

## О ТЕРМИЧЕСКОМ ДЕЙСТВИИ ТОКОВ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ СРЕДНИХ НАПРЯЖЕНИЙ, ЗАЩИЩАЕМЫХ ВАКУУМНЫМИ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯМИ

Клименко Б.В., д.т.н., проф., Байда Е.И., к.т.н., доц., Гречко А.М., Боев С.А.  
 Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"  
 Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Электрические аппараты"  
 тел. (057) 707-62-81, e-mail: kbv@kpi.kharkov.ua, baida@kpi.kharkov.ua, grechko@kpi.kharkov.ua.

*Проведено аналіз залежності величини інтегралу Джоуля від повного часу розмикання вакуумним вимикачем кола симетричного трифазного КЗ за допомогою чисельного рішення відповідних диференціальних рівнянь. Розроблено математичну модель, яка дозволяє отримати залежність між швидкодією вакуумного вимикача та термічною стійкістю у режимі КЗ струмопроводів. Знайдено оптимальне значення повного часу розмикання контактів вакуумного вимикача з погляду мінімального значення інтегралу Джоуля.*

*Проведен анализ зависимости величины интеграла Джоуля от полного времени размыкания вакуумным выключателем цепи симметричного трехфазного КЗ путем численного решения соответствующих дифференциальных уравнений. Разработана математическая модель, позволяющая получить зависимость между быстродействием вакуумного выключателя и термической стойкостью в режиме КЗ токопроводов. Найдено оптимальное значение полного времени размыкания контактов вакуумного выключателя с точки зрения минимального значения интеграла Джоуля.*

### ВВЕДЕНИЕ

Современные электроустановки средних напряжений (6 – 35 кВ) характеризуются большими значениями токов коротких замыканий (КЗ), которые достигают десятков тысяч ампер. Отключающая способность выключателей, защищающих эти цепи, должна соответствовать уровню токов КЗ в этих установках. При этом выбор типа выключателя должен производиться не только с учетом его отключающей способности, но и с учетом его возможностей в части ограничения термического действия тока КЗ на защищаемые выключателем токопроводы. В настоящее время на рынке выключателей средних напряжений доминируют вакуумные выключатели [1]. Это связано не только с высокой отключающей способностью таких выключателей, их высокой надежностью, коммутационной износостойкостью и относительно малыми габаритами, но и с успешным решением тех проблем (в первую очередь, проблемы среза тока, которая порождала появление опасных коммутационных перенапряжений, а также проблемы приваривания контактов), которые ранее ограничивали возможности их применения.

Важной положительной особенностью вакуумных выключателей является их уникальная эффективность дугогашения, которая обеспечивается за счет очень высокой скорости восстановления электрической прочности дугового промежутка после перехода тока через нулевое значение. По данным [1], электрическая прочность межконтактных промежутков вакуумных камер при расстояниях между контактами порядка 10 мм составляет приблизительно (40...50) кВ/мм, причем большие значения соответствуют малым зазорам. При размыкании контактов в вакуумной камере, между ними, вследствие притока паров контактного материала в межконтактный промежуток, возникает электрическая дуга, а после перехода тока через ноль пары металла очень быстро (за время порядка нескольких микросекунд) конденса-

руются на поверхности контактов, в результате чего межконтактный промежуток теряет проводящие свойства. По данным [2], за первые 1...2 мкс восстанавливается приблизительно половина общей диэлектрической прочности, а за 6...8 мкс электрическая прочность восстанавливается полностью. При такой высокой скорости восстановления электрической прочности электрическая дуга гаснет при первом же прохождении тока через ноль и не возникает в течение последующих полупериодов изменения напряжения сети. Благодаря указанным особенностям дугогашения, вакуумные выключатели уменьшают термическое действие тока короткого замыкания на токопроводы по сравнению с другими типами выключателей (воздушные, масляные и элегазовые, в которых дуга горит, как правило, несколько полупериодов) при одном и том же собственном времени размыкания контактов.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Степень термического воздействия тока КЗ на проводники и токопроводы электрических аппаратов определяется значением интеграла Джоуля  $G$ :

$$G = \int_0^{t_K} i^2 \cdot dt, \quad (1)$$

где  $i$  – мгновенное значение тока КЗ,  $t_K$  – время протекания тока КЗ.

Размерность интеграла Джоуля –  $A^2 \cdot c = Дж/Ом$ . Таким образом, интеграл Джоуля соответствует энергии, которая выделилась бы в резисторе с сопротивлением в 1 Ом, если бы через этот резистор протекал ток короткого замыкания  $i$ .

Время протекания тока КЗ складывается из времени реагирования релейной защиты или датчиков выключателя  $t_3$  (время от момента возникновения короткого замыкания до момента выдачи команды на отключение выключателя), собственного времени размыкания выключателя  $t_C$  (время от момента выдачи команды на отключение выключателя до момента

размыкания его контактов) и времени гашения электрической дуги  $t_d$  (время от момента размыкания контактов выключателя до момента погасания электрических дуг на всех его контактах):

$$t_k = t_3 + t_c + t_d = t_p + t_d, \quad (2)$$

где  $t_p = t_3 + t_c$  – полное время размыкания выключателя (время от момента возникновения короткого замыкания до момента размыкания контактов выключателя).

Считается (и, на первый взгляд, вполне обоснованно), что повышение быстродействия выключателя, то есть уменьшение времени  $t_p$ , обязательно приводит к уменьшению термического действия тока короткого замыкания на защищаемые выключателем электрические цепи. Как это ни странно может показаться на первый взгляд, при коммутации токов трехфазных КЗ вакуумными выключателями в сетях средних напряжений, в определенных ситуациях, уменьшение времени  $t_p$  может приводить к увеличению интеграла Джоуля и наоборот.

Цель работы – анализ зависимости интеграла Джоуля от полного времени размыкания вакуумным выключателем цепи симметричного трехфазного КЗ путем численного решения соответствующих дифференциальных уравнений; разработка математической модели, которая позволит получить зависимость между быстродействием вакуумного выключателя и термической стойкостью в режиме КЗ токопроводов, которые защищаются вакуумными выключателями; нахождение оптимального времени начала размыкания контактов выключателя с точки зрения минимального значения интеграла Джоуля.

#### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В качестве расчетной схемы рассматривается включение выключателем  $Q$  трехфазного источника на короткое замыкание (рис. 1).

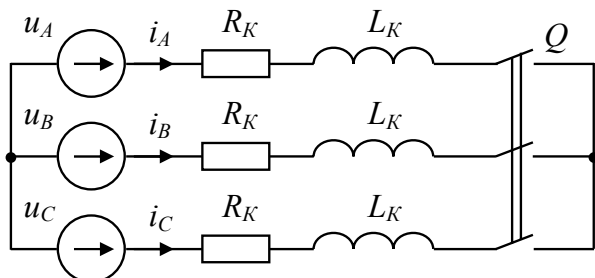


Рис. 1. Расчетная схема цепи симметричного трехфазного короткого замыкания

Напряжения источников представляют собой симметричную трехфазную систему:

$$u_A = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi); \quad (3)$$

$$u_B = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi + 2 \cdot \pi / 3); \quad (4)$$

$$u_C = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi + 4 \cdot \pi / 3), \quad (5)$$

где  $U_m$  – амплитуда фазного напряжения,  $\omega$  – круговая частота изменения напряжения,  $\psi$  – фаза момента начала КЗ.

Пассивные параметры цепи короткого замыкания  $R_k$  и  $L_k$  определялись, исходя из задаваемых действующих значений фазного напряжения  $U$ , ожидае-

мого установившегося тока короткого замыкания  $I$  и значения коэффициента мощности  $\cos \varphi$  цепи КЗ:

$$R_k = (U / I) \cdot \cos \varphi, \quad (6)$$

$$L_k = (U / I) \cdot \left( \sqrt{1 - (\cos \varphi)^2} \right) / \omega, \quad (7)$$

Характер переходных процессов в расчетной схеме зависит не только от параметров цепи, но и от начальных условий, а также от фазы начала короткого замыкания. Один из вариантов переходных процессов при замкнутых контактах выключателя иллюстрируют графики, приведенные на рис. 2.

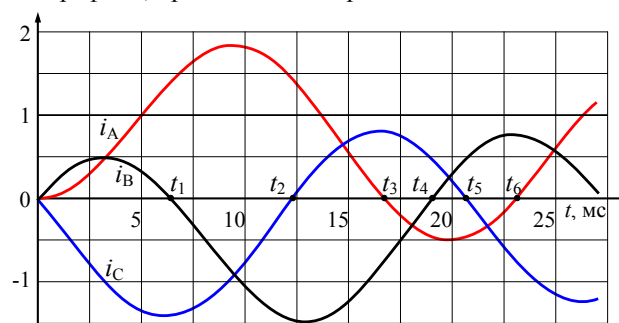


Рис. 2. Графики переходных процессов изменения фазных токов в расчетной цепи (в кратностях к амплитуде установившегося тока КЗ) при нулевых начальных условиях и при  $\psi = 0$

Моменты времени  $t_1, t_2, \dots, t_6$  соответствуют моментам перехода через ноль фазных токов при замкнутых контактах выключателя  $Q$ . Если же контакты выключателя размыкаются, то после размыкания контактов вид графиков фазных токов претерпевает определенные изменения, характер которых обусловлен особенностями коммутаций цепей средних напряжений в вакууме.

Об одной из этих особенностей уже упоминалось: дуга в вакууме гаснет при первом же переходе тока через ноль и не возникает в течение последующих полупериодов изменения напряжения источника. Другая особенность заключается в том, что вакуумная дуга в цепях средних напряжений практически не влияет на форму кривой тока. Это объясняется тем, что даже при токах десятки тысяч ампер, падение напряжения на вакуумной дуге мало по сравнению с фазным напряжением. По данным, приведенным в [2], при токах 14...25 кА падение напряжения на вакуумной дуге составляет 75...100 В, что не превышает 1,2...1,6% от действующего значения напряжения источника (min 6 кВ). Таким образом, можно считать, что и после размыкания контактов, вплоть до момента перехода тока через ноль в одной из фаз, графики изменения фазных токов практически не претерпят изменений.

#### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

После перехода тока через ноль в одной из фаз, например, в фазе В, схема переходит в однофазный режим (токи в фазах А и С – одинаковы), при этом графики токов в фазах А и С существенно изменятся, и после перехода тока в этих фазах через ноль дуги в соответствующих вакуумных камерах гаснут.

Учитывая указанные выше особенности коммутации в вакууме, можно утверждать, что характер кривых фазных токов практически не зависит от момента размыкания контактов при условии, что полное время размыкания лежит между двумя ближайшими моментами ( $t_j$  и  $t_{j+1}$ ) перехода через ноль фазных токов при замкнутых контактах выключателя  $Q$ :

$$t_j < t_p < t_{j+1}, \quad j = 0, 1, 2, \dots \quad (8)$$

Например, если полное время размыкания  $t_p$  уменьшить от 12 мс до 7,5 мс, то графики переходных процессов, а следовательно, и интеграл Джоуля не изменятся.

Графики изменения фазных токов, определенные с учетом указанных особенностей коммутаций в расчетной цепи, приведены на рис. 4.

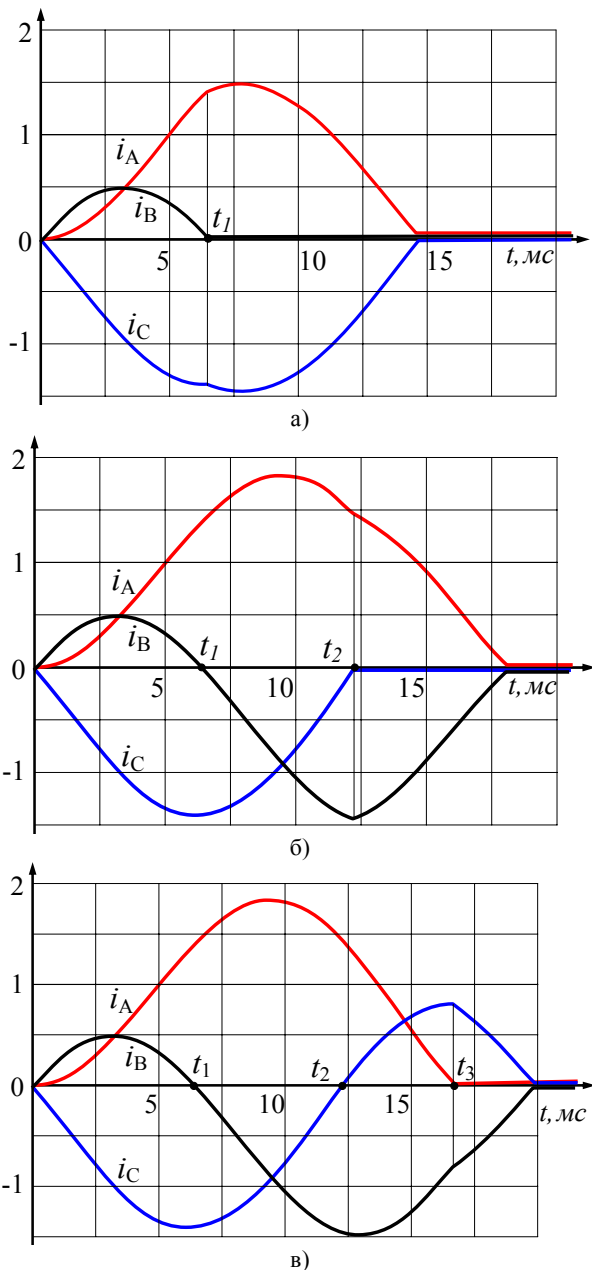


Рис. 4. Графики переходных процессов для различных значений полного времени размыкания контактов: а –  $t_p = 0 \dots 7$  мс; б –  $7 < t_p < 12$  мс; в –  $12 < t_p < 17$  мс

Анализ графиков, приведенных на рис. 4, позволяет сделать очень интересный вывод: уменьшение полного времени размыкания  $t_p$  в два раза – от 16 мс до 8 мс, уменьшает полное время отключения всего на 10% – от 20 до 18 мс, а вот максимальное значение интеграла Джоуля в фазах токопровода при этом не только не уменьшается, а даже возрастает. Действительно, результаты расчетов показывают, что, хотя при  $12 < t_p < 17$  мс (рис. 4,в) полное время отключения увеличивается, наибольший интеграл Джоуля имеет место не в фазах В и С, через которые ток течет 20 мс, а в фазе А, через которую ток течет только 17 мс. С другой стороны, при  $7 < t_p < 12$  мс (рис. 4,б) наибольший интеграл Джоуля имеет место тоже в фазе А, но ток в фазе в этом случае течет дольше – 18 мс, причем до 12 мс токи в фазе А одинаковы в обоих случаях, поэтому, несмотря на более быстрое размыкание контактов, интеграл Джоуля, а значит и тепловое действие тока КЗ на токопроводы, оказываются больше, чем в случае более позднего размыкания контактов (рис. 5).

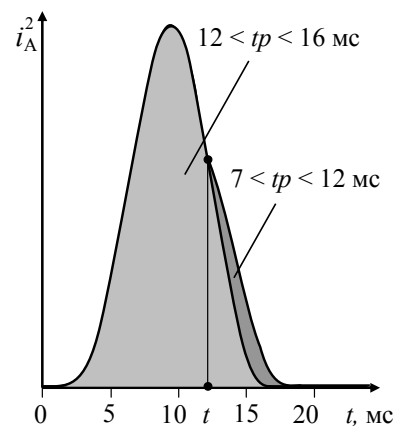


Рис. 5. Подынтегральная функция интеграла Джоуля при различных значениях полного времени размыкания контактов выключателя

На рис. 6–8 представлены зависимости наибольшего (из трех фаз) значения приведенного интеграла Джоуля  $G^*$  (интеграла Джоуля, отнесенного к квадрату действующего значения ожидаемого тока короткого замыкания) от полного времени размыкания  $t_p$  выключателя при различных значениях коэффициента мощности цепи короткого замыкания  $\cos\varphi$ .

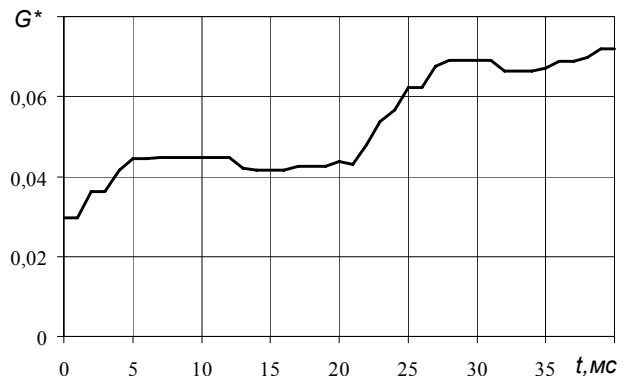


Рис. 6. Наибольшие значения интеграла Джоуля при  $\cos\varphi = 0,1$  и  $\psi = 0$

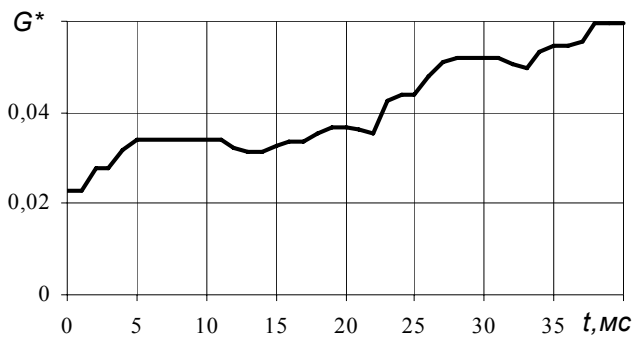


Рис. 7. Наибольшие значения интеграла Джоуля при  $\cos\varphi = 0,2$  и  $\psi = 0$

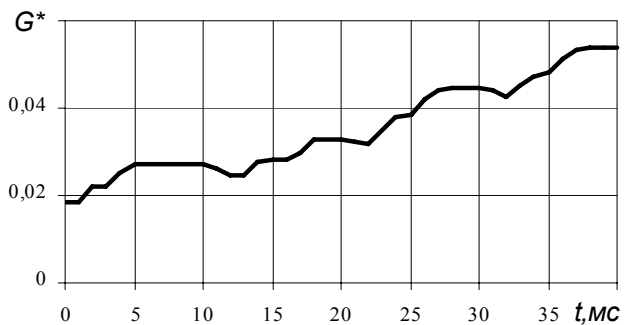


Рис. 8. Наибольшие значения интеграла Джоуля при  $\cos\varphi = 0,3$  и  $\psi = 0$

Зависимости, приведенные на рис. 6-8, имеют немонотонный, ступенчатый характер, хотя соблюдается общая тенденция возрастания интеграла Джоуля при увеличении полного времени размыкания  $t_p$ .

Ступенчатый характер этой зависимости наблюдается и при других начальных фазах короткого замыкания. Расчеты интегралов Джоуля при  $\psi = \pi / 4$ ,  $\psi = \pi / 2$  и  $\psi = 3 \cdot \pi / 4$  дали возможность построить огибающую наибольших значений интеграла Джоуля при  $\cos\varphi=0,1$  и различных начальных фазах  $\psi$  (рис. 9).

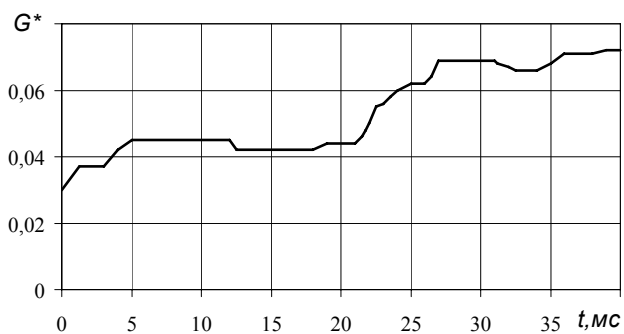


Рис. 9. Огибающая кривая наибольших значений интеграла Джоуля при  $\cos\varphi = 0,1$  и различных начальных фазах

Аналогичные расчеты были проведены и для других значений коэффициента мощности цепи короткого замыкания, равных 0,2 и 0,3. Характер зависимостей остался неизменным (немонотонным, ступенчатым), однако, значения интеграла Джоуля в этих случаях получались существенно меньшими, чем в цепи с  $\cos\varphi = 0,1$ .

Важной особенностью зависимости, приведенной на рис. 9, является наличие достаточно протяженных практически горизонтальных участков, по-

этому, если, например, полное время размыкания выключателя составляет 40 мс, то нет никакого смысла в уменьшении полного времени размыкания до 25 мс, а вот уменьшение полного времени размыкания до 20 мс приводит примерно к полуторакратному уменьшению интеграла Джоуля. Дальнейшее уменьшение полного времени отключения лишено смысла, поскольку это не приведет к уменьшению термического действия тока КЗ на токопроводы.

## ВЫВОДЫ

1. В данной работе проведен анализ зависимости величины интеграла Джоуля от полного времени размыкания вакуумным выключателем цепи симметричного трехфазного КЗ путем численного решения соответствующих дифференциальных уравнений.

2. Разработана математическая модель, которая позволяет получить зависимость между быстродействием вакуумного выключателя и термической стойкостью в режиме КЗ токопроводов, которые защищаются вакуумными выключателями.

3. Для вакуумных выключателей, осуществляющих коммутации в цепях средних напряжений, найдено оптимальное значение полного времени размыкания контактов выключателя с точки зрения минимального значения интеграла Джоуля, которое составляет приблизительно 22 мс.

4. Уменьшение полного времени размыкания ниже данного значения требует достаточно затратных технических решений, однако, не приводит к уменьшению термического действия токов КЗ на токопроводы. Такое время отключения можно получить только в относительно дорогостоящих выключателях с электромагнитным приводом и микропроцессорным управлением, однако, выигрыш – повышение эффективности защиты от токов КЗ – очевиден.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Евдокунин Г.А., Тилер Г. Современная вакуумная коммутационная техника для сетей среднего напряжения. – СПб: Издательство Сизова М.П., 2000. – 114 с., с илл.
- [2] Раховский В.И. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме. – М.: Наука, 1971.

Поступила 11.11.2006