

УДК 621.311

***МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ
КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ******Царегородцев А.Д.¹****магистрант,
ФГБОУ ВО Амурский государственный университет,
РФ, г. Благовещенск***Аннотация.**

В статье рассмотрены вопросы моделирования переходных процессов, возникающих при коротких замыканиях в электрических сетях. Описана физическая сущность явления, включая формирование принужденной и апериодической составляющих тока, а также особенности поведения синхронных генераторов в сверхпереходной и переходной стадиях. Приведены основные математические модели, такие как аналитические решения для цепи R L, уравнения Парка для синхронных машин и метод симметричных составляющих для анализа несимметричных повреждений. Представлены практические методы расчета ударных токов, тепловых импульсов и ударных коэффициентов. Приведен численный пример расчета параметров короткого замыкания для генератора мощностью 100 МВА.

Ключевые слова: переходный процесс, короткое замыкание, моделирование, апериодическая составляющая, сверхпереходный ток.

***MODELING TRANSIENT PROCESSES DURING SHORT CIRCUIT
FAULTS******Tsaregorodtsev A.D.***

¹ Научный руководитель: Козлов А.Н. кандидат техн.наук. доцент
Дневник науки | www.dnevniknauki.ru | СМИ Эл № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

*Master's Student,
Amur State University,
Blagoveshchensk, Russian Federation*

Annotation.

This article examines the modeling of transient processes occurring during short circuits in electrical networks. It describes the physical nature of the phenomenon, including the formation of forced and aperiodic current components, as well as the behavior of synchronous generators during the subtransient and transient stages. Key mathematical models are presented, including analytical solutions for the R-L circuit, Park's equations for synchronous machines, and the method of symmetrical components for analyzing asymmetrical faults. Practical methods for calculating surge currents, thermal pulses, and surge coefficients are presented. A numerical example of calculating short-circuit parameters for a 100 MVA generator is provided.

Keywords: transient process, short circuit, modeling, aperiodic component, subtransient current.

Короткое замыкание в электрической сети представляет собой аварийный режим работы. При этом режиме токи в цепи могут превышать номинальные значения в десятки раз. Такое явление возникает при соединении двух точек с разными потенциалами через проводник с низким сопротивлением. Причинами могут быть повреждение изоляции, поломка оборудования или ошибочные действия персонала.

Переходный процесс при коротком замыкании развивается очень быстро. Его продолжительность обычно составляет от долей секунды до

нескольких секунд. За это время электромагнитные и электромеханические величины успевают существенно измениться. Знание характера этих изменений необходимо для правильного выбора защитной аппаратуры. Также результаты моделирования помогают рассчитать ударные токи и тепловые импульсы.

Моделирование переходных процессов позволяет изучать поведение системы без реальной аварии. Это безопасный и экономичный способ получить информацию о динамике токов и напряжений. Современные средства моделирования дают инженерам возможность предсказывать последствия коротких замыканий. Они также помогают подбирать параметры устройств релейной защиты и автоматики.

Важно отметить, что переходный процесс имеет две основные стадии. Первая стадия называется сверхпереходной. Она длится примерно один период промышленной частоты. На этой стадии проявляют себя индуктивности рассеяния обмоток машин. Вторая стадия является переходной. Она связана с затуханием апериодической составляющей тока и изменением потокосцеплений в синхронных машинах.

Для адекватного моделирования необходимо учитывать множество факторов. Среди них лежат активные и индуктивные сопротивления элементов сети. Также важны емкостные проводимости линий и запас энергии в магнитных полях. Чем подробнее модель, тем точнее результат. Однако сложные модели требуют больших вычислительных ресурсов.

Основная формула, описывающая переходный процесс в простейшей цепи, выглядит следующим образом. Полный ток короткого замыкания в цепи R L выражается как

$$i(t) = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \frac{U_m}{Z} (\alpha - \varphi) \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$$

Первое слагаемое здесь это принужденная составляющая. Второе слагаемое – это свободная апериодическая составляющая. В формуле U_m означает амплитуду напряжения, $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ полное сопротивление, α фазу включения, а $\varphi = \arctg(\frac{\omega L}{R})$ угол сдвига. Важной величиной является постоянная времени цепи

$$T_a = \frac{L}{R}$$

Это время, за которое апериодическая составляющая уменьшается в e раз примерно в 2,718 раза [2,3].

Чтобы понять принципы моделирования, надо разобраться в физических процессах. При коротком замыкании (Рис.1) общее сопротивление цепи резко уменьшается. Это приводит к росту тока согласно закону Ома. Однако этот рост происходит не мгновенно из-за наличия индуктивностей. Индуктивность препятствует изменению тока, вызывая появление свободной апериодической составляющей.

Полный ток короткого замыкания можно представить как сумму двух составляющих. Первая составляющая является принужденной или установившейся. Она существует до тех пор, пока существует короткое замыкание. Эта составляющая имеет синусоидальную форму с частотой сети. Ее амплитуда определяется отношением напряжения к полному сопротивлению цепи [1].

Вторая составляющая называется свободной или апериодической. Она появляется в момент возникновения аварии. Эта составляющая имеет экспоненциальный характер. Ее начальное значение зависит от фазы напряжения в момент короткого замыкания. Со временем апериодическая составляющая затухает с постоянной времени цепи.

В синхронных генераторах ситуация усложняется. Магнитный поток в машине не может измениться мгновенно. Поэтому в первые моменты короткого замыкания реактивность генератора минимальна. Она равна сверхпереходному сопротивлению. По мере затухания свободных токов в демпферных обмотках реактивность растет до переходного значения. Затем после затухания тока в обмотке возбуждения реактивность достигает установившегося значения [4].

Этот процесс называется изменением реактивности во времени. Он приводит к тому, что огибающая тока короткого замыкания уменьшается от максимального значения к меньшему. Такое поведение характерно для генераторов и крупных двигателей. При моделировании эти особенности надо обязательно воспроизводить.

В сетях, где нет синхронных машин, переходный процесс проще. Там ток короткого замыкания состоит только из синусоидальной и апериодической составляющих. Апериодическая составляющая затухает за несколько периодов частоты сети. После этого наступает установившийся режим короткого замыкания.

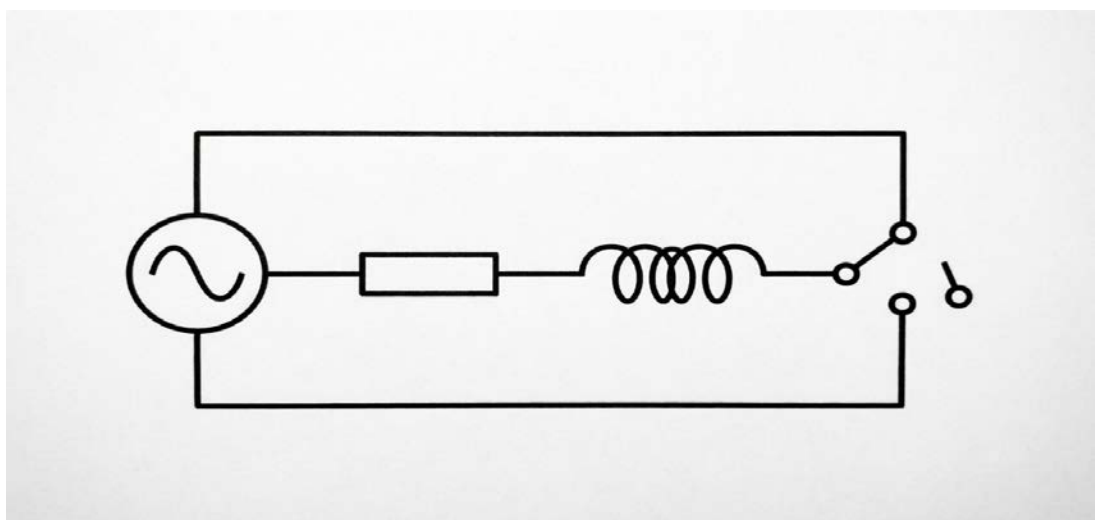


Рисунок 1 - Электрическая цепь R L для анализа переходного процесса при коротком замыкании [7].

Математическое моделирование переходных процессов базируется на дифференциальных уравнениях. Эти уравнения описывают связь между токами, напряжениями и параметрами элементов. Основой служат законы Кирхгофа и компонентные уравнения резисторов, индуктивностей, емкостей. Для трехфазных цепей уравнения записываются для каждой фазы отдельно [6].

Первый подход к моделированию использует аналитические методы. Он подходит для простых схем с одним источником питания. Например, для линии с нагрузкой или для одиночного генератора. Аналитическое решение дает точные выражения для тока и напряжения. Однако с ростом сложности схемы аналитические методы становятся громоздкими. Они требуют решения систем дифференциальных уравнений высокого порядка.

Второй подход основан на использовании преобразования Лапласа. Этот метод переводит дифференциальные уравнения в алгебраические. В области комплексной переменной легче решать задачи с коммутациями. После получения решения в изображениях выполняется обратное преобразование. Для типовых цепей существуют готовые таблицы изображений. Преимуществом метода является возможность учета начальных условий.

Третий подход заключается в применении фазных координат. При этом все элементы цепей описываются матрицами сопротивлений и проводимостей. Уравнения составляются для мгновенных значений токов и напряжений. Этот подход универсален, но требует больших вычислительных затрат. Он удобен для несимметричных режимов [3,5].

Четвертый подход широко распространен в компьютерных программах. Это метод узловых потенциалов или метод контурных токов в сочетании с численным интегрированием. Наиболее популярным является метод трапеций. Он относится к численным методам решения дифференциальных уравнений.

Шаг интегрирования выбирается автоматически или задается пользователем. Метод трапеций обеспечивает хорошую устойчивость и точность.

Для синхронных машин часто используют уравнения Парка. Это преобразование координат, которое переносит обмотки ротора на оси d и q . В результате уравнения с переменными коэффициентами превращаются в уравнения с постоянными коэффициентами. Это упрощает моделирование и ускоряет расчеты.

Важными формулами для моделирования генераторов являются выражения для токов в разные моменты времени. Сверхпереходный ток генератора в начальный момент короткого замыкания

$$I_k'' = \frac{E''}{X_d''}$$

Здесь E'' сверхпереходная ЭДС генератора, X_d'' сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси. Переходный ток после затухания быстрых процессов

Следует запомнить, что $X_d'' < X_d' < X_d$. Поэтому ток вначале максимальный, а потом снижается. Закон изменения тока во времени описывается приближенной формулой

$$I_k(t) = I_k'' \cdot e^{-\frac{t}{T_d''}} + (I_k' - I_k'') \cdot e^{-\frac{t}{T_d'}} + I_k$$

Величины T_d'' и T_d' это сверхпереходная и переходная постоянные времени.

Симметричное трехфазное короткое замыкание является самым тяжелым по току. Однако на практике чаще встречаются несимметричные повреждения. К ним относятся однофазные, двухфазные и двухфазные на землю замыкания. Для моделирования таких режимов недостаточно

использовать эквивалентную схему одной фазы. Требуется применение метода симметричных составляющих [2].

Этот метод был предложен Фортестью в начале XX века. Он заключается в разложении несимметричной трехфазной системы на три симметричные системы. Это прямая последовательность, обратная последовательность и нулевая последовательность. Каждая последовательность имеет свои сопротивления элементов сети. Для вращающихся машин эти сопротивления различны.

Моделирование несимметричного короткого замыкания включает несколько этапов. Сначала составляются схемы замещения для каждой последовательности. Затем рассчитываются их результирующие сопротивления и ЭДС. После этого формируются граничные условия в месте повреждения. Граничные условия зависят от вида короткого замыкания. Например, при однофазном замыкании на землю токи прямой и обратной последовательностей равны между собой.

Далее решается система уравнений для токов и напряжений последовательностей. Полученные токи преобразуются обратно в фазные величины. Переходный процесс при несимметричном коротком замыкании также содержит апериодические составляющие. Их затухание происходит по постоянным времени соответствующих последовательностей.

Моделирование несимметричных повреждений требует внимания к характеристикам трансформаторов. Схемы соединения обмоток влияют на прохождение токов нулевой последовательности. В трансформаторе со схемой звезда треугольник ток нулевой последовательности не проходит на сторону треугольника. Это необходимо учитывать при построении схемы замещения [3].

Современные цифровые программы позволяют автоматически строить схемы последовательностей. Пользователю достаточно указать вид короткого замыкания и место повреждения. Программа сама формирует граничные условия и решает уравнения. Это значительно ускоряет процесс моделирования для сложных электрических сетей.

Формулы для расчета токов при несимметричных повреждениях выглядят следующим образом (Рис. 2). Для однофазного короткого замыкания на землю ток поврежденной фазы

$$I_{k1} = \frac{3E}{Z_1 + Z_2 + Z_3}$$

Здесь E ЭДС прямой последовательности, Z_1 , Z_2 , Z_0 сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей. Для двухфазного короткого замыкания без земли

$$I_{k2} = \frac{\sqrt{3}E}{Z_1 + Z_2}$$

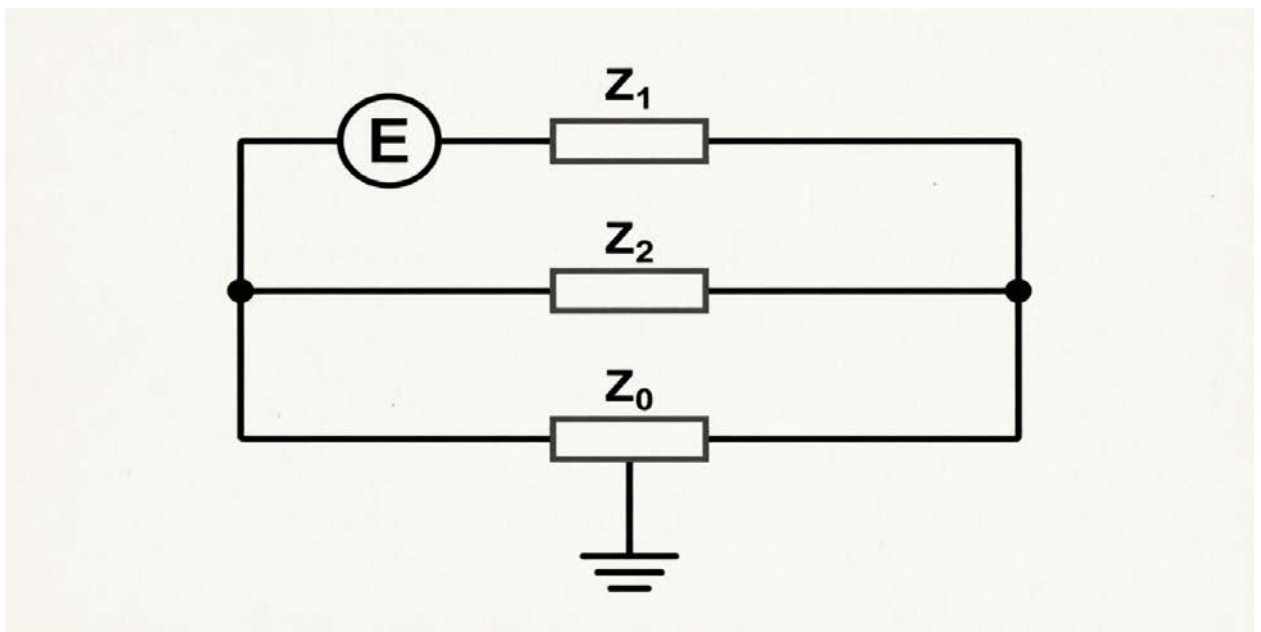


Рисунок 2 - Схема замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей при однофазном коротком замыкании на землю [7].

В инженерной практике не всегда требуется подробное моделирование с миллисекундной разбивкой. Для выбора оборудования часто достаточно знать максимальные и минимальные значения токов. Существуют упрощенные методы расчета, которые дают приемлемую точность. Один из них метод расчетных кривых. Он разработан для систем с синхронными генераторами [4].

Метод расчетных кривых основан на типовых зависимостях тока от времени. Эти зависимости получены для генераторов разных типов и мощностей. Для расчета необходимо знать удаленность точки короткого замыкания от генератора. Удаленность выражается через расчетное сопротивление. По этому сопротивлению и времени определяется относительный ток.

Для систем с несколькими генераторами их приводят к одному эквивалентному источнику. При этом используют принцип сохранения суммарной мощности и реактивностей. Метод расчетных кривых хорошо зарекомендовал себя в проектных организациях. Он позволяет быстро оценить периодическую составляющую тока в любой момент времени.

Другой практический метод основан на использовании типовых постоянных времени. Этот метод применяют для определения аperiodической составляющей. Максимальное значение аperiodической составляющей принимается равным амплитуде периодической. Затем ток затухает по экспоненте с заданной постоянной времени. Значения постоянных времени приведены в нормативных документах [5].

Для сетей напряжением до 1 кВ используется иная методика. Здесь активное сопротивление часто превышает индуктивное. Поэтому аperiodическая составляющая затухает очень быстро. Основное внимание уделяется расчету ударного тока. Ударный коэффициент в таких сетях не

превышает 1,05. Также важно учитывать переходные сопротивления в месте короткого замыкания.

Все упрощенные методы расчета имеют ограничения. Они не учитывают насыщение магнитных систем. Они также не моделируют работу автоматических регуляторов возбуждения. Для точного исследования сложных систем применяют цифровое моделирование во временной области. Такие программы как MATLAB Simulink, PSCAD, EMTP позволяют учесть все детали.

Основные формулы для практических расчетов включают следующие выражения. Ударный ток короткого замыкания

Величина $k_{уд}$ это ударный коэффициент. Он рассчитывается так

$$k_{уд} = 1 + e^{-\frac{\pi}{T_a/T}}$$

Здесь T период промышленной частоты, равный 0,02 секунды для сети 50 Гц. Для цепей с большим активным сопротивлением ударный коэффициент близок к 1. Действующее значение полного тока в первый момент

$$I_y = I_k'' \cdot \sqrt{1 + 2(k_{уд} - 1)^2}$$

Тепловой импульс, необходимый для проверки нагрева

$$B_k = \int_0^{t_{откл}} i^2(t) dt$$

Приближенно для быстрых защит

$$B_k = (I_k'')^2 \cdot (T_a + t_{откл})$$

Величина $k_{уд}$ это ударный коэффициент. Он рассчитывается так

$$k_{уд} = 1 + e^{-\frac{\pi}{T_a/T}}$$

Здесь T период промышленной частоты, равный 0,02 секунды для сети 50 Гц. Для цепей с большим активным сопротивлением ударный коэффициент близок к 1. Действующее значение полного тока в первый момент

$$I_y = I_k'' \cdot \sqrt{1 + 2(k_{уд} - 1)^2}$$

Тепловой импульс, необходимый для проверки нагрева

$$W_k = \int_0^{t_{откл}} i^2(t) dt$$

Приближенно для быстрых защит

$$W_k = (I_k'')^2 \cdot (T_a + t_{откл})$$

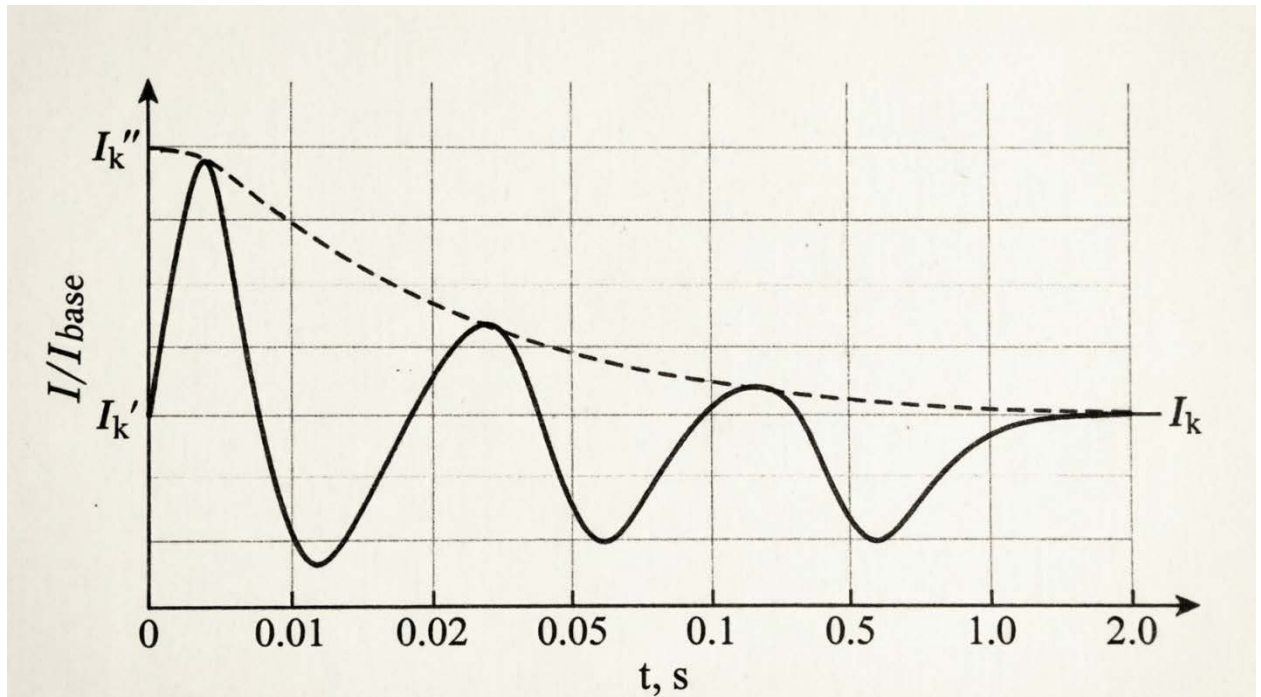


Рисунок 3 - График изменения тока короткого замыкания во времени [7].

Современное цифровое моделирование переходных процессов базируется на мощных вычислительных комплексах. Программный пакет ЕМТР (Electromagnetic Transients Program) считается классическим. Он создан специально для расчета электромагнитных переходных процессов. ЕМТР позволяет моделировать любые виды коротких замыканий. Программа учитывает нелинейности, ферромагнитные искажения и дуговые разряды.

Другим распространенным средством является MATLAB с пакетом Simulink и библиотекой Simscape Electrical. Этот инструмент удобен для образовательных целей и научных исследований. Пользователь строит схему из готовых блоков. Блоки представляют генераторы, линии, трансформаторы и выключатели. Параметры задаются через диалоговые окна. Симуляция выполняется в среде Simulink с возможностью визуализации результатов [6].

Промышленным стандартом в области энергетики считается программный комплекс PSCAD. Он имеет развитый графический интерфейс и библиотеки моделей. PSCAD позволяет выполнять моделирование в реальном

масштабе времени. Это важно для тестирования устройств релейной защиты. Большим преимуществом является поддержка параллельных вычислений на многоядерных процессорах.

Рассмотрим пример расчета параметров для моделирования. Пусть имеется генератор мощностью 100 МВА с номинальным напряжением 10,5 кВ. Номинальный ток такого генератора

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}U_{\text{НОМ}}} = \frac{100 \cdot 10^6}{1,73 \cdot 10,5 \cdot 10^3} \approx 5500 \text{ А}$$

Сверхпереходный ток при трехфазном коротком замыкании на выводах генератора

$$I''_{\text{к}} = \frac{E''}{X''_{\text{д}}} I_{\text{НОМ}}$$

При типовом значении $E'' = 1,08$ от номинала и $X''_{\text{д}} = 0,12$ относительных единиц

$$I''_{\text{к}} = \frac{1,08}{0,12} \cdot 5500 \approx 49500 \text{ А}$$

Это почти в 9 раз выше номинала. Ударный ток при ударном коэффициенте 1,8

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 49500 \approx 126000 \text{ А}$$

Такие параметры необходимо учитывать при выборе выключателей и проводников.

Результаты моделирования показывают характерный спад тока. В первый момент ток достигает 12 кратного значения от номинального. За несколько периодов ток снижается до 6 кратного значения. Затем процесс выходит на установившийся уровень в 3 кратного значения. Аперриодическая составляющая накладывается на первые три периода (Рис.3). Она полностью затухает за 0,15 секунды.

Такой результат позволяет сделать выводы. Ударный ток следует учитывать при проверке динамической стойкости оборудования. Тепловой импульс, рассчитанный по интегралу квадрата тока, критичен для изоляции. Время срабатывания защиты должно быть согласовано с характером затухания. Моделирование даёт ценные рекомендации для проектирования.

Таким образом, современное моделирование переходных процессов при коротких замыканиях является незаменимым инструментом. Оно сочетает физически обоснованные математические модели и мощные вычислительные методы. Это позволяет повысить надежность и безопасность электрических систем. Развитие технологий моделирования продолжается, открывая новые возможности для инженеров и исследователей.

Библиографический список

1. Аксенов С. Г., Овчинникова М. Н. Автозаправочная станция как сложный пожаровзрывоопасный объект // Прикладные экономические исследования. 2024. № 3. С. 155–161.

2. Герман Л. А., Герман В. Л. Диагностика аварийных ситуаций контактной сети переменного тока железных дорог // Электроника и электрооборудование транспорта. 2008. № 3. С. 41–47.

3. Герман Л. А., Куров Д. А., Фельдман С. О. и др. Совершенствовать регулирование напряжения на тяговых подстанциях // Локомотив. 2012. № 5 (665). С. 45–46.

4. Герман Л. А., Саморуков А. В., Ишкин Д. В. и др. Интеллектуальные терминалы для автоматизации электроснабжения // Локомотив. 2013. № 12 (684). С. 39–40.

5. Турсунов Д. А., Исмоилов И. К. Анализ вопросов применения устройств регулирования силовых трансформаторов // Universum: технические науки. 2020. № 8-3 (77). С. 68–75.

6. Герман Л. А., Кишкурно К. В. Регулирование напряжения в тяговой сети переменного тока железных дорог // Электричество. 2014. № 9. С. 23–33.

7. Герман Л. А., Герман В. Л. Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока. Москва : МГУПС, 2014. 173 с.

8. Каландаров Х. У., Михеев Г. М., Ефремов Л. Г. Применение переключающих устройств в электроэнергетике // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения : сборник научных трудов. Чебоксары, 2015. Т. 11. С. 129–139.