

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОТКЛЮЧЕНИЯ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИМИ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯМИ

Байда Е.И., к.т.н., доц.

Национальный технический Университет Украины "Харьковский политехнический институт"  
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Электрические аппараты"  
тел. (057) 707-69-76, mailto:baida@kpi.kharkov.ua

Гапоненко Г.Н., к.т.н., Президент ЗАО "ЭНАС",  
Кобозев А.С., к.т.н., технический руководитель проекта ЗАО "ЭНАС",  
Украина, 61000, Харьков, пр. Московский 138 А  
тел. (057) 392-31-00, mailto:ENAS2@yanddex.ru

*У статті розглянуто питання моделювання відключення струмів короткого замикання трифазного електричного кола не токообмежуючим автоматичним вимикачем за допомогою математичної моделі, створеної на базі теоретичних та експериментальних досліджень. Це дозволяє моделювати процес відключення електричного кола, розрахувати значення інтеграла Джоуля з урахуванням часу гасіння електричної дуги, визначити час розімкнення контактів та суттєво скоротити об'єм натурних експериментів.*

*В статье рассматриваются вопросы моделирования отключения токов короткого замыкания трехфазной электрической цепи не токоограничивающим автоматическим выключателем при помощи математической модели, созданной на базе теоретических и экспериментальных исследований. Это позволяет моделировать процесс отключения электрической цепи, засчитать значения интеграла Джоуля с учетом времени гашения электрической дуги, определить время размыкания контактов и существенно сократить объем натурных экспериментов.*

Наиболее опасным для оборудования режимом работы силовой трехфазной электрической цепи является режим короткого замыкания (КЗ), которое может быть одно- двух- или трехфазным. В этом случае для создания эффективной защиты линий электропередач и силового оборудования необходимо точно знать значение тока цепи, время возникновения и погасания электрической дуги, значение Джоулевого интеграла и т.д. Большинство таких параметров можно получить только при проведении дорогостоящих экспериментов либо на опытных установках, либо, что нежелательно, на реальных объектах. В этой связи практический интерес представляет математическое моделирование процессов в сетях при возникновении тока КЗ автоматическим выключателем (АВ). В настоящей статье рассматривается процесс отключения тока КЗ не токоограничивающим АВ, т.е. выключателем, у которого процесс размыкания электрических контактов происходит под действием механизма свободного расцепления (селективные выключатели и т.д). Так как наиболее распространенной трехфазной цепью для напряжений до 1000 В является трехфазная цепь соединенная по схеме "звезда" с нулевым проводом, то в дальнейшем, все процессы будут рассматривать-

ся для такой цепи. Расчетная электрическая схема работы цепи в номинальном режиме показана на рис. 1, где  $u_A, u_B, u_C$  – фазные напряжение;  $R_l, L_l$  – параметры линии, включая сопротивление обмоток питающего трансформатора;  $R_n, L_n$  – параметры нагрузки;  $Q$  – контакты автоматического выключателя;  $R_0, L_0$  – параметры нулевого провода;  $i_A, i_B, i_C, i_0$  – токи соответствующих фаз и нулевого провода.

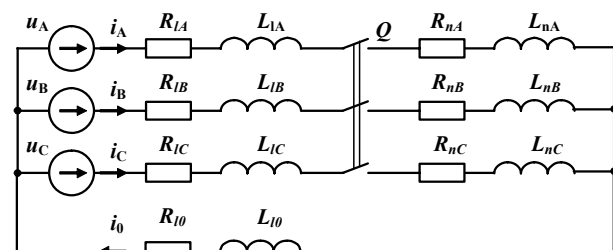


Рис. 1. Электрическая схема трехфазной цепи с нулевым проводом

Расчет токов в случае одно-, двух- или трехфазного КЗ на выводах выключателя осуществляется для соответствующих электрических схем, показанных на рис. 2.

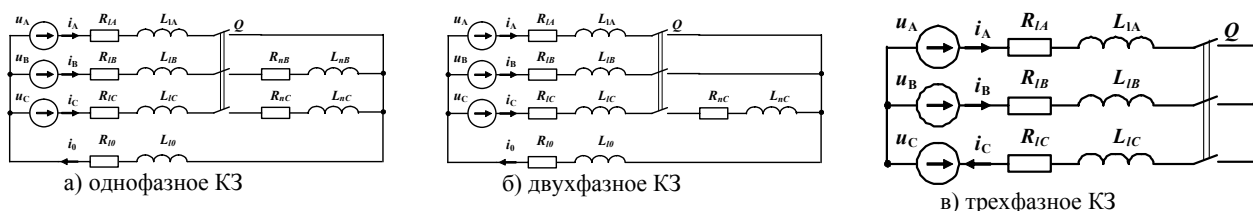


Рис. 2. Расчетные электрические схемы

Расчет может быть проведен как в случае внезапного возникновения тока КЗ (начальное значение тока равно номинальному), так и для случая включения автоматического выключателя на ток КЗ.

Для расчета переходных процессов в качестве исходных данных должны быть заданы фазные напряжения, а так же определены активные сопротивления и индуктивности линии, нагрузки, нулевого провода. Полное сопротивление линии рассчитывается по действующему значению установившегося тока трехфазного КЗ на выводах выключателя равному 30 номинальным и коэффициенту мощности  $\cos(\varphi_{КЗ})=0,1$ . Полное сопротивление нагрузки - по действующему значению номинального тока и  $\cos(\varphi_n)=0,8$ . Так как в цепи рис. 1, 2 все параметры взаимосвязаны и влияют на значения токов в фазах, то расчет токов КЗ проводится на основании решения системы дифференциальных уравнений при заданной начальной фазе напряжения.

При отключении не токоограничивающим АВ электрической цепи будем исходить из следующего:

- Время начала расхождения контактов АВ задано. Это время включает время достижения током цепи уставки, выдержку времени, время срабатывания механизма и время выбора провала контактов.
- Все контакты начинают двигаться одновременно под действием пружины отключения или иного механизма.
- Напряжение на дуге в каждой фазе можно аппроксимировать кусочно-линейной функцией [2].
- Дуга неподвижно горит на расходящихся контактах, пока расстояние между ними не достигнет

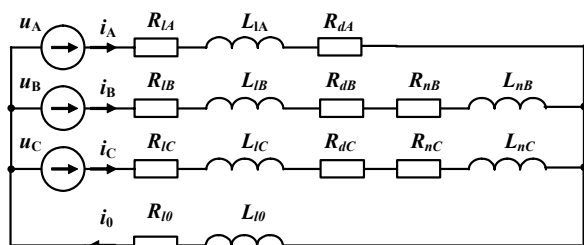
величины порядка (2,5-5) мм [1, 2], а далее она начинает двигаться, выходя на дугогасительные рога и входя в дугогасительную решетку.

- Скорость нарастания напряжения на движущейся дуге до момента полного ее вхождения в дугогасительную решетку зависит от значения тока цепи в момент расхождения контактов и определяется по экспериментальным данным [2].

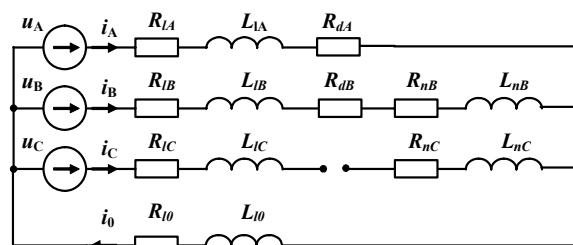
- После вхождения дуги в дугогасительную решетку, напряжение на ней постоянно и определяется либо по экспериментальным данным, либо расчетным путем в зависимости от конструкции дугогасительной камеры.

- Дуга на контактах гаснет либо под действием увеличивающегося падения напряжения на дуге, либо в первый переход тока через ноль после времени начала расхождения контактов.

Расчет дугогашения проводится для токов КЗ на основании соответствующих расчетных схем путем решения системы дифференциальных уравнений с учетом напряжения на дуге. При этом необходимо учитывать, что напряжение на дуге совпадает по знаку с током. Кроме того, необходимо учесть, что гашение дуги происходит не одновременно во всех трех фазах. В этом случае расчетная схема должна быть изменена, так как фаза, в которой ток равен нулю, в дальнейшем расчете не участвует рис. 3, где  $R_{dA}$ ,  $R_{dB}$ ,  $R_{dC}$  – активные сопротивления дуги.



а) схема цепи при однофазном КЗ



б) схема цепи при отсутствии дуги в фазе С

Рис. 3. Расчетные схемы электрической цепи.

На первом этапе был проведен расчет переходных процессов в электрической цепи при ее включении на ток КЗ. Система дифференциальных уравнений, описывающая этот процесс, обозначена (1).

Система (1) должна быть дополнена начальными условиями. При расчете одно-, двухфазного КЗ, соответствующие значения фазных нагрузок принимаются равными нулю. Для трехфазного КЗ система (1) трансформируется в (2).

На основании (1, 2) был проведен расчет изменения тока в цепи при включении АВ в случае КЗ в фазе А и трехфазное КЗ.

На рис. 4 показан процесс включения цепи на режим однофазного КЗ в относительных единицах при нулевой начальной фазе включения  $u_A$ . На рис. 5 – включение цепи на трехфазное КЗ на выводах выключателя.

$$\begin{aligned}
 i_A + i_B + i_C &= i_0 \\
 -u_A + u_C &= (L_C + L_{lC}) \cdot \frac{di_C}{dt} + (R_C + R_{lC}) \cdot i_C \\
 - (L_A + L_{lA}) \cdot \frac{di_A}{dt} - (R_A + R_{lA}) \cdot i_A & \\
 -u_B + u_A &= (L_A + L_{lA}) \cdot \frac{di_A}{dt} + (R_A + R_{lA}) \cdot i_A \\
 - (L_B + L_{lB}) \cdot \frac{di_B}{dt} - (R_B + R_{lB}) \cdot i_B & \\
 u_B &= (L_B + L_{lB}) \cdot \frac{di_B}{dt} + (R_B + R_{lB}) \cdot i_B \\
 + L_{l0} \cdot \frac{di_0}{dt} + R_{l0} \cdot i_0 &
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
i_A + i_B + i_C &= 0 \\
-u_A + u_C &= (L_C + L_{IC}) \cdot \frac{di_C}{dt} + (R_C + R_{IC}) \cdot i_C \\
-(L_A + L_{IA}) \cdot \frac{di_A}{dt} - (R_A + R_{IA}) \cdot i_A & \\
-u_B + u_A &= (L_A + L_{IA}) \cdot \frac{di_A}{dt} + (R_A + R_{IA}) \cdot i_A \\
-(L_B + L_{IB}) \cdot \frac{di_B}{dt} - (R_B + R_{IB}) \cdot i_B &
\end{aligned} \quad (2)$$

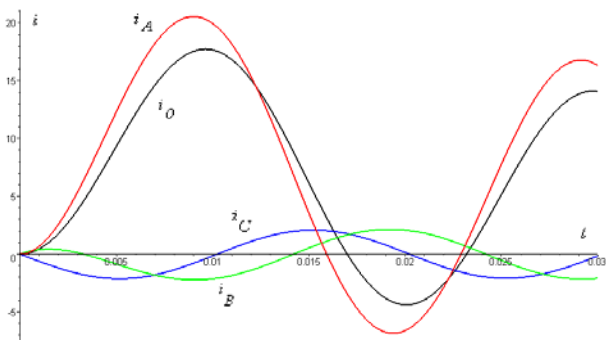


Рис. 4. Переходный ток в цепи при включении на однофазное КЗ

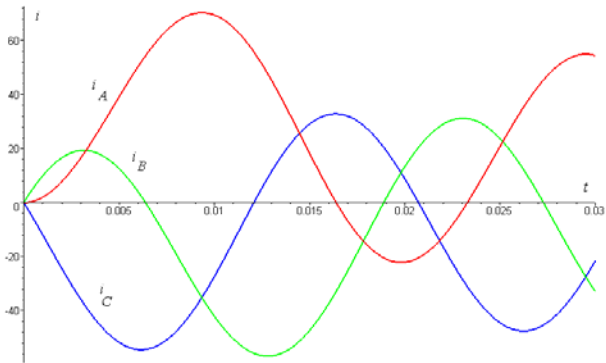


Рис. 5. Включение на трехфазное КЗ на выводах выключателя

Для расчета процесса отключения электрической цепи АВ необходимо определиться со значениями напряжения на дуге и скоростью его нарастания в функции времени. Такие значения были получены на основании экспериментальных данных для автоматических выключателей серии АЗ700 [2]. Так как для не токоограничивающих выключателей время размыкания контактов одинаково, а ток в каждой фазе различен, то и скорости нарастания напряжения будут различны. Напряжение на дуге может быть аппроксимировано зависимостью рис.6, где  $t_c$  – время начала размыкания контактов;  $t_{d0}$  – время неподвижного горения дуги на контактах;  $t_{dk}$  – время от начала движения дуги до входа её в дугогасительную решетку для соответствующей фазы;  $U_{d10}$  – начальное напряжение на дуге в момент её возникновения;  $U_{d20}$  – напряжение на дуге в момент начала ее движения;  $U_{dm}$  – максимальное напряжение на дуге, горящей в решетке. При расчете были приняты следующие значения параметров напряжения на дуге:  $t_c = 20$  мс;  $t_{d0} = 2,5$  мс при средней скорости размыкания контактов 2 м/с;  $t_{dk}$  определя-

лось значением тока в момент размыкания контактов [2];  $U_{d10} = 15$  В;  $U_{d20} = 35$  В;  $U_{dm} = 1,6U_n$ .

Уравнение напряжения на дуге представлено кусочно-линейной функцией (3).

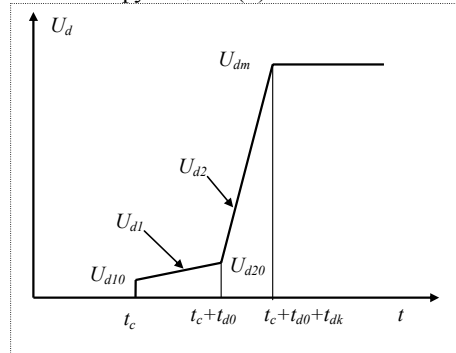


Рис. 6. Линейная аппроксимация напряжения на дуге

$$U_d = \begin{cases} \text{если } t < t_c, \text{ тогда } U_d = 0 \\ \text{если } t > t_c \text{ \& } t < t_c + t_{d0}, \\ \text{тогда } U_d = U_{d1}(t) \\ \text{если } t \geq t_c + t_{d0} \text{ \& } t < t_c + t_{d0} + t_{dk}, \\ \text{тогда } U_d = U_{d2}(t) \\ \text{если } t \geq t_c + t_{d0} + t_{dk}, \text{ тогда } U_d = U_{dm}. \end{cases} \quad (3)$$

Для построения корректной математической модели помимо напряжения на дуге в программу расчета необходимо ввести дополнительное сопротивление, которое будет имитировать обрыв тока и переключение цепи в случае погасания дуги в одной из фаз:

$$R_d = \begin{cases} 0, \text{ если } t \leq t_c \\ \infty, \text{ если } t > t_c \text{ \& } |i_K| < \varepsilon \end{cases} \quad (4)$$

где  $R_d$  – эквивалент сопротивления цепи при погасании дуги в соответствующей фазе;  $t_c$  – время размыкания контактов;  $i$  – ток в соответствующей фазе;  $\varepsilon$  – некоторая малая величина.

В этом случае расчетная обобщенная система уравнений будет иметь следующий вид (5).

По описанной математической модели был рассчитан процесс ВО автоматического выключателя на однофазное рис. 7 и двухфазное КЗ рис. 8. На рис. 9 показаны напряжения на дугах для трехфазного КЗ, расчетная система уравнений (6) и токи фаз рис. 10.

$$\begin{aligned}
i_A + i_B + i_C &= i_0 \\
-u_A + u_C &= (L_C + L_{IC}) \cdot \frac{di_C}{dt} + (R_C + R_{IC} + R_{dC}) \cdot i_C \\
-(L_A + L_{IA}) \cdot \frac{di_A}{dt} - (R_A + R_{IA} + R_{dA}) \cdot i_A + U_{dC} \cdot \text{signal}(i_C) & \\
-U_{dA} \cdot \text{signal}(i_A); & \\
-u_B + u_A &= (L_A + L_{IA}) \cdot \frac{di_A}{dt} + (R_A + R_{IA} + R_{dA}) \cdot i_A \\
-(L_B + L_{IB}) \cdot \frac{di_B}{dt} - (R_B + R_{IB} + R_{dB}) \cdot i_B & \\
+ U_{dA} \cdot \text{signal}(i_A) - U_{dB} \cdot \text{signal}(i_B); & \\
u_B &= (L_B + L_{IB}) \cdot \frac{di_B}{dt} + (R_B + R_{IB} + R_{dB}) \cdot i_B \\
+ L_{I0} \cdot \frac{di_0}{dt} + R_{I0} \cdot i_0 + U_{dB} \cdot \text{signal}(i_B); &
\end{aligned} \quad (5)$$

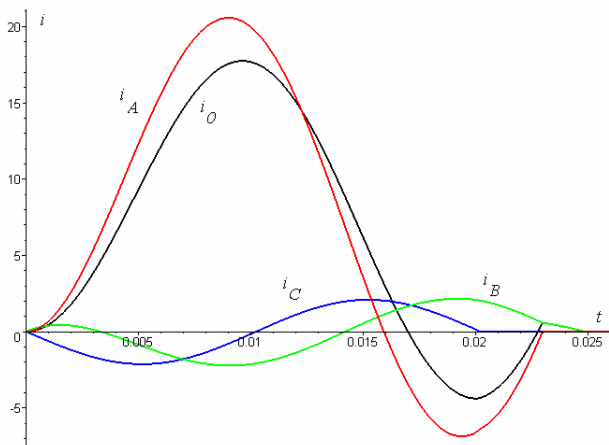


Рис. 7. Изменение тока в цепи в цикле ВО при однофазном КЗ

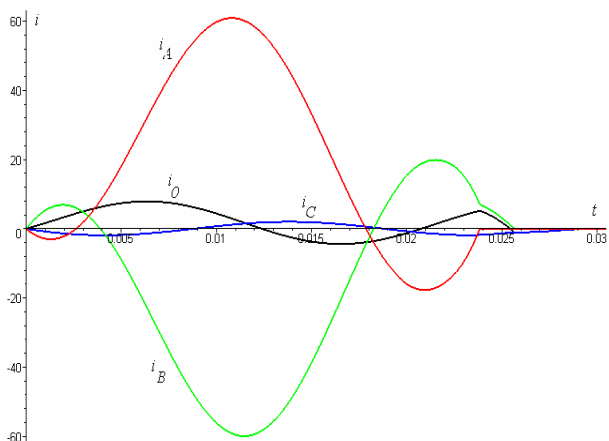


Рис. 8. Изменение тока в цепи в цикле ВО при двухфазном КЗ в фазах А и В

$$\begin{aligned}
 & i_A + i_B + i_C = 0 \\
 & -u_A + u_C = (L_C + L_{IC}) \cdot \frac{di_C}{dt} + (R_C + R_{IC} + R_{dC}) \cdot i_C \\
 & - (L_A + L_{IA}) \cdot \frac{di_A}{dt} - (R_A + R_{IA} + R_{dA}) \cdot i_A \\
 & + U_{dC} \cdot \text{signal}(i_C) - U_{dA} \cdot \text{signal}(i_A); \\
 & -u_B + u_A = (L_A + L_{IA}) \cdot \frac{di_A}{dt} + (R_A + R_{IA} + R_{dA}) \cdot i_A \\
 & - (L_B + L_{IB}) \cdot \frac{di_B}{dt} - (R_B + R_{IB} + R_{dB}) \cdot i_B \\
 & + U_{dA} \cdot \text{signal}(i_A) - U_{dB} \cdot \text{signal}(i_B);
 \end{aligned} \tag{6}$$

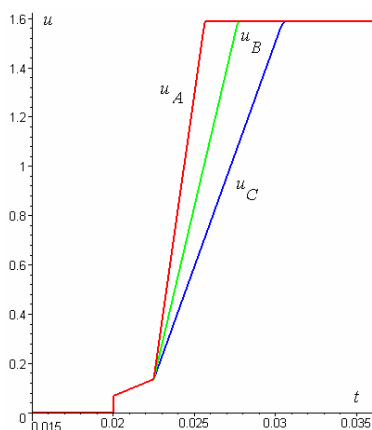


Рис. 9. Расчетные значения напряжения на дугах в фазах

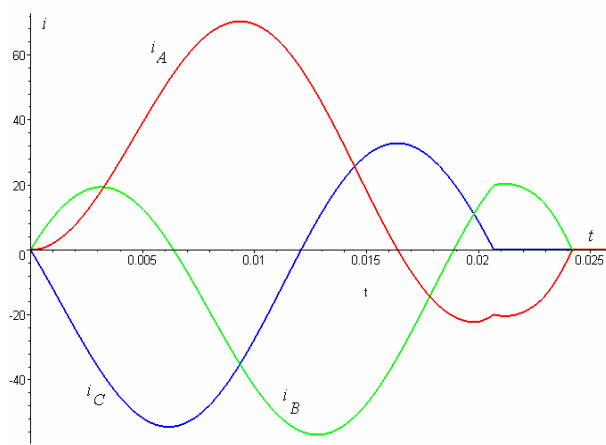


Рис. 10. Изменение тока цепи в цикле ВО при трехфазном КЗ на выводах выключателя

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании теоретических и экспериментальных исследований разработана математическая модель имитации отключения электрической цепи автоматическим выключателем, которая позволяет частично отказаться от дорогостоящих натуральных экспериментов, и дает возможность:

1. На основании заданных параметров определить значения токов короткого замыкания в различных режимах (одно-, двух- и трехфазное КЗ) с учетом параметров цепи.
2. Рассчитать значение Джоулевого интеграла с учетом времени горения дуги на контактах выключателя и параметров цепи.
3. Определить время начала размыкания контактов с учетом допустимого значения Джоулевого интеграла и требований селективной защиты для различных цепей.
4. 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 19.01.2007