

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого»

На правах рукописи

КАСЬЯНОВ Сергей Евгеньевич

**Исследование коммутационных процессов в линиях электропередачи с  
элегазовыми выключателями и разработка мероприятий по  
обеспечению их безопасной эксплуатации**

Направление подготовки 13.06.01 – Электро- и теплотехника

Направленность 05.14.02 – Электростанции и электроэнергетические системы

Научный доклад  
об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы: аспирант  
Касьянов Сергей Евгеньевич  
Научный руководитель: доктор  
технических наук, профессор  
Попков Евгений Николаевич

Санкт-Петербург – 2021

Научно-квалификационная работа выполнена в Высшей школе электроэнергетических систем Института энергетики федерального автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШ: Зверев Сергей Геннадьевич  
кандидат технических науки, доцент  
Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

Научный руководитель: Попков Евгений Николаевич  
доктор технических наук, профессор  
Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

Рецензент: Герасимов Андрей Сергеевич  
кандидат технических наук, доцент  
Акционерное общество «Научно-технический центр Единой энергетической системы Противоаварийное управление» (АО «НТЦ ЕЭС Противоаварийное управление»)

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте библиотеки по адресу: <https://elib.spbstu.ru/>

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность темы исследования

В последнее время в сетях сверх- и ультравысокого напряжения получили широкое распространение элегазовые выключатели. В первую очередь это связано с высокой электрической прочностью элегаза, позволяющей делать аппараты более компактными, а также с пожаро- и взрывобезопасностью (элегаз химически инертен) и хорошими дугогасящими свойствами.

Такие преимущества элегазовых выключателей способствуют их повсеместному распространению на всех классах напряжений и уровнях производства и распределения электроэнергии.

Одновременно с увеличением количества элегазовых выключателей с дугогасительной системой автокомпрессионного типа была выявлена проблема, связанная с повреждением этих выключателей в циклах «включение - быстрое отключение» компенсированных линий электропередачи при отключении токов нормального режима с высоким содержанием апериодической составляющей тока [1].

В этот период произошла серия повреждений линейных элегазовых выключателей высокого напряжения, то есть тех выключателей, которыми осуществляется коммутация линий электропередачи (ЛЭП) с присоединенными шунтирующими реакторами. Подобные аварийные ситуации имели место на ПС 500 (1150) кВ Кокшетауская в 2006 и в 2007 гг., на ПС 500 (1150) кВ Алтай в 2007 г., на ПС 500 кВ Агадырь в 2009 г., на ПС 750 кВ Новобрянская в 2011 г.

Аварии происходили в циклах «включение - быстрое отключение», когда вслед за включением ЛЭП с реакторами, при котором в токе линейного выключателя из-за наличия реакторов появлялась апериодическая составляющая, с малым интервалом времени давалась команда на отключение. Повышенное содержание апериодической составляющей в незначительном по

величине отключаемом токе промышленной частоты односторонне питаемой линии приводило к длительному отсутствию нулевых значений этого суммарного тока. Принимая во внимание малое время отключения современных элегазовых выключателей сверхвысокого напряжения, остается открытым вопрос коммутаций в таких режимах, который требует дополнительного изучения. В частности, следует отметить, что большой период эксплуатации в прошедшие годы реактированных линий, снабженных воздушными выключателями, время отключения которых в 2-3 раза превышало время отключения современных элегазовых выключателей, не выявил подобной проблемы.

Наиболее опасными являются схемы, в которых мощность установленных на линии ШР практически полностью компенсирует зарядную мощность линии, то есть, при коэффициенте компенсации близком к 1 о.е. В этом случае, периодическая составляющая тока, протекающего в выключателе, практически равна нулю, поскольку зарядный ток ЛЭП и ток, потребляемый шунтирующими реакторами находятся в противофазе. Таким образом, если при коммутации такой ЛЭП возникнет апериодическая составляющая, это гарантированно приведет к появлению задержек перехода тока через ноль, а, следовательно, и задержек при гашении межконтактной дуги в выключателе, что и приводит к его повреждению.

По стандартам проектирования линии 500 кВ должны быть скомпенсированы на не менее чем 80-100% своей зарядной мощности, для линий 750 кВ это 100-110%. Таким образом, для линий сверхвысокого напряжения коэффициент компенсации зарядной мощности часто оказывается близким к 1 о.е.

Известно, что величина апериодической составляющей тока к моменту возможного отключения ЛЭП определяется:

1. амплитудой фазного тока шунтирующего реактора (то есть его номинальной мощностью);

2. моментом включения (при включении в момент прохождения тока через ноль апериодическая составляющая тока будет равна нулю);
3. скоростью затухания апериодической составляющей.

Очевидно, что, с учетом изложенного выше, опасными являются коммутации, при которых команда на отключение ВЛ следует сразу же за ее постановкой под напряжение. Это может происходить также и при включении ЛЭП на однофазное или двухфазное короткое замыкание, поскольку современные устройства релейной защиты на базе микропроцессоров позволяют производить алгоритмическую обработку поступающих измерений за достаточно малое время – порядка 20-40 мс. Таким образом, команда отключения ЛЭП после ее постановки под напряжение может прийти уже через 1-2 периода промышленной частоты. Апериодическая составляющая тока в неповрежденной фазе линии к этому времени еще не успеет затухнуть, и, при малом значении периодической составляющей, попытка отключения приведет к длительному горению дуги в выключателе с последующим его повреждением из-за отсутствия условий для гашения дуги.

Помимо этого, цикл «включение-быстрое отключение» может иметь место при ложных срабатываниях релейной защиты, вызванных коммутационными процессами при постановке ЛЭП под напряжение, а также в циклах автоматического повторного включения и т.п.

Безаварийная эксплуатация выключателей может быть обеспечена:

1. Схемно-режимными мероприятиями, которые заключаются в перемещении реактора с линии на шины подстанции, постановке ЛЭП под напряжение с противоположного реактору конца, что в ряде случаев может дать требуемый эффект, и других. Как правило, эти мероприятия имеют довольно ограниченный эффект [2];
2. Использование средств управляемой коммутации. Данные средства позволяют совершать коммутацию выключателя в момент, когда возникающая апериодическая составляющая тока реактора минимальна.

Данные средства имеют ограниченную точность, что снижает их эффективность для линий с высокой степенью компенсации [3];

3. Организационные меры, направленные на одновременную коммутацию фазных выключателей, с целью исключить коммутации вида «включение-быстрое отключение». Данные меры весьма эффективны, но не исключают проблему при ошибках работы релейной защиты и автоматики;

4. Предвключаемые резисторы выключателей. Данные резисторы вводятся в цепь выключателя на короткий промежуток времени во время коммутации, приводя к существенному затуханию апериодического тока за время порядка 5-15 мс. Данное средство весьма универсально и эффективно [4];

5. Резисторы в нейтральных выводах реакторов. Данные резисторы вводятся в цепь реактора на короткий промежуток времени во время коммутации и также приводят к существенному затуханию апериодической составляющей тока. Данное средство также универсально и эффективно [5].

Для решения задач выявления опасности повреждения выключателя и выбора средств ее снижения в 2012 году была выпущена методика [6], регламентирующая порядок расчетов. Данная методика имеет ряд недостатков, основным из которых является то, что выбор технического решения необходимо производить путем анализа осциллограмм переходного процесса, которые, особенно часто для тяжелых, с точки зрения функционирования выключателя, режимов, имеют крайне сложный для анализа вид, что может приводить к неоднозначной трактовке результатов.

### **Цели и задачи**

Целью работы является создание подхода к выполнению расчетов по оценке опасности возникновения недопустимых апериодических составляющих токов в линейных выключателях и выбору технического

решения для обеспечения безопасности коммутации выключателя, основанного на объективных расчетных показателях.

Задачи работы:

1. Подготовка инструментов для расчетов параметров апериодических токов и средств:

1.1. Подготовка инструментов для оценки амплитуд апериодических токов;

1.2. Подготовка инструментов для оценки постоянных времени затухания апериодических токов;

1.3. Подготовка инструментов для работы со схемой замещения, предназначенных для расчетов амплитуд и постоянных времени затухания апериодических токов в конкретных схемно-режимных условиях;

1.4. Подготовка инструментов для выбора параметров средств решения проблемы недопустимых апериодических токов выключателей;

2. Определение параметров оптимальной схемы замещения для задач определения опасности повреждения выключателей;

3. Проведение упрощенного анализа опасности возникновения недопустимой апериодической составляющей в различных схемно-режимных условиях для определения наиболее сложных, с точки зрения обеспечения безопасности коммутации выключателей, случаев;

4. Исследование процессов, возникающих при коммутациях элегазовых выключателей компенсированных линий электропередачи с использованием разработанных инструментов, а также анализ наиболее сложных, с точки зрения обеспечения безопасности коммутации выключателей, случаев и поиск решений, направленных на снижение величины апериодической составляющей для этих схем;

5. Сравнение эффективности основных технических решений, позволяющих устранить опасность повреждения элегазовых выключателей;

6. Формирование рекомендаций по выбору мероприятий, обеспечивающих безопасное отключение элегазовых выключателей.

### **Научная новизна**

1. В работе предлагается новый подход к задаче оценки опасности повреждения выключателя вследствие возникновения недопустимых апериодических составляющих и выбору технического решения для исключения этой опасности. Предлагаемый подход позволяет рассчитать отдельные характеристики электромагнитного процесса, которые позволяют объективно оценить возможность безаварийной эксплуатации элегазового выключателя и выбрать соответствующее техническое решение для ее обеспечения.

2. Определены параметры оптимальной схемы замещения для задачи выявления опасности повреждения выключателей компенсированных линий.

3. По результатам анализа широкого спектра схемно-режимных ситуаций выявлены наиболее опасные режимы и их характерные особенности.

4. Выполнено качественное сравнение основных технических средств для борьбы с указанной проблемой на основании их эффективности, сложности подбора решения и принципиальных особенностей для широкого спектра схемно-режимных условий.

### **Практическая значимости работы**

Результаты работы имеют высокую практическую значимость.

Разработанная методика позволяет:

- существенно снизить трудозатраты при проектировании линий электропередачи сверх- и ультравысокого напряжения за счет автоматизации расчетов;

- избежать ошибок при оценке опасности возникновения апериодических составляющих токов элегазовых выключателей путем расчетов электромагнитных переходных процессов в специализированных программных комплексах вручную;

- повысить достоверность получаемых результатов и снизить риски или затраты на реализацию излишних технических решений.

Результаты проведенного анализа различных схемно-режимных условий могут быть применены на ранних этапах проектирования линий электропередачи, для определения наиболее опасных расчетных случаев и предварительного состава технических решений, обеспечивающих безаварийную работу элегазовых выключателей. Впоследствии, наиболее опасные случаи могут быть проанализированы с использованием специализированных программных комплексов для уточнения предложенных технических решений.

### **Методология и методы исследования**

В работе использовались методы расчетов установившихся режимов с использованием матричных методов, метод переменных состояния, математические методы для работы с матрицами, методы аппроксимации, методы оптимизации, методы работы с системами дифференциальных уравнений.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Методика расчета отдельных характеристик электромагнитных переходных процессов, происходящих при коммутациях элегазовых выключателей компенсированных линий электропередачи.
2. Способы автоматизированной оценки опасности расчетных случаев и эффективности технических решений, обеспечивающих безаварийную

работу элегазовых выключателей, на основе результатов расчета отдельных характеристик электромагнитных переходных процессов, возникающих при коммутациях элегазовых выключателей компенсированных линий электропередачи.

3. Дополнения к общепринятой схеме замещения для задач выявления опасности повреждения выключателей компенсированных линий.

4. Результат анализа эффективности технических решений в различных схемно-режимных ситуациях в виде наиболее универсального и эффективного средства обеспечения безопасности коммутации элегазовых выключателей компенсированных линий.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Степень достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, изложенных в диссертации, основана на соответствии исходных расчетных условий нормативным документам, определяющим порядок проведения расчетов электромагнитных переходных процессов при оценке опасности повреждения элегазовых выключателей, использованием известных и хорошо изученных методов анализа переходных процессов в электрических цепях и подтверждена результатами расчетов в специализированных программных комплексах.

### **Апробация результатов работы**

Полученные в работе результаты докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

XLV «Неделя Науки СПбПУ» (г. Санкт-Петербург, Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2016 г.)

International Scientific Electric Power Conference ISEPC-2021. (г. Санкт-Петербург, Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2021 г.)

## **Публикации**

По теме диссертации в соавторстве опубликовано 2 печатных работы, обе в изданиях, рекомендованных ВАК.

## **Личный вклад автора**

Разработка инструментов для автоматизированного расчета, проведение исследований электромагнитных переходных процессов, анализ результатов, сравнение эффективности технических мероприятий, разработка методических рекомендаций.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение** содержит обоснование актуальности выбранной темы исследования, степень ее проработанности, цели и задачи научной работы, обоснование научной новизны, практической значимости работы. Также во введении перечислены методы исследования, защищаемые научные положения, степень достоверности, апробация результатов работы, публикации и личный вклад автора.

**В первой главе** приведено описание разработанной методики, положенной в основу автоматизированного расчета отдельных показателей электромагнитного переходного процесса, возникающего при коммутации компенсированной линий электропередачи.

Разработка средств для проведения расчетов проводилась в программном комплексе *MATLAB*. Инструменты разрабатывались в виде набора функций и классов, объединенных в одну библиотеку.

Инструменты подразделяются на несколько групп:

1. Первая группа служит для расчета установившегося режима в произвольной схеме;
2. Вторая группа служит для расчета постоянных времени апериодических токов реакторов в произвольных схемах;
3. Третья группа служит для автоматизации расчетов, анализа результатов и выбора технических средств для обеспечения безаварийной эксплуатации элегазовых выключателей.

В главе приводится описание подходов, принятых при моделировании расчетных схем, и этапы проведения расчета. Также в первой главе описаны система классов и библиотек для удобного и быстрого моделирования произвольных схем с возможностью формирования систем уравнений установившихся режимов и систем дифференциальных уравнений.

На основе системы классов был реализован функционал по анализу систем алгебраических и дифференциальных уравнений.

Также в данной главе приводится описание средств автоматизации расчетов, а именно приводится описание предлагаемого подхода к анализу результатов расчетов, позволяющий путем последовательного вычисления установившихся значений токов реакторов и их постоянных времени определять возможность повреждения выключателей и выбирать эффективные технические решения для обеспечения безаварийной эксплуатации элегазовых выключателей.

Предлагаемый подход заключается в представлении тока выключателя следующим выражением:

$$I_B(t) = \sum_i I_{pa_i} e^{-\frac{t}{T_{a_i}}} + I_{Bm} \sin(\omega t + \psi) \quad (1)$$

где  $I_{pa_i}$  – аperiodический ток  $i$ -го реактора;

$T_{a_i}$  – постоянная времени аperiodического тока  $i$ -го реактора;

$I_{Bm}$  – амплитуда периодического тока выключателя.

Выражение (1) включает в себя ток выключателя, который может быть легко получен путем расчета электрического режима в схеме, в то время как аperiodические токи реакторов рассчитываются как разница между токами реактора до момента коммутации и после него.

В простых случаях, когда до и после коммутации наблюдаются установившиеся режимы, аperiodический ток реактора может быть получен путем максимизации следующего выражения:

$$V = \max \left| \sum_i \left( I_{pm_i}^{T1} \sin(\omega T_k + \psi_{pi}^{T1}) - I_{pm_i}^{T2} \sin(\omega T_k + \psi_{pi}^{T2}) \right) e^{-\frac{t_B}{T_{a_i}}} \right|_{T_k} \quad (2)$$

где  $t_B$  – предельное время отключения выключателя (предельное время в течение которого допускается горение дуги).

Максимизация проводится по  $T_k$ , то есть таким образом варьируется время коммутации так, чтобы суммарный аperiodический ток через выключатель в момент  $t_B$  был наибольшим, что позволяет определить момент коммутации, при котором условия отключения будут наилучшими.

Выражение (2) позволяет легко определить аperiodический ток в том случае, когда коммутация единичная. При необходимости рассмотрения расчетного случая, в котором происходит несколько коммутаций подряд, выражение (2) необходимо дополнить с учетом переходных токов и скорости их затухания:

$$V = \max \left| \sum_j \sum_i \left( I_{p_{m_i}}^{T_j} \sin(\omega T_k + \psi_{p_i}^{T_j}) + I_{p_{a_i}}^{T_j} e^{-\frac{T_{kj}}{T_{a_i}^{T_j}}} - \right. \right. \\ \left. \left. - I_{p_{m_i}}^{T(j+1)} \sin(\omega T_k + \psi_{p_i}^{T(j+1)}) \right) e^{-\frac{t_x^{T(j+1)}}{T_{a_i}^{T(j+1)}}} \right|_{T_{kj}} \quad (3)$$

где  $T_{a_i}^{T_j}$  – постоянная времени аperiodического тока реактора до  $j$ -ой коммутации;

$T_{a_i}^{T(j+1)}$  – постоянная времени аperiodического тока реактора после  $j$ -ой коммутации;

$t_x^{T(j+1)}$  – момент времени, в который выполняется оценка суммарной аperiodической составляющей, или происходит очередная коммутация.

Принимая, что амплитуда аperiodической составляющей, получающейся в результате коммутации, условно состоит из двух частей: обусловленной разностью периодических токов реактора в момент коммутации и аperiodическим током, уже имеющимся в токе реактора в момент коммутации, можно упростить выражение (3):

$$V = \max \left| \sum_j \sum_i \left( I_{p_{a_i}}^{T_j} e^{-\frac{T_{kj}}{T_{a_i}^{T_j}}} + I_{p_{a_i}}^{T_j \Pi}(T_{kj}) \right) e^{-\frac{t_x^{T(j+1)}}{T_{a_i}^{T(j+1)}}} \right|_{T_{kj}} \quad (4)$$

где  $I_{p_{a_i}}^{T_j \Pi}$  – аperiodическая составляющая тока реактора, вызванная разницей периодических составляющих.

Переписывая выражение (4) для каждого реактора, можно получить следующее:

$$V = \max \left| \sum_i \sum_j I_{pa_i}^{Tjп} (T_{кп}) e^{-\sum_{n=1}^N \frac{T_{кп}}{T_{a_i}^{Tn}}} \right|_{T_{кп}} \quad (5)$$

где  $N$  – количество последовательных коммутаций в схеме.

После нахождения таких  $T_{кп}$ , при которых наблюдается максимум  $V$ , рассчитываются токи каждого реактора для подстановки их в выражение (1). Расчет ведется с использованием выражения:

$$I_{pa_i} = \sum_j I_{pa_i}^{Tjп} e^{-\sum_{n=1}^N \frac{T_{кп}}{T_{a_i}^{Tn}}} \quad (6)$$

Выражение (3) не учитывает переходные составляющие токов реакторов, кроме апериодической.

Для учета периодических составляющих в переходном токе реактора выражение (3) формируется под конкретные условия. Например, при расчете включения фазы после бестоковой паузы АПВ необходимо использовать следующее выражение:

$$V = \max \left| \sum_i \left( I_{pm_i}^{T1} \sin(\omega T_k + \psi_{pi}^{T1}) + I_{pa_i}^{T1} e^{-\frac{T_k}{T_{a_i}^{T1}}} - \right. \right. \\ \left. \left. - I_{pm_i}^{T2} \sin(\omega T_k + \psi_{pi}^{T2}) \right) e^{-\frac{t_x}{T_{a_i}^{T2}}} \right|_{T_k} \quad (7)$$

После этого, требуется провести оценку наличия переходов тока выключателя через ноль в установленное время  $t_b$ . Это делается с использованием выражения:

$$\sum_i I_{pa_i} e^{-\frac{t_b}{T_{a_i}}} < I_{Bm} \quad (8)$$

Выражение (8) позволяет оценить время первого перехода тока через ноль с точностью до 20 мс. Погрешность возникает вследствие того, что в(8) не учитывается фаза установившегося тока в момент  $t_b$ . При необходимости, фаза может быть учтена подстановкой в выражение (8) вместо  $I_{Bm}$  мгновенного значения тока выключателя в момент  $t_b$  при условии отсутствия отрицательных значений мгновенного тока выключателя до этого момента.

Таким образом, оценка опасности повреждения выключателя сводится к определению переходных токов реакторов и установившегося тока выключателя, при этом токи реакторов зависят от моментов коммутаций в схеме и в общем случае должны быть получены путем максимизации выражения (5).

Определение требуемых параметров предвключаемых резисторов или резисторов в нейтральных выводах шунтирующего реактора сводится к определению величины сопротивления этих резисторов и времени их действия в цепи. Выбор обоих параметров должен производиться исходя из следующих условий:

1. Величина сопротивления резисторов должна обеспечивать быстрое затухание апериодической составляющей тока.
2. Время работы резисторов должно обеспечивать затухание апериодической составляющей тока и отсутствие новых опасных апериодических составляющих после его шунтирования.
3. Тепло, выделяющееся на резисторах, не должно превышать его теплоемкости.
4. Напряжение на резисторах в нейтральных выводах шунтирующего реактора не должно превышать заданного значения.

Первые два условия могут быть выполнены при выборе величины сопротивления и времени его работы с использованием выражения (9).

$$V = \max_{(t_p, R)} \left| \sum_i \left( I_{a_{m_i}} e^{-\frac{t_p}{T_{a_i}^{t_1}(R)}} + I_{a_{\Pi}}(t_p, R) \right) e^{-\frac{t_B}{T_{a_i}^{t_2}}} \right| \quad (9)$$

где  $I_{a_{m_i}}$  – величина апериодического тока  $i$ -го реактора в момент включения резисторов в работу, соответствующая условию максимального апериодического тока выключателя, найденная по формуле (5);

$T_{a_i}^{t1}(R)$  – постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока  $i$ -го реактора во время работы резисторов, в зависимости от сопротивления резисторов;

$t_p$  – время работы резисторов;

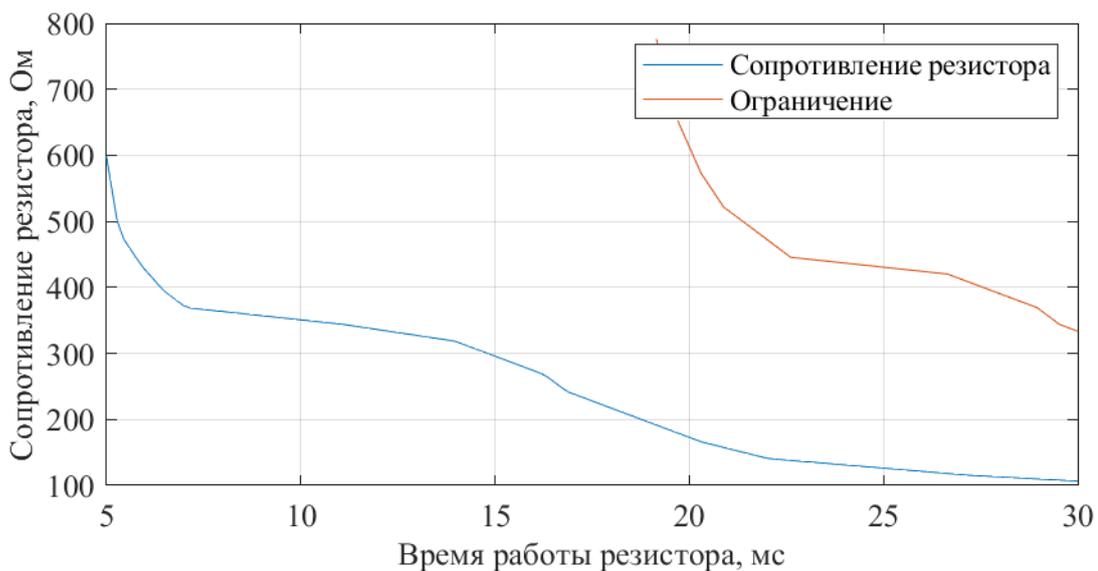
$I_{a_{пi}}(t_p, R)$  – аperiodическая составляющая тока  $i$ -го реактора, определяемая разностью периодических составляющих тока этого реактора в момент вывода резисторов из работы, в зависимости от сопротивления резисторов и времени его работы;

$t_b$  – время до которого для успешной коммутации должен произойти переход тока через ноль;

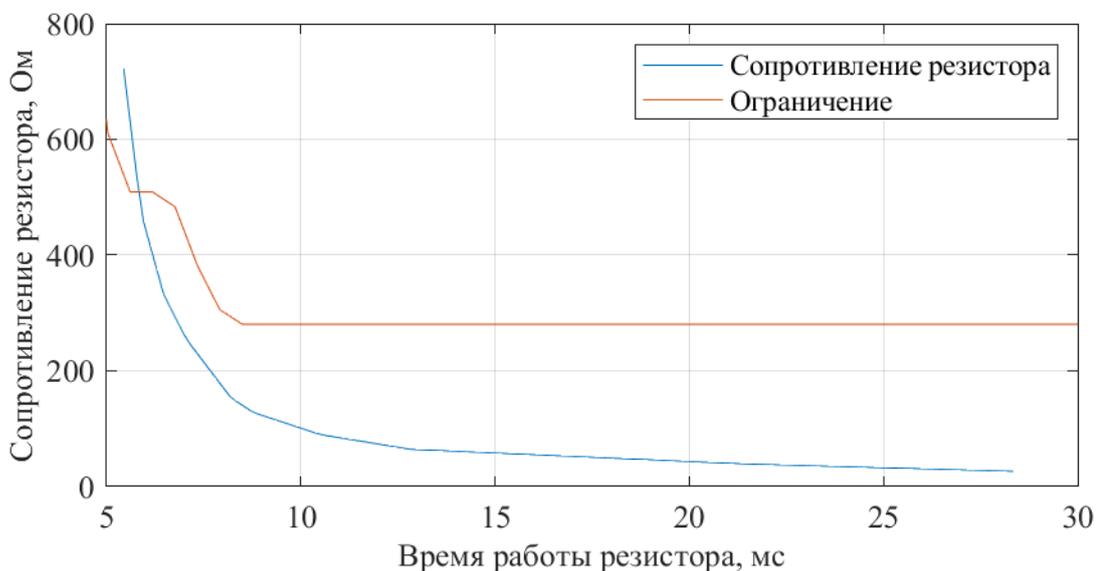
$T_{a_i}^{t2}$  – постоянная времени аperiodического тока  $i$ -го реактора после выведения резисторов из работы.

Выражение (9) описывает максимально возможную величину аperiodического тока в предельный момент времени отключения выключателя, в зависимости от времени действия резисторов в цепи и величины его сопротивления.

Рассчитав по выражению (9) максимальную величину аperiodической составляющей тока и с использованием выражения (8) оценив возможность успешной коммутации выключателя, можно построить кривые для выбора параметров резисторов (рис. 1). Далее подобные кривые будут называться  $Rt$ -кривые.



а)



б)

Рисунок 1. Зависимости сопротивления резисторов от времени их нахождения в цепи для:

- а) предвключаемых резисторов в выключателях с кривой, ограничивающей параметры резисторов по условию их предельной теплоемкости;
- б) резисторов в нейтральных выводах шунтирующего реактора с кривой, ограничивающей параметры резисторов по условию максимально допустимого напряжения на резисторах.

На рисунках 1а и 1б приведены кривые, соответствующие граничному условию осуществления коммутации: сочетания сопротивления и времени работы резисторов в точках кривой соответствуют равенству апериодической

и периодической составляющих тока выключателя в момент размыкания контактов выключателя, то есть отсутствию недопустимого длительного периода неперехода мгновенного значения тока через ноль. Также на рисунках 1а и 1б приведены кривые, построенные по условию предельно допустимой величины выделяемого тепла на предвключаемых резисторах и по условию максимально допустимого напряжения на резисторах в нейтральных выводах шунтирующего реактора.

С учетом разброса величины сопротивлений резисторов и времени его действия в цепи, необходимо выбрать такие значения, которые приведут к появлению условий для гашения дуги в предельно допустимое время.

Третье условие для выбора резисторов выполняется путем прямой оценки величины тепла, выделяемого на резисторах в течение переходного процесса по формуле:

$$Q = \int_0^{t_p} I_p^2 dt \quad (10)$$

где  $I_p$  – ток, протекающий через резистор.

Для предвключаемых резисторов этот ток равен току выключателя при коротком замыкании и находится по выражению:

$$I_p^n(t) = I_{кз_а} e^{-\frac{t}{T_{кз}}} + I_{кз_п} \sin(\omega t + \psi) \quad (11)$$

где  $I_{p_{a_i}}$  – аperiodический ток короткого замыкания.

Для резисторов в нейтральных выводах реактора выражение следующее:

$$I_p^p(t) = I_{p_a} e^{-\frac{t}{T_a}} + I_{p_m} \sin(\omega t + \psi) \quad (12)$$

где  $I_{p_a}$  – максимально возможный аperiodический ток реактора;

$I_{p_m}$  – амплитуда периодического тока реактора.

Полученные значения величины тепла, выделяющего на резисторах, для различных сочетаний параметров сопротивлений резисторов и времени его работы, оцениваются по паспортным данным резисторов, и на одни оси с кривыми для выбора параметров резисторов наносится кривая, разделяющая

координатную плоскость на области допустимых параметров резисторов и недопустимых (см. рис. 1).

Четвертое условие для выбора резисторов актуально для резисторов, устанавливаемых в нейтральные выводы шунтирующих реакторов. Оценка допустимости величины напряжений на резисторах производится по различным выражениям, зависящим от конкретной схемы включения данных резисторов.

**Вторая глава** состоит из двух частей: в первой проводится упрощенный анализ различных схемно-режимных ситуаций для их общей оценки и выявления их особенностей.

Список схемно-режимных ситуаций включает в себя:

1. Постановка линии электропередачи под напряжение:
  - 1.1.Тремя фазами выключателя;
  - 1.2.Двумя фазами выключателя;
  - 1.3.Одной фазой выключателя;
2. Включение линии на короткое замыкание:
  - 2.1.Однофазное короткое замыкание в начале линии;
  - 2.2.Двухфазное на землю короткое замыкание в начале линии;
  - 2.3.Однофазное замыкание в конце линии;
  - 2.4.Двухфазное на землю замыкание в конце линии;
3. Включение линии в цикле ТАПВ:
  - 3.1.При проходящем коротком замыкании;
  - 3.2.При постоянном несимметричном коротком замыкании;
4. Включение линии в цикле ОАПВ при проходящем коротком замыкании.

Во второй части главы приведены результаты анализа допущений, принятых во время выполнения работы.

Самым главным допущением, принятым в работе, является использование фиксированной расчетной модели ЛЭП, состоящей из линии

электропередачи, реакторов и эквивалентных энергосистем по концам линии. Данная схема предлагается к использованию в [6].

Для оценки указанного допущения было проведено исследование изменение переходных свойств системы при последовательном эквивалентировании ее к точке.

Исследование проводилось на модели энергосистемы, реализованной в программном комплексе АРМ СРЗА. Изначально, рассматриваемая модель содержала в себе 2180 узлов и 3600 ветвей, но для проведения исследования была сэквивалентирована в несколько этапов до 384 ветвей. Это было необходимо для удобства оценки постоянных времени, так как разработанные методы не были оптимизированы для анализа схем больших размерностей в силу отсутствия подобной необходимости.

Как было показано ранее, наиболее важными величинами с точки зрения расчетов моментов перехода тока через ноль, являются токи реакторов, выключателя и постоянные времени апериодических составляющих токов реакторов.

Так как эквивалентирование осуществлялось в специализированном программном комплексе АРМ СРЗА по условию сохранения распределения токов короткого замыкания в неэквивалентируемой части схемы, то предполагается, что установившиеся значения токов КЗ в ветвях схемы при таком эквивалентировании не изменяются. В то же время, неизвестно, как изменяются постоянные времени затухания апериодических токов и их начальные значения. В качестве наблюдаемых величин при последовательном эквивалентировании были выбраны постоянные времени, после чего проводилось сравнение кривых токов на различных этапах эквивалентирования.

Также нужно отметить, что обычно параметры эквивалентов, используемых для расчетов апериодических составляющих, рассчитываются исходя из токов короткого замыкания, а, следовательно, такой способ

эквивалентирования можно считать наиболее близким к реальным расчетным задачам.

Эквивалентирование производилось к некоторой заранее определенной точке в схеме. В эту точку при расчете добавлялся шунтирующий реактор.

Для определения состава эквивалентируемых узлов для каждого этапа эквивалентирования схемы, перед началом работы был произведен расчет токов трехфазного короткого замыкания в ранее выбранной точке. При этом фиксировались напряжения во всех узлах схемы. Затем все узлы были отсортированы по величине напряжения в них. На первых трех этапах эквивалентирование включало в себя отдельные части схемы, имеющие достаточно большую электрическую удаленность от рассматриваемой точки, и не удобные для последовательного эквивалентирования по уровню напряжений.

При достижении этапа, связанного с эквивалентированием узлов, имеющих напряжение ниже 5% от максимального в схеме, были введены новые этапы последовательного сокращения оставшейся схемы в 5 дополнительных этапов. Всего было подготовлено 25 этапов.

Изменение постоянной времени тока реактора для различных этапов эквивалентирования показано на рисунке **Ошибка! Источник ссылки не найден.**

На рисунке отмечено три области:

1. Первой областью показано значительное и резкое изменение постоянной времени реактора в результате эквивалентирования токоограничивающих реакторов. Данное изменение вызвано отличием соотношения активного и реактивного сопротивлений эквивалентов, соответствующих средним параметрам сети, аналогичному соотношению токоограничивающих реакторов. Несмотря на относительно большую электрическую удаленность

токоограничивающих реакторов от контрольной точки, их влияние на наблюдаемые параметры оказывается достаточно большим.

2. Несмотря на указанное отклонение, в течение следующих этапов эквивалентирования, постоянная времени реактора стремится к своему фактическому значению и становится равна ему через 4 этапа эквивалентирования.

3. Вторая область указывает на резкое изменение постоянной времени реактора, вызванное эквивалентированием кабельных линий вблизи точки установки реактора. Причина этого изменения аналогична ранее появившемуся изменению постоянной времени, вызванному эквивалентированием токоограничивающих реакторов.

4. После данного изменения постоянная времени не стремится к своему фактическому значению, что обусловлено малым количеством не эквивалентированных элементов в системе, которые уже не смогут повлиять на параметры эквивалентов.

5. Третья область выделяет изменение постоянной времени реактора в течение двух последовательных этапов эквивалентирования. Данное изменение связано со следующими событиями:

5.1. Эквивалентирование коротких кабельных участков и изменение отношения активного и реактивного сопротивлений эквивалента;

5.2. Эквивалентирование двух параллельных эквивалентов с различающимися отношениями активного и реактивного сопротивлений.

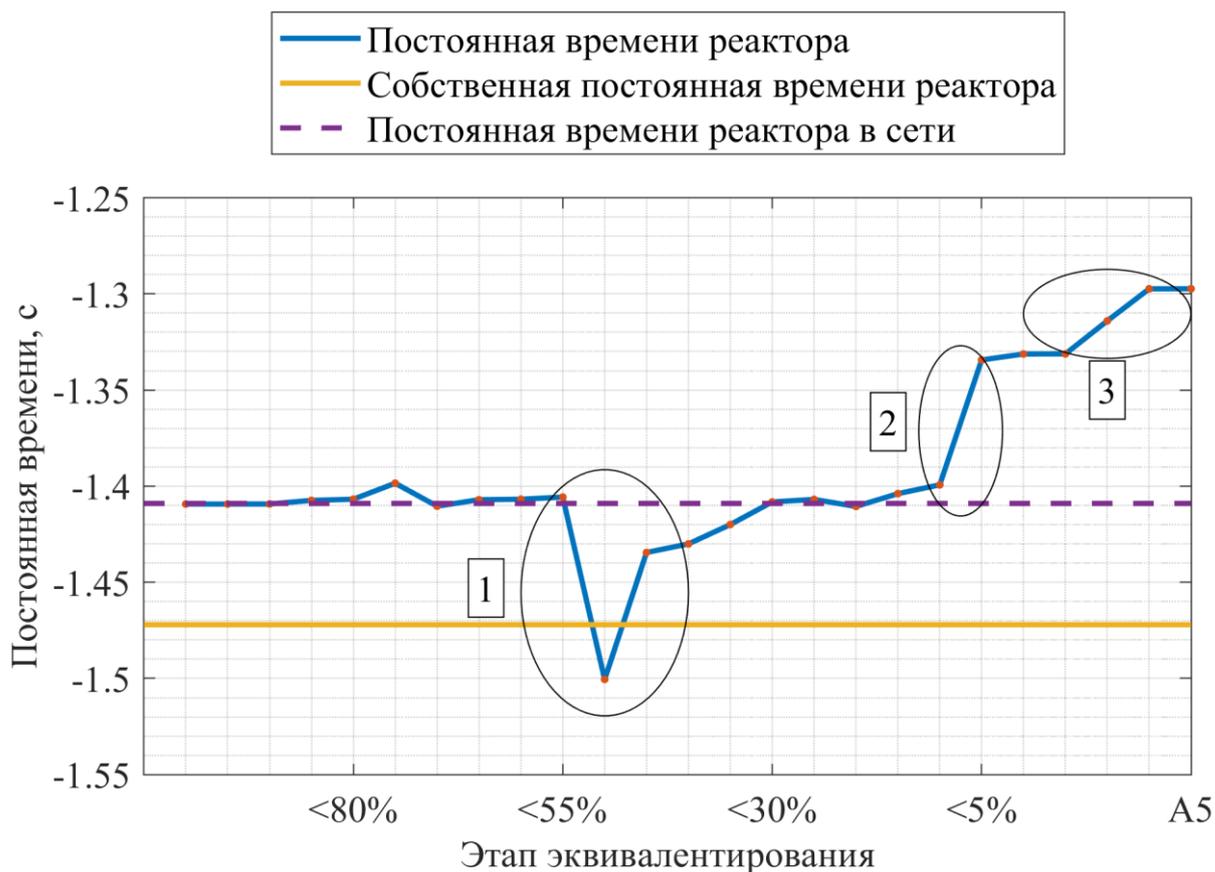


Рисунок 2. Изменение постоянной времени тока реактора на различных этапах эквивалентирования.

На рисунке 3 приведены расчетные осциллограммы фазного тока шунтирующего реактора, установленного в контрольной точке, полученные при его постановке под напряжение на различных этапах эквивалентирования. Момент включения подбирался так, чтобы обеспечить максимальную величину апериодической составляющей тока.

Из полученных результатов следует, что при эквивалентировании изменяется только постоянная времени затухания апериодической составляющей тока реактора, а начальное ее значение остается неизменным. При этом, изменение постоянной времени вызвано не самим процессом эквивалентирования, а неоднородностью сети и колебаниями соотношения активного и реактивного сопротивлений эквивалентов. Если неоднородность расположена далеко от точки установки реактора, то постоянная времени реактора изменится только при расположении границы эквивалентирования

вблизи этой неоднородности и при ее попадании в эквивалент. При удалении границы эквивалентирования от неоднородности, постоянная времени будет стремиться к своему фактическому значению (то есть, к значению, которая она имеет в полной расчетной модели сети).

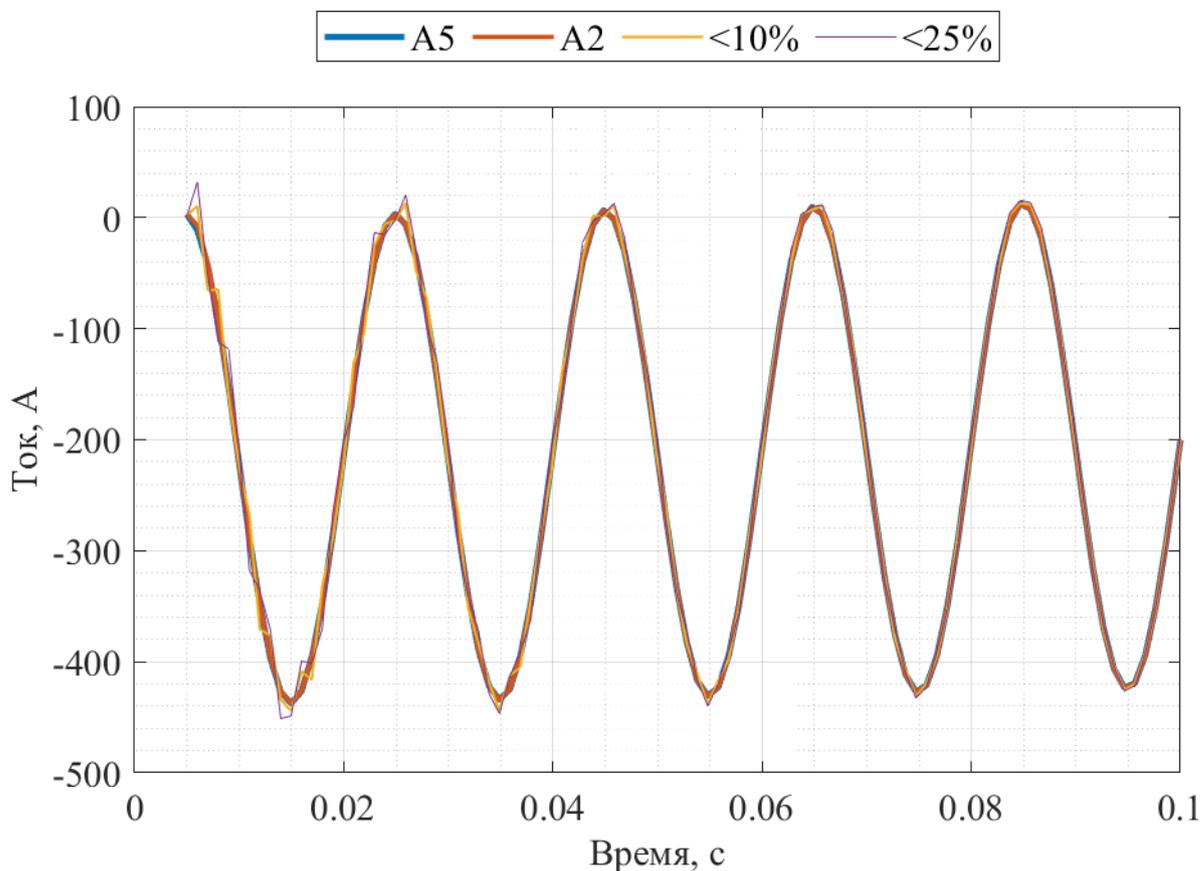


Рисунок 3. Ток реактора при его постановке под напряжение на различных этапах эквивалентирования

Также во второй главе приводится упрощенный анализ схемно-режимных ситуаций, показывающий их основные особенности и выявляющий наиболее тяжелый режим из каждой группы. Так, например, показано, что наиболее тяжелым режимом из полного списка режимов является включение после бестоковой паузы ОАПВ.

Показано, что тяжесть режима зависит от степени компенсации, приведены простейшие формулы для грубой оценки времени первого перехода тока через ноль для ряда режимов.

**Третья глава** посвящена анализу различных схемно-режимных условий с использованием разработанных инструментов с точки зрения задачи выбора технического решения. В качестве критерия сравнения выступали зависимости минимально требуемой величины сопротивления предвключаемых резисторов, или устанавливаемых в нейтральные выводы шунтирующего реактора, от времени его действия в цепи. Для оценки, области рассматриваемых значений сопротивлений и времен действия резисторов в цепи были изменены относительно типовых значений.

Данные зависимости были проанализированы при вариации степени компенсации линии, ее длины, момента коммутации, угла по линии электропередачи для различных схемно-режимных ситуаций.

Пример результирующих кривых представлен на рисунке 4.

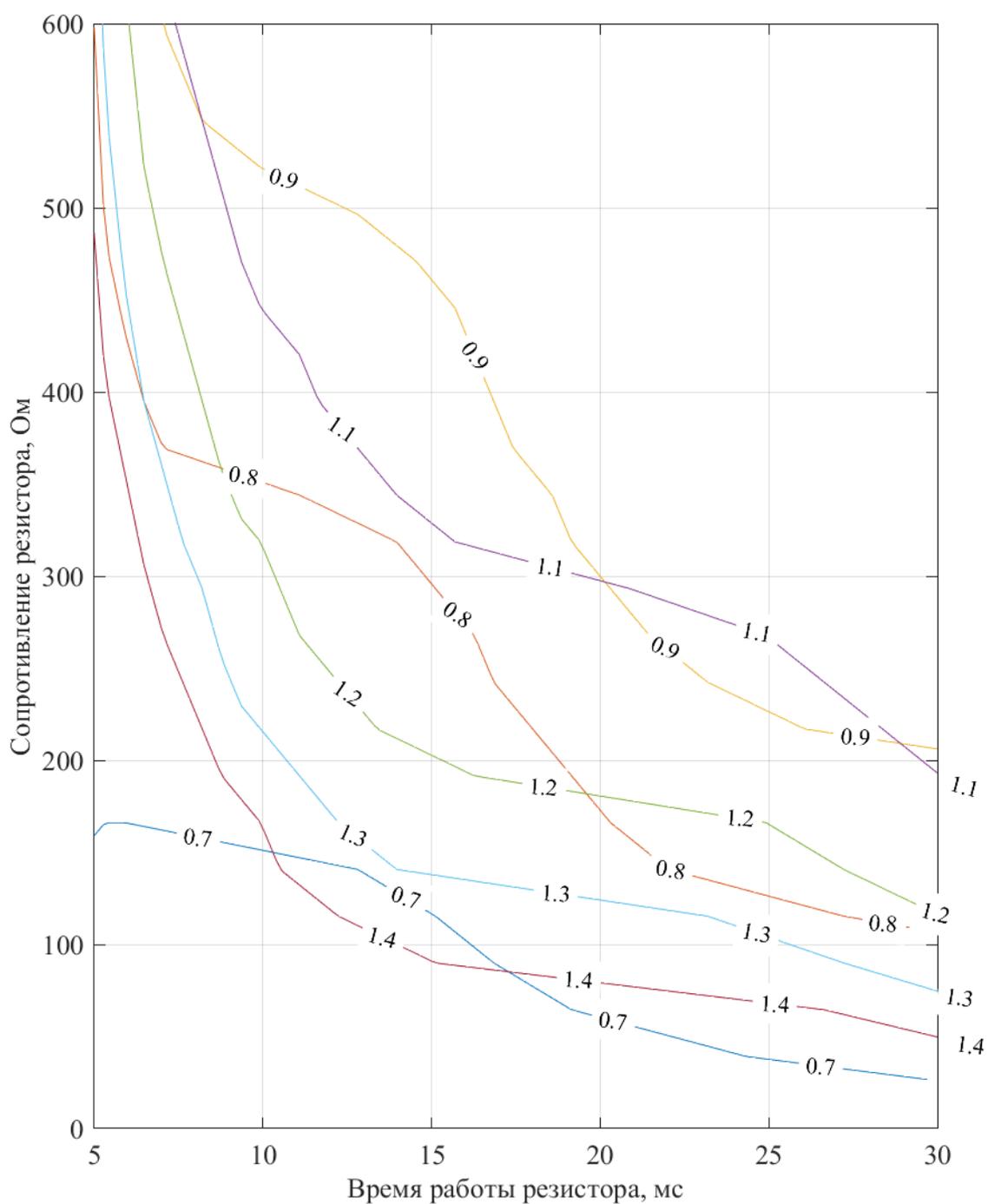


Рисунок 4. Зависимость требуемых сопротивлений предвключаемых резисторов от времени их работы для случая полнофазной постановки ЛЭП под напряжение для различных значений степени компенсации зарядной мощности линии электропередачи

Кривые, изображенные на рисунке 4, показывают минимально необходимые по условию обеспечения безопасного отключения элегазовых выключателей сопротивления резисторов в зависимости от времени их действия в цепи. Кривые построены для различных значений степени компенсации ЛЭП.

Из рисунка 4 видно, что характер изменения этих кривых не линейный, тяжесть условий коммутации определяется степенью компенсации ЛЭП: чем выше и правее расположена кривая, тем тяжелее схемно-режимная ситуация.

Подобный способ представления результатов позволяет обнаружить особенности, которые практически невозможно выявить при выполнении расчетов вручную с использованием специализированных программных комплексов. Пример, иллюстрирующий эти особенности, приведен на рисунке 5.

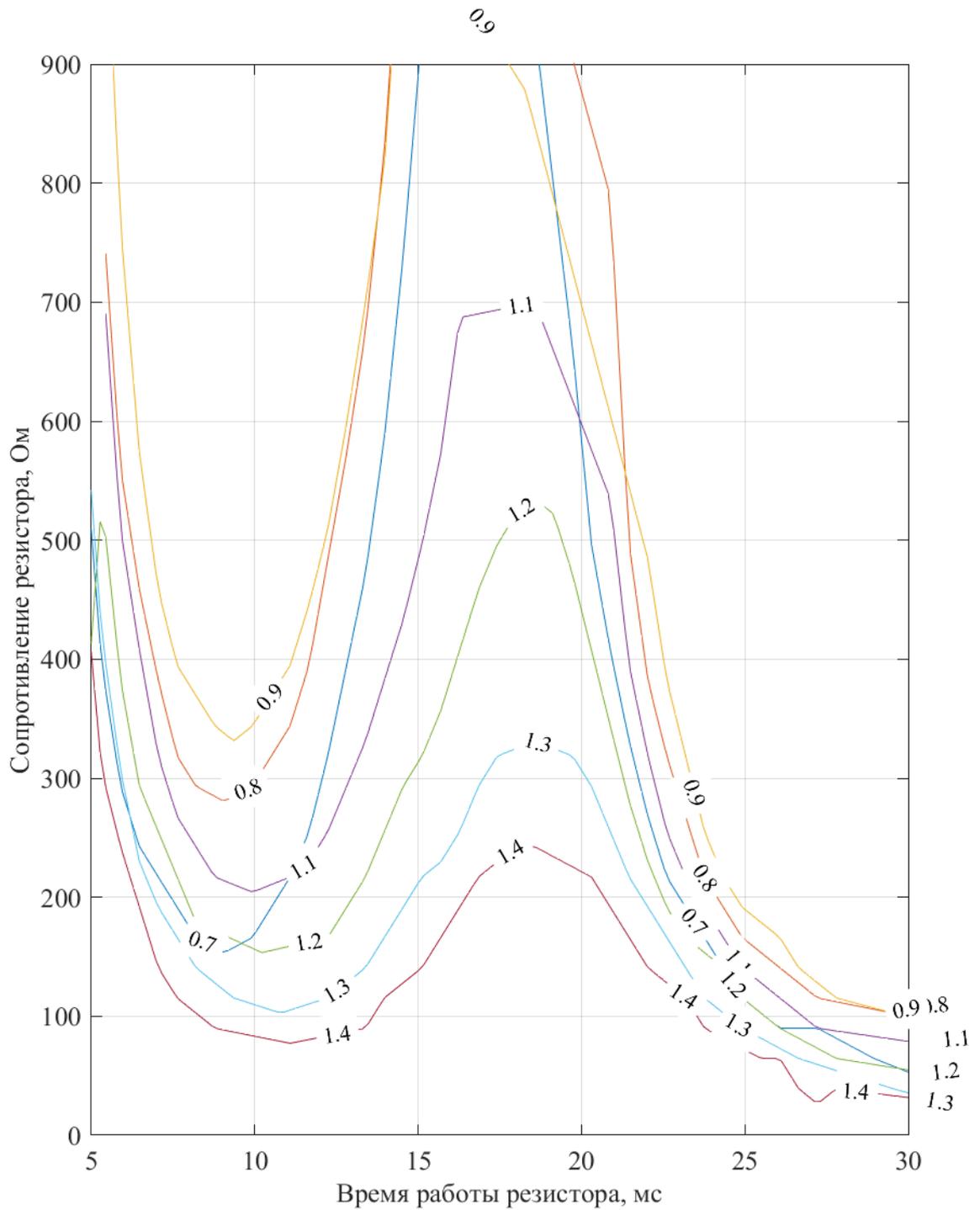


Рисунок 5. Зависимость требуемых сопротивлений предвключаемых резисторов от времени их работы для случая включения линии на однофазное короткое замыкание в конце для различных значений степени компенсации зарядной мощности линии электропередачи.

На рисунке 5 показаны кривые, аналогичные приведенным ранее на рисунке 4, но для случая включения линии на однофазное короткое замыкание в конце линии. При этом момент коммутации выбирался исходя из условия обеспечения максимального апериодического тока выключателя в момент включения, соответствующий моменту введения предвключаемых резисторов в работу.

Для начала, из рисунка 5 следует, что требуемое сопротивление резисторов, обеспечивающее безопасное отключение элегазового выключателя, ниже, чем полученное для расчетного случая постановки ЛЭП под напряжение в диапазоне типовых значений времени действия резисторов в цепи (5 – 12 мс).

Далее прослеживается значительное увеличение требуемого сопротивлений резисторов при длительности действия резистора в цепи в диапазоне 12-22 мс. Указанный диапазон находится за пределами типовых значений, однако, необходимо принять во внимание, что указанные кривые построены для момента, соответствующего условию обеспечения максимального начального значения апериодической составляющей тока – условию включения линии в ноль фазного напряжения. Учитывая, что вероятность замыкания контактов при любой фазе напряжения от 0 до  $\pi/2$  имеет существенное значение [1], далее рассмотрены различные моменты времени замыкания контактов выключателя.

Кривые, показывающие требуемое значение сопротивления предвключаемых резисторов от времени его действия в цепи для различных моментов времени включения линии приведены на рисунке 6.

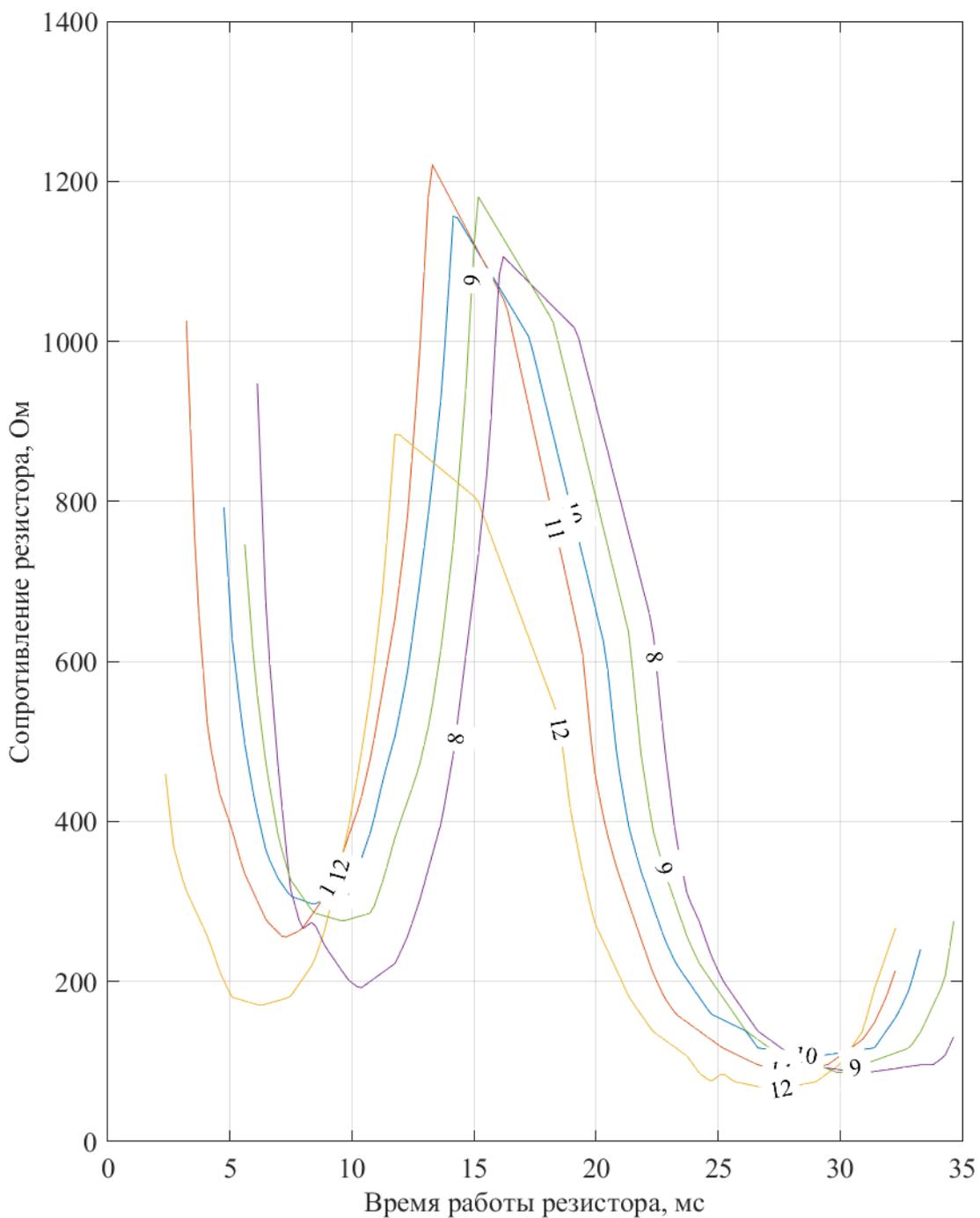


Рисунок 6. Зависимость требуемых сопротивлений предвключаемых резисторов от времени их работы для случая включения линии на однофазное короткое замыкание в конце линии при вариации момента включения линии. Кривые подписаны моментом коммутации в мс. Исходный момент коммутации равен 10 мс.

На рисунке 6 приведены зависимости, аналогичные построенным на рисунке 5 при степени компенсации 0,8, но при вариации момента включения линии на короткое замыкание. На рисунке видно смещение пика как влево, так и вправо при изменении момента коммутации, что накладывает существенные ограничения на параметры выбираемых предвключаемых резисторов, так как они должны, с учетом допустимой погрешности действия приводов, обладать временем действия в цепи в диапазоне 5-10 мс и сопротивлением 200 - 800 Ом.

Как видно, вариация момента включения линии под напряжение, приводит к значительному изменению требований к предвключаемым резисторам, несмотря на снижение начальной величины апериодической составляющей.

По результатам анализа различных схемно-режимных ситуаций был подтвержден вывод, полученный во второй главе, что потенциально наиболее тяжелым расчетным случаем является повторное включение фазы ЛЭП в цикле ОАПВ. В частности, это можно продемонстрировать с использованием зависимостей требуемого сопротивления предвключаемых резисторов от времени их действия в цепи, приведенных на рисунке 7.

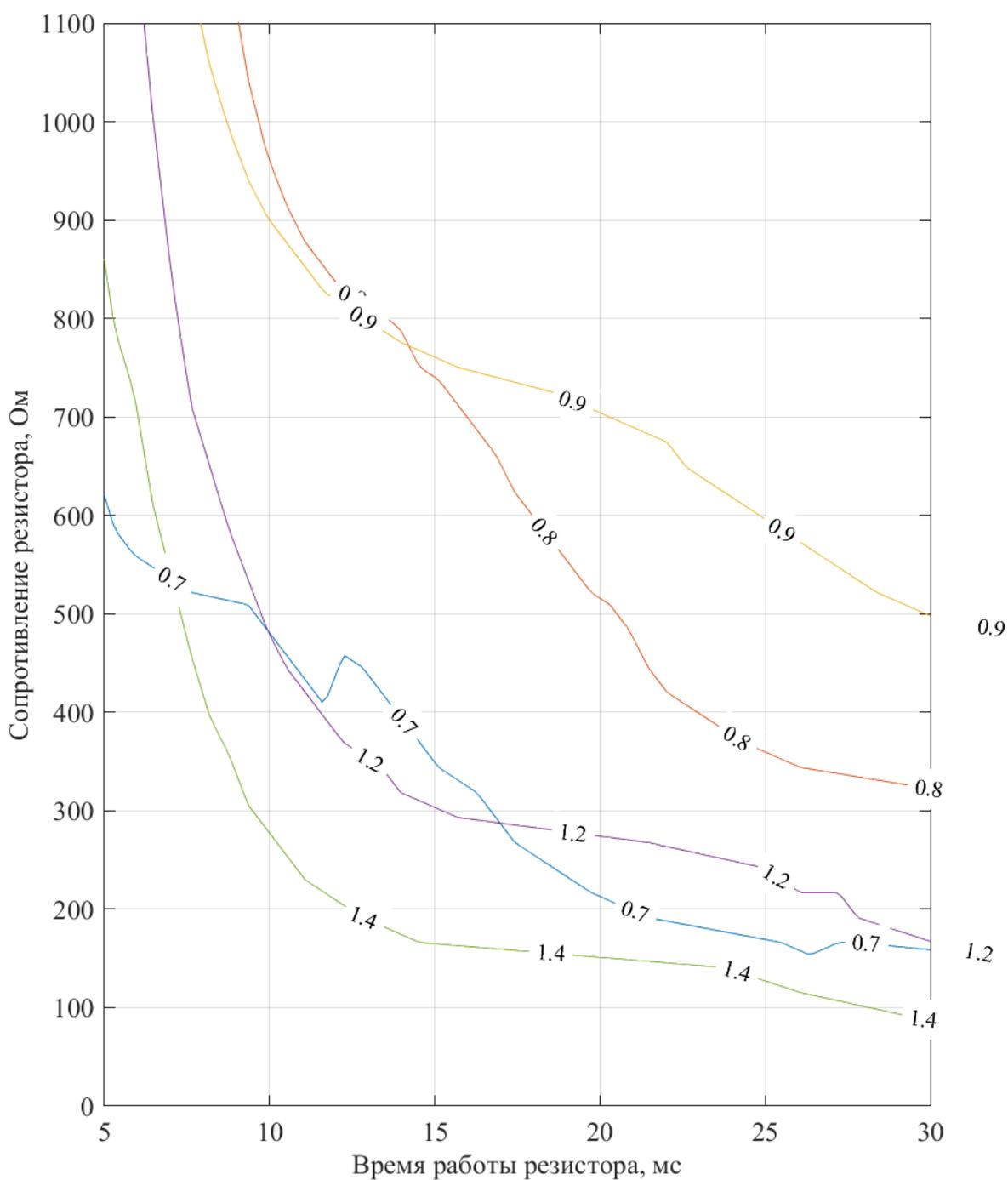


Рисунок 7. Зависимость требуемых сопротивлений предвключаемых резисторов от времени их работы для случая включения фазы после бестоковой паузы в цикле ОАПВ при коротком замыкании в начале линии относительно коммутируемого выключателя.

На рисунке 7 приведены зависимости требуемых сопротивлений предвключаемых резисторов от времени их нахождения в цепи при различных значениях степени компенсации ЛЭП. Как видно из рисунка 7, для обеспечения безаварийного отключения элегазового выключателя в этом случае требуются в целом большие сопротивления и более длительное их нахождение в цепи, из чего следует, что данный случай является более тяжелым, чем рассмотренные ранее, без учета резких пиков, вызванных наличием короткого замыкания, как на рисунке 5.

Для резисторов в нейтральных выводах шунтирующих реакторов можно построить аналогичные кривые. На рисунке 8 приведены кривые, показывающие требуемое сопротивление резисторов в нейтральных выводах ШР в зависимости от времени их действия при различных значениях степени компенсации для случая полнофазной постановки ЛЭП под напряжение.

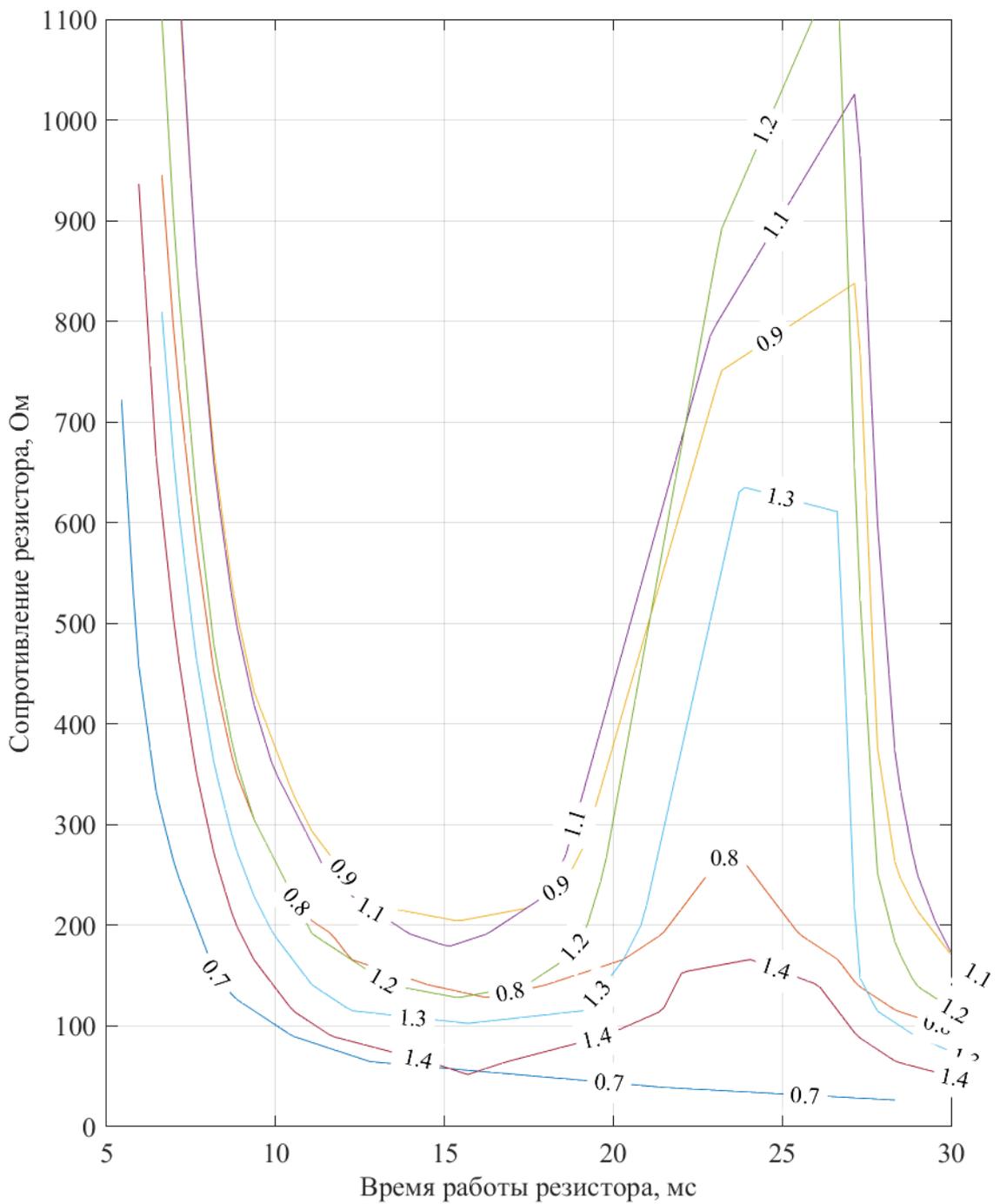


Рисунок 8. Зависимость требуемого сопротивления резисторов в нейтральных выводах ШР от времени их работы для случая полнофазной постановки ЛЭП под напряжение при установке одного реактора в конце линии.

Как видно из рисунка 8, использование резисторов в нейтральных выводах ШР, как и в случае постановки ЛЭП под напряжение на КЗ, приводит к появлению пиков на зависимостях требуемых сопротивлений резисторов от времени их действия в цепи. Это связано с изменением соотношения активно-индуктивного сопротивления реактора и изменением фазы его периодического тока, и, соответственно, с изменением величины апериодического тока после коммутации для конкретных моментов коммутации. Это легко увидеть из векторной диаграммы, приведенной на рисунке 9.

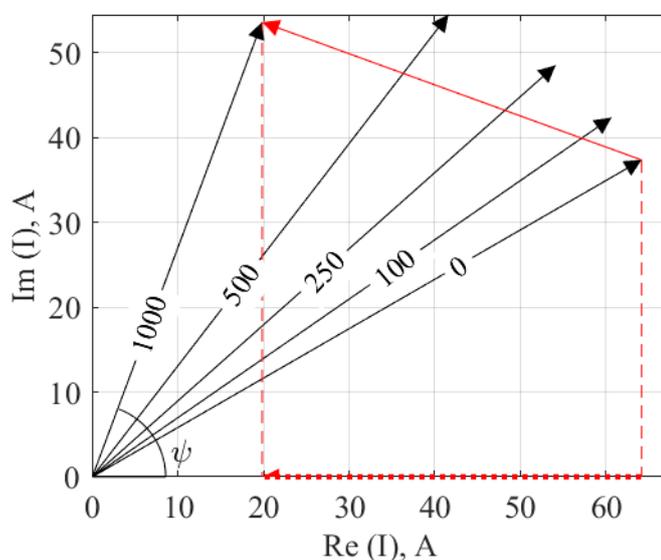


Рисунок9. Векторная диаграмма фазного тока реактора при различных значениях активного сопротивления, установленного в нейтральном выводе фазы ШР. Черным цветом показаны вектора установившихся токов реакторов при введении в цепь реактора активного сопротивления от 0 до 1000 Ом. Красный сплошной вектор – разница между током реактора с введенным сопротивлением в 1000 Ом и током реактора без дополнительного сопротивления. Пунктирный красный вектор – проекция красного вектора на вещественную ось.

На векторной диаграмме на рисунке 9 показан фазный ток реактора и его составляющие различных значениях активного сопротивления, установленного в нейтральном выводе фазы ШР (черным цветом) с указанием

величины активного сопротивления. Красным сплошным вектором показана разница между током реактора с нулевым активным сопротивлением, то есть после его выведения из цепи, и током реактора с активным сопротивлением в 1000 Ом. Проекция данного тока на вещественную ось показана пунктирным красным вектором. Данный вектор по модулю совпадает с апериодической составляющей тока, возникающей при выведении резистора из работы. Данный ток составляет лишь некоторую долю от апериодической составляющей тока, возникающей после постановки линии под напряжение, но он может влиять на результаты расчетов и выбор технических решений.

Очевидно, что величина этого тока зависит от угла между вектором, соответствующими отсутствию сопротивления в нейтрали (индекс «0») и вещественной осью. Обозначим этот угол как  $\psi$ , и далее определим, как он зависит от момента коммутации.

При варьировании времени действия резисторов происходит изменение момента коммутации, изменение угла  $\psi$  и изменение величины апериодической составляющей, за счет появления значительной по величине разницы между токами реактора до и после введения резисторов в цепь реактора.

Записывая разницу токов в виде выражения в упрощенном виде, получим:

$$\Delta i = \frac{\dot{E}}{jX} - \frac{\dot{E}}{R+jX} \quad (13)$$

где  $\dot{E}$  – ЭДС сети;

$R$  – активное сопротивление резистора в нейтральном выводе реактора;

$X$  – реактивное сопротивление реактора.

Вещественная часть этого тока, определяющая величину апериодической составляющей, возникающей в результате выведения резисторов из работы, будет равна:

$$Re(\Delta i) = E'' \frac{XR^2}{X^4+X^2R^2} - E' \frac{RX^2}{X^4+X^2R^2} \quad (14)$$

Данное выражение будет иметь максимальное значение при условии равенства нулю мнимой части выражения (13):

$$\operatorname{Im}(\Delta i) = -E'' \frac{RX^2}{X^4 + X^2 R^2} - E' \frac{X^2 R}{X^4 + X^2 R^2} = 0 \quad (15)$$

Преобразуя:

$$-E'' X - E' R = 0 \quad (16)$$

$$\frac{E''}{E'} = -\frac{R}{X} \quad (17)$$

Тогда максимальное значение апериодического тока можно выразить как:

$$\operatorname{Re}(\Delta i)_{\max} = -E' \left( \frac{R}{X} \frac{XR^2}{X^4 + X^2 R^2} + \frac{RX^2}{X^4 + X^2 R^2} \right) \quad (18)$$

$$\operatorname{Re}(\Delta i)_{\max} = -E' \frac{R}{X^2 + R^2} \left( \frac{R^2}{X^2} + 1 \right) \quad (19)$$

Переписывая:

$$\operatorname{Re}(\Delta i)_{\max} = -\frac{E' R}{X X} \quad (20)$$

Как видно, ток, возникающий при выведении резисторов может составлять до  $R/X$  от номинального тока реактора.

При использовании предвключаемых резисторов данный эффект наблюдается в меньшей степени, в чем можно убедиться при анализе упрощенной формулы для тока реактора в случае использования предвключаемых резисторов (21).

$$i = \dot{E} \left( \frac{1}{R + jX} + R_p \frac{1 - j\omega C(R + jX)}{R + jX + R_p(1 - j\omega C(R + jX))} \right) \quad (21)$$

где  $\dot{E}$  – ЭДС сети;

$R$  – активное сопротивление реактора;

$X$  – реактивное сопротивление реактора;

$R_p$  – сопротивление предвключаемых резисторов;

$C$  – емкость линии.

Тогда, используя выражение для коэффициента компенсации  $K$ , можно получить:

$$\dot{I} = \dot{E} K \frac{R_p(K-1) + jKX}{R_p^2(K-1)^2 + K^2X^2} \quad (22)$$

Тогда можно легко выразить величину аperiodического тока, возникающего вследствие разницы между токами реактора при введенных резисторах и без них:

$$I_{\text{ап}} = \dot{E} \left( j \frac{1}{X} - K \frac{R_p(K-1) + jKX}{R_p^2(K-1)^2 + K^2X^2} \right) \Big|_{\text{Re}} \quad (23)$$

Максимальная величина аperiodического тока будет наблюдаться при чисто вещественном значении  $I_{\text{ап}}$ , то есть при:

$$E' \left( \frac{1}{X} - \frac{K^2X}{R_p^2(K-1)^2 + K^2X^2} \right) - E'' \frac{KR_p(K-1)}{R_p^2(K-1)^2 + K^2X^2} = 0 \quad (24)$$

где  $E'$  – вещественная часть ЭДС;

$E''$  – мнимая часть ЭДС.

Преобразуя:

$$E' R_p^2 (K-1)^2 - E'' K X R_p (K-1) = 0 \quad (25)$$

Откуда:

$$\begin{cases} \frac{R_p(K-1)}{KX} = \frac{E''}{E'} \\ K = 1 \\ R_p = 0 \end{cases} \quad (26)$$

Из выражения (26) можно выделить случаи возникновения максимальной величины аperiodического тока:

1.  $R_p = 0$  – значение, соответствующее нулевой мнимой части искомого тока, но соответствующее не максимальному значению вещественной части, а минимальному – нулю;
2.  $K = 1$  – при данном значении будет наблюдаться резонанс, ток реактора будет стремиться к бесконечности;
3.  $\frac{R_p(K-1)}{KX} = \frac{E''}{E'}$  – основное выражение по которому можно судить о случаях с максимальной величиной аperiodического тока. Принимая:

$$\frac{E''}{E'} = \tan \psi, \text{ где } \psi \text{ – аргумент вектора напряжения, получаем: } \psi = \arctan\left(\frac{R_p(K-1)}{KX}\right).$$

Максимальная величина апериодического тока составит:

$$I_{\text{апmax}} = E'' \left( \frac{K^2 X}{R_p^2 (K-1)^2 + K^2 X^2} - \frac{1}{X} \right) - E' \frac{K R_p (K-1)}{R_p^2 (K-1)^2 + K^2 X^2} \quad (27)$$

$$I_{\text{апmax}} = \frac{R_p (K-1) (E'' R_p (K-1) + E' K X)}{X (R_p^2 (K-1)^2 + K^2 X^2)} \quad (28)$$

Используя условие (26):

$$I_{\text{апmax}} = \frac{E' R_p (K-1)}{X} \frac{1}{KX} \quad (29)$$

Таким образом, максимальная величина апериодического тока, возникающего вследствие выведения резисторов из цепи, при стремлении коэффициента компенсации к 1, то есть при утяжелении условий коммутации, будет стремиться к нулю и всегда будет в  $\frac{1}{1-1/K}$  раз меньше, чем аналогичный ток при коммутации резисторов в нейтральных выводах реактора.

Этим обусловлены искажения кривых требуемого сопротивления резисторов, приведенные на рисунках 4 и 9, и при этом значительно увеличивающиеся при использовании резисторов в нейтральных выводах реактора.

При коротком замыкании ситуация противоположная. На рисунке 10 приведены кривые сопротивлений резисторов в нейтралях реакторов в зависимости от времени их работы для случая включения на однофазное короткое замыкание.

Как видно из рисунка 10, пики на кривых незначительно изменились относительно рисунка 9, только для степени компенсации 0,8 это увеличение оказалось весомым.

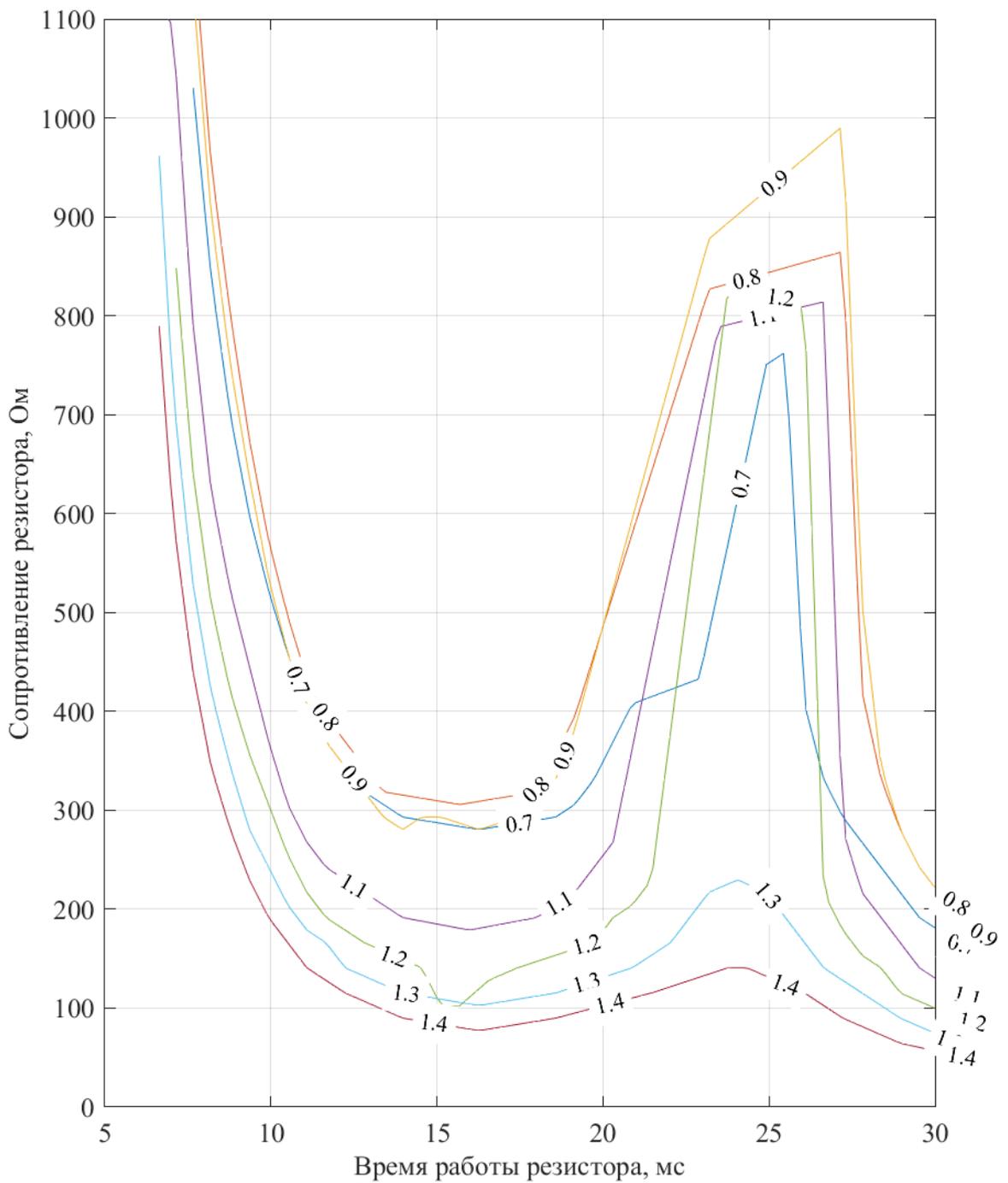


Рисунок 10. Зависимость требуемых сопротивлений резисторов в нейтральных выводах реактора от времени их работы для случая включения линии на однофазное короткое замыкание в конце линии и размещении реактора в конце линии.

В результате, по полученным кривым можно провести сравнение предвключаемых резисторов и резисторов в нейтральных реакторов. В первую очередь необходимо отметить жесткие ограничения, которые накладывают на величину сопротивления резисторов условия по величине выделяемого тепла на предвключаемых резисторах и по напряжению на резисторах в нейтральных выводах реактора. Для резисторов в нейтральных выводах реактора, напряжения на резисторах жестко привязаны к параметрам реактора, что приводит к тому, что на величину сопротивления накладываются ограничения, не зависящие от параметров переходного процесса. Более того, постоянная времени реактора с введенным резистором равна:

$$T_a = \frac{L}{R} = \frac{X}{\omega} \frac{1}{R} = \frac{X}{\omega} \frac{Q}{\sqrt{3}UU_0} = \frac{U}{\sqrt{3}\omega U_0} \quad (30)$$

где  $\frac{Q}{\sqrt{3}UU_0} = \frac{1}{R}$

$R$  – сопротивление резисторов в нейтральных выводах реактора;

$U_0$  – максимально допустимое напряжение на нейтральном выводе реактора;

$U$  – номинальное напряжение реактора;

$\omega = 2\pi f$ ;

$Q$  – номинальная реактивная мощность реактора;

$X$  – реактивное сопротивление реактора;

$L$  – индуктивность реактора.

Как видно из формулы (30), постоянная времени оказывается прямо пропорциональна отношению номинального напряжения реактора и максимально допустимого напряжения нейтрали. Для реакторов классов напряжений 220-750 кВ максимально допустимое напряжение нейтрального вывода обычно соответствует максимально допустимому напряжению класса 35 кВ, редко – 110 кВ, а это значит, что в общем случае с увеличением номинального напряжения реактора, увеличивается минимально возможная величина постоянной времени реактора с введенными резисторами. При учете того, что с ростом номинального напряжения, как правило, увеличивается

степень компенсации линий электропередачи, а значит утяжеляются условия коммутации, суммарная эффективность резисторов в нейтральных выводах реакторов падает значительно при росте номинального напряжения последнего.

Для предвключаемых резисторов проблема ограничения количества выделяемого тепла не так резко ограничивает величину допустимых значений сопротивлений резисторов, так как данные резисторы рассчитаны на включение линии на короткое замыкание – вариант с наибольшим тепловыделением.

Также необходимо отметить наличие достаточно больших по величине апериодических токов реакторов, возникающих при выведении резисторов в нейтральных выводах реакторов из работы, и требующих увеличения сопротивлений резисторов, что в свою очередь приводит к увеличению начального значения апериодического тока после его выведения. Такой контур с положительной обратной связью вносит значительные искажения в кривые требуемых сопротивлений резисторов (рис.8). В то же время для предвключаемых резисторов данная проблема менее выражена из-за меньшего тока, протекающего через выключатель, и оказывает достаточно слабое влияние на кривые требуемого сопротивления.

Однако резисторы в нейтральных выводах реакторов имеют преимущество перед предвключаемыми резисторами при большом количестве реакторов на линии. В такой ситуации, каждый резистор оказывается привязан к своему реактору и при выведении реактора из работы, вместе с ним будет выведен из работы и резистор, что облегчает выбор сопротивлений резисторов. Также, при относительно небольшой величине сопротивлений резисторов в нейтральных выводах нескольких реакторов, будет достигнута та же эффективность и скорость затухания апериодического тока реакторов, что и при использовании больших по величине сопротивлений предвключаемых резисторов.

При прочих равных, установка резисторов в нейтральных выводах реакторов оказывается незначительно эффективнее, чем использование аналогичного предвключаемого резистора.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Подготовлены специальные инструменты для автоматизированного расчета электромагнитных переходных процессов, возникающих при коммутации элегазовых выключателей компенсированных линий электропередачи.
2. Выявлена наиболее оптимальная схема замещения для задач определения опасности повреждения выключателей.
3. Проведен анализ схемно-режимных условий с определением их особенностей и оценки их тяжести для коммутации элегазового выключателя, выявлены наиболее опасные и тяжелые с точки зрения обеспечения безопасности коммутации режимы
4. Проведен анализ результатов выбора техникой решений для большого числа различных схемно-режимных вариаций, на основании которого произведено сравнение основных технических решений и выявлено наиболее универсальное и оптимальное решение.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ, СОДЕРЖАЩИХ ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Вессарт В.В., Касьянов С.Е., Шескин Е.Б. Проблемы коммутации компенсированных кабельных линий высокого напряжения на примере КЛ 330 кВ Южная - Пулковская. «Известия вузов. Проблемы Энергетики», № 11-12, 2016 г, с.43-50, Казань.
2. Касьянов С.Е., Шескин Е.Б. Методика оценки апериодических составляющих тока в выключателях компенсированных линий электропередачи. «Известия НТЦ Единой энергетической системы», №2, 2016 г., с.102-113, Санкт-Петербург.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Наумкин И.Е. Аварийные отказы элегазовых выключателей при коммутациях компенсированных ВЛ 500-1150 кВ // Электричество, № 10, 2012. С. 22-32.
2. Шескин Е.Б., Дмитриев М.В. Проблема отключения реактивированных линий 330 – 750 КВ элегазовыми выключателями // Энергетик, № 10, 2013. С. 46-53.
3. Шескин Е.Б., Евдокунин Г.А. Проблему коммутации кабельных линий высокого напряжения с шунтирующими реакторами // Электрические станции, № 12, 2013. С. 37-43.
4. Дмитриев М.В. Элегазовые выключатели 110-750 кВ. Методика выбора мероприятий по борьбе с апериодическими токами. // Новости ЭлектроТехники, № 4, 2012. С. 2-4.
5. Дмитриев М.В. О возможности применения резисторов в нейтрали шунтирующих реакторов 330-750 кВ // Энергетик, № 10, 2015. С. 3-7.
6. АО "ФСК ЕЭС". Методика расчета и выбора средств, обеспечивающих отключение элегазовых выключателей при коммутациях линий электропередачи и сборных шин, оснащенных шунтирующими реакторами. Москва. 2012.