

По итогам Всероссийской конференции «Режимы нейтрали. Ограничение перенапряжений. Релейная защита. 2019»

О настройке расчётных моделей однофазных дуговых замыканий по результатам экспериментов

ЖУЙКОВ А. В.; antonzhuykov23@gmail.com
МАТВЕЕВ Д. А.; daniil.matveev@gmail.com
НИУ «Московский энергетический институт»
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14
НИКУЛОВ И. И.; nikulov@ramenergy.ru
ОАО «Раменский электротехнический завод «Энергия»
140105, Московская обл., г. Раменское, ул. Левашова, 21
ФРОЛОВ М. В.; frolovmikv@gmail.com; НИУ МЭИ



А. В. Жуйков



Д. А. Матвеев



И. И. Никулов



М. В. Фролов

Численное моделирование переходных процессов в электрических сетях имеет множество применений. Современные компьютеры позволяют использовать весьма точные расчётные модели электрооборудования для решения инженерных и научно-исследовательских задач. Одна из них — расчётные исследования эффективности работы дугогасящих реакторов в режиме перемежающихся дуговых замыканий. Численное моделирование переходного процесса в сети на сегодняшний день не представляет проблемы. Однако задача значительно усложняется, если переходный процесс вызван горением открытых дуг. Известно, что существующие аналитические модели дугового замыкания, основанные на гипотезах Петерса — Слепяна, В. Петерсена, Н. Н. Белякова, позволяют количественно оценить кратности возникающих перенапряжений, но не воспроизводят характер переходного процесса с достаточной точностью. При этом общепринятой методики моделирования дуговых замыканий не существует, и данное обстоятельство препятствует проведению расчётных исследований, направленных на решение практических задач, например, оптимизации конструкций дугогасящих реакторов и их систем управления. Настоящая статья посвящена разработке таких моделей.

Ключевые слова: дуговой разряд, однофазные замыкания на землю, электрические сети с изолированной нейтралью, электрические сети с компенсированной нейтралью, численное моделирование.

Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) — наиболее распространённый вид повреждения в распределительных сетях напряжением 6 – 35 кВ. По происхождению они могут быть двух видов — металлические и дуговые. Замыкания первого вида неустраняемы без отключения повреждённого присоединения, в то время как замыкания второго вида могут самоустраниваться за счёт погасания заземляющей дуги. Характер процессов при ОЗЗ оп-

ределяется в первую очередь способом заземления нейтрали сети. В отечественных распределительных сетях он выбирается так, чтобы дать возможность однофазному дуговому замыканию (ОДЗ) самоустраниваться, при этом не прерывая электроснабжение потребителей.

Существенное влияние на протекание переходных процессов при дуговых замыканиях на землю оказывает поведение самой дуги в месте замыкания. Известен

ряд гипотез, описывающих это поведение [1]. Так, согласно гипотезе Петерсена [2], погасание дуги происходит при первом переходе через ноль высокочастотной составляющей тока замыкания, а повторное зажигание происходит через полпериода промышленной частоты в момент максимума напряжения на повреждённой фазе. Согласно другой известной гипотезе, выдвинутой Петерсом и Слепяном [3], погасание дуги происходит при переходе через ноль установившейся составляющей тока замыкания. Гипотеза Н. Н. Белякова [4] гласит, что пик гашения в повреждённой фазе не превышает значения, равного примерно 40 % от амплитуды фазного напряжения сети. Результаты многочисленных экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что указанные гипотезы позволяют лишь качественно судить о характере протекания процессов — в действительности ни одна из них не реализуется, а точное описание дугового замыкания представляется весьма сложной задачей.

Более точное описание процессов при дуговом замыкании может быть получено при представлении дуги чисто активным элементом электрической цепи, при этом её проводимость рассчитывается с помощью так называемого обобщённого уравнения дуги [5]:

$$\frac{d(\ln g)}{dt} = \frac{1}{g} \frac{dg}{dQ} (P - P_{\text{отв}}), \quad (1)$$

где g — проводимость канала дугового разряда; Q — количество теплоты, запасённое в канале дугового разряда; P — мощность, выделяющаяся в канале дугового разряда; $P_{\text{отв}}$ — мощность, отводимая от канала дугового разряда (мощность охлаждения); t — время.

На основе уравнения (1) с использованием определённых допущений могут быть получены уравнения, пригодные для совместного решения с системой дифференциальных уравнений состояния электрической цепи. Модели, основанные на применении уравнения (1), относятся к классу моделей «чёрного ящика». Исторически они разрабатывались преимущественно для описания поведения дуги в камерах силовых выключателей. В 1939 г. Кассье предположил, что канал дуги имеет постоянную температуру, а выделившееся количество теплоты и проводимость канала пропорциональны его объёму [6]. На основе указанных предполо-

жений было получено уравнение, известное как уравнение Кассье:

$$\frac{d(\ln g)}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u^2}{U_c^2} - 1 \right), \quad (2)$$

где u — напряжение на дуговом промежутке; τ — постоянная времени дуги; U_c — постоянная уравнения Кассье, равная квадратному корню отношения удельной отводимой мощности и удельной проводимости и имеющая размерность напряжения.

Противоположное по смыслу предположение сделал в 1943 г. Майер. Оно заключалось в том, что канал дуги имеет постоянный диаметр, а его температура со временем меняется [7]. Основанное на этих положениях уравнение известно как уравнение Майера:

$$\frac{d(\ln g)}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{P_{отв}} - 1 \right), \quad (3)$$

где i — ток дуги.

Опыт использования этих уравнений говорит о том, что уравнение Кассье применимо при больших токах дуги, а уравнение Майера — при малых. Известен ряд их модификаций, основанных на обработке экспериментальных данных, например, уравнения Шварца [8] и Шейвмейкера [9]. Также были предприняты попытки совместного использования уравнений Майера и Кассье. Так, модель Брауна [10] предполагает решение уравнения Кассье в области больших токов дуги и решение уравнения Майера — в области малых токов. В модели Хабданка [11] используется последовательное соединение двух активных элементов, проводимость первого из которых описывается уравнением Майера, а проводимость второго — уравнением Кассье.

Первая часть настоящих исследований заключалась в проверке указанных моделей с помощью результатов экспериментов на физической модели электрической сети с дуговым промежутком, собранной на экспериментально-испытательном стенде 6 – 35 кВ ОАО «РЭТЗ Энергия». В результате сравнения экспериментальных и расчётных осциллограмм было выявлено, что ни одно из рассмотренных уравнений не обеспечивает удовлетворительного описания процессов при ОДЗ. Поэтому вторая часть исследований была посвящена поиску уравнения, применение которого позволяет воспроизвести экспериментальные осциллограммы с достаточной степенью точности. Наконец, третья часть настоящих исследований посвящена выбору способа учёта повторных зажиганий дуги, что является необходимым для полного описания перемежающихся дуговых замыканий. Формирование такой модели дугового замыкания позволит осуществлять расчёты переходных процессов при ОДЗ с хорошей точностью, что требуется для анализа режимов работы оборудования — например, управляемых дугогасящих реакторов (ДГР).

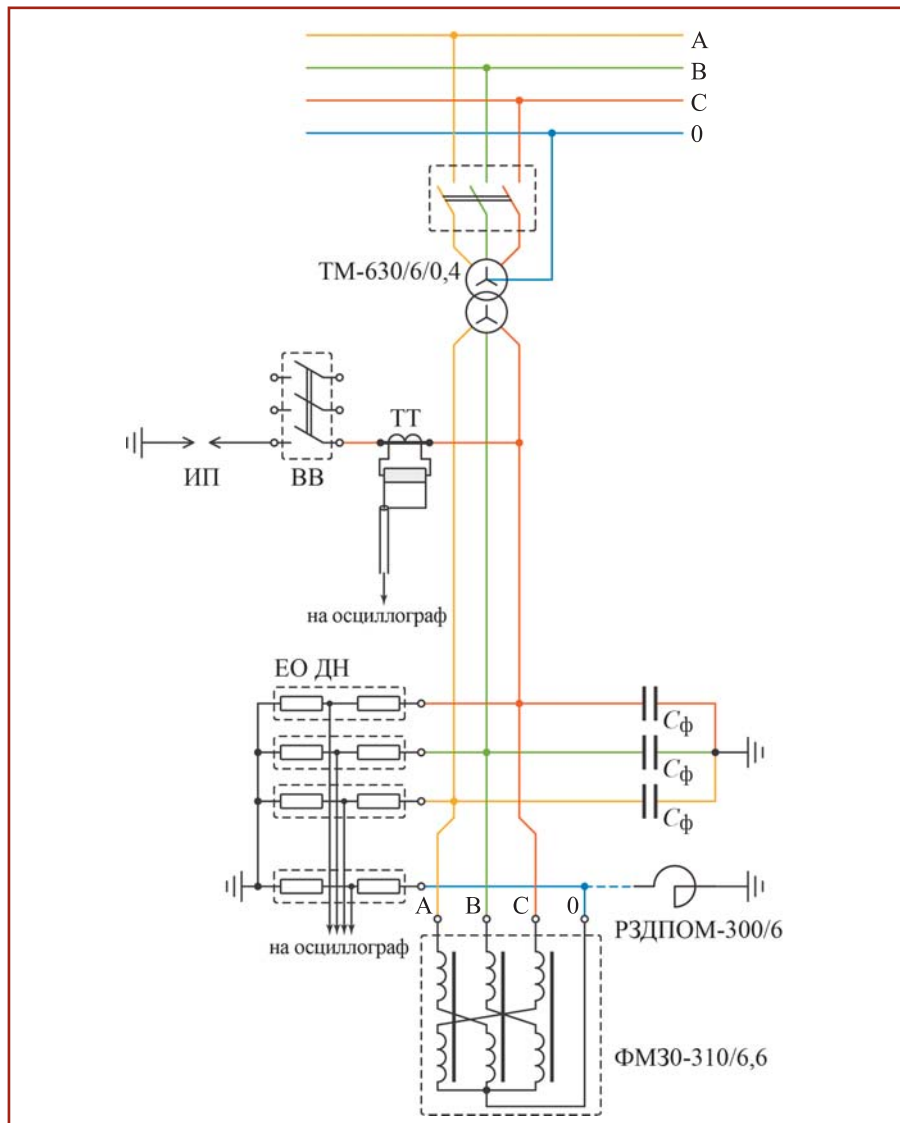


Рис. 1. Схема экспериментально-испытательного стенда 6 кВ

Экспериментально-испытательный стенд 6 – 35 кВ

Для проведения исследований использован экспериментально-испытательный стенд ОАО «РЭТЗ Энергия». Схема стенда для измерений параметров режима при дуговых замыканиях на землю приведена на рис. 1.

Источником напряжения 6 кВ служит силовой трансформатор мощностью 630 кВА. Для создания нейтральной точки и подключения плунжерного дугогасящего реактора типа РЗДПОМ-300/6 используется нейтралеобразующий фильтр нулевой последовательности ФМ30-310/6,6. Фазные ёмкости сети C_{ϕ} имитируются конденсаторами. Однофазное замыкание на землю организуется посредством подачи напряжения на искровой промежуток (ИП), представляющий собой роговые электроды, путём замыкания вакуумного выключателя ВВ-TEL. В ходе эксперимента с помощью ёмкостно-омических делителей напряжения (ЕО ДН) регист-



Рис. 2. Дуговой промежуток при токе ОДЗ 45 А

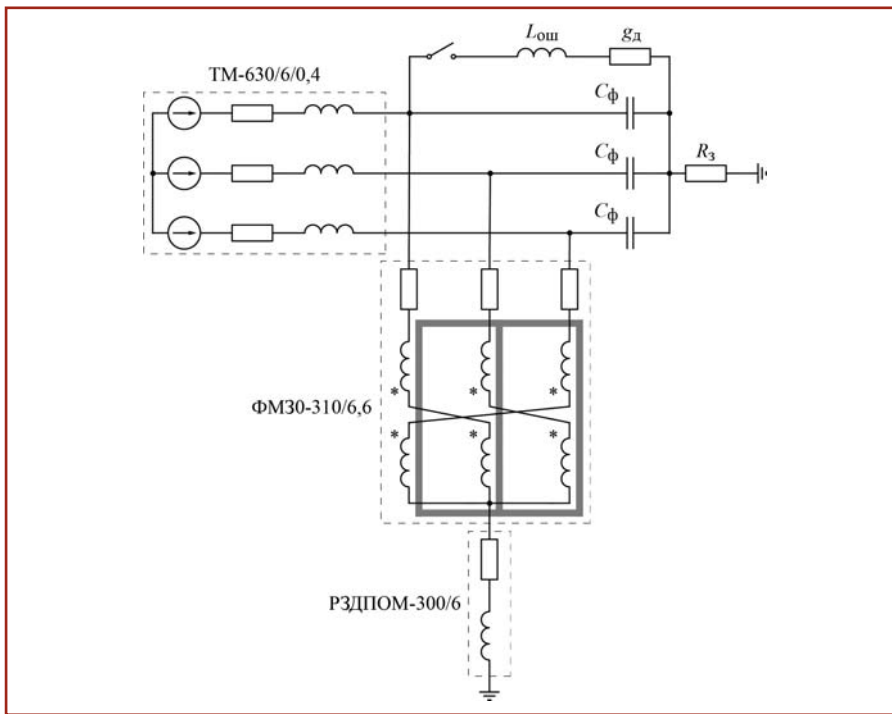


Рис. 3. Схема замещения физической модели сети:

$L_{\text{ош}}$ — индуктивность участка ошиновки; $C_{\text{ф}}$ — фазная ёмкость; $g_{\text{д}}$ — меняющаяся во времени проводимость канала дуги; $R_{\text{з}}$ — сопротивление контура заземления

рируются осциллограммы напряжения фаз и нейтральной точки ФМ30, а также ток замыкания на землю.

В качестве искрового промежутка использованы роговые электроды (рис. 2) с регулируемым расстоянием между ними. Во время проведения опытов данное расстояние составляло примерно 0,9 мм. Электроды подключались к фазе С повышающего трансформатора через участок ошиновки длиной примерно 10 м.

Расчётная модель сети

Схема замещения физической модели сети, описанной выше, представлена на рис. 3. Источник напряжения — трёхфазный с активно-индуктивным внутренним сопротивлением. Следует отметить, что соответствующие индуктивности и активные сопротивления определяются не только параметрами повышающего трансформатора, но и параметрами сети низкого напряжения. Строго говоря, значения этих индуктивностей и активных сопротивлений неизвестны, и в настоящей работе они определены исходя из собственной частоты колебаний сети при ОЗЗ и затухания колебательного процесса.

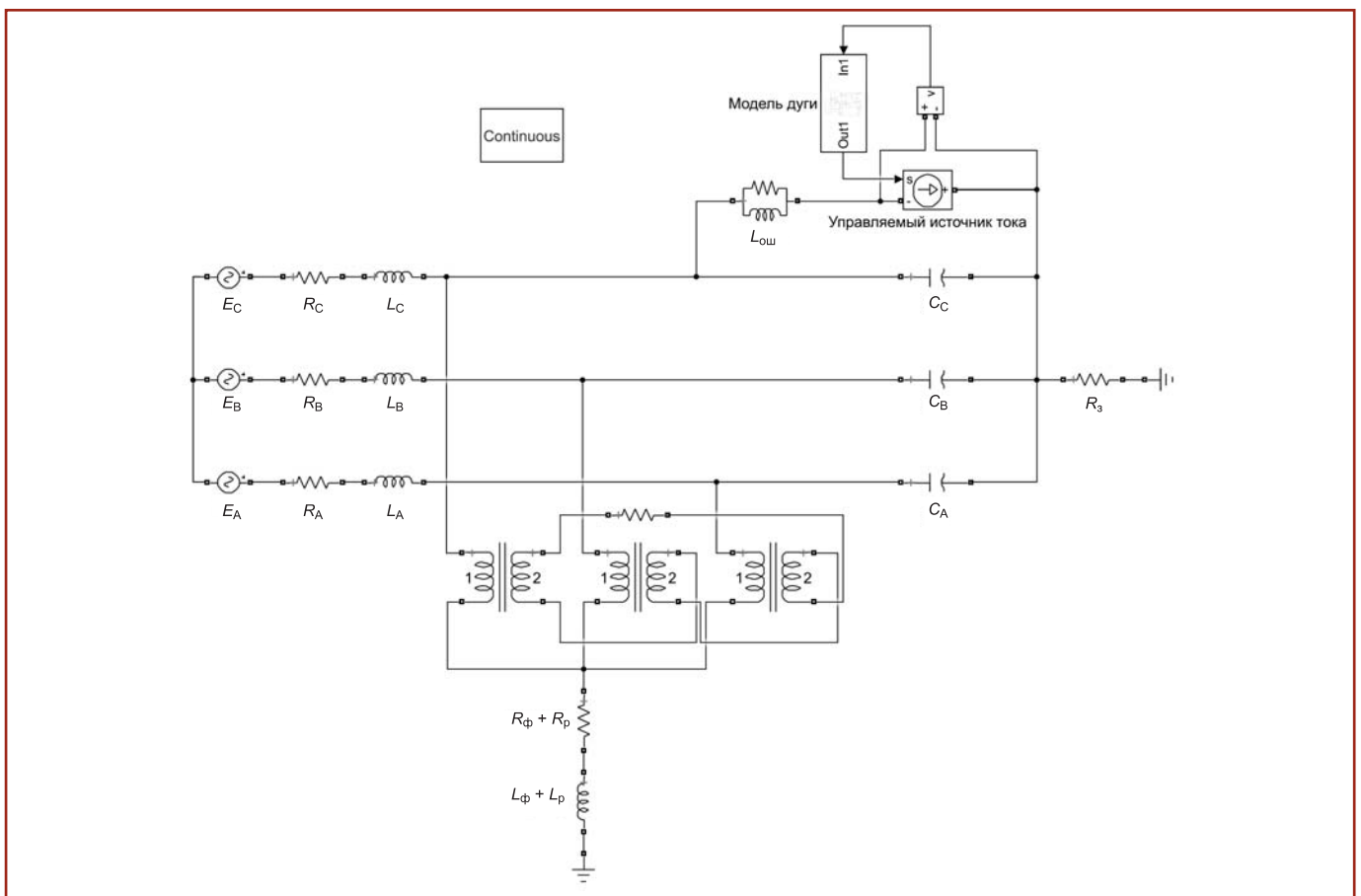


Рис. 4. Схема модели сети в программном пакете SimPowerSystems:

$L_{\text{д}}$ — индуктивность ДГР; $L_{\text{ф}}$ — индуктивность ФМ30; $R_{\text{п}}$ — активное сопротивление ДГР; $R_{\text{ф}}$ — активное сопротивление ФМ30; $E_{\text{А}}, E_{\text{В}}, E_{\text{С}}$ — ЭДС фаз А, В и С соответственно; $R_{\text{А}}, R_{\text{В}}, R_{\text{С}}$ — внутреннее активное сопротивление фаз А, В и С источника соответственно; $L_{\text{А}}, L_{\text{В}}, L_{\text{С}}$ — внутренние индуктивности источника в фазах А, В и С соответственно; $C_{\text{А}}, C_{\text{В}}, C_{\text{С}}$ — ёмкости фаз А, В и С соответственно; $L_{\text{ош}}$ — индуктивность участка ошиновки; $R_{\text{з}}$ — сопротивление контура заземления

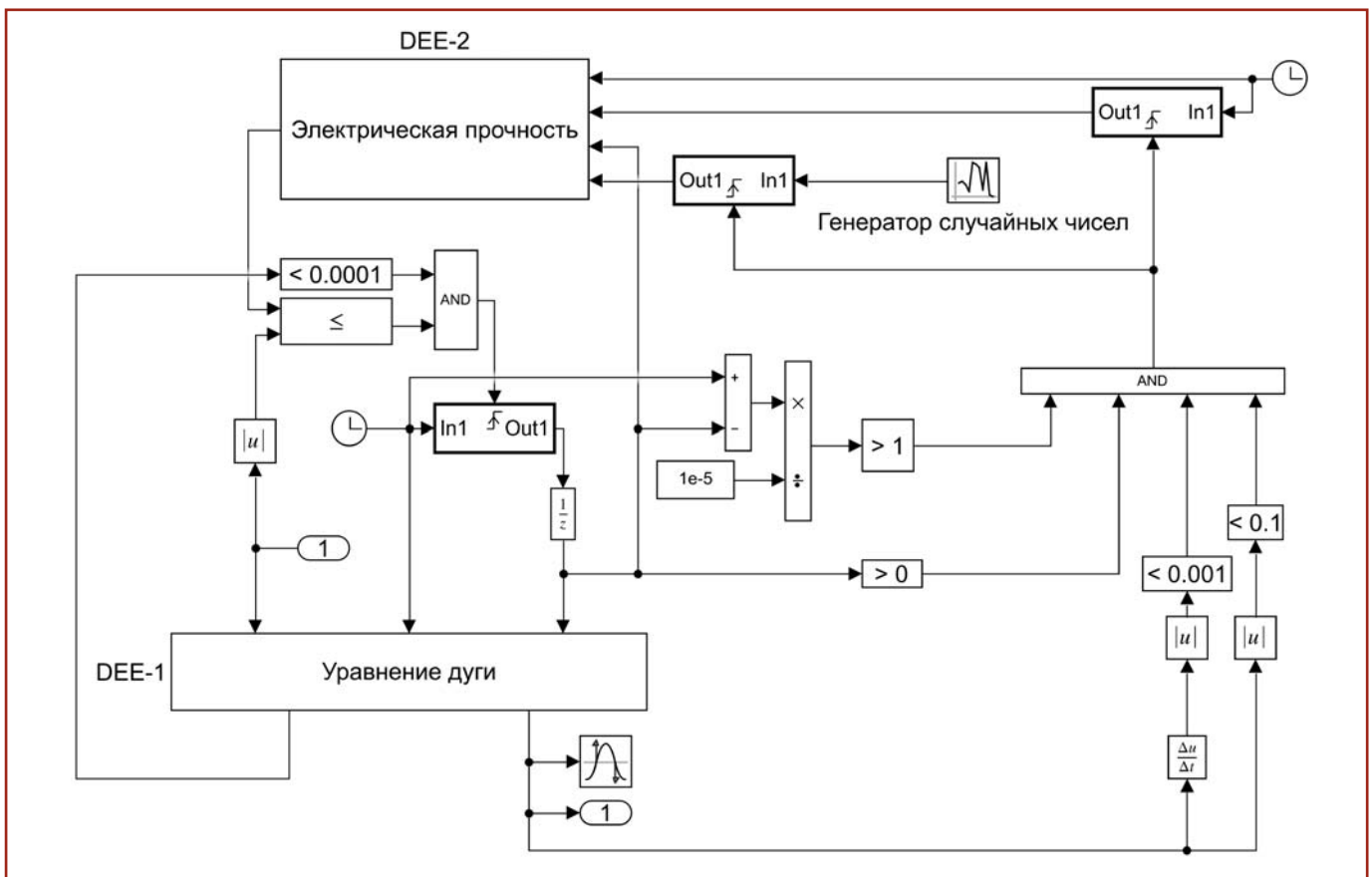


Рис. 5. Схема модели дуги в месте замыкания в программном пакете SimPowerSystems

Поскольку дуговой промежуток был подключён к трансформатору не непосредственно, а последовательно с участком ошиновки длиной порядка 10 м, для корректного воспроизведения экспериментально полученных процессов необходим учёт индуктивности этого участка ошиновки. Её значение было определено исходя из закона сохранения энергии в колебательном контуре «фазная ёмкость — индуктивность ошиновки»:

$$L_{\text{ош}} = C_{\text{ф}} \frac{U_{\text{пр}}^2}{I_{\text{макс}}^2}, \quad (4)$$

где $U_{\text{пр}}$ — напряжение пробоя дугового промежутка; $I_{\text{макс}}$ — значение первого максимума тока замыкания.

Дугогасящий реактор в схеме замещения представлен последовательным соединением индуктивности, настроенной согласно условиям эксперимента, и активного сопротивления, эквивалентирующего потери активной мощности в реакторе. Также на схеме изображена трёхфазная обмотка ФМ30, соединённая по схеме «зигзаг»; её активное сопротивление представлено включёнными последовательно с полуобмотками резисторами.

На рис. 4 приведена схема расчётной модели сети с компенсированной нейтралью в программном пакете SimPowerSystems (SPS). Фильтр ФМ30 представлен индуктивностью и актив-

ным сопротивлением нулевой последовательности, причём нейтральная точка образована первичными обмотками идеальных трансформаторов, подключённых к фазам сети, а их вторичные обмотки соединены в треугольник, нагруженный на пренебрежимо малое сопротивление (1 мОм). Проводимость дуги рассчитывается путём совместного решения уравнения, описывающего её поведение, с системой дифференциальных уравнений состояния электрической цепи. Уравнение дуги задаётся в отдельной подсистеме (рис. 5), а значения её тока как произведение напряжения на дуговом промежутке на рассчитанную проводимость в каждый момент времени подаются на вход блока управляемого источника тока.

Предлагаемая модель дугового замыкания. Определение её параметров

Прежде чем перейти к рассмотрению модели дугового замыкания, следует подчеркнуть важные особенности, связанные с используемой физической моделью сети. Как описано выше, дуговой промежуток подключается к фазе повышающего трансформатора через участок ошиновки длиной около 10 м. Такое обстоятельство обуславливает наличие в экспериментальном токе замыкания двух высокочастотных составляющих, первая из которых создаётся колебаниями в контуре «фазная

ёмкость — индуктивность ошиновки», а вторую определяет индуктивность источника. Другое существенное отличие экспериментальной установки от реальной сети — сравнительно малая мощность источника и, следовательно, невысокая частота собственных колебаний при ОЗЗ. Однако эти факторы не имеют принципиального значения для предмета настоящей работы, поскольку они не меняют сути происходящих процессов.

На рис. 6, а представлена расчётная осциллограмма тока замыкания при описании проводимости дуги уравнением Майера. В сравнении с экспериментальной осциллограммой (рис. 6, б) заметны два основных отличия:

- 1) скорость затухания первой ВЧ-составляющей заметно меньше;
- 2) гашение дуги происходит при переходе первой высокочастотной составляющей тока замыкания через нулевое значение, а не второй (рис. 6, в).

Следует отметить, что оба фактора имеют противоположную зависимость от параметров уравнения Майера. Скорость затухания первой высокочастотной составляющей тока тем выше, чем меньше проводимость дуги, чего можно достичь увеличением $P_{\text{отв}}$. В свою очередь, уменьшение скорости изменения тока при переходе через нулевое значение, при которой будет происходить гашение дуги, требует уменьшения значения $P_{\text{отв}}$. Исходя из этих соображений следует вывод, что для

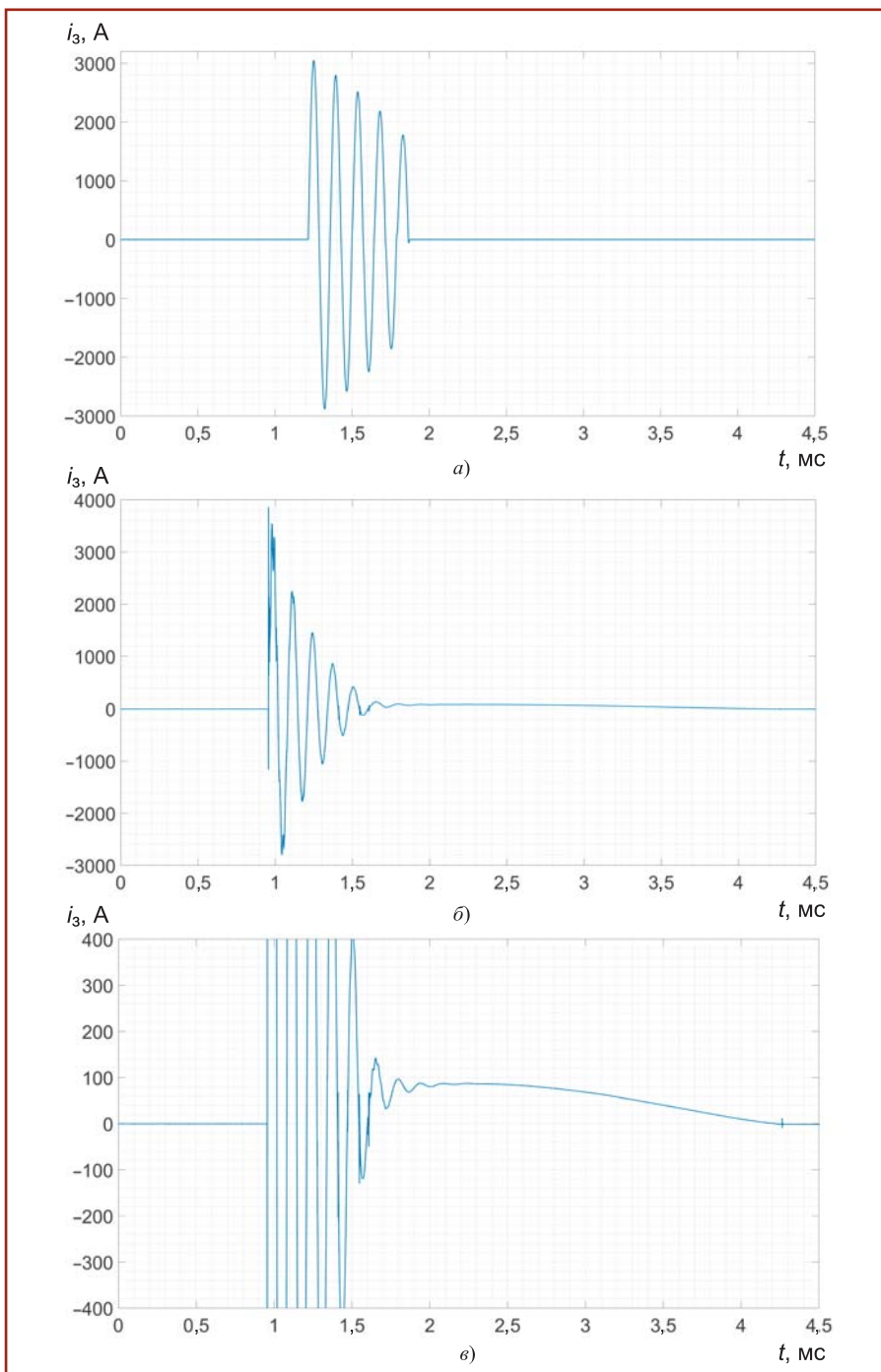


Рис. 6. Осциллограммы тока замыкания на землю:

a — осциллограмма, полученная расчётным путём при $P_{\text{отв}} = 215$ кВт, $\tau = 1$ мкс; *б* — экспериментальная осциллограмма; *в* — экспериментальная осциллограмма при уменьшенных пределах по оси тока замыкания

воспроизведения результатов экспериментов необходимо менять значение $P_{\text{отв}}$ в зависимости от текущего состояния дуги.

Таким образом, основной недостаток уравнения Майера применительно к моделируемому дуговому промежутку — постоянство мощности охлаждения канала дуги. Также это следует и из физических соображений. В соответствии с законом Фурье плотность потока энергии, передаваемой посредством теплопроводности, пропорцио-

нальна градиенту температуры. Помимо механизма теплопроводности следует учитывать также механизмы конвекции и излучения. Всё это делает невозможным корректный учёт отводимой от канала дуги энергии одним постоянным значением.

В свою очередь, проводимость дуги является функцией температуры, поэтому мощность охлаждения канала дуги можно представить в виде зависимости от проводимости, которая учитывала бы все механизмы теплопередачи.

На основе экспериментальных данных подобран следующий вид уравнения дуги:

$$\frac{d(\ln g)}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{P_0 + Cg^\alpha} - 1 \right), \quad (5)$$

где P_0 — составляющая мощности охлаждения, независимая от температуры, C и α — некоторые постоянные, определяющие составляющую мощности охлаждения, зависящую от температуры.

На рис. 7 и 8 представлены расчётные осциллограммы тока замыкания при различных параметрах уравнения (5), из которых следует, что параметр α влияет на форму огибающей тока замыкания: например, при $\alpha = 1,5$ форма огибающей близка к линейной, а при больших значениях приближается к экспоненциальной. Параметр C при заданном значении α определяет скорость затухания высокочастотной составляющей тока замыкания.

На рис. 9 представлены участки расчётных осциллограмм тока замыкания, соответствующие последнему переходу первой высокочастотной составляющей через ноль. Влияние составляющей мощности охлаждения канала дуги, независимой от проводимости дуги, на ток замыкания (при заданных параметрах C и α) сводится к влиянию на критическое значение скорости изменения тока при переходе через ноль, т. е. такое значение, ниже которого дуга гаснет, а выше — нет. Однако, как показано на рис. 10, для указанного параметра существенно также значение постоянной времени τ , поэтому при подборе параметров уравнения (5) необходимо рассматривать эти величины совместно.

Таким образом, процесс подбора параметров уравнения (5) применительно к конкретному случаю замыкания на землю состоит в следующем:

- 1) подбор параметра α исходя из формы огибающей осциллограммы тока замыкания;
- 2) подбор параметра C исходя из скорости затухания высокочастотной составляющей тока замыкания;
- 3) подбор независимой составляющей мощности охлаждения P_0 и постоянной времени τ исходя из наибольшего значения скорости изменения тока при переходе через ноль, при котором наблюдается гашение дуги, или наименьшего значения, при котором гашение дуги не наблюдается (либо исходя из комбинации этих значений).

Дуговое замыкание может иметь перемежающийся характер, при котором после гашений дуги происходят её повторные зажигания. Для моделирования процесса перемежающегося замыкания необходим учёт восстановления электрической прочности в месте повреждения.

В первую очередь необходимо выбрать закон, которым будет описан

процесс восстановления электрической прочности промежутка. Были рассмотрены два варианта — возрастание электрической прочности по линейному и по экспоненциальному закону:

$$U_{\text{пр}} = U'_{\text{пр}} t + U_{\text{пр}0}; \quad (6)$$

$$U_{\text{пр}} = U_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (7)$$

где $U'_{\text{пр}}$ — скорость восстановления электрической прочности; $U_{\text{пр}0}$ — начальное значение электрической прочности промежутка после погасания дуги; U_0 — значение электрической прочности полностью деионизированного промежутка; τ — постоянная времени экспоненциального возрастания электрической прочности.

При обработке экспериментальных данных для каждого цикла гашения-зажигания дуги рассчитаны коэффициенты, характеризующие восстановление электрической прочности промежутка — скорость и постоянная времени для линейного и экспоненциального законов соответственно. В результате выявлено, что при использовании линейного закона (6) среднеквадратическое отклонение коэффициентов от их среднего значения в выборке, рассчитанной с помощью экспериментальных данных, гораздо меньше, чем при использовании экспоненциального закона (7). Исходя из этого, в описываемую расчётную модель дугового замыкания был заложен линейный закон восстановления электрической прочности места повреждения.

Как известно, значение пробивного напряжения заданного промежутка имеет некоторый статистический разброс. Следует полагать, что он присущ и скорости восстановления электрической прочности, которая во многом определяется комбинацией частиц — также случайным процессом. Это предположение учитывается в описываемой модели путём использования генератора случайных чисел, распределённых по нормальному закону. Математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение выдаваемых генератором значений определяются из эксперимента. В случаях, когда начальное значение электрической прочности промежутка оказывает существенное влияние на характер переходного процесса, целесообразно рассматривать его также как случайную величину, в соответствии со значением которой корректируются параметры закона распределения скорости восстановления электрической прочности промежутка.

Описать процесс зажигания дуги только лишь с помощью уравнения (5) невозможно. Его свойства таковы, что проводимость увеличивается лишь при условии превышения выделяющейся в канале мощности над отводимой. После погасания дуги (снижения проводимости практически до нулевого зна-

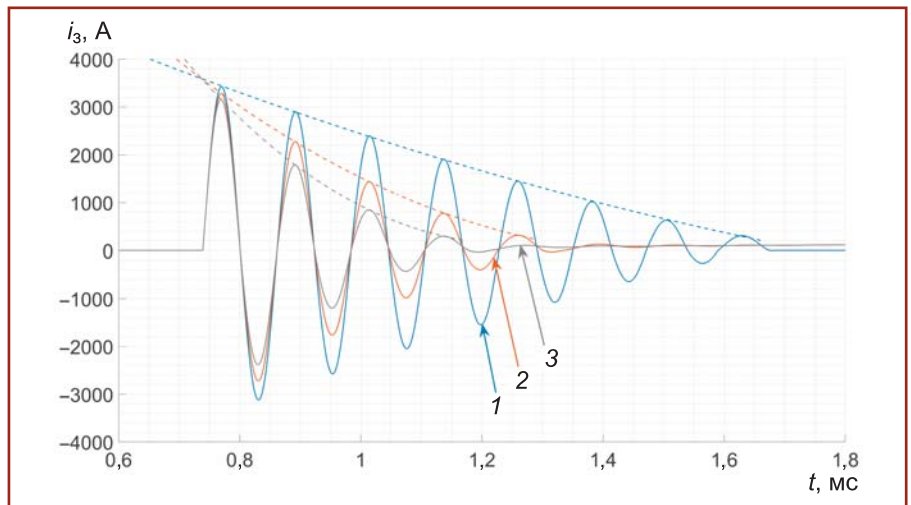


Рис. 7. Расчётные осциллограммы тока замыкания при различных значениях параметра α и $C = 13 \text{ кВт/См}^{1.5}$:

1 — $\alpha = 1,5$; 2 — $\alpha = 2,5$; 3 — $\alpha = 3,5$

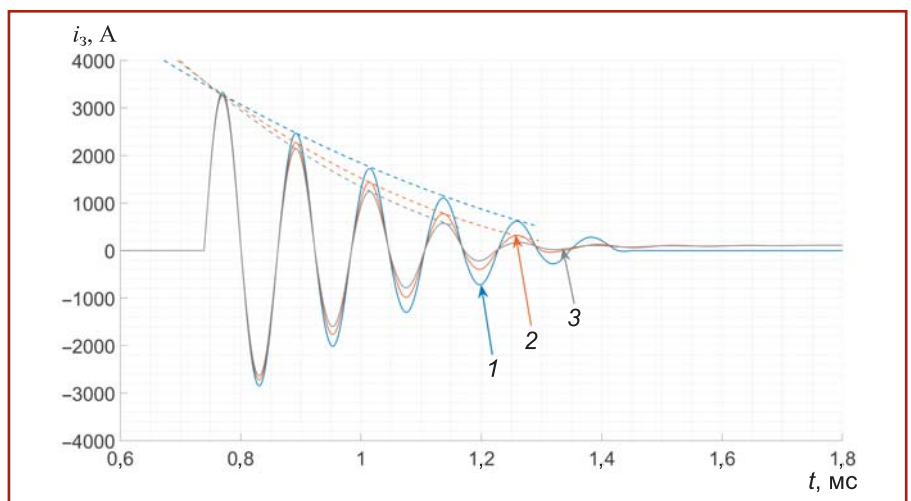


Рис. 8. Расчётные осциллограммы тока замыкания при различных значениях параметра C и $\alpha = 2,5$:

1 — $C = 7 \text{ кВт/См}^{2.5}$; 2 — $C = 13 \text{ кВт/См}^{2.5}$; 3 — $C = 19 \text{ кВт/См}^{2.5}$

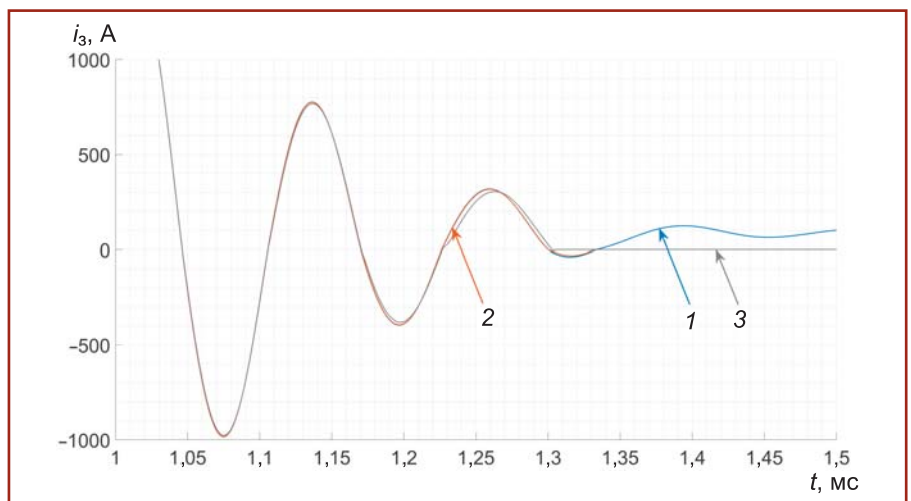


Рис. 9. Расчётные осциллограммы тока в канале дуги, иллюстрирующие момент перехода первой высокочастотной составляющей через ноль при различных значениях P_0 :

1 — $P_0 = 0 \text{ Вт}$; 2 — $P_0 = 500 \text{ Вт}$; 3 — $P_0 = 5000 \text{ Вт}$

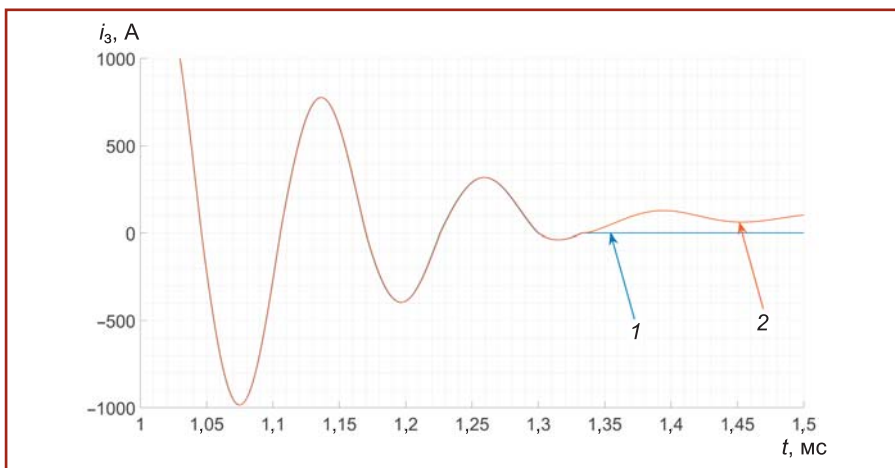


Рис. 10. Расчётные осциллограммы тока в канале дуги, иллюстрирующие момент перехода первой высокочастотной составляющей через ноль при различных значениях τ :

1 — $\tau = 0,5$ мкс; 2 — $\tau = 1,0$ мкс

чения) ток через промежуток отсутствует, и проводимость возрастает не может — следовательно, невозможно и протекание тока. Поэтому в настоящей модели после превышения напряжением на промежутке значения его электрической прочности изменение проводимости канала дуги определяется не решением уравнения (5), а задаётся следующим выражением:

$$g(t) = g_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{пр}}} \right), \quad (8)$$

где g_0 — значение, к которому стремится проводимость дуги после пробоя, $\tau_{пр}$ — постоянная времени возрастания проводимости. Уравнение (8) решается в течение пяти постоянных времени $\tau_{пр}$, после чего решается уравнение (5). Значение g_0 в настоящей работе принято равным 1 См, $\tau_{пр}$ — 1 мкс.

Ниже представлены некоторые из экспериментальных осциллограмм для случая компенсированной нейтрали, а также результаты расчёта по модели. Параметры уравнения (5) приняты следующими: $P_0 = 75$ Вт, $\tau = 1$ мкс, $\alpha = 2,5$, $C = 10$ кВт/См^{2,5}. Расстройка ДГР принята равной экспериментальной — примерно 1,5 %.

На рис. 11 и 12 представлены расчётная и экспериментальная осциллограммы фазных напряжений для случая модели сети с компенсированной нейтралью. Кратности перенапряжений, полученные в результате расчёта, с хорошей точностью соответствуют экспериментально полученным данным.

На рис. 13 сопоставлены участки расчётной и экспериментальной осциллограмм тока замыкания, из которых видно, что уравнение (5) с хорошей степенью точности воспроизводит зарегистрированную кривую тока при первом зажигании дуги. Расчётные осциллограммы при повторных пробоях несколько отличаются от экспериментальных ввиду статистического разбро-

са параметров восстанавливающейся электрической прочности промежутка, однако характер процесса, полученно-

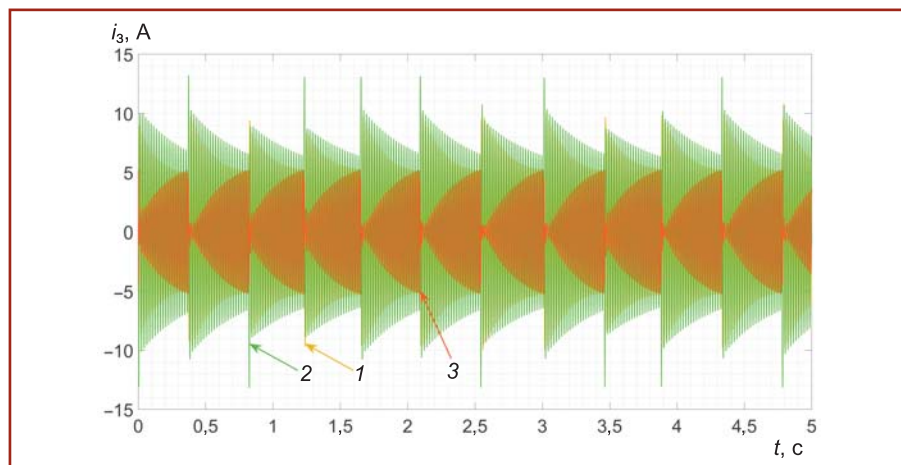


Рис. 11. Расчётная осциллограмма фазных напряжений для модели сети с компенсированной нейтралью:

1 — фаза А; 2 — фаза В; 3 — фаза С

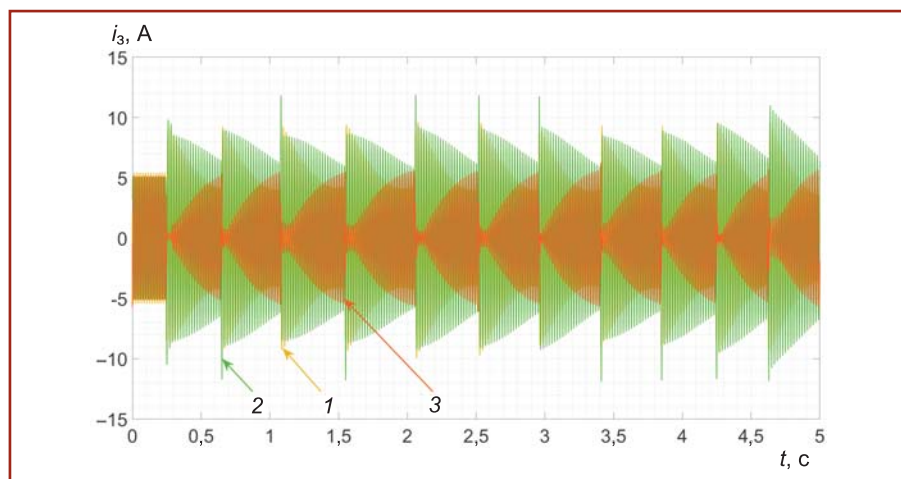


Рис. 12. Экспериментальная осциллограмма фазных напряжений для модели сети с компенсированной нейтралью:

1 — фаза А; 2 — фаза В; 3 — фаза С

го расчётным путём, совпадает с экспериментально зарегистрированным. На рис. 14 представлены соответствующие рис. 13 участки расчётной и экспериментальной осциллограмм напряжения повреждённой фазы, которые также демонстрируют способность описываемой модели воспроизводить характер переходных процессов с достаточной хорошей степенью точности.

Выводы

1. На испытательном стенде ОАО «РЭТЗ Энергия» проведены измерения параметров переходных процессов при однофазных дуговых замыканиях на землю. Зарегистрированные процессы воспроизведены с помощью численного расчёта в программном пакете SPS.

2. Применение классических уравнений ОДЗ на экспериментально-испытательном стенде 6 кВ не позволило воспроизвести параметры зарегистрированных переходных процессов.

3. Предложена модель дугового замыкания и процедура подбора её пара-

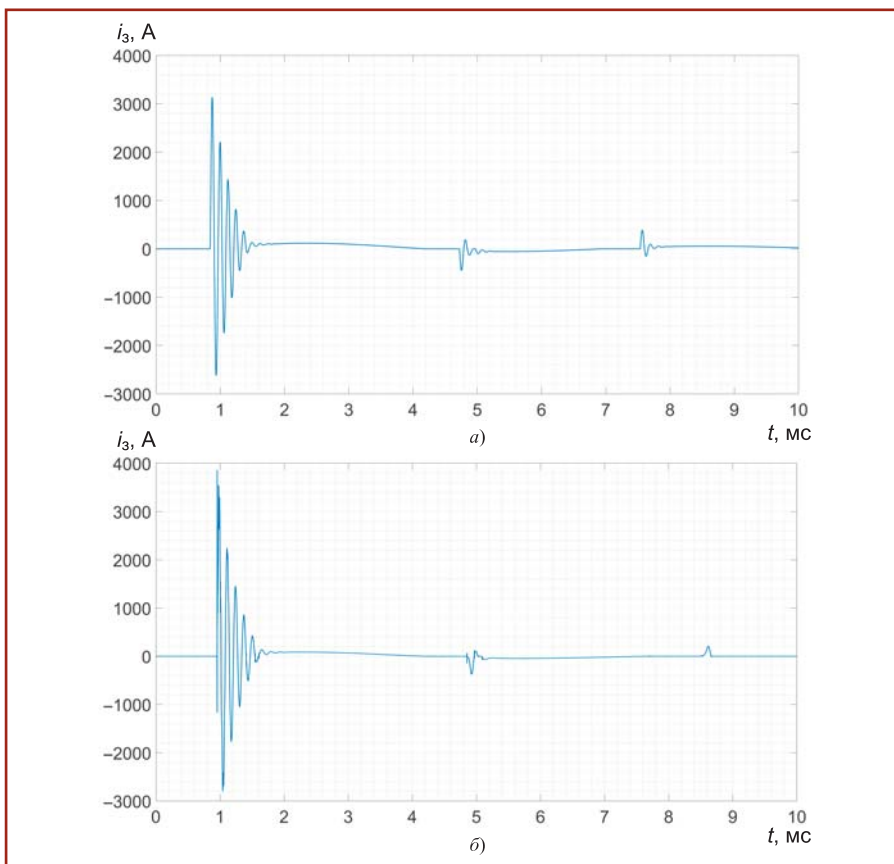


Рис. 13. Расчётная (а) и экспериментальная (б) осциллограммы тока замыкания на землю

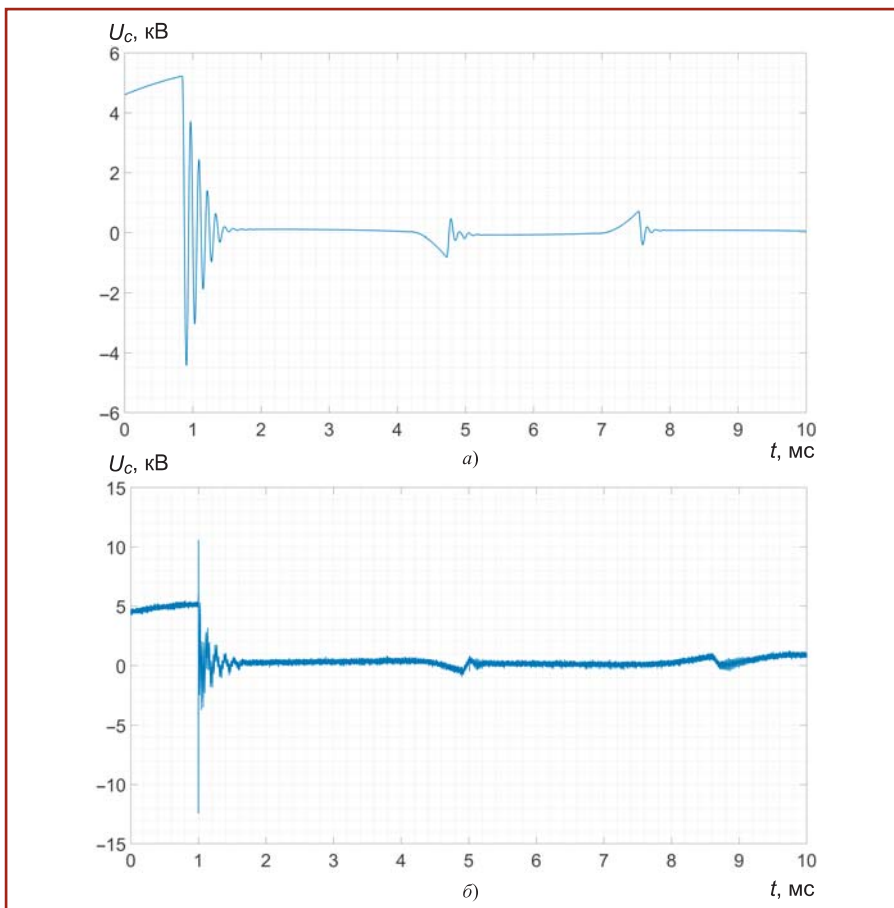


Рис. 14. Расчётная (а) и экспериментальная (б) осциллограммы напряжения повреждённой фазы

метров, основанная на обработке результатов экспериментов. Модель включает в себя:

- экспоненциальный закон изменения проводимости дуги при пробое;
- дифференциальное уравнение, описывающее проводимость дуги;
- закон восстановления электрической прочности после её погасания.

Восстановление электрической прочности промежутка описывается в модели линейным законом, параметры которого подвержены статистическому разбросу, соответствующему экспериментальным данным.

4. Сравнение результатов экспериментов и численных расчётов в SPS показывает, что при корректном подборе параметров указанная модель с хорошей степенью точности воспроизводит переходные процессы при ОДЗ.

5. Дальнейшая работа должна быть направлена на определение параметров модели по результатам регистраций в реальных электрических сетях, где отсутствует измерение тока замыкания. Такая задача должна решаться как оптимизационная с использованием осциллограмм фазных напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Техника высоких напряжений: учебник для студ. электротехнических и электроэнергетических специальностей вузов / Под общей ред. Д. В. Разевига. Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Энергия, 1976. — 488 с.
2. Petersen W. Der Aussetzende (Intermittierende) Erdschuss // ETZ, No. 47 – 48, 1917.
3. Peters J. F., Slepian J. Voltages Induced by Arcing Grounds // AIEE Transactions, Vol. 42, 1923, pp. 478 – 493.
4. Беляков Н. Н. Исследование перенапряжений при дуговых замыканиях на землю: дис. ... канд. техн. наук — М.: Министерство электростанций СССР, Центральная научно-исследовательская лаборатория, 1954. — 184 с.
5. Sluis L. Transients in Power Systems // John Wiley & Sons, 2001.
6. Cassie A. M. Arc Rupture and Circuit Severity: a new theory // CIGRE Session Report No. 102, 1939.
7. Mayr O. Beitrage zur Theorie des Statischen und des Dynamischen Lichtbogens // Archiv für Elektrotechnik, Vol. 37, No. 12, 1943, pp. 588 – 608.
8. Schwarz J. Dynamisches Verhalten eines Gasbeblasenen, Turbulenzbestimmten Schaltlichtbogens // ETZ-A, Vol. 92, 1971, pp. 389 – 391.
9. Schavemaker P. H., Sluis L. An Improved Mayr-Type Arc Model Based on Current-Zero Measurements // IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 2, 2000, pp. 580 – 584.
10. Browne T. E. A Study of A-C Arc Behavior Near Current Zero by Means of Mathematical Models // AIEE Transactions, Vol. 67, No. 1, 1948, pp. 141 – 153.
11. Habedank U. Application of a New Arc Model for the Evaluation of Short-circuit Breaking Tests // IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, No. 4, 1993, pp. 1921 – 1925.