

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение высшего и
профессионального образования
Томский политехнический университет

Л.В. Кривова, А.В. Шмойлов

**Выбор и обоснование оборудования, токоведущих
частей и коммутационных аппаратов с применением
вероятностных технологий**

Монография

Издательство ТПУ
Томск 2006

ББК 24.7
УДК 621.311.019.
С 90

Кривова Л.В., Шмойлов А. В. Выбор и обоснование оборудования, токоведущих частей и коммутационных аппаратов с применением вероятностных технологий: Монография. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. –69 с.

С90
ISBN

Разработана система выбора и обоснования оборудования, токоведущих частей и коммутационных аппаратов электроустановок с применением существующих и предложенного вероятностного метода селекции границ исходных и выходных данных (СГИД), позволяющего по вероятностным характеристикам аргументов получать полные вероятностные характеристики или законы распределения вероятностей (ЗРВ) результатов функциональной зависимости от аргументов (исходных данных). Любая задача, в том числе электрические величины или параметры стационарных рабочих режимов и переходных процессов, протекающих в силовых элементах электроустановок при повреждениях или возмущениях и характеризующих их состояние, могут быть представлены как зависимости от исходных или входных данных. Благодаря методу СГИД возможно получение ЗРВ результатов обработки исходных данных этих зависимостей. ЗРВ позволяют вычислить риски перегрузки силовых компонентов в рабочих режимах и разрушений в аварийных условиях, а параметры оборудования, токоведущих частей и коммутационных аппаратов при этом выбираются, исходя из минимума указанных рисков. Приведены примеры проверки силовых элементов конкретной электростанции. Монография предназначена для инженерно-технических работников расчетных групп, служб и отделов энергосистем и проектных организаций. Может быть использована в образовательном процессе для студентов электроэнергетических направлений и специальностей.

УДК 621.311.019

Рекомендовано к печати Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета

Рецензенты

ISBN

© Томский политехнический университет, 2006
© Оформление. Издательство ТПУ, 2006

Содержание

1. Существующие методы выбора и обоснования силовых компонентов электроустановок.
 - 1.1. Выбор и обоснование коммутационных аппаратов типа выключателей.
 - 1.2. Выбор и обоснование сечения токоведущих частей.
 - 1.3. Выбор и обоснование силового оборудования.
2. Предлагаемые вероятностные методы выбора и обоснования.
 - 2.1. Вероятностные характеристики фактических и допустимых режимных параметров силовых объектов электроустановок.
 - 2.2. Показатели и обобщенные алгоритмы выбора и проверки элементов электроустановок.
3. Получение полных вероятностных характеристик эксплуатационных и предельно-допустимых величин.
 - 3.1. Существующие методы определения ЗРВ неслучайной функции от случайных аргументов.
 - 3.2. Метод селекции границ интервалов исходных и выходных данных.
 - 3.3. Распределение вероятностей предельно-допустимых величин.
4. Алгоритмы выбора и обоснования оборудования, токоведущих частей и коммутационных аппаратов.
 - Подготовка данных для расчета параметров ЗРВ электрических величин в рабочих режимах и при повреждениях.
 - Применение ВРК ТКЗ – 3000 для расчетов параметров ЗРВ электрических величин при повреждениях.
 - Применение ВРК для расчетов параметров нормальных ЗРВ электрических величин эксплуатационных режимов.
 - Обоснование выбранных коммутационных аппаратов.
 - Обоснование выбранных токоведущих частей.
 - Жесткие токопроводы.
 - Гибкие токопроводы.
 - Жесткие сборные шины.
 - Обоснование выбранного оборудования.
 - Генераторы.
 - Трансформаторы и автотрансформаторы.
 - Токоограничивающие и шунтирующие реакторы.
 - Заключение
 - Список литературы
 - Приложение Примеры выбора и обоснования коммутационных аппаратов, токоведущих частей и оборудования

Введение

Вопросы надежности, эффективности, безопасности, удобства обслуживания, другие функциональные характеристики при проектировании и эксплуатации любых объектов народного хозяйства всегда являются актуальными. Данные вопросы еще более актуализируются в случае электроустановок – больших и комплексных объектов в энергетике, таких как подстанции, электростанции, или в целом энергосистемы. Необходимость и важность решения этих вопросов непрерывно сопровождает все стадии разработки, проектирования и эксплуатации электроэнергетических комплексов и систем.

В связи с этим в данной работе ставится задача оценки функциональной надежности в электрической части таких важнейших объектов электроэнергетики как электростанции и подстанции.

Надежность согласно ГОСТ 27.002-89 – это свойство объекта (элемента, компонента, системы) выполнять заданные функции в заданных условиях эксплуатации.

Структурная надежность – это надежность конструкций и схем без учета режимов их работы (загрузки).

Функциональная надежность – это восполнение режимных свойств компонентов и их совокупностей, входящих в состав конструкций и схем объектов, не учтенных в показателях структурной надежности.

Как структурная, так и функциональная надежность систем – это задачи определения показателей надежности интересующих элементов, объектов и в целом систем по показателям надежности всех компонентов систем.

Показатели объектов и компонентов систем могут быть разными и однотипными. В зависимости от этого могут формироваться разные методы определения показателей надежности объектов, систем и их составляющих. Опыт показывает, что рациональными с практической точки зрения методами расчета надежности являются те, которые позволяют оценить надежность любых подразделений (отдельных элементов, разных их совокупностей) и в целом электроэнергетических и иных объектов однотипными показателями.

Такой является практическая методика расчета структурной надежности схем электрических соединений, разработанная Ф.И. Синьчуговым, которая для любых схемных объектов: элементов (агрегат, трансформатор (автотрансформатор), блок агрегат-двухобмоточный трансформатор без выключателя на генераторном

напряжении, секция, линия), совокупностей элементов и коммутационных аппаратов (энергоблок, трансформаторная связь, линейная связь, распределительное устройство, подстанция, электростанция, электропередача, район энергосистемы и т.д.) позволяет выразить надежность в виде трех однотипных показателей надежности: параметра потока аварийной потери, вероятности и средней продолжительности аварийного простоя расчетного объекта. Эти показатели функционально связаны в виде произведения параметра потока и средней продолжительности, которое равно вероятности аварийного простоя.

Аналогичной является разработанная на кафедре электрических станций инженерная методика оценки показателей функциональной надежности в виде вероятностей или рисков перегрузки и разрушения коммутационных аппаратов, токоведущих частей и оборудования, входящих в состав указанных выше объектов. Риски определяются соответственно в рабочих и аварийных режимах по законам распределения вероятностей (ЗРВ) электрических величин (токов и мощностей в ветвях и напряжений в узлах) при выборе и обосновании названных силовых компонентов. Методы и показатели функциональной надежности важны и необходимы, кроме выбора и обоснования силовых объектов систем электроснабжения и выдачи мощности источников, для решения многих других инженерных задач: определения небалансов и дефицитов активной мощности распределительных устройств, электростанций, подстанций, районов и в целом энергосистем, определения показателей и характеристик трансформаторных и линейных связей, определения уставок и эффективности релейной защиты и автоматики и т.д.

Особенностью применения предлагаемой методики оценки функциональной надежности в отличие от экспертно-руководящих методов, рекомендующих те или иные решения, является то, что она позволяет не только осуществить объективный выбор интересующих параметров, исходя из определенных критериев, но и одновременно произвести оценку эффективности данного выбора, а, следовательно, скорректировать выбор, сделать его оптимальным, т.е. соответствующим максимальной эффективности. Данные возможности методики имеют место и могут быть реализованы только при известных полных вероятностных характеристиках названных интересующих параметров, т.е. если известен способ получения таких характеристик.

Обсуждаемая методика функциональной надежности основана на методе селекции границ интервалов входных и выходных данных (СГИД), разработанном также на кафедре электрических станций ТПУ.

Метод СГИД позволяет по полным вероятностным характеристикам (функции распределения – ФРВ – или плотности распределения – ПРВ – вероятностей) аргументов любой детерминированной (неслучайной) или случайной функции определить практически точно или приближенно ФРВ результатов преобразования этой функции. Зная же полные вероятностные характеристики интересующих параметров или величин можно легко находить простые и объективные решения многих практических задач.

Суть метода СГИД основывается на следующих положениях.

1. Любые задачи могут быть представлены в виде обычных неслучайных или случайных функций. При неслучайных функциях произвольно (случайно) меняются только аргументы или исходные (входные) данные, функции остаются неизменными, а результаты или выходные данные образуются путем преобразований исходных данных с помощью неслучайных функций (НФ). Поэтому выходные данные являются также случайными, но зависящими от входных исходных данных через жесткое (детерминированное) преобразование НФ. При случайных функциях (СФ) произвольно (случайно) меняются как аргументы, так и преобразования случайных функций, а результаты или выходные данные при этом формируются путем случайных преобразований случайных исходных данных.

2. Интегральная вероятностная характеристика – функция распределения вероятностей (ФРВ) или вероятность непревышения каждой случайной величиной заданного значения (т.е. функция изменяющегося заданного значения) имеет такие замечательные свойства как принятие собственной меры в интервале от нуля до единицы во всем диапазоне заданных значений ее аргументов от минимально-возможного до максимально-возможного, причем ни на каком промежутке интервала не убывая. Другими словами, ФРВ является неубывающей функцией.

Благодаря данным свойствам ФРВ можно утверждать, что, если все аргументы НФ (исходные данные) принять как значения, соответствующие одному и тому же значению их ФРВ, то при нарастающей НФ результаты преобразования аргументов неслучайной функцией или выходные данные должны соответствовать тому же значению ФРВ НФ.

Значение ФРВ, соответствующее значению своего аргумента, называется квантилем порядка, определяемого значением ФРВ. Другими словами, преобразование квантилей исходных данных одного и того же порядка нарастающей НФ дает результат в виде квантиля того же порядка, что и порядок квантилей исходных данных. При

убывающих НФ преобразование квантилей исходных данных одного и того же порядка убывающей НФ дает результат в виде квантиля порядка, равного разности единицы и порядка квантилей исходных данных. Признаком нарастающей или убывающей НФ является то, что если разности предыдущего и последующего порядков исходных данных, а также предыдущего и последующего результатов, соответствующих указанным порядкам, имеют одинаковую полярность, то НФ является нарастающей, в противном случае НФ является убывающей. Таким образом, начиная со второго варианта исходных данных как квантилей одного и того же порядка, по результатам каждой НФ можно конкретно определять нарастающий или убывающий характер последней и, следовательно, определять конкретные порядки у выходных данных (результатов) как квантилей того же порядка, что и порядок квантилей исходных данных или порядка, равного разности единицы и порядка квантилей исходных данных.

Показатели надежности должны выражать как свойства структурной надежности: повреждений, отказов, времен между этими событиями, времен восстановления (ремонта), так и функциональной надежности: рабочей загруженности и перегруженности, аварийного разрушения для отдельных объектов энергосистем и их совокупностей. Так как указанные события и величины являются случайными, то адекватными и рациональными количественными мерами для них будут указанные выше вероятностные или статистические характеристики. Для случайных событий количественной мерой является вероятности или достоверности событий, а для случайных величин – вероятности значений (дискретные величины) или плотности этих вероятностей (непрерывные величины). Зависимости плотностей вероятностей от значений случайных величин называют плотностями распределения вероятностей (ПРВ) или дифференциальными законами распределения вероятностей (ЗРВ). Используются также интегральные ЗРВ (интеграл от ПРВ непрерывной, сумма вероятностей значений дискретной случайной величины, не превышающих своего заданного значения) как зависимости в порядке нарастания значений случайных величин. Интегральные ЗРВ называются функциями распределения вероятностей (ФРВ). В целом, конкретные или интегральные значения ПРВ и ФРВ, их моментные преобразования могут быть использованы в качестве показателей структурной и функциональной надежности.

Используя выше названные методы и процедуры, в настоящей работе представлены материалы по разработке и применению алгоритмов, последовательностей расчетов и процедур для выбора и обоснования различных силовых компонентов электрической части

электростанций и подстанций, некоторая часть их апробирована на компонентах конкретных электростанций.

Указанная положительная и уникальная возможность обоснования оборудования, коммутационных аппаратов и токоведущих частей по предлагаемым в работе вероятностным технологиям, позволяет не только выбрать значения интересующих параметров и электрических величин, характеризующих указанные объекты, но и сразу же объективно оценить суммарные технические потери – риски перегрузки и аварийного разрушения. Данное обоснование может быть реализовано, если риски перегрузки и разрушения вследствие превышения выбранных значений интересующего параметра или параметров соответственно в эксплуатационных и аварийных условиях, также другие риски перегрузки и разрушения вследствие снижения допустимых соответственно длительно-допустимых (ДД) и кратковременно-допустимых (КД) относительно выбранных значений указанного параметра или параметров могут быть приведены к одинаковым условиям наблюдения. Так как данное приведение теоретически и практически осуществлено в составе данной работы, то критерий суммарного эффекта в настоящей работе может рассматриваться и использоваться как инструмент оптимизации выбора значений указанных параметра или параметров силовых компонентов. Отыскание оптимальных значений выбираемых параметров является предметом задачи или группы задач, которые пока конкретно не решены, но вполне разрешимы. В данной работе эффективность выбора или обоснования силовых компонентов оценивается приближенно по техническим потерям, приведенным к разным эксплуатационным и аварийным условиям, также испытательно-эксплуатационным и испытательно-аварийным условиям.

1. Существующие методы выбора и обоснования силовых компонентов электроустановок

Электроустановкой согласно [1] ГОСТ 19431 – 84 является совокупность силовых элементов, предназначенная для производства или преобразования, передачи, распределения или потребления электрической энергии.

Под силовыми компонентами здесь понимаются оборудование, токоведущие части и коммутационные аппараты, входящие в состав трансформаторных и линейных связей, других присоединений электроустановок.

При проектировании и эксплуатации развивающихся электроустановок возникают многочисленные задачи выбора и обоснования новых либо обоснования существующих силовых компонентов электростанций, электропередач, районных и распределительных сетей, систем электроснабжения.

Данные задачи обычно предстают в виде определения расчетных эксплуатационных значений электрических величин в условиях длительных установившихся режимов работы, кратковременных ненормальных асинхронных режимов, аварийных электромагнитных процессов коротких замыканий, утяжеленных установившихся режимов и электромеханических переходных процессов (режимные параметры). Названные расчетные значения при выборе и обосновании соответственно сопоставляются с режимными длительно-допустимыми (ДД) и кратковременно-допустимыми (КД) параметрами справочно-каталожных данных, полученных в условиях испытаний.

Как методы и условия определения расчетных значений, так и ДД и КД параметры устанавливаются (рассчитываются, принимаются, назначаются) экспертно-испытательным путем. Недостатком экспертных рекомендаций является отсутствие объективной гарантии. Значимость последней зависит от вида расчетных, ДД и КД параметров.

По виду ДД и КД параметры можно разделить на базовые (токи и напряжения) и производные (мощности и сопротивления). Последние зависят от других базовых и производных параметров. Наряду с режимными при выборе и обосновании силовых элементов электроустановок возникает необходимость рассматривать также схемно-конструкторские параметры. Особенность последних проявляется в том, что если режимные параметры зависят как от других

режимных, так и схемно-конструкторских параметров, то схемно-конструкторские параметры не зависят от режимных. Также схемно-конструкторские параметры в основном определяются параметрами окружающей среды, которые в условиях эксплуатации мало изменяются. Поэтому в детерминированных расчетах и приближенном анализе схемно-конструкторские параметры можно рассматривать неизменными.

Далее приводятся существующие, например [2], методы выбора и обоснования силовых элементов электроустановок. При этом учитываются только количественно измеряемые параметры и показатели, для которых важно определение расчетно-экстремальных значений (тока, напряжения, мощности и др.).

1.1. Выбор и обоснование коммутационных аппаратов типа выключателей

Выключатели в настоящее время выбираются по напряжению электроустановки, ДД току и проверяются:

- по отключаемому действующему периодическому и мгновенному аperiodическому токам на момент расхождения силовых контактов,
- по действующему и мгновенному значениям тока включения,
- по действующему периодическому и полному мгновенному токам в момент возникновения КЗ,
- по тепловому импульсу тока КЗ в течение заданного времени.

1.2. Выбор и обоснование сечения токоведущих частей

Сечение жестких шин секций и присоединений выбираются по ДД току и проверяются на термическую и динамическую стойкость, как правило, при КЗ. Проверка на термическую стойкость осуществляется путем сопоставления расчетного минимального сечения, исходя из теплового импульса при КЗ, с принятым сечением. Проверка на динамическую стойкость выполняется путем сравнения расчетного механического напряжения в материале шин при КЗ с КД напряжением, полученном в испытаниях.

Сечение жестких шин токопроводов генераторов выбираются по номинальному току и номинальному напряжению генератора с учетом его типа, а проверяются путем сравнением эксплуатационного расчетного тока с ДД величиной и на динамическую стойкость посредством сравнения фактического ударного тока при КЗ с КД током.

Сечение гибких шин секций выбираются по ДД току, а присоединений – по экономической плотности тока. Все гибкие токопроводы проверяются на термическую и динамическую стойкость. Причем на термическую стойкость точно так же, как и жесткие токопроводы, а динамическая стойкость – путем сравнения расчетных углового и горизонтального отклонений при КЗ от положения в рабочих режимах с одноименными КД отклонениями.

1.3. Выбор и обоснование силового оборудования

Свободно варьируемым параметром при выборе генераторов и двигателей является их номинальная мощность, которая принимается для генераторов, исходя из баланса мощности электростанций, а для двигателей – по мощности приводимых механизмов. Поэтому для названного оборудования осуществляется проверка на ДД ток, приводимый в технической документации.

В связи с тем, что генераторы и двигатели включены в состав схем электрических соединений как поперечные элементы, электрическое напряжение вдоль их обмоток при соединении в звезду распределено от нуля в нейтрали до полного напряжения на фазных выводах. Поэтому токи от ЭДС данных динамических элементов, протекающие через эти элементы при КЗ (наиболее вероятном виде повреждений) для проверки по термической и динамической стойкости данного оборудования не могут быть больше значений, чем для случая КЗ на выводах электрических машин. Конструкции генераторов и двигателей выдерживают собственные (от своих полных ЭДС) токи КЗ. Однако при внутреннем КЗ возможны протекающие через оборудование ток и от источников энергосистемы, превышающие по величине токи от ЭДС генератора или двигателя. При внешнем КЗ в сети за конденсаторами продольной компенсации индуктивного реактивного сопротивления линий также возможно превышение тока КЗ на выводах генератора и тока асинхронного режима при отсутствии компенсации. В таких случаях, следовательно, необходима проверка оборудования электрических машин на термическое и динамическое действие токов КЗ.

В отличие от генераторов и двигателей трансформаторы и автотрансформаторы выбираются по полной проходной мощности. Трансформаторные элементы, также как генераторы и двигатели, выдерживают воздействия КД токов КЗ, ограниченных их проходными реактансами. Что касается токов асинхронного и других особых (например, резонансных) режимов, то необходима проверка на

непревышение этими токами указанных КД токов трансформаторов и автотрансформаторов.

2. Предлагаемые вероятностные методы выбора и обоснования

Расчетные и предельные значения параметров элементов электроустановок зависят от множества определяющих их случайных факторов: разбросы исходных и эксплуатационных данных, параметры среды, динамическое изменение схемно-конструкторских параметров при протекании процессов и др. В ряде случаев удается выделить параметр или группу параметров, объединяющих в изменениях своих значений указанные факторы, например, напряжение узлов электрической сети, время протекания входных и выходных процессов. С точки зрения решаемой задачи выделение параметра напряжения позволяет учесть влияние случайных факторов через заданные значения в диапазоне изменения этого напряжения. Однако практическое использование значений выделяемого параметра требует определения множества расчетных значений. Поэтому при детерминированном решении данной задачи используют, как правило, номинальные или особые значения выделенного параметра.

Чтобы при выборе и обосновании силовых компонентов электроустановок учесть реальные условия их функционирования, необходим переход от детерминированных методов, при использовании которых случайные изменения, отклонения, вариации параметров являются помехой, к вероятностным, которые по своей природе основаны на случайных величинах, событиях, процессах.

Прямое применение вероятностных подходов не дает эффекта в решении многомерных задач электроэнергетики. Такими задачами, в том числе, являются также задачи выбора и обоснования обсуждаемых силовых объектов, т.к. электрические величины, характеризующие их, должны рассматриваться и определяться в многочисленных и разных условиях функционирования силовых элементов и состояний структур (схем) электроустановок. Это требует огромных вычислительных и аналитических ресурсов.

Основным препятствием вероятностного решения названных задач выбора и обоснования является получение полных вероятностных характеристик в виде законов распределения вероятностей (ЗРВ) режимных параметров процессов силовых элементов, которые обуславливают получение расчетных значений.

Однако предельные значения параметров, получаемые, как правило, в испытаниях и характеризующие возможности элементов электроустановок, также не являются детерминированными величинами. Действительно, условия эксплуатации могут отличаться от условий испытаний. Эти отличия обусловлены изменением неконтролируемых параметров среды, также некоторых режимных параметров протекающих процессов (например, напряжения), динамическое изменение схемно-конструкторских параметров, которые в условиях испытаний стабилизируют.

Таким образом, параметры (величины) процессов как в условиях эксплуатации, так и предельно-допустимых (ПД) возможностей, содержащихся в справочных материалах по результатам испытаний, являются случайными величинами. Поэтому выбранные или расчетные значения параметров должны определенным образом соотноситься с ЗРВ этих параметров в эксплуатационных и ДД, аварийных и КД условиях. При этом целесообразно утяжеляющие отклонения от выбранных параметров в эксплуатационных и ДД условиях называть перегрузкой, а в аварийных и КД условиях – разрушением. Как правило, выбираемые и проверяемые силовые элементы являются элементами максимального разрушительного действия, т.е. изделиями, перегрузка и разрушение которых происходит при превышении текущими фактическими параметрами некоторых предельных значений. Следовательно, эксплуатационные утяжеляющие отклонения силовых элементов максимального разрушительного действия формируются как превышение выбранного расчетного параметра возможными его фактическими значениями, но появляются утяжеляющие отклонения, обусловленные сниженными относительно него ДД случайными значениями и формирующими таким образом ДД случайную величину. Аналогично разрушающие отклонения в аварийных условиях образуют соответственно как превышение другого расчетного значения параметра его возможными фактическими аварийными значениями, но возникают другие разрушающие отклонения, обусловленные сниженными относительно указанного расчетного значения КД значениями как случайной величины.

2.1. Вероятностные характеристики фактических и допустимых режимных параметров силовых объектов электроустановок

В связи с тем, что сопоставляемые параметры как в эксплуатационных, так и в ПД условиях случайны, детерминированное обоснование выбора является также случайным и, следовательно, неправомерным. Последнее состоит в том, что экспертно-руководящие

обоснования путем сравнения фактических значений параметров с ДД и КД значениями объективно не гарантированы. Но вполне приемлемыми для практических целей являются вероятности или риски перегрузки и разрушения, однозначно и независимо от какого-либо субъекта характеризующих пороговые значения, разграничивающие диапазоны рабочих и перегрузочных, аварийно-допустимых и разрушительных значений интересующих электрических параметров силовых компонентов. Для силового компонента максимального разрушительного действия вероятность превышения эксплуатационного порогового значения фактическими значениями параметра является эксплуатационным риском r_3 перегрузки, а вероятность сниженных относительно указанного порога ДД значений данного параметра вследствие рассеяния соответственно означает риск $r_{\text{дд}}$ перегрузки из-за ДД снижения параметра в эксплуатационных условиях. Соответственно для названного компонента максимального разрушительного действия вероятность превышения аварийного порогового значения фактическими значениями параметра является аварийным риском r_a перегрузки, а вероятность сниженных относительно аварийного порога КД значений данного параметра вследствие рассеяния соответственно означает риск $r_{\text{кд}}$ разрушения из-за снижения КД параметра в аварийных условиях. Указанные вероятности или риски характеризуют не только пороговые значения перегрузки и разрушения, но и дают другую весьма адекватную и уникальную вероятностную меру интересующим диапазонам параметров как случайных величин. Они позволяют оперировать случайными величинами через квантили заданных порядков как привычными детерминированными величинами, но в то же время к этим величинам можно обращаться по другой их характеристике – вероятности и проводить с ними различные преобразования и анализ. С помощью вероятностной меры выбираемые силовые компоненты могут оцениваться как метрическими пороговыми значениями, так и другой мерой в виде выше названных вероятностей или рисков.

Особенностью всех представленных на рисунке вероятностных характеристик (ВХ) в виде ПРВ являются разные условия их формирования. ПРВ $c_{\text{фэ}}(\text{п})$ и $c_{\text{дд}}(\text{п})$ построены в условиях эксплуатации, а ПРВ $c_{\text{фа}}(\text{п})$ и $c_{\text{кд}}(\text{п})$ - в условиях аварийных возмущений.

Другой особенностью является рандомизированное представление ДД и КД испытательных параметров. Последнее, обусловлено случайными флуктуациями параметров среды, также

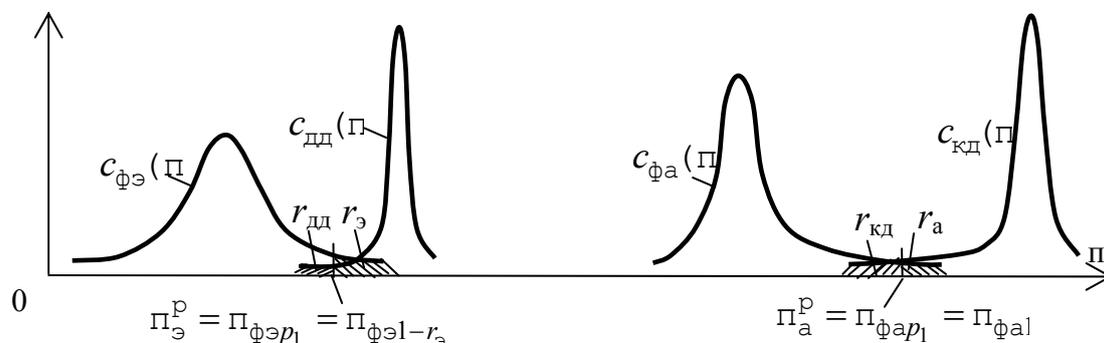


Рис.1. Плотности распределения вероятностей фактических и предельно-допустимых значений интересующего параметра Π силового элемента в условиях эксплуатации – фактических $c_{\phi\epsilon}(\Pi)$ и длительно-допустимых (ДД) $c_{дд}(\Pi)$, в условиях аварийных возмущений (коротких замыканий, асинхронных режимов) – фактических $c_{\phi а}(\Pi)$ и кратковременно-допустимых (КД) $c_{кд}(\Pi)$:

- расчетные значения параметра Π : Π_{ϵ}^p – в условиях эксплуатации, $\Pi_{а}^p$ – в условиях аварийных возмущений;

- риски:

r_{ϵ} – перегрузки вследствие превышения расчетного эксплуатационного значения Π_{ϵ}^p параметром Π ,

$r_{дд}$ – перегрузки вследствие снижения ДД значений как случайной величины относительно расчетного эксплуатационного значения Π_{ϵ}^p ,

$r_{а}$ – разрушения вследствие превышения расчетного аварийного значения $\Pi_{а}^p$ параметром Π ,

$r_{кд}$ – разрушения вследствие снижения КД значений как случайной величины относительно расчетного аварийного значения $\Pi_{а}^p$,

$\Pi_{\phi\epsilon p_1}$ и $\Pi_{\phi а p_1}$ – квантили порядков $p_1 = 1 - r_{\epsilon}$ и $p_1 = 1 - r_{а}$,

определяющие расчетные значения Π_{ϵ}^p , $\Pi_{а}^p$ с рисками: r_{ϵ} и $r_{а}$ (квантили перегрузки в условиях эксплуатации и разрушения в условиях аварийных возмущений)

изменениями фактических напряжений в режимах, которое оказывает влияние на производные параметры (мощности, сопротивления). Существенным рандомизирующим фактором испытательных значений параметров являются переходные процессы в условиях испытаний (поляризация диэлектрических сред, динамические и термические воздействия протекающих токов в местах соединений и сочленений проводников, время существования переходных процессов), свободные составляющие которых случайным образом изменяются от нулевых до максимальных значений. В целом предположительно рандомизирующие факторы могут обусловить 30 – 40 % -е изменение величины интересующего параметра от максимального или первоначального в переходном процессе его значения. Среднее значение или математическое (МО) параметра устанавливается в процессе испытаний, а разброс, например, в виде среднеквадратического значения (СКО) в предположении нормального ЗРВ можно, исходя из вышеназванного испытательного изменения, принять 5 – 7 % от испытательного диапазона или максимального (первоначального) его значения.

Разные условия ВХ рис.1 вызваны необходимостью их определения по методу селекции границ интервалов данных (СГИД), который позволяет определить полные ВХ выходных данных по ВХ исходных данных в заданных условиях наблюдения. Разные условия формирования полных ВХ исходных данных в виде ПРВ, функций распределения вероятностей (ФРВ) обуславливают разные условия получения ВХ выходных данных, что не позволяет объединять риски, показатели, вероятности при разных условиях с целью получения обобщенных критериев.

2.2. Показатели и обобщенные алгоритмы выбора и проверки элементов электроустановок

Анализ показывает, что законы распределения вероятностей (ЗРВ) рассматриваемых параметров в виде ПРВ или ФРВ для условий эксплуатации [ПРВ $c_{фэ}(п)$, $c_{дд}(п)$] и аварийных условий [$c_{фа}(п)$, $c_{кд}(п)$] равно, как и различные показатели (например, риски перегрузки $r_{э}$, $r_{дд}$ и разрушения $r_{а}$, $r_{кд}$) в названных парах не имеют заметных отличий в условиях их рассмотрения. Следовательно, риски перегрузки $r_{э}$, $r_{дд}$ и разрушения $r_{а}$, $r_{кд}$ можно попарно суммировать с одинаковым удельным весом, т.е. $r_{п} = r_{э} + r_{дд}$, $r_{р} = r_{а} + r_{кд}$.

Таким образом, обоснование параметров выбранных силовых компонентов можно производить по обобщенным рискам перегрузки $r_{п}$

и разрушения r_p и, следовательно, производить локальную оптимизацию соответственно в условиях эксплуатации и аварийных возмущений.

Анализ показывает, что предложенные модели перегрузки и разрушения могут быть приведены к общим условиям наблюдения, например, риски перегрузок привести к условиям аварийных разрушений. Это возможно благодаря тому, что финитная вероятность состояния аварийных разрушений $p(A)$ без каких-либо ограничений в условиях наблюдений может быть найдена как произведение параметра потока КЗ на выбираемом силовом объекте $\omega_{\text{ВО}}^{\text{КЗ}}$ на среднюю продолжительность $m(T_{\text{КЗ}})$ существования КЗ, т.е. $p(A) = \omega_{\text{ВО}}^{\text{КЗ}} m(T_{\text{КЗ}})$, а также благодаря тому, что вероятность эксплуатационного состояния $p(\text{Э})$ аналогично без каких-либо ограничений в условиях наблюдения практически равна единице, т.к. вероятность $p(A)$ имеет значения в пределах от 10^{-5} до 10^{-11} . Сомножители $p(A)$: параметр потока $\omega_{\text{ВО}}^{\text{КЗ}}$ задается в справочных материалах, а средняя продолжительность $m(T_{\text{КЗ}})$ определяется временем работы основной защиты и временем отключения.

Приведение рисков или вероятностей перегрузки к рискам или вероятностям разрушения должно осуществляться путем умножения данных вероятностей или рисков на вероятности состояний $p(A)$ и $p(\text{Э})$, найденных в условиях наблюдения без ограничений. При этом следует также обратить внимание на то, что указанные вероятности или риски в условиях эксплуатации или аварийных разрушений имеют разный удельный вес и этот фактор можно попытаться учесть. Очевидно, что каждое разрушение силовых компонентов по негативным последствиям во много раз превышает перегрузку. Поэтому удельный вес перегрузки необходимо принять по сравнению с разрушением в виде коэффициента $k_{\text{п-р}}^y$, меньшего единицы, например, 0,001.

Таким образом, оказывается сформированным обобщенный критерий риска $r_0 = k_{\text{п-р}}^y r_{\text{п}} + r_p$, который может быть использован для сопоставления разных вариантов выбираемых силовых компонентов, а также для оптимизации параметров этих компонентов при их проектировании.

Анализ рис. 1 позволяет сформулировать практически реализуемые варианты выбора и проверки расчетных параметров силовых элементов,

исходя из разных значений рисков отдельно в эксплуатационных и аварийных условиях:

1) выбор расчетных значений интересующего расчетного параметра Π в эксплуатационных p_3^p и аварийных p_a^p условиях, исходя из заданных рисков соответственно r_3 в эксплуатационных и r_a в аварийных условиях, также определение рисков $r_{дд}$, $r_{кд}$, соответственно из-за сниженных ДД и КД значений интересующего параметра относительно расчетных пороговых значений p_3^p и p_a^p ;

2) варьирование расчетных значений интересующего расчетного параметра Π в эксплуатационных p_3^p и аварийных p_a^p условиях; определение рисков перегрузки r_3 и разрушения r_a за счет превышения соответственно расчетных значений p_3^p и p_a^p ; рисков перегрузки $r_{дд}$ и разрушения $r_{кд}$ за счет сниженных ДД и КД значений относительно расчетных значений p_3^p и p_a^p ; суммарных рисков перегрузки $r_{п} = r_3 + r_{дд}$ и разрушения $r_{р} = r_a + r_{кд}$; минимизация результатов выбора расчетных значений p_3^p и p_a^p по величине соответственно суммарных рисков $r_{п}$ и $r_{р}$;

3) использование всего комплекса действий п.2) по каждому варианту расчетных значений p_3^p и p_a^p ; определение обобщенного риска $r_0 = k_{п-р}^y r_{п} + r_{р}$ и расчетных затрат на установку и содержание силовых компонентов; оптимизация по минимуму обобщенного риска и расчетных затрат.

В данной работе обсуждаемые выбор и обоснование производятся с использованием только условных характеристик по п.2. В целом порядок выбора и обоснования параметров силовых элементов при этом может быть сформулирован:

- методом селекции границ интервалов данных (СГИД) определяются параметры условных ПРВ расчетного параметра Π в эксплуатационных $c_3(p)$ и аварийных $c_a(p)$ условиях,

- аналогично методом СГИД могут быть определены параметры условных ПРВ ДД $c_{дд}(p)$ и КД $c_{кд}(p)$ расчетного параметра Π , если известна зависимость ДД и КД параметров от исходных данных, в

противном случае задача решается другим путем как это делается в настоящей работе,

- выбираются, задаются, обосновываются риск перегрузки r_3 и разрушения r_a ,

- по указанным рискам и ПРВ $c_3(\pi)$ и $c_a(\pi)$ определяются или просто назначаются возможные значения расчетного параметра Π как квантили соответственно порядков $1-r_3$ и $1-r_a$, т.е. Π_{31-r_3} и Π_{a1-r_a} , которые в первом случае принимаются за выбранные и обоснованные расчетные значения интересующего параметра Π соответственно в эксплуатационных Π_3^p и аварийных Π_a^p условиях, а во втором случае принимаются только как выбранные,

- по полученным значениям Π_3^p , Π_a^p и ПРВ $c_{дд}(\pi)$ и $c_{кд}(\pi)$ в первом случае определяются риск перегрузки $r_{дд}$ и разрушения $r_{кд}$ вследствие снижения ДД и КД значений параметра относительно расчетных значений Π_3^p , Π_a^p :

$$r_{дд} = \int_{\Pi_{эи}}^{\Pi_3^p} c_{дд}(\pi) d\pi, \quad r_{кд} = \int_{\Pi_{аи}}^{\Pi_a^p} c_{кд}(\pi) d\pi. \quad (2)$$

Для завершения логики выбора и обоснования должны быть заданы нормирующие значения рисков r_3 , r_a , $r_{дд}$, $r_{кд}$. До проведения специальных исследований можно рекомендовать принимать указанные риски равными 0,001. Во втором случае наряду с рисками $r_{дд}$, $r_{кд}$ определяются также r_3 , r_a .

3. Получение полных вероятностных характеристик эксплуатационных и предельно-допустимых величин

Полными вероятностными характеристиками (ВХ) случайных величин являются законы распределения вероятностей (ЗРВ), которые могут быть представлены в двух видах – функции (ФРВ) и плотности (ПРВ) распределения вероятностей.

Получение ЗРВ возможно двумя путями: с помощью обработки статистики и расчетным путем. Исползованию методов обработки статистики свойственен естественный недостаток, обусловленный ее ретроспективностью. Это приводит к тому, что статистика является неоднородной по времени, характеристики такой статистики являются

опосредованными, недостаточно отражающими текущее состояние процессов. Более ранняя по времени статистика влияет на характеристики более поздней статистики. Данный недостаток ретростатистики особенно проявляется в настоящее время, когда динамика процессов во всех сферах деятельности, включая технику, быстро меняется и ускоряется. В связи с этим практически возможно использование только наиболее близкой по времени к моменту применения статистики. Однако объем современной статистики в ряде случаев оказывается недостаточным для получения представительных характеристик. Поэтому всегда, а в настоящее время тем более, целесообразно использовать расчетные методы, позволяющие, с одной стороны, в ряде случаев априорно получить или назначить практически полную (генеральную) статистику для интересующих объектов, по которой можно определить полные ВХ, а, с другой стороны, путем использования названных ВХ как исходных данных, расчетным путем найти также полные ВХ преобразований этих данных, определяемых интересующими задачами. Указанные преобразования чаще всего предстают в виде детерминированных (неслучайных) функций (НФ) от аргументов, которые, как указано выше, являются случайными.

В качестве примеров случайных аргументов (СА) можно привести количество поврежденных однотипных единиц потребителей (двигателей, преобразовательных установок и др.), характеризующихся единичной мощностью. Благодаря последнему биномиальные ЗРВ совокупностей однотипных элементов преобразуются в биномиальное распределение мощностей, кратных единичной мощности. Биномиальное распределение мощностей при большом количестве потребителей с соизмеримыми дисперсиями согласно выводам математической статистики, стремится к нормальному ЗРВ. Также независимое случайное электропотребление разных соизмеримых по мощности токоприемников или загрузка генераторов, согласно выводам математической статистики, стремится к нормальному ЗРВ.

Примерами НФ от СА могут быть алгоритмы или программы задачи определения параметров рабочих режимов (перетоков активной и реактивной мощностей в ветвях, величин и углов напряжений в узлах). Аналогично можно рассматривать как НФ от СА (заданные активные и реактивные мощности в нагрузочных и генераторных узлах) предельно-допустимые (ПД) по условию устойчивости мощности электропередач, электрические величины при повреждениях, асинхронном режиме и т.д.

Для целей данной работы выбора и обоснования силовых компонентов схемы электрических соединений необходимо задание или

получение ЗРВ потоков мощностей и токов в ветвях и уровнях напряжений в узлах. Однако получение потоков через элементы схемы осуществляется по-разному, а именно, одни из них должны задаваться, а другие определяются путем применения к схеме правил электротехники.

В соответствии с используемой практикой расчетов электрических режимов энергосистем обычно принято задавать потоки мощностей нагрузочных и генераторных узлов, т.е. в поперечных ветвях, и на их базе рассчитывать потоки в продольных элементах, т.е. в линейных, трансформаторных и иных связях.

3.1. Существующие методы определения ЗРВ неслучайной функции от случайных аргументов

Аналитическое определение ЗРВ неслучайной функции (НФ) от СА в настоящее время разработано в полном объеме только для одномерной НФ [2]. Это аналитическое определение можно назвать методом неслучайной функции от случайных аргументов (НФСА). Распространение этого метода для двумерной НФ принципиально возможно, но возникают трудности: неаналитичность областей НФ от СА, отсутствие развитого банка двумерных совместных плотностей распределения вероятностей (ПРВ). Первое обуславливает необходимость разбиения данных областей на подобласти путем визуального анализа, СА. Второе при наличии зависимости между СА вызывает необходимость знания не только безусловных, но и условных ПРВ СА, т.е. фактически делает проблему НФСА неразрешимой. В случае трехмерной и более высоких размерностей НФ названные трудности ускоренно возрастают. Поэтому практически метод НФСА используется в основном для одномерных НФ.

Для многомерных НФ используется метод статистического моделирования (СМ) значений СА и последующих статистических испытаний (СИ) получения результатов многомерных НФ по смоделированным вариантам значений СА (метод СМСИ). Принципиальных препятствий применения метода СМСИ нет при любой размерности НФ. Однако с ростом размерности НФ или системы СА необозримо возрастает объем вычислений при подготовке вариантов исходных данных путем СМ и последующих СИ. Неограниченное нарастание обусловлено требованием представительности результатов СИ как статистических данных. Последнее обуславливает практическую возможность применения метода СМСИ только для задач ограниченной размерности, когда

предписываемое требованием представительности получаемой статистики количество вариантов СМ и СИ находится в пределах технических возможностей применяемых ЭВМ и программного обеспечения. Опыт применения метода СМСИ показывает, что это обычно 10-ти, 12-ти мерные НФ.

Другие практические методы [3, 4] определения ЗРВ многомерных НФ кроме названных и модификаций на их основе, в настоящее время малоизвестны и распространены.

Предлагаемый метод [4,5] селекции границ интервалов исходных и выходных данных (СГИД) весьма прост и достаточно хорошо адаптирован для применения в инженерных решениях.

3.2. Метод селекции границ интервалов исходных и выходных данных

Аналогично методу СМСИ метод СГИД не имеет принципиальных ограничений на размерность НФ, связывающей исходные и выходные данные, но, в отличие от последнего, в нем также устранена проблема статистической представительности результатов, которая вызывает необходимость перебора всевозможных сочетаний СА. Вместо этого для реализации метода СГИД осуществляется так называемое специализированное задание вариантов исходных данных или СА в виде значений как квантилей одного и того же порядка для каждого из вариантов. Благодаря этому обеспечивается невероятно огромное сокращение вариантов исходных данных СА. Можно сказать, что указанное сокращение вариантов в методе СГИД доведено до вырожденного (почти нулевого) значения.

Определение квантиля заданного порядка можно сформулировать на основе функции распределения вероятностей (ФРВ) – второй наряду с ПРВ полной вероятностной характеристики любой случайной величины, в том числе и СА. ФРВ, как известно, представляет собой вероятность неперевышения случайной величиной, например, активной мощностью N_i нагрузки i -го узла, заданного значения n_i , т.е.

$$p(N_i < n_i) = f_i(n_i),$$

где f_i - обозначение ФРВ.

Квантилем порядка p называется значение аргумента ФРВ, которому соответствует значение ФРВ, равное порядку, т.е. $f_i(n_{ip}) = p$,

где n_{ip} – квантиль нагрузки N_i порядка p . Из приведенного уравнения квантиль n_{ip} может быть найден по формуле: $n_{ip} = f_i^{-1}(p)$,

где f_i^{-1} – обратная функция, которая имеет место для ФРВ как неубывающей функции.

Вариант СА как квантилей одного и того же порядка p формируется путем определения квантилей порядка p по примеру последней приведенной формулы. ФРВ и их обратные функции для каждого исходного данного или СА должны быть предварительно получены или заданы. Практически любые исходные данные, в частности, активные и реактивные мощности нагрузочных и генераторных узлов близки к нормальному или равномерному ЗРВ. Количество параметров данных ЗРВ, определяющих выражения ПРВ и ФРВ, равно двум и они могут быть оценены по минимально- и максимально-возможным наблюдаемым значениям как квантилям соответственно порядков $p_2 = 0,0013$ и $p_1 = 0,9987$; например, для минимального $n_{ии}$ и максимального $n_{иа}$ значений активной мощности N_i . Тогда параметры нормального ЗРВ могут быть оценены по правилу трех сигм:

- первый параметр, математическое ожидание (МО)

$$m(N_i) = \frac{n_{иа} + n_{ии}}{2}, \quad (3)$$

- второй параметр, среднеквадратическое отклонение (СКО)

$$\sigma(N_i) = \frac{n_{иа} - n_{ии}}{6}. \quad (4)$$

В случае весьма реального для обсуждаемых исходных данных равномерного ЗРВ:

- первый параметр, минимально-возможное значение $n_{ии}$,

- второй параметр, максимально-возможное значение $n_{иа}$.

МО и СКО при равномерном ЗРВ будут:

$$m(N_i) = \frac{n_{иа} + n_{ии}}{2}, \quad \sigma(N_i) = \frac{n_{иа} - n_{ии}}{2\sqrt{3}}. \quad (5)$$

Метод СГИД заключается в распространении на многомерные случаи (многомерные НФ) метода НФСА, состоящего в соответствии (в частности, равенстве) вероятностей непревышения заданных

функционально-связанных значений как СА, так и результата применения НФ к СА. Другими словами, ФРВ СА и НФ от них либо равны друг другу (нарастающая НФ), либо ФРВ НФ равна разности единицы и ФРВ СА (убывающая НФ). При этом задание границ непревышения должно быть специализированным для СА, т.е. границы должны соответствовать одному и тому же значению ФРВ каждого СА или должны быть квантилями одного и того же порядка. Характер нарастания или убывания НФ устанавливается по одно- или разно-полярным разностям соответственно ФРВ двух разных вариантов СА и значений НФ от указанных вариантов или разностям соответственно двух порядков квантилей, определяющих варианты СА, и вышеназванных НФ от данных вариантов СА. Например, если разность порядков p_1 и p_2 вариантов квантилей СА или исходных данных, т.е. $p_1 - p_2$ и разность НФ от указанных вариантов (например, потоков активной мощности N_{ijk} в k -й ветви сети между i -м и j -м узлами $n_{ijk1} - n_{ijk2}$) имеют один и тот же знак, то зависимость потока N_{ijk} от СА является нарастающей и ее значения n_{ijk1} и n_{ijk2} являются квантилями соответственно порядков p_1 и p_2 , т.е. $n_{ijk1} = n_{ijkp_1}$, $n_{ijk2} = n_{ijkp_2}$. Если же разность НФ от рассматриваемых вариантов СА (например, значений u_{s1} и u_{s2} величины напряжения U_s в s -м узле, т.е. $u_{s1} - u_{s2}$) имеет противоположный знак по сравнению с разностью $p_1 - p_2$, то НФ U_s от СА является убывающей, а ее значения u_{s1} и u_{s2} являются соответственно квантилями порядков $1 - p_1$ и $1 - p_2$, т.е. $u_{s1} = u_{s1-p_1}$, $u_{s2} = u_{s1-p_2}$.

ФРВ НФ, полученные методом СГИД, могут иметь отклонения от истинных. Анализ показал, что эти отклонения зависят от характера НФ. При этом отклонения ФРВ для значений НФ близких к концам диапазона НФ минимальны, а на концах диапазона вообще равны нулю. Данный вывод целесообразно использовать для формирования ФРВ НФ. Практически это можно применить в случаях, если априорно известен вид ЗРВ НФ. Например, вследствие многомерности параметров режимов как НФ ЗРВ последних близко к нормальному, полностью определяемому двумя параметрами: МО и СКО. Метод СГИД в таких случаях следует применять только для определения двух параметров ЗРВ (ФРВ). Поэтому можно для этой цели использовать точки ФРВ, по методу СГИД наиболее точно совпадающие с истинными ФРВ, т.е. при значениях НФ, близких к концам диапазона

последней, и в этих точках составлять уравнения-условия для определения неизвестных параметров известных по виду ЗРВ. Количество уравнений-условий при этом равно числу параметров ЗРВ. Данные уравнения могут быть представлены как квантили НФ при специализированном задании СА, также в виде квантилей порядков, близких к единице и нулю.

НФ, определяющая задачу вычисления параметров режимов реализуется путем применения вычислительных расчетных комплексов (ВРК), преобразующих СА (исходные данные). Применение ВРК вследствие эксплуатационных ограничений обуславливают невозможность моделирования слабозагруженных режимов. В связи с этим возможно организовать не любое специализированное задание СА (исходных данных), а только такие, при которых режимы являются достаточно загруженными, т.е. порядки p_1 и p_2 квантилей исходных данных при нормальных ЗРВ выходных данных (параметров режимов) должны быть близкими к единице, например, $p_1 = 0,9987$ и $p_2 = 0,99$. Однако, если бы ВРК мог надежно моделировать параметры режимов при ничтожно малых исходных данных, то целесообразно было принять исходные данные как квантили порядка $p_2 = 0,0013$. Точность определения параметров известного по виду ЗРВ при этом была бы выше, чем при $p_2 = 0,99$

В результате расчетов с помощью ВРК специализированных режимов, характеризующихся вариантами квантилей исходных данных порядков p_1 и p_2 , оказываются определенными интересующие электрические величины, которым как квантилям присваиваются порядки соответственно p_1 , p_2 при нарастающей НФ от СА и $1 - p_1$, $1 - p_2$ при убывающей НФ. Например, при нормальном ЗРВ электрических величин режимов поток активной мощности N_{ijk} , являющийся нарастающей НФ будет иметь квантили порядков p_1 и p_2 , которые могут быть выражены следующим образом:

$$n_{ijkp_1} = m(N_{ijk}) + \sigma(N_{ijk})\Phi^{-1}(p_1 - 0,5),$$

$$n_{ijkp_2} = m(N_{ijk}) + \sigma(N_{ijk})\Phi^{-1}(p_2 - 0,5).$$

При рассмотрении данных выражений как системы двух уравнений относительно неизвестных параметров нормального ЗРВ МО $m(N_{ijk})$ и СКО $\sigma(N_{ijk})$, последние определяются по формулам:

$$\sigma(N_{ijk}) = \frac{n_{ijkp_1} - n_{ijkp_2}}{\Phi^{-1}(p_1 - 0,5) - \Phi^{-1}(p_2 - 0,5)}, \quad (6)$$

$$m(N_{ijk}) = n_{ijkp_1} - \sigma(N_{ijk})\Phi^{-1}(p_1 - 0,5). \quad (7)$$

Аналогично при нормальном ЗРВ напряжения U_s , являющейся гарантированно убывающей НФ, рассматриваются квантили порядков $1 - p_1$ и $1 - p_2$, т.е.:

$$U_{s1-p_1} = m(U_s) + \sigma(U_s)\Phi^{-1}(1 - p_1 - 0,5),$$

$$U_{s1-p_2} = m(U_s) + \sigma(U_s)\Phi^{-1}(1 - p_2 - 0,5),$$

которые как система двух уравнений разрешается относительно неизвестных:

$$\sigma(U_s) = \frac{u_{s1-p_1} - u_{s1-p_2}}{\Phi^{-1}(1 - p_1 - 0,5) - \Phi^{-1}(1 - p_2 - 0,5)}, \quad (8)$$

$$m(U_s) = u_{s1-p_1} - \sigma(U_s)\Phi^{-1}(1 - p_1 - 0,5). \quad (9)$$

3.3. Распределение вероятностей предельно-допустимых величин

Детерминированные значения предельно-допустимых (ПД) величин или параметров оборудования, токоведущих частей, коммутационных аппаратов устанавливаются по результатам специализированных испытаний в конкретных условиях параметров среды: температуры, давления, влажности. Однако по разным причинам значения параметров среды не могут быть точно удержаны, т.е. имеет место определенный разброс данных параметров, а, следовательно, также некоторый разброс зависящих от этих параметров ПД величин.

Так называемые базовые параметры, например, ток ни от каких других электрических величин не зависит, однако параметры среды: температура, давление, влажность влияют на величину пропускаемого тока по проводнику и, поскольку они случайно изменяются, благодаря указанному влиянию вызывают случайное изменение также тока, в том числе его ПД величины. Влияние параметров среды в пределах эксплуатационных границ обычно небольшое, 1-3% от среднего значения. Для практических целей можно принимать вид ЗРВ базового

параметра нормальным. Полученное в испытаниях ПД детерминированное значение базового параметров следует рассматривать как МО или среднее значение – один из параметров нормального ЗРВ. Тогда СКО – другой и последний параметр нормального ЗРВ определится по формуле $СКО=(0,01 - 0,03)МО$. Аналогичные характеристики и показатели имеет другой базовый параметр – напряжение.

Наиболее часто используемым при выборе и обосновании силовых трансформаторов, автотрансформаторов, шунтирующих реакторов является параметр полной мощности, которая определяется НФ в виде произведения тока и напряжения данных силовых элементов. Особенностью параметра мощности является то, что как произведение базовых параметров тока и напряжения мощность является более рандомизированной по сравнению с ними. Данная особенность проявляет себя и в ПД мощности, однако в том смысле, что ПД мощность в каждой ситуации определяется в основном ПД током, т.к. ПД значения напряжения, обусловленные запасом электрической прочности изоляции, в условиях эксплуатации практически не достигаются. Более того, при эксплуатации стремятся напряжения в узлах поддерживать стабильными или в требуемых диапазонах. При изменениях же фактического напряжения ПД мощность, определяемая также и этим напряжением, будет соответствующим образом изменяться. Если отвлечься от значений составляющих тока и напряжения, то ПД мощность можно представить как случайную величину с условным распределением вероятностей в зависимости от значений напряжения, т.е. ПД мощность, определяемая током, становится более случайной из-за случайного изменения напряжения и распределение безусловных вероятностей этой мощности становится более рассеянным. Вклад в рассеяние мощности внесут также неконтролируемые изменения параметров среды, но также непрерывными изменениями эксплуатационных режимов, т.е. их параметров, в том числе напряжений. Таким образом, такие производные параметры как полная, очевидно, также активная и реактивная мощности являются более случайными и рассеянными.

ЗРВ таких сложных величин могут быть определены как ЗРВ НФ от СА: тока, напряжения и угла между ними. Количество СА в данном случае небольшое, поэтому ЗРВ результата НФ в виде мощности может быть получен как точным методом НФСА, так и приближенно методом СГИД. Аппроксимируя для практических целей ЗРВ ПД мощностей нормальным законом, параметры последнего в виде МО и СКО следует

определять методом СГИД по уравнениям – условиям квантилей мощностей, полученных в специализированных режимах, учитывая при этом характер изменения зависимости мощности от исходных данных. При определении параметров установившихся режимов, в том числе токов в ветвях и напряжений в узлах методом СГИД при нормальном ЗРВ исходных данных, получаемые результаты (токи в ветвях и напряжения в узлах) обычно являются квантилями соответственно высоких (токи в ветвях) или низких порядков (величины напряжений в узлах).

4. Алгоритмы выбора и обоснования оборудования, токоведущих частей и коммутационных аппаратов

Выбор указанных силовых компонентов производится в соответствии обобщенными условиями:

- 1) целью применения (использования),
- 2) конъюнктурой (потребительскими качествами, рекламой),
- 3) финансовыми возможностями,
- 4) знанием технических характеристик и требований к выбираемым объектам, изложенных в разделе 1.

Обоснование выбранных элементов предлагается проводить по трем модификациям алгоритмов подраздела 2.2., формы которых с точки зрения результатов адекватны, но с уточнением, расширением и обобщением содержания и качества обоснования.

Ниже представлены примеры выбора параметров проверки и обоснования оборудования, токоведущих частей и коммутационных аппаратов в указанных алгоритмических последовательностях или мало отличающихся от них модификациях. Однако в связи с особенностями существующих программных продуктов ВРК, позволяющих рассчитывать параметры установившихся и аварийных режимов, т.е. основные многомерные неслучайные функции от исходных схемно-конструкторских и режимных данных, как квантили определенных порядков, предварительно необходимо рассмотреть подготовку и получение данных для расчетов параметров ЗРВ электрических величин в рабочих режимах и при повреждениях. При подготовке следует учесть пространственную распределенность выбираемых силовых компонентов, что обуславливает необходимость усреднения ряда электрических величин и их ВХ по факторам режимов работы источников, коммутационных состояний сети и пространственной

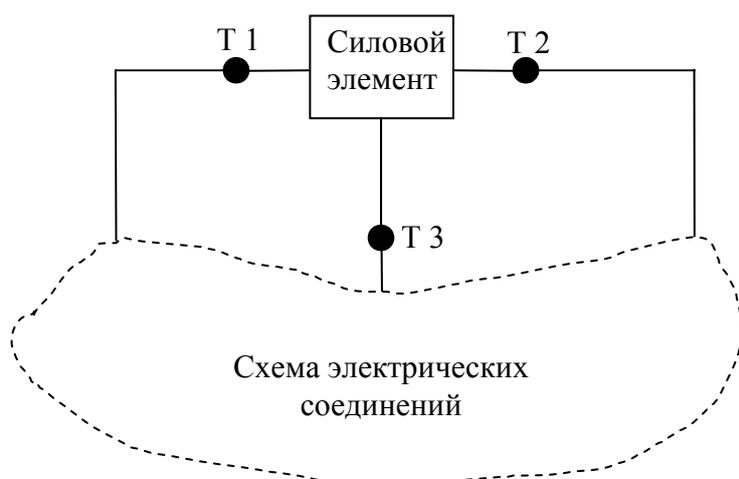


Рис. 2. Подключение силового элемента с тремя терминалами T1, T2 и T3 к схеме электрических соединений.

Последнее предписывает определенную процедуру действий. Сначала в заданном, как правило, нормальном состоянии сети и режиме источников необходимо определить направления изменения электрических величин по пространству интересующего объекта в рабочих условиях и при повреждениях или возмущениях (рис. 2).

Названные направления определяются потоками электрических величин через терминалы силового элемента. При этом выявляются максимальные и минимальные значения. Терминал с максимальными значениями можно назвать отправным, а с минимальным значением – приемным. Далее путем анализа схемы электрических соединений следует назначить режимы источников и коммутационных состояний сети относительно отправных и приемных терминалов с целью обеспечения экстремальных значений интересующих режимных и аварийных параметров. При недостаточно четкой связи режимов источников и состояний схемы с экстремальными значениями потоков через терминалы следует проводить интерактивные расчетные испытания по выявлению предельных значений данных потоков. Полученные максимальные и минимальные значения на разных терминалах в описанных рабочих и аварийных условиях (включая виды электрических повреждений) следует рассматривать как максимально- и минимально-наблюдаемые значения нормально-распределенных по вероятностям интересующих параметров, изменяющихся по всем выше оговоренным факторам: режимам источников, коммутационным

состояниям сети, особым условиям (резонанс, асинхронные режимы, различные виды повреждений и т.д.).

4.1. Подготовка данных для расчетов параметров ЗРВ электрических величин в рабочих режимах и при повреждениях

Определение параметров нормальных ЗРВ рабочих токов и других электрических величин, в частности, напряжений, активных, реактивных и полных мощностей по методу СГИД требует предварительной подготовки исходных данных в виде квантилей порядков p_1 и p_2 и последующих расчетов на ВРК установившихся режимов, которые целесообразно назвать специализированными, т.к. база данных для расчета данных режимов отличается от обычной случайной или экспертно-определенной. Обычно распределение вероятностей исходных данных подчиняется нормальному или равномерному ЗРВ. При этом должны быть известны максимально- и минимально-возможные наблюдаемые значения каждого из исходных данных, например, $x_{на}$ и $x_{ни}$, которым приписываются соответственно порядки квантилей $p_1 = 0,9987$ и $p_2 = 0,0013$; исходя из правила трех сигм при нормальном ЗРВ. Имея названные данные, просто определяются параметры ЗРВ каждого исходного данного:

- при нормальном ЗРВ по правилу трех сигм – это МО и СКО:

$$m(X) = \frac{x_{на} + x_{ни}}{2}, \quad \sigma(X) = \frac{x_{на} - x_{ни}}{6}; \quad (10)$$

- при равномерном ЗРВ можно получить гранично-минимальное $x_{и}^p$ и - максимальное $x_{а}^p$ значения ПРВ равномерного распределения:

$$x_{и}^p = \frac{p_1 x_{ни} - p_2 x_{на}}{p_1 - p_2}, \quad x_{а}^p = x_{и}^p + \frac{x_{на} - x_{ни}}{p_1 - p_2} = \frac{p_1 x_{ни} - p_2 x_{на}}{p_1 - p_2} + \frac{x_{на} - x_{ни}}{p_1 - p_2}, \quad (11)$$

на основании которых МО и СКО равномерного ЗРВ будут:

$$m(X) = \frac{x_{а}^p + x_{и}^p}{2} = \frac{x_{на} + x_{ни}}{2}, \quad \sigma(X) = \frac{x_{а}^p - x_{и}^p}{2\sqrt{3}}.$$

Полученные исходные данные в виде квантилей порядков $p_1 = 0,9987$ и $p_2 = 0,0013$ используются для определения параметров специализированных стационарных установившихся и аварийных режимов работы электроустановок как неслучайной функции (НФ) от случайных аргументов (СА). Данные результаты (выходные данные) являются квантилями порядков p_1 и p_2 если НФ является нарастающей и $1 - p_1$ и $1 - p_2$ при убывающей НФ.

По квантилям установившихся или аварийных режимов определяются параметры нормальных ЗРВ выходных данных: с помощью выражений (6,7) при нарастающей их зависимости от исходных данных и выражений (8,9) при убывающей данной зависимости.

4.2. Применение ВРК ТКЗ – 3000 для расчетов параметров ЗРВ электрических величин при повреждениях

В связи с широким применением ВРК ТКЗ-3000 и аналогичных модификаций ВРК, в составе которых не предусмотрен полноценный модуль расчета параметров установившихся режимов и вследствие этого невозможностью получения квантилей специализированных установившихся режимов, принято в качестве квантилей порядка p_1 нарастающих и порядка $1 - p_1$ убывающих электрических величин интересующих повреждений использовать электрические величины, рассчитанные при обычной базе ТКЗ-3000. Основанием для этого является то, что обычно электрические величины повреждений необходимы для проверки силовых элементов на максимально-токовое разрушение и, следовательно, для этого требуются максимально-большие величины КЗ. В соответствии с этим производится подготовка и отладка обычной базы данных ТКЗ-3000. Среди данных этой базы подготавливаются также ЭДС динамических (генераторных) элементов в поперечной оси синхронных машин для сверхпереходного момента. Режимный параметр ЭДС должен готовиться на основе электрических величин фактического доаварийного установившегося режима, но, поскольку в ТКЗ-3000 нет модуля расчета установившегося режима, то используются приближенно электрические величины номинального режима для каждого генераторного элемента. Выражения при этом для величин ЭДС генераторных элементов как квантилей порядка p_1 (нарастающая функция от тока) имеют вид:

$$e''_{гн} = e''_{p_1} = \sqrt{(u_{гн} + i_{гн} z''_{гн} \cos \varphi_{гн})^2 + (i_{гн} z''_{гн} \sin \varphi_{гн})^2},$$

где $\varphi_{гн}$ – угол загрузки генераторных элементов, соответствующий номинальному коэффициенту мощности $\cos \varphi_{гн}$, в случае генераторных элементов в виде комплексной нагрузки коэффициент мощности принимается равным усредненному значению для каждого нагрузочного узла.

Указанное допущение способствует увеличению как рассчитываемых ЭДС источников, так и токов повреждений, пропорциональных этим ЭДС и линейно зависящих от них.

Следовательно, это допущение обуславливает запас при получении максимально-больших величин КЗ и поэтому является правомерным. С этой точки зрения необходимым является также формирование состояния сети и режимов источников (способствующих возрастанию величин КЗ), контроль максимальной величины токов при всех видах КЗ, требуемых для рассмотрения при решении задач выбора и обоснования конкретных силовых компонентов схем электрических соединений. Учет указанных условий и мер позволяет определить максимально-возможные наблюдаемые электрические величины, являющиеся нарастающими функциями (токи $i_{на}$, напряжения обратной $u_{2на}$ и нулевой $u_{0на}$ последовательностей) и минимально-возможные наблюдаемые электрические величины, являющиеся убывающими функциями (напряжения $u_{1ни}$ и сопротивления $z_{1ни}$ прямой последовательности) от исходных баз данных. В качестве выходных данных как квантилей порядка p_2 или $1 - p_2$ электрических величин при КЗ, обрывах, других повреждениях можно принять электрические величины, которые бы получились при минимально-возможных исходных данных в виде квантилей порядка $p_2 = 0,0013$. Установившийся режим при таких малых исходных данных, по-видимому, не может быть сбалансирован на большинстве ВРК, хотя принципиально и технически вполне достижим. Но нет, оказывается, никакой необходимости производить реализацию такого минимального режима на ВРК для целей определения методом СГИД параметров ЗРВ электрических величин при КЗ. Данная возможность возникает благодаря линейной зависимости токов в сети от вызвавших их ЭДС в поперечной оси синхронных машин для любого заданного момента, в том числе для сверхпереходного.

Рассчитанные токи КЗ при полученных ЭДС e''_{p1} как квантилей порядка p_1 благодаря нарастающей функциональной зависимости от указанных ЭДС согласно методу СГИД будут также квантилями порядка p_1 , а благодаря многомерности этой зависимости ЗРВ токов, остаточных напряжений и других электрических величин будут близки к нормальному ЗРВ.

Распределения вероятностей токов рабочих режимов генераторных элементов как и любых других токов в ветвях между узлами следует принять также нормальными, т.к. они являются многомерными неслучайными (НФ) функциями массовых исходных данных установившихся режимов

Распределение вероятностей данных ЭДС вследствие массовой зависимости от напряжений и токов в установившихся режимах для каждого момента переходного процесса в соответствии с приведенным выражением должно быть нормальным. Нормальный ЗРВ, как известно, определяется двумя параметрами: МО и СКО. Поэтому для вычисления значений данных параметров кроме известного квантиля e''_{p_1} порядка p_1 для каждого генераторного элемента требуется дополнительное второе условие, характеризующееся некоторым другим квантилем e''_{p_2} порядка p_2 . Метод СГИД обеспечивает более точные значения квантилей при больших и малых значениях порядков. Так как порядок p_1 принят равным 0,9987, что соответствует максимально возможному наблюдаемому значению e''_{p_1} нормально распределенной величины по правилу трех сигм и весьма большому значению порядка (предельный порядок единица при нормальном ЗРВ физически недостижим), то в силу симметрии нормального ЗРВ следует принять весьма малый порядок p_2 , близким к нулю и равным 0,0013, который соответствует минимально возможному наблюдаемому значению e''_{p_2} нормально распределенной величины по правилу трех сигм. При данных двух квантилях параметры нормального ЗРВ МО и СКО определяются по простейшим формулам:

$$m(E) = \frac{e''_{p_1} + e''_{p_2}}{2}, \quad \sigma(E) = \frac{e''_{p_1} - e''_{p_2}}{6}.$$

Зависимость между ЭДС и электрическими величинами (токами, остаточными напряжениями) при КЗ и обрывах фаз для каждого момента времени является линейной. Поэтому в среднем пропорциональность между квантилями разных порядков исходных ЭДС должна сохраняться для одноименных (нарастающая зависимость между ЭДС и токами) и соответствующих (убывающая зависимость между ЭДС и остаточными напряжениями) по порядкам квантилей выходных электрических величин при повреждениях, т.е.

$$\frac{e''_{p_1}}{e''_{p_2}} = \frac{i''_{p_1}}{i''_{p_2}}, \quad \frac{e''_{p_1}}{e_{p_2}} = \frac{u''_{1-p_2}}{u''_{1-p_1}}.$$

Благодаря названной пропорциональности можно через квантили порядков p_1 , $1-p_1$ определить квантили порядков соответственно p_2 , $1-p_2$, т.е.

$$i''_{p_2} = \frac{e''_{p_2}}{e''_{p_1}} i''_{p_1}, \quad u''_{1-p_2} = \frac{e''_{p_1}}{e''_{p_2}} u''_{1-p_1}$$

выходных электрических величин при возрастающей и убывающей зависимостях. Причем ЭДС e''_{p_2} рассчитывается приближенно по выражению, аналогичному, по которому определяется ЭДС e''_{p_1} , но при токовой нагрузке $0,3 \cdot i_{ГН}$, равной 30 % от тока рабочего режима или приближенно от номинальной нагрузки. Такая минимальная нагрузка принята, исходя из регулировочных возможностей по минимуму паровых турбин. В целом выражение для определения e''_{p_2} будет иметь вид:

$$e''_{p_2} = \sqrt{(u_{ГН} + 0,3 \cdot i_{ГН} z''_{ГТ} \cos \varphi_{ГН})^2 + (0,3 \cdot i_{ГН} z''_{ГТ} \sin \varphi_{ГН})^2}.$$

ЭДС e''_{p_1} и e''_{p_2} , входящие в состав последних выражений должны быть предварительно усреднены по фактору проходной через узлы генераторных элементов активной мощности. Точнее должны быть рассчитаны e''_{p_1} и e''_{p_2} для всех генераторных узлов и приведены к базисному напряжению $u_б$, равного, например, номинальному напряжению первого генераторного узла $u_{ГН1}$. Затем полученные e''_{p_1} и e''_{p_2} должны быть усреднены по наиболее представительному фактору – номинальной активной мощности всех узлов, т.е.:

$$e''_{p_1} = \sum_{j=1}^{n_j} \sqrt{[u_б + i_{ГТj} \frac{u_б}{u_{ГТj}} z''_{ГТj} (\frac{u_б}{u_{ГТj}})^2 \cos \varphi_{ГТj}]^2 + [i_{ГТj} \frac{u_б}{u_{ГТj}} z''_{ГТj} (\frac{u_б}{u_{ГТj}})^2 \sin \varphi_{ГТj}]^2} \frac{n_{ГТj}}{n_{\Sigma}},$$

$$e''_{p_2} = \sum_{j=1}^{n_j} \sqrt{[u_б + 0,3 \cdot i_{ГТj} \frac{u_б}{u_{ГТj}} z''_{ГТj} (\frac{u_б}{u_{ГТj}})^2 \cos \varphi_{ГТj}]^2 + [0,3 \cdot i_{ГТj} \frac{u_б}{u_{ГТj}} z''_{ГТj} (\frac{u_б}{u_{ГТj}})^2 \sin \varphi_{ГТj}]^2} \frac{n_{ГТj}}{n_{\Sigma}}.$$

Под знаком квадратных корней стоят квадраты приведенных к базисному напряжению $u_б$ ЭДС $e''_{p_{1j}}$ и $e''_{p_{2j}}$ j -го генераторного или нагрузочного узла, $n_{ГТj}$ – активная номинальная мощность этого узла,

$$n_{\Sigma} = \sum_{j=1}^{n_j} n_{ГТj} \text{ суммарная активная мощность всех генераторных элементов}$$

(генераторных и нагрузочных узлов), n_j – число этих элементов.

Вышеуказанное приведение и усреднение (эквивалентирование) сверхпереходных ЭДС генераторных узлов было произведено для одной энергосистемы. Далее было найдено отношение этих

эквивалентированных ЭДС $\frac{e''_{p_1}}{e''_{p_2}}$, а через него квантили эквивалентных

тока и остаточного напряжения энергосистемы:

$$i_{p_2}'' = \frac{e_{p_2}''}{e_{p_1}''} i_{p_1}, \quad u_{1-p_2}'' = \frac{e_{p_1}''}{e_{p_2}''} u_{1-p_1}, \quad \text{которое также справедливо для}$$

каждой электрической величины каждой ветви и каждого узла сети.

Отличительной особенностью квантилей порядков $p_2 = 0,0013$ и $p_1 = 0,9987$, определяющих минимаксные значения, является то, что их просто вычислить как при аналитической, так и при любой другой как жесткой, так и нежесткой зависимости интересующих выходных электрических величин от аргументов. Причем аргументы могут быть в виде: количественных значений непрерывных или дискретных величин (режимные параметры), качественных определений типа состояний сети, видов повреждений и повреждений в заданной точке. Чтобы данной возможностью воспользоваться, необходимо в интерактивном режиме на ПЭВМ рассчитать минимальное и максимальное значения электрических величин с учетом всех факторов, затем выбрать самое максимальное и самое минимальное среди них из протокола ПЭВМ и принять в качестве квантилей $i_{p_1}, i_{p_2}, u_{1-p_1}, u_{1-p_2}$. При этом следует учесть получение квантилей электрических величин порядков p_2 и $1-p_2$ через базу данных порядка p_1 . Это означает, что квантили порядков p_2 и $1-p_2$ определяются в два этапа. На первом этапе по базе данных порядка p_1 , но при коммутациях и видах КЗ, обеспечивающих минимальные значения, определяются промежуточные значения НФ (результаты) $i_{p_2и}^{пкс}, u_{1-p_2и}^{пкс}$. На втором этапе уточняются минимальные промежуточные значения в предположении их линейной зависимости от ЭДС e_{p_1}'', e_{p_2}'' . В результате можно получить:

$$i_{p_1}'' = i_{p_1а}^{пкс}, \quad u_{1-p_1}'' = u_{1-p_1а}^{пкс}, \quad i_{p_2}'' = \frac{e_{p_2}''}{e_{p_1}''} i_{p_2и}^{пкс}, \quad u_{1-p_2}'' = \frac{e_{p_1}''}{e_{p_2}''} u_{1-p_2и}^{пкс},$$

где нижний индекс “а” означает максимально-возможное значение квантиля тока порядка p_1 в протоколах ВРК ТКЗ-3000 при s -м виде КЗ или обрыва, при k -м состоянии сети, p -м месте повреждения – факторах обеспечивающих максимум тока через силовой элемент, при этом:

s -й вид КЗ или обрыва – это один из видов одиночного КЗ или обрыва, в том числе сложного вида повреждения, при котором обеспечивается максимум тока через силовой элемент,

k -е состояние сети, при котором параллельные или шунтирующие проверяемый силовой элемент отключены,

p -е место повреждения, обеспечивающее максимум тока через силовой элемент;

нижний индекс “и” означает минимально-возможное значение квантиля тока порядка p_2 в протоколах ВРК ТКЗ-3000 при s-м виде КЗ или обрыва, при k -м состоянии сети, p -м месте повреждения – факторах обеспечивающим минимум тока через силовой элемент, при этом:

s -й вид КЗ или обрыва – это один из видов одиночного КЗ или обрыва, в том числе сложного вида повреждения, при котором обеспечивается минимум тока через силовой элемент,

k -е состояние сети, при котором параллельные или шунтирующие силовой элемент цепи не отключены,

p -е место повреждения, обеспечивающее минимум тока через силовой элемент за счет фактора места повреждения на объекте;

отношение $\frac{e''_{p_1}}{e''_{p_2}}$ для исследуемой энергосистемы согласно проведенным

расчетам и последующему усреднению можно принять равным 1,14 .

С помощью представленных соотношений можно весьма просто и быстро определить параметры нормальных ЗРВ токов в ветвях и остаточных напряжений в узлах для каждого набора учитываемых факторов, используя расчет электрических величин повреждений защищаемого объекта в планируемых местах сети.

4.3. Применение ВРК для расчетов параметров нормальных ЗРВ электрических величин эксплуатационных режимов

Рассмотренный алгоритм подготовки по определению параметров нормальных ЗРВ при повреждениях с использованием единственного псевдостационарного режима можно распространить также для расчетов параметров нормального ЗРВ для эксплуатационных условий. Это может быть использовано благодаря линейной зависимости между рабочими токами режимов и ЭДС в поперечной оси источников во всем диапазоне электрических величин в установившихся режимах. Вследствие этого аналогично сверхпереходным ЭДС можно также рассчитать ЭДС в поперечной оси источников для любых рабочих режимов, в том числе, при минимально-допустимой специализированной нагрузке, принятой равной 0,3 от номинальной. Соотношения между ЭДС в поперечной оси e_{p_1} / e_{p_2} как квантилей порядка p_1 и p_2 будут равны соотношению рабочих токов i_{p_1} / i_{p_2} как квантилей этих же порядков и обратному соотношению напряжений в узлах, но как квантилей порядков $1 - p_1$ и $1 - p_2$.

В качестве квантилей рабочих токов порядка p_1 (или максимально-наблюдаемых токов) рассматриваются токи, протекающие в ветвях сети под действием ЭДС в поперечных осях, обеспечивающих в источниках

номинальные токи, которые должны также учитываться как квантили порядка p_1 . Соответственно минимально-наблюдаемые токи источников, равные 0,3 от номинальных, рассматриваются как квантили порядка p_2 . Далее определяются и усредняются ЭДС источников в поперечных осях аналогично сверхпереходным ЭДС по формулам предыдущего подраздела, в которых сверхпереходные сопротивления z''_{ij} заменяются на синхронные сопротивления z_{ij} . Затем находится отношение усредненных ЭДС e_{p_1} / e_{p_2} , а через него токи в ветвях и напряжения в узлах как квантили соответственно порядков p_2 и $1 - p_2$,

$$\text{т.е. } i_{p_2} = \frac{e_{p_2}}{e_{p_1}} i_{p_1}, \quad u_{1-p_2} = \frac{e_{p_1}}{e_{p_2}} u_{1-p_1}.$$

Так как расчеты результатов квантилей порядка p_2 и $1 - p_2$ практически целесообразно осуществлять по базе данных как квантилей порядка p_1 , то промежуточные результаты $i_{p_2}^k$, $u_{1-p_2}^k$ как квантили порядков p_2 и $1 - p_2$ вычисляются при коммутационных состояниях, обеспечивающих минимальные значения данных результатов. Следовательно, можно получить:

$$i_{p_1} = i_{p_1a}^k, \quad u_{1-p_1} = u_{1-p_1a}^k, \quad i_{p_2} = \frac{e_{p_2}}{e_{p_1}} i_{p_2a}^k, \quad u_{1-p_2} = \frac{e_{p_1}}{e_{p_2}} u_{1-p_2a}^k,$$

где отношение $\frac{e_{p_1}}{e_{p_2}}$ для одной из энергосистем, как показали расчеты, можно принять равным 1,9.

4.4. Обоснование выбранных коммутационных аппаратов

В соответствии с разделом 2 вероятностное обоснование коммутационных аппаратов должно производиться в эксплуатационных и аварийных условиях. Следовательно, должны быть определены параметры нормальных ЗРВ рабочих и аварийных токов через коммутационный аппарат методом СГИД:

- путем расчета по модулю ВРК установившегося режима квантилей рабочих токов при задании исходных данных (активных и реактивных мощностей нагрузочных узлов, активных мощностей и напряжений генераторных узлов) в виде квантилей высоких порядков, например, $p_1 = 0,9987$ и $p_2 = 0,99$ или согласно рекомендаций подраздела 4.1 в виде квантилей порядков $p_1 = 0,9987$ и $p_2 = 0,0013$, причем расчет установившегося режима при квантилях порядка $p_2 = 0,0013$

осуществляется путем использования линейной зависимости с выходными квантилями порядка $p_1 = 0,9987$.

- по промежуточным исходным данным (которые получены в предыдущем подразделе как расчетные выходные данные установившихся режимов и которым приписаны порядки p_1 и p_2 квантилей исходных данных – ВРК Дакар, либо приближенным определением через номинальные электрические величины – ВРК ТКЗ-3000) путем дальнейших расчетов по другим модулям ВРК определяются квантили аварийных токов и других электрических величин:

- действующего периодического тока в момент расхождения контактов выключателя ($i_{птр1}, i_{птр2}$),

- аperiodического тока в тот же момент времени ($i_{атр1}, i_{атр2}$),

- полного тока аналогично в тот же момент:

$$i_{тр1} = \sqrt{2}i_{птр1} + i_{атр1}, \quad i_{тр2} = \sqrt{2}i_{птр2} + i_{атр2},$$

- действующего периодического тока в начальный момент КЗ: $i_{пор1}, i_{пор2}$,

- ударного тока: $i_{ур1}, i_{ур2}$,

- теплового импульса тока КЗ

$$b_{кр1} = i_{пор1}^2 (t_{тер} + \tau), \quad b_{кр2} = i_{пор2}^2 (t_{тер} + \tau),$$

где $t_{тер}$ – время протекания тока термической стойкости,

$\tau = (t_{рз} + t_{отк})$ – время протекания тока КЗ через коммутационный аппарат,

$t_{рз}$ – минимальное время работы релейной защиты,

$t_{отк}$ – собственное время отключения.

Аналогично по промежуточным данным (выходных данных установившихся режимов) должны быть сформированы квантили рабочих токов $i_{рр1}, i_{рр2}$.

Далее по формулам (6-9) или (3-4) определяются МО и СКО (рис.1) нормальных ЗРВ интересующих электрических величин в рабочих – ПРВ c_3 (п) – и аварийных ПРВ c_a (п) – условиях.

Исходя из принятых рисков перегрузки r_3 и разрушения r_a , можно определить соответственно квантили перегрузки и разрушения по каждому из перечисленных параметров с помощью формул, например,

- для рабочего тока $i_{p1-r_3} = m(I_p) + \sigma(I_p)\Phi^{-1}(1 - r_3 - 0,5)$,

- для действующего периодического тока в начальный момент КЗ

$$i_{\text{пол}-r_a} = m(I_{\text{по}}) + \sigma(I_{\text{по}}) \Phi^{-1}(1 - r_a - 0,5),$$

где $m(I_p)$, $m(I_{\text{по}})$, $\sigma(I_p)$, $\sigma(I_{\text{по}})$ – МО и СКО соответственно рабочего I_p и аварийного периодического тока в начальный момент $I_{\text{по}}$.

Далее определяются параметры нормального ЗРВ испытательных и КД значений как случайных величин. Так как все проверяемые параметры коммутационных аппаратов являются базовыми (токи и тепловой импульс, который определяется также током и постоянными $t_{\text{тер}}$ и τ), то неучтенное рассеяние при испытаниях по отклонению ДД и КД значений следует учесть только за счет случайных изменений параметров среды, т.е. МО данных значений следует принять равными представленным в каталогах значениям, а СКО – 1÷3% от МО. Таким образом, для ДД тока: $m(I_{\text{дд}}) = i_{\text{дд}}^{\text{к}}$, $\sigma(I_{\text{дд}}) = 0,02m(I_{\text{дд}})$,

для КД тока отключения: $m(I_{\text{кд}}) = i_{\text{кд}}^{\text{к}}$, $\sigma(I_{\text{кд}}) = 0,02m(I_{\text{кд}})$, для КД ударного тока: $m(I_{\text{кду}}) = i_{\text{дин}}^{\text{к}}$, $\sigma(I_{\text{кду}}) = 0,02m(I_{\text{кду}})$, для КД теплового импульса: $m(B_{\text{кд}}) = i_{\text{тер}}^{\text{к}2} t_{\text{тер}}$, $\sigma(B_{\text{кд}}) = 0,02m(B_{\text{кд}})$,

где верхний индекс “к” указывает на каталожно-справочное значение величины.

По полученным нормальным ЗРВ определяются риски перегрузки и разрушения выключателя вследствие снижения ДД и КД значений как случайных величин, т.е.

$$r_{\text{дд}} = 0,5 + \Phi \left[\frac{i_{\text{п}1-r_a} - m(I_{\text{дд}})}{\sigma(I_{\text{дд}})} \right], \quad r_{\text{кд}} = 0,5 + \Phi \left[\frac{i_{\text{пол}-r_a} - m(I_{\text{кд}})}{\sigma(I_{\text{кд}})} \right],$$

$$r_{\text{кду}} = 0,5 + \Phi \left[\frac{i_{\text{у}1-r_a} - m(I_{\text{кду}})}{\sigma(I_{\text{кду}})} \right], \quad r_{\text{кдтерм}} = 0,5 + \Phi \left[\frac{b_{\text{к}1-r_a} - m(B_{\text{кд}})}{\sigma(B_{\text{кд}})} \right].$$

4.5. Обоснование выбранных токоведущих частей

В связи с некоторым различием условий выбора и проверки различных видов токоведущих частей рассмотрены разные примеры.

4.5.1. Жесткие токопроводы

Жесткие токопроводы соединений аналогично коммутационным аппаратам проверяются в эксплуатационных и аварийных условиях. Причем проверка в эксплуатационных условиях по ДД току и в аварийных условиях по КД ударному току К.З. производится точно так же как и для коммутационных аппаратов. Проверка жестких токопроводов на термическую стойкость не производится.

4.5.2. Гибкие токопроводы

Обоснование гибких токопроводов в части динамической стойкости производится не по ударному току как для жестких токопроводов, а путем сравнения расчетных углового A_a и горизонтального B_a отклонений с одноименными КД отклонениями $A_{кд}$, $B_{кд}$. Квантили порядков p_1 и p_2 горизонтальных b_{p_1} , b_{p_2} и угловых α_{p_1} , α_{p_2} для определения параметров нормальных ЗРВ рассчитываются в последовательности:

- квантили порядков p_1 и p_2 действующих значений аварийных токов в начальный момент “о” двухфазного КЗ $i_{пор1}^{(2)}$, $i_{пор2}^{(2)}$ в условиях исходных данных: активных и реактивных мощностей нагрузочных узлов, активных мощностей и напряжений генераторных узлов, заданного места КЗ “п”;

- квантили порядков p_1 и p_2 усилий между фазами, приходящихся на один метр токопровода при протекании токов $i_{пор1}^{(2)}$, $i_{пор2}^{(2)}$:

$$f_{p_1} = 2 \cdot 10^{-7} i_{пор1}^{(2)2} / a_m, \quad f_{p_2} = 2 \cdot 10^{-7} i_{пор2}^{(2)2} / a_m \quad [\text{Н/м}],$$

где a_m – расстояние между системами проводов фаз в м;

- значение силы тяжести, приходящейся на один метр токопровода $g = 1,1 \cdot 9,8m$ [Н/м], и квантили порядков p_1 и p_2 отношений: f_{p1}/g , f_{p2}/g , где m – масса одного метра токопровода в кг;

- $h = \frac{\gamma l_{пр}^2}{8\sigma}$ [м] – значение стрелы провеса проводов фаз в пролете $l_{пр}$ [м]

между опорами вдоль гибкого токопровода,

где γ [Н/м · мм²] – удельная нагрузка на провода фазы, определяемая собственным весом, ветровой нагрузкой, гололедом, среднегодовой температурой, для сибирских условий может быть принята равной 0,04 Н/м · мм² [8],

σ_a [Н/мм²] – допустимое механическое напряжение в материале проводов при среднегодовой температуре, для сталеалюминевых проводов в сибирских условиях может быть принято равным 87 Н/м · мм² [8];

- значение времени протекания тока КЗ [6] $t_{кз} = t_3 + 0,05$ [с],

где t_3 – время действия быстродействующей релейной защиты;

- значение отношения $\sqrt{h}/t_{кз}$;

- по диаграмме рис. 4.9 [2] в зависимости от отношений: f_{p1}/g , f_{p2}/g , $\sqrt{h}/t_{кз}$ находятся квантили порядков p_1 и p_2 горизонтального b_{p_1} , b_{p_2} и углового α_{p_1} , α_{p_2} отклонений проверяемого токопровода.

Далее определяются параметры нормальных ЗРВ горизонтального и углового отклонений в аварийных условиях по формулам (6,7), т.к. данные неслучайные функции от исходных данных являются нарастающими зависимостями, т.е.:

$$\text{для горизонтального отклонения } B_a: \sigma(B_a) = \frac{b_{p_1} - b_{p_2}}{\Phi^{-1}(p_1 - 0,5) - \Phi^{-1}(p_2 - 0,5)},$$

$$m(B_a) = b_{p_1} - \sigma(B_a)b_{p_2}\Phi^{-1}(p_2 - 0,5),$$

$$\text{для углового отклонения } A_a: \sigma(A_a) = \frac{\alpha_{p_1} - \alpha_{p_2}}{\Phi^{-1}(p_1 - 0,5) - \Phi^{-1}(p_2 - 0,5)},$$

$$m(A_a) = \alpha_{p_1} - \sigma(A_a)\alpha_{p_2}\Phi^{-1}(p_2 - 0,5).$$

Детерминированные значения КД горизонтального и углового отклонений определяются формулами [2]:

$$b_{кд} = \frac{a_m - d_c - a_{мдоп}}{2}, \quad \alpha_{кд} = \arctg \frac{b_{кд}}{h}$$

где d_c – диаметр системы проводов в фазе, определяемый по формулам:

$$d_c = 2r_o - \text{при одиночном проводе в фазе,}$$

$$r_o - \text{радиус провода,}$$

$$d_c = \sqrt{r_o a} - \text{при двух проводах в фазе,}$$

$$a - \text{расстояние между проводами в фазе,}$$

$$d_c = \sqrt[3]{r_o a^2} - \text{при трех проводах в фазе,}$$

$$d_c = \sqrt[4]{\sqrt{2} r_o a^3} - \text{при четырех проводах в фазе,}$$

$a_{мдоп}$ – наименьшее допустимое расстояние между соседними фазами в момент их наибольшего сближения, определяется согласно ПУЭ [7], также по [2].

Определяются параметры нормальных ЗРВ КД значений названных величин, рассеиваемых только за счет среды:

$$\text{для горизонтального отклонения } B_{кд}: m(B_{кд})=b_{кд}, \quad \sigma(B_{кд})=0,02m(B_{кд})$$

$$\text{для углового отклонения } A_{кд}: m(A_{кд})=b_{кд}, \quad \sigma(A_{кд})=0,02m(A_{кд}).$$

В случае расщепленных фаз проверка гибких токопроводов на динамическую стойкость от межфазных воздействий производится также, как изложено ранее. Дополнительно необходимо, исходя из условия схлестывания проводов в фазе определить квантили порядков

p_1 и p_2 между распорками, а по ним уже найти параметры нормального ЗРВ указанных расстояний и при принятом расстоянии между распорками вычислить по известному ЗРВ риск схлестывания проводов в фазе. Данные действия следует производить в последовательности:

- определяются квантили порядков p_1 и p_2 межпроводных усилий в фазе при трехфазном КЗ

$$f_{цр1} = \frac{n-1}{n^2} \cdot 2 \cdot 10^{-7} \frac{i_{пор1}^{(3)2}}{d_c}, \quad f_{цр2} = \frac{n-1}{n^2} \cdot 2 \cdot 10^{-7} \frac{i_{пор2}^{(3)2}}{d_c},$$

где n – число проводов в фазе;

- находятся квантили порядков p_1 и p_2 предельных расстояний между распорками:

$$l_{цр1} = k\sigma_a \cdot 10^3 \sqrt{\frac{(k-1)\sigma_a \cdot 24 \cdot \beta}{(\gamma_{ap1} + k\gamma)(\gamma_{ap1} - k\gamma)}}, \quad l_{цр2} = k\sigma_a \cdot 10^3 \sqrt{\frac{(k-1)\sigma_a \cdot 24 \cdot \beta}{(\gamma_{ap2} + k\gamma)(\gamma_{ap2} - k\gamma)}}$$

где $k=1,8$ – коэффициент допустимого увеличения механического напряжения в проводах фазы при КЗ,

$\beta = 159 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/\text{Н}$ – коэффициент упругого удлинения алюминиевого провода,

$$\gamma_{ap1} = f_{цр1} / q_{п}, \quad \gamma_{ap2} = f_{цр2} / q_{п}, \quad q_{п} \text{ – сечение провода,}$$

$$\sigma_a = 87 \text{ Н/мм}^2 = 87 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2 = 87 \text{ МПа},$$

$$\gamma = 0,04 \text{ Н/м} \cdot \text{мм}^2 = 0,04 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^3 = 0,04 \text{ МПа/м};$$

- определяются параметры МО $m(L_{ц})$, СКО $\sigma(L_{ц})$ нормального ЗРВ расстояния $L_{ц}$ между распорками по (6,7) как убывающей зависимости от тока КЗ;

- определяются расстояния между распорками, исходя из заданного риска r_c схлестывания проводов в фазе при КЗ

$$l_{цr_c} = m(L_{ц}) + \sigma(L_{ц})\Phi^{-1}(r_c - 0,5),$$

где r_c – заданный риск схлестывания проводов, можно принять 0,001.

4.5.3. Жесткие сборные шины

Согласно подразделу 1.2. жесткие сборные шины выбираются по ДД току и проверяются в аварийных условиях по КД величинам.

4.5.3.1. Выбор сечения сборных шин по ДД току с применением вероятностных технологий осуществляется, исходя из риска термической перегрузки вследствие сниженного значения ДД тока как случайной величины. То есть необходимо сначала определить

параметры нормального ЗРВ ДД тока $I_{\text{дд}}$ МО $m(I_{\text{дд}})$ и СКО $\sigma(I_{\text{дд}})$ для заданной каталожной величины $i_{\text{дд}}^{\text{к}}$.

Однако в отличие от других уже рассмотренных примеров в данном случае каталожная величина $i_{\text{дд}}^{\text{к}}$ задана не в виде постоянной величины, а в оговоренных условиях по температуре, а именно, при температуре воздуха $\theta_{0\text{ном}} = 25^\circ\text{C}$. Кроме того задана также формула [2] зависимости допустимого тока $i_{\text{дд}}$ от температуры θ_0 ,

отличающейся от $\theta_{0\text{ном}} = 25^\circ\text{C}$, т.е. $i_{\text{дд}} = i_{\text{дд}}^{\text{к}} \sqrt{\frac{\theta_{\text{доп}} - \theta_0}{\theta_{\text{доп}} - \theta_{0\text{ном}}}}$,

где θ_0 – действительная температура воздуха в условиях эксплуатации, $\theta_{\text{доп}}$ – допустимая температура нагрева продолжительного режима, для шин на основе алюминия $\theta_{\text{доп}} = 70^\circ\text{C}$.

Таким образом, имеется возможность рассчитать максимально-возможное $i_{\text{дда}}^\theta$ и минимально-возможное $i_{\text{дди}}^\theta$ длительно допустимого тока $I_{\text{дд}}$ как случайной величины по фактору температуры. Судя по приведенной формуле минимально-возможное значение $i_{\text{дди}}^\theta$, равное нулю, будет при температуре $\theta_0 = \theta_{\text{доп}}$, а максимально-возможное $i_{\text{дда}}^\theta$ при минимальной наблюдаемой температуре $\theta_0 = \theta_{\text{и}}$, которая для сибирских условий может быть принята равной $\theta_{\text{и}} = -40^\circ\text{C}$. В результате можно получить:

$$i_{\text{дди}}^\theta = i_{\text{дд}}^{\text{к}} \sqrt{\frac{\theta_{\text{доп}} - \theta_{\text{доп}}}{\theta_{\text{доп}} - \theta_{0\text{ном}}}} = 0^\circ\text{C}, \quad i_{\text{дда}}^\theta = i_{\text{дд}}^{\text{к}} \sqrt{\frac{\theta_{\text{доп}} - (-40)}{\theta_{\text{доп}} - \theta_{0\text{ном}}}}.$$

Рассматривая действие других факторов среды (влажность, давление) на величину ДД тока незначительным по сравнению с температурой, можно принять максимально-возможное $i_{\text{дда}}^\theta$ и минимально-возможное $i_{\text{дди}}^\theta$ значения как квантили нормального ЗРВ соответственно порядков $p_1 = 0,9987$ и $p_2 = 0,0013$; т.е. $i_{\text{дда}}^\theta = i_{p_1}$ $i_{\text{дди}}^\theta = i_{p_2}$. Тогда параметры нормального ЗРВ МО и СКО будут иметь вид: $m(I_{\text{дд}}) = (i_{p_1} + i_{p_2})/2$, $\sigma(I_{\text{дд}}) = (i_{p_1} - i_{p_2})/6$.

Далее, задавшись риском $r_{\text{дд}}$ перегрузок вследствие сниженных значений ДД тока как случайной величин $I_{\text{дд}}$, можно найти расчетное значение ДД тока $i_{\text{дд}1-r_{\text{дд}}}$ как квантиля порядка $1-r_{\text{дд}}$, т.е.

$$i_{\text{дд}1-r_{\text{дд}}} = m(I_{\text{дд}}) + \sigma(I_{\text{дд}})\Phi^{-1}(1-r_{\text{дд}} - 0,5) = m(I_{\text{дд}}) + \sigma(I_{\text{дд}})\Phi^{-1}(0,5 - r_{\text{дд}}),$$
 превышение которого возможно только с незначительной вероятностью $r_{\text{дд}}$. По величине $i_{\text{дд}1-r_{\text{дд}}}$ выбирается сечение q шин.

4.5.3.2. Проверка сборных шин на термическую стойкость осуществляется в последовательности:

- определяются периодические составляющие тока КЗ в начальный момент времени как квантили порядков p_1 и p_2 , т.е. $i_{\text{пор}1}$ и $i_{\text{пор}2}$

- находятся значения теплового импульса как квантили порядков p_1 и p_2 :

$$b_{\text{кр}1} = i_{\text{по}p_1}^2 (t_{\text{отк}} + t_a) \quad b_{\text{кр}2} = i_{\text{по}p_2}^2 (t_{\text{отк}} + t_a),$$

где $t_{\text{отк}}$ – время отключения выключателя, с,

t_a – постоянная времени затухания аperiodического тока КЗ, с,

- подсчитываются минимальное сечение шин как квантили порядков p_1

и p_2 : $q_{\text{ир}1} = \sqrt{b_{\text{кр}1}} / C$, $q_{\text{ир}2} = \sqrt{b_{\text{кр}2}} / C$,

где C – функция, зависящая от вида материала шин;

- т.к. зависимость сечения Q от теплового импульса B_k и соответственно тока $I_{\text{по}}$ является нарастающей, то параметры нормального ЗРВ сечения Q определяются по выражениям:

$$\sigma(Q) = \frac{q_{\text{ир}1} - q_{\text{ир}2}}{\Phi^{-1}(p_1 - 0,5) - \Phi^{-1}(p_2 - 0,5)}, \quad m(Q) = q_{\text{ир}1} - \sigma(Q)\Phi^{-1}(p_1 - 0,5);$$

- искомое сечение сборных шин находится, исходя из заданного риска r_a разрушения при КЗ, т.е. как квантиля порядка $1-r_a$

$$q_{1-r_a} = m(Q) + \sigma(Q)\Phi^{-1}(0,5 - r_a).$$

4.5.3.3. Далее производится проверка сборных шин на динамическую стойкость. Ниже рассматриваются примеры для одно и двухполосных шин прямоугольного, а также коробчатого сечения.

4.5.3.3.1. Однополосные прямоугольные шины горизонтального или вертикального расположения. При названном расположении фаз шин моменты сопротивления динамическим усилиям или КЗ формируются относительно сторон прямоугольного сечения шин.

Сначала определяются квантили порядков p_1 и p_2 :

- наибольшего электромагнитного усилия при трехфазном КЗ в Н/м:

$$f_{p_1} = \sqrt{3} \cdot 10^{-7} i_{yp1}^2 / a_m, \quad f_{p_2} = \sqrt{3} \cdot 10^{-7} i_{yp2}^2 / a_m,$$

где a_m – расстояние между фазами в м,

$i_{yp1} = \sqrt{2} k_y i_{пор1}$, $i_{yp2} = \sqrt{2} k_y i_{пор2}$ – квантили ударных токов порядков p_1 и p_2 ,

$i_{пор1}$, $i_{пор2}$ – квантили порядков p_1 и p_2 периодической составляющей токов КЗ в начальный момент электромагнитного переходного процесса,

k_y – ударный коэффициент тока КЗ;

- соответствующего этому усилию изгибающего момента в Нм:

$$m_{p_1} = f_{p_1} l^2 / 10, \quad m_{p_2} = f_{p_2} l^2 / 10,$$

где l – длина пролета в м между опорными изоляторами шинной конструкции, причем коэффициент 10 учитывает расчетную длину плеч приложения суммарного усилия в пролете относительно опорных изоляторов;

- напряжение в материале шин в МПа: $\sigma_{p_1} = m_{p_1} / w$, $\sigma_{p_2} = m_{p_2} / w$, причем w -момент сопротивления шины в см³ относительно оси, перпендикулярной действующему усилию.

Далее по формулам (6,7) определяются параметры: СКО и МО нормального ЗРВ напряжения в материале шин:

$$\sigma(\Sigma) = \frac{\sigma_{p_1} - \sigma_{p_2}}{\Phi^{-1}(p_1 - 0,5) - \Phi^{-1}(p_2 - 0,5)}, \quad m(\Sigma) = \sigma_{p_1} - \sigma(\Sigma) \Phi^{-1}(p_1 - 0,5)$$

и максимально-возможное напряжение в материале шин, исходя из заданного риска r_a разрушения при КЗ, т.е. квантиля порядка $1-r_a$

$$\sigma_{1-r_a} = m(\Sigma) + \sigma(\Sigma) \Phi^{-1}(0,5 - p_1).$$

Наконец, находятся параметры МО и СКО нормального ЗРВ КД напряжения в материале шин, т.е. $m(\Sigma_{кд}) = \sigma_{кд}^k$, $\sigma(\Sigma_{кд}) = 0,02m(\Sigma_{кд})$, где $\sigma_{кд}^k$ - каталожное (справочное) значение КД напряжения.

Риск $r_{кд}$ разрушения шин при к.з. вследствие снижения значений КД напряжения $\Sigma_{кд}$ как случайной величины, определяется выражением:

$$r_{\text{кд}} = 0,5 + \Phi \left[\frac{\sigma_{1-r_a} - m(\Sigma_{\text{кд}})}{\sigma(\Sigma_{\text{кд}})} \right].$$

4.5.3.3.2. Двухполосные шины. Аналогично рассмотренному случаю однополосных шин ниже приводится проверка динамической стойкости для горизонтального и вертикального расположения двухполосных шин. Особенностью динамических переходов в данном случае является возникновение дополнительного межполосного воздействия, которое, с одной стороны обуславливает собственные действия (соприкосновение полос, механический резонанс), а с другой стороны, увеличивает механическое напряжение в материале шин. При этом распределения вероятностей усилий и соответствующих электрических и механических величин как собственно межполосных, так и результирующих (совместно междуфазных и межполосных) воздействий принимаются по нормальному ЗРВ. В соответствии со сказанным проводится проверка соприкосновения полос при КЗ. Для этой цели находятся:

- квантили порядков p_1 и p_2 ударного тока при трехфазном КЗ

$$i_{yp1}^{(3)} = \sqrt{2}k_y i_{\text{пор}1}^{(3)}, \quad i_{yp2}^{(3)} = \sqrt{2}k_y i_{\text{пор}2}^{(3)},$$

где квантили $i_{\text{пор}1}^{(3)}$, $i_{\text{пор}2}^{(3)}$ порядков p_1 и p_2 периодической составляющей токов КЗ в начальный момент, k_y – ударный коэффициент;

- квантили порядков p_1 и p_2 значений пролетов $l_{\text{пп}1}$, $l_{\text{пп}2}$ между прокладками как случайной величины:

$$l_{\text{пп}1} = 0,216 \sqrt{\frac{a_{\text{п}}}{i_{yp1}^{(3)}}} \sqrt[4]{\frac{EJ_{\text{п}}}{k_{\Phi}}}, \quad l_{\text{пп}2} = 0,216 \sqrt{\frac{a_{\text{п}}}{i_{yp2}^{(3)}}} \sqrt[4]{\frac{EJ_{\text{п}}}{k_{\Phi}}}$$

где $a_{\text{п}}$ – расстояние между осями полос, см,

E – модуль упругости материала шин, Па,

$J_{\text{п}}$ – момент инерции полосы, см⁴,

k_{Φ} – коэффициент формы [2];

- определяются по формулам (6,7) параметры нормального ЗРВ расстояния $L_{\text{п}}$ между прокладками, т.е. $\sigma(L_{\text{п}})$, $m(L_{\text{п}})$;

- исходя из заданного риска r_a соприкосновения полос от междуполосного усилия находится значение расстояния между прокладками: $l_{\pi 1-r_a} = m(L_{\pi}) + \sigma(L_{\pi})\Phi^{-1}(1 - r_a - 0,5)$.

Далее производится проверка соприкосновения полос при механическом резонансе. В связи с тем, что резонансные условия также как и параметры среды невозможно точно проконтролировать, распределение вероятностей случайной величины соприкосновения полос $L_{\text{пр}}$ задается в виде нормального ЗРВ, в котором расчетное резонансное значение расстояния между прокладками $l_{\pi}^{\text{рк}}$, найденное по принятым каталожным величинам, принимается как МО $L_{\pi}^{\text{р}}$ нормального ЗРВ, а СКО задается как некоторый процент от этого МО, т.е.

$$m(L_{\pi}^{\text{р}}) = l_{\pi}^{\text{рк}}, \quad \sigma(L_{\pi}^{\text{р}}) = 0,02m(L_{\pi}^{\text{р}}), \quad \text{причем по [2]} \quad l_{\pi}^{\text{рк}} = 0,133 \cdot 10^{-2} \sqrt[4]{\frac{EJ_{\pi}}{m_{\pi}}},$$

где m_{π} – масса полосы на единицу длины, в кг;

- исходя из заданного риска $r_{\text{и}}^{\text{р}}$ по минимуму резонансного соприкосновения полос от междуполосного усилия находится минимально-гарантированное значение расстояния между прокладками: $l_{\text{пр}r_{\text{и}}^{\text{р}}}^{\text{р}} = l_{\text{пр}p_2}^{\text{р}} = m(L_{\pi}^{\text{р}}) + \sigma(L_{\pi}^{\text{р}})\Phi^{-1}(r_{\text{и}}^{\text{р}} - 0,5)$,

где порядок $p_2 = r_{\text{и}}^{\text{р}}$ квантиля $l_{\text{пр}r_{\text{и}}^{\text{р}}}^{\text{р}} = l_{\text{пр}p_2}^{\text{р}}$ может быть принят равным 0,0013;

- из двух значений $l_{\pi 1-r_a}$ и $l_{\text{пр}r_{\text{и}}^{\text{р}}}^{\text{р}}$ принимается меньше значение расстояния между прокладками, т.е. $l_{\pi} = \min(l_{\pi 1-r_a}, l_{\text{пр}r_{\text{и}}^{\text{р}}}^{\text{р}})$.

Анализ показывает, что при описанном выборе расстояния между прокладками риск соприкосновения полос вследствие увеличения расстояния между прокладками не превышает заданной величины либо r_a , если минимальным оказалось значение $l_{\pi 1-r_a}$, либо $r_{\text{и}}^{\text{р}}$, если минимальным оказалось значение $l_{\text{пр}r_{\text{и}}^{\text{р}}}^{\text{р}}$.

После проверки на схлестывание полос:

- определяются квантили порядков p_1 и p_2 усилий между полосами в пакете из двух полос:

$$f_{\text{пп}1} = \frac{k_{\Phi}}{4} \frac{i_{\text{yp}1}^2}{b} \cdot 10^{-7}, \quad f_{\text{пп}2} = \frac{k_{\Phi}}{4} \frac{i_{\text{yp}2}^2}{b} \cdot 10^{-7},$$

где b – толщина полос в см,

- находятся квантили порядков p_1 и p_2 напряжения в материале шин
-- от взаимодействия полос:

$$\sigma_{\text{пп}1} = \frac{f_{\text{пп}1} \cdot l_{\text{п}}^2}{12 \cdot w_{\text{п}}}, \quad \sigma_{\text{пп}2} = \frac{f_{\text{пп}2} \cdot l_{\text{п}}^2}{12 \cdot w_{\text{п}}},$$

где $w_{\text{п}}$ – момент сопротивления одной полосы в см^3 ,

вычисляются квантили порядков p_1 и p_2 напряжений в материале шин
-- от взаимодействия фаз:

$$\sigma_{\Phi p_1} = \sqrt{3} \cdot 10^{-8} \frac{l^2}{a_{\text{м}} w_{\Phi}} i_{\text{yp}1}^2, \quad \sigma_{\Phi p_2} = \sqrt{3} \cdot 10^{-8} \frac{l^2}{a_{\text{м}} w_{\Phi}} i_{\text{yp}2}^2,$$

где w_{Φ} – момент сопротивления сечения двухполосного пакета шин в см^3 ,

$i_{\text{yp}1}$, $i_{\text{yp}2}$ – квантили порядков p_1 и p_2 ударного тока при трехфазном КЗ,

- квантили порядков p_1 и p_2 суммарного механического напряжения в материале двухполосных шин: $\sigma_{\Sigma p_1} = \sigma_{\Phi p_1} + \sigma_{\text{пп}1}$, $\sigma_{\Sigma p_2} = \sigma_{\Phi p_2} + \sigma_{\text{пп}2}$,
СКО и МО нормального ЗРВ механического напряжения в материале:

$$\sigma(\Sigma_{\Sigma}) = \frac{\sigma_{\Sigma p_1} - \sigma_{\Sigma p_2}}{\Phi^{-1}(p_1 - 0,5) - \Phi^{-1}(p_2 - 0,5)}, \quad m(\Sigma_{\Sigma}) = \sigma_{\Sigma p_1} - \sigma(\Sigma_{\Sigma}) \cdot \Phi^{-1}(p_1 - 0,5).$$

Значение суммарного напряжения, исходя из заданного риска r_a разрушения шинной конструкции $\sigma_{\Sigma 1-r_a} = m(\Sigma_{\Sigma}) + \sigma(\Sigma_{\Sigma}) \cdot \Phi^{-1}(0,5 - r_a)$.

МО и СКО нормального ЗРВ КД механического напряжения в материале шин $m(\Sigma_{\text{кд}}) = \sigma_{\text{кд}}^{\text{к}}$, $\sigma(\Sigma_{\text{кд}}) = 0,02m(\Sigma_{\text{кд}})$.

Риск разрушения конструкции шин при снижении КД величины $\Sigma_{\text{кд}}$ напряжения относительно $\sigma_{\Sigma 1-r_a}$, т.е. $r_{\text{кд}} = 0,5 + \Phi \left[\frac{\sigma_{\Sigma 1-r_a} - m(\Sigma_{\text{кд}})}{\sigma(\Sigma_{\text{кд}})} \right]$.

4.5.3.3.3. Шины коробчатого сечения. Шины коробчатого сечения, как правило, используются в виде двух швеллеров, опирающихся нижними полками на изоляторы. Швеллеры могут иметь жесткое соединение нижних и верхних полок. Конструкции шин могут располагаться на изоляторах горизонтально и вертикально. Вследствие этого при горизонтальном расположении конструкции с жестко соединенными полосами имеет момент сопротивления сечения $w_{y_0-y_0}$ относительно вертикальной оси y_0-y_0 , пересекающей соединенные сварным швом полки. При отсутствии жесткого соединения между полками момент сопротивления сечения конструкции определяется суммой моментов сопротивления каждого швеллера w_{y-y} относительно вертикальной оси $y-y$, пересекающей нижнюю и верхние полки швеллера, т.е. $2w_{y-y}$. При вертикальном расположении шин момент сопротивления сечения будет определяться суммой моментов сопротивления каждого швеллера w_{x-x} , но относительно горизонтальной оси $x-x$, пересекающей стойки швеллеров, т.е. $2w_{x-x}$.

С учетом изложенного далее определяются квантили порядков p_1 и p_2 :

1) периодическая составляющая тока в начальный момент КЗ $i_{\text{пор}p_1}, i_{\text{пор}p_2}$;

2) ударного тока: $i_{yp1} = \sqrt{2}k_y i_{\text{пор}p_1}, i_{yp2} = \sqrt{2}k_y i_{\text{пор}p_2}$;

3) силы взаимодействия между швеллерами: $f_{\text{пп}1} = 0,5 \frac{i_{yp1}^2}{h} \cdot 10^{-7}$,

$f_{\text{пп}2} = 0,5 \frac{i_{yp2}^2}{h} \cdot 10^{-7}$, причем h – высота стойки швеллера в м;

4) напряжение в материале шин: $\sigma_{\text{пп}1} = \frac{f_{\text{пп}1} l^2}{12w_{\text{п}}}, \sigma_{\text{пп}2} = \frac{f_{\text{пп}2} l^2}{12w_{\text{п}}}$,

где $w_{\text{п}} = w_{y-y}$, см³, l – расстояние между изоляторами, м;

5) силы взаимодействия между фазами:

$f_{\Phi p_1} = \sqrt{3} \cdot 10^{-7} \frac{i_{yp1}^2}{a_{\text{м}}}, f_{\Phi p_2} = \sqrt{3} \cdot 10^{-7} \frac{i_{yp2}^2}{a_{\text{м}}}$,

где a – расстояние между фазами, м;

б) изгибающий момент:
$$m_{p_1} = \frac{f_{\Phi p_1} l^2}{10}, \quad m_{p_2} = \frac{f_{\Phi p_2} l^2}{10};$$

7) напряжение в материале шин от межфазных усилий:

$$\sigma_{\Phi p_1} = \frac{m_{p_1}}{w}, \quad \sigma_{\Phi p_2} = \frac{m_{p_2}}{w},$$

где $w = w_{y_0-y_0}$ при горизонтальном расположении жестко сваренных швеллеров,

$w = 2w_{y-y}$ при горизонтальном расположении швеллеров, без жесткого соединения,

$w = 2w_{x-x}$ при вертикальном расположении конструкции коробчатых шин;

8) результирующего напряжения в материале шин:

$$\sigma_{\Sigma p_1} = \sigma_{\Gamma p_1} + \sigma_{\Phi p_1}, \quad \sigma_{\Sigma p_2} = \sigma_{\Gamma p_2} + \sigma_{\Phi p_2}.$$

Далее определяются параметры нормального ЗРВ результирующего напряжения Σ_{Σ} . Так как $\sigma_{\Sigma p_1} > \sigma_{\Sigma p_2}$ при $p_1 > p_2$, то выражение для параметров МО и СКО будут:

$$\sigma(\Sigma_{\Sigma}) = \frac{\sigma_{\Sigma p_1} - \sigma_{\Sigma p_2}}{\Phi^{-1}(p_1 - 0,5) - \Phi^{-1}(p_2 - 0,5)}, \quad m(\Sigma_{\Sigma}) = \sigma_{\Sigma p_1} - \sigma(\Sigma_{\Sigma}) \cdot \Phi^{-1}(p_1 - 0,5).$$

Значение результирующего напряжения, исходя из заданного риска r_a разрушения шинной конструкции $\sigma_{\Sigma 1-r_a} = m(\Sigma_{\Sigma}) + \sigma(\Sigma_{\Sigma}) \Phi^{-1}(0,5 - r_a)$.

Определяются МО и СКО нормального ЗРВ КД механического напряжения в материале шин

$$m(\Sigma_{\text{кд}}) = \sigma_{\text{кд}}^{\text{к}}, \quad \sigma(\Sigma_{\text{кд}}) = 0,02m(\Sigma_{\text{кд}}).$$

Риск разрушения конструкции шин при снижении КД величины $\Sigma_{\text{кд}}$

напряжения относительно $\sigma_{\Sigma 1-r_a}$, т.е. $r_{\text{кд}} = 0,5 + \Phi \left[\frac{\sigma_{\Sigma 1-r_a} - m(\Sigma_{\text{кд}})}{\sigma(\Sigma_{\text{кд}})} \right]$.

4.5.3.3.4. Замечания для шин расположенных по вершинам равностороннего и прямоугольного треугольников. Анализ усилий на изоляторы показывает, что результирующая сила, действующая на

изоляторы одной фазы и сформированная благодаря взаимодействию с другими фазами треугольного расположения шин, может оказывать изгибающее, растягивающее и сжимающее действие. При этом максимальное межфазное значение усилия имеет место для фазы В как при горизонтальном расположении шин. Анализ позволяет рекомендовать следующие выражения для квантилей порядков p_1 и p_2 напряжения в материале шин от межфазного взаимодействия:

- трубчатые шины, расположенные в вершинах равностороннего

треугольника:
$$\sigma_{\Phi\Pi_1} = \sqrt{3} \frac{i_{yp1}^2 l^2}{a_m w} \cdot 10^{-8}, \quad \sigma_{\Phi\Pi_2} = \sqrt{3} \frac{i_{yp2}^2 l^2}{a_m w} \cdot 10^{-8};$$

- шины коробчатого сечения, расположенные в вершинах равностороннего треугольника:

$$\sigma_{\Phi\Pi_1} = 2,5 \frac{i_{yp1}^2 l^2}{a_m w_{yo-yo}} \cdot 10^{-8}, \quad \sigma_{\Phi\Pi_2} = 2,5 \frac{i_{yp2}^2 l^2}{a_m w_{yo-yo}} \cdot 10^{-8};$$

- трубчатые шины, расположенные в вершинах прямоугольного

треугольника:
$$\sigma_{\Phi\Pi_1} = 1,64 \frac{i_{yp1}^2 l^2}{a_m w} \cdot 10^{-8}, \quad \sigma_{\Phi\Pi_2} = 1,64 \frac{i_{yp2}^2 l^2}{a_m w} \cdot 10^{-8};$$

- коробчатые шины, расположенные в вершинах прямоугольного

треугольника:
$$\sigma_{\Phi\Pi_1} = 2,2 \frac{i_{yp1}^2 l^2}{a_m w_{yo-yo}} \cdot 10^{-8}, \quad \sigma_{\Phi\Pi_2} = 2,2 \frac{i_{yp2}^2 l^2}{a_m w_{yo-yo}} \cdot 10^{-8}.$$

Квантили порядков p_1 и p_2 напряжения в материале коробчатых шин от межполосного взаимодействия определяются так же как в п. 4.3.3.3.3. При этом выражение для квантилей межфазного взаимодействия вместо момента сопротивления относительно оси $yo-yo$, должны содержать удвоенный момент сопротивления относительно оси $y-y$.

4.6. Обоснование выбранного оборудования

В отечественной практике принято проводить стендовые испытания головных образцов оборудования. Испытательные стенды организуются на изготавливающих заводах, на электроустановках или строятся специализированные испытательные лаборатории (стенды). Стендовые испытания устанавливают ПД детерминированные значения в заданных

конкретных условиях (параметры среды и другие контролируемые в эксплуатации параметры, например, электрическое напряжение).

Проверка оборудования осуществляется путем сопоставления расчетных эксплуатационных и аварийных значений параметров соответственно с ДД и КД испытательными значениям. Однако в эксплуатационных условиях названные как рабочие и аварийные, так и ДД и КД значения испытательных параметров (величин) могут изменяться в некоторых предписанных инструкцией пределах. Поэтому приведенная детерминированная проверка является по своей сути случайной. Следовательно, так же как и в рассмотренных примерах с коммутационными аппаратами и токоведущими частями проверка оборудования должна выполняться вероятностным путем по ЗРВ параметров эксплуатационных рабочих и аварийных величин, также по ЗРВ ДД и КД испытательных значений параметров, т.е. исходя из рисков перегрузки и разрушения.

В настоящее время, как правило, не осуществляют проверку в аварийных условиях, т.к. данные условия реализуются на стендовых испытаниях. Последнее однако не охватывает все возникающие в эксплуатации условия. Так, токи асинхронных режимов в ряде схем включения источников могут превысить разрушительные для оборудования значения. В связи с этим в таких случаях рекомендуются ПД значения параметров для оборудования, например [6]. Аналогично возможны значения параметров оборудования, близкие к предельным или их превышающим значениям в условиях электрической резонансной компенсации энергоемких параметров электрических схем включения оборудования и линий.

Таким образом, полученные испытательные детерминированные значения являются случайными не только из-за изменяющихся параметров среды, но и вследствие отмеченных и возможно также других влияющих факторов. Поэтому вероятностная проверка оборудования должна осуществляться так же как и для других силовых компонентов: коммутационных аппаратов и токоведущих частей.

4.6.1. Генераторы

При детерминированной (обычной) проверке в условиях рабочих режимов фактические токи ротора и статора не должны превышать ДД значений, зависящих только от параметров среды. Поэтому вероятностная проверка должна производиться уже в условиях рабочих режимов путем определения рисков перегрузки:

1) вследствие превышения номинальных как максимально-возможных токов ротора и статора

$$r_{\sigma} = 0,5 - \Phi \left\{ \frac{i_{\text{нр}(c)} - m[I_{\text{р}(c)}]}{\sigma[I_{\text{р}(c)}]} \right\},$$

2) вследствие снижения ДД токов из – за параметров среды

$$r_{\text{дд}} = 0,5 + \Phi \frac{i_{\text{нр}(c)} - m[I_{\text{ддр}(c)}]}{\sigma[I_{\text{ддр}(c)}]},$$

причем $i_{\text{нр}(c)}$ – номинальные токи ротора (статора),

$m(I_c) = 0,65i_{\text{нс}}$, $\sigma(I_c) = 0,117i_{\text{нс}}$ – МО и СКО токов рабочих режимов статора, исходя из диапазона $(0,3 \div 1) = i_{\text{нс}}$ токовой загрузки статорной обмотки,

$m(I_p) = 2,3i_{\text{ххр}}$, $\sigma(I_p) = 0,25i_{\text{ххр}}$ – МО и СКО рабочих токов ротора, исходя также из диапазона $(0,3 \div 1) = i_{\text{нс}}$ токовой загрузки статорной обмотки и стабилизации номинального уровня напряжения на статорной обмотке,

$m(I_{\text{ддс}}) = 1,05i_{\text{нс}}$, $\sigma(I_{\text{ддс}}) = 0,02m(I_{\text{ддс}})$ – МО и СКО ДД токов статорной обмотки, исходя из изменений параметров среды,

$m(I_{\text{ддр}}) = 1,06i_{\text{нр}}$, $\sigma(I_{\text{ддр}}) = 0,02m(I_{\text{ддр}})$ – МО и СКО ДД токов ротора, аналогично исходя из изменений параметров среды,

Вероятностная проверка генераторов в аварийных условиях на термическую и динамическую стойкость может быть проведена аналогично проверке коммутационных аппаратов и токоведущих частей, т.е. должны быть определены ЗРВ проверяемых параметров: теплового импульса и ударного тока (механических усилий) по полученным квантилям порядков p_1 и p_2 данных величин. Распределение вероятностей аварийных токов генераторов при повреждениях для каждого момента следует принять нормальным, т.к. они определяются линейной зависимостью от ЭДС каждого момента переходного процесса, которые в свою очередь также формируются линейной зависимостью от заданных рабочих токов узлов с нормальными ЗРВ. Хотя зависимости выходных электрических величин как в рабочих установившихся режимах, так и при повреждениях от исходных данных (мощностей узлов) являются нелинейными, благодаря массовости этих зависимостей можно принять ЗРВ выходных величин

нормальными. Что касается КД базовых величин, то их вероятностное распределение обуславливается флуктуациями параметров среды. Это обеспечивает нормальные ЗРВ указанных КД величин.

Поскольку для генераторов КД величины в регулярной справочной литературе не представлены, имеются лишь сведения [6] по действующему значению полного тока статора в сверхпереходный период, проверка генератора может быть проведена только по данному КД току.

Методом СГИД определяются параметры нормального ЗРВ аварийных токов трехфазных КЗ на выводах каждого генератора. Исходя из заданного риска r_a разрушения генератора действием аварийных электрических величин, определяются квантили этих величин, например, квантиль порядка $1-r_a$ тока трехфазного КЗ генератора:
$$i_{1-r_a}^{(3)} = m[I_a^{(3)}] + \sigma[I_a^{(3)}] \Phi^{-1}(0,5 - r_a).$$

Далее определяются параметры нормальных ЗРВ КД величин, например, КД тока $I_{кд}$ генератора:

$$m(I_{кд}) = i_{кд*} I_{нг}, \quad \sigma(I_{кд}) = 0,02m(I_{кд}),$$

где $i_{кд*}$ – относительное значение КД тока генератора, который может принят как максимум из сверхпереходного тока трехфазного КЗ на выводах генератора и максимально-допустимой величины тока качаний или асинхронного режима, рекомендуемой [6], и риск разрушения вследствие снижения КД значений, т.е.

$$r_{кд} = 0,5 + \Phi \left[\frac{i_{1-r_a} - m(I_{кд})}{\sigma(I_{кд})} \right].$$

4.6.2. Трансформаторы и автотрансформаторы

Перегрузки и аварийная потеря трансформаторов и автотрансформаторов в основном обусловлены режимами и повреждениями обмоток, которые проявляются в протекающих в них токах. Поэтому аналогично проверке других силовых объектов электроустановок для трансформаторов и автотрансформаторов можно установить ДД и КД токи, и на основе последних – критерии термической и динамической стойкости. Поскольку для трансформаторов и автотрансформаторов справочно-каталожные ДД и КД величины не представлены и допускаются заметные перегрузки, ДД величины для обмоток можно в рабочих условиях принять

номинальные токи или превышающие их на 10-20% , а в качестве КД величин использовать КД токи при асинхронном режиме, рекомендованные в [6].

Однако в настоящее время проверка трансформаторов и автотрансформаторов в эксплуатационных условиях производится по полной мощности. Поэтому для выбора данного параметра и проверки перегрузочной способности в эксплуатационных условиях необходимо получить ЗРВ полной фактической мощности, т.е. получить условную ПРВ $c_{\vartheta}(s)$. Выполнить это можно по методу СГИД, например, определить параметры нормального ЗРВ: МО $m_{\vartheta}(S)$ и СКО $\sigma_{\vartheta}(S)$. Что касается ДД мощности, то ее в данном случае определяем также по методу СГИД, используя квантили заданных порядков нормальных ЗРВ тока I , напряжения U и мощности S , т.е.

$$i_{\text{ддр}1} = m(I_{\text{дд}}) + \sigma(I_{\text{дд}}) \cdot \Phi^{-1}(p_1 - 0,5),$$

$$u_{\text{дд}1-p_1} = m(U_{\text{дд}}) + \sigma(U_{\text{дд}}) \Phi^{-1}(0,5 - p_1),$$

$$s_{\text{ддр}1} = \sqrt{3} i_{\text{ддр}1} u_{\text{дд}1-p_1},$$

$$i_{\text{ддр}2} = m(I_{\text{дд}}) + \sigma(I_{\text{дд}}) \cdot \Phi^{-1}(p_2 - 0,5),$$

$$u_{\text{дд}1-p_2} = m(U_{\text{дд}}) + \sigma(U_{\text{дд}}) \Phi^{-1}(0,5 - p_2),$$

$$s_{\text{ддр}2} = \sqrt{3} i_{\text{ддр}2} u_{\text{дд}1-p_2}.$$

Неизвестные параметры нормальных ЗРВ тока $m(I_{\text{дд}})$, $\sigma(I_{\text{дд}})$ и напряжения $m(U_{\text{дд}})$, $\sigma(U_{\text{дд}})$ определяются:

- для тока, реализуемого случайными изменениями параметров среды, т.е. $m(I_{\text{дд}}) = i_{\text{дд}} = (1,1 \div 1,2) i_{\text{н}}$, $\sigma(I_{\text{дд}}) = 0,02 m(I_{\text{дд}})$;

- для напряжения – по диапазону изменения в эксплуатационных условиях, которое можно принять в пределах $0,8 \div 1,2$ номинального напряжения, т.е.

$$m(U_{\text{дд}}) = \frac{1,2 + 0,8}{2} u_{\text{н}} = u_{\text{н}}, \quad \sigma(U_{\text{дд}}) = \frac{1,2 - 0,8}{6} u_{\text{н}} = 0,067 u_{\text{н}}.$$

По полученным квантилям полной мощности с помощью выражений (6,7) определяются параметры нормальных ЗРВ: МО $m(S)$,

$m(S_{\text{дд}})$ и СКО $\sigma(S)$, $\sigma(S_{\text{дд}})$ соответственно фактической S и длительно-допустимой ДД $S_{\text{дд}}$ мощности.

Далее, исходя из заданного риска $r_{\text{э}}$ эксплуатационной перегрузки, можно определить расчетную мощность трансформатора и автотрансформатора как квантиль порядка $1 - r_{\text{э}}$, т.е.

$$s_{1-r_{\text{э}}} = m(S) + \sigma(S) \cdot \Phi^{-1}(0,5 - r_{\text{э}}),$$

\выбрать из дискретного ряда номинальных мощностей ближайшее к расчетному значение номинальной мощности $s_{\text{тн}}$ и рассчитать уточненные фактические риски перегрузки трансформатора (автотрансформатора) соответственно в эксплуатационных условиях и вследствие снижения ДД полной мощности $S_{\text{дд}}$ как случайных величин, т.е.

$$r_{\text{эН}} = 0,5 - \Phi \left[\frac{s_{\text{тн}} - m(S)}{\sigma(S)} \right], \quad r_{\text{ддН}} = 0,5 + \Phi \left[\frac{s_{\text{тн}} - m(S_{\text{дд}})}{\sigma(S_{\text{дд}})} \right].$$

где S – фактическая, а $S_{\text{дд}}$ – ДД мощности трансформатора, как случайные величины.

Проверка трансформаторов и автотрансформаторов по КД величинам (токам) осуществляется в последовательности:

- с помощью ВРК ТКЗ-3000 рассчитываются сквозные токи при КЗ на разных сторонах как квантили порядков p_1 и p_2 ,

- по наибольшему приведенному к одному напряжению квантилю i_{p_1} порядка p_1 и аналогичному наибольшему или наименьшему также приведенному к тому же напряжению квантилю i_{p_2} порядка p_2 сквозных токов при КЗ на разных сторонах трансформатора или автотрансформатора определяются с помощью метода СГИД параметры $m(I)$ и $\sigma(I)$ нормального ЗРВ этих токов,

- исходя из заданного риска $r_{\text{а}}$ находится пограничная величина тока как квантиль порядка $1 - r_{\text{а}}$, превышение которого приводит к разрушению оборудования, т.е. $i_{1-r_{\text{а}}} = m(I) + \sigma(I) \Phi^{-1}(0,5 - r_{\text{а}})$,

- находятся параметры нормального ЗРВ КД тока, рандомизируемого изменением параметров среды, т.е.:

$$m(I_{\text{кд}}) = i_{\text{кд}} = I_{\text{н}} / u_{\text{кз}}, \quad \sigma(I_{\text{кд}}) = 0,02m(I_{\text{кд}}),$$

где I_H – номинальный ток трансформатора (автотрансформатора) в именованных единицах,

$u_{кз}$ – напряжение КЗ в относительных единицах.

В случае трехобмоточного трансформатора или автотрансформатора $i_{кд}$ будет определяться в зависимости от стороны, на которой внешнее КЗ обуславливает максимальные токи как квантили порядков p_1 и p_2 , например, при КЗ на низшем напряжении, т.е. $i_{кд} = I_H / (u_{сн} + u_{вн})$, причем $u_{сн}$ и $u_{вн}$ – напряжения КЗ между обмотками средней и низкой и высоко-низкой сторон.

В заключение определяется риск разрушения вследствие снижения КД тока как случайной величины, т.е.

$$r_{кд} = 0,5 + \Phi \left[\frac{i_{1-r_a} - m(I_{кд})}{\sigma(I_{кд})} \right].$$

4.6.3. Токоограничивающие и шунтирующие реакторы

Токоограничивающие реакторы проверяются в эксплуатационных условиях по ДД току и дополнительно по ДД напряжению в точке за фидерным реактором. В аварийных условиях осуществляется проверка на термическую и динамическую стойкость, также дополнительно по остаточному напряжению на сборных шинах при КЗ на фидере.

Шунтирующие реакторы проверяются по ДД мощности в эксплуатационных условиях.

4.6.3.1. Проверка токоограничивающих реакторов

4.6.3.1.1. Проверка по ДД току. По методу СГИД определяются параметры МО $m(I)$ и СКО $\sigma(I)$ нормального ЗРВ рабочего тока I через реактор, обусловленный нагрузкой фидера, группы или секции фидеров. Исходя из заданного риска r_{\ominus} перегрузки, определяется расчетная величина рабочего тока как квантиля порядка $1 - r_{\ominus}$, т.е.

$$i_{1-r_{\ominus}} = m(I) + \sigma(I) \Phi^{-1}(0,5 - r_{\ominus}).$$

Исходя из неравенства $i_{1-r_{\ominus}} \leq i_H$, где i_H – номинальный ток реактора, определяется последний, а также фактический риск перегрузки в рабочих условиях $r_{\ominus\Phi} = 0,5 - \Phi \left[\frac{i_H - m(I)}{\sigma(I)} \right]$.

Определяются параметры нормального ЗРВ ДД тока реактора, изменения которого вызваны флуктуациями среды, т.е.

$$m(I_{\text{дд}}) = i_{\text{н}}, \quad \sigma(I_{\text{дд}}) = 0,02m(I_{\text{дд}}).$$

Далее находится риск перегрузки вследствие изменения параметров среды, иначе $r_{\text{дд}} = 0,5 - \Phi\left[\frac{i_{\text{н}} - m(I_{\text{дд}})}{\sigma(I_{\text{дд}})}\right]$.

Проверка по отключающей способности фидерного выключателя. Данная проверка реализуется в условиях ограничения тока при КЗ за фидерным выключателем. Методом СГИД при КЗ до реактора определяются квантили токов порядков p_1 и p_2 $i_{\text{пор}p_1}$, $i_{\text{пор}p_2}$ и находятся квантили сопротивления системы. Зависимость сопротивления системы от тока КЗ является убывающей. Поэтому квантили сопротивления будут иметь порядки $1-p_1$ и $1-p_2$ и их величины могут быть найдены по выражениям: $x_{\text{с}1-p_1} = u_{\text{срн}} / \sqrt{3}i_{\text{пор}p_1}$, $x_{\text{с}1-p_2} = u_{\text{срн}} / \sqrt{3}i_{\text{пор}p_2}$, где $u_{\text{срн}}$ – средне-номинальное напряжение.

Далее определяются квантили требуемых сопротивлений КЗ цепи из условия обеспечения номинального тока отключения заданного выключателя. Поскольку данные сопротивления являются убывающими зависимостями относительно тока отключения, то порядки их как квантилей соответственно будут: $1-p_1$ и $1-p_2$, а сами квантили могут быть определены по выражениям:

$$x_{\text{рез}1-p_1}^{\text{треб}} = \frac{u_{\text{н}}}{\sqrt{3}i_{\text{кд}p_1}}, \quad x_{\text{рез}1-p_2}^{\text{треб}} = \frac{u_{\text{н}}}{\sqrt{3}i_{\text{кд}p_2}},$$

где $u_{\text{н}}$ – номинальное напряжение электроустановки,

$i_{\text{кд}p_1}$, $i_{\text{кд}p_2}$ – квантили порядков p_1 и p_2 КД тока отключения, определяемые выражениями:

$$i_{\text{кд}p_1} = m(I_{\text{кд}}) + \sigma(I_{\text{кд}})\Phi^{-1}(p_1 - 0,5), \quad i_{\text{кд}p_2} = m(I_{\text{кд}}) + \sigma(I_{\text{кд}})\Phi^{-1}(p_2 - 0,5),$$

где $m(I_{\text{кд}}) = i_{\text{кд}}^{\text{к}}$, $\sigma(I_{\text{кд}}) = 0,02m(I_{\text{кд}})$, $i_{\text{кд}}^{\text{к}}$ – каталожное значение тока отключения выключателя.

Квантили расчетного сопротивления реактора определяются разностью требуемых сопротивлений системы совместно с реактором $x_{\text{рез}1-p_1}^{\text{треб}}$, $x_{\text{рез}1-p_2}^{\text{треб}}$ и сопротивлений системы без реактора $x_{\text{с}1-p_1}$, $x_{\text{с}1-p_2}$, т.е.: $x_{1-p_1}^{\text{р}} = x_{\text{рез}1-p_1}^{\text{треб}} - x_{\text{с}1-p_1}$, $x_{1-p_2}^{\text{р}} = x_{\text{рез}1-p_2}^{\text{треб}} - x_{\text{с}1-p_2}$.

Параметры нормального ЗРВ расчетного реактивного сопротивления реактора X^P определяются по формулам (8,9), т.е.

$$\sigma(X^P) = \frac{x_{1-p_1}^P - x_{1-p_2}^P}{\Phi^{-1}(0,5-p_1) - \Phi^{-1}(0,5-p_2)}, \quad m(X^P) = x_{1-p_1}^P - \sigma(X^P)\Phi^{-1}(0,5-p_1).$$

Исходя из заданного риска снижения расчетного сопротивления реактора X^P как случайной величины, определяется квантиль порядка r_a , т.е. $x_{r_a}^P = m(X^P) + \sigma(X^P)\Phi^{-1}(r_a - 0,5)$.

По данному сопротивлению выбирается реактор с большим каталожным сопротивлением $x_{\kappa}^P > x_{r_a}^P$.

Квантили результирующих сопротивлений КЗ цепи с учетом выбранного реактора: $x'_{pez1-p_1} = x_{c1-p_1} + x_{\kappa}^P$, $x'_{pez1-p_2} = x_{c1-p_2} + x_{\kappa}^P$, что обеспечивает следующие квантили фактических значений тока КЗ за реактором:

$$i'_{пор1} = \frac{u_H}{\sqrt{3}x'_{pez1-p_1}}, \quad i'_{пор2} = \frac{u_H}{\sqrt{3}x'_{pez1-p_2}}.$$

Данные токи можно использовать для уточнения расчета выбора реактора по используемой вероятностной методике.

4.6.3.1.2. Проверка реактора на динамическую стойкость.

Определяются квантили порядков p_1 и p_2 ударных токов:

$$i_{yp1} = \sqrt{2}k_y i'_{пор1}, \quad i_{yp2} = \sqrt{2}k_y i'_{пор2},$$

где $k_y = 1,956$ – ударный коэффициент.

По формулам (6,7) находятся параметры СКО $\sigma(I_Y)$ и МО (I_Y) $\sigma(I_Y)$ нормального ЗРВ ударного тока I_Y .

Исходя из заданного риска r_a разрушения реактора, определяется квантиль i_{y1-r_a} порядка $1-r_a$ $i_{y1-r_a} = m(I_Y) + \sigma(I_Y)\Phi^{-1}(0,5-r_a)$.

Находятся параметры МО $m(I_{\kappa д})$ и СКО $\sigma(I_{\kappa д})$ нормального ЗРВ тока $I_{\kappa д}$ динамической стойкости реактора

$$m(I_{\kappa д}) = i_{\kappa д}^{\kappa}, \quad \sigma(I_{\kappa д}) = 0,02m(I_{\kappa д}),$$

где $i_{\text{кд}}^{\text{к}}$ – каталожное значение КД ударного тока реактора.

Риск разрушения реактора вследствие снижения его КД тока как случайной величины $r_{\text{кд}} = 0,5 + \Phi \left[\frac{i_{\text{y}1-r_a} - m(I_{\text{кд}})}{\sigma(I_{\text{кд}})} \right]$.

4.6.3.1.3. Проверка реактора на термическую стойкость.

Квантили порядков p_1 и p_2 тепловых импульсов:

$$b_{kp_1} = i_{\text{пор}p_1}^2 (t_{\text{отк}} + T_a), \quad b_{kp_2} = i_{\text{пор}p_2}^2 (t_{\text{отк}} + T_a),$$

где $t_{\text{отк}}$ – время отключения выключателя,

T_a – время затухания апериодической составляющей тока КЗ в ветви с реактором [2, табл. 3.8], зависит от номинального тока реактора.

Параметры СКО $\sigma(B_{\text{к}})$ и МО $m(B_{\text{к}})$ нормального ЗРВ тока $I_{\text{кд}}$ теплового импульса реактора $B_{\text{к}}$ вычисляются по формулам (6,7)

Исходя из заданного риска r_a разрушения реактора, определяется квантиль теплового импульса $b_{\text{к}1-r_a}$ порядка $1-r_a$, т.е.

$$b_{\text{к}1-r_a} = m(B_{\text{к}}) + \sigma(B_{\text{к}})\Phi^{-1}(0,5 - r_a).$$

Находятся параметры МО $m(B_{\text{кд}})$ и СКО $\sigma(B_{\text{кд}})$ нормального ЗРВ теплового импульса $I_{\text{кд}}$ реактора

$$m(B_{\text{кд}}) = b_{\text{кд}}^{\text{к}}, \quad \sigma(B_{\text{кд}}) = 0,02m(B_{\text{кд}}),$$

где $b_{\text{кд}}^{\text{к}}$ – каталожное значение КД теплового импульса реактора.

Риск разрушения реактора вследствие снижения его КД теплового импульса как случайной величины $r_{\text{кд}} = 0,5 + \Phi \left[\frac{i_{\text{y}1-r_a} - m(I_{\text{кд}})}{\sigma(I_{\text{кд}})} \right]$.

4.6.3.1.4. Проверка реактора на остаточное напряжение на сборных шинах. Квантили в относительных единицах порядков $1-p_1$ и $1-p_2$ остаточного напряжения как убывающей функции:

$$u_{*p_1} = \frac{\sqrt{3}i_{\text{пор}p_1} x_{\text{к}}^{\text{р}}}{u_{\text{н}}}, \quad u_{*p_2} = \frac{\sqrt{3}i_{\text{пор}p_2} x_{\text{к}}^{\text{р}}}{u_{\text{н}}}.$$

Параметры СКО $\sigma(U_*)$ и МО $m(U_*)$ нормального ЗРВ остаточного напряжения U_* в относительных единицах:

$$\sigma(U_*) = \frac{u_{*1-p_1} - u_{*1-p_2}}{\Phi^{-1}(0,5 - p_1) - \Phi^{-1}(0,5 - p_2)},$$

$$m(U_*) = u_{*1-p_1} - \sigma(U_*)\Phi^{-1}(0,5 - p_1).$$

Риск снижения остаточного напряжения на шинах ниже рекомендуемых [7] разрушительных значений $(0,6 \div 0,7)u_n$

$$r_a = 0,5 + \Phi\left[\frac{(0,6 \div 0,7) - m(U_*)}{\sigma(U_*)}\right].$$

4.6.3.2. Проверка шунтирующих реакторов

По номинальному напряжению реактора, которое превышает номинальное напряжение: сетей $35 \div 220$ кВ на 10 %, а 500 кВ и выше – на 5 %, т.е. $u_{нр} = (0,05 \div 0,1)u_{нс}$ и дискретному ряду номинальных мощностей $s_{нр}$ реакторов каталога определяются полные сопротивления нескольких, например, трех вариантов реактора:

$$z_1 = s_{рн1} / u_{нр}, \quad z_2 = s_{рн2} / u_{нр}, \quad z_3 = s_{рн3} / u_{нр}.$$

С помощью ВРК, имеющего в своем составе модуль установившихся режимов энергосистем, рассчитываются варианты трех специализированных (исходные данные каждого варианта заданы в виде квантилей одного порядка) стационарных режимов энергосистемы, в которую входит электроустановка с шунтирующим реактором. Выходные данные установившихся режимов, в том числе уровни напряжений в узлах, включая узел, к которому подключен шунтирующий реактор, распределены по нормальному ЗРВ, полностью определяемого двумя параметрами МО и СКО. Это предопределяет необходимость рассмотрения всего двух специализированных режимов с исходными данными в виде квантилей двух порядков. В результате получают выходные данные в виде квантилей также двух порядков p_1 и p_2 (нарастающие зависимости, например, потоки активных мощностей в ветвях) или $1-p_1$ и $1-p_2$ (убывающие зависимости напряжений в узлах). Следовательно, выходные данные напряжений в узле каждого варианта шунтирующего реактора оказываются в виде двух квантилей u_{1-p_1} и u_{1-p_2} порядков $1-p_1$ и $1-p_2$. Тогда могут

быть найдены квантили фактических мощностей трех вариантов шунтирующего реактора, т.е.:

$$s_{1-p_1}^{(1)} = u_{1-p_1}^2 / z_1, \quad s_{1-p_2}^{(1)} = u_{1-p_2}^2 / z_1,$$

$$s_{1-p_1}^{(2)} = u_{1-p_1}^2 / z_2, \quad s_{1-p_2}^{(2)} = u_{1-p_2}^2 / z_2, \quad s_{1-p_1}^{(3)} = u_{1-p_1}^2 / z_3, \quad s_{1-p_2}^{(3)} = u_{1-p_2}^2 / z_3,$$

По формулам (8,9) определяются параметры нормального ЗРВ потребляемой реактором фактической мощности в каждом из вариантов, например, первом:

$$\sigma(S_{p1}) = \frac{s_{p11-p_1} - s_{p11-p_2}}{\Phi^{-1}(0,5 - p_1) - \Phi^{-1}(0,5 - p_2)}, \quad m(S_{p1}) = s_{p11-p_1} - \sigma(S_{p1})\Phi^{-1}(0,5 - p_1).$$

Исходя из заданного риска r_{\ominus} эксплуатационной перегрузки определяются расчетные значения мощности реактора по вариантам:

$$s_{p1}^p = s_{p11-r_{\ominus}} = m(S_{p1}) + \sigma(S_{p1})\Phi^{-1}(0,5 - r_{\ominus}),$$

$$s_{p2}^p = s_{p21-r_{\ominus}} = m(S_{p2}) + \sigma(S_{p2})\Phi^{-1}(0,5 - r_{\ominus}),$$

$$s_{p3}^p = s_{p31-r_{\ominus}} = m(S_{p3}) + \sigma(S_{p3})\Phi^{-1}(0,5 - r_{\ominus}).$$

По дискретному ряду номинальных мощностей шунтирующих реакторов определяется ближайшее к одному из расчетных, например, s_{p2}^p значение номинальной мощности реактора $s_{pн2}$ и фактические риски перегрузки в условиях эксплуатации r_{\ominus} и вследствие снижения ДД мощности:

$$r_{\ominus} = 0,5 - \Phi\left[\frac{s_{pн2} - m(S_{p2})}{\sigma(S_{p2})}\right], \quad r_{дд} = 0,5 + \Phi\left[\frac{s_{pн2} - m(S_{дд2})}{\sigma(S_{дд2})}\right],$$

где МО $m(S_{дд2})$ и СКО $\sigma(S_{дд2})$ ДД мощности для реактора по второму варианту определяются изменениями параметров среды, т.е.

$$m(S_{дд2}) = s_{pн2}, \quad \sigma(S_{дд2}) = 0,02m(S_{дд2}).$$

Литература

1. ГОСТ 27.002 – 89. Надежность в технике. Термины и определения.
2. Рожкова Л.Д. Электрооборудование станций и подстанций: Учебник. –2-е изд., перераб. и доп. –М.: Энергоатомиздат, 1987.–648 с.
3. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. –М: Наука, 1974. –576 с.

4. Shmoilov A.V. Probability technologies in electric power industry // Proc. 6-th Russian-Korean Int. Simp. On Science and Technology KORUS-2002, Novosibirsk-2002.-Vol.2.-P.421-424.
5. 2.Krivova L.V., Stoyanov E.I., Shmoilov A.V. The definition of probability characteristics of potential-possible power system capacities// Proc. 5-th Russian-Korean Int. Simp. On Science and Technology KORUS-2001, Tomsk-2001.-Vol.1.-P.163-169.
6. Гизила Е.П. Расчет устройств автоматики энергосистем. –Киев: Вища школа, 1974. –344 с.
7. Правила устройств электроустановок / Минэнерго СССР. – 6-е изд. перераб. и доп. –М.: Энергоатомиздат, 1985.–640 с.
8. Электротехнический справочник: В 4-х т. Т.3. . Производство и распределение электрической электроэнергии / Под общ. ред. профессоров МЭИ: В.Г. Герасимова и др.(гл. ред. А.И. Попов)—8-е изд. испр. и доп. –М.: Издательство МЭИ, 2002. –964 с.
9. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения / Под. ред. И.А. Баумштейна, С.А. Бажанова – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 768 с.

О зависимости ПД параметров

от эксплуатационного напряжения

1. ПД активные и реактивные мощности жестко зависят от изменяющегося эксплуатационного напряжения, поэтому случайные изменения напряжения электроустановки отразятся на распределении вероятностей ПД мощностей.
2. ПД отключаемые токи также зависят от эксплуатационного напряжения через восстанавливающееся напряжение. При большом рабочем напряжении эффект восстанавливающегося напряжения должен быть меньше и наоборот. Следовательно, случайные изменения эксплуатационного напряжения отразятся на ЗРВ отключаемых токов.
3. Критериальные величины термической и динамической стойкости коммутационной аппаратуры и токоведущих частей формируются из токов, случайные изменения которых незначительны и определяются параметрами окружающей среды. Поэтому ЗРВ указанных критериальных величин практически не будут рассеяны. От рабочего напряжения названные токи и критериальные величины не зависят.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в представленной работе вопросы оценки показателей функциональной надежности в виде выбора и обоснования силовых компонентов (коммутационных аппаратов, токоведущих частей, оборудования) с учетом случайного характера параметров рабочих и аварийных режимов, длительно- и кратковременно-допустимых величин, указанных в справочниках и каталогах как неизменные константы, являются особо актуальными в настоящее время в связи с перестройкой электроэнергетики. Результаты данного рассмотрения позволили предложить и разработать практические инженерные быстродействующие варианты алгоритмов и методов разрешения указанных задач надежности.

Для функциональной надежности это оказалось возможным благодаря применению ранее разработанного на кафедре электрических станций метода селекции границ исходных и выходных данных (СГИД), позволяющего просто и быстро получать полные вероятностные характеристики в виде функций (ФРВ) и плотностей (ПРВ) распределения вероятностей интересующих параметров: токов и мощностей в ветвях и напряжений в узлах, производных параметров – ударных токов, усилий, механических напряжений, температур, тепловых импульсов и др. Благодаря этому появилась возможность, исходя из заданных рисков перегрузки и разрушения определять расчетные значения параметров выбираемых и проверяемых силовых компонентов. Анализ также выявил что справочно-каталожные значения длительно- и кратковременно- допустимых величин, характеризующих предельные возможности коммутационных аппаратов, токоведущих частей, оборудования, при сравнении с рабочими и аварийными величинами определяются при тех же или аналогичных условиях, а следовательно, являются случайными. Поэтому возможны риски перегрузки и разрушения вследствие случайного снижения длительно- и кратковременно- допустимых величин. В работе продемонстрированы числовые примеры выбора и проверки коммутационных аппаратов и токоведущих частей по предложенным вероятностным технологиям, из которых ясно, что возможна оптимизация определения расчетных значений, исходя из минимума суммарного риска от превышений рабочими, аварийными значениями выбранных величин и снижений относительно последних соответственно длительно- и кратковременно- допустимых значений.

5. Примеры выбора и обоснования коммутационных аппаратов, токоведущих частей и оборудования

Электрические величины в расчетных рабочих и аварийных режимах определены для заданных районов Тюменской энергосистемы, базы данных которой сформированы в вычислительных расчетных комплексах (ВРК) ТКЗ – 3000 (вынужденные синусоидальные электрические величины при КЗ и других возмущениях), Дакар (рабочие режимы).

5.1. Выключатель нагрузки КАГ – 24 – 30/30000УЗ в цепи линейных выводов генератора 200 МВт Сургутской ГРЭС – 1

Поскольку выключатель коммутирует генератор блока, максимальное наблюдаемое значение тока в рабочих режимах следует принять равным максимальному эксплуатационному току генератора, т.е.

$$i_{p1} = 1,05i_{нГ} = 1,05 \frac{n_{нГ}}{\sqrt{3}u_{нГ} \cos\varphi_{нГ}} = 1,05 \frac{200}{\sqrt{3} \cdot 15,75 \cdot 0,85} = 9,056 \text{ кА}.$$

Минимально-наблюдаемый ток рабочего режима определяется коммутационным состоянием района сети размещения блока и минимального режима генераторов. Так как генератор блока непрерывно выдает мощность в сеть, то район сети генератора и коммутационное состояние определяются единственной цепью самого генератора. Поэтому минимально-наблюдаемый ток рабочего режима определяется минимальным режимом самого генератора, т.е.

$$i_{p2} = \frac{e_{p2}}{e_{p1}} \cdot i_{p1} = \frac{1}{1,9} \cdot 9,056 = 4,766 \text{ кА}.$$

Параметры нормального ЗРВ в эксплуатационных условиях:

$$\text{МО } m(I_3) = \frac{i_{p1} + i_{p2}}{2} = \frac{9,056 + 4,766}{2} = 6,911 \text{ кА},$$

$$\text{СКО } \sigma(I_3) = \frac{i_{p1} - i_{p2}}{6} = \frac{9,056 - 4,766}{6} = 0,715 \text{ кА}.$$

Параметры нормального ЗРВ ДД тока. В соответствии с рекомендациями теоретической части, МО ДД тока $m(I^{ДД})$ принимается равным испытательному значению, приведенному в каталогах (справочниках), т.е.

$$m(I^{ДД}) = i^K = 30 \text{ кА}.$$

СКО $\sigma(I^{ДД})$ по этим же рекомендациям принимается 0,06 от испытательного значения:

$$\sigma(I^{ДД}) = 0,06m(I^{ДД}) = 0,06 \cdot 30 = 1,8 \text{ кА}.$$

С помощью ВРК ТКЗ – 3000 найдем максимальное и минимальное наблюдаемые значения аварийного тока КЗ, протекающего через выключатель нагрузки. Максимально-наблюдаемое значение – это периодическая составляющая сверхпереходного тока КЗ от генератора и энергосистемы при КЗ на перифериях выключателя в состоянии сети и режима источников, обуславливающих максимальные значения. Это максимально-наблюдаемое значение является квантилем порядка $p_1 = 0,9987$:

$$i''_{p_1} = 2,063 \cdot \frac{500}{15,75} = 65,492 \text{ кА},$$

где 2,063 – максимальный ток КЗ через выключатель приведенный к ступени напряжения 500 кВ.

Минимально-наблюдаемое значение в соответствии с разработанными рекомендациями найдем в два этапа. Сначала определяется минимально-наблюдаемое значение, обусловленное коммутационным состоянием сети и видом повреждения при КЗ на тех же перифериях выключателя $i''_{up_2} = 1,266 \cdot \frac{500}{15,75} = 40,19 \text{ кА}$, а затем находится

минимально-наблюдаемое значение с учетом 30 % загрузки источников и вида КЗ, которое рассматривается как квантиль порядка $p_2 = 0,0013$

$$i''_{p_2} = \frac{e''_{p_2}}{e''_{p_1}} \cdot i''_{up_2} = \frac{1}{1,14} \cdot 40,19 = 35,254 \text{ кА},$$

где 1,266 – минимальный ток КЗ через выключатель, приведенный к напряжению 500 кВ.

Далее определяются МО и СКО нормального ЗРВ аварийного тока КЗ через выключатель:

$$\text{МО } m(I_a) = \frac{i''_{p_1} + i''_{p_2}}{2} = \frac{65,492 + 35,254}{2} = 83,119 \text{ кА},$$

$$\text{СКО } \sigma(I_a) = \frac{i''_{p_1} - i''_{p_2}}{6} = \frac{65,492 - 35,254}{6} = 5,033 \text{ кА}.$$

Аналогично в аварийных условиях рассчитываются квантили порядков p_1 и p_2 тепловых воздействий:

1) для основной цепи:

$$b_{kp1\text{осн}} = i_{p1\text{осн}}^2 (t_{\text{тер}} + \tau) = 65,492^2 (3 + 0,15) = 13511 \text{ кА} \cdot \text{с}^2,$$

$$b_{kp2\text{осн}} = i_{p2\text{осн}}^2 (t_{\text{тер}} + \tau) = 35,254^2 (3 + 0,15) = 3915 \text{ кА} \cdot \text{с}^2,$$

$$\text{МО } m(B_{\text{к осн}}) = \frac{b_{kp1\text{осн}} + b_{kp2\text{осн}}}{2} = \frac{13511 + 3915}{2} = 8713 \text{ кА}^2 \cdot \text{с},$$

$$\text{СКО } \sigma(B_{\text{к осн}}) = \frac{b_{kp1\text{осн}} - b_{kp2\text{осн}}}{6} = \frac{13511 - 3915}{6} = 1935,3 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

2) для цепи заземлителя:

$$b_{kp1\text{заз}} = i_{p1\text{заз}}^2 (t_{\text{тер}} + \tau) = 65,492^2 (1 + 0,15) = 4933 \text{ кА} \cdot \text{с}^2,$$

$$b_{kp2\text{заз}} = i_{p2\text{заз}}^2 (t_{\text{тер}} + \tau) = 35,254^2 (1 + 0,15) = 1433 \text{ кА} \cdot \text{с}^2,$$

$$\text{МО } m(B_{\text{к заз}}) = \frac{b_{kp1\text{заз}} + b_{kp2\text{заз}}}{2} = \frac{4933 + 1433}{2} = 3183 \text{ кА}^2 \cdot \text{с},$$

$$\text{СКО } \sigma(B_{\text{к заз}}) = \frac{b_{kp1\text{заз}} - b_{kp2\text{заз}}}{6} = \frac{4933 - 1433}{6} = 583,3 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

В статическом состоянии выключатель нагрузки должен выдерживать аварийные сквозные токи, возникающие при возмущениях на электростанции и в энергосистеме. В связи с этим для данного аппарата задаются амплитудное и действующее значения предельного испытательного сквозного тока для главной цепи и заземлителя. Полагая возможное случайное изменение данных значений аналогично другим КД испытательным величинам, определим параметры нормального ЗРВ указанных случайных изменений испытательного сквозного тока:

1) для основной цепи:

$$\text{МО } m(I_{\text{ск осн}}^{\text{КД}}) = i_{\text{ск осн}}^{\text{К}} = \frac{500}{\sqrt{2}} = 353,6 \text{ кА},$$

где 500 кА является испытательным КД значением,

$$\text{СКО } \sigma(I_{\text{ск осн}}^{\text{КД}}) = 0,06 \cdot m(I_{\text{ск осн}}^{\text{КД}}) = 0,06 \cdot 353,6 = 21,21 \text{ кА},$$

2) для цепи заземлителя:

$$\text{МО } m(I_{\text{ск заз}}^{\text{КД}}) = i_{\text{ск заз}}^{\text{К}} = \frac{360}{\sqrt{2}} = 254,6 \text{ кА},$$

где 360 кА – испытательное КД значение,

$$\text{СКО } \sigma(I_{\text{ск заз}}^{\text{КД}}) = 0,06 \cdot m(I_{\text{ск заз}}^{\text{КД}}) = 0,06 \cdot 254,6 = 15,27 \text{ кА}.$$

Аналогично возможное ранее предопределенное случайное изменение испытательного тока термической стойкости позволяет сформировать параметры нормального ЗРВ:

1) для основной цепи выключателя:

$$\text{МО } m(B_{\text{осн}}^{\text{КД}}) = b_{\text{осн}}^{\text{К}} = 190^2 \cdot 3 = 108300 \text{ кА}^2 \cdot \text{с},$$

$$\text{СКО } \sigma(B_{\text{осн}}^{\text{КД}}) = 0,06 \cdot m(B_{\text{осн}}^{\text{КД}}) = 0,06 \cdot 108300 = 6498 \text{ кА}^2 \cdot \text{с},$$

2) для заземлителя:

$$\text{МО } m(B_{\text{зав}}^{\text{КД}}) = b_{\text{зав}}^{\text{К}} = 150^2 \cdot 3 = 67500 \text{ кА}^2 \cdot \text{с},$$

$$\text{СКО } \sigma(B_{\text{зав}}^{\text{КД}}) = 0,06 \cdot m(B_{\text{зав}}^{\text{КД}}) = 0,06 \cdot 67500 = 4050 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

На основании результатов расчетов принимаются расчетные рабочие и аварийные электрические величины. В качестве первоначальных расчетных рабочих величин целесообразно принять номинальные величины, а в качестве аналогичных аварийных значений можно рекомендовать как полусумму математических ожиданий нормальных ЗРВ фактических аварийных и кратковременно-допустимых величин. Благодаря этому можно определить риски соответственно:

1) перегрузки в эксплуатационных условиях:

$$r_{\text{п}} = 0,5 - \Phi \left[\frac{i_{\text{pp}} - m(I_{\text{э}})}{\sigma(I_{\text{э}})} \right] + 0,5 + \Phi \left[\frac{i_{\text{pp}} - m(I^{\text{ДД}})}{\sigma(I^{\text{ДД}})} \right],$$

где $i_{\text{pp}} = i_{\text{н}}$,

2) разрушения в аварийных условиях:

$$r_{\text{р}} = 0,5 - \Phi \left[\frac{i_{\text{рао}} - m(I_{\text{а}})}{\sigma(I_{\text{а}})} \right] + 0,5 + \Phi \left[\frac{i_{\text{рао}} - m(I^{\text{КД}})}{\sigma(I^{\text{КД}})} \right],$$

где $i_{\text{рао}} = \frac{m(I_{\text{а}}) + m(I_{\text{ск осн}}^{\text{КД}})}{2}$.

Таким образом, находим:

1) риск перегрузки в эксплуатационных условиях:

$$r_{\Pi} = 0,5 - \Phi \left[\frac{8,625 - 4,766}{0,715} \right] + 0,5 + \Phi \left[\frac{8,625 - 30}{1,8} \right] =$$

$$= 0,5 - 0,49999996611 + 0,5 - 0,5 = 0,0000003389.$$

$$i_{pp} = 8,625 \text{ кА.}$$

2) риск разрушения в аварийных условиях:

$$r_p = 0,5 - \Phi \left[\frac{218,36 - 83,119}{5,033} \right] + 0,5 + \Phi \left[\frac{218,36 - 353,6}{21,21} \right] =$$

$$= 0,5 - 0,5 + 0,5 - 0,49999999991146 = 0,00000000008854.$$

$$i_{pao} = \frac{83,119 + 353,6}{2} = 218,36 \text{ кА.}$$

Далее возможна оптимизация расчетных величин путем изменения их величин i_{pp} и i_{pao} , исходя из минимума рисков соответственно перегрузки r_{Π} и разрушения r_p .

5.2. Гибкий токопровод на высшем напряжении блока 200 МВт Сургутской ГРЭС – 1

Обоснование гибких токопроводов в эксплуатационных условиях осуществляется по ДД току, а в аварийных условиях по термическому действию токов КЗ аналогично, как это делается для коммутационных аппаратов. Динамическая стойкость гибких токопроводов проверяется в соответствии с 4.3.2. путем сравнения расчетного углового A_a и горизонтального B_a отклонений с одноименными отклонениями $A_{кд}$ и $B_{кд}$. Токопровод от выводов высшего напряжения трансформатора блока до сборных шин выполнен проводом $2 \times A300$ с массой одного метра [9, с. 440] $2 \cdot 0,794 = 1,588$ кг/м.

5.2.1. Проверка по току в эксплуатационных условиях

Данный токопровод используется для пропуска рабочих токов укрупненного блока (2 генератора по 200 МВт и трансформатор 630

МВА ТЦ-630000/500). Максимальный наблюдаемый рабочий ток определяется полной мощностью, выдаваемой двумя генераторами через трансформатор в сеть. Этот ток не может быть более максимального эксплуатационного тока двух генераторов. Следовательно,

$$i_{p1} = 1,05 \cdot 2i_{\text{нг}} = 1,05 \cdot 2 \frac{P_{\text{нг}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{нг}} \cos \varphi_{\text{нг}}} = 1,05 \cdot 2 \frac{200}{\sqrt{3} \cdot 525 \cdot 0,85} = 0,544$$

кА

Минимально-наблюдаемый ток рабочего режима аналогично определяется мощностью, выдаваемой двумя генераторами блока, но при минимально-возможной загрузке генераторов по условиям режимов турбины (30% от номинальных мощности и тока и номинальном напряжении), т.е.

$$i_{p2} = \frac{e_{p2}}{e_{p1}} \cdot i_{p1} = \frac{1}{1,9} \cdot 0,544 = 0,286 \text{ кА,}$$

где e_{p1} и e_{p2} - ЭДС в поперечной оси генератора, рассматриваемые как квантили экстремальных порядков $p_1 = 0,9987$ и $p_2 = 0,0013$.

На основании приведенных расчетов параметры усредненного нормального ЗРВ в эксплуатационных условиях будут

$$\text{МО } m(I_3) = \frac{i_{p1} + i_{p2}}{2} = \frac{0,544 + 0,286}{2} = 0,415 \text{ кА,}$$

$$\text{СКО } \sigma(I_3) = \frac{i_{p1} - i_{p2}}{6} = \frac{0,544 - 0,286}{6} = 0,043 \text{ кА.}$$

Параметры нормального ЗРВ ДД тока в данном случае определяются в соответствии с рекомендациями

$$\text{МО } m(I^{\text{ДД}}) = i_{\text{ДД}}^{\text{к}} = 1360 \text{ А,}$$

$$\text{СКО } \sigma(I^{\text{ДД}}) = 0,06m(I^{\text{ДД}}) = 0,06 \cdot 1360 = 81,6 \text{ А.}$$

Риск перегрузки провода $2 \times \text{А300}$:

$$r_{\text{п}} = 1 - \Phi \left[\frac{i_{\text{пр}} - m(I_3)}{\sigma(I_3)} \right] + \Phi \left[\frac{i_{\text{пр}} - m(I^{\text{ДД}})}{\sigma(I^{\text{ДД}})} \right] = 1 - \Phi \left[\frac{680 - 415}{43} \right] + \Phi \left[\frac{680 - 1360}{81,6} \right] =$$

$$= 1 - 0,499999999636 - 0,499999999999 = 3,64 \cdot 10^{-10}.$$

$i_{\text{пр}} = 680 \text{ А}$ – расчетная загрузка токопровода, принимаемая равной экономическому току.

5.2.2. Проверка по электрическим величинам при КЗ

Согласно п. 4.3.2 гибкий токопровод при КЗ проверяется на динамическую стойкость. При этом расчетные параметры горизонтальных и угловых отклонений определяются при двухфазном КЗ. Далее определяются максимально – и минимально-наблюдаемые величины при 2-х фазном КЗ по пространству гибкого токопровода как квантили порядков p_1 и p_2 . Сначала с помощью ВРК ТКЗ-3000 рассчитаны максимально и минимально-наблюдаемые значения токов по всей длине токопровода, которые рассматриваются как квантили порядков p_1 и p_2 . В результате при 2-х фазном КЗ получены значения $i_{\text{по } p_1}^{(2)} = 25564 \text{ А}$, $i_{\text{по } p_2}^{(2)} = 779 \text{ А}$. Дальнейшие расчеты проводятся по последовательности 4.3.2:

- квантили порядков p_1 и p_2 усилий между фазами, приходящихся на один метр токопровода при протекании токов $i_{\text{пор } p_1}^{(2)}$, $i_{\text{пор } p_2}^{(2)}$:

$$f_{p_1} = 2 \cdot 10^{-7} i_{\text{пор } p_1}^{(2)2} / a_m = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 25504^2 / 12 = 10,84 \text{ Н/м},$$

$$f_{p_2} = 2 \cdot 10^{-7} i_{\text{пор } p_2}^{(2)2} / a_m = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 779^2 / 12 = 0,001 \text{ Н/м},$$

где $a_m = 12$ – расстояние между системами проводов фаз в м;

- значение силы тяжести, приходящейся на один метр токопровода $g = 1,1 \cdot 9,8m = 1,1 \cdot 9,8 \cdot 1,588 = 17,12 \text{ Н/м}$, и квантили порядков p_1 и p_2 отношений:

$$f_{p_1} / g = \frac{10,84}{17,12} = 0,633, \quad f_{p_2} / g = \frac{0,001}{17,12} = 0,000058,$$

$$h = \frac{\gamma l_{\text{пр}}^2}{8\sigma} = \frac{0,04 \cdot 200^2}{8 \cdot 87} = 2,3 \text{ м} - \text{значение стрелы провеса проводов фаз в}$$

пролете $l_{\text{пр}}$ [м] между опорами вдоль гибкого токопровода,

где $\gamma = 0,04 \text{ Н/м} \cdot \text{мм}^2$,

$$\sigma_a = 87 \text{ Н/м} \cdot \text{мм}^2;$$

- значение времени протекания тока КЗ $t_{\text{кз}} = t_3 + 0,05 = 0,05 + 0,05 = 0,1 \text{ с}$,

- значение отношения $\sqrt{h} / t_{\text{кз}} = \sqrt{2,3} / 0,1 = 15,17 \text{ м}^{1/2} / \text{с}$;

- по диаграмме рис. 4.9 [2] в зависимости от отношений: f_{p_1} / g , f_{p_2} / g , $\sqrt{h} / t_{\text{кз}}$ находятся квантили порядков p_1 и p_2 горизонтального $b_{p_1} = 0,125 \cdot 2,3 = 0,288 \text{ м}$, $b_{p_2} = 0 \cdot 2,3 = 0 \text{ м}$ и углового $\alpha_{p_1} = 7^\circ$, $\alpha_{p_2} = 0^\circ$ – отклонения проверяемого токопровода.

Далее определяются параметры нормальных ЗРВ горизонтального и углового отклонений в аварийных условиях по формулам (6,7), т.к. данные неслучайные функции от исходных данных являются нарастающими зависимостями, т.е.:

для горизонтального отклонения B_a :

$$\sigma(B_a) = \frac{b_{p_1} - b_{p_2}}{\Phi^{-1}(p_1 - 0,5) - \Phi^{-1}(p_2 - 0,5)} = \frac{0,288 - 0}{\Phi^{-1}(0,9987 - 0,5) - \Phi^{-1}(0,0013 - 0,5)} = 0,048$$

м,

$$m(B_a) = b_{p_1} - \sigma(B_a) b_{p_2} \Phi^{-1}(p_2 - 0,5) = 0,288 - 0,048 \cdot 3 = 0,144 \text{ м,}$$

для углового отклонения A_a :

$$\sigma(A_a) = \frac{\alpha_{p_1} - \alpha_{p_2}}{\Phi^{-1}(p_1 - 0,5) - \Phi^{-1}(p_2 - 0,5)} = \frac{7 - 0}{\Phi^{-1}(0,9987 - 0,5) - \Phi^{-1}(0,0013 - 0,5)} = 1,167^\circ$$

,

$$m(A_a) = \alpha_{p_1} - \sigma(A_a) \alpha_{p_2} \Phi^{-1}(p_2 - 0,5) = 7 - 1,167 \cdot 3 = 35^\circ .$$

Детерминированные значения КД горизонтального и углового отклонений определяются формулами [2]:

$$b_{\text{кд}} = \frac{a_m - d_c - a_{\text{мдоп}}}{2} = \frac{12 - 0,0666 - 2}{2} = 4,967 \quad \text{м,}$$

$$\alpha_{\text{кд}} = \arctg \frac{b_{\text{кд}}}{h} = \arctg \frac{4,967}{2,3} = 65,2^\circ ,$$

где d_c – диаметр системы 2-х проводов в фазе, определяемый по формулам:

$$r_o = 22,2/2 = 11,1 \text{ мм} = 0,0111 \text{ м} – \text{радиус провода,}$$

$$d_c = \sqrt{r_o a} = \sqrt{0,0111 \cdot 0,4} = 0,0666 \text{ м, при двух проводах в фазе,}$$

$$a = 0,4 \text{ м} – \text{расстояние между проводами в фазе,}$$

$$a_{\text{мдоп}} = 2 \text{ м} – \text{наименьшее допустимое расстояние между соседними}$$

фазами токопровода 500 кВ в момент их наибольшего сближения, определяется согласно ПУЭ [7], также по [2].

Определяются параметры нормальных ЗРВ КД значений названных величин:

для горизонтального отклонения $B_{\text{кд}}$:

$$m(B_{\text{кд}}) = 4,967 \text{ м, } \sigma(B_{\text{кд}}) = 0,06 \cdot 4,967 = 0,298 \text{ м}$$

для углового отклонения $A_{\text{кд}}$:

$$m(A_{\text{кд}}) = 6,52^\circ , \sigma(A_{\text{кд}}) = 0,06 \cdot 6,52 = 3,91^\circ .$$

Поскольку провода в фазе токопровода расщеплены на 2, необходимо дополнительно, исходя из условия схлестывания проводов в фазе

определить квантили порядков p_1 и p_2 между распорками, а по ним уже найти параметры нормального ЗРВ указанных расстояний и при принятом расстоянии между распорками вычислить по известному ЗРВ риск схлестывания проводов в фазе. Данные действия производятся в последовательности:

- определяются квантили порядков p_1 и p_2 межпроводных усилий в фазе при трехфазном КЗ

$$f_{цр1} = \frac{n-1}{n^2} \cdot 2 \cdot 10^{-7} \frac{i_{\text{пор}p_1}^{(3)2}}{d_c} = \frac{2-1}{2^2} \cdot 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{30159^2}{0,0666} = 682,9 \text{ Н/м},$$

$$f_{цр2} = \frac{n-1}{n^2} \cdot 2 \cdot 10^{-7} \frac{i_{\text{пор}p_2}^{(3)2}}{d_c} = \frac{2-1}{2^2} \cdot 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{949^2}{0,0666} = 0,676 \text{ Н/м},$$

где $n=2$ – число проводов в фазе;

- находятся квантили порядков p_1 и p_2 предельных расстояний между распорками:

$$l_{цр1} = k\sigma_a \cdot 10^3 \sqrt{\frac{(k-1)\sigma_a \cdot 24 \cdot \beta}{(\gamma_{ap_1} + k\gamma)(\gamma_{ap_1} - k\gamma)}} =$$

$$= 1,8 \cdot 87 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{\frac{(1,8-1) \cdot 87 \cdot 24 \cdot 159 \cdot 10^{-13}}{(2,276 + 1,8 \cdot 0,04) \cdot (2,276 - 1,8 \cdot 0,04)}} = 11,32 \text{ м},$$

$$l_{цр2} = k\sigma_a \cdot 10^3 \sqrt{\frac{(k-1)\sigma_a \cdot 24 \cdot \beta}{(\gamma_{ap_2} + k\gamma)(\gamma_{ap_2} - k\gamma)}} =$$

$$= 1,8 \cdot 87 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{\frac{(1,8-1) \cdot 87 \cdot 24 \cdot 159 \cdot 10^{-13}}{(0,002 + 1,8 \cdot 0,04) \cdot |(0,002 - 1,8 \cdot 0,04)|}} = 360 \text{ м},$$

где $k=1,8$ – коэффициент допустимого увеличения механического напряжения в проводах фазы при КЗ,

$\beta = 159 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/\text{Н}$ – коэффициент упругого удлинения алюминиевого провода,

$$\gamma_{ap_1} = f_{цр1} / q_{\text{п}}, \quad \gamma_{ap_2} = f_{цр2} / q_{\text{п}}, \quad q_{\text{п}} \text{ – сечение провода,}$$

$$\sigma_a = 87 \text{ Н/мм}^2 = 87 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2 = 87 \text{ МПа},$$

$$\gamma = 0,04 \text{ Н/м} \cdot \text{мм}^2 = 0,04 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^3 = 0,04 \text{ МПа/м};$$

- определяются параметры МО $m(L_{\text{ц}})$, СКО $\sigma(L_{\text{ц}})$ нормального ЗРВ расстояния $L_{\text{ц}}$ между распорками по (6,7) как убывающей зависимости от тока КЗ:

$$m(L_{\text{ц}}) = \frac{l_{цр1} + l_{цр2}}{2} = \frac{11,32 + 360}{2} = 185,7 \text{ м},$$

$$\sigma(L_{\text{ц}}) = \frac{l_{\text{ц}p_1} - l_{\text{ц}p_2}}{6} = \frac{|11,32 - 360|}{6} = 58,1 \text{ м},$$

- определяются расстояния между распорками, исходя из заданного риска r_c схлестывания проводов в фазе при КЗ:

$$l_{\text{ц}r_c} = m(L_{\text{ц}}) + \sigma(L_{\text{ц}})\Phi^{-1}(r_c - 0,5) = 185,7 + 58,1 \cdot \Phi^{-1}(0,001 - 0,5) = 5,59 \text{ м},$$

где r_c – заданный риск схлестывания проводов, можно принять 0,001.

5.3. Гибкие сборные шины распределительного устройства 500 кВ Сургутской ГРЭС – 1

Проверка гибких сборных шин в эксплуатационных условиях выполняется по ДД току, а в аварийных условиях по термическому и динамическому действию токов КЗ аналогично как это выполнено в п. 5.2. Сборные шины 500 кВ Сургутской ГРЭС – 1 выполнены проводом 3×АС300/48 с массой одного метра [9] $3 \cdot 1,186 = 3,558$ кг/км.

5.3.1. Проверка по току в эксплуатационных условиях

Присоединения к сборным шинам 500 кВ Сургутской ГРЭС – 1 выполнены в виде 5 линий, 5 укрупненных блоков 2×200 МВт и двух связей на высшем напряжении автотрансформаторов 3×167 МВА. Возможные максимальные перетоки мощностей определяются консолью электропитания или выдачи мощности одного из названных присоединений. Анализ показывает, что максимальный переток будет определяться одной из линий 500 кВ, который, исходя из сечения проводов, равен около 2000 МВт или 2200 А. Приведенную величину тока следует рассматривать как максимально-наблюдаемую величину или квантиль тока порядка $p_1 = 0,9987$. Минимально-наблюдаемая величина перетока по сборным шинам определяется минимально-возможной загрузкой линии, которая принимается в соответствии с минимальной загрузкой тепловых агрегатов, равной 30% от максимальной загрузки с учетом снижения ЭДС в поперечной оси в данном режиме, т.е. $0,3 \cdot 2000 \cdot \frac{1}{1,9} = 315,8$ А. Эта величина рассматривается как квантиль порядка $p_2 = 0,0013$. На основании полученных результатов определяются параметры нормального ЗРВ, т.е.

$$\text{МО } m(I_3) = \frac{i_{p_1} + i_{p_2}}{2} = \frac{2000 + 315,8}{2} = 1157,9 \text{ А},$$

$$\text{СКО } \sigma(I_3) = \frac{i_{p1} - i_{p2}}{6} = \frac{2000 - 315,8}{6} = 280,7 \text{ А.}$$

Параметры нормального ЗРВ ДД тока как принято ранее определяются:

$$\text{МО } m(I^{\text{ДД}}) = i_{\text{ДД}}^{\text{К}} = 690 \cdot 3 = 2070 \text{ А,}$$

$$\text{СКО } \sigma(I^{\text{ДД}}) = 0,06m(I^{\text{ДД}}) = 0,06 \cdot 2070 = 124,2 \text{ А.}$$

Риск перегрузки сборных шин $3 \times \text{АС300/48}$

$$r_{\text{П}} = 1 - \Phi \left[\frac{i_{\text{pp}} - m(I_3)}{\sigma(I_3)} \right] + \Phi \left[\frac{i_{\text{pp}} - m(I^{\text{ДД}})}{\sigma(I^{\text{ДД}})} \right].$$