

УДК 621.316.9.064.22

## ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ РУДНИЧНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ПО СОВОКУПНОСТИ ФРАГМЕНТОВ НАБЛЮДЕНИЯ ТОКА УТЕЧКИ НА ЗЕМЛЮ

Сергин Е.В.,

Институт прикладной математики и механики НАН Украины

*Представлена корректная оценка интегрального показателя безопасности тока утечки на землю в рудничной электрической сети при дроблении наблюдений во времени.*

*Presented is the correct estimation of integral safety-index of leakage-on-ground current in a mine electrical network, when observations are split along the time.*

**Постановка проблемы.** Согласно стандарту [1] безопасность защищаемой рудничной электрической сети считается приемлемой при соблюдении критерия

$$I * T \leq 50 \text{ мА} * \text{с}, \quad (1)$$

где  $I$  - среднеквадратичное значение однофазного тока утечки на землю через расчетное сопротивление тела человека в течение времени протекания  $T$ . Стандарт скупое предписывает оценивать интегральный, по сути, показатель электробезопасности  $I * T$  методом осциллографирования. В математическом отношении искомая оценка достаточно очевидна в случае наблюдения (осциллографирования) тока утечки одним фрагментом в течение требуемого промежутка времени и не столь очевидна в случае наблюдения того же процесса несколькими смежными фрагментами.

При дроблении наблюдений возникает задача корректного определения среднеквадратичного значения тока утечки за суммарный промежуток времени. Дробление наблюдений может потребоваться как при экспериментальных исследованиях, например, в случае использования цифровых регистрирующих приборов с недостаточной длительностью записи, так и при теоретических исследованиях.

**Анализ исследований и публикаций.** Методический прием дробления наблюдений тока утечки на фрагменты применялся уже на стадии становления системного изучения вопросов электробезопасности. Так, в работе [2] фрагменты наблюдений использованы для упрощения определения порций энергии, поглощаемой сопротивле-

нием в цепи протекания тока утечки, с последующим сравнением суммарного значения порций с допустимым значением, заданным на основе принятого в то время критерия безопасности электрического тока. Выполненный в размерности энергии анализ корректен, так как основан на законе сохранения энергии.

В более поздних работах [3-5] анализ электробезопасности выполнен также с использованием нескольких фрагментов наблюдения, однако в размерности количества электричества, соответствующей новому критерию (1). Следует отметить, что из-за совпадения размерности показатель  $I * T$  неуместно именуется в [1] количеством электричества – физической величиной, характеризующей процесс электролиза. Кроме того, применение термина «количество электричества» повлекло за собой серьезную методическую ошибку – анализу электробезопасности по аналогии с законом электролиза. Об этом свидетельствует необоснованная замена в работах [3-5] критерия (1) «эквивалентным» критерием

$$\sum_{j=1}^n I_j * \Delta T_j \leq 50 \text{ мА} * \text{с}, \quad (2)$$

где  $n$  - число фрагментов наблюдения тока утечки;  $I_j$  - среднеквадратичное значение фрагмента тока утечки в промежутке времени наблюдения  $\Delta T_j$ . Действительно, при

$$T = \sum_{j=1}^n \Delta T_j \quad (3)$$

показатели безопасности в левых частях условий (1) и (2) тождественно равны в случае  $I_j = I = const$ , характерном для процесса электролиза постоянным стабильным током, но не соответствующем колебательному току утечки с изменяющейся амплитудой.

Определение среднеквадратичного значения тока утечки является, как известно, нелинейной вычислительной операцией, в связи с чем замена критерия (1) на критерий (2) некорректна. Таковую замену можно признать допустимой только в случае получения более жесткой оценки электробезопасности, что подлежит проверке.

**Цель работы** – представление корректной оценки безопасности рудничной электрической сети по совокупности фрагментов наблюдения тока утечки на землю.

**Результаты исследований.** Оценка интегрального показателя электробезопасности  $I * T$  при известном  $T$  сводится к определению среднеквадратичного значения тока утечки  $i(t)$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}. \quad (4)$$

Результату наблюдения тока  $i(t)$  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

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

Тогда (4) с учетом (5) и линейности операции интегрирования преобразуется к пригодному для большинства расчетов виду

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{j=1}^n \int_{t_{j-1}}^{t_j} i_j^2(t) dt}. \quad (6)$$

Для определения  $I$  через значения  $I_j$  фрагментов замечаем, что

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

где  $\Delta T_j = t_j - t_{j-1}$ .

Подставляя (7) в (6) получаем выражение

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{j=1}^n \Delta T_j I_j^2}, \quad (8)$$

по которому следует определять среднеквадратичное значение  $I$  тока утечки на требуемом интервале времени  $T$  через  $n$  среднеквадратичных значений  $I_j$  фрагментов наблюдения в промежуточных интервалах времени  $\Delta T_j$ ,  $j = \overline{1, n}$ .

Искомую корректную оценку интегрального показателя электробезопасности, отвечающей стандарту [1], получаем из (8) с учетом (3) в виде:

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

Оценка (9) по сравнению с альтернативной по [3-5] оценкой  $\sum_{j=1}^n \Delta T_j I_j$  дает более высокие значения, то есть

$$\sqrt{\left( \sum_{j=1}^n \Delta T_j \right) \sum_{j=1}^n \Delta T_j I_j^2} \geq \sum_{j=1}^n \Delta T_j I_j. \quad (10)$$

Покажем справедливость неравенства (10) эквивалентными преобразованиями.

Возведение в квадрат левой и правой частей неравенства (10) дает

$$\sum_{j=1}^n \Delta T_j^2 I_j^2 + \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{n-k} \Delta T_j \Delta T_{j+k} (I_j^2 + I_{j+k}^2) \geq \sum_{j=1}^n \Delta T_j^2 I_j^2 + 2 \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{n-k} \Delta T_j \Delta T_{j+k} I_j I_{j+k}. \quad (11)$$

Далее, после переноса в неравенстве (11) правой части в левую часть и применения сокращенной записи умножения многочленов, получаем

$$\sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{n-k} \Delta T_j \Delta T_{j+k} (I_j - I_{j+k})^2 \geq 0. \quad (12)$$

Выражение (12) справедливо для любых среднеквадратичных значений  $I_j$ ,  $j = \overline{1, n}$  фрагментов тока утечки поскольку квадрат их парных сравнений  $(I_j - I_{j+k})^2$ ,  $k = \overline{1, n-1}$ ,  $j = \overline{1, n-k}$  всегда положителен, а промежутки времени  $\Delta T_j$ ,  $j = \overline{1, n}$  положительны по смыслу.

Таким образом, корректная оценка интегрального показателя электробезопасности (9) является более жесткой по сравнению с альтернативной оценкой каждого фрагмента наблюдения с последующим суммированием:  $\sum_{j=1}^n \Delta T_j I_j$ . Согласно (12) совпадение сравниваемых оценок может наступить только в случае  $I_j - I_{j+k} = 0$ , что, как

уже отмечалось, маловероятно для тока утечки с изменяющейся амплитудой при защитном отключении электрической сети.

Продемонстрируем применение оценки (9) на примере реального процесса. На рисунке представлена осциллограмма тока утечки на землю через сопротивление 1 кОм в электрической сети частотно-регулируемого привода подачи добычного угольного комбайна УКН400 во время движения в лаве на холостом ходу и максимальной скорости. Защитное отключение сети с запирающим преобразователем частоты обеспечивалось аппаратом АКП.1. Предположим, испытатель наблюдает такой процесс двумя фрагментами, имея в распоряжении регистрирующие приборы с ограниченным объемом памяти. Одним прибором с частотой дискретизации 50 кГц и выше регистрируется первый, короткий фрагмент процесса, содержащий состав-

ляющие на частотах около 2-10 кГц и заканчивающийся моментом записи преобразователя частоты. Другим же прибором регистрируется оставшийся низкочастотный, более длительный фрагмент процесса за счет снижения частоты дискретизации. Моменту окончания второго фрагмента соответствует снижение среднеквадратичного значения полного колебания тока к безопасному значению 25 мА [1].

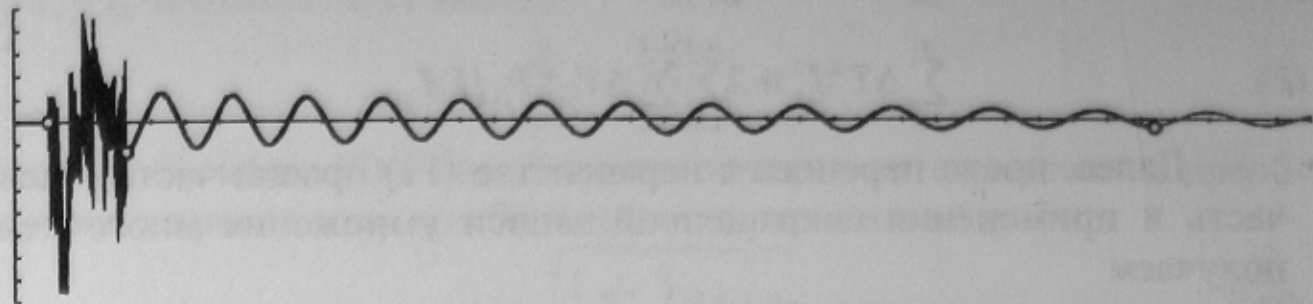


Рисунок – Осциллограмма реального процесса. Цена делений по осям X и Y: 10 мс и 100 мА. На границах фрагментов – маркеры.

Среднеквадратичные значения и длительности фрагментов тока утечки составили 202 мА и 0,02 с, а также 55 мА и 0,3 с. При этом интегральный показатель электробезопасности (9) равен 23,5 мА\*с. «Эквивалентная» же оценка по сумме показателей каждого фрагмента составляет 20,5 мА\*с, что на 12,8 % ниже реального значения.

**Выводы.** 1) При совокупности фрагментов наблюдения тока утечки на землю безопасность рудничной электрической сети должна определяться согласно представленной оценке (9), основанной на определении среднеквадратичного значения тока в течение общей продолжительности фрагментов.

2) Применение распространенной оценки безопасности в виде суммы оценок отдельных фрагментов методически ошибочно и дает заниженный результат.

#### 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., Риман Я.С. Метод расчета кратковременного безопасного тока//В сб. науч. трудов Гипронисэлектрошахт: «Взрывобезопасное электрооборудование». Вып. 6. – М.: Энергия, 1969. - С. 208-220.
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. Взрывозащищенные аппараты низкого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1993. 240 с.