

УСЛОВИЯ РАЗРЕШЕНИЯ И ЗАПРЕТА ШУНТИРОВАНИЯ ФАЗЫ НА ЗЕМЛЮ В ШАХТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НАПРЯЖЕНИЕМ 380-1140 В

Сергин Е.В.,

Институт прикладной математики и механики НАН Украины

Найдены токи утечки для оценки определяемости поврежденной фазы на землю в шахтной электрической сети.

Obtained are leakage currents for damaged-on-ground mine electrical network phase determinability estimation.

Объект изучения. Защитное шунтирование фазы на землю по своему действию позволяет эффективно снижать токи утечки в шахтных участковых электрических сетях [1]. Однако, его использование требует существования определяемости поврежденной фазы в системе "электрическая сеть – аппарат защиты от токов утечки на землю" - возможности безошибочного распознавания поврежденной фазы по наблюдениям за промышленной составляющей напряжения $U_0(t)$ смещения нейтрали относительно земли. Согласно графо-аналитическому методу оценки определяемости поврежденной фазы [2] амплитудно-фазовые значения напряжения $U_0(t)$ представляются элементами множеств ожидания S_0 , разрешения S_i и запрета E_i^+ , E_i^- для одноименных состояний шунтирования, где $i=1, 2, 3$ - номер фазы электрической сети, а знаки "+" и "-" верхнего индекса указывают на принадлежность множеств соответственно опережающей и отстающей фазе по отношению к i -ой фазе электрической сети. Оценка сводится к визуальному сопоставлению множеств на отсутствие пересечений и позволяет судить о реализуемости аппарата защиты от токов утечки (в дальнейшем, аппарата защиты) на стадии создания.

В настоящей работе анализируются условия образования множеств разрешения S_i и запрета E_i^+ , E_i^- шунтирования. Их пересечение указывает на неоднозначность определения номера поврежденной фазы электрической сети, что может приводить к ошибочному шунтированию на землю "здоровой" фазы и, как следствие, к резкому увеличению тока утечки вместо снижения.

Условие разрешения шунтирования. Защитное шунтирование фазы на землю должно разрешаться при токах утечки опасной величины, протекающих во времени от момента появления до момента снижения, например, к длительно безопасной величине 25 мА [3]. Мерой опасности тока утечки может служить интегральный показатель электробезопасности (ИПЭ) в виде произведения среднеквадратичного значения тока на интервал времени действия с нормой не более 50 мА*с [3]. Данному критерию отвечает некоторый кратковременный (по определению [3]) ток утечки, начиная с которого требуется (разрешается) шунтирование. Определим его из соответствующего рассматриваемому случаю выражения

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = 50, \text{ мА*с}, \quad (1)$$

где Q_1 - составляющая ИПЭ в течение времени t_1 отключения электрической сети по команде от аппарата защиты, Q_2 - составляющая ИПЭ в промежутке времени t_2 от момента отключения электрической сети до момента отключения пускателем присоединения с утечкой, Q_3 - составляющая ИПЭ в промежутке времени t_3 от момента отключения присоединения до момента снижения среднеквадратичного значения тока утечки к безопасной величине 25 мА.

При определении тока утечки будем исходить из общепринятых допущений [1, 4] о сосредоточенности параметров изоляции фаз электрической сети относительно земли, равенстве нулю активных сопротивлений и индуктивности фазных проводников сети и цепи заземления, а также возможности представления цепи однофазной утечки в виде активного сопротивления R' . Пусть

$$Q_1 = I'_1 t_1, \quad (2)$$

где I'_1 - искомое среднеквадратичное значение кратковременного тока однофазной утечки на момент отключения электрической сети.

В промежутке времени $t_2 + t_3$ действует обратная ЭДС выбега электродвигателей, при которой ток утечки представим функцией времени

$$I'(t) = 0,95 I'_1 e^{-t/T_M}, \quad t \in [0, t_2 + t_3], \quad (3)$$

где 0,95 - коэффициент снижения напряжения электрической сети после отключения [1], T_M - электромагнитная постоянная времени затухания обратной ЭДС электродвигателей. Снижением частоты обратной ЭДС электродвигателей в течение рассматриваемого промежутка времени пренебрегаем и полагаем $I'_1 = const$ [4].

Ток утечки в присоединении после отключения его пускателем становится ниже максимально возможного тока перед отключением присоединения. Рассматривая наиболее жесткие условия принимаем параметры функции (3) постоянными. Тогда, в промежутке времени $t_2 + t_3$ имеем

$$Q_1 + Q_2 = \sqrt{\frac{1}{t_2 + t_3} \int_0^{t_2+t_3} I'(t)^2 dt * (t_2 + t_3)}. \quad (4)$$

Моменту окончания данного промежутка времени соответствует условие $I'(t_2 + t_3) = 25$, из которого с учетом (3) находим

$$t_2 + t_3 = T_M \ln \frac{0,95I'_1}{25}, [I'_1] = \text{мА}. \quad (5)$$

Из (1)-(5) после преобразований получаем уравнение

$$I'_1 \left\{ t_1 + 0,67T_M \sqrt{1 - e^{-2 \ln \left(\frac{0,95I'_1}{25} \right)}} \ln \frac{0,95I'_1}{25} \right\} = 50, \quad (6)$$

решение которого представлено на рис. 1.

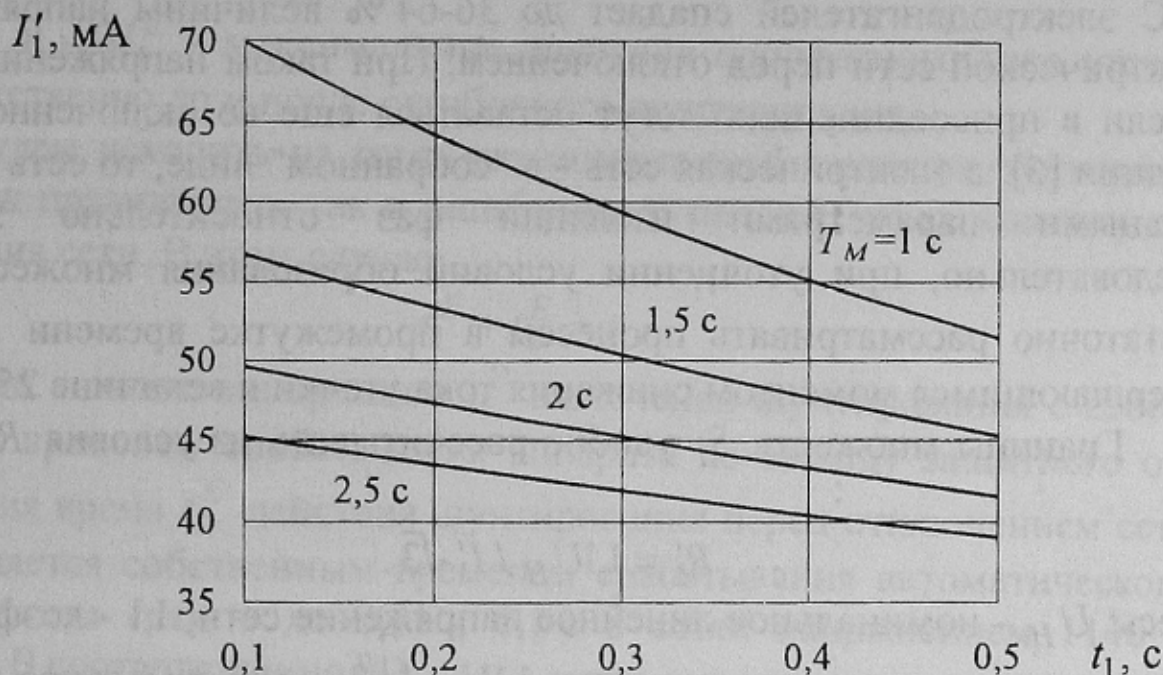


Рисунок 1 – Разрешающий шунтирование кратковременный ток I'_1 утечки в зависимости от времени t_1 отключения сети при постоянной времени затухания обратной ЭДС электродвигателей $T_M = 1-2,5$ с

Для электрических сетей напряжением 1140 и 660/380 В при постоянной времени T_M , равной 1,5 и 1 с [2], а также времени отключе-

ния сети $t_1=0,1-0,3$ с ток I'_1 составляет соответственно 50-56 и 59-70 мА (см. рис. 1). Этим и более высоким значениям токов утечки должны соответствовать границы множеств разрешения шунтирования S_i , $i=1, 2, 3$ при оценке определяемости поврежденной фазы. В случае необходимости границы уточняются с учетом фактических значений времени t_1 . Более жесткие условия ($T_M > 1,5$ с) учитываются при исследованиях предельных возможностей системы "электрическая сеть – аппарат защиты".

Найденные разрешающие шунтирование токи I'_1 оказались существенно ниже значения 100 мА, допускаемого стандартом [3] и полученного, видимо, из рассмотрения менее жестких условий – меньшей постоянной времени T_M , повышенного напряжения отключения пускателей (55 % от номинального [4]), малого тока утечки в отключенном присоединении.

В ходе решения уравнения (6) установлено, что общее время $t_1 + t_2 + t_3$ снижения тока утечки к безопасной величине 25 мА составляет 1,1-1,5 с при $t_1=0,1-0,3$ с, $T_M=1-2,5$ с. За это время обратная ЭДС электродвигателей спадает до 36-64 % величины напряжения электрической сети перед отключением. При таком напряжении пускатели в присоединениях могут оставаться еще во включенном состоянии [5], а электрическая сеть – в "собранном" виде, то есть с предельными параметрами изоляции фаз относительно земли. Следовательно, при уточнении условий образования множеств S_i достаточно рассматривать процессы в промежутке времени $t_1 + t_2$, завершающимся моментом снижения тока утечки к величине 25 мА.

Границы множеств S_i удобно рассчитывать из условия $R' \leq R'_1$, где

$$R'_1 = 1,1U_H / I'_1\sqrt{3}. \quad (7)$$

Здесь: U_H – номинальное линейное напряжение сети; 1,1 – коэффициент допустимого его превышения; $1,1U_H / \sqrt{3}$ – максимальное напряжение фазы электрической сети относительно земли. Следует помнить, что выражение (7) дает завышенную величину сопротивления утечки R'_1 при разрешении шунтирования и, как следствие, некоторое расширение границ множеств S_i .

Условие запрета шунтирования. Ошибочное шунтирование на землю "здоровой" фазы электрической сети вместо поврежденной (с

током утечки выше длительно допустимой величины 25 мА) приводит к росту тока утечки за счет скачкообразного увеличения напряжения поврежденной фазы относительно земли до линейного напряжения электрической сети. Такое включение шунтирования подлежит запрету, если значение ИПЭ превышает 50 мА*с. Граничному условию соответствует выражение

$$Q_1^E + Q_2^E + Q_3^E = 50, \text{ мА*с}, \quad (8)$$

где Q_1^E - составляющая ИПЭ в течение времени t_1^E ошибочного включения шунтирования, Q_2^E - составляющая ИПЭ в промежутке времени t_2^E от момента ошибочного включения шунтирования до момента отключения электрической сети по команде от аппарата защиты, Q_3^E - составляющая ИПЭ в промежутке времени t_3^E от момента отключения электрической сети до момента снижения действующего значения тока утечки к безопасной величине 25 мА.

Пусть

$$Q_1^E = I_1^E t_1^E, \quad Q_2^E = \sqrt{3} I_1^E t_2^E, \quad (9)$$

где I_1^E и $\sqrt{3} I_1^E$ - максимальные значения однофазного тока утечки соответственно до и после ошибочного шунтирования.

Будем исходить из того, что момент срабатывания шунтирования (как правильного, так и ошибочного) предшествует моменту отключения сети. В этом случае

$$t_1^E + t_2^E = t_1. \quad (10)$$

При совпадении времени t_1^E включения шунтирования с собственным временем срабатывания аппарата по выходу защитного отключения время t_2^E действия шунтирования перед отключением сети определяется собственным временем срабатывания автоматического выключателя сети - до 0,05 и 0,1 с в сетях напряжением 1140 и 660/380 В соответственно [4].

После отключения электрической сети ток утечки представим, по аналогии с (3), функцией времени

$$I_3^E(t) = 0,95 \sqrt{3} I_1^E e^{-t/T_M}, \quad t \in [0, t_3^E]. \quad (11)$$

Снижение тока к безопасной величине 25 мА происходит за время

$$t_3^E = T_M \ln \frac{1,65 I_1^E}{25}, \quad [I_1^E] = \text{мА}. \quad (12)$$

По определению -

$$Q_3^E = \sqrt{\frac{1}{t_3^E} \int_0^{t_3^E} I_3^E(t)^2 dt * t_3^E}. \quad (13)$$

Из (8)-(13) после преобразований получаем уравнение

$$I_1^E \left\{ t_1 + 0,73t_2^E + 1,16T_M \sqrt{\left[1 - e^{-2 \ln \left(\frac{1,65I_1^E}{25} \right)} \right] \ln \frac{1,65I_1^E}{25}} \right\} = 50, \quad (14)$$

решение которого представлено на рис. 2.

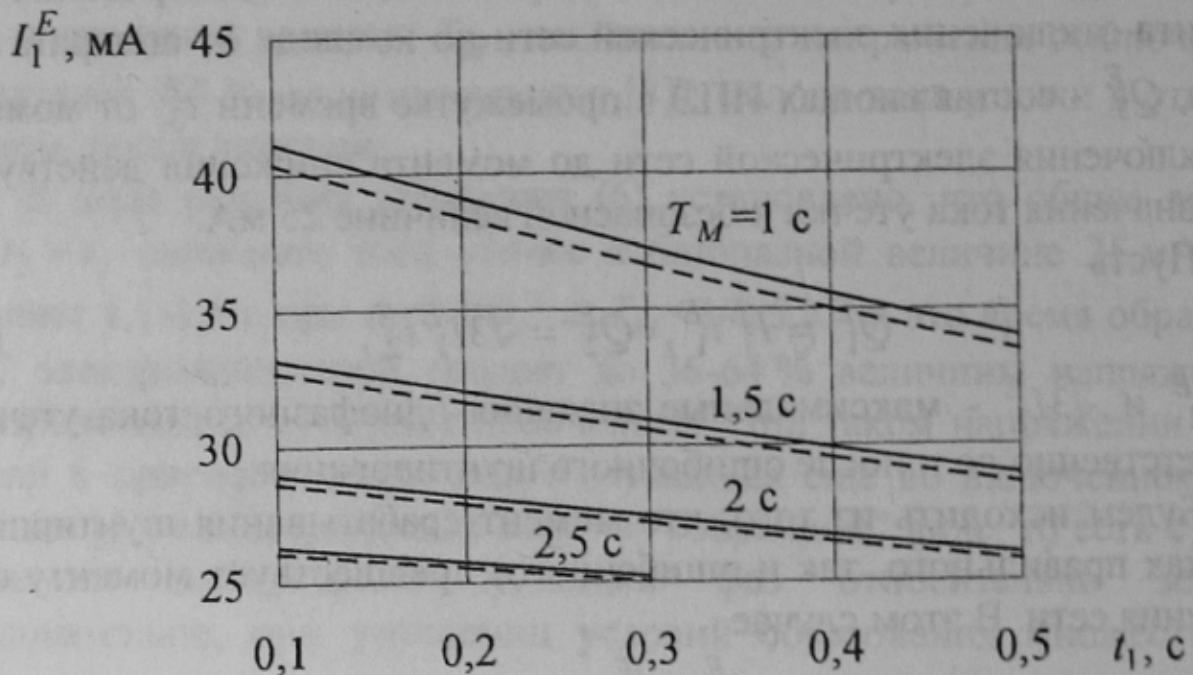


Рисунок 2 – Запрещающий шунтирование кратковременный ток I_1^E утечки в зависимости от времени t_1 отключения сети при постоянной времени затухания обратной ЭДС электродвигателей $T_M = 1-2,5$ с и времени действия шунтирования перед отключением сети, равном 0,05 с и 0,1 с (пунктир)

Для электрических сетей напряжением 1140 В ($T_M = 1,5$ с, $t_2^E = 0,05$ с) и 660/380 В ($T_M = 1$ с, $t_2^E = 0,1$ с) при общем времени отключения $t_1 = 0,1-0,3$ с запрещающий ошибочное шунтирование кратковременный ток I_1^E составляет соответственно 31-33 и 37-40 мА (см. рис. 2). Этим и более высоким значениям токов должны отвечать границы множеств запрета шунтирования E_i^+ , E_i^- , $i=1, 2, 3$. Сопоставление их с множествами разрешения шунтирования S_i должно

выполняются для заданного напряжения сети при одинаковых исходных условиях – общих значениях T_M и t_1 . По фактическим значениям последних уточняются границы всех сопоставляемых множеств.

В ходе решения уравнения (14) установлено, что общее время $t_1 + t_3^E$ снижения тока утечки к безопасной величине 25 мА составляет 1,1-1,7 с при $t_1=0,1-0,3$ с, $T_M=1-2,5$ с. За это время обратная ЭДС электродвигателей спадает до 35-60 % величины напряжения электрической сети перед отключением и электрическая сеть может оставаться в "собранном" виде [5], при котором действуют наиболее жесткие условия электробезопасности.

При повышенных значениях T_M и t_1 ток I_1^E может быть меньше длительно безопасной величины 25 мА. Физически это означает, что ошибочное шунтирование может переводить исходно безопасные токи утечки в разряд опасных. На рис. 2 данный случай не показан (продолжение графиков при $T_M=2,5$ с), т. к. уравнение (14) справедливо при токах $I_1^E > 25$ мА. Для меньших токов I_1^E при выводе аналогичного уравнения составляющая ИПЭ Q_1^E должна игнорироваться.

Границы множеств E_i^+ и E_i^- удобно рассчитывать из условия $R' \leq R_1^E$, где $R_1^E = 1,1U_H / I_1^E \sqrt{3}$ - сопротивление утечки при запрете шунтирования.

Вывод. Шахтной электрической сети напряжением 1140/660/380 В при времени защитного отключения 0,12/0,2/0,2 с и постоянной времени затухания обратной ЭДС группы электродвигателей 1,5/1/1 с соответствуют разрешающий шунтирование кратковременный ток утечки 56/64/64 мА и более и запрещающий ошибочное шунтирование кратковременный ток утечки 33/38/38 мА и более. Минимальные значения токов определяются из уравнений (6) и (14).

Список источников.

1. Дзюбан В.С. Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях. М.: Недра, 1982. 152 с.
2. Сергин Е.В. Определяемость поврежденной фазы на землю в шахтной участковой электрической сети. Метод оценки//Наукові праці Донецького державного технічного університету. Випуск 35, серія гірничо-електромеханічна. – Донецьк: ДонДТУ, 2001. – С. 159-167.
3. Аппараты защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В. Общие технические условия. ГОСТ 22929-78.
4. Колосюк В.П. Защитное отключение рудничных электроустановок. - М.: Недра, 1980.
5. Житников В.К., Абара Л.П., Салуева И.Л. Унифицированная схема включения воздушных и вакуумных контакторов//Уголь Украины, - 1999. - № 9. – С. 16-17.