

На правах рукописи



ЛОЗИНСКИЙ КОНСТАНТИН СТЕПАНОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЁТОВ НЕСИММЕТРИЧНЫХ
РЕЖИМОВ В ХОДЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ
ПРОЦЕССОВ ДЛЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические
системы

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск - 2011

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО “Национальный исследовательский Томский политехнический университет” на кафедре “Электроэнергетических сетей и систем”

Научный руководитель: **Вайнштейн Роберт Александрович**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Литвак Валерий Владимирович**
доктор технических наук, профессор

Ершов Юрий Александрович
кандидат технических наук, доцент

Ведущая организация: **ЗАО “Институт автоматизации энергетических систем”**, г. Новосибирск

Защита состоится «21» декабря 2011 г. в 14⁰⁰ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.10 при ФГБОУ ВПО “Национальный исследовательский Томский политехнический университет” по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВПО Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан «18» ноября 2011 г.

Ученый секретарь совета
по защите докторских
и кандидатских диссертаций
Д 212.269.10, д.т.н., с.н.с.



Кабышев А.В

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

В настоящее время для расчета токов короткого замыкания (КЗ) в электроэнергетических системах (ЭЭС) используются программные комплексы (ПК), которые соответствуют методическим положениям, действующим руководящим указаниям и стандартам по расчетам токов КЗ. Существенным недостатком данных ПК является невозможность учета изменения величин в ходе электромеханических переходных процессов (ЭМПП) в ЭЭС и электромагнитных переходных процессов в контурах роторов синхронных машин. Эти процессы, как известно, могут оказывать влияние на функционирование устройств релейной защиты и автоматики (РЗА).

Применяемые в специализированных ПК («Мустанг», «Дакар», «АНАРЭС-2000» и т.п.) математические модели электрической сети для расчётов установившихся режимов и ЭМПП построены на однолинейной схеме замещения (схеме прямой последовательности). Следовательно, процессы, вызываемые несимметричными короткими замыканиями или неполнофазными режимами, воспроизводятся только по прямой последовательности. При этом исключается возможность определения токов и напряжений обратной и нулевой последовательности и их фазных значений в любой ветви и в любом узле схемы в ходе ЭМПП, что не позволяет использовать данные ПК для выполнения большинства расчётных задач РЗА.

В связи с этим, актуальной является задача разработки методик расчёта несимметричных режимов в ПК, моделирующих ЭМПП по однолинейной схеме замещения сети, а также совершенствования математических моделей электрической сети данных ПК, с целью реализации в них возможности расчёта электрических величин в ходе ЭМПП при одноместной и многоместной несимметрии трёхфазной электрической сети.

При выполнении диссертационной работы автор использовал известные результаты работ Ульянова С.А., Чернина А.Б., Иванова В.П., Лоханина Е.К., Скрыпника А.И., Шепилова О.Н., Закарюкина В.П., Нагая В.И., Чернякова В.Н., Медова Р.В. и др. в области расчёта электрических величин в несимметричных режимах и моделирования электромеханических переходных процессов на электронных вычислительных машинах (ЭВМ).

Цель работы и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка методик и вариантов усовершенствования математической модели электрической сети, а также вспомогательных программных средств для расчёта электрических величин при одноместной и многоместной несимметрии трёхфазной электрической сети в ходе электромеханического переходного процесса в энергосистеме.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

- разработка методики расчёта симметричных составляющих токов и напряжений в узлах и ветвях схемы при несимметричных режимах электрической сети, в ПК для моделирования ЭМПП, работающих с однолинейной схемой замещения;
- разработка алгоритма автоматического формирования схем замещения обратной и нулевой последовательности на основе схемы замещения прямой последовательности, дополненной необходимой количественной и логической информацией по параметрам исследуемой сети;
- реализация полученного алгоритма в виде программы для ЭВМ с пользовательским интерфейсом, использующим принятые в электроэнергетике термины и обозначения;
- разработка вариантов усовершенствования математической модели электрической сети, применяемой в ПК для моделирования ЭМПП в ЭЭС, с целью реализации в этих ПК возможности расчёта электрических величин в ходе ЭМПП при многоместной несимметрии.

Методы исследований

Для решения поставленных в работе задач используются: фундаментальные законы электротехники; методы обработки информации с помощью ЭВМ; методы математического моделирования; вычислительные эксперименты.

Достоверность результатов подтверждается использованием классических методов, совпадением результатов расчётов, выполненных в различных специализированных программных комплексах.

Научная новизна и результаты, выносимые на защиту

1. Разработан алгоритм автоматического формирования схем замещения обратной и нулевой последовательности, с сохранением в них трансформаторных связей в продольных и поперечных ветвях.
2. Разработаны уравнения для моделирования нескольких одновременных коротких замыканий и обрывов фаз в системе симметричных составляющих, записанные в форме, используемой для уравнений электрической сети программных комплексов, моделирующих электромеханические переходные процессы.
3. Разработана методика расчёта несимметричных режимов электрической сети в ходе электромеханических переходных процессов с применением декомпозиции схемы замещения на части в фазных координатах и симметричных составляющих.

Практическое значение и реализация результатов работы

Полученные в работе средства расчёта электрических величин в ходе электромеханических переходных процессов при несимметричных режимах электроэнергетической системы, могут использоваться в расчётах электрических величин для выбора параметров срабатывания и анализа поведения устройств релейной защиты и автоматики в ходе электромеханического переходного процесса в энергосистеме.

Результаты работы использовались:

- ООО НПП “ЭКРА” для расчёта напряжения нулевой последовательности, наводимого на цепи статора гидрогенераторов Чебоксарской ГЭС при однофазном коротком замыкании на стороне высокого напряжения трансформатора блока (НИР Н-10/08 (173/Э-08) «Обследование режимов заземления нейтрали генератора для предотвращения опасных перенапряжений в различных режимах эксплуатации с выдачей экспертного заключения, разработкой ТЭО выбранного варианта»).

- ООО «НефтеЭнергоПроект» в расчётах токов короткого замыкания при проектировании объектов: «Система магистральных нефтепроводов Юрубчено-Тохомское месторождение (ЮТМ) – Тайшет. Магистральный нефтепровод Кучеткан-Тайшет. Автономное электроснабжение», «Технологическое присоединение газотурбинной электростанции мощностью 24 МВт на Двуреченском месторождении ОАО «Томскнефть» ВНК».

- в учебном процессе Томского политехнического университета при выполнении курсовых и дипломных проектов.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международной научно-практической конференции “Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем” (г. Москва, 2009 г.), международной научно-практической конференции “ЭНЕРГОСИСТЕМА: Исследование свойств, Управление, Автоматизация” (г. Новосибирск, 2009 г.); научно-технической конференции “Развитие противоаварийного управления Объединенной энергосистемы Сибири” (г. Кемерово, 2010 г.); международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2008, 2009 г.г.); международной научно - практической конференции “ЭНЕРГОСИСТЕМА: Управление, Конкуренция, Образование” (Екатеринбург, 2008 г.).

Публикации. По направлению диссертационной работы автором опубликовано 13 работ, в том числе: 4 статьи в рецензируемых периодических изданиях по перечню ВАК, 7 статей материалы докладов конференций, 1 работа депонирована, 1 программа введена в Государственный фонд алгоритмов и программ РФ.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 37 наименований, одного приложения и содержит 54 рисунка. Общий объём диссертации 147 стр.: текст диссертации 140 стр., список литературы 4 стр., приложение 3 стр.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, отражена научная новизна и практическое значение полученных результатов, очерчен круг задач решаемых в диссертации.

В первой главе рассмотрены характерные случаи ложной работы и отказа в срабатывании устройств релейной защиты и автоматики вследствие изменения подводимых к измерительным органам электрических величин под влиянием электромеханических переходных процессов в электроэнергетической системе.

Показано замеченное в процессе исследований влияние ЭМПП на работу защит, реагирующих на симметричные составляющие токов, при нахождении электрического центра качаний (ЭЦК) вблизи места КЗ. При расчетах динамической устойчивости энергосистемы схемы обратной и нулевой последовательности обычно сворачивают к эквивалентному сопротивлению - шунту короткого замыкания, который подключается к месту КЗ в схеме прямой последовательности. (Например, комплексная схема замещения для случая однофазного КЗ на рис. 1).

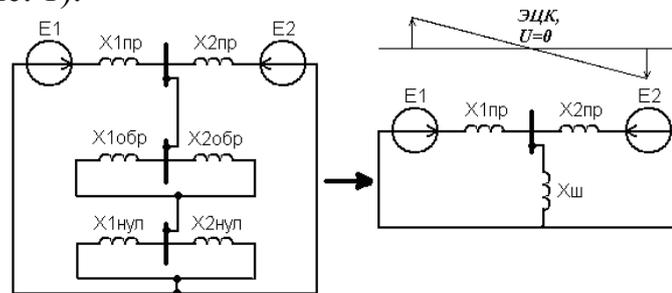


Рис.1. Комплексная схема замещения простой сети при однофазном КЗ
 E1, E2, X1пр, X2пр – ЭДС и сопротивления в схеме прямой последовательности;
 X1обр, X2обр – сопротивления в схеме обратной последовательности;
 X1нул, X2нул – сопротивления в схеме нулевой последовательности;
 Xш – эквивалентное сопротивление последовательно подключенных схем обратной и нулевой последовательности (шунт КЗ).

Токи в ветвях схем обратной (ОП) и нулевой последовательности (НП) находятся в прямой зависимости от тока по шунту КЗ, соответственно, чем ближе ЭЦК к месту возникновения несимметрии, тем заметнее уменьшение токов обратной и нулевой последовательности по ветвям схемы в ходе электромеханического переходного процесса. Данное обстоятельство может привести к отказу защит, реагирующих на симметричные составляющие аварийных токов, в частности токовой защиты нулевой последовательности.

Приведён сравнительный анализ существующих методик учёта электромеханических переходных процессов при выборе характеристик и параметров настройки устройств РЗА, показано их несовершенство. Выполнено сопоставление требований к математической модели электрических машин при моделировании несимметричных режимов в различных системах координат. Показаны достоинства и недостатки каждой из систем для различных расчетных задач.

Приведён обзор используемых в электроэнергетике расчетных программных комплексов, выполнено сравнение их возможностей применительно к решению задач расчета несимметричных режимов и моделирования электромеханических переходных процессов. Сделан вывод, что программные средства, позволяющие с достаточной точностью рассчитывать фазные токи и напряжения, а также их симметричные составляющие при несимметричных режимах электрической сети большой размерности в ходе электромеханического переходного процесса, в настоящее время отсутствуют. Разработка таких средств является актуальной задачей.

Во второй главе приводится описание разработанных средств расчёта токов и напряжений в ветвях и узлах схемы в ходе электромеханического переходного процесса в энергосистеме при одноместной несимметрии. Данные средства включают в себя расчётную методику и компьютерную программу, выполняющую ряд операций, без автоматизации которых практическое применение предлагаемой методики было бы невозможно из-за их трудоёмкости. Для использования разработанной методики необходим какой-либо программный комплекс для моделирования ЭМПП, построенный на однолинейной схеме замещения сети (схеме прямой последовательности). Методика заключается в том, что к имеющейся в ПК схеме замещения прямой последовательности, в виде фиктивных узлов и ветвей прямой последовательности, добавляются развёрнутые схемы замещения обратной и нулевой последовательности. Средствами исходного ПК в ходе электромеханического переходного процесса может быть организована “сборка” из схем замещения отдельных последовательностей комплексных схем замещения, соответствующих моделируемым видам несимметрии. При этом возможна смена видов несимметрии по каким-либо факторам, что позволяет моделировать процессы, например в цикле однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ) и др. Для реализации такой возможности разработаны правила составления схем ОП и НП и соответствующая вспомогательная программа “Shemwizard” для автоматического формирования схем ОП и НП, с использованием только внешних средств обращения к базовой программе. В главе в виде блок-схемы приведен разработанный автором алгоритм автоматического формирования схем замещения ОП и НП на основе схемы замещения прямой последовательности, а также алгоритмы других (вспомогательных) функций, выполняемых программой “Shemwizard”. То обстоятельство, что при расчетах по предлагаемой методике сохраняются трансформаторные связи в продольных

и поперечных ветвях схем замещения ОП и НП, накладывает на алгоритм формирования схем ОП и НП требование определения уравнивающих коэффициентов трансформации относительно общей точки для поперечных ветвей данных схем. В алгоритме формирования схем замещения обратной и нулевой последовательности, для решения данной задачи, используется адаптированный метод “волны”, стандартно применяющийся для поиска кратчайшего пути на простом неориентированном графе. Применительно к схемам замещения электрической сети, данный метод реализован следующим образом: в качестве вершин графа выступают узлы схемы, в качестве ребер – ветви, “волна” начинается от выбранного узла, для которого её значение равно 1 и растекается через ветви, связывающие узлы в схеме. В качестве значений “волны” для узлов используется величина коэффициента трансформации ступени напряжения узла относительно общей точки (нулевого провода) схемы.

На схеме простой энергосистемы приводится пример использования разработанной методики расчета и программы для автоматического формирования схем замещения ОП и НП. Для этой схемы, с использованием ПК “Мустанг” в качестве базовой программы, выполнен расчет симметричных составляющих токов по стороне 220 кВ трансформатора блока электростанции в цикле успешного ОАПВ на одной из цепей воздушной линии электропередачи (ЛЭП), отходящей от шин станции. Результаты расчёта приведены на рис. 2.

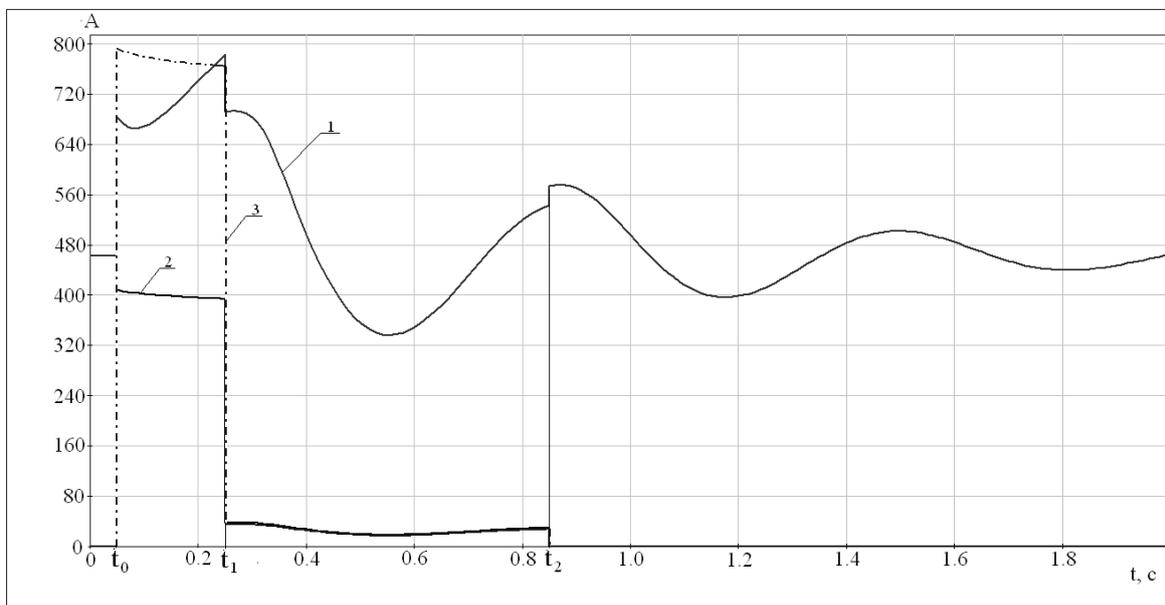


Рис. 2. Иллюстрация результатов, полученных с использованием предлагаемого приёма расчёта.

- 1 – Ток прямой последовательности на стороне 220 кВ трансформатора;
- 2 – Ток обратной последовательности на стороне 220 кВ трансформатора;
- 3 – Ток нулевой последовательности на стороне 220 кВ трансформатора;
- $t_1 - t_0$ – стадия однофазного короткого замыкания;
- $t_2 - t_1$ – стадия неполнофазного режима при отключении повреждённой фазы;

Поскольку при решении задачи оценки динамической устойчивости электроэнергетической системы к возмущениям, вызванным несимметричными

КЗ и обрывами фаз, достаточно моделировать процессы только в схеме прямой последовательности, такие возмущения можно моделировать включением в место несимметрии шунта КЗ или добавочного сопротивления. Для решения задач расчёта шунтов несимметричных коротких замыканий и добавочных сопротивлений, автором разработана программа “EkvS”, которая позволяет найти эквивалентное сопротивление схем обратной и нулевой последовательности, сформированных программой “Shemwizard”, для любого узла относительно общей точки схемы, или для ветви относительно её начала и конца. Зная эквивалентные сопротивления схем замещения обратной и нулевой последовательности относительно места короткого замыкания, достаточно просто по известным соотношениям метода симметричных составляющих определить величину шунта короткого замыкания или добавочного сопротивления в зависимости от вида несимметрии.

Использование предложенной расчетной методики и вспомогательных программных средств позволяет выполнять расчёты в ходе ЭМПП электрических величин для анализа работы устройств РЗА при одноместных несимметричных КЗ и неполнофазных режимах.

В третьей главе рассматриваются вопросы расчёта электрических величин в ходе электромеханического переходного процесса при многоместной (сложной) несимметрии трёхфазной электрической сети.

В начале главы проводится анализ существующих способов расчёта электрических величин при многоместной несимметрии трёхфазной электрической сети. Рассматриваются методики, описанные в известной литературе по расчёту токов КЗ, а также способ расчёта электрических величин при многоместной несимметрии, используемый в специализированном ПК для расчета релейной защиты ТКЗ – 3000 (по описанию, приведённому в справочной системе данного ПК). Проведённый анализ показывает, что все эти способы ориентированы на расчёт электрических величин для одного момента времени и не подходят или неэффективны при расчёте электрических величин в ходе ЭМПП. Это связано с ограниченным количеством видов несимметрии для которых составлены расчётные выражения и эквивалентированием рассчитываемой схемы к местам несимметрии, что недопустимо при необходимости учёта различия переходных процессов отдельных генераторов. Радикальным способом решения вопроса расчёта полных электрических величин и симметричных составляющих является использование математической модели электроэнергетической системы в фазных координатах. Однако, при этом порядок системы алгебраических и дифференциальных уравнений резко возрастает, в то время как точность решения основных задач расчета установившихся режимов и электромеханических переходных процессов вполне достаточна и при использовании модели энергосистемы, используемой в таких программах как “Мустанг”, “Дакар” и т.п.

. В связи с этим возникла необходимость усовершенствования математической модели электрической сети для реализации возможности расчёта электрических величин при многоместной несимметрии, с сохранением

идеологии моделирования ЭМПП той, что используется в ПК “Мустанг” и других подобных ПК. В главе приведено описание математической модели энергосистемы, используемой в таких ПК, принятой в данной работе за исходную.

Разработка вариантов усовершенствования модели электрической сети выполнялась с учетом следующие требования:

- 1) сохранение существующих возможностей в части моделирования электромеханического переходного процесса в энергосистеме;
- 2) возможность расчета для случаев с любым количеством одновременных несимметричных повреждений;
- 3) возможность расчета электрических величин при сложных повреждениях (обрыв провода и падение его на землю);

В процессе работы было найдено два варианта решения поставленной задачи, которые приводятся в данной главе.

Первый вариант заключается в использовании модели сети, работающей со схемами замещения симметричных составляющих. При этом моделирование всех видов КЗ (в том числе через переходные сопротивления) и обрывов фаз выполняется посредством подстановки в систему уравнений электрической сети для каждого места несимметрии разработанных уравнений, связывающих электрические величины в месте нарушения симметрии.

Второй вариант усовершенствования математической модели электрической сети основывается на разработанной методике расчёта с применением декомпозиции схемы замещения на части в симметричных составляющих (120) и фазных координатах (ABC). Фрагменты в разных системах координат соединяются через полученные из основных положений метода симметричных составляющих уравнения перехода (переходные звенья). Части схемы замещения, в которых имеется нарушение симметрии трёхфазной сети, моделируются в координатах ABC, остальная часть схемы замещения – в системе симметричных составляющих 120.

В отличие от методики, описанной в главе 2, применение какого - либо существующего ПК для моделирования электромеханических переходных процессов в данном случае невозможно, так как для этого требуется изменить исходный код программы. Данное обстоятельство вызвало необходимость разработки вспомогательных программных средств для расчета на ЭВМ, в которых можно апробировать полученные в ходе данной работы варианты усовершенствования модели сети. Эта задача решалась с помощью математического пакета MathCad, средствами которого были составлены программы, выполняющие расчеты по схеме простой электроэнергетической системы. Правильность результатов расчёта при моделировании одноместной и многоместной несимметрии в ходе ЭМПП проверялась выполнением граничных условий для напряжений и токов в каждом месте несимметрии, а для сверхпереходной стадии КЗ - совпадением результатов с полученными в программе расчета электрических величин при сложных повреждениях комплекса ТКЗ-3000.

Оба варианта усовершенствованных моделей сети представлены системами алгебраических уравнений, которые записываются в форме, применяемой для уравнений электрической сети ПК “Мустанг” и других подобных ПК. В главе приведён пример составления системы алгебраических уравнений электрической сети для схемы из 3-х узлов, отмечено, что аналогично можно составить и решить систему уравнений для нахождения узловых напряжений схемы замещения любой размерности. Этот же принцип составления уравнений для связи напряжений узлов в схеме каждой фазы или последовательности, применим в случае если полная схема замещения состоит из схем трёх фаз или симметричных составляющих.

Получение уравнений для моделирования многоместных КЗ и обрывов фаз в системе симметричных составляющих 120 выполнено преобразованием соотношений, связывающих токи в месте несимметрии из системы фазных координат в симметричные составляющие. Первоначально рассматривались замыкания между фазами и землёй с учетом переходных сопротивлений. На рис. 5 приведён фрагмент схемы замещения в фазных координатах ABC, на котором показано место замыкания и связи фаз в данном месте между собой и относительно земли.

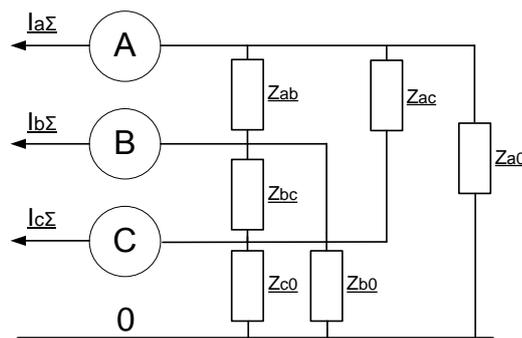


Рис. 5. Поясняющая схема места КЗ в одной точке 3-х фазной сети.

Токи $I_{a\Sigma}$, $I_{b\Sigma}$, $I_{c\Sigma}$ – это сумма токов втекающих и вытекающих из места КЗ по фазам А, В, С.

До возникновения замыкания токи от места КЗ $I_{a\Sigma} = 0$, $I_{b\Sigma} = 0$, $I_{c\Sigma} = 0$.

После включения переходных сопротивлений между фазами, между каждой фазой и землёй, в соответствии с первым законом Кирхгофа,

$$\underline{I_{a\Sigma}} + \underline{I_{a0}} + \underline{I_{ab}} + \underline{I_{ac}} = 0;$$

$$\underline{I_{b\Sigma}} + \underline{I_{b0}} + \underline{I_{ba}} + \underline{I_{bc}} = 0;$$

$$\underline{I_{c\Sigma}} + \underline{I_{c0}} + \underline{I_{ca}} + \underline{I_{cb}} = 0;$$

токи I_{a0} , I_{b0} , I_{c0} , I_{ab} , I_{ba} , I_{ac} , I_{ca} , I_{bc} , I_{cb} записываются в виде разницы напряжений, делённой на сопротивление. Например, для токов вытекающих из фазы А рассматриваемого узла:

$$\underline{I_{a0}} = (\underline{U_a} - 0) / \underline{Z_{a0}};$$

$$\underline{I_{ab}} = (\underline{U_a} - \underline{U_b}) / \underline{Z_{ab}};$$

$$\underline{I_{ac}} = (\underline{U_a} - \underline{U_c}) / \underline{Z_{ac}};$$

Для проведения расчета в координатах 120 необходимо перейти к симметричным составляющим токов, для чего выражаем фазные напряжения через их симметричные составляющие.

$$\begin{aligned} \underline{U}_a &= \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0; \\ \underline{U}_b &= a^2 \cdot \underline{U}_1 + a \cdot \underline{U}_2 + \underline{U}_0; \\ \underline{U}_c &= a \cdot \underline{U}_1 + a^2 \cdot \underline{U}_2 + \underline{U}_0, \end{aligned}$$

где $a = e^{j120^\circ}$.

Токи по переходным сопротивлениям выражаются в следующем виде:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{a0} &= (\underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0) / \underline{Z}_{a0}; \\ \underline{I}_{b0} &= (a^2 \cdot \underline{U}_1 + a \cdot \underline{U}_2 + \underline{U}_0) / \underline{Z}_{b0}; \\ \underline{I}_{c0} &= (a \cdot \underline{U}_1 + a^2 \cdot \underline{U}_2 + \underline{U}_0) / \underline{Z}_{c0}; \\ \underline{I}_{ab} &= (\underline{U}_a - \underline{U}_b) / \underline{Z}_{ab} = ((1 - a^2)\underline{U}_1 + (1 - a)\underline{U}_2) / \underline{Z}_{ab}; \\ \underline{I}_{ba} &= (\underline{U}_b - \underline{U}_a) / \underline{Z}_{ab} = ((a^2 - 1)\underline{U}_1 + (a - 1)\underline{U}_2) / \underline{Z}_{ab}; \\ \underline{I}_{ac} &= (\underline{U}_a - \underline{U}_c) / \underline{Z}_{ac} = ((1 - a)\underline{U}_1 + (1 - a^2)\underline{U}_2) / \underline{Z}_{ac}; \\ \underline{I}_{ca} &= (\underline{U}_c - \underline{U}_a) / \underline{Z}_{ac} = ((a - 1)\underline{U}_1 + (a^2 - 1)\underline{U}_2) / \underline{Z}_{ac}; \\ \underline{I}_{bc} &= (\underline{U}_b - \underline{U}_c) / \underline{Z}_{bc} = ((a^2 - a)\underline{U}_1 + (a - a^2)\underline{U}_2) / \underline{Z}_{bc}; \\ \underline{I}_{cb} &= (\underline{U}_c - \underline{U}_b) / \underline{Z}_{bc} = ((a - a^2)\underline{U}_1 + (a^2 - a)\underline{U}_2) / \underline{Z}_{bc}. \end{aligned}$$

В зависимости от вида короткого замыкания, какие-либо из сопротивлений стремятся к бесконечности, соответственно, токи по ним исключаются из системы уравнений.

Например, при замыкании между фазой В и землёй в сети с заземлённой нейтралью через сопротивление \underline{Z}_{b0} , в системе 120 токи отдельных последовательностей ($\underline{I}_{1кз}$, $\underline{I}_{2кз}$, $\underline{I}_{0кз}$) имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{1кз} &= 1/3(\underline{I}_{a0} + a \cdot \underline{I}_{b0} + a^2 \cdot \underline{I}_{c0}) = 1/3(a \cdot \underline{I}_{b0}) = 1/3 \cdot a \cdot (a^2 \cdot \underline{U}_1 + a \cdot \underline{U}_2 + \underline{U}_0) / \underline{Z}_{b0}; \\ \underline{I}_{2кз} &= 1/3(\underline{I}_{a0} + a^2 \cdot \underline{I}_{b0} + a \cdot \underline{I}_{c0}) = 1/3(a^2 \cdot \underline{I}_{b0}) = 1/3 \cdot a^2 \cdot (a^2 \cdot \underline{U}_1 + a \cdot \underline{U}_2 + \underline{U}_0) / \underline{Z}_{b0}; \\ \underline{I}_{0кз} &= 1/3(\underline{I}_{a0} + \underline{I}_{b0} + \underline{I}_{c0}) = 1/3 \cdot \underline{I}_{b0} = 1/3 \cdot (a^2 \cdot \underline{U}_1 + a \cdot \underline{U}_2 + \underline{U}_0) / \underline{Z}_{b0}; \end{aligned}$$

Для схем последовательностей в системе 120 в соответствии с 1 законом Кирхгофа, при возникновении КЗ к токам $\underline{I}_{1\Sigma}$, $\underline{I}_{2\Sigma}$, $\underline{I}_{0\Sigma}$ добавляются токи в месте КЗ $\underline{I}_{1кз}$, $\underline{I}_{2кз}$, $\underline{I}_{0кз}$.

Система уравнений для узла с коротким замыканием фазы В приобретает вид:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{1\Sigma} + \underline{I}_{1кз} &= \underline{I}_{1\Sigma} + 1/3 \cdot a \cdot (a^2 \cdot \underline{U}_1 + a \cdot \underline{U}_2 + \underline{U}_0) / \underline{Z}_{b0} = 0; \\ \underline{I}_{2\Sigma} + \underline{I}_{2кз} &= \underline{I}_{2\Sigma} + 1/3 \cdot a^2 \cdot (a^2 \cdot \underline{U}_1 + a \cdot \underline{U}_2 + \underline{U}_0) / \underline{Z}_{b0} = 0; \\ \underline{I}_{0\Sigma} + \underline{I}_{0кз} &= \underline{I}_{0\Sigma} + 1/3 \cdot (a^2 \cdot \underline{U}_1 + a \cdot \underline{U}_2 + \underline{U}_0) / \underline{Z}_{b0} = 0; \end{aligned}$$

Данные уравнения можно привести к виду $\underline{I}_{\Sigma} + \underline{k}_1 \cdot \underline{U}_1 + \underline{k}_2 \cdot \underline{U}_2 + \underline{k}_3 \cdot \underline{U}_0 = 0$, затем подставить коэффициенты \underline{k} в матрицу коэффициентов, составленную по описанному выше принципу, после чего решить систему уравнений на ЭВМ каким либо матричным методом (в данной работе для этого используется метод Гаусса). Аналогично составляются уравнения для всех других видов коротких замыканий. Например, коэффициенты при напряжениях для замыкания фазы А на землю приведены в табл. 1. Переходное сопротивление в месте КЗ обозначается \underline{Z}_{a0} .

Таблица 1 Коэффициенты при напряжениях узла I в случае КЗ фазы А

	Токи от узла I в точку замыкания		
	U1	U2	U0
1	$\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{Z_{ao}}$	$\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{Z_{ao}}$	$\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{Z_{ao}}$
2	$\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{Z_{ao}}$	$\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{Z_{ao}}$	$\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{Z_{ao}}$
0	$\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{Z_{ao}}$	$\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{Z_{ao}}$	$\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{Z_{ao}}$

Количество одновременных мест несимметрии при таком подходе не ограничено. В работе приведены уравнения для моделирования всех видов КЗ и полученные при использовании такого же подхода, уравнения для моделирования неполнофазных режимов.

На рис. 6 показана поясняющая схема, к ней в качестве примера приведены уравнения для моделирования обрыва фаз В и С, записанные в форме таблицы коэффициентов при напряжениях (табл. 2). Коэффициент q в табл. 2 – это $\frac{1}{3}$ от проводимости фазы искусственно вводимого выключателя.

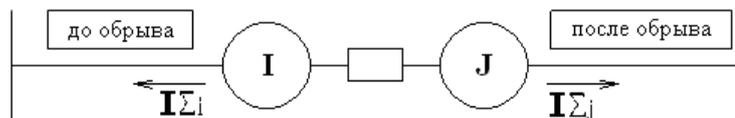


Рис. 6. Поясняющая схема к случаю неполнофазного режима

Таблица 2. Коэффициенты при напряжениях по концам ветви I-J при обрыве фазы В

	Токи от узла I к узлу J						Токи от узла J к узлу I					
	U ^I ₁	U ^I ₂	U ^I ₀	U ^J ₁	U ^J ₂	U ^J ₀	U ^I ₁	U ^I ₂	U ^I ₀	U ^J ₁	U ^J ₂	U ^J ₀
1	2q	-a ² q	-aq	-2q	a ² q	aq	-2q	a ² q	aq	2q	-a ² q	-aq
2	-aq	2q	-a ² q	aq	-2q	a ² q	aq	-2q	a ² q	-aq	2q	-a ² q
0	-a ² q	-aq	2q	a ² q	aq	-2q	a ² q	aq	-2q	-a ² q	-aq	2q

Второй вариант усовершенствования математической модели электрической сети основан на использовании разработанной методики расчёта с применением декомпозиции схемы замещения на части в системе симметричных составляющих 120 и фазных координатах ABC. Преимущества модели в фазных координатах ABC для расчётов несимметричных режимов при многоместной несимметрии с получением любых электрических величин в моделируемой системе неоспоримо. Однако при использовании координат ABC существуют сложности при моделировании синхронных машин, в частности их реакции на токи и напряжения обратной последовательности. К тому же при моделировании сети в фазных координатах ABC теряется такое существенное достоинство использования системы симметричных составляющих 120, как значительно меньший порядок системы уравнений, описывающих сетевые элементы. При необходимости моделирования режимов с многоместной (сложной) несимметрией в исследуемом районе сети, переходить на трёхфазную модель для всей схемы замещения большой энергосистемы нецелесообразно.

По предлагаемой методике в координатах ABC моделируется только та часть сети, где возникает несимметрия. Вся остальная сеть представлена в виде

трёх схем: прямой, обратной и нулевой последовательности. Трёхфазный фрагмент соединяется со схемами прямой, обратной и нулевой последовательности через переходные звенья (операторы прямого и обратного преобразования координат) по каждой ветви на границе выделенного трёхфазного фрагмента, как показано для одной связи на рис. 7.

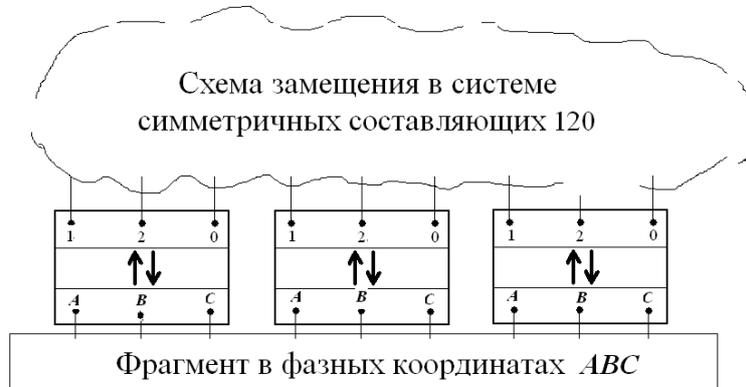


Рис. 7. Подключение трёхфазного фрагмента к схеме в системе симметричных составляющих

Наиболее просто такой подход может быть реализован в том случае, если выделенный трёхфазный фрагмент сети не содержит вращающихся электрических машин. Такой случай может часто встречаться при расчётах релейной защиты. При этом генераторы остаются только в схеме прямой последовательности, что позволяет рассчитывать несимметричные режимы в ходе ЭМПП с использованием таких же математических моделей генераторов, как в ПК для расчёта ЭМПП, построенных на однолинейной схеме замещения.

Полученные уравнения переходного звена составляют следующую систему линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0 - \underline{U}_a &= 0; \\ a^2 \cdot \underline{U}_1 + a \cdot \underline{U}_2 + \underline{U}_0 - \underline{U}_b &= 0; \\ a \cdot \underline{U}_1 + a^2 \cdot \underline{U}_2 + \underline{U}_0 - \underline{U}_c &= 0; \\ \underline{I}_1 \Sigma + \underline{I}_2 \Sigma + \underline{I}_0 \Sigma + \underline{I}_a \Sigma &= 0; \\ a^2 \cdot \underline{I}_1 \Sigma + a \cdot \underline{I}_2 \Sigma + \underline{I}_0 \Sigma + \underline{I}_b \Sigma &= 0; \\ a \cdot \underline{I}_1 \Sigma + a^2 \cdot \underline{I}_2 \Sigma + \underline{I}_0 \Sigma + \underline{I}_c \Sigma &= 0, \end{aligned}$$

Токи при этом должны быть записаны в форме $(\underline{U}_i - \underline{U}_j) / \underline{Z}_{ij}$.

Показанные выше уравнения составляются для узлов в схемах прямой последовательности, ОП, НП и узлов фаз А, В, С, находящихся на границе части схемы в координатах 120 с частью в координатах ABC, после чего добавляются к системе уравнений, описывающих электрическую сеть.

Кроме этого применение декомпозиции исходной схемы замещения на части в фазных координатах ABC и в системе симметричных составляющих 120 позволяет использовать в части схемы, выполненной в координатах 120 уравнения для моделирования многоместной несимметрии, предложенные для первого варианта усовершенствования математической модели электрической сети.

Использование обоих вариантов усовершенствованных моделей электрической сети проиллюстрировано на примере простой ЭЭС. Модель

электроэнергетической системы была выполнена в математическом пакете MathCad. Для расчёта электромеханических переходных процессов использовалась модель генератора в виде уравнения движения ротора и ЭДС за переходным сопротивлением. Выполненное в качестве проверки сопоставление результатов расчёта одноместной несимметрии с полученными для такой же схемы в ПК “Мустанг”, с использованием описанной в главе 2 методики, показало, что результаты получаются одинаковыми.

В четвёртой главе иллюстрируются примеры возможного применения разработанных средств расчета электрических величин при несимметричных режимах в ходе ЭМПП в энергосистеме, разработанных в рамках данной работы, для решения практических задач релейной защиты и противоаварийной автоматики.

Расчеты для случаев одноместной несимметрии выполнялись в программном комплексе “Мустанг” с использованием для формирования схем замещения обратной и нулевой последовательности программы “Shemwizard”. В главе приводятся примеры применения разработанной методики расчета для решения задач релейной защиты сети 110-750 кВ и сети 6-35 кВ. При расчетах для случаев многоместной несимметрии, применялась усовершенствованная по описанным в главе 3 данной работы правилам, модель энергосистемы, которая была подготовлена в математическом пакете MathCad.

В качестве первого примера приведено использование разработанной в главе 2 методики расчета для оценки влияния неполнофазного режима сети на работу устройства АЛАР, устанавливаемого на одной из ЛЭП-220 кВ энергосистемы Томской области, при использовании разных измеряемых сопротивлений (1 вариант - устройство измеряет сопротивление Z_{AB} , вычисляемое как отношение полного напряжения к полному току; 2 вариант - устройство измеряет сопротивление Z_{Π} , вычисляемое по составляющим прямой последовательности). Схема замещения прямой последовательности была подготовлена в ПК “Мустанг” путём дополнения имеющейся схемы объединённой энергосистемы Сибири и составляла порядка 600 узлов. В схемах замещения ОП и НП использовались эквиваленты ЭЭС к исследуемому району сети, размерность схем замещения ОП и НП – 18 и 12 узлов соответственно..

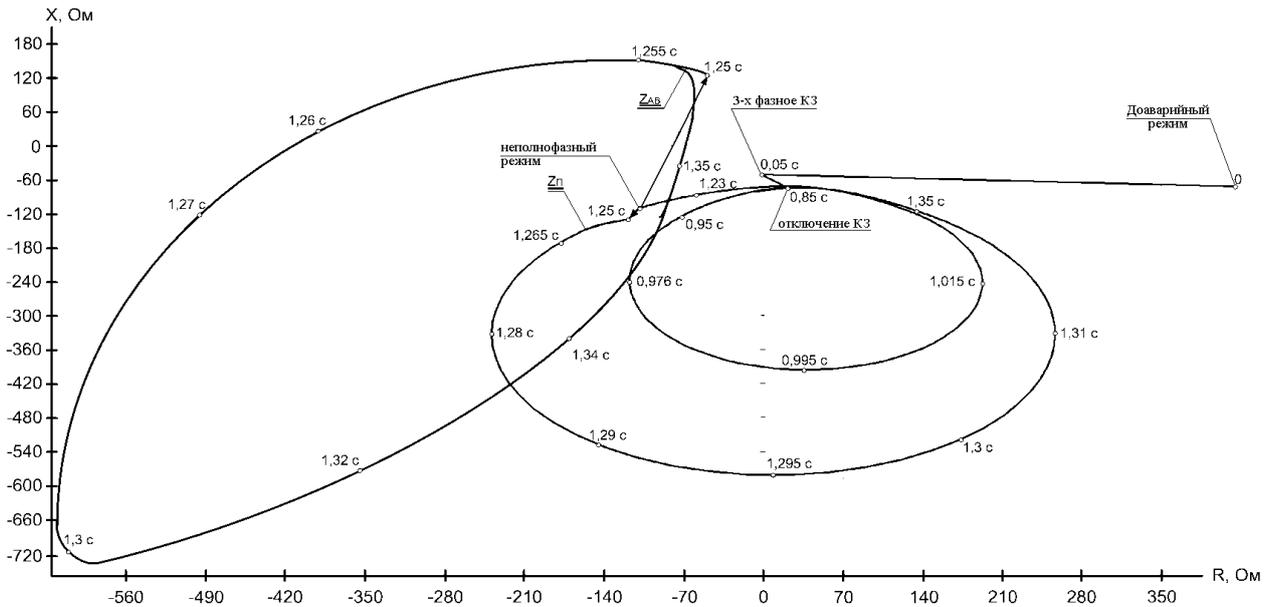


Рис. 8. Графики изменения сопротивлений, замеряемых устройством АЛАР.

$t = 0 \div 0,05$ с – доаварийный режим; $t = 0,05 \div 0,85$ с – трёхфазное КЗ; $t = 1,25$ с – переход в неполнофазный режим с одной отсутствующей фазой и нарушением синхронной динамической устойчивости

Годографы изменения в ходе электромеханического переходного процесса сопротивлений $Z_{\text{п}}$ и $Z_{\text{ав}}$ показаны на рис. 8.

Использование предложенной методики, по сравнению с традиционными методами расчёта, позволяет в ходе ЭМПП при неполнофазном режиме ЭЭС рассчитывать сопротивления как по составляющим токов и напряжений прямой последовательности, так и по фазным токам и напряжениям. Результаты расчёта могут использоваться для корректировки параметров настройки устройств АЛАР с целью исключения их неправильного срабатывания или отказа в неполнофазном режиме работы ЭЭС.

Следующий пример показывает возможности предложенной методики расчёта для анализа работы ТЗНП в случаях ликвидации повреждения с выдержкой времени. Одним из условий выбора тока срабатывания ТЗНП является исключение ложной работы защиты в цикле ОАПВ на своей или предыдущей ЛЭП. Расчёты иллюстрируются на демонстрационной схеме (12 узлов в прямой последовательности), в качестве исходной программы применялся ПК “Мустанг”. На рис. 9 приведено рассчитанное изменение симметричных составляющих токов по одной цепи воздушной ЛЭП в цикле ОАПВ на параллельной цепи.

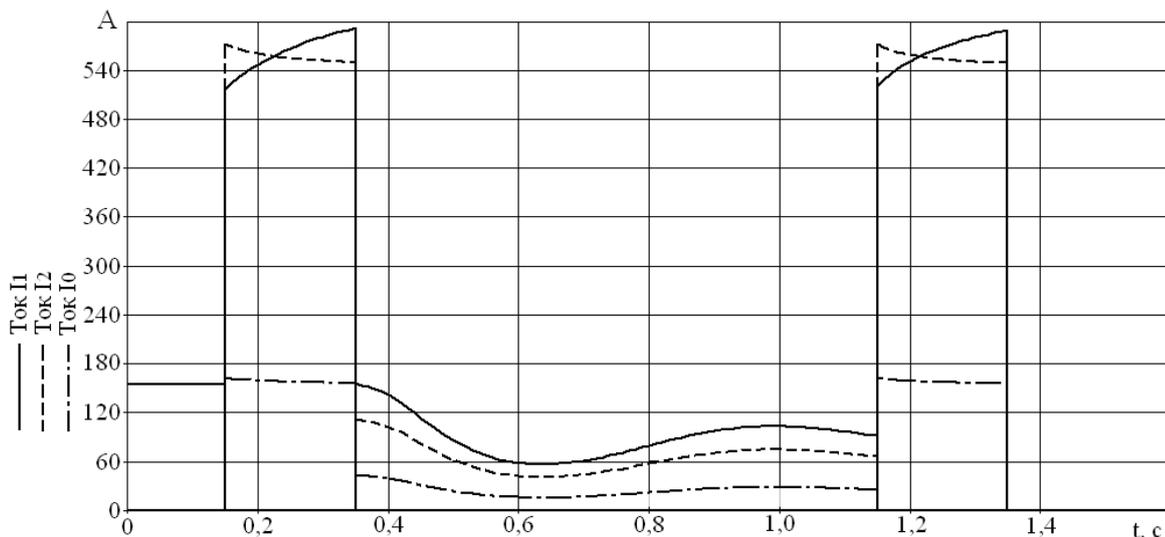


Рис. 9. Графики изменения токов в цикле неуспешного ОАПВ.

$t = 0 \div 0,15$ с – доаварийный режим;

$t = 0,15 \div 0,35$ с – однофазное КЗ;

$t = 0,35 \div 1,15$ с – неполнофазный режим с одной отключенной фазой;

$t = 1,15 \div 1,35$ с – повторное включение фазы на неустранившееся КЗ с последующим отключением трех фаз линии с двух сторон.

При помощи предложенной в главе 2 методики выполнялось несколько расчётов в схеме автономной системы электроснабжения нефтяного промысла, в которой используются работающие на общие шины генераторы двух разных типов. При этом отмечается, что для таких концентрированных сетей, в которых к одним шинам подключены синхронные генераторы (СГ) и асинхронные двигатели (АД), соизмеримые с ними по мощности, помимо электромеханического переходного процесса в начальный момент большое влияние на величину токов КЗ оказывает подпитка от АД. Для учёта этого явления при расчётах несимметричных режимов в ходе ЭМПП в программах с идеологией расчёта, используемой в ПК "Мустанг", разработан специальный приём. Приём заключается в подключении к узлу сети с АД развозбуждённого СГ с подобранными определённым образом параметрами (см. поясняющую схему на рис. 10). После затухания тока подпитки СГ, имитирующей её, отключается от остальной сети.

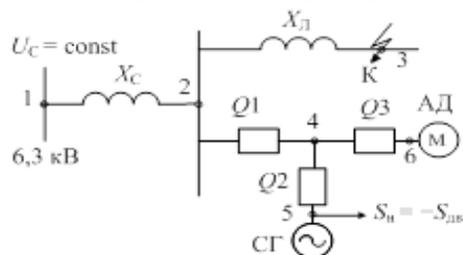


Рис. 10. Схема для иллюстрации приема моделирования подпитки места КЗ от асинхронного двигателя

Полученные в ПК "Мустанг" с использованием описанных расчётных приёмов результаты расчёта токов КЗ в схеме автономной системы электроснабжения, выполненные для проверки чувствительности максимальной токовой защиты линии электропередачи, показаны на рис. 11.

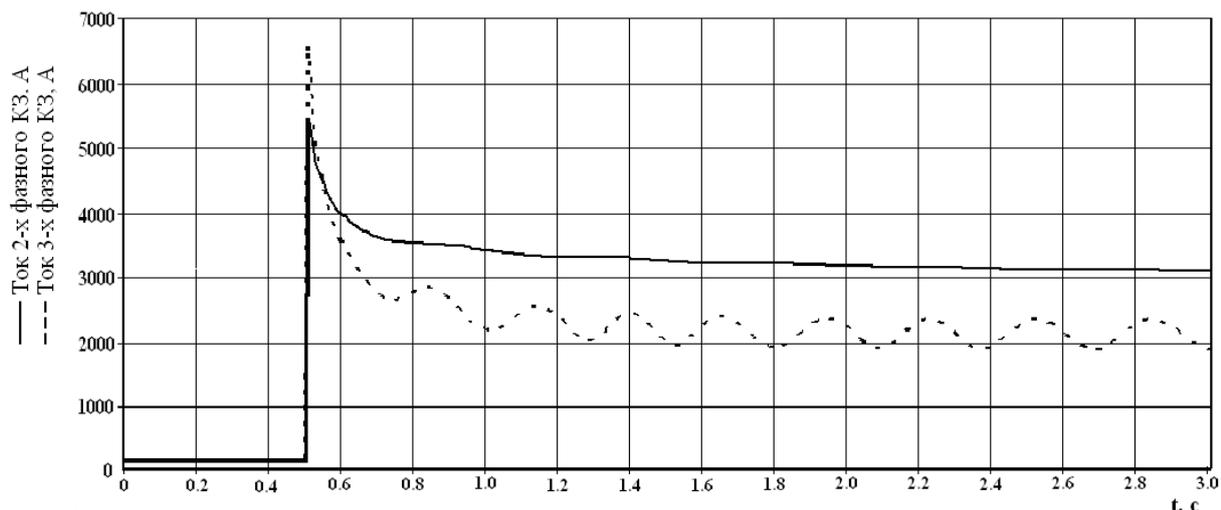


Рис. 11. Кривые изменения тока по ЛЭП при КЗ, близком к шинам электростанции

При этом на рис. 11 видно, что вследствие изменения фазных углов ЭДС генераторов разных типов друг относительно друга происходят колебания тока в месте КЗ. Так же заметно затухание токов КЗ в течении времени, обусловленное электромагнитными переходными процессами в контурах роторов СГ и затуханием подпитки от АД. Благодаря корректному учету сопротивления асинхронных двигателей в схеме обратной последовательности, после затухания токов в контурах генераторов и двигателей, эквивалентное сопротивление схемы обратной последовательности становится меньше эквивалентного сопротивления прямой последовательности. Поэтому ток при двухфазном коротком замыкании становится больше, чем при трёхфазном.

В качестве примера выполнения расчета с комбинацией систем координат АВС и 120, а также использования уравнений для системы 120, приводится расчет тока обратной последовательности генератора и утроенного тока нулевой последовательности по высокой стороне трансформатора в схеме, показанной на рис. 12. Часть схемы, включающая генератор (G) и трансформатор (T) задаётся в координатах симметричных составляющих, ЛЭП (W) и система бесконечной мощности (S) выделяются в трёхфазный фрагмент. Ключи S_1 – S_3 введены для моделирования коротких замыканий и обрывов фаз, последовательность коммутаций приведена в таблице 3. Нагрузка L , подключенная на генераторном напряжении содержит две составляющие – симметричную по фазам нагрузку и подключенную только к фазам ВС (моделируется при помощи разработанных в главе 3 уравнений для системы составляющих 120).

Таблица 3. Последовательность коммутаций

Время, с	Событие	Коммутация ключей	
		включение	отключение
0,10	КЗ фазы А ЛЭП на землю сразу за выключателем	S_3	
0,25	Ликвидация КЗ отключением фазы А ЛЭП с обеих сторон		S_1, S_2, S_3
1,10	Успешное ОАПВ фазы А ЛЭП, восстановление нормального режима	S_1, S_2	

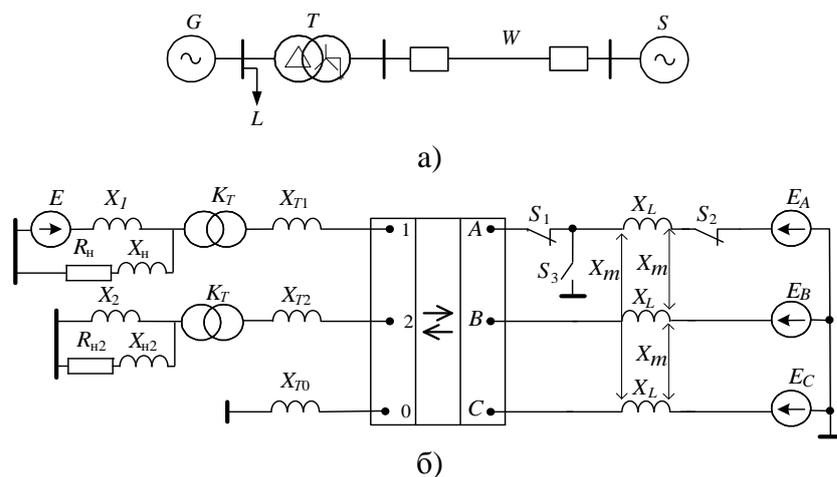


Рис. 12. Иллюстрация расчётов несимметричных режимов в электроэнергетической системе на основе сочетания систем координат: а – однолинейная принципиальная схема; б – схема замещения выделенного трёхфазного фрагмента, связанного через переходное звено со схемами прямой, обратной и нулевой последовательностей

На рис. 13 приводятся графики изменения тока обратной последовательности I_2 по генератору G (в доаварийном режиме обусловлен несимметрией нагрузки, в аварийном режиме - несимметрией нагрузки и однофазным КЗ с последующим циклом ОАПВ) и утроенного тока нулевой последовательности $3I_0$ на стороне 220 кВ трансформатора T . При этом учитывается изменение токов в ходе электромеханического переходного процесса, обусловленное изменением электрического угла между ЭДС генератора G и системы бесконечной мощности S .

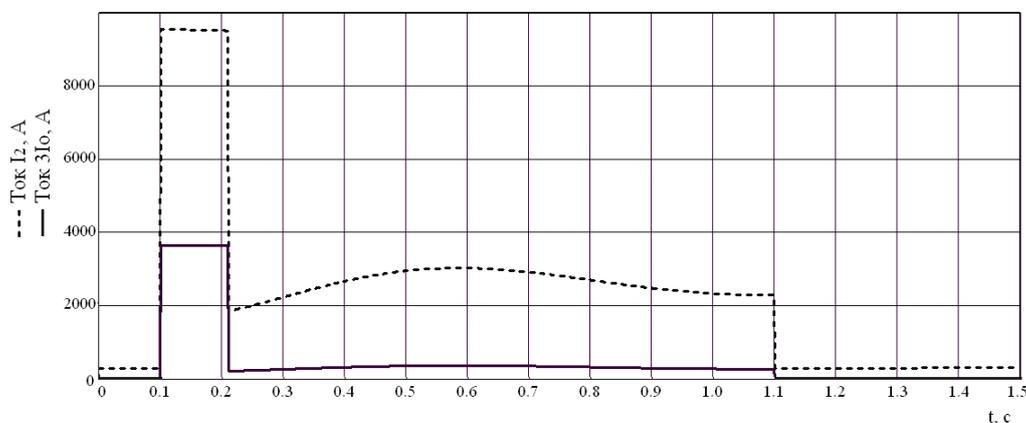


Рис. 13. График изменения тока I_2 по генератору G и тока $3I_0$ по стороне 220 кВ трансформатора T

По главе сделаны выводы о важности учёта изменения электрических величин в ходе электромеханических переходных процессов в ЭЭС при анализе работы устройств РЗА, особенно выполняющих дальнейшее резервирование защит смежных участков. Пренебрежение этим фактором при выборе уставок может привести к ложной работе или отказу некоторых устройств РЗА в процессе эксплуатации. Отмечена целесообразность применения разработанных методик и вспомогательных программных средств при выполнении расчётов токов несимметричных КЗ и неполнофазных режимов для релейной защиты и противоаварийной автоматики сетей различных классов напряжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в диссертационной работе, заключаются в следующем:

1. Обоснована целесообразность расчёта электрических величин при несимметричных повреждениях в ходе электромеханического переходного процесса в энергосистеме при выборе параметров срабатывания и анализе работы устройств РЗА, что особенно актуально для устройств защиты и автоматики, реагирующих на симметричные составляющие токов и напряжений и имеющих выдержки времени на срабатывание.
2. Проведён анализ существующих методик, применяемых при расчётах несимметричных режимов электрических сетей, отмечены их достоинства и недостатки при расчётах с моделированием электромеханических переходных процессов в энергосистеме.
3. Проанализированы возможности существующих программных комплексов, используемых в электроэнергетике для расчёта электрических величин, выполнено сравнение их возможностей применительно к решению задач расчета несимметричных режимов в ходе электромеханических переходных процессов в энергосистеме.
4. Предложена методика расчёта симметричных составляющих токов и напряжений в ветвях и узлах схемы в темпе электромеханического переходного процесса в промышленных программных комплексах, построенных на базе однолинейной схемы замещения прямой последовательности.
5. Разработан алгоритм автоматического формирования схем замещения обратной и нулевой последовательности, с сохранением в них трансформаторных связей в продольных и поперечных ветвях, на основе схемы прямой последовательности и дополнительной логической и количественной информации по элементам электрической сети.
6. Разработана программа (“Shemwizard”) с пользовательским интерфейсом, использующим принятые в электроэнергетике термины и обозначения, выполняющая автоматическое формирование схем замещения обратной и нулевой последовательности по предложенному алгоритму.
7. Предложен алгоритм определения эквивалентных сопротивлений схем замещения обратной и нулевой последовательности, сформированных программой “Shemwizard”, для расчёта шунтов КЗ и добавочных сопротивлений. Разработана программа, работающая по предложенному алгоритму.
8. Предложено два варианта усовершенствования модели электрической сети, используемой в программных комплексах для моделирования электромеханических переходных процессов, позволяющих без изменения идеологии расчёта и математического аппарата, реализовать в данных программных комплексах возможность расчёта режимов при многоместной несимметрии электрической сети в ходе электромеханических переходных процессов.

9. Разработанные расчётные средства и вспомогательное программное обеспечение апробированы на большом количестве как академических схем, так и на схемах реальных энергообъектов.

Личный вклад автора в опубликованных работах:

В результатах, опубликованных в соавторстве, лично автором выполнено следующее:

разработка и практическая реализация в виде программы для ЭВМ алгоритма формирования схем замещения обратной и нулевой последовательности;

разработка и практическая реализация в виде программы для ЭВМ алгоритма расчёта эквивалентных сопротивлений схем замещения обратной и нулевой последовательности, для определения шунтов КЗ и добавочных сопротивлений;

разработка уравнений для моделирования нескольких одновременных коротких замыканий и обрывов фаз в системе симметричных составляющих 120, записанных в форме, используемой для уравнений электрической сети программных комплексов, моделирующих электромеханические переходные процессы;

разработка уравнений связи фрагментов в симметричных составляющих и фазных координатах в общую схему замещения, записанных в форме, используемой для уравнений электрической сети программных комплексов, моделирующих электромеханические переходные процессы.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах:

1. **Лозинский, К.С.** Усовершенствование расчетов несимметричных режимов в программах расчета электромеханических переходных процессов / Р.А. Вайнштейн, К.С. Лозинский, В.П. Иванов, М.И. Кобытев // *Электричество* №07 – 2008 с. 19.
2. **Лозинский, К.С.** Программа определения эквивалентных сопротивлений обратной и нулевой последовательности для расчёта переходных процессов при несимметричных коротких замыканиях/ Р.А. Вайнштейн, К.С. Лозинский // *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. Специальный выпуск* №1 2009 с. 10.
3. **Лозинский, К.С.** Расчёт несимметричных режимов в электроэнергетической системе на основе сочетания систем координат / Р.А. Вайнштейн, К.С. Лозинский, Н.В Коломиец. // *Известия Томского политехнического университета.* – 2010. – Т. 316. – № 4, с. 146–152.
4. **Лозинский, К.С.** Расчет токов короткого замыкания и неполнофазных режимов с учетом электромеханических переходных процессов на базе программы "Мустанг" / Р. А. Вайнштейн, И. М. Кац, К. С. Лозинский // *Энергетик.* - 2011. - N 2. - С. 39-42.
5. **Лозинский, К.С.** Приём расчёта токов короткого замыкания и неполнофазных режимов с учётом электромеханических переходных процессов / Р.А. Вайнштейн, К.С. Лозинский // *Современные направления развития*

систем релейной защиты и автоматики энергосистем. Сборник докладов Международной научно-технической конференции, Москва, 2009, с. 171-173.

6. **Лозинский, К.С.** Разработка программных средств для автоматического формирования схем обратной и нулевой последовательности для расчёта несимметричных режимов в промышленных программах, построенных на базе схемы прямой последовательности / Р.А. Вайнштейн, К.С. Лозинский // Энергетика: экология, надёжность, безопасность: Материалы XII Всероссийской научно-технической конференции, Томск, 2006, с. 18-21.

7. **Лозинский, К.С.** О расчёте несимметричных режимов с учетом влияния электромеханического переходного процесса. // Современные техника и технологии. Материалы XIV Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых, Томск, 2008, с. 65-67.

8. **Лозинский, К.С.** Дополнительные практические приёмы расчёта токов короткого замыкания и неполнофазных режимов на базе программы «Мустанг» / Р.А. Вайнштейн, К.С. Лозинский // ЭНЕРГОСИСТЕМА: Управление, Конкуренция, Образование. Сборник докладов III Международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 2008.

9. **Лозинский, К.С.** Программа расчёта эквивалентных сопротивлений схем замещения обратной и нулевой последовательности для нахождения шунтов несимметричных коротких замыканий // Энергетика: экология, надёжность, безопасность: Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции, Томск, 2008, с. 33-35.

10. **Лозинский, К.С.** Расчёт тока нулевой последовательности для РЗА с учётом электромеханического переходного процесса в энергосистеме // Современные техника и технологии. Материалы XV Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых, Томск, 2009, с. 67-68.

11. **Лозинский, К.С.** Моделирование подпитки от асинхронных двигателей при коротких замыканиях. / Вайнштейн Р. А., Коломиец Н. В., Лозинский К. С. / Томский политехнический университет. - Томск, 2009. - 14 с., ил., библи. 5. - Рус. - Деп. в ВИНТИ РАН 13.07.2009, № 472-B2009.

12. **Лозинский К.С.** Вайнштейн Р.А. Программа “Shemwizard” Формирование схем замещения обратной и нулевой последовательности электрической сети. Информационная карта АИП зарегистрирована ВНИИЦ № 50201151176 от 29.08.2011.

13. **Лозинский, К.С.** Усовершенствование для программы «Мустанг» для расчета несимметричных процессов // Всероссийский конкурс инновационных проектов студентов и аспирантов по приоритетному направлению «Энергетика и энергосбережение». Каталог заявленных инновационных проектов - Томск, 26-30 сентября 2006. - Томск: ТПУ, 2006. - с. 33

Подписано к печати 14.11.2011. Тираж 100 экз.
Кол-во стр. 24. Заказ № 49-11
Бумага офсетная. Формат А-5. Печать RISO
Отпечатано в типографии ООО «РауШ мбх»
Лицензия Серия ПД № 12-0092 от 03.05.2001г.
634034, г. Томск, ул. Усова 7, ком. 046
тел. (3822) 56-44-54