

КОРРЕКТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ТОКА УТЕЧКИ НА ЗЕМЛЮ ПРИ ОЦЕНКЕ БЕЗОПАСНОСТИ РУДНИЧНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Сергин Е.В.

Институт прикладной математики и механики НАН Украины

Представлено корректное выражение для определения действующего значения тока утечки на землю по совокупности фрагментов. Рассмотрены аспекты приложения. Уточнена норма кратковременного тока.

Presented is a correct expression for calculation of earth leakage current RMS value using totality of fragments. Application aspects are considered. The norm of short-time current is defined more accurately.

Постановка проблемы. Согласно стандарту [1] система «рудничная электрическая сеть – аппарат защиты от токов утечки на землю» считается безопасной при соблюдении базового критерия

$$I * T \leq 0,05 \text{ А*с}, \quad (1)$$

где I - действующее (среднеквадратичное) значение однофазного тока утечки на землю через расчетное сопротивление тела человека в течение времени T оценивания. Этим же стандартом допускается оценивать эффективность аппаратов защиты с устройством компенсации емкостной составляющей тока утечки косвенным критерием

$$I_K \leq 0,1 \text{ А}, \quad (2)$$

где I_K - действующее значение, так называемого, кратковременного тока утечки на землю, под которым понимают действующее значение тока перед защитным отключением электрической сети [2]. Критерий (2) ориентирован на замену трудоемкой процедуры определения интегрального показателя $I * T$ простым контролем тока I_K на стенде без отключения рабочего напряжения. Очевидно, что при рассмотрении тока утечки в виде совокупности образующих фрагментов расчет нормы I_K для соответствующего фрагмента должен выполняться через определение действующего значения тока I и анализ выполнения критерия (1). Однако, норма 0,1 А для тока I_K была получена с применением «эквивалентного» критерия:

$$\sum_{j=1}^n I_j * \Delta T_j \leq 0,05 \text{ А*с}, \quad (3)$$

где n - число фрагментов наблюдения тока утечки; I_j - среднеквадратичное значение тока в промежутке времени ΔT_j действия j -го фрагмента [2]. Здесь

$$\sum_{j=1}^n \Delta T_j = T. \quad (4)$$

При таком подходе справедливость применения «эквивалентного» критерия (3) взамен базовому критерию (1) не рассматривалась, что ставит под сомнение достоверность косвенного критерия (2).

Анализ исследований и публикаций. В работе [3] при обзоре критериев электробезопасности отмечено, что показатель $I * T$ имеет совпадающую размерность с количеством электричества. Видимо, такое совпадение послужило поводом ошибочного именованя в стандарте [1] интегрального показателя $I * T$ количеством электричества и применения, тем самым, известного физического термина не по назначению. В работах [2-4] для пояснения требований к аппаратам защиты от токов утечки использована замена критерия (1) на критерий (3) под влиянием ассоциации термина «количество электричества» с возможностью применения закона электролиза – в нашем случае, равенства показателя $I * T$ сумме $\sum_{j=1}^n I_j * \Delta T_j$. Для совокупности промежутков времени (4) это справедливо в случае постоянного тока $I_j = const$, что не соответствует колебательному току утечки с изменяющейся амплитудой. Переход от базового критерия (1) к «эквивалентному» критерию (3) упрощал аналитические выкладки и казался столь естественным, что был проигнорирован опыт правильного подхода к исследованиям на основе закона сохранения энергии [5]. В работе [6] показано, что применение суммы $\sum_{j=1}^n I_j * \Delta T_j$ оценок отдельных фрагментов методически ошибочно и дает заниженный результат по сравнению с оценкой $I * T$. Причиной этому является отсутствие правила определения тока I через токи I_j образующих фрагментов.

Цель работы – представить выражение для определения действующего значения тока утечки на землю, состоящего из совокупности фрагментов во времени, и рассмотреть аспекты применения корректного определения.

Результаты исследований. Наблюдению тока утечки $i(t)$ фрагментами $i_j(t)$ в промежутках времени $t \in [t_{j-1}, t_j]$, $j = \overline{1, n}$ с суммарной продолжительностью $T = t_n - t_0$ соответствует запись

$$i(t) = \sum_{j=1}^n i_j(t \in [t_{j-1}, t_j]). \quad (5)$$

Среднеквадратичные значения тока $i(t)$ и его фрагментов $i_j(t)$ по определению равны соответственно

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad (6)$$

и

$$I_j = \sqrt{\frac{1}{\Delta T_j} \int_{t_{j-1}}^{t_j} i_j^2(t) dt}, \quad \Delta T_j = t_j - t_{j-1}. \quad (7)$$

Выражение для расчета величины I через значения I_j фрагментов может быть получено путем прямых преобразований [6]. Другой, более короткий и наглядный путь заключается в применении закона сохранения энергии, согласно которому энергия, поглощаемая сопротивлением $R = const$ в цепи протекания тока I за суммарный промежуток времени T , состоит из суммы порций энергии образующих фрагментов I_j длительностью ΔT_j , то есть:

$$I^2 RT = \sum_{j=1}^n I_j^2 R \Delta T_j. \quad (8)$$

Из (8) сразу получаем искомое выражение

$$I = \sqrt{\sum_{j=1}^n \frac{\Delta T_j}{T} I_j^2}. \quad (9)$$

В нем квадраты значений I_j суммируются с весовыми коэффициентами $\Delta T_j/T$, что подчеркивает взаимовлияние фрагментов на конечный результат и указывает на необходимость учета всех фрагментов, не пренебрегая некоторыми из них из-за кажущейся малости [2]. В сущности ошибок, возникающих в силу упрощений и применения «эквивалентного» критерия (3), легко убедиться на примере определения нормы кратковременного тока с помощью математического моделирования переходного процесса в системе «электрическая сеть – аппарат защиты от токов утечки с устройством компенсации емкостной составляющей». Математическое моделирование позволяет обойтись без спорных допущений и находить норму значе-

ния тока I_K путем подбора индуктивности устройства компенсации до выполнения базового критерия (1). Параметры моделируемой системы приняты аналогичными расчету нормы кратковременного тока I_K в работе [2]: номинальное напряжение электрической сети – 660 В, сопротивление цепи утечки в конечном присоединении электрической сети – 1 кОм; предельная общесетевая емкость изоляции – 1 мкФ на фазу; емкость изоляции конечного присоединения – 0,15 мкФ на фазу; время защитного отключения электрической сети – 0,2 с; коэффициент снижения напряжения электрической сети после момента защитного отключения – 0,83; постоянная времени снижения электродвижущей силы электродвигателя в конечном присоединении – 1 с; коэффициент отношения напряжения отключения присоединения к номинальному напряжению электрической сети – 0,5; индуктивность, омическое сопротивление и емкость разделительного конденсатора в последовательной схеме замещения устройства компенсации – 5,1 Гн, 150 Ом и 10 мкФ соответственно; электродвижущая сила и омическое сопротивление в последовательной схеме замещения устройства контроля сопротивления изоляции постоянным током, включенной параллельно разделительному (по постоянному току) конденсатору – 165 В и 16 кОм соответственно.

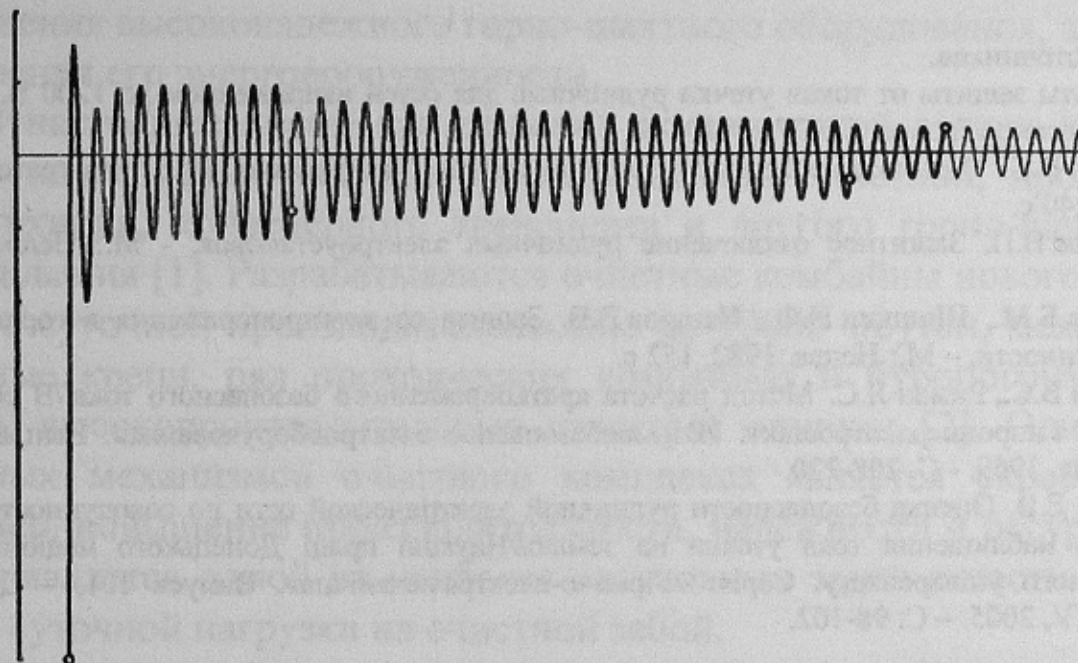


Рисунок – Результат моделирования тока утечки во времени. Цена деления по оси Y – 0,1 А.

На рисунке маркерами обозначены слева направо моменты: появления тока утечки на землю, защитного отключения электрической сети (через 0,2 с), отключения присоединения (через 0,5 с после об-

щесетевого отключения), снижения действующего тока утечки (в течение полного колебания) к расчетному безопасному значению 0,025 А. Последний маркер соответствует концу промежутка времени оценки эффективности снижения величины тока утечки по критерию (1). Оцениваемый процесс соответствует условию $I * T = 0,05 \text{ А} * \text{с}$. При этом значение тока I_k на периоде колебания перед защитным отключением равно 0,07 А. Данное значение не является окончательным, но уже существенно жестче оценки по критерию (3), что подчеркивает актуальность применения корректного определения величины действующего тока I .

Выводы. 1) Действующее значение тока в течение суммарного времени протекания составляющих фрагментов равно корню квадратному из суммы квадратов действующих значений тока каждого фрагмента с весовым коэффициентом его доли в суммарном промежутке времени.

2) Норма действующего значения кратковременного (по [1]) тока утечки на землю, как косвенного критерия эффективности аппаратов защиты с устройством компенсации емкостной составляющей тока утечки для электрических сетей напряжением 660 В, составляет не более 0,07 А. Норма подлежит уточнению применительно к параметрам контролируемой системы «электрическая сеть – аппарат защиты».

Список источников.

1. Аппараты защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В. Общие технические условия. ГОСТ 22929-78.
2. Дзюбан В.С. Взрывозащищенные аппараты низкого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1993. 240 с.
3. Колосюк В.П. Защитное отключение рудничных электроустановок. - М.: Недра, 1980. 334 с.
4. Ягудаев Б.М., Шишкин Н.Ф., Назаров В.В. Защита от электропоражения в горной промышленности. – М.: Недра, 1982. 152 с.
5. Дзюбан В.С., Риман Я.С. Метод расчета кратковременного безопасного тока//В сб. науч. трудов Гипронисэлектрошахт: «Взрывобезопасное электрооборудование». Вып. 6. – М.: Энергия, 1969. - С. 208-220.
6. Сергин Е.В. Оценка безопасности рудничной электрической сети по совокупности фрагментов наблюдения тока утечки на землю//Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Гірничо-електромеханічна». Випуск 101, – Донецьк: ДонНТУ, 2005. – С. 98-102.

Дата поступления статьи в редакцию: 31.10.06