

УДК 621

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ В ВЫКЛЮЧАТЕЛЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Докт. физ. наук, проф. ЖУКОВСКИ П.,  
канд. техн. наук, доц. КАРВАТ Ч., ассист. КОЗАК Ч.

*Люблинский технический университет (Польша)*

В электрических аппаратах, предназначенных для коммутации, при значениях напряжения на контактной паре выше 12–15 В и силе тока более 0,4–0,9 А возникает электрическая дуга. Ее систематическое воздействие на поверхность контактов приводит к их износу и является одним из основных факторов, определяющих надежность работы аппарата.

Одна из важных характеристик электрической дуги – ее энергия, величина которой может быть мерой воздействия дуги на контакты и аппарат в целом, а также зависит от материала контактов и покрытия, структуры контактной поверхности, эффективности дугогашения, номинальных значений коммутируемых напряжений и силы тока; мгновенного значения силы тока в моменте начала размыкания и направления ее изменения на спадающей или возрастающей ветви синусоиды.

При высокой эффективности дугогашения время горения дуги должно быть меньше времени одного полупериода. В этом случае в некоторой части размыканий, для которых мгновенные значения напряжения и силы тока окажутся меньше приведенных выше значений, электрическая дуга не возникает.

Таким образом, энергия электрической дуги зависит от многих конструктивных характеристик аппарата. Найти ее среднее значение можно, например, на основании трудоемкого анализа и численного интегрирования большого числа осциллограмм.

Для определения средней энергии электрической дуги выключателей переменного тока нами разработан новый метод анализа вольт-температурной характеристики выключателя, работающего в повторно-кратковременном режиме. Были изучены выключатели переменного тока для приборов с номинальными параметрами:  $I_n = 10(4) \text{ А}$ ;  $U_n = 250 \text{ В}$ . Экспериментальная установка, на которой проведены исследования, описана в [1]. Размыкание и замыкание контактов выключателя осуществляются с помощью электромагнита. Его работой управляет электронное реле времени. Длительность интервалов времени замкнутого и разомкнутого со-

стояний устанавливалась с точностью  $\pm 1$  мс. Погрешность измерения падения напряжения на контактах выключателя  $\Delta U$  и температуры  $T$  составляет  $\pm 10$  мкВ и  $0,1$  °С соответственно. Измерения  $\Delta U$  и  $T$  производятся в каждом цикле коммутации при замкнутых контактах и регистрируются в памяти персонального компьютера. Переходное сопротивление контактной пары для каждого цикла рассчитывается на основании измеренных величин  $\Delta U$  и  $I$ . Установка позволяет осуществлять также непрерывное протекание тока заданной силы и измерение зависимости температуры выключателя от времени.

При протекании тока  $I$  происходит нагревание электрического аппарата. Превышение его температуры  $\Delta T$  по сравнению с температурой окружающей среды  $T_c$  в случае естественной конвекции можно описать формулой [2]

$$\Delta T = T_0 \exp\left(-\frac{t}{\Omega}\right) + T_u \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\Omega}\right)\right), \quad (1)$$

где  $T_0$  – превышение температуры в начале процесса (при  $t = 0$ );  $\Omega$  – постоянная времени нагрева;  $T_u$  – установившееся превышение температуры;

$$T_u = \frac{P}{K_T S} = \frac{I^2 R_p}{K_T S}, \quad (2)$$

$P$  – мощность, выделяемая в аппарате;  $R_p$  – переходное сопротивление аппарата;  $K_T$  – коэффициент теплообмена;  $S$  – поверхность теплообмена.

Постоянная времени нагревания

$$\Omega = \frac{C}{K_T S}, \quad (3)$$

где  $C$  – теплоемкость тела.

Постоянную времени выключателя трудно рассчитать с достаточной высокой точностью. Поэтому надежнее определять ее экспериментально из временной зависимости температуры нагревания при протекании электрического тока и остывания после размыкания контактов.

Для определения средней энергии электрической дуги проанализируем изменение температуры выключателя в режиме повторно-кратковременной работы. Пусть цикл коммутации  $t_c$  состоит из времени протекания тока  $t_p$  и времени паузы  $t_b$ . Если выбрать длительность цикла  $t_c \ll \Omega$ , то за время  $t > 4\Omega$  от начала циклической работы аппарата устанавливается квазистационарный режим, во время которого будут наблюдаться пульсации температуры  $\delta T \ll T_u - T_0$ , связанные с нагреванием или охлаждением аппарата.

Энергия, выделяемая в выключателе во время одного цикла:

$$W = W_D + I^2 R_p t_p, \quad (4)$$

где  $W_D$  – средняя энергия электрической дуги, приходящаяся на один цикл.

Средняя мощность тепловой энергии в течение одного цикла

$$P = \frac{W}{t_c} = \frac{W_D}{t_c} + \frac{I^2 R_p t_p}{t_c}. \quad (5)$$

В квазистационарном режиме установившееся превышение температуры, согласно (2), (3) и (5):

$$T_u = \frac{P\Omega}{C} = \frac{W_D\Omega}{Ct_c} + \frac{I^2 R_p t_p \Omega}{Ct_c}. \quad (6)$$

При длительной эксплуатации изменяются величина переходного сопротивления  $R_p$  и температура выключателя [3].

Суть предлагаемого метода определения средней энергии электрической дуги  $W_D$  основана на измерении  $R_p$  и  $T$  для большого числа циклов  $N$ . Если изменения  $R_p$  происходят сравнительно медленно, то можно найти средние значения  $R_p$  и  $T_u$  для каждого очередных  $n$  циклов. Число  $n$  выбирается следующим образом:

$$\frac{4\Omega}{t_c} < n < N. \quad (7)$$

Таким образом получается  $m = N/n$  пар величин  $R_p^i$  и  $T_u^i$ . На их основании можно построить график зависимости

$$T_u^i = f(R_p^i). \quad (8)$$

График (8) должен быть, согласно (6), линейной функцией:

$$y = ax + b, \text{ причем } a = \frac{I^2 t_p \Omega}{Ct_c}, \quad b = \frac{W_D}{Ct_c}. \quad (9)$$

Решение уравнения (9) можно найти, экстраполируя зависимость (9) к  $y = T_u = 0$ . Отсюда:

$$\frac{W_D\Omega}{Ct_c} = -\frac{I^2 t_p \Omega}{Ct_c} R_p(T_u = 0). \quad (10)$$

Тогда

$$W_D = -I^2 t_p R_p(T_u = 0). \quad (11)$$

Для проверки изложенных выше соображений были исследованы две группы выключателей. Первая – с медными контактами, вторая – с гальванически покрытыми серебром. На рис. 1 представлена зависимость температуры от времени, измеренная на выводе (конекторе) выключателя, верхняя часть которого является неподвижным разрывным контактом. Рост

температуры вызван протеканием тока, а ее уменьшение произошло после его выключения. Обе части зависимости можно с высокой точностью описать постоянной времени  $\Omega = (80 \pm 5)$  с. Сплошная линия на рис. 1 представляет зависимости, рассчитанные по (1). Установлено, что выключатели с контактами, гальванически покрытыми серебром, имеют постоянную времени нагревания той же величины.

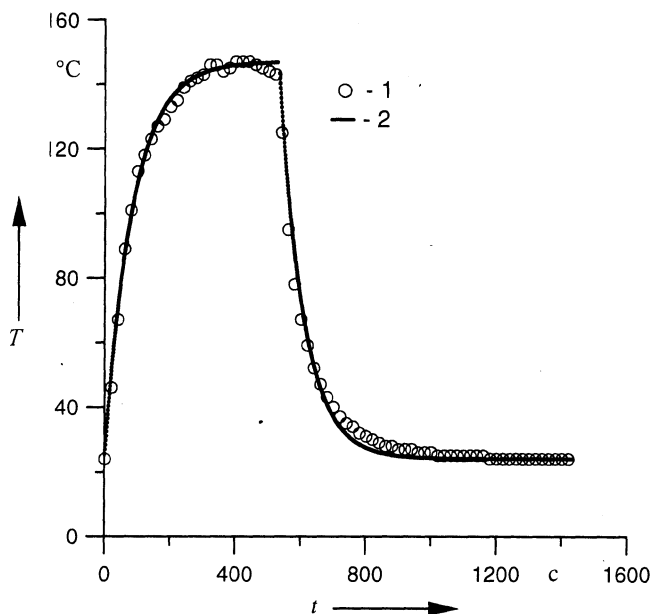


Рис. 1. Изменение температуры вывода неподвижного разрывного контакта при протекании номинальной силы тока и после выключения. Выключатель с медными контактами. На рис. обозначена каждая 20-я измеренная точка: 1 – экспериментальные результаты; 2 – расчеты по формуле (1) для постоянной времени нагревания  $\Omega = 80$  с

Использованный в установке цифровой вольтметр позволяет измерять падение напряжения на выключателе для времени не менее 0,8 с. Для ликвидации возможных ошибок измерений мы выбрали время протекания тока  $t_p = 1,5$  с, паузы  $t_b = 0,78$  с, а время цикла  $t_c = t_p + t_b = 2,28$  с.

Тогда на основании критерия (7) можно определить число циклов  $n$ , для которого проводим усреднение:

$$n > \frac{4\Omega}{t_c} = 150.$$

Поскольку при  $t = 4\Omega$  температура составляет  $0,98T_u$ , для уменьшения погрешности определения  $T_u$  выбрано  $n = 500$ . Тогда за число циклов коммутации, позволяющее получить достоверные значения функции (8), может быть принято  $N = 5000$ .

На рис. 2 приведены экспериментальные значения  $T_u^i = f(R_p^i)$  для выключателя с медными контактами, а также их аппроксимация линейной функцией, полученной методом наименьших квадратов:

$$T = 1,55R_p + 47,52. \quad (12)$$

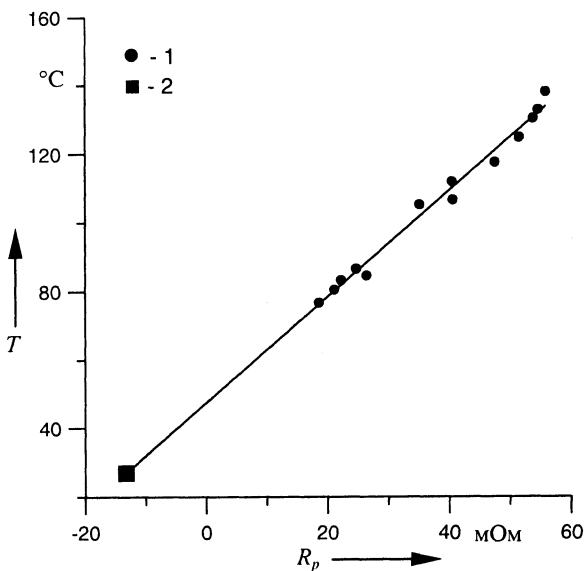


Рис. 2. Зависимость средней температуры вывода от среднего значения переходного сопротивления. Усреднение для каждых 500 циклов коммутации. Выключатель с медными контактами: 1 – экспериментальные значения; 2 – экстраполяция к температуре окружающей среды 27 °С;  $I = 7,68$  А;  $t_p = 1,5$  с;  $t_b = 0,78$  с

Экстраполируя функцию (12) к значению температуры окружающей среды ( $T_u = 0$ ), получим  $R_p(T_u = 0) = -13,27$  МОм, а из формулы (11)  $W_D = 1,78$  Дж.

На рис. 3 представлены аналогичные результаты, полученные для выключателя с контактами, гальванически покрытыми серебром. Как видно из рисунка, для циклов от 1 до 6500 аппроксимация экспериментальных результатов имеет вид

$$T = 1,33R_p + 37,61. \quad (13)$$

Это означает, что средняя энергия электрической дуги  $W_D = 0,71$  Дж. Для циклов от 6500 до 10000 получено

$$T = 1,28R_p + 68,34. \quad (14)$$

Из сравнения выражений (13) и (14) следует, что тепловые свойства выключателя для циклов от 6500 до 10000 не изменились в пределах ошибки измерений, поскольку коэффициенты  $a$  в обеих формулах различаются всего на 4 % (см. также (9)). Преобразуя (9), получим

$$b = \frac{aW_D}{I^2 t_p}. \quad (15)$$

Как следует из (15), увеличение  $b$  для циклов от 6500 до 10000 при неизменных значениях  $a$ ,  $I$  и  $t_p$  вызвано ростом средней энергии электрической дуги до  $W_D = 2,98$  Дж.

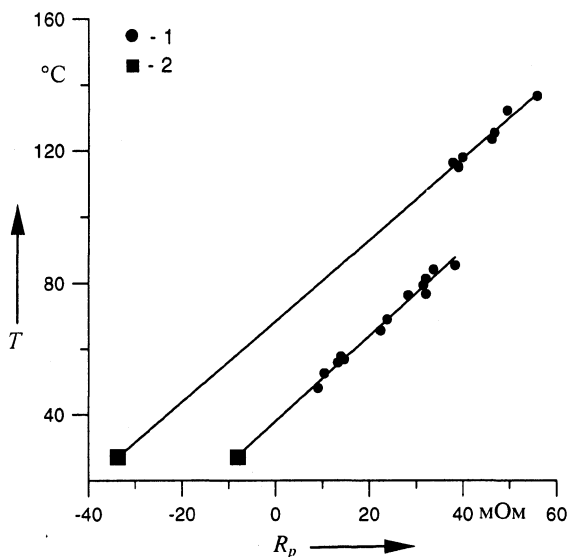


Рис. 3. Зависимость средней температуры вывода от среднего значения переходного сопротивления. Усреднение для каждых 500 циклов коммутации. Выключатель с контактами, гальванически покрытыми серебром: 1 – экспериментальные значения; 2 – экстраполяция к температуре окружающей среды 27 °С;  $I = 9,48$  А;  $t_p = 1,5$  с;  $t_b = 0,78$  с

Возрастание средней энергии  $W_D$  может быть связано с уменьшением эффективности дугогашения выключателя, например вследствие снижения упругости пружины, размыкающей контакты. В этом случае скорость расхождения контактов уменьшается, что приводит к повторному возникновению дуги в нескольких полупериодах, а следовательно, к увеличению средней энергии дуги.

## ВЫВОД

В статье представлен способ определения средней энергии электрической дуги переменного тока из измерений вольт-температурной характеристики выключателя при повторно-кратковременном режиме работы. Предложенный способ может быть полезен при испытаниях новых материалов контактов или их покрытий, а также при анализе деградации коммутационных устройств во время эксплуатации\*.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Карват Ч. Применение ионных технологий для модификации материалов и элементов электротехнических устройств // Взаимодействие излучений с твердым телом: Материалы IV междунар. конф. – Мн., 2001. – С. 347–350.
2. Чунихин А. А. Электрические аппараты. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 720 с.
3. Карват Ч., Жуковски П., Меконнен В. Мегерса. Изменения переходного сопротивления выключателей для приборов в процессе эксплуатации // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2001. – № 2. – С. 43–50.

Поступила 12.12.2002

\* Авторы выражают благодарность Комитету научных исследований Польши за поддержку работы (грант № 4Т10А03723).