

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

СЕВЕРО-КАВКАЗСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ

А.В. Гурин
И.А. Гурина

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Учебное пособие
для обучающихся направления подготовки
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Черкесск
2024

УДК 621.311
ББК 31.27
Г 95

Рассмотрено на заседании кафедры «Электроснабжение»
Протокол № 1 от 01.09.2023 г.
Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом СКГА
Протокол № 26 от 29.09.2023 г.

Рецензенты: Джендубаев А-З.Р., д.т.н., зав. кафедрой
«Электроснабжение»

Г 95 **Гурин, А.В.** Электромагнитные переходные процессы: учебное пособие для обучающихся направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» / И.А. Гурина – Черкесск: БИЦ СКГА, 2024. – 56 с.

Учебное пособие содержит краткий теоретический материал по анализу электромагнитных переходных процессов в электроэнергетических системах, их влиянию на режимы работы электротехнического оборудования.

Учебное пособие предназначено для обучающихся направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» (профиль «Электроснабжение»)

УДК 621.311
ББК 31.27

© Гурин А.В., Гурина И.А. 2024
© ФГБОУ ВО «СКГА», 2024

Содержание

Введение. Цели, задачи изучения дисциплины	5
1. Основные понятия и определения	6
2. Общие сведения о переходных процессах	16
3. Виды, причины и последствия короткого замыкания (КЗ)	21
4. Расчетные схемы цепей КЗ и параметров их элементов. Схемы замещения и приведения параметров ее элементов к базисным условиям	26
4.1 Выбор расчетных условий	26
4.2. Расчетная схема	27
4.3. Расчетный вид КЗ	27
4.4. Расчетная точка КЗ	27
4.5. Расчетная продолжительность короткого замыкания	28
4.6. Схемы замещения и приведения параметров ее элементов к базисным условиям	29
4.7. Составление схемы замещения по расчетной схеме	30
4.8. Преобразование схем замещения. Основные расчетные приемы	31
5. Точные и приближенные методы расчета	34
5.1. Точное приведение элементов схемы замещения в именованных единицах	34
5.2. Приближенное приведение схемы замещения в именованных единицах	35
5.3. Система относительных единиц. Точное и приближенное приведение в относительных единицах	35
6. Практические методы расчета ТКЗ	37
6.1. Метод расчетных кривых в произвольный момент времени	37
6.2. Метод расчетных (типовых) кривых	37
7. Начальный ток КЗ от групп асинхронных и синхронных электродвигателей, от комплексной нагрузки	39
7.1. Расчет периодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания от синхронных электродвигателей в произвольный момент времени	39
7.2. Расчет периодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания от асинхронных электродвигателей в произвольный момент времени	41
7.3. Тока КЗ от конденсаторных батарей поперечной компенсации	42

7.4. Учет комплексной нагрузки при расчетах токов короткого замыкания	43
8. Ударный ток короткого замыкания	44
9. Особенности расчета ПП при нарушении симметрии	47
9.1. Метод симметричных составляющих	47
9.2. Двухфазное короткое замыкание	50
9.3. Однофазное короткое замыкание	50
9.4. Двухфазное короткое замыкание на землю	51
Рекомендуемая литература	53

Введение. Цели, задачи изучения дисциплины.

В начале практического использования электрической энергии генераторы, двигатели и другие элементы электроустановок выполнялись с учетом лишь требований для нормальных условий работы. Первые электрические машины и электроустановки будучи маломощными, обладали достаточным запасом стойкости против механических, тепловых и других воздействий как в рабочих режимах, так и в аварийных ситуациях. С увеличением мощности электроустановок значительные отклонения от нормальных условий работы сопровождались серьезными последствиями. Потребовалась разработка специальных мероприятий и средств для обеспечения работы электроустановок в аварийных ситуациях. Успех планируемых мероприятий зависел от знаний процессов, происходящих в аварийных ситуациях, поэтому требовалось разработать приемлемые методы расчета работы электроустановок в аварийных режимах и увязать способы их защиты от повреждений с учетом переходных процессов, в также решить проблему устойчивости и другие задачи.

Создание территориальных объединенных энергетических систем и формирование Единой энергетической системы СССР способствовали широкому проведению специальных исследований вопросов внедрения противоаварийной автоматики, обеспечения устойчивости работы создаваемых систем. Возникла необходимость в нормировании требований к устойчивости объединенных энергетических систем. В 1964г. были изданы Основные положения и временные руководящие указания по определению устойчивости энергетических систем.

По мере развития энергетических систем и их объединений усложнились решаемые задачи применения различных средств анализа и их последующего совершенствования. На физических моделях исследовались переходные процессы в сложных энергетических системах, принципы действия и оптимизации настройки устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики, особенности режимов ЛЭП и др.

Моделирующие и расчетные устройства послужили основой для последующего создания и применения моделей переменного тока с динамическими элементами, моделирующими генераторами и нагрузками, а также устройств с использованием элементов аналоговой техники, статических моделей электрических сетей и элементов цифровой вычислительной техники.

В последние годы в качестве основных средств для расчета и анализа переходных процессов в электроустановках используются компьютеры. Большое внимание уделяется также созданию и применению гибридных комплексов, содержащих физическую модель, аналоговые элементы для имитации действующих регулирующих устройств и управляющую ЭВМ, которая позволяет автоматизировать управление и использовать современные методы обработки и контроля результатов исследования.

Выявлению особенностей и качественно новых свойств, появляющихся при объединении большого числа отдельных элементов в единую электрическую систему и пониманию возникающих явлений посвящена дисциплина «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах».

Однако только понимания недостаточно, нужно предвидеть какие процессы будут протекать и управлять ими. Для этого надо уметь рассчитывать процессы, предсказывая по изменениям параметров системы количественные изменения ее режима, устанавливать, когда и какие воздействия должны получать элементы системы от регулирующих устройств, для того чтобы переходный процесс приобрел желательный характер.

Необходимо знать математические модели, описывающие протекающие процессы, расчетные формулы, терминологию, важнейшие понятия, основные параметры электрических систем и их элементов, значения физических величин, участвующих в процессах.

Переход к математическим моделям, программам для расчетов, приводят к тому, что физические вопросы рассчитываемых процессов неизбежно скрывается. Между тем именно роль физико-технических представлений особенно велика в современных условиях, когда управление переходными процессами средствами автоматики и вычислительной техники становится главной задачей специалиста, проектирующего и эксплуатирующего электроэнергетические системы. Поэтому при изучении дисциплины особое внимание должно уделяться физической стороне проблемы.

Следовательно, предметом изучения являются переходные взаимосвязанные электромагнитные и механические процессы в электрических системах, а также установившиеся режимы, предшествовавшие переходным процессам и заканчивающие их.

Требуется получить представление о мероприятиях, обеспечивающих нормальную работу системы при малых возмущениях (статическая устойчивость) и благополучный исход различных аварийных режимов (динамическая и результирующая устойчивость).

Знание поведения системы после любых возмущений оказывается, необходимым для оценки действия устройств автоматического регулирования, правильного их выбора и обеспечения работы системы в нормальных и аварийных условиях.

1. Основные понятия и определения

Авария в энергосистеме – нарушение нормального режима работы всей или значительной части энергетической системы, связанное с повреждением оборудования, временным недопустимым ухудшением качества электрической энергии или перерывом в электроснабжении потребителей.

Автоматика ликвидации асинхронного режима (АЛАР) –устройства противоаварийной автоматики, осуществляющие управляющее воздействие на скорость вращения роторов генераторов электростанций или действующие на деление энергосистемы на несинхронно работающие части.

Автоматика предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ) энергосистемы (района) - автоматика, предназначенная для предотвращения нарушения устойчивости параллельной работы электростанций, энергосистем, устойчивости узлов двигательной нагрузки при аварийных возмущениях (АВ) и обеспечения в послеаварийных режимах нормативного запаса статической устойчивости, осуществляющая контроль режима района управления, фиксацию АВ, выбор и реализацию необходимых управляющих воздействий.

Автоматическое противоаварийное управление – управление режимом энергосистемы посредством специальных автоматических устройств. Цель заключается в предотвращении развития нарушений нормального режима, сопровождающихся высокой скоростью изменения его параметров, при которой неэффективны системы автоматического и оперативно-диспетчерского управления нормальными режимами.

Автоматическая частотная разгрузка (АЧР) – автоматическое устройство, отключающее часть нагрузки энергосистемы в случае снижения частоты ниже допустимого уровня.

Автоматическое ограничение повышения напряжения (АОПН) – устройство противоаварийного управления, воздействующее на автоматические регуляторы возбуждения генераторов и синхронных компенсаторов и на включение шунтирующих реакторов или на отключение линии электропередачи при повышении напряжения выше допустимого уровня.

Автоматическое ограничение повышения частоты (АОПЧ) – устройство противоаварийного управления, воздействующее на отключение части генераторов электрических станций, при повышении частоты сверх заданного значения.

Автоматическое ограничение снижения напряжения (АОСН) – устройство противоаварийного управления, воздействующее на автоматические регуляторы возбуждения генераторов и синхронных компенсаторов, на отключение шунтирующих реакторов, включение источников реактивной мощности, отключение нагрузки при снижении напряжения ниже допустимого уровня.

Автоматическое ограничение снижения частоты (АОСЧ) – автоматика для ограничения снижения частоты, воздействующая на: автоматический частотный ввод резерва; автоматическую частотную разгрузку; дополнительную разгрузку; выделение электрических станций или генераторов на питание собственных нужд электростанций; включение питания отключенных потребителей при восстановлении частоты.

Автоматическое предотвращение перегрузки оборудования (АОПО) – автоматика, которая воздействует на отключение потребителей,

деление системы и на отключение перегруженного оборудования при токовой перегрузке данного оборудования сверх допустимой величины в течение заданного времени.

Автоматическое регулирование возбуждения (АРВ) – изменение автоматическим устройством (регулятором) тока ротора синхронной электрической машины, обеспечивающее заданное в нормальном режиме или максимальное технически достижимое в аварийном режиме напряжение на шинах электростанции или подстанции.

Автоматическое регулирование напряжения и реактивной мощности – автоматическое поддержание требуемых значений напряжения и реактивной мощности путем воздействия на возбуждение синхронных электрических машин и других источников реактивной мощности (конденсаторные батареи, статические тиристорные компенсаторы), а также путем автоматического изменения коэффициентов трансформации трансформаторов и автотрансформаторов.

Апериодическая составляющая тока – составляющая тока, изменяющаяся по экспоненциальному закону.

Асинхронный режим – режим энергосистемы, характеризующийся устойчивыми глубокими периодическими колебаниями напряжений, токов и мощностей, периодическим изменением взаимного угла ЭДС генераторов электрической станций и наличием разности частот между частями синхронной зоны при сохранении электрической связи между ними.

Асинхронный режим синхронной машины – режим синхронной машины при частоте вращения ротора, отличающейся от синхронной.

Астатическое регулирование – регулирование, имеющее целью сведение к нулю установившегося значения отклонения регулируемого параметра. Реализация автоматического астатического регулирования обеспечивается интегральным (пропорционально-интегральным) регулятором.

Баланс мощности энергосистемы – система показателей, характеризующая соответствие суммы значений нагрузки энергосистемы и необходимой резервной мощности величине располагаемой мощности энергосистемы.

Баланс электроэнергии энергосистемы – система показателей, характеризующая соответствие потребления электроэнергии в энергосистеме, расхода ее на собственные нужды и потерь в электрических сетях величине выработки электроэнергии в энергосистеме с учетом перетоков мощности из других энергосистем.

Большая электроэнергетическая система – протяженное и, как правило, транснациональное энергообъединение с различной оперативной политикой, технико-экономическими характеристиками и показателями надежности оборудования, необходимостью учета контрактных поставок и приоритетности оказания взаимопомощи

Вторичное регулирование частоты и перетоков активной мощности (вторичное регулирование) – процесс компенсации возникающих

в области регулирования небалансов мощности путем изменения мощности электростанций под воздействием центрального регулятора (автоматическое) или по командам диспетчера (оперативное) для поддержания плановых обменов мощностью между энергосистемами, восстановления нормального уровня частоты, а также ликвидации перегрузки транзитных связей и сечений.

Глухозаземленная нейтраль – нейтраль источника, непосредственно соединенная с землей.

Демпферная обмотка – дополнительная обмотка на роторе синхронной машины.

Динамическая устойчивость энергосистемы – способность энергосистемы возвращаться к установившемуся режиму после значительных нарушений без перехода в асинхронный режим.

Единая энергетическая система России (ЕЭС России) – совокупность производственных и иных имущественных объектов электроэнергетики, связанных единым процессом производства (в том числе производства в режиме комбинированной выработки электрической и тепловой энергии) и передачи электроэнергии в условиях централизованного оперативно-диспетчерского управления в электроэнергетике.

Единая национальная (общероссийская) электрическая сеть – комплекс электросетей и иных объектов электросетевого хозяйства, принадлежащих на праве собственности или на ином предусмотренном федеральными законами основании, субъектам электроэнергетики и обеспечивающих устойчивое снабжение электроэнергией потребителей, функционирование оптового рынка, а также параллельную работу российской электроэнергетической системы и электроэнергетических систем иностранных государств.

Изолированная нейтраль – нейтраль источника, не имеющая соединения с землей.

Интеграл Джоуля – параметр, характеризующий термическое действие тока.

Компенсированная нейтраль – нейтраль источника, соединенная с землей через индуктивность.

Короткое замыкание – внезапное резкое уменьшение сопротивления цепи, подключенной к источнику напряжения.

Комплексная схема замещения – схема, включающая в себя схемы прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Концентрированная электроэнергетическая система – ЭЭС, пропускная способность связей которой (в том числе при плановых и аварийных ремонтах сетевых элементов) не ограничивает использование мощности электростанций в любой точке потребления.

Критическое напряжение в энергосистеме - предельное наименьшее значение напряжения в узлах энергосистемы по условиям статической устойчивости.

Крутизна статической частотной характеристики энергосистемы (энергообъединения) – коэффициент линеаризованной зависимости мощности первичного регулирования энергосистемы от отклонения частоты.

Лавина напряжения в энергосистеме – явление лавинообразного снижения напряжения вследствие нарушения статической устойчивости энергосистемы (нарушения устойчивости работы асинхронных двигателей) и нарастающего дефицита реактивной мощности.

Лавина частоты в энергосистеме – явление лавинообразного снижения частоты в энергосистеме, из-за нарастания дефицита активной мощности.

Максимально допустимый переток – наибольший допустимый переток мощности в сечении в нормальном режиме, удовлетворяющий требованиям к устойчивости энергосистемы.

Математическая модель – описание режима электроэнергетической системы в виде математических соотношений, устанавливающих количественные связи между основными параметрами, его характеризующими

Межсистемная связь – линия или участок линии электропередачи, непосредственно соединяющие электростанции или подстанции разных энергосистем.

Мертвая полоса первичного регулирования ($\pm \Delta f_0$) – диапазон фактических отклонений частоты тока от номинального значения, в котором энергоблок может не изменять свою мощность, определяемый как сумма точности локального измерения частоты и зоны нечувствительности первичных регуляторов.

Метод симметричных составляющих – метод расчета несимметричных режимов электроэнергетической системы, базирующийся на математической теории многофазных электрических систем при неодинаковых условиях работы фаз.

Надежность энергосистемы – комплексное свойство энергетической системы, определяющее ее способность выполнять заданные функции по производству, передаче, распределению и потреблению электроэнергии при сохранении своих основных характеристик (при установленных отраслевыми правилами условиях эксплуатации) в допустимых пределах.

Нормированное первичное регулирование частоты в энергосистеме – первичное регулирование, осуществляемое в целях обеспечения гарантированного качества первичного регулирования и повышения надёжности энергосистемы (энергообъединения) выделенными электростанциями (энергоблоками), на которых запланированы и постоянно поддерживаются резервы первичного регулирования, обеспечено их эффективное использование в соответствии с заданными характеристиками (параметрами).

Нулевая последовательность – система, состоящая из трех одинаковых векторов, совпадающих по направлению друг с другом.

Обобщенный вектор трехфазной системы – вектор, проекции которого на три оси времени дают его мгновенные значения в отдельных фазах.

Обобщённая нагрузка – совокупность различных электроприемников, подключенных к шинам источника питания

Обратная последовательность – система трех равных векторов, сдвинутых по фазе на 120° , с обратным порядком чередования векторов.

Объединенная энергосистема (ОЭС) – совокупность нескольких энергетических систем, объединенных общим режимом работы, имеющая общее диспетчерское управление.

Общее первичное регулирование частоты в энергосистеме – первичное регулирование, осуществляемое всеми эл. станциями в пределах, имеющихся в данный момент времени регулировочных возможностей систем первичного регулирования эл. станций (энергоблоков) с характеристиками систем первичного регулирования, заданными действующими нормативами, и имеющее целью сохранение энергоснабжения потребителей и функционирования эл. станций при аварийных отклонениях частоты.

Опрокидывание электродвигателя – остановка двигателя по причине снижения напряжения на его зажимах.

Относительное значение величины – отношение этой величины к заранее принятой базисной величине.

Первичное регулирование мощности электростанций – процесс изменения мощности электростанций под воздействием систем первичного регулирования, вызванный изменением частоты и направленный на уменьшение этого изменения.

Первичное регулирование мощности нагрузки потребителей – изменение мощности потребителей при изменении частоты вследствие саморегулирования.

Первичное регулирование частоты в энергосистеме (первичное регулирование) – совместное первичное регулирование мощности потребителей и эл. станций.

Периодическая составляющая тока – составляющая тока, изменяющаяся по синусоидальному закону.

Преобразование координат – переход от одной системы координат к другой системе координат.

Поперечная ось синхронной машины – ось синхронной машины, направленная между полюсами ротора.

Продольная ось синхронной машины – ось синхронной машины, направленная по полюсам ротора.

Простейшая трёхфазная схема – симметричная трёхфазная цепь с сосредоточенными параметрами при отсутствии трансформаторных связей.

Прямая последовательность – система трех равных векторов, сдвинутых по фазе на 120° , с тем же порядком чередования, что и в несимметричной системе.

Противоаварийная автоматика – совокупность устройств измерения и обработки параметров режима, передачи информации и команд управления, объединенных в единый комплекс автоматики, реализующий управляющие воздействия в соответствии с заданными алгоритмами и настройкой для предотвращения развития аварий в ЭЭС, их локализации и ликвидации.

Рабочая мощность – располагаемая мощность энергосистемы с учетом снижения мощности вследствие вывода в ремонт оборудования электростанций.

Располагаемая мощность – установленная мощность энергосистемы с учетом имеющихся ограничений по мощности и возможных длительно допустимых перегрузок оборудования в данный момент времени.

Реакторный пуск двигателя – пуск двигателя через реактор, включенный между шинами и двигателем.

Регулирующий эффект нагрузки – электроэнергетической системы:
– по **напряжению** (регулирующий эффект нагрузки по напряжению) – изменение активной или реактивной мощности нагрузки электроэнергетической системы при изменении напряжения на ее шинах, препятствующее данному возмущению.

– по **частоте** (регулирующий эффект нагрузки по частоте) – изменение активной или реактивной нагрузки электроэнергетической системы при изменении частоты, препятствующее данному возмущению

Режим энергосистемы – единый процесс производства, преобразования, передачи и потребления эл. энергии в энергосистеме, характеризуемый его техническими параметрами, состоянием объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок потребителей электроэнергии (включая схемы электрических соединений объектов электроэнергетики).

Режим энергосистемы нормальный (нормальный режим энергосистемы) – режим энергосистемы, при котором все потребители снабжаются электроэнергией в соответствии с договорами и диспетчерскими графиками, а значения технических параметров режима энергосистемы и оборудования находятся в пределах длительно допустимых значений, имеются нормативные оперативные резервы мощности и топлива на электростанциях.

Режим энергосистемы аварийный (аварийный режим энергосистемы) – режим энергосистемы с параметрами, выходящими за пределы требований технических регламентов, возникновение и длительное существование которого представляют недопустимую угрозу жизни людей, повреждения оборудования и/или ведут к ограничению подачи электрической и тепловой энергии в значительном объеме.

Режим энергосистемы послеаварийный – режим, в котором энергосистема находится после локализации аварии до установления нормального или вынужденного режима.

Режим энергосистемы вынужденный – режим энергосистемы, при котором нагрузка некоторых сечений выше максимально допустимой, но не превышает аварийно-допустимую.

Режимная автоматика – совокупность устройств измерения и обработки параметров режима, передачи информации и команд управления, объединенных в единый комплекс автоматики, реализующий воздействия на органы управления энергетического оборудования в соответствии с заданными алгоритмами и настройкой для регулирования параметров режима энергосистемы (частоты электрического тока, напряжения, активной и реактивной мощности).

Резерв генерирующей мощности – мощность, которая при необходимости может быть использована для покрытия дефицита мощности энергосистемы.

Резерв мощности – мощность, которая при необходимости может быть использована диспетчером для покрытия максимума нагрузок. В том числе:

– **аварийный** – резерв мощности, необходимый для восполнения аварийного понижения генерирующей мощности в энергосистеме.

– **оперативный** – часть резерва мощности, предназначенная для компенсации небаланса между производством и потреблением, вызванного отказами, аварийным или случайным снижением рабочей мощности энергосистемы, или непредвиденным увеличением нагрузки потребителей в режиме реального времени.

– **перспективный технологический** – совокупность генерирующих объектов, созданных для покрытия прогнозируемого дефицита электрической мощности и используемых с момента их создания как для производства электрической энергии, так и для поддержания оперативного технологического резерва мощностей в порядке, установленном законодательством об электроэнергетике.

– **расчетный** – резерв мощности, необходимый для обеспечения нормальной работы энергосистемы в процессе ее развития и эксплуатации, равный сумме расчетных величин оперативного, ремонтного и стратегического резервов.

– **ремонтный** – резерв мощности, необходимый для возмещения мощности оборудования, выводимого в ремонт.

– **стратегический** – планируемый на перспективу резерв мощности, предназначенный для полной или частичной компенсации непредвиденных заранее нарушений балансов мощности, вызванных причинами, которые не учитываются при определении других видов резервов мощности (оперативного и ремонтного) и которые являются внешними для электроэнергетики.

– **энергосистемы полный** – резерв активной мощности, равный разности между располагаемой мощностью энергосистемы и нагрузкой ее в момент годового максимума при нормальных показателях качества электроэнергии и с учетом сальдо перетоков.

– **эксплуатационный** – резерв активной мощности в данный момент времени, равный разности между рабочей мощностью и нагрузкой энергосистемы при нормальных показателях качества электрической энергии и с учетом сальдо перетоков.

Ресинхронизация – автоматическая или самопроизвольная ликвидация асинхронного режима синхронной машины.

Самозапуск электродвигателей – пуск группы двигателей после кратковременного перерыва питания, за который двигатели успели затормозиться.

Сальдо переток мощности (сальдо-переток) – алгебраическая сумма перетоков мощности по всем межсистемным связям данной энергосистемы с другими энергосистемами.

Сечение (в электрической сети) – совокупность таких сетевых элементов одной или нескольких связей, отключение которых приводит к полному разделению энергосистемы на две изолированные части.

Соппротивление синхронное – сопротивление синхронной машины в установившемся режиме работы.

Системная надежность (надежность ЭЭС) – комплексное свойство (способность) ЭЭС выполнять функции по производству, передаче, распределению и электроснабжению потребителей электроэнергией в требуемом количестве и нормированного качества путем технологического взаимодействия генерирующих установок, электрических сетей и электроустановок потребителей.

Системы возбуждения – машины и аппараты для создания тока ротора синхронной электрической машины (тока возбуждения) и управления им с помощью регулирующих устройств.

Синхронная зона – совокупность всех синхронно работающих энергосистем, имеющих общую системную частоту электрического тока.

Система глобального позиционирования (Global Positioning System (GPS)), Глобальная навигационная система России (ГЛОНАСС) – спутниковые навигационные системы, состоящие из множества работающих в единой сети спутников, находящихся на нескольких орбитах над поверхностью Земли. Внутренние часы приемника сигнала постоянно синхронизируются с прецизионными атомными часами, установленными на спутниках, что позволяет обеспечить точность измерения времени от микро до наносекунд.

Система мониторинга переходных режимов ЭЭС/ОЭС (СМНР). Глобальная система векторных измерений (Wide Area Measurement System (WAMS)) - система регистрации синхронизированной информации о режиме энергосистемы в реальном времени, применяемая для мониторинга этого режима и управления им.

Системный регулятор – устройство, воздействующее на энергетическое оборудование объекта электроэнергетики или энергопринимающего устройства с целью обеспечения устойчивой работы оборудования и энергосистемы в целом.

Сопротивление переходное – сопротивление синхронной машины в начальный момент КЗ при отсутствии на роторе демпферных обмоток.

Сопротивление сверхпереходное – сопротивление синхронной машины в начальный момент КЗ при наличии на роторе демпферных обмоток.

Статическая устойчивость – способность системы возвращаться в исходное состояние или близкое к нему после малых возмущений.

Статическая частотная характеристика энергообъединения – зависимость величины первичной мощности, выдаваемой в соответствии с принципом совместного участия в первичном регулировании частоты синхронно работающих энергосистем, от отклонения частоты в энергообъединении от номинальной.

Третичное регулирование активной мощности в энергосистеме (третичное регулирование) – процесс изменения мощности электростанций под воздействием центрального регулятора (автоматическое) или по команде диспетчера (оперативное) в целях восстановления вторичного резерва по мере его исчерпания, а также для осуществления оперативной коррекции режима в иных целях.

Ударный ток короткого замыкания – максимальное мгновенное значение полного тока короткого замыкания, возникающее при определенных режимных условиях электрической сети.

Управляющее воздействие – воздействие на объект управления для достижения целей управления. Интенсивность управляющего воздействия – совокупность параметров, характеризующих величину и вид управляющего воздействия.

Устройство векторных измерений (Phasor Measurement Unit (PMU)) – устройство, предназначенное для синхронизированной записи значений тока и напряжения в режиме реального времени, которые могут быть использованы для мониторинга и оценки состояния энергосистемы. Синхронность измерений достигается применением технологии GPS (ГЛОНАСС).

Цифровая расчетная модель – база данных, позволяющая проводить расчет режима электроэнергетической системы с помощью соответствующей математической модели.

Шунт несимметричного короткого замыкания – сопротивление, включаемое между началом и концом схемы замещения прямой последовательности и определяемое величинами результирующих сопротивлений схем замещения обратной и нулевой последовательностей.

ЭДС синхронная – ЭДС синхронной машины в установившемся режиме.

ЭДС переходная – ЭДС синхронной машины в начальный момент КЗ при отсутствии на роторе демпферных обмоток.

ЭДС сверхпереходная – ЭДС синхронной машины в начальный момент КЗ при наличии на роторе демпферных обмоток

Электрический центр качаний – точка электросети, характеризующаяся максимальным снижением напряжения при взаимных колебаниях или проворотах роторов генераторов электрически связанных частей энергосистемы, а также сменой знака мощности по линиям электропередачи, связывающим эти части между собой. В асинхронном режиме напряжение в электрическом центре качаний снижается до нуля.

Энергетическая система (энергосистема) – совокупность электростанций, электрических и тепловых сетей, соединенных между собой и связанных общностью режима (работающих параллельно) в непрерывном процессе производства, преобразования и распределения электроэнергии и тепла при общем управлении этим режимом.

Электроэнергетическая система – электрическая часть энергетической системы, в которой осуществляются выработка, преобразование, передача и потребление электроэнергии и которая рассматриваемая как единое целое в отношении протекающих в ней физических процессов.

Энергообъединение – множество энергосистем, работающих синхронно.

2. Общие сведения о переходных процессах

Энергосистема – совокупность электрических станций, линий электропередачи, подстанций, тепловых сетей, вспомогательного оборудования и сооружений, связанных общностью режима и непрерывностью процесса производства, преобразования, передачи, распределения и потребления электрической и тепловой энергии.

Электроэнергетическая система (ЭЭС) – условно выделенная часть энергосистемы, в которой генерируется, преобразуется, передается и потребляется электрическая энергия (рис. 1). Часть электрической системы, непосредственно осуществляющая снабжение электрической энергией потребителей, называется системой электроснабжения.

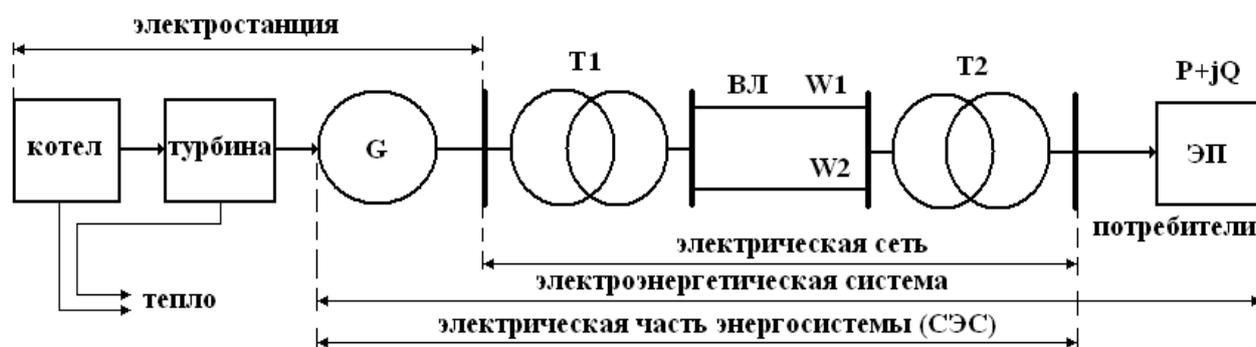


Рисунок 1. – Электроэнергетическая система и ее элементы.

Элементы электроэнергетической системы делятся на две группы:

1. Силовые элементы – вырабатывающие (генераторы), преобразующие (трансформаторы, выпрямители, инверторы), передающие, распределяющие (ЛЭП, сети) и потребляющие (нагрузки, электроприемники) электроэнергию.

2. Элементы управления – реагирующие на возмущения и изменяющие состояние системы (регуляторы возбуждения, частоты, скорости вращения роторов синхронных машин, устройства релейной защиты и автоматики).

Поведение электроэнергетической системы определяется ее режимом. **Режим ЭЭС** – некоторое ее состояние, определяемое значениями мощностей, напряжений, токов, частоты, схемой соединения элементов системы и другими физическими переменными величинами, характеризующими процесс функционирования системы. Относя термин «режим» к некоторому интервалу времени, обычно указывают величину или другие признаки этого интервала:

- предшествующий режим – режим работы электроустановки непосредственно перед моментом возникновения короткого замыкания;
- режим после отключения короткого замыкания;
- режим до срабатывания релейной защиты и т.п.

Следует различать параметры режима и параметры системы.

Параметры режима – показатели, определяющие работу системы. К ним относятся: значения мощности, напряжения, тока, частоты, углов сдвига векторов ЭДС и напряжений (δ) и т.д.

Параметры системы – показатели, количественно определяющиеся физическими свойствами элементов системы, схемой их соединения и рядом допущений расчетного характера. К ним относятся: значения активных, реактивных, полных сопротивлений, собственных и взаимных проводимостей, коэффициентов трансформации, постоянных времени и т.п.

Параметры режима связаны между собой соотношениями, в которые входят параметры системы. Например, $I=U/R$, где I , U – параметры режима, R – параметр системы.

Любые переходные режимы возникают в результате изменения параметров системы, вызванных какими-либо причинами. Эти причины называются возмущающими воздействиями.

Ряд параметров системы может нелинейно зависеть от параметров режима. Такая система называется нелинейной. Например - вследствие нагрева активное сопротивление проводника изменяется. Однако во многих практических задачах параметры этой системы можно полагать неизменяющимися, считая систему линейной. Другой вид нелинейности, который уже приходится учитывать, вызван характером соотношений между параметрами режима системы:

$$P = \frac{U^2}{R}; P = \frac{U_1 \cdot U_2}{x_c} \cdot \sin \delta, \quad (2.1)$$

где: R , x_c – параметры системы; P , U , δ – параметры режима.

Режим электрической системы может быть *установившимся* или *переходным* (неустановившимся). Различают следующие основные режимы электроэнергетических систем:

- *нормальные установившиеся режимы*, при которых значения параметров режима остаются неизменными или изменяются медленно, в пределах, соответствующих нормальной работе элементов системы с

оптимальными технико-экономическими характеристиками. Применительно к ним проектируется электрическая система, и определяются ее технико-экономические показатели;

– *переходные режимы* имеют место при переходе от одного установившегося режима к другому и характеризуются относительно быстрым и резким изменением параметров режима;

– *нормальные переходные режимы* возникают при нормальной эксплуатации электрической системы и связаны с переходом из одного нормального установившегося режима к другому; параметры в этих режимах близки к нормальным, хотя могут изменяться во времени достаточно быстро (включение и отключение каких-либо элементов системы, изменение нагрузки, несинхронные включения синхронных машин и т.п.);

– *аварийные установившиеся и переходные режимы* протекают в аварийных условиях (короткие замыкания, внезапные отключения, повторные включения и отключения, обрывы фаз, выпадение из синхронизма синхронных машин, нарушение устойчивой работы двигательной нагрузки и т.п.);

– *аварийные переходные режимы* характеризуются значительными изменениями параметров режима, выходящими за пределы допустимых значений. Для них определяются технические характеристики, связанные с длительностью ликвидации аварии и выясняются условия дальнейшей работы системы. Длительное существование аварийного переходного режима невозможно: электросистема в этих условиях не может полностью или частично выполнять свои функции;

– *послеаварийные установившиеся режимы* наступают после аварийного отключения одного или нескольких элементов системы с целью ликвидации аварии и сопровождаются изменением структуры системы. Параметры этого режима могут существенно отличаться от параметров нормального режима. В послеаварийном режиме система может работать с несколько ухудшенными технико-экономическими характеристиками по сравнению с доаварийным режимом.

Для электроустановок характерны 4 режима: нормальный, аварийный, послеаварийный, ремонтный. Из них аварийный режим является кратковременным, остальные – продолжительными. *Электрооборудование выбирается по параметрам продолжительных режимов и проверяется по параметрам кратковременных, определяющим из которых является режим короткого замыкания.* По режиму короткого замыкания электрооборудование проверяется на электродинамическую и термическую стойкость, а коммутационные аппараты – на коммутационную способность.

Режим короткого замыкания – режим работы электроустановки при наличии в ней короткого замыкания.

Переходные режимы связаны с возникновением переходных процессов, при которых происходит изменение электрического состояния элементов системы, по естественным причинам и работой устройств автоматики.

Процесс – последовательная смена состояний, стадий развития; совокупность последовательных действий для достижения какого-либо результата.

Переходный процесс в ЭЭС – явление, возникающее при переходе от одного режима системы к другому, отличающемуся от предыдущего амплитудой, фазой, формой или частотой напряжения, других параметров, ее структурой.

При переходе от одного режима к другому изменяется электромагнитное состояние элементов системы и нарушается баланс между механическим и электромагнитным моментами на валах генераторов и двигателей. Это означает, что переходный процесс характеризуется совокупностью электромагнитных и механических изменений в системе, которые взаимно связаны и представляют собой единое целое. Но часто *переходный процесс* делят на две стадии:

– *Электромагнитный переходный процесс* – процесс изменения во времени только электромагнитных параметров режима электроустановки без учета влияния на них изменения частоты вращения генераторов системы. Их длительность от сотых долей секунды до 0,1...0,2 с. с частотой 50 – 150 Гц.

– *Электромеханический переходный процесс* – переходный процесс, характеризуемый одновременным изменением значений электромагнитных и механических величин, определяющих состояние электроустановки. Скорость их протекания изменяется от 10 до 50 Гц.

Переходный процесс, начавшийся в момент возмущения режима в линейной системе, теоретически длится бесконечно долго. *Поэтому практически считают, что переходный процесс закончился и наступил установившийся режим, если характеризующие его параметры отличаются от своих установившихся значений на некоторую величину, значение которой относительно невелико.*

В любых переходных процессах происходят закономерные последовательные изменения параметров режима системы, вызванные какими-либо причинами, называемыми *возмущающими воздействиями*. Они создают начальные отклонения параметров режима – возмущения режима. Под возмущениями (большими или малыми) подразумеваются отклонения параметров режима энергосистем в начальной стадии переходного режима. Возмущения являются реакцией энергосистемы на возмущающие воздействия. Возмущающие воздействия условно разделяют на внешние и внутренние.

Как уже отмечалось, нормальные переходные процессы сопровождают текущую эксплуатацию системы. Они связаны в основном с *изменениями нагрузки системы, реакцией на это регулирующих устройств и возникают при обычных эксплуатационных операциях: включении и отключении отдельных элементов системы или изменениях их мощности.* При нормальной эксплуатации даже в установившемся режиме реальной электрической системы всегда имеются малые возмущающие воздействия,

вызывающие малые возмущения режима (*изменение нагрузки*). Следовательно, действия регулирующих устройств происходят непрерывно. Это означает, что строго неизменного режима в системе не существует, и, говоря об установившемся режиме, всегда имеют в виду режим малых возмущений. При этом предполагают, что отклонения параметров режима, связанные с этими возмущениями, происходят около некоторого условно принятого среднего исходного состояния. Поэтому *при малых колебаниях параметров режим допустимо считать установившимся*.

Малые возмущения не должны вызывать нарушения устойчивости системы, то есть не должны приводить к *утяжелению режима* - прогрессивно возрастающему изменению параметров ее исходного режима. Иначе говоря, электрическая система должна обладать статической устойчивостью.

Статическая устойчивость – это способность системы *восстанавливать исходный режим после малого его возмущения или режим, весьма близкий к исходному, если возмущающее воздействие не снято*. Для увеличения статической устойчивости необходим учет действия регуляторов возбуждения, особенно так называемых «сильного действия» с высоким «потолком возбуждения» и регулированием по отклонению нескольких параметров режима и скорости их изменения (по производным).

Нормальные и аварийные переходные процессы при *больших возмущениях в электрической системе возникают вследствие резких и существенных изменений параметров режима: при коротких замыканиях и последующем их отключении; при изменении схемы соединения системы; при нормальном включении или отключении линий электропередачи; при включении генераторов или крупных электродвигателей методом самосинхронизации и в других случаях*. Все это приводит к значительным отклонениям параметров режима от их исходного состояния, при которых необходимо учитывать нелинейности системы. По отношению к большим возмущениям вводят понятие динамической устойчивости.

Динамическая устойчивость – способность системы *восстанавливать после большого возмущения исходное состояние или близкое к исходному, допустимое по условиям эксплуатации системы*. Для повышения динамической устойчивости требуется форсировка возбуждения генераторов, быстрое отключение аварийных участков, применение специальных тормозящих устройств, отключение части генераторов и части нагрузки устройствами автоматической разгрузки по частоте (АЧР). Уменьшение передаваемой мощности будет способствовать сохранению в работе основной части системы.

Если после большого возмущения синхронная работа частей объединенной системы нарушается, а затем, после некоторого, допустимого по условиям эксплуатации перерыва, восстанавливается, то система считается имеющей результирующую (синхронную динамическую) устойчивость. Увеличение результирующей устойчивости обычно рассматривается как повышение живучести системы. Это достигается в

первую очередь регулированием мощности, выдаваемой генераторами и автоматическим отключением части потребителей.

Расчет токов короткого замыкания требуется для правильного разрешения ряда практических задач, возникающих при проектировании и эксплуатации электрических установок и СЭС. К числу этих задач относятся:

- выбор электрических аппаратов, проводников и проверка их по условиям работы при коротких замыканиях;
- выявление условий работы потребителей при аварийных режимах;
- проектирование и настройка устройств релейной защиты и автоматики (РЗА);
- выбор средств ограничения токов короткого замыкания;
- проектирование заземляющих устройств: определение числа заземленных нейтралей трансформаторов и расположение их в системе;
- определение влияния ЛЭП на линии связи;
- анализ аварий в электрических системах;
- подготовка к проведению различных испытаний в ЭЭС и др.

Точное вычисление токов короткого замыкания представляет значительные трудности. Для упрощения расчетов применяют ряд допущений. При этом погрешность не должна превышать 5 – 10%. Наибольшие требования в отношении точности расчетов ставит релейная защита. В остальных случаях представляется возможным ограничиться приближенным способом вычислений.

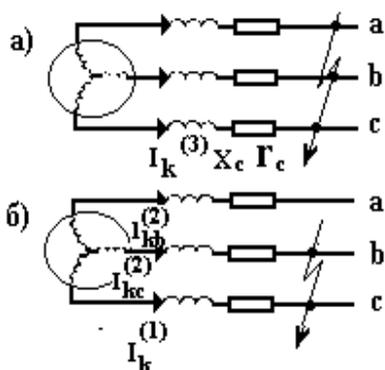
Контрольные вопросы и вопросы для самостоятельного изучения:

1. Какие задачи решаются при изучении переходных процессов?
2. Каковы отличия изучения переходных процессов в ЭЭС от переходных процессов, изучаемых в ТООЭ?
3. Какие задачи решаются на стадии электромагнитного переходного процесса?
4. Что такое «малые и большие возмущения»?
5. Что такое результирующая устойчивость системы?

3. Виды, причины и последствия короткого замыкания (КЗ)

Короткое замыкание – замыкание, при котором токи в ветвях электроустановки, примыкающих к месту его возникновения, резко возрастают, превышая наибольший допустимый ток продолжительного режима. Чтобы облегчить задачу исследования электромагнитных переходных процессов, КЗ принято классифицировать по виду, характеру и другим признакам.

В трехфазных системах возможны следующие основные виды КЗ (рис. 2):



1. **Трехфазное короткое замыкание $K^{(3)}$** – КЗ между тремя фазами в трехфазной ЭЭС (рис. 2, а).

2. **Двухфазное короткое замыкание $K^{(2)}$** – КЗ между двумя фазами в трехфазной ЭЭС (рис. 2, б).

3. **Однофазное короткое замыкание $K^{(1)}$** – КЗ на землю в трехфазной системе с глухо- или эффективно заземленными нейтральными силовых элементов, при котором с землей соединяется только одна фаза (рис. 2, в).

4. **Двухфазное короткое замыкание на землю $K^{(1,1)}$** – КЗ на землю в трехфазной системе с глухо- или эффективно заземленными нейтральными силовых элементов, при котором с землей соединяются две фазы (рис. 2, г).

Рисунок 2 – Виды коротких замыканий.

Возможны также одновременные КЗ в различных точках сети, представляющие собой разнообразные сочетания из указанных выше основных видов КЗ (Например, **двойное короткое замыкание на землю $K^{(1+1)}$** – совокупность двух однофазных КЗ на землю в различных, но электрически связанных частях электроустановки и др.).

В системах с изолированной нейтралью замыкание одной фазы на землю не является КЗ и называется **замыканием на землю $Z^{(1)}$** или **простым замыканием**.

В дальнейшем ограничимся рассмотрением лишь основных видов короткого замыкания.

В местах КЗ часто образуется электрическая **дуга, ее сопротивление нелинейно**. Учет влияния дуги на ток КЗ представляет собой сложную задачу. Кроме сопротивления дуги в месте КЗ возникает **переходное сопротивление**, вызываемое загрязнением, наличием остатков изоляции, гари и пр. В случае, когда **переходное сопротивление и сопротивлению дуги малы, ими пренебрегают**. Такое замыкание называют **металлическим**. **Расчет максимально возможных токов проводят для металлического КЗ**.

В трехфазных системах **все КЗ обычно делят на симметричные и несимметричные**. При **симметричном КЗ** все фазы электроустановки находятся в одинаковых условиях, а при **несимметричном КЗ** одна из фаз находится в условиях, отличных от условий для двух других фаз (такую фазу называют **особой**). К симметричным относится трехфазное КЗ, а к несимметричным относятся однофазное, двухфазное КЗ и двухфазное КЗ на землю.

Короткие замыкания могут быть и **видоизменяющимися**, т.е. переходящими из одного вида в другой, а также устойчивыми и неустойчивыми.

Устойчивыми называются КЗ, условия возникновения которых

сохраняются во время бестоковой паузы коммутационного электрического аппарата (выключателя), т.е. кратковременного отключения электрического аппарата с целью устранить причину КЗ с помощью временного обесточивания поврежденного элемента.

Неустойчивыми называются КЗ, условия возникновения которых самоликвидируются вовремя бестоковой паузы. К ним относятся, например, КЗ, вызванные перекрытием фаз воздушных линий электропередачи в результате грозových перенапряжений.

Согласно статистическим исследованиям, относительная частота различных видов КЗ зависит от напряжения сети (табл. 1).

Таблица 1. Частота возникновения КЗ в электрических сетях %

Вид КЗ	Относительная частота КЗ (%) в сетях, U (кВ)							
	До1	6-20	35	110	220	330	500	750
Трехфазные - К ⁽³⁾	29	9-11	8	4	2	1	1	1
Двухфазные –К ⁽²⁾		17-19	18	5	3	4	2	1
Однофазные –К ⁽¹⁾	71	60-61	67	83	88	91	95-96	97
Двухфазные на землю – К ^(1,1)		11-12	7	8	7	4	1-2	1

Как видно, большинство коротких замыканий является однофазным. Хотя трехфазное КЗ возникает реже, но не считаться с ним нельзя, так как в ряде случаев этот вид КЗ является расчетным для решения многих практических задач.

Изучение трехфазного короткого замыкания важно и в связи с тем, что применение метода симметричных составляющих позволяет определить величины токов и напряжений прямой последовательности любого несимметричного КЗ.

Причины возникновения аварийных переходных процессов весьма разнообразны, но в большинстве случаев они являются результатом своевременно обнаруженных и не устраненных дефектов электрооборудования, допущенных ошибок при проектировании, а также неудовлетворительного монтажа и (иди) эксплуатации электроустановок.

Короткие замыкания являются результатом нарушения фазной или (и) линейной изоляции токоведущих частей электрооборудования, которое в основном **вызывается:**

- **старением изоляционных материалов электротехнических устройств**, своевременно не выявленным путем профилактических испытаний изоляции электрооборудования повышенным напряжением;

- **загрязнением поверхности изоляторов;**

- **недостаточно тщательным уходом за оборудованием** (в практике эксплуатации наблюдались случаи повреждения ограждений и крыш закрытых распределительных устройств, а также перекрытия изоляции животными и птицами);

– **механическими повреждениями**, имеющими место во время раскопок траншей, **набросов посторонних предметов на токоведущие части**, при падении опор линий электропередачи;

– **перенапряжениями в электроустановках** (особенно в сетях с незаземленными или резонансно-заземленными нейтральями), если, их величина превосходит испытательное напряжение изоляции;

– **прямыми ударами молнии**.

К коротким замыканиям могут приводить **ошибочные действия персонала** при невыполнении им правил технической эксплуатации и должностных инструкций.

Сейчас еще применяются «упрощенные» схемы электрических соединений понижающих подстанций, которые были спроектированы и построены в 60 ~ 70-х годах XX века. Наличие короткозамыкателей в таких схемах и действие их создают **преднамеренные короткие замыкания** с целью быстрых отключений возникающих повреждений.

Уменьшение количества коротких замыканий в электрических системах связано со строгим соблюдением правил технической эксплуатации электроустановок и повышением качества продукции электротехнической промышленности.

Наиболее опасные последствия коротких замыканий проявляются обычно в элементах **системы вблизи шин станций (генераторов)**. В результате этого может возникнуть системная авария, приводящая к нарушению устойчивости системы и значительному технико-экономическому ущербу. Если КЗ появилось на большой удаленности от источника питания, то увеличение тока воспринимается генераторами как некоторое повышение нагрузки, а сильное снижение напряжения происходит только вблизи места КЗ.

Последствиями коротких замыканий являются:

1. **Недопустимый нагрев токоведущих частей электрооборудования и его термическое повреждение из-за значительного увеличения токов (более 10 раз)**. Под **термическим действием тока короткого замыкания** понимается его тепловое действие, вызывающее изменение температуры элементов электроустановки. Характеристикой теплового действия тока короткого замыкания на рассматриваемый элемент электроустановки является **интеграл Джоуля** – условная величина, численно равная

$$B_K = \int_0^{t_{\text{отк}}} i_K^2 dt \quad (3.1)$$

где $i_K(t)$ – ток короткого замыкания; $t_{\text{отк}}$ – момент отключения тока КЗ.

Ток термической стойкости электрического аппарата при КЗ – нормированный ток, термическое действие которого электрический аппарат способен выдержать при коротком замыкании в течение нормированного времени.

Нарушение термической стойкости может привести к **увеличению пожарной опасности и возгораниям в электроустановках** вследствие перегрева токоведущих частей, воспламенения горючих изоляционных материалов, самовоспламенения взрывоопасной среды. В электроустановках,

находящихся в условиях взрывоопасной внешней среды, резкое увеличение тока при коротких замыканиях может нарушить взрывонепроницаемость электрооборудования за счет коробления его оболочек. Увеличение пожароопасности могут вызвать электрические искры и дуги, обладающие воспламеняющей способностью.

2. Появление больших механических усилий между токоведущими частями, особенно в начальной стадии процесса КЗ, которые могут привести к их механическому повреждению и разрушению. В этом проявляется **электродинамическое действие тока КЗ** – механическое действие электродинамических сил, обусловленных током короткого замыкания, на элементы электроустановки.

Ток электродинамической стойкости электрического аппарата при КЗ – нормированный ток, электродинамическое действие которого электрический аппарат способен выдержать при коротком замыкании без повреждений, препятствующих его дальнейшей исправной работе.

3. Снижение напряжения и искажение его симметрии, что отрицательно сказывается на работе потребителей. Момент вращения асинхронных электродвигателей пропорционален квадрату подведенного напряжения $M_d \approx U^2$. Поэтому даже при сравнительно небольшом снижении напряжения момент двигателя может оказаться недостаточным для вращения механизма. При незначительных снижениях напряжения угловая скорость вращения ротора двигателей уменьшается, а это приводит к уменьшению производительности и увеличению потребляемого ими тока. **При понижении напряжения на 30-40% в течение одной секунды и более останавливаются достаточно загруженные электродвигатели**, в результате чего нарушается технологический процесс промышленных предприятий и возникает экономический ущерб. Оставаясь включенными в сеть, остановившиеся двигатели могут вызвать дальнейшее снижение напряжения сети, то есть полное нарушение электроснабжения не только данного предприятия, но и за его пределами.

4. При замыканиях на землю возникают неуравновешенные системы токов. Они способны создавать магнитные потоки, которые достаточны, чтобы **в соседних линиях сигнализации и связи навести ЭДС, величины которых могут быть опасны для обслуживающего персонала и аппаратуры устройств, подключенных к этим линиям.**

5. При задержке отключений КЗ сверх допустимой продолжительности **может произойти нарушение устойчивости электрической системы, что является одним из наиболее опасных последствий КЗ**, так как оно отражается уже на работе всей системы.

Расчёт электромагнитных переходных процессов в современных ЭС с учётом всех действующих условий очень сложен и практически невыполним. Для выполнения расчёта вводят допущения. Эти допущения зависят от характера исследуемой задачи. При решении большинства практических задач, связанных с определением токов и напряжений, обычно принимают следующие допущения:

1. Отсутствие насыщения магнитных систем, то есть схемы являются линейными ($L=\text{const}$, $M=\text{const}$);
2. Пренебрежение токами намагничивания трансформаторов ($i_{\mu}=0$);
3. Пренебрежение ёмкостными проводимостями линий ($\epsilon_c=0$), за исключением линий 500 кВ и выше;
4. Пренебрежение активными сопротивлениями линий ($r=0$), за исключением сетей низкого напряжения и кабельных линий;
5. Отсутствие несимметрии трёхфазных систем;
6. Приближённый учёт нагрузок;
7. Отсутствие качаний синхронных машин ($\omega=\omega_c=\text{const}$).

Контрольные вопросы и вопросы для самостоятельного изучения:

1. Какие виды коротких замыканий существуют?
2. Причины возникновения коротких замыканий.
3. Что такое устойчивое и не устойчивое короткое замыкание?
4. Какие допущения принимают при расчетах токов короткого замыкания?

4. Расчетные схемы цепей КЗ и параметров их элементов. Схемы замещения и приведения параметров ее элементов к базисным условиям

4.1 Выбор расчетных условий

В соответствии с целевым назначением расчета электромагнитного переходного процесса устанавливают исходные расчетные условия, которые разнообразны при решении различных задач и могут быть даже противоречивыми.

Расчетные условия КЗ – это наиболее тяжелые, но достаточно вероятные условия КЗ. Они формируются на основе опыта эксплуатации установок, анализа отказов электрооборудования, последствий КЗ и условий функционирования электроэнергетической системы. *Расчетные условия КЗ определяются индивидуально для каждого элемента электрической сети (электроустановки) – электрических аппаратов, ЛЭП, кабелей, шин РУ.*

Утяжеление расчетных условий может привести к неоправданным дополнительным затратам, если возникновение таких ситуаций маловероятно.

Выбор легких расчетных условий может привести к нарушению электроснабжения потребителей.

Расчетные условия КЗ включают в себя расчетную схему электроустановки, расчетный вид КЗ, расчетную точку КЗ, расчетную продолжительность КЗ.

В соответствии с ПУЭ *допускается не проверять по режиму КЗ некоторые проводники и электрические аппараты, защищенные плавкими предохранителями*, а также проводники и аппараты в цепях маломощных,

неответственных потребителей, имеющих резервирование. При этом должны быть исключены возможности взрыва или пожара в электроустановках.

4.2. Расчетная схема

Расчетная схема – упрощенная однолинейная схема электроустановки, используемая при расчете токов КЗ. Как правило, она включает в себя все элементы электроустановки и примыкающей к ней части энергосистемы исходя из условий, предусмотренных продолжительной работой электроустановки с перспективой не менее чем пять лет после ввода ее в эксплуатацию.

4.3. Расчетный вид КЗ

Расчетным видом короткого замыкания является:

а) трехфазное КЗ:

– **при проверке электрических аппаратов и жестких проводников** (вместе с поддерживающими и опорными конструкциями) **на электродинамическую стойкость;**

– **при проверке проводников и электрических аппаратов на термическую стойкость;**

б) двухфазное КЗ:

– **при проверке гибких проводников** на электродинамическую стойкость (опасное сближение и схлестывание проводников);

– **при проверке на термическую стойкость** проводников и аппаратов в цепях генераторного напряжения электростанций, если оно обуславливает больший нагрев проводников и аппаратов, чем при трехфазном КЗ.

При проверке электрических аппаратов на коммутационную способность расчетным видом КЗ может быть трехфазное или однофазное КЗ в зависимости от того, при каком виде КЗ ток КЗ имеет наибольшее значение.

Двойные КЗ на землю в общем случае допускается не учитывать.

4.4. Расчетная точка КЗ

Расчетная точка КЗ – точка, находящаяся непосредственно с одной или с другой стороны от рассматриваемого элемента электроустановки в зависимости от того, когда для него создаются наиболее тяжелые условия при КЗ.

При выборе и проверке выключателей неактивированных линий 6-35 кВ, отходящих от сборных шин распределительных устройств, расчетная точка выбирается за выключателем, считая от сборных шин.

В закрытых распределительных устройствах проводники и электрические аппараты, расположенные на реактированных линиях до реактора, проверяются исходя из того, что расчетная точка КЗ находится за реактором, если они отделены от сборных шин разделяющими полками, а реактор находится в том же здании и все соединения от реактора до сборных шин выполнены шинами.

Выбор места КЗ и режима ЭЭС в зависимости от назначения расчета производится из следующих основных соображений:

1. Ток КЗ должен проходить по ветвям, для которых выбирается или проверяется аппаратура.

2. Для определения наибольшего значения тока КЗ при данном режиме место КЗ выбирается у места установки аппарата, релейной защиты (в начале линии, до трансформатора и т.д., считая от источника питания). Для определения минимального значения тока КЗ, место КЗ выбирается в конце участка.

Режим работы ЭЭС, предшествующий КЗ, весьма сильно влияет на величину токов КЗ. Поэтому правильный учет режима является важным элементом выбора расчетных условий.

Так, если расчет выполняется для выбора или проверки аппаратуры, то расчетный режим должен быть таким, при котором ток КЗ имеет наибольшее значение. Для этого необходимо учитывать не только полную мощность ЭЭС, но и перспективу ее развития.

То есть, для определения максимального и минимального значения тока КЗ режим работы принимается соответственно максимальным и минимальным.

Максимальный режим характеризуется следующими условиями:

1. Включены все источники питания (генераторы, трансформаторы, линии), питающие сеть или распределительное устройство, в котором рассматривается КЗ.

2. При расчете КЗ на землю включены все трансформаторы и автотрансформаторы, нормально работающие с заземленной нейтралью.

3. Схема участка сети, непосредственно примыкающая к месту КЗ такова, что по элементу проходит максимальный ТКЗ.

Минимальный режим характеризуется условиями, противоположными максимальному режиму при отключенной практически возможной части источников питания (генераторов, трансформаторов, линий), а схема соединений принимается такой, когда по защищаемому элементу проходит минимальный ТКЗ.

При проверке кабелей на термическую стойкость расчетной точкой КЗ является:

- **точка КЗ в начале кабеля** (для одиночных кабелей одной длины);
- **точка КЗ в начале каждого участка нового сечения** (для одиночных кабелей со ступенчатым сечением по длине);
- **точка КЗ в начале каждого кабеля (для двух и более параллельно включенных кабелей одной кабельной линии).**

Отступления от этих требований должны быть обоснованы.

4.5. Расчетная продолжительность короткого замыкания

При проверке проводников и электрических аппаратов на термическую стойкость (и электрических аппаратов на коммутационную способность) в

качестве расчетной продолжительности КЗ *следует принимать минимально возможное время воздействия тока КЗ, определяемое путем сложения времени действия основной токовой защиты (с учетом действия автоматического повторного включения) t_{P3A} , установленной у ближайшего к месту КЗ выключателя, и полного времени отключения этого выключателя $t_{B. OTKL}$:*

$$t_{расч.К} = t_{P3A} + t_{B. OTKL} \quad (4.1)$$

При наличии зоны нечувствительности у основной защиты расчетную продолжительность КЗ следует определять путем сложения времени действия защиты, реагирующей на КЗ в указанной зоне, и полного времени отключения выключателя присоединения.

При проверке кабелей на невозгораемость при КЗ в качестве расчетной продолжительности КЗ следует принимать сумму времени действия резервной защиты и полного времени отключения выключателя присоединения.

В таблице 2 приведены рекомендации для некоторых случаев.

Таблица 2. Рекомендации по выбору расчетных условий

Назначение расчета	Вид КЗ	Момент времени от начала КЗ
1. Выбор и проверка коммутационных аппаратов (выключателей, разъединителей и др.), реакторов, трансформаторов тока, шин, силовых кабелей:		
а) на термическую устойчивость	$K^{(3)}$	∞
б) на динамическую устойчивость	$K^{(3)}$	0
в) выключателей на допустимый отключающий ток или мощность	$K^{(3)}$	0
2. Выбор и проверка аппаратов для защиты от перенапряжений	$K^{(1)}$	$t = t_{ЗАЩ} + t_{ВЫК}$

4.6. Схемы замещения и приведения параметров ее элементов к базисным условиям

Расчет тока КЗ начинают с составления для исходной расчетной схемы ее схемы замещения, которая представляется в однолинейном изображении (для одной фазы) и содержит все элементы расчетной схемы (генераторы, трансформаторы, линии и т.п.), их связи между собой и точкой КЗ.

Элементы вводят в схему своими эквивалентными сопротивлениями, а источники питания эквивалентными ЭДС. Сопротивления и ЭДС целесообразно обозначать номерами и указывать их величины в виде дроби, числитель которой указывает порядковый номер элемента, а знаменатель его величину в относительных или именованных единицах.

Генераторы и нагрузки вводят в схему замещения параметрами, соответствующими моменту времени, для которого рассчитывается ТКЗ.

Параметры элементов расчетной схемы устанавливаются в соответствии с их паспортными данными. При этом, некоторые из них указываются в именованных единицах (Вольт, Ампер, Ом), а другие – в относительных единицах.

Например, для воздушных и кабельных линий электропередач задаются: длина линии и ее удельное сопротивление в Ом/км.

Для генераторов, трансформаторов, токоограничивающих реакторов, двигателей, обобщенной нагрузки сопротивления задаются в относительных единицах. Как известно, под относительным значением какой-либо величины понимают ее отношение к другой одноименной физической величине, выбранной за единицу измерения. В данном случае относительные сопротивления указанных элементов задаются при номинальных условиях.

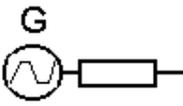
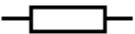
4.7. Составление схемы замещения по расчетной схеме

Расчетная схема в однолинейном изображении должна включать участвующие в питании КЗ генераторы и все элементы их связей как с местом КЗ, так и между собой. Дополнительные источники - синхронные компенсаторы, крупные двигатели, мелкие станции следует вводить в схему только в тех случаях, когда они сравнительно близко расположены к месту КЗ.

Очень крупные источники (смежные системы и др.) часто можно заменять источниками неограниченной мощности, т.е. считать, что напряжения в точках их присоединения к схеме остаются неизменными в течении всего процесса КЗ.

При учете нагрузок их можно объединять в крупные группы, например, нагрузка района сети, подстанции и т.д.

Таблица 3. Представление основных типовых элементов в схемах замещения

Наименование	Обозначение на расчетных схемах	Схема замещения	Реактивности элементов	
			Именованные единицы, Ом	Относительные базовые единицы
1	2	3	4	5
Синхронный генератор (двигатель, компенсатор)			$X_d'' \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$	$X_d \cdot \frac{S_B}{S_H}$
Двухобмоточный трансформатор			$\frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$	$\frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{S_B}{S_H}$

1	2	3	4	5
Трехобмоточный трансформатор			$X_B = 0,5 \cdot (X_{BH} + X_{BC} - X_{CH}); X_{BH} = \frac{U_{KBH}}{100}$ $\tilde{O}_{\tilde{N}} = 0,5 \cdot (\tilde{O}_{\tilde{AN}} + \tilde{O}_{\tilde{NI}} - \tilde{O}_{\tilde{AI}}); \tilde{O}_{\tilde{NI}} = \frac{U_{\tilde{E}_{NI}}}{100}$ $\tilde{O}_{\tilde{I}} = 0,5 \cdot (\tilde{O}_{\tilde{AI}} + \tilde{O}_{\tilde{NI}} - \tilde{O}_{\tilde{AN}}); \tilde{O}_{\tilde{AN}} = \frac{U_{\tilde{E}_{AN}}}{100}$	
ЛЭП: воздушная кабельная	$\frac{W_{ВЛ}}{W_{КЛ}}$ 		$X_0 \cdot l$	$X_0 \cdot l \cdot \frac{S_B}{U_{ЛЭП}^2}$
Токоограничивающий реактор			$\frac{X_P\%}{100} \cdot \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot I_H}$	$\frac{X_P\%}{100} \cdot \frac{I_B}{I_H} \cdot \frac{U_H}{U_B}$
Сдвоенный реактор			$\frac{X_P\%}{100} \cdot \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot I_H}$	$\frac{X_P\%}{100} \cdot \frac{I_B}{I_H} \cdot \frac{U_H}{U_B}$
Асинхронный двигатель			$\frac{1}{K_{\Pi}} \cdot \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot I_H}$	$\frac{1}{K_{\Pi}} \cdot \frac{S_B \cdot \eta \cdot \cos \varphi}{P_H}$
Обобщенная нагрузка			$0,35 \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$	$0,35 \cdot \frac{S_B}{S_H}$

Где: U_H – номинальное напряжение элемента (для трансформатора – напряжение высшей или низшей стороны); K_{Π} – относительный пусковой ток асинхронного двигателя (коэффициент кратности пуска).

Пример расчетной схемы и ее схемы замещения приведены на рис. 3.

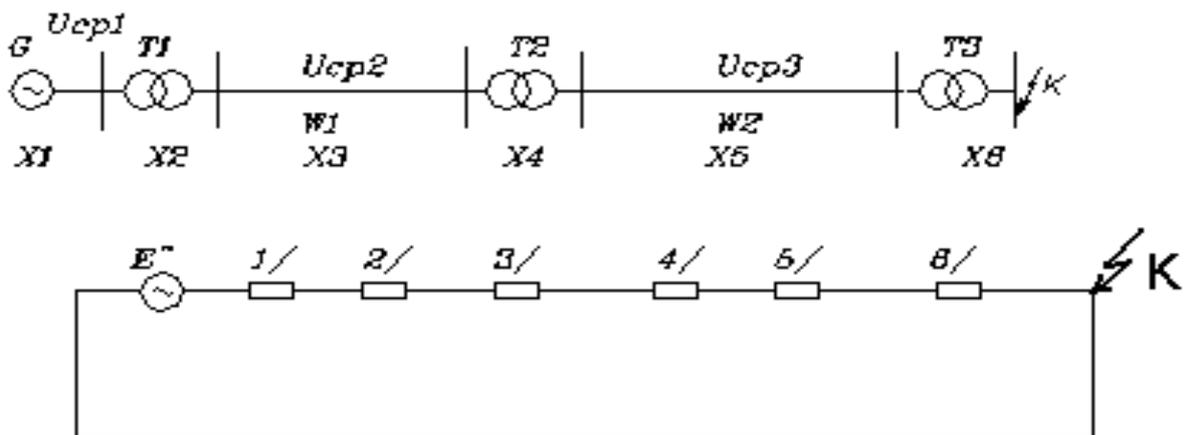


Рисунок 3. Расчетная схема и схема замещения.

4.8. Преобразование схем замещения. Основные расчетные приемы

Если схема замещения не содержит замкнутых контуров и в ней имеется один или несколько источников ЭДС, то ее необходимо привести к простейшему виду путем элементарных преобразований как при расчетах линейных электрических цепей. Например, к ним относятся: замена

нескольких генерирующих ветвей, присоединенных к общему узлу, одной эквивалентной; преобразования треугольника в звезду и обратно и т.д.

Эквивалентная замена генераторных ветвей одним эквивалентным генератором возможна если генераторы, питающие точку КЗ однотипные (турбогенераторы или гидрогенераторы) и генераторы, питающие точку КЗ соизмеримой мощности и имеют соизмеримую удаленность от точки КЗ.

Определение взаимных сопротивлений, например, между источником и точкой КЗ при преобразовании схемы к радиальному (лучевому) виду (рис.4).

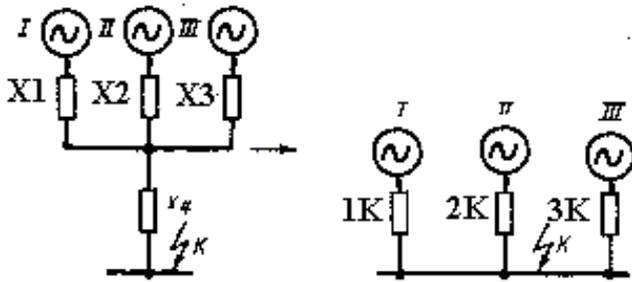


Рисунок 4.

Порядок преобразования схемы следующий: $X_{\text{экр}} = X_1 || X_2 || X_3$,

$$X_{\text{сум}} = X_{\text{экр}} + X_4$$

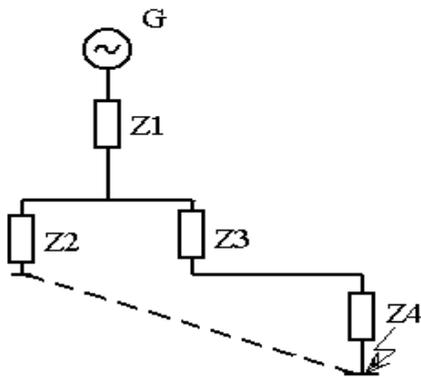
$$C_1 = X_{\text{экр}}/X_1, C_2 = X_{\text{экр}}/X_2,$$

$$C_3 = X_{\text{экр}}/X_3$$

Проверка: $C_1 + C_2 + C_3 = 1$.

$$X_{1K} = X_{\text{сум}}/C_1, X_{2K} = X_{\text{сум}}/C_2,$$

$$X_{3K} = X_{\text{сум}}/C_3$$



принимаются равными нулю, следует соединять с точкой КЗ (рис.5).

Рисунок 5.

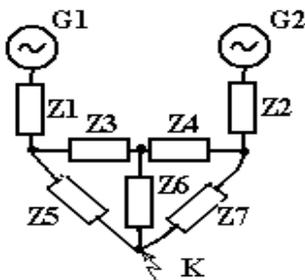


Рисунок 6.

Особенности преобразованиях схем:

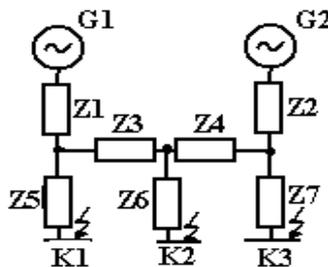
1. Первоочередной задачей расчета тока КЗ является определение тока непосредственно в аварийной ветви или в месте КЗ. Поэтому преобразование схемы нужно вести так, чтобы аварийная ветвь по возможности была сохранена до конца преобразования или, в крайнем случае, участвовала в нем на последнем этапе. С этой целью, в частности, концы нагрузочных ветвей, ЭДС которых

относительно любой из точек КЗ, учитывая другие ветви

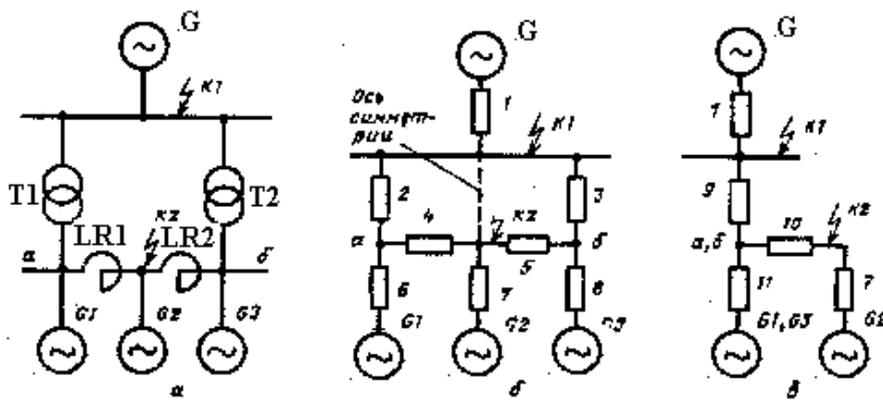
с КЗ как нагрузочные ветви

с ЭДС равными нулю (рис.

6).



2. Когда КЗ находится в узле с несколькими сходящимися в нем ветвями, узел можно разрезать, сохранив на конце каждой ветви такое же КЗ. Далее схему нетрудно преобразовать



Определенные трудности в упрощении схем возникают, когда точка КЗ находится в одном из узлов многоугольника, к другим узлам которого

присоединены генерирующие ветви (рис.7).

Рисунок 7

Если точка КЗ делит схему на две симметричные части, например, точки K_1, K_2 , (рис. 7) то при одинаковых характеристиках генераторов G_1, G_3 и трансформаторов узлы a и b схемы будут иметь одинаковые потенциалы, вследствие чего их можно совместить: ветви генераторов G_1 и G_3 объединяют, представляя их эквивалентной машиной с $S = 2S_{ном}$. В результате получится схема "в". В этой схеме $X_9 = X_2 || X_3$, $X_{10} = X_4 || X_5$, $X_{11} = X_6$.

Преобразуем схему, приведенную на рис.8. Если генераторы $G1$ и $G2$ имеют одинаковые ЭДС, то их можно объединить в эквивалентный генератор с мощностью $S = 2S_{ном}$.

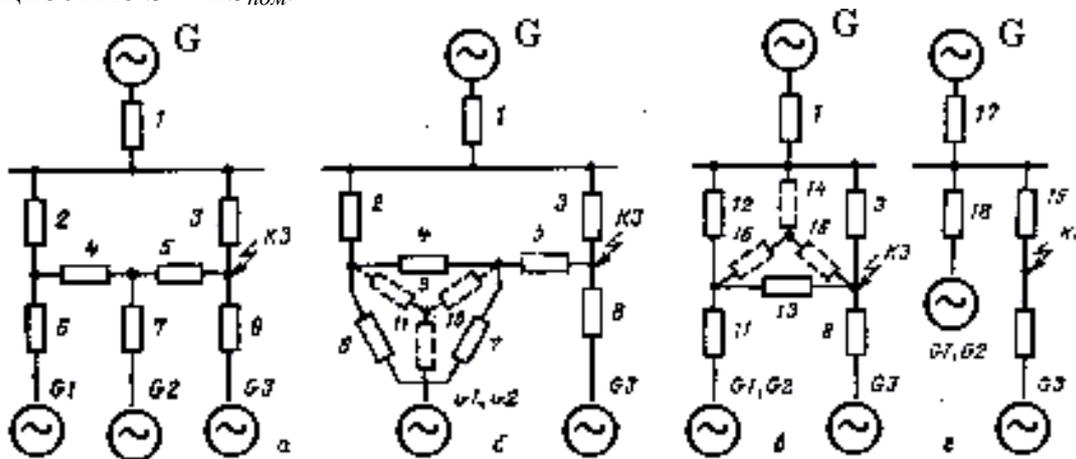
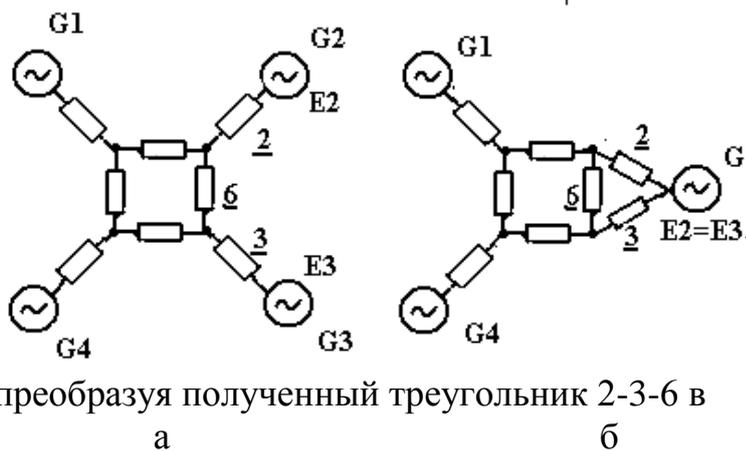


Рисунок 8

При таком объединении образуется треугольник сопротивлений X_4, X_6, X_7 (рис. 8, б), который преобразуется в звезду X_9, X_{10}, X_{11} . Далее преобразовывая, получим: $X_{12} = X_2 + X_9$, $X_{13} = X_5 + X_{10}$. Полученный треугольник X_3, X_{12}, X_{13} , преобразуется в звезду X_{14}, X_{15}, X_{16} (рис. 8, в). Последовательно сложив сопротивления $X_{17} = X_1 + X_{14}$ и $X_{18} = X_{11} + X_{16}$, получим схему (рис. 8 г).



преобразуя полученный треугольник 2-3-6 в
а
получим

Если схема имеет одинаковые ЭДС, то в некоторых случаях упрощение схемы достигается объединением источников. Например, если схема (рис.9 а) имеет одинаковые ЭДС E_2 и E_3 , то объединяя эти ЭДС и эквивалентную звезду,

Рисунок 9

схему (рис.9.б).

Следует отметить, что трудность преобразования схем замещения в значительной степени определяется выбранным порядком выполнения операций по упрощению схемы. Поэтому при преобразовании схем следует придерживаться такого порядка расчётов и записи результатов, который обеспечивает проверку полученных результатов. После получения простейшей схемы, содержащей точку КЗ и эквивалентную ЭДС за эквивалентным сопротивлением приступают к расчёту тока КЗ. Токи и напряжения в других ветвях схемы (если в этом есть необходимость) определяют, совершая обратный переход от простейшей схемы к всё более сложным, вплоть до исходной.

Контрольные вопросы и вопросы для самостоятельного изучения:

1. Что такое расчетные условия КЗ?
2. Как составляется расчетная схема?
3. Как определяется расчетный вид КЗ?
4. Что такое расчетная точка КЗ?
5. Как определяется расчетная продолжительность КЗ?
6. Составление схемы замещения.
7. Основные приемы преобразования схем замещения.

5. Точные и приближенные методы расчета

5.1. Точное приведение элементов схемы замещения в именованных единицах

Часто расчетная схема системы содержит трансформаторы. Поэтому для составления схем замещения магнитосвязанные цепи должны быть заменены эквивалентной электрической связанной цепью.

Составление такой схемы замещения сводится к приведению сопротивлений и ЭДС элементов, находящихся в различных схемах трансформации заданной схемы к какой-либо одной ступени, принимаемой за основную.

В общем случае, выражения для определения приведенных к основной ступени значений ЭДС (напряжения), токов и сопротивлений имеют вид:

$$E_{OCH} = (K_1 \cdot K_2 \dots K_{II}) \cdot E; \quad I_{OCH} = \frac{1}{K_1 \cdot K_2 \dots K_{II}} \cdot I; \quad Z_{OCH} = (K_1 \cdot K_2 \dots K_{II})^2 \cdot Z, \quad (5.1)$$

где $K_1, K_2 \dots K_{II}$ - коэффициенты трансформации ряда последовательно включенных в схеме трансформаторов, определяемые как отношение их линейных напряжений в направлении от выбранной основной ступени напряжения к той ступени, элементы которой подлежат приведению.

Приведение сопротивлений и ЭДС к одной ступени напряжения может быть выполнено точно с учетом действительных коэффициентов трансформации, указанных в паспортных данных.

5.2. Приближенное приведение схемы замещения в именованных единицах

Приведение сопротивлений и ЭДС к одной ступени напряжения может быть выполнено точно с учетом действительных коэффициентов трансформации, указанных в паспортных данных или приближенно с учетом коэффициентов трансформации, найденных как отношение средних номинальных напряжений $U_{cp.n}$ соответствующих ступеней трансформации.

Шкала средних номинальных напряжений следующая:

340; 230; 115; 37; 24; 20; 18; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3; 0,69; 0,525; 0,4; 0,23 кВ.

При приближенном приведении выражения для пересчета упрощаются:

$$E^o = \frac{U_{cp.осн.}}{U_{ch}} E, \quad z^o = \left(\frac{U_{cp.осн.}}{U_{ch}} \right)^2 z, \quad I^o = \frac{U_{cp.осн.}}{U_{ch}} I, \quad (5.2)$$

где: U_{cp} - среднее напряжение ступени, с которой производится пересчет; $U_{cp.осн}$ - то же, выбранной основной ступени.

5.3. Система относительных единиц. Точное и приближенное приведение в относительных единицах

ЭДС и сопротивления элементов схемы замещения могут быть выражены не только в именованных единицах, но и в относительных единицах. Для этого на основной ступени напряжения произвольно устанавливают, так называемые базисные единицы (или условия), т.е. те величины, которые должны служить соответствующими единицами измерения. Обычно задаются базисной мощностью S_B (которая на всех ступенях трансформации одинакова) и напряжением $U_{B.осн}$. Две другие базисные величины определяют из выражений:

$$I_{BOCH} = \frac{S_B}{\sqrt{3}U_B}, \quad Z_B = \frac{U_B}{\sqrt{3}I_B} = \frac{U_B^2}{S_B}. \quad (5.3)$$

Базисные единицы измерения на других ступенях напряжения связаны с базисными единицами основной ступени через коэффициенты трансформации.

$$\dot{U}_B = U_{B.ОСН} \cdot \frac{1}{K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_H}; \dot{I}_B = I_{B.ОСН} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_H, \text{ или } \dot{I}_B = \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot U_B}. \quad (5.4)$$

Любые величины, заданные в именованных единицах, входящие в расчет переводятся в относительные базисные единицы следующим образом:

$$E_{*(B)} = \frac{E}{U_B}; \quad I_{*(B)} = \frac{I}{I_B}; \quad S_{*(B)} = \frac{S}{S_B}; \quad Z_{*(B)} = \frac{Z}{Z_B} = Z \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot I_B}{U_B} = Z \cdot \frac{S_B}{U_B^2}; \quad (5.5)$$

где U, I, Z, S – значение величины в именованных единицах (кВ, кА, Ом, МВА) на расчетной ступени напряжения; U_B, I_B, Z_B, S_B – базисные единицы на той же ступени напряжения;

Здесь звездочка (*) указывает, что величина выражена в относительных единицах, а индекс (Б) – что эта величина отнесена к базисным единицам измерений.

Если величины заданы в относительных единицах при номинальных условиях, то их пересчет к базисным условиям производится по следующим соотношениям:

$$E_{*(B)} = E_{*(H)} \cdot \frac{U_H}{U_B}, \quad Z_{*(B)} = Z_{*(H)} \cdot \frac{I_B}{I_H} \cdot \frac{U_H}{U_B} \quad \text{или} \quad Z_{*(B)} = Z_{*(H)} \cdot \frac{S_B}{S_H} \cdot \frac{U_H^2}{U_B^2}. \quad (5.6)$$

В приближенных расчетах полагают, что номинальное напряжение всех элементов одной ступени напряжения одинаково и равно среднему номинальному напряжению, в соответствии с приведенной шкалой, и принимают $U_B = U_{ср.н.}$. Тогда расчетные выражения имеют более простой вид:

$$E_{*(B)} = E_{*(H)}; \quad Z_{*(B)} = Z_{*(H)} \cdot \frac{S_B}{S_H} \cdot \frac{U_H^2}{U_B^2}; \quad (5.7)$$

Следует подчеркнуть, что в каждой приведенной выше формуле под U_B, I_B всегда понимают базисные напряжения и ток той ступени трансформации, где находятся элементы, параметры которых определяются в относительных базисных единицах. После выполнения расчетов в относительных базисных единицах, действующие значения напряжений, токов, мощностей в именованных единицах находят по формулам обратного пересчета:

$$U = U_{*(B)} \cdot U_B; \quad I = I_{*(B)} \cdot I_B; \quad S = S_{*(B)} \cdot S_B. \quad (5.8)$$

Точность расчета не зависит от того, в какой системе единиц выражают величины.

Контрольные вопросы и вопросы для самостоятельного изучения:

1. Как выполняется приведение сопротивлений и ЭДС к основной ступени?
2. Чем отличается приведение сопротивлений и ЭДС к основной ступени при точном и приближенном приведении?

3. Как выполняется точное и приближенное приведение элементов в относительных единицах?

6. Практические методы расчета ТКЗ

6.1. Метод расчетных кривых в произвольный момент времени

Расчет при удаленных КЗ

Обычно в расчетах токов КЗ индивидуально учитываются лишь те элементы, которые находятся относительно недалеко от места КЗ. Всю остальную часть энергосистемы представляют в виде одного источника, называемого системой. ЭДС системы принимают неизменной во времени и равной среднему номинальному напряжению той ступени, к которому присоединено сопротивление системы X_c . ЭДС и X_c должны быть приведены к напряжению ступени КЗ. Ток для любого момента времени со стороны системы определится по формуле:

$$I_{pt}=I_{p0}=\frac{U_c}{\sqrt{3} \cdot X_c} \quad (6.1)$$

Если сопротивление системы выражено в относительных единицах при базисных условиях, то

$$I_{pt}^* = I_{p0}^* = 1/X_c^* \quad (\text{о.е.}) \quad I_{pt}=I_{p0} = I_{pt}^* \cdot I_6 = I_6 / X_c^* \quad (\text{кА}) \quad (6.2)$$

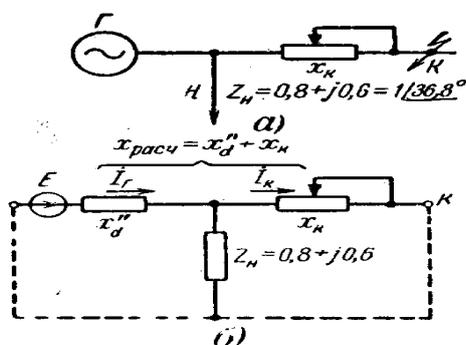
Обычно при расчетах токов КЗ X_c неизвестно. Вместо нее обычно задается либо величина начального сверхпереходного тока I'' , либо мощность короткого замыкания $S_{K''}$ при трехфазном КЗ в какой-либо точке системы. По этим величинам нетрудно определить X_c :

$$X_c = U_{cp} / \sqrt{3} I'' \quad (\text{Ом}); \quad X_c = U_{cp}^2 / S_{K''} \quad (\text{Ом}); \quad X_c^* = I_6 / I'' = S_6 / S_{K''} \quad (*) \quad (6.3)$$

Здесь U_{cp} – среднее напряжение той ступени, где задан ток I , I_6 – базисный ток той же ступени.

6.2. Метод расчетных (типовых) кривых

Когда задача ограничена нахождением тока КЗ или остаточного напряжения за аварийной ветвью, удобно пользоваться методом расчетных кривых. Он прост и достаточно точен. Метод основан на использовании специальных кривых, с помощью которых для произвольного момента времени $0 \leq t \leq \infty$ и для расчетных сопротивлений $0 \leq X_{расч} \leq 3$ можно



получить относительное значение периодической слагающей тока КЗ $I_{*пт}$.

Для построения специальных кривых использовался реальный генератор, работающий с номинальной нагрузкой (рис.10, а) – расчётная схема; б) – схема замещения).

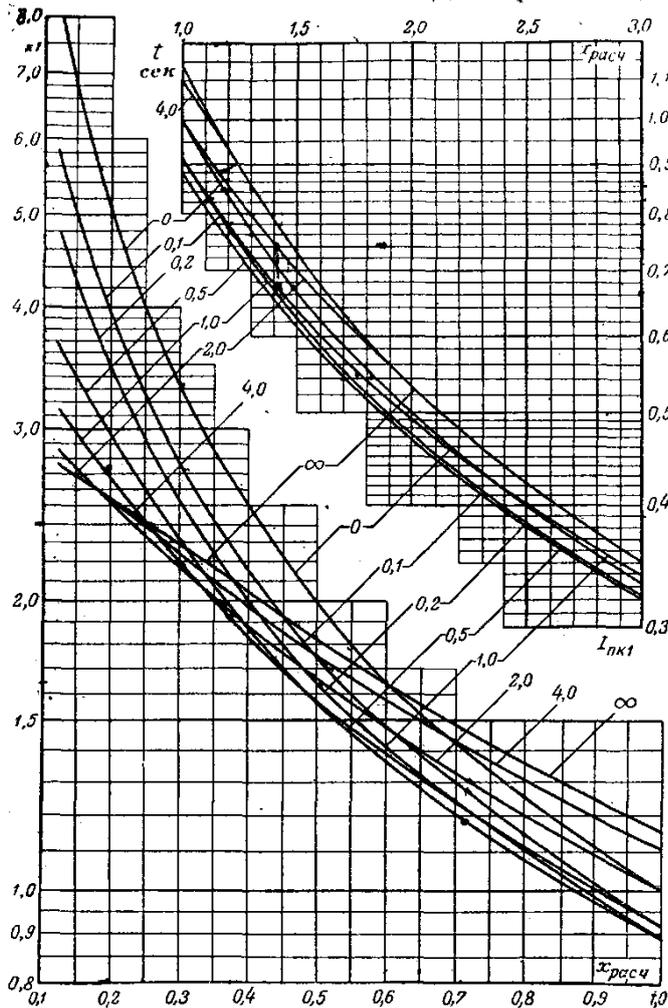
Изменением X_k регулируют электрическую удалённость генератора до точки КЗ. Для различных значений X_k и t замеряют ток и напряжение генератора и по соответствующим формулам находят периодическую

слагающую тока КЗ.

$$X_{расч.} = X_d'' + X_k. \quad (6.4)$$

Параметры турбо- и гидрогенераторов отличаются друг от друга ($X_d''_{ТГ} \neq X_d''_{ТГ}$), поэтому специальные кривые выполняются отдельно для турбо- и гидрогенераторов

По мере увеличения $X_{расч.}$ различия между $I_{*пт}$ для разных моментов времени становится всё меньше, что позволяет принять при $X_{*расч} \geq$ неизменность по величине. $I_{*пт=0} = I_{*пт=\infty}$. С ростом $X_{расч}$ различие специальных кривых для турбо- и гидрогенераторов сказываются всё меньше и при $X_{расч} \geq 1$ расчётные кривые практически совпадают.



На рисунке 11 изображены расчётные кривые для турбогенератора с АВР.

Порядок выполнения расчёта:

1. Для заданной расчётной схемы составляют схему замещения, в которую генераторы входят своими X_d'' ;
2. Все нагрузки отбрасываются за исключением тех, что находятся вблизи точки КЗ или подключены к шинам, на которых возникло КЗ. Крупные двигатели и компенсаторы учитываются как генераторы с равновеликой мощностью. ЭДС в схему замещения не

Рисунок 11

3. вводят. Расчёт ТКЗ целесообразно ввести по средним напряжениям без учёта действительных коэффициентов трансформации трансформаторов;
4. Преобразованием схемы замещения находят X_{Σ} относительно точки КЗ;
5. Для определения $X_{*расч}$ полученное X_{Σ} выражают в относительных единицах при суммарной номинальной мощности генераторов ($S_{ном_{\Sigma ТГ}}$ или $S_{ном_{\Sigma Г}}$), МВА.

При расчёте токов КЗ в именованных единицах:

$$X_{*расч} = X_{\Sigma(O.M)} \cdot S_{ном_{\Sigma Г}} / U_{ср}^2, \quad (6.5)$$

где $U_{ср}$ – среднее напряжение точки КЗ.

При расчёте токов КЗ в относительных единицах:

$$X_{*расч} = X_{*\Sigma} \cdot S_{ном\Sigma\Gamma} / S_{баз}. \quad (6.6)$$

6. По расчётным кривым для турбо - и гидрогенераторов, при известном $X_{*расч}$ и заданном моменте времени t находят I_{*nt} ;

7. Находят номинальный ток от однотипных генераторов:

$$I_{ном\Sigma} = \frac{S_{ном\Sigma\Gamma}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}}, \text{кА} \quad (6.7)$$

где $U_{ном}$ – номинальное напряжение точки КЗ; или

$$I_{баз} = \frac{S_{баз}}{\sqrt{3} \cdot U_{баз}}, \text{кА}, \quad (6.8)$$

где $U_{баз}$ – среднее напряжение точки КЗ;

8. Находят искомую величину тока КЗ для заданного момента времени:

$$Ik^{(3)} = I_{*nt} \cdot I_{ном\Sigma}, \text{кА}. \quad (6.9)$$

При $X_{расч} \geq 3$:

$$Ik^{(3)} = I_{ном\Sigma} / X_{*\Sigma}, \quad (6.10)$$

$$X_{*\Sigma} = X_{\Sigma(ом)} \cdot S_{ном\Sigma\Gamma} / U_{ср}^2,$$

где $U_{ср}$ – среднее напряжение точки КЗ.

От системы бесконечной мощности ток КЗ находят по формуле:

$$Ik_c^{(3)} = I_{баз} / X_{*c}, \text{кА}, \quad (6.11)$$

$$I_{баз} = S_{баз} / (\sqrt{3} U_{ср}) \text{ точки КЗ.}$$

Примечания:

объединение разнотипных источников питания не допускается во избежание чрезмерных погрешностей расчёта тока КЗ;

объединение однотипных источников питания при резком отличии их номинальных мощностей, а также при различной электрической удалённости их от точки КЗ недопустимо во избежание больших погрешностей расчёта.

Контрольные вопросы и вопросы для самостоятельного изучения:

1. На чем основан метод расчетных кривых?
2. Как строят расчетные кривые?
3. Как определяют ток КЗ по методу расчетных кривых?
4. Что не допускается делать при расчете тока КЗ методом расчетных кривых?

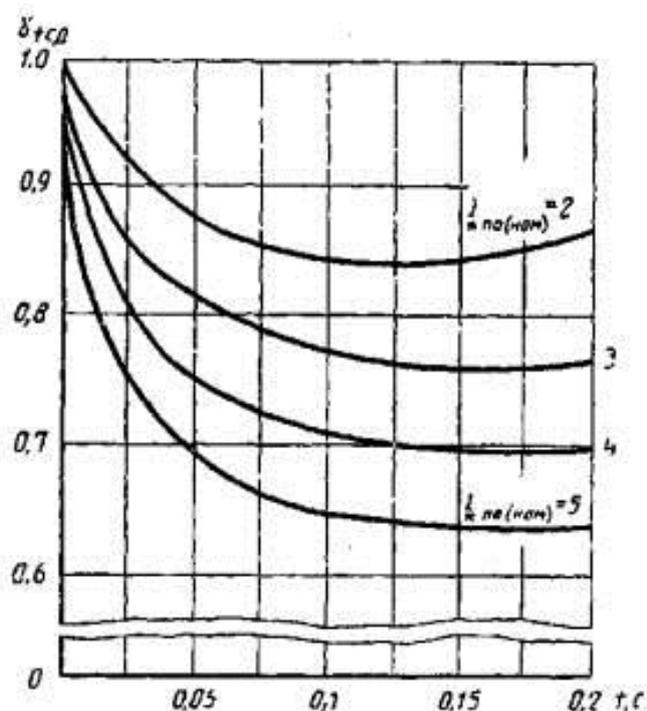
7. Начальный ток КЗ от групп асинхронных и синхронных электродвигателей, от комплексной нагрузки

7.1. Расчет периодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания от синхронных электродвигателей в произвольный момент времени

Периодическую составляющую тока КЗ от синхронных электродвигателей в произвольный момент времени следует рассчитывать в соответствии с указаниями п. 5.1. ГОСТ 27514-87 путем решения соответствующей системы дифференциальных уравнений ПП с использованием ЭВМ (в сложных схемах).

В простых радиальных схемах действующее значение периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени определяют в соответствии с п. 5.2. ГОСТ 27514-87.

При приближенных расчетах действующего значения периодической составляющей тока КЗ от синхронных электродвигателей в произвольный момент времени в радиальной схеме допускается использовать типовые



кривые, приведенные на рисунке 12, которые характеризуют изменение этой составляющей во времени при разных удаленностях точки КЗ. Значения периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени отнесены к начальному значению этой составляющей:

$$\gamma_{исД} = \frac{I_{исД}}{I_{исД_0}} \quad (7.1)$$

Удаленность точки КЗ от синхронного электродвигателя характеризуется отношением периодической составляющей тока этого двигателя в начальный момент КЗ к его номинальному

току:

$$I_{исД_0} = \frac{I_{исД}}{I_{ном, СД}} \quad (7.2)$$

Рисунок 12.

1. Для определения аperiodической

Порядок расчета действующего значения периодической составляющей тока КЗ от синхронного электродвигателя в произвольный момент времени определяется согласно нижеприведенному порядку:

составляющей тока КЗ в произвольный момент времени предварительно должна быть составлена такая исходная схема замещения, чтобы в ней все элементы исходной расчетной схемы учитывались как индуктивными, так и активными сопротивлениями.

2. Синхронные генераторы и компенсаторы, синхронные и асинхронные электродвигатели должны быть учтены индуктивным сопротивлением обратной последовательности (для асинхронных

электродвигателей $X2 \approx X''$) и сопротивлением обмотки статора постоянному току при нормированной рабочей температуре этой обмотки.

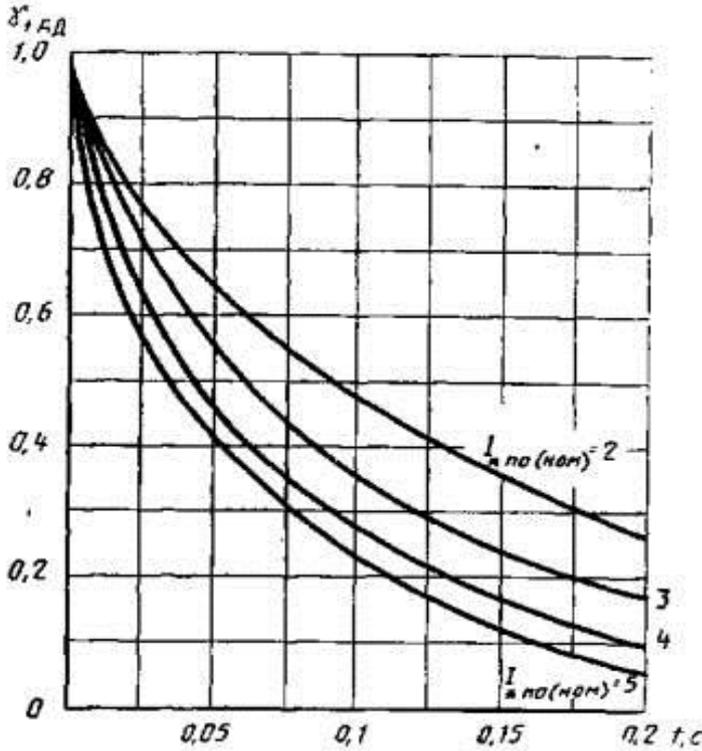
3. Значение периодической составляющей тока в килоамперах в момент времени t равно:

$$I_{\text{п.с.д}} = \gamma_{\text{т.с.д}} I_{* \text{т.п.0(ном)}} I_{\text{ном.с.д}} = \gamma_{\text{т.с.д}} I_{* \text{т.п.0(с)}} I_{\sigma}. \quad (7.3)$$

7.2. Расчет периодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания от асинхронных электродвигателей в произвольный момент времени

Периодическую составляющую тока КЗ от асинхронных электродвигателей в произвольный момент времени следует рассчитывать путем решения соответствующей системы дифференциальных уравнений переходных процессов с использованием ЭВМ.

В приближенных расчетах для определения действующего значения периодической составляющей тока КЗ от асинхронных электродвигателей в произвольный момент времени при радиальной схеме следует использовать типовые кривые, приведенные на рисунке 13, характеризующие изменение этой составляющей во времени при разных удаленностях точки КЗ. Значения периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент отнесены к начальному значению этой составляющей:



$$\gamma_{\text{т.с.д}} = \frac{I_{\text{т.п.с.д}}}{I_{\text{т.п.н.с.д}}}$$

(7.4)

Удаленность точки КЗ от асинхронного электродвигателя характеризуется отношением действующего значения периодической составляющей тока этого электродвигателя в начальный момент КЗ к его номинальному току

$$I_{* \text{т.п.0(ном)}} = \frac{I_{\text{т.п.н.с.д}}}{I_{\text{ном.с.д}}}$$

(7.5)

Рисунок 13

Порядок расчета действующего значения периодической составляющей тока КЗ от асинхронного электродвигателя в произвольный момент времени определяется согласно нижеследующему порядку:

1. Для определения аperiodической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени предварительно должна быть составлена такая исходная схема замещения, чтобы в ней все элементы исходной расчетной схемы учитывались как индуктивными, так и активными сопротивлениями.

2. Синхронные генераторы и компенсаторы, синхронные и асинхронные электродвигатели должны быть учтены индуктивным сопротивлением обратной последовательности (для асинхронных электродвигателей $X_2 \approx X''$) и сопротивлением обмотки статора постоянному току при нормированной рабочей температуре этой обмотки.

3. Значение периодической составляющей тока в килоамперах в момент времени t равно:

$$I_{\text{п.АД}} = \gamma_{\text{т.АД}} I_{\text{п0(ном)}} I_{\text{ном.АД}} = \gamma_{\text{т.АД}} I_{\text{п0(с)}} I_{\text{с}}. \quad (7.6)$$

7.3. Тока КЗ от конденсаторных батарей поперечной компенсации

Максимальную амплитуду тока КЗ от конденсаторных батарей поперечной компенсации (I_{max}) в килоамперах следует определять по формуле:

$$I_{\text{max}} = \frac{U_{\text{с|p|}}}{\sqrt{3} \omega_0 (L_{\text{к}} + L_{\text{вш}})}, \quad (7.7)$$

где $U_{\text{с|p|}}$ - напряжение на конденсаторной батарее до КЗ (кВ); $L_{\text{к}}$ и $L_{\text{вш}}$ - индуктивности соответственно конденсаторной батареи и цепи между батареей и точкой КЗ (Гн); ω_0 - угловая частота собственных колебаний короткозамкнутого контура с конденсаторной батареей (рад/с).

Свободную составляющую тока КЗ от конденсаторной батареи ($i_{\text{св}}$) следует определять по формуле:

$$i_{\text{св}} = I_{\text{max}} e^{-bt} \sin(\omega_0 t + \pi), \quad (7.8)$$

где $b = R/2L = [R_{\text{к}(\omega_0)} + R_{\text{вш}}] / 2L$ - коэффициент затухания (Ом/Гн); $R_{\text{к}(\omega_0)}$ - активное сопротивление конденсаторной батареи при частоте ω_0 (Ом); $R_{\text{вш}}$ - активное сопротивление внешней по отношению к батарее части контура (Ом).

При наличии в электрических сетях статических компенсаторов в зависимости от схемы исполнения их следует вводить в расчетную схему замещения соответствующими емкостными и индуктивными сопротивлениями.

7.4. Учет комплексной нагрузки при расчетах токов короткого замыкания

При расчетах токов КЗ следует учитывать влияние каждой комплексной нагрузки, если ток в месте КЗ от этой нагрузки составляет не менее 5% тока в месте КЗ, определенного без учета нагрузки.

В общем случае ток КЗ комплексной нагрузки следует определять, как геометрическую сумму токов отдельных ее элементов.

В приближенных расчетах допускается эквивалентирование комплексной нагрузки с представлением ее в виде эквивалентной ЭДС и эквивалентного сопротивления.

При расчете несимметричных КЗ следует учитывать соответствующие параметры прямой, обратной и нулевой последовательностей комплексных нагрузок. Рекомендуемые значения сопротивлений прямой и обратной последовательностей элементов комплексных нагрузок приведены в таблице 4.

Таблица 4. Рекомендуемые значения сопротивлений прямой и обратной последовательностей элементов комплексных нагрузок

Потребители комплексной нагрузки	cos φ	Сопротивление, отн. ед.	
		прямой последовательности \underline{z}_1	обратной последовательности \underline{z}_2
Синхронные электродвигатели высоковольтные	0,9	0,04+ j 0,22	0,04+ j 0,22
Асинхронные электродвигатели высоковольтные	0,9	0,06+ j 0,18	0,06+ j 0,18
Асинхронные электродвигатели низковольтные	0,8	0,09+ j 0,154	0,09+ j 0,154
Лампы накаливания	1,0	1,0	1,33
Газоразрядные источники света	0,85	0,85+ j 0,53	0,382+ j 0,24
Преобразователи	0,9	0,9+ j 0,44	1,66+ j 0,814
Электротермические установки	0,9	1+ j 0,49	0,4+ j 0,196

Контрольные вопросы и вопросы для самостоятельного изучения:

1. Как рассчитывается периодическая составляющая тока КЗ от синхронных электродвигателей в произвольный момент времени?

2. Как рассчитывается периодическая составляющая тока КЗ от асинхронных электродвигателей в произвольный момент времени?

3. Как рассчитывается ток КЗ от конденсаторных батарей поперечной компенсации?

4. Как учитывается влияние комплексной нагрузки при расчетах токов КЗ?

8. Ударный ток короткого замыкания

Полный ток КЗ состоит из двух слагающих: вынужденной периодической и свободной аperiodической.

$$i = \frac{U_{\max}}{Z_K} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) + \left[\frac{U_{\max}}{Z_H} \sin(\alpha - \varphi_H) - \frac{U_{\max}}{Z_K} \sin(\alpha - \varphi_K) \right] \cdot e^{-\frac{t}{T_a}},$$

(8.1)

$$T_a = \frac{L_K}{r_K}.$$

В практических расчетах максимальное мгновенное значение полного тока КЗ находят при наибольшей аperiodической составляющей. Это значение называют **ударным током КЗ**.

При этом выбирают предшествующий доаварийный режим – холостой ход. Это самый тяжелый случай из типичных в системе, однако, не самый тяжелый из возможных вообще.

Дело в том, что емкостной доаварийный ток дает большую аperiodическую составляющую, так как при этом разница в фазах, а значит, и в значениях токов на момент КЗ до и после будет максимальна. Но емкостной или даже активно-емкостной доаварийный ток совершенно нетипичен для режимов электрических сетей. По этой причине в расчетах КЗ используют следующий по опасности режим – холостой ход. Активно-индуктивный или индуктивный характер доаварийного тока дают меньшее значение аperiodического тока КЗ.

Как следует из приведенного выражения для расчета тока КЗ, наибольшее начальное значение аperiodической составляющей окажется в том случае если при появлении КЗ фаза напряжения будет равной нулю, потому что фаза тока при этом будет равна 90° и ток будет иметь максимальное значения (аргумент сопротивления $Z_K \sim 90^\circ$ из-за очень малых значений активных сопротивлений короткозамкнутой цепи). Если же при КЗ фаза напряжения будет 90° , то периодическая слагающая тока КЗ выйдет из нуля, закон коммутации будет выполнен, следовательно, не возникнет аperiodический ток и ударного тока не будет.

Условия образования аperiodической слагающей тока КЗ в зависимости от характера предшествующего режима показаны на рисунке 14 (показан вектор $I - I_n$, проекция которого дает начальное значение аperiodического тока).

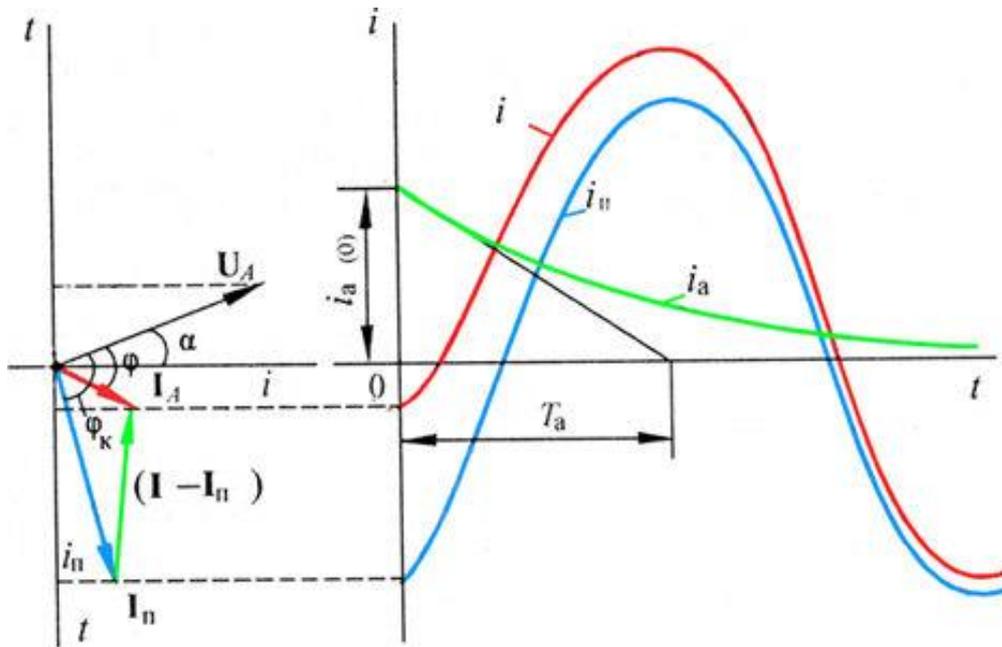


Рисунок 14

На рисунке 15 показаны три случая доаварийного режима имеющего: активно-индуктивный характер, активно-емкостной и холостой ход.

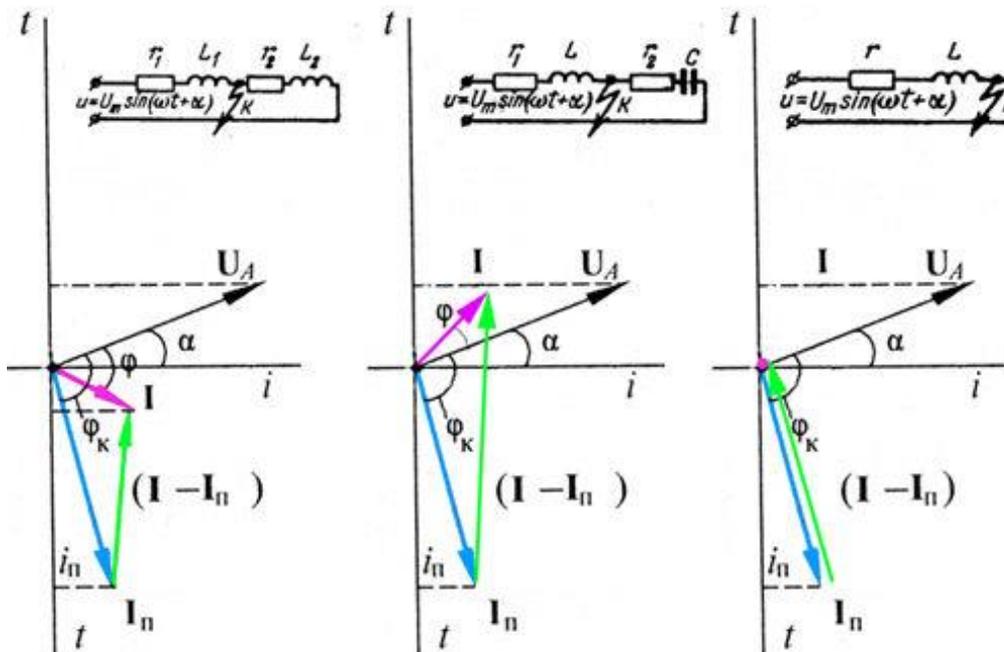


Рисунок 15.

Расчетные условия ударного тока: доаварийный режим холостого хода и при возникновении КЗ угол напряжения равен 0 градусов (рис. 16):

Ударный ток КЗ появляется тогда, когда аperiodический ток еще не успел заметно затухнуть, а периодический стал с ним одного знака, что, как видно из рисунка, происходит в момент времени равному половине периода – 0.01с (при частоте чети 50Гц).

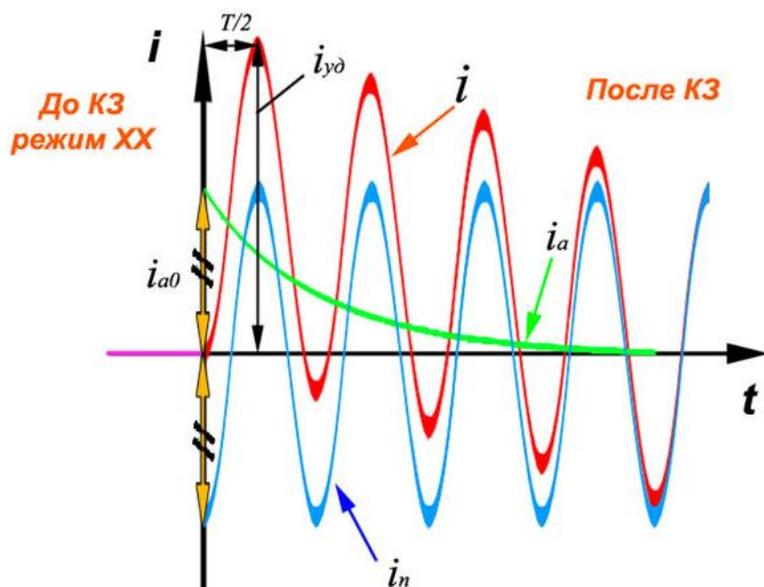


Рисунок 16.

С учетом этих условий выражение для ударного тока КЗ можно записать так:

$$i_y = I_{\text{пmax}} + I_{\text{пmax}} e^{-\frac{0.01}{T_a}} = K_y I_{\text{пmax}} = \sqrt{2} I_n K_y, \quad (8.2)$$

где K_y - ударный коэффициент.

Ударный коэффициент изменяется в пределах $2 > K_y > 1$, при изменении постоянной времени $\infty > T_a > 0$. Чем меньше T_a , тем быстрее затухает аperiodическая составляющая и тем меньше ударный коэффициент. В высоковольтных сетях (35 кВ и выше) аperiodическая составляющая исчезает через 0.1...0.3 с, а в сетях низкого напряжения она практически незаметна.

Наибольшее действующее значение полного тока

Действующим значением тока в произвольный момент времени называют среднеквадратичное значение за один его период, в середине которого находится рассматриваемый момент времени t :

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} [i(t)]^2 dt}. \quad (8.3)$$

Если ток не синусоидален, то действующее значение будет равно квадратному корню из суммы квадратов всех его гармоник.

В результате, наибольшее действующее значение полного тока КЗ рассчитывают так:

$$I_y = \sqrt{I_n^2 + I_a^2} = \sqrt{I_n^2 + \left(I_n \sqrt{2} e^{-0.01/T_a} \right)^2} = I_n \sqrt{1 + 2e^{-0.02/T_a}}, \quad (8.4)$$

Отношение действующего значения ударного тока к действующему значению периодической слагающей можно оценить так:

$$\sqrt{3} > \frac{I_{уд}}{I_n} > 1 \quad (8.5)$$

При расчете ударного тока в разветвленной сети предполагается, что апериодическая составляющая тока КЗ затухает экспоненциально с постоянной времени:

$$T_{\alpha \text{ экв}} = \frac{x_{\Sigma(r=0)}}{I_{\Sigma(x=0)}} \quad (8.6)$$

Здесь реактивное и активное сопротивления между источником и точкой КЗ, рассчитаны в предположении, что каждый элемент схемы замещается своим либо реактивным, либо активным сопротивлением. Такой подход противоречит канонам теоретических основ электротехники, но является допущением, приемлемым с практической точки зрения.

Таким образом, для расчета ударного тока КЗ необходимо построить две схемы замещения: с чисто реактивными сопротивлениями и чисто активными.

Контрольные вопросы и вопросы для самостоятельного изучения:

1. Из каких составляющих состоит полный ток КЗ?
2. Что называется ударным током?
3. Расчетные условия ударного тока.
4. Наибольшее действующее значение полного тока

9. Особенности расчета ПП при нарушении симметрии

9.1. Метод симметричных составляющих

При несимметричных повреждениях в трехфазной системе нельзя рассматривать процесс только в одной фазе, т.к. процессы в разных фазах, различны.

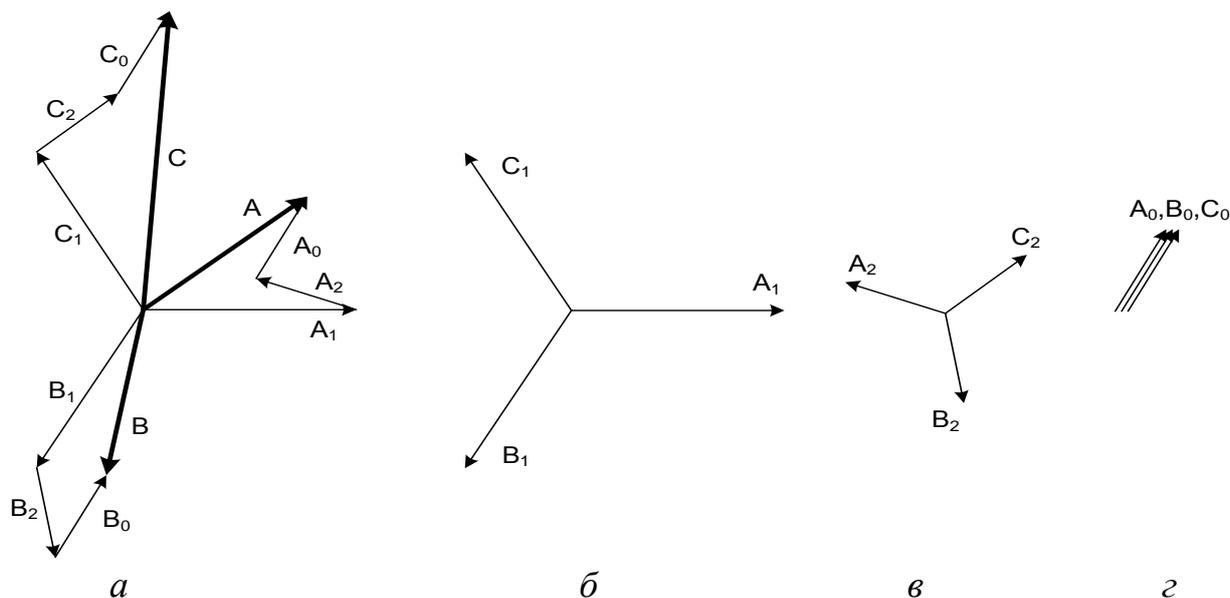


Рисунок 17. Представление несимметричной трехфазная система векторов симметричными составляющими.

Для расчетов несимметричных режимов применяется метод **симметричных составляющих**. Суть метода заключается в том, что любую несимметричную систему трех векторов (рис. 17 а) всегда можно разложить на три симметричные системы (последовательности): - прямую, - обратную, - нулевую.

Система **прямой последовательности** состоит из трех равных по величине векторов A_1, B_1, C_1 , сдвинутых по фазе на угол 120° с прямым порядком чередования фаз A_1, B_1, C_1 (рис. 17 б).

Система **обратной последовательности** состоит также из трех равных по величине векторов A_2, B_2, C_2 , сдвинутых по фазе на угол 120° , но с обратным порядком чередования фаз A_2, C_2, B_2 (рис. 17 в).

Система **нулевой** последовательности состоит из трех одинаковых векторов A_0, B_0, C_0 , совпадающих по направлению друг с другом (рис. 17 г).

Связь между векторами A, B, C несимметричной системы и векторами A_1, A_2, A_0 симметричных систем определяется матричным соотношением:

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_0 \end{bmatrix}, \quad (9.1)$$

где $a = -1/2 + j\sqrt{3}/2 = e^{j120^\circ}$ – оператор поворота вектора на 120° против часовой стрелки.

При умножении вектора на оператор a вектор поворачивается на 120° против часовой стрелки, при умножении вектора на a^2 вектор поворачивается на 240° против часовой стрелки.

Например, вектор B несимметричной системы есть сумма вектора A_1 прямой последовательности, повернутого на 240° против часовой стрелки, вектора A_2 обратной последовательности, повернутого на 120° против часовой стрелки, и вектора A_0 нулевой последовательности:

$$B = a^2 \cdot A_1 + a \cdot A_2 + 1 \cdot A_0. \quad (9.2)$$

Связь между векторами A_1, A_2, A_0 симметричных систем и векторами A, B, C несимметричной системы определяется матричным соотношением

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} * \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix}. \quad (9.3)$$

В частности, вектор A_1 прямой последовательности есть одна треть от суммы вектора A несимметричной системы, вектора B несимметричной системы, повернутого на 120° против часовой стрелки, и вектора C несимметричной системы, повернутого на 240° против часовой стрелки,

$$A_1 = \frac{1}{3} (A + a^2 \cdot B + a \cdot C). \quad (9.4)$$

Применительно к токам и напряжениям в точке несимметричного КЗ можно записать:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_0 \end{bmatrix}, \quad (9.5)$$

или

$$\begin{aligned} I_A &= I_1 + I_2 + I_0; & U_A &= U_1 + U_2 + U_0; \\ I_B &= a^2 I_1 + a I_2 + I_0; & U_B &= a^2 U_1 + a U_2 + U_0; \\ I_C &= a I_1 + a^2 I_2 + I_0; & U_C &= a U_1 + a^2 U_2 + U_0. \end{aligned} \quad (9.6)$$

Метод симметричных составляющих для расчета несимметричных режимов основывается на следующих положениях:

– несимметричная трехфазная схема (рис. 17, *а*) рассматривается в виде трех отдельных схем (рис. 17, *б, в, г*), соответствующих трем симметричным системам: прямой, обратной и нулевой последовательностей;

– элементы, входящие в исходную электрическую схему, представляются в указанных трех схемах соответствующими сопротивлениями прямой Z_1 , обратной Z_2 и нулевой Z_0 последовательностей; при этом следует учитывать отличие сопротивлений Z_1, Z_2, Z_0 отдельных элементов схемы;

– источники ЭДС имеются только в схеме прямой последовательности;

– в каждой схеме протекает ток соответствующей последовательности;

– напряжения трех последовательностей U_1, U_2, U_0 считаются приложенными (возникающими) в месте повреждения рассматриваемой цепи.

На схемах рисунка 18, *б* обозначены:

E_1 – эквивалентная ЭДС прямой последовательности;

I_1, I_2, I_0 – токи прямой, обратной и нулевой последовательностей;

U_1, U_2, U_0 – напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей;

Н и К – начало и конец схемы.

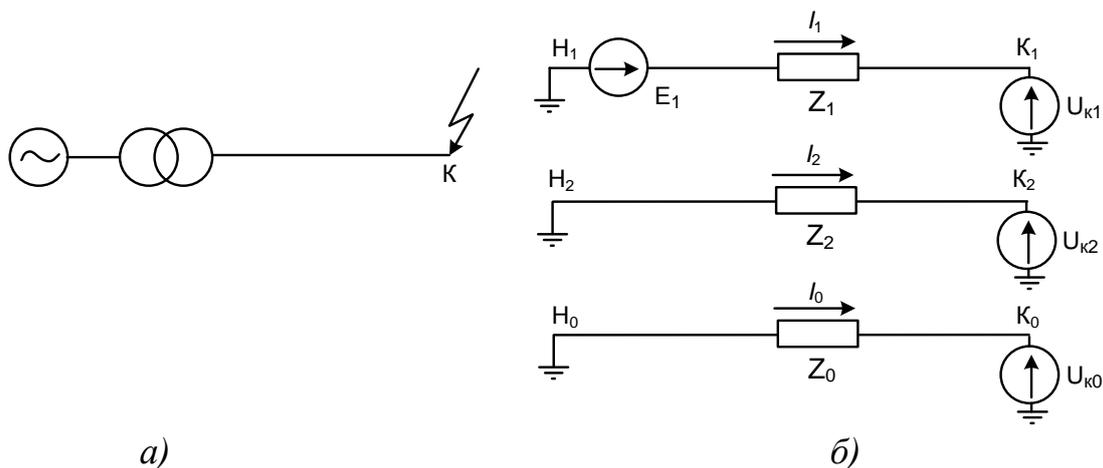


Рисунок 18. Принципиальная схема с несимметричным повреждением в точке *К* (*а*) и схемы прямой, обратной и нулевой последовательностей (*б*).

Расчет токов I_1, I_2, I_0 и напряжений U_1, U_2, U_0 каждой последовательности ведется в соответствии с законами теоретической электротехники. Результирующие токи и напряжения в точке несимметричного КЗ рассчитываются по выражениям (9.6).

9.2. Двухфазное короткое замыкание

Принципиальная схема этого режима приведена на рисунке 19, а. При КЗ между фазами В и С имеют место следующие граничные условия:

- в точке КЗ напряжения поврежденных фаз $U_B=U_C$;
- ток КЗ неповрежденной фазы $I_A=0$;
- токи КЗ поврежденных фаз $I_B=-I_C$.

Поскольку точка КЗ не имеет связи с землей, токов и напряжений нулевой последовательности не будет.

Комплексная схема замещения (рис. 19, б) включает в себя эквивалентные схемы прямой Z_1 и обратной Z_2 последовательностей. Сопротивления этих схем соединены последовательно. Ток обратной последовательности I_{A2} направлен встречно току прямой последовательности I_{A1} .

На основании граничных условий, комплексной схемы замещения, законов электротехники и соотношений (9.6) построены векторные диаграммы напряжений (рис. 19, в) и токов (рис. 19, г) в точке двухфазного КЗ.

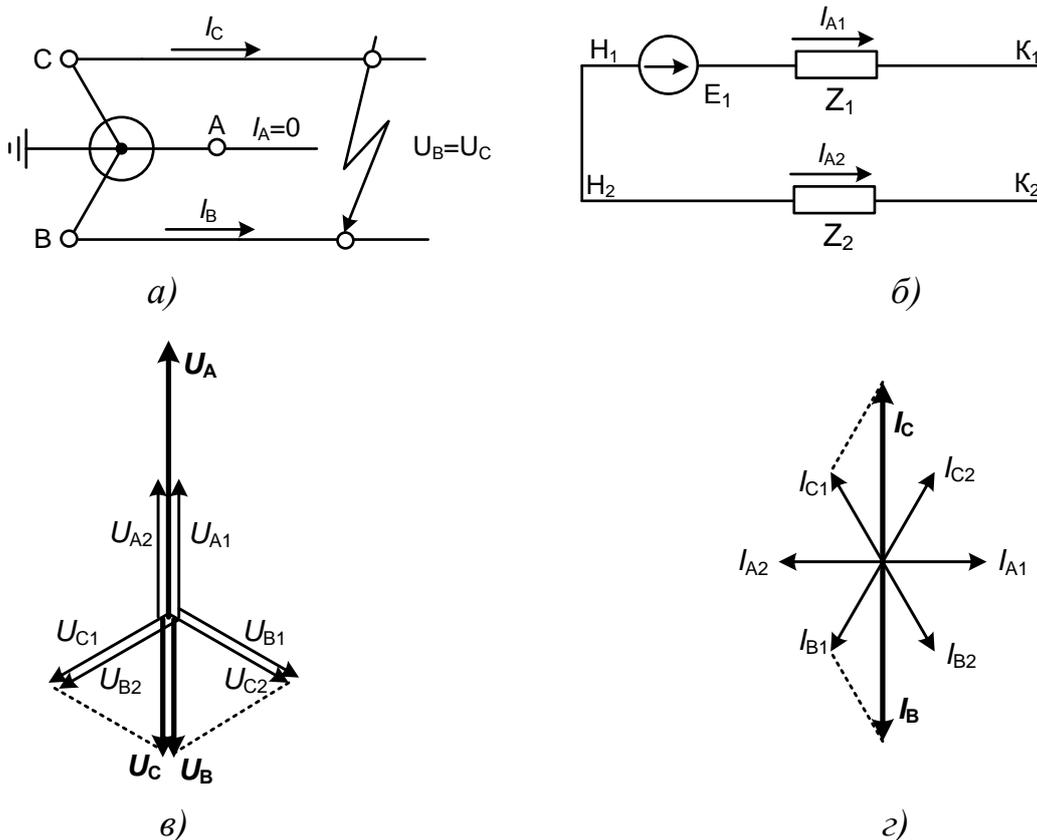


Рисунок 19. Принципиальная схема (а), комплексная схема замещения (б), векторные диаграммы напряжений (в) и токов (г) при двухфазном КЗ фаз С и В.

9.3. Однофазное короткое замыкание

Принципиальная схема этого режима показана на рисунке 20, а. При КЗ фазы А имеют место следующие граничные условия:

- токи КЗ неповрежденных фаз $I_B=0$, $I_C=0$;

– в точке КЗ напряжение поврежденной фазы $U_A=0$.

Комплексная схема замещения (рис. 20, б) включает в себя эквивалентные схемы прямой Z_1 , обратной Z_2 и нулевой последовательностей Z_0 . Сопротивления этих схем соединены последовательно, поэтому имеет место равенство векторов токов $I_1=I_2=I_0$.

На основании граничных условий, комплексной схемы замещения, законов электротехники и соотношений (9.6) построены векторные диаграммы напряжений (рис. 20, в) и токов (рис. 20, г) в точке однофазного КЗ.

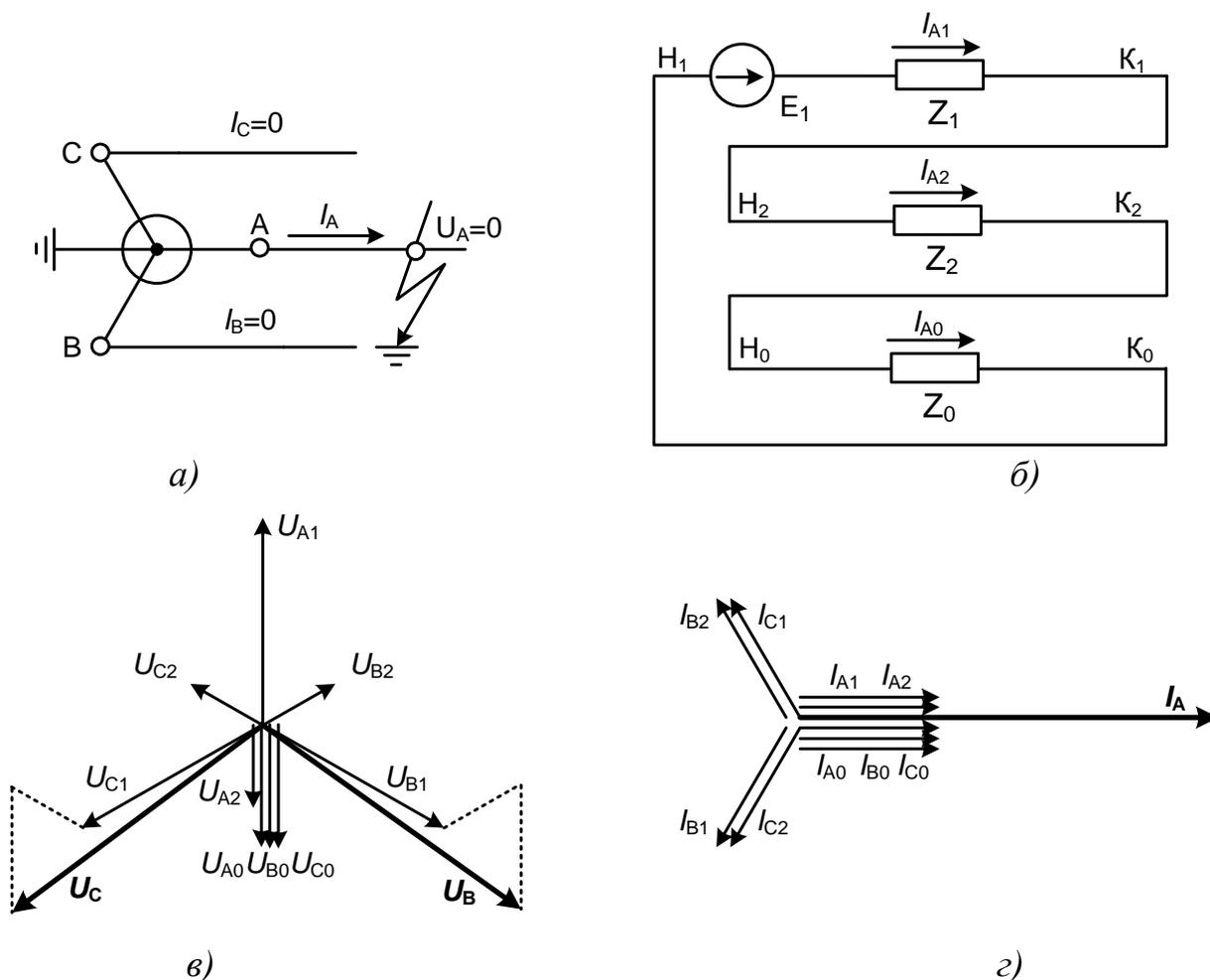


Рисунок 20. Схема (а), комплексная схема замещения (б), векторные диаграммы напряжений (в) и токов (г) при однофазном КЗ фазы А.

9.4. Двухфазное короткое замыкание на землю

Принципиальная схема этого режима показана на рисунке 21, а. При КЗ на землю фаз В и С имеют место следующие граничные условия:

- в точке КЗ напряжения поврежденных фаз $U_B=0$, $U_C=0$;
- ток КЗ в неповрежденной фазе $I_A=0$.

Комплексная схема замещения (рис. 21, б) включает в себя эквивалентные схемы прямой Z_1 , обратной Z_2 и нулевой последовательностей Z_0 .

Сопротивления эквивалентных схем обратной Z_2 и нулевой Z_0 последовательностей соединяются между собой параллельно. Схемы всех

последовательностей соединяются так, чтобы токи обратной I_{A2} и нулевой I_{A0} последовательностей были направлены противоположно по отношению к току прямой последовательности I_{A1} .

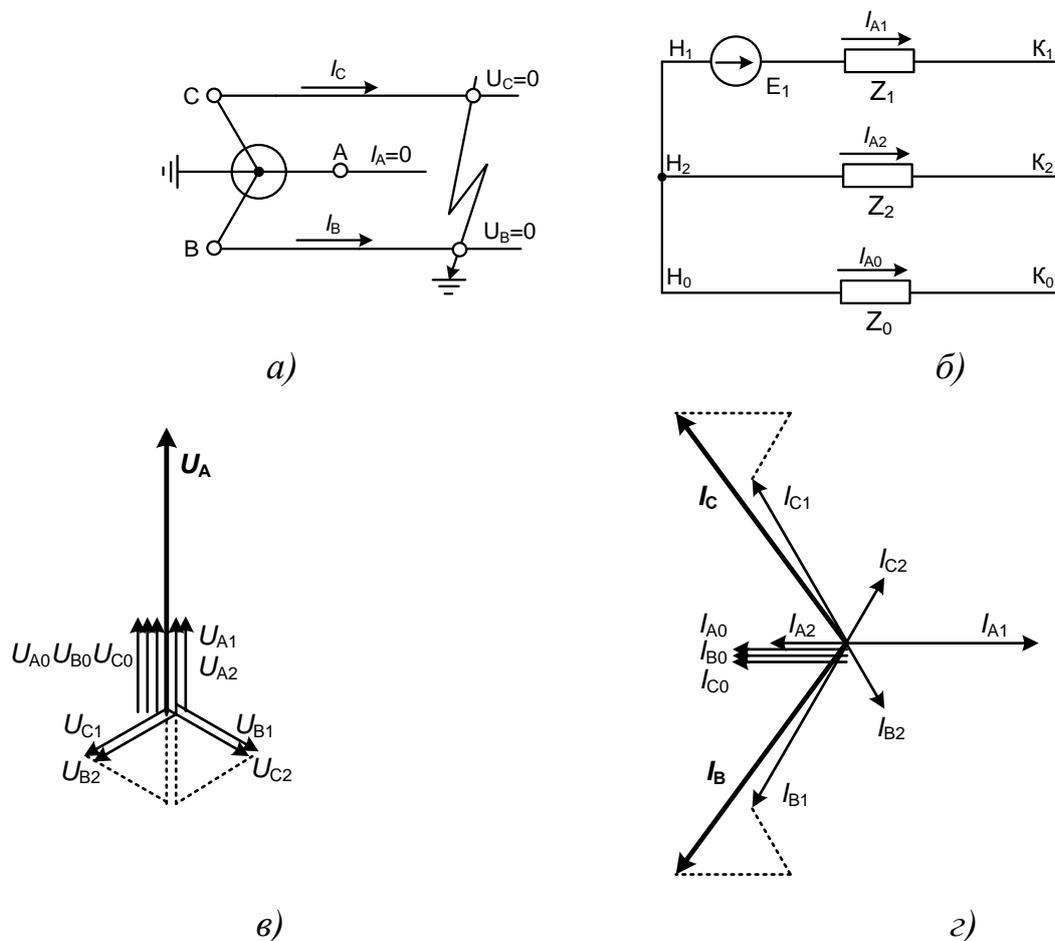


Рисунок 21. Принципиальная схема (а), комплексная схема замещения (б), векторная диаграмма напряжений (в) и токов (г) при двухфазном КЗ на землю фаз С и В.

На основании граничных условий, комплексной схемы замещения, законов электротехники и соотношений (9.6) построены векторные диаграммы напряжений (рис. 21, в) и токов (рис. 21, г) в точке двухфазного КЗ на землю.

Контрольные вопросы и вопросы для самостоятельного изучения:

1. На чем основан метод симметричных составляющих?
2. Что такое система прямой последовательности?
3. Что такое система обратной последовательности?
4. Что такое система нулевой последовательности?
5. Расчет тока КЗ двухфазного КЗ.
6. Расчет тока КЗ однофазного КЗ.

Рекомендуемая литература

1. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электроэнергетических системах: учеб, пособие. - М.: Издательство «Омега-Л», 2013. - 384 с.: ил., табл. - (Высшее техническое образование).
2. Переходные процессы в системах электроснабжения: Учебник. В. Н. Винославский, Г.Г. Пивняк, Л. И. Несен и др.; Под ред. В. Н. Винославского. К: Выща ШК. Головное изд-во, 1989. 422 С.
3. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. Дроздов А.Д. 1976, Новочеркасск: Новочеркасский политехнический институт.
4. Несимметричные переходные режимы в электрических системах и цепях релейной защиты. Дроздов А.Д. 1977, Новочеркасск: Новочеркасский политехнический институт.

ГУРИН Александр Васильевич
ГУРИНА Ирина Алексеевна

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Учебное пособие
для обучающихся направления подготовки
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Корректор Чагова О.Х.
Редактор Чагова О.Х.

Сдано в набор 20.09.2024 г.
Формат 60x84/16
Бумага офсетная.
Печать офсетная.
Усл. печ. л. 3,25
Заказ № 4993
Тираж 100 экз.

Оригинал-макет подготовлен
в Библиотечно-издательском центре СКГА
369000, г. Черкесск, ул. Ставропольская, 36

