

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОТКЛЮЧЕНИЯ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИМИ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯМИ ТОКООГРАНИЧИВАЮЩЕГО ИСПОЛНЕНИЯ

Байда Е.И., к.т.н., доц.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"  
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Электрические аппараты"  
тел. (057) 707-69-76, факс (057) 707-66-01, E-mail: baida@kpi.kharkov.ua

*У статті розглянуто питання моделювання відключення струмів короткого замикання струмообмежуючим автоматичним вимикачем з електродинамічним пристроєм за допомогою математичної моделі, створеної на базі теоретичних та експериментальних досліджень. Це дозволяє моделювати процес відключення електричного кола, розрахувати значення Джоулевого інтегралу з урахуванням часу гасіння електричної дуги, визначити час розімкнення контактів, оцінювати струмообмежуючу дію та суттєво скоротити об'єм натурних експериментів.*

*В статье рассматриваются вопросы моделирования отключения токов короткого замыкания токоограничивающим выключателем с электродинамическим устройством при помощи математической модели, созданной на базе теоретических и экспериментальных исследований. Это позволяет моделировать процесс отключения электрической цепи, рассчитать значения Джоулевого интеграла с учетом времени горения дуги, определить время размыкания контактов, оценить токоограничение и существенно сократить объем натурных экспериментов.*

Наиболее опасным аварийным режимом с точки зрения теплового и механического воздействия на токоподводящие линии и электрооборудование является режим трехфазного короткого замыкания (КЗ) на выводах выключателя. В случае "коротких" или мощных электрических цепей, токи КЗ в таком режиме достигают недопустимо больших величин. Для защиты токоподводящих линий и оборудования в таких цепях устанавливают автоматические выключатели (АВ) токоограничивающего исполнения. В этой связи, практический интерес представляет расчет переходных процессов в трехфазных электрических цепях, а так же процесс отключения такой цепи токоограничивающим АВ. Рассматриваемая цепь - трехфазная цепь, соединенная по схеме "звезда" с нулевым проводом. В самом общем случае, расчетная электрическая схема цепи показана на рис. 1, где  $u_A, u_B, u_C$  - фазные напряжения;  $R_l, L_l$  - параметры линии, включая параметры обмоток питающего трансформатора;  $R_n, L_n$  - параметры нагрузки;  $Q$  - контакты автоматического выключателя;  $R_{l0}, L_{l0}$  - параметры нулевого провода;  $i_A, i_B, i_C, i_0$  - токи соответствующих фаз и нулевого провода. Причем, полное сопротивление нулевого провода в три раза превышает сопротивление линейного провода.

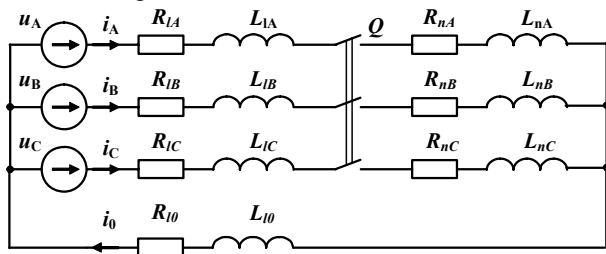


Рис. 1. Электрическая схема трехфазной цепи с нулевым проводом

Для трехфазного КЗ на выводах выключателя расчетная схема будет иметь вид, показанный на рис. 2.

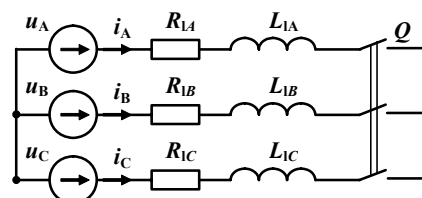


Рис. 2. Расчетная схема цепи в случае трехфазного КЗ на выводах выключателя

Расчет переходных режимов в случае трехфазного короткого замыкания на выводах выключателя осуществляется для соответствующих электрической схемы рис. 2. Сопротивления  $Z_l$  могут быть рассчитаны по действующему значению установившегося тока короткого замыкания, который принимался равным  $30 I_n$ , а коэффициент мощности  $\cos(\varphi_{КЗ})$  принимался равным 0,1.

Для расчета процесса гашения дуги токоограничивающим выключателем, прежде всего, необходимо определиться с конструкцией токоограничивающего устройства, которое играет решающую роль в процессе отключения электрической цепи. В настоящей работе будет рассмотрен АВ серии АЗ700 с двойной электродинамической петлей. При отключении токоограничивающим автоматическим выключателем электрической цепи будем исходить из следующих предположений и допущений:

- Время начала расхождения контактов рассчитывается на основании равенства сил контактного нажатия электродинамической силе токоограничивающего устройства, и для каждой фазы будет иметь свое значение.
- Время начала движения дуги рассчитывается на основании решения дифференциального уравнения движения для малоподвижной части электродинамической петли и определяется исходя из раствора контактов в 2,5 мм [2].
- Так как время размыкания контактов и начало роста напряжения на дуге различны для каждой из фаз,

то может возникнуть ситуация, когда механизм выключателя начнет размыкать подвижные контакты раньше, чем начнется движение контактов токоограничителя в одной из фаз. В этой связи, необходимо знать время от достижения током цепи тока уставки выключателя до начала движения подвижных контактов – назовем его временем срабатывания выключателя.

- Если время срабатывания меньше, чем время начала размыкания контактов одной из фаз токоограничителя под действием электродинамики, то временем начала движения контактов необходимо считать время срабатывания выключателя, а время начала движения дуги определяется исходя из средней скорости размыкания контактов под действием пружины, которую можно ориентировочно принять равной 1 м/с на расстоянии 2,5 мм или рассчитать [1].

- Кроме того, при расчетах необходимо учитывать тот факт, что при определенных значениях электродинамического коэффициента контура малоподвижного контакта может возникнуть ситуация повторного замыкания контактов с последующим их свариванием, что так же должно быть учтено в процессе расчета.

- Напряжение на дуге может быть аппроксимировано кусочно-линейной функцией.

- Скорость нарастания напряжения на дуге зависит от значения тока в момент размыкания контактов и определяется по экспериментальным данным.

Очевидно, скорость нарастания напряжения на дуге для токоограничивающего выключателя будет одинаковой, так как принимается, что контактное нажатие на полюсах выключателя одинаково и контакты начинают размыкаться под действием электродинамики при одинаковом значении тока цепи.

Момент размыкания контактов токоограничивающего выключателя определяется значением тока цепи и зависит от конструкции токоограничивающего устройства. Поэтому, перед расчетом процесса отключения необходимо провести расчет токоограничивающего устройства рассматривается двойная электродинамическая петля, схематически показанная на рис. 3.

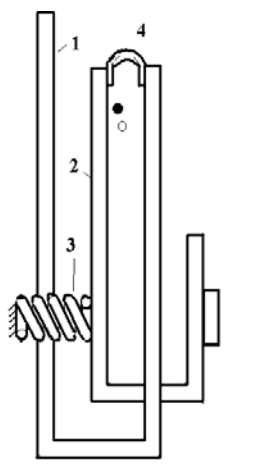


Рис. 3. Конструкция двойной электродинамической петли: 1-неподвижная часть; 2- малоподвижный контакт, вращающийся относительно оси O; 3 – контактная пружина; 4 – гибкое соединение

Работа устройства заключается в размыкании контактов за счет движения малоподвижной части под действием электродинамических сил. Необходимо учесть, что интенсивное нарастание напряжения на дуге до момента входа ее в дугогасительную решетку определяется моментом выхода дуги из межконтактного промежутка, который по экспериментальным данным наступает при достижении раствора контактов величины порядка 2,5 мм. Расчет значения токов короткого замыкания был проведен на основании решения системы дифференциальных уравнений для трехфазной электрической системы и получен в аналитической форме. Далее, был рассчитан момент начала движения контакта 2, см. рис. 3, который определится на основании решения трансцендентного уравнения:

$$F_{kl} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot i_1^2(t_{tr}) \cdot k_k, \quad (2)$$

где  $F_{kl}$  - контактное нажатие в каждой из фаз;  $i_1^2(t)$  - квадрат тока соответствующей фазы;  $k_k$  - электродинамический коэффициент контура;  $t_{tr}$  - время трогания контакта 2, рис. 3.

Решение уравнения (2) относительно времени, дает время трогания малоподвижного контакта. Для определения времени достижения контактами раствора 2,5 мм, решается уравнение движения:

$$m_p \cdot \frac{d^2 s_l(t)}{dt^2} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot i_1^2(t) \cdot k_k - F_{kl} \quad (3)$$

$$s_l(t_{tr1}) = 0, \quad \frac{ds_l(t_{tr1})}{dt} = 0,$$

где  $s_l(t)$  - путь малоподвижного контакта каждой из фаз;  $m_p$  - приведенная масса.

Для расчета времени выхода дуги из межконтактного промежутка необходимо решить нелинейное уравнение:

$$s_l(t_{dv}) = 2,5 \cdot 10^{-3}, \quad (4)$$

где  $t_{dv}$  - время начала движения электрической дуги.

На основании полученных данных определяются времена размыкания контактов и выхода дуги из межконтактного промежутка, которые определяют процесс дугогашения. В соответствии с описанной методикой, был проведен расчет токоограничивающего выключателя при условии, что номинальный ток равен 630 А, ток короткого замыкания тридцатикратен номинальному, коэффициент контура равен 5, а сила контактного нажатия – 150 Н. Аварийный режим - симметричное короткое замыкания на выводах выключателя. На рис. 4 показаны соотношения электродинамической силы и силы контактного нажатия для соответствующих фаз. Из рисунка 4 следует, что размыкание контактов будет происходить в различные моменты времени. Для определения времени трогания для каждого из контактов были решены трансцендентные уравнения (2) и получены следующие значения времен трогания: фаза А – 4 мс, фаза В – 8,73 мс; фаза С – 2,27 мс. На рисунке 5 показаны решения дифференциального уравнения движения малоподвижного контакта (2, рис. 3) с момента трогания (точка 1 рис. 6).

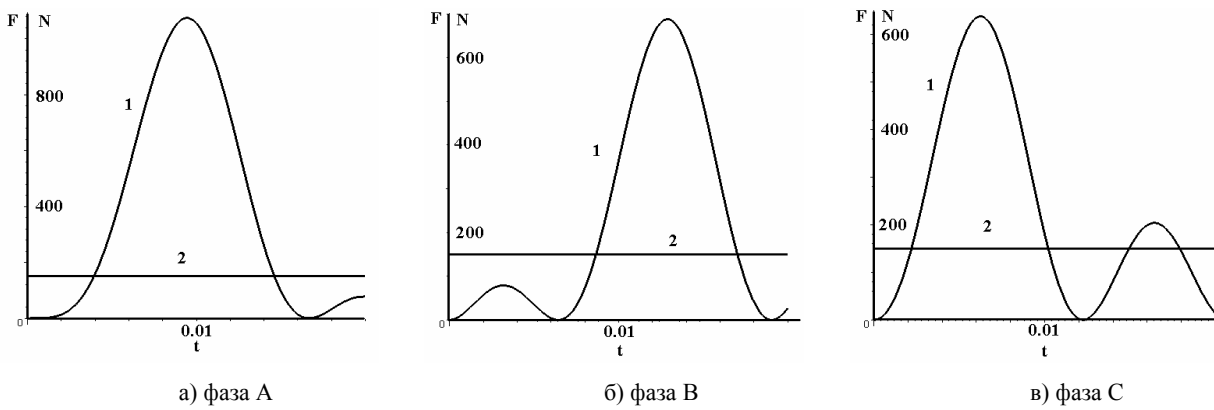


Рис. 4. Соотношение между электродинамической силой и силой контактного нажатия:  
1 – электродинамическая сила; 2 – сила контактного нажатия

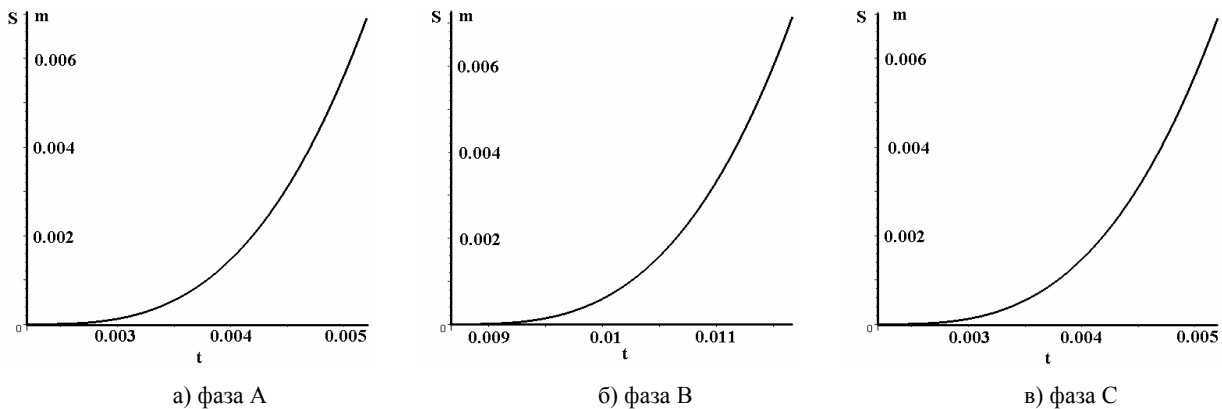


Рис. 5. Графики движения малоподвижного контакта

На основании проведенных расчетов по решению нелинейного уравнения (4), были получены следующие времена начала движения дуги и интенсивного роста напряжения на ней от начала тока короткого замыкания (точка 2 на рис. 6): для фазы А – 6,1 мс; для фазы В – 10,8 мс; для фазы С – 4,4 мс. Время от начала трогания до выхода дуги из межконтактного промежутка составляет: для фазы А- 2,1 мс; для фазы В- 2,1 мс; для фазы С - 2,17 мс.

Считая, что время срабатывания выключателя больше 10,8 мс (механизм плюс электромагнит) получаем, с учетом скорости нарастания напряжения, график напряжения на дуге, показанный на рис. 6. В том случае, если время от достижения током цепи уставки до начала размыкания контактов механизмом автоматического выключателя меньше 10,8 мс, или в цепи режим короткого отличающийся от принятого ранее, то соответствующие времена для соответствующих фаз будут определяться как и для не токоограничивающего автоматического выключателя – по средней скорости размыкания контактов.

На рис. 7 показаны результаты расчета по от-

ключению симметричного трехфазного короткого замыкания токоограничивающим выключателем в безразмерных единицах. Из рисунка явно видно токоограничивающее действие выключателя.

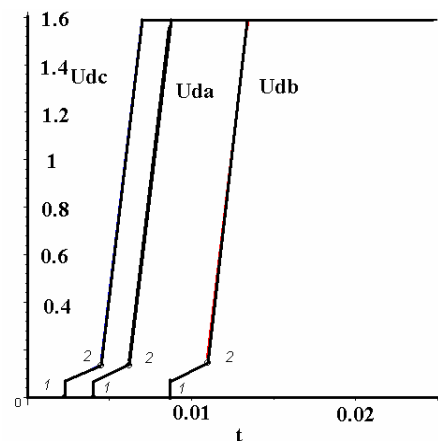


Рис. 6. Напряжение на дуге в относительных единицах для токоограничивающего выключателя

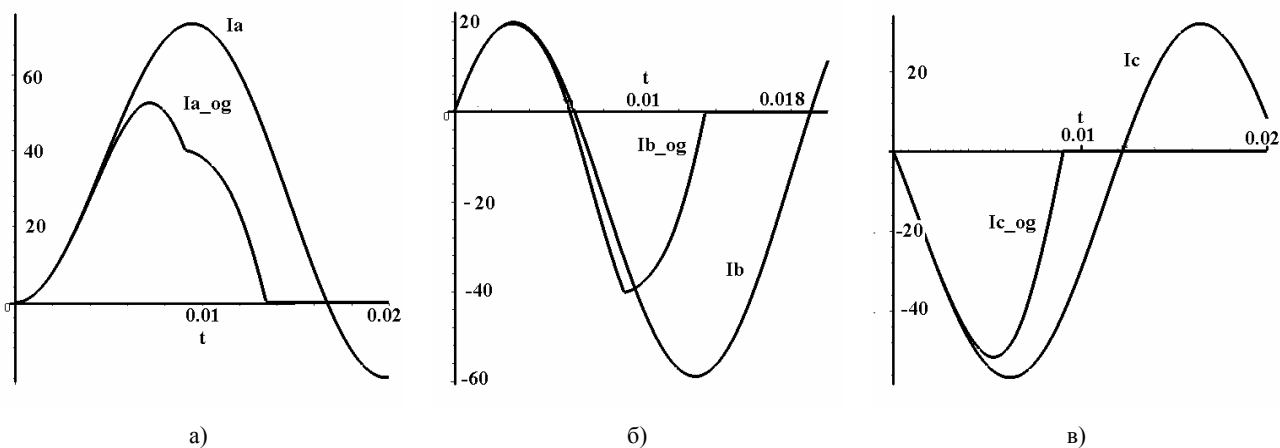


Рис. 7. Процесс токоограничения: а) в фазе А, б) в фазе В, в) в фазе С

На рис. 8 показаны токи в фазах при аварийном отключении цепи в относительных единицах (действующее значение установившегося тока короткого замыкания тридцатикратно номинальному току).

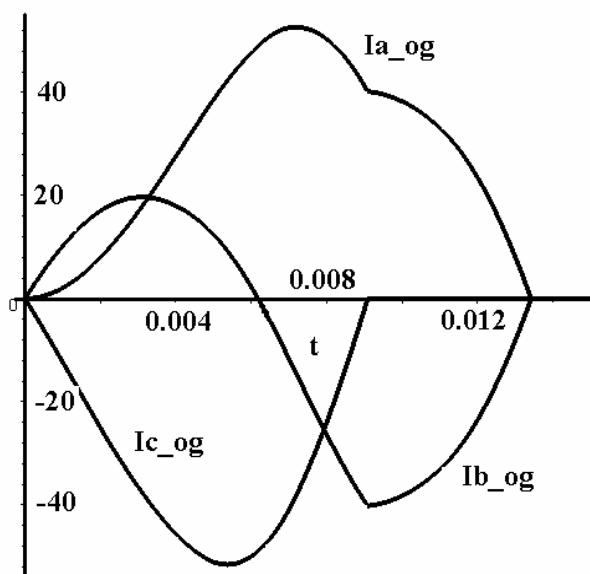


Рис. 8. Значения тока в фазах при отключении аварийного режима короткого замыкания на выводах выключателя в относительных единицах

Значение Джоулевого интеграла в относительных единицах для каждой из фаз приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Расчетные значения Джоулевого интеграла для каждой из фаз выключателя

Фаза	А	В	С
$Q = \int_t i^2 \cdot dt$	15,1	6,77	11,54

Причем, сравнительные характеристики показывают, что в случае отсутствия токоограничивающего устройства и времени отключения тока в фазе А за 20 мс, значение Джоулевого интеграла было бы равно 56,25 относительных единиц, что примерно в 3,7 раза больше, чем в рассмотренном случае.

Из приведенных данных расчетов следует явно несинусоидальный характер тока в отключаемой цепи при воздействии на нее электрической дуги.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании теоретических и экспериментальных исследований разработана математическая модель отключения электрической цепи токоограничивающим выключателем с двойной электродинамической петлей, которая позволяет частично отказаться от дорогостоящих натуральных экспериментов, и дает возможность:

1. По известным параметрам отключаемой цепи определить значения токов короткого замыкания в различных аварийных режимах (одно-, двух- и трехфазное короткое замыкание) с учетом переходных процессов.
2. Рассчитать значение Джоулевого интеграла с учетом времени горения дуги на контактах выключателя и параметров цепи.
3. Для токоограничивающего выключателя программа позволяет определить параметры и эффективность токоограничивающего устройства, а именно: значения ограниченного тока; требуемое значение коэффициента контура исходя из условия отсутствия повторного замыкания контактов и т.д.
4. Данная программа может являться источником входных данных для определения параметров работы микропроцессорных расцепителей автоматических выключателей.
5. Дальнейшее дополнение модели программой работы микропроцессорного расцепителя позволит создать единую модель отключения цепи автоматическим выключателем.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гушин В.Я. Повышение коммутационной способности автоматических выключателей за счет применения электродинамических устройств. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Харьков, 1972.
- [2] Кобозев А.С. Повышение предельной коммутационной способности токоограничивающих выключателей за счет оптимизации их параметров. Харьков, 1980.

Поступила 10.04.2007