_{3,2}} \sin^2 \omega t dt}. \quad (11)$$

Если принять, что длина гибкого кабеля от электромагнитного пускателя до мощной горной машины (комбайна, струга, конвейера лавы) не превышает 250-300 м, то максимальная емкость такого ответвления сети составит 0,15 мкФ на фазу. Ток однофазной утечки I_{y1} в сети с такой емкостью при отсутствии компенсатора (отключенного главными контактами контактора пускателя от утечки) в соответствии с работой [2] можно определить как

$$I_{y1} = U / \sqrt{R_y^2 + 1/\omega^2 C_1^2}. \quad (12)$$

Вычислив значение тока при $R_y = 1$ кОм, $C_1 = 0,45$ мкФ, получим, что при напряжениях сети $U = 0,5U_{ном}$ и $U_{ном} = 1140, 660, 380$ В он равен соответственно, равен 46,2; 26,7; 15,4 мА, т.е. в сетях 660 В и ниже ток утечки не превышает допустимого значения $I_{доп}$ и поэтому можно принять $Q_3 = 0$.

Эффективность автоматических компенсаторов такова, что ток в сетях напряжением до 660 В с емкостью 1 мкФ на фазу через однофазную утечку сопротивлением 1 кОм может быть ограничен до уровня 60-100 мА. В это же время измерительный ток у действующих аппаратов защиты от токов утечки АЗПБ, АЗУР, снабженных автоматическими компенсаторами, не превышает 10 мА. Поэтому в расчетах током I_0 можно пренебречь.

Тогда выражение (11) может быть существенно упрощено исходя из того, что период тока промышленной частоты составляет 0,02 с, т.е. он значительно меньше постоянной времени $T_{3,2}$. Это означает, что за один период изменения амплитуда тока утечки остается практически неизменной. Поэтому Q_2 целесообразно определить методом медленно меняющихся амплитуд:

$$Q_2 = \int_0^{t_3} K_1 I_y e^{-t/T_{3,2}} dt = K_1 I_y T_{3,2} (1 - e^{-t_3/T_{3,2}}). \quad (13)$$

Если принять, что t_3 , в течение которого напряжение сети достигнет $0,5U_{ном}$, при $T_{э.н} = 1$ с и $K_1 = 0,83$ равно $0,5$ с, тогда

$$Q_2 = I_y(0,83 - 0,5) \approx 0,3I_y \text{ МА}\cdot\text{с}. \quad (14)$$

Аналогично найдем значение Q_3 при снижении напряжения от $0,5U_{ном}$ до напряжения, при котором ток утечки будет равен $I_{дон}$:

$$Q_3 = \int_0^{t_4} K_2 I_y e^{-t/T_{э.н}} dt = K_2 I_y T_{э.н} (1 - e^{-t_3/T_{э.н}}), \quad (15)$$

где K_2 – коэффициент, определяемый кратностью напряжения отключения пускателей по отношению к $U_{ном}$; t_4 – интервал времени от момента отключения пускателей до момента, когда ток утечки снизится до $I_{дон}$; $T_{э.н}$ – постоянная времени электродвигателя, присоединенного к тому ответвлению, на котором произошло прикосновение человека.

При $K_2 = 0,5$

$$Q_3 = (0,5I_y - 25)1,5 = (0,75I_y - 37,5) \text{ МА}\cdot\text{с}. \quad (16)$$

Рассмотрим влияние переходного процесса в сети при возникновении утечки на допустимое значение тока утечки $I_{y.дон}$. При напряжениях 380, 660, 1140 В ток $I_{св}$, соответственно, равен 220, 380, 660 мА. Эквивалентное время протекания этого тока, как видно из зависимостей, приведенных на рисунке, зависит от емкости разделительного конденсатора C_p . При $C_p = 2 \div 3$ мкФ и времени отключения сети $t_0 = 2$ с для напряжений 380, 660, 1140 В $I_{св}^2 t_3 / t_0$ составляет, соответственно, 2178, 6498, и 19 602 мА². Это означает, что количество электричества в теле человека в результате действия переходного процесса может оказаться значительно большим, чем количество электричества, которое обусловлено протеканием тока I_y , причем доля свободной составляющей растет по мере снижения I_y (т.е. с повышением эффективности компенсатора) и времени отключения сети (т.е. с повышением эффективности быстродействия защитной аппаратуры). Однако, как показали расчеты, при правильно выбранных параметрах компенсатора уже при емкости разделительного конденсатора 8-10 мкФ и времени t_0 в пределах 0,1-0,2 с влияние $I_{св}$ на допустимый ток в сетях напряжением 660 В невелико и для практических расчетов с учетом $I_0^2 \ll I_{y.д}^2$; $I_{св}^2 t_3 / t_0 \ll I_{y.д}^2$ допустимый ток, мА, при условии $Q_3 = 0$ для сетей напряжением до 660 В может быть определен из выражения

$$I_{y.д} = 50 / (t_0 + 0,3). \quad (17)$$

Подставив в (17) $t_0 = 0,2$ с – значение, нормированное для сетей напряжением до 660 В, получим $I_{y.0} = 100$ мА. Однако уже при напряжении 1140 В значения $I_{св}^2 t_3 / t_0$ и Q_3 резко возрастают, в результате чего требуется снижение

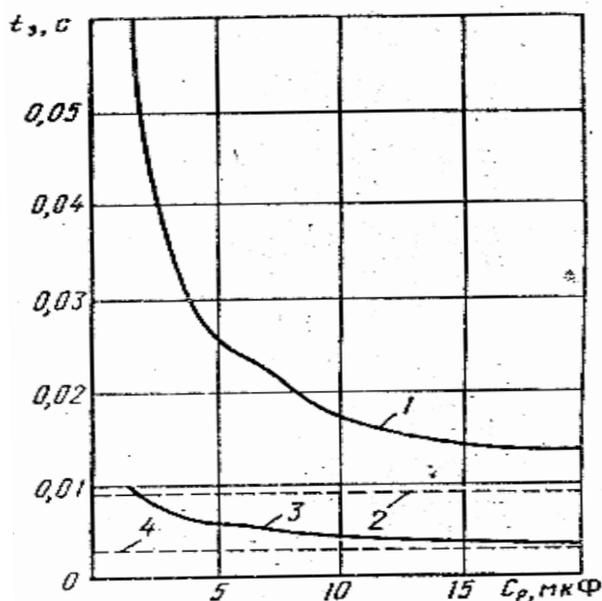


Рис. 1. Зависимости эквивалентного времени t_3 от емкости разделительного конденсатора C_p при $C_c = 3$ мкФ (1,2), 9 (3, 4) и ∞ (2, 4)

кратковременного тока утечки до значений в несколько десятков миллиампер. Поэтому в таких сетях осуществить снижения кратковременных токов утечки до требуемого уровня путем компенсации их емкостной составляющей оказывается весьма затруднительным. Кроме того, токи утечки после отключения пускателей при напряжении $0,5U_{ном}$ в сетях напряжением 1140 В еще чрезвычайно велики и $Q_3 > Q_{доп}$. В таких сетях целесообразно производить отключения пускателей при напряжениях, когда ток утечки после их отключения не превышает длительно допустимого значения, как это было сделано при напряжениях до 660 В. Из выражения (12) можно определить, что при емкости ответвления 0,15 мкФ на фазу это условие в сетях напряжением 1140 В будет выполнено, если отключение пускателей будет происходить при напряжении ниже $0,27U_{ном}$.

при напряжении 1140 В будет выполнено, если отключение пускателей будет происходить при напряжении ниже $0,27U_{ном}$.

Выводы

1. В рудничных электрических сетях напряжением 1140 В снижение кратковременных токов утечки до требуемого уровня может быть достигнуто комплексным путем – компенсацией емкостной составляющей и защитным заземлением токоведущих частей с поврежденной изоляцией.

2. Отключение пускателей из условия не превышения длительно допустимого значения тока утечки, обусловленного наличием ЭДС электродвигателя отключенной машины и при емкости ответвления 0,15 мкФ на фазу, в сетях напряжением 1140 В должно осуществляться при снижении напряжения до 25% номинального.

Список литературы

1. Дзюбан В.С. Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях.- М.: Недра, 1982.- 194 с.
2. Колосюк В.П. Защитное отключение рудничных электроустановок.- М.: Недра, 1980.- 334 с.