

# Опыт расчетов электромеханических переходных процессов в сложных энергосистемах<sup>1</sup>

ВАЙНШТЕЙН Р.А., КАЦ И.М., КОЛОМИЕЦ Н.В., ЛОЦМАН Д.С., ПРИХОДЬКО С.Н.,  
РУСОЛ Д.А., ШЕСТАКОВА В.В.

*Излагается опыт проведения расчетных исследований, связанных с реальными задачами операционной зоны ОЭС Сибири. В качестве основы для расчетов используется общая частично эквивалентированная модель ОЭС Сибири, на базе которой решаются частные задачи отдельных региональных диспетчерских управлений. Для выполнения расчетных исследований используется программный комплекс MUSTANG, который позволяет проводить расчеты в моделях практически неограниченной размерности.*

Ключевые слова: энергосистема, моделирование, программные комплексы, частичное эквивалентирование

Проведение исследований электромеханических переходных процессов в сложных энергосистемах в основном связано с задачами совместной работы ОДУ Сибири и ТПУ по подготовке кадров для подразделений Системного оператора. В настоящее время эта работа ведется на определенных договорных условиях, в рамках которых в обязательном порядке предусматривается выполнение студентами выпускных работ, связанных с решением актуальных задач операционной зоны регионального диспетчерского управления (РДУ) по месту предполагаемого трудоустройства.

Для задач, связанных с релейной защитой, используется программный комплекс (ПК) АРМ СРЗА с расчетами только установившихся режимов – ПК RASTR, а для исследования установившихся режимов и электромеханических переходных процессов – ПК MUSTANG.

Необходимыми и важными этапами подготовки и проведения конкретных расчетных исследований являются следующие.

1. Определение требуемой степени детализации моделирования топологии схемы расчетного района энергосистемы и отдельных элементов, таких как агрегат турбина–генератор, системы автоматики, релейная защита, нагрузка потребителей и др.

2. Обоснованное упрощение моделей элементов энергосистемы, примыкающих к расчетному рай-

*Experience gained from calculation studies performed in carrying out education works connected with real problems relating to the operating zone of the Siberian Power Pool is outlined. A general model of the Siberian Power Pool containing partial equivalents is applied as a basis for calculations, using which partial problems relating to individual regional dispatch control centers are solved. Calculation studies are carried out using the MUSTANG software system, which makes it possible to carry out calculations in models of essentially unlimited dimensionality.*

Key words: power system, simulation, software systems, construction of partial equivalents

ону, при котором по возможности вносится наименьшее искажение процессов в исследуемом районе.

Последнее обстоятельство, как известно, связано с проблемой эквивалентирования отдельных частей энергосистемы. Задача эквивалентирования для установившихся режимов может быть решена достаточно строго [1], а для электромеханических переходных процессов эта задача общего строгого формализованного решения не имеет.

При существующей организованной структуре управления режимами задачи, требующие подробного моделирования, относятся к ответственности специалистов операционной зоны отдельного РДУ. Как правило, для исследования электромеханических переходных процессов расчетная схема выделяется из общей схемы без должного обоснования, что в большинстве случаев приводит к существенным ошибкам в результатах расчетов. Необходимость проведения расчетных исследований в операционных зонах различных РДУ при наличии общей расчетной модели ОЭС Сибири требует использования приема, в целом известного, который можно назвать приемом частичного эквивалентирования.

При частичном эквивалентировании должны быть сохранены связи на границах операционных зон РДУ, а эквивалентными могут быть заменены группы генераторов и блоков генератор–трансформатор, группы параллельных трансформаторов и автотрансформаторов на подстанциях, группы на-

<sup>1</sup> Посвящается памяти разработчика программы MUSTANG Владимира Петровича Иванова.

грузок. Такой подход также позволяет более обоснованно выделить зону подробного моделирования, определяя сброс мощности эквивалентных генераторов при планируемых возмущениях, например при КЗ в исследуемой зоне.

Таким образом, при выполнении частичного эквивалентирования в исходной модели, общей для всех пользователей, при решении частных задач определяются перетоки мощности на границах операционных зон и уровни напряжений в системообразующих сетях. Частично эквивалентированная расчетная модель включает электростанции, линии 500 и 220 кВ и частично 110 кВ ОЭС Сибири, электростанции и основные связи энергосистемы Северного Казахстана, Тюменьэнерго и ряд элементов ОЭС Урала в зоне примыкания основных связей Тюменьэнерго и Северного Казахстана.

Учебный эффект при использовании частичного эквивалентирования заключается также и в том, что студенты знакомятся с особенностями режимов в целом по ОЭС Сибири.

В составе общей расчетной базы был выполнен ряд конкретных расчетных исследований, в частности:

- исследование режимов при замыкании транзита 220 кВ Томская 500 кВ – Нижневарттовская ГРЭС;
- режимы и противоаварийная автоматика в Хакасской энергосистеме в условиях поэтапного ввода генераторов на Саяно-Шушенской ГЭС и др.

Решение различных частных задач потребовало в каждом случае разной глубины детализации расчетной модели в исследуемом районе. Наибольшая степень детализации вплоть до фрагментов электрических сетей 6 и 0,4 кВ и отдельных синхронных и асинхронных двигателей потребовалась при решении первой из названных выше задач. Проблема, связанная с возможностью замыкания тран-

зита 220 кВ Томская 500 кВ – Нижневарттовская ГРЭС, известна и заключается в том, что переток мощности по этой линии оказывается зависимым от режима системообразующих сетей 500 кВ и, в частности, от перетока по транзитной сети 500 кВ Урал–Казахстан–Сибирь. Поясняющая схема приведена на рисунке.

Предложения и соответствующие проекты по решению этой проблемы за счет установки фазоворотного устройства (ФПУ) или вставки постоянного тока (ВПТ) прорабатывались еще в 90-е годы прошлого века [2]. По результатам последних проектных проработок по замыканию данного транзита 220 кВ планируется использовать ФПУ или ВПТ в сочетании с сетевым строительством, в частности со строительством транзита 500 кВ Томская–Нижневарттовская–Советско-Соснинская.

Надежность питания потребителей нефтегазопромышленных предприятий при замыкании линии 220 кВ повышается за счет сохранения питания южной и северной групп подстанций в случае отключения двух цепей на каком-либо участке данной линии. Еще один фактор, который определяет надежность питания потребителей, обусловлен следующими особенностями:

- питание групп территориально распределенных систем электроснабжения по протяженным линиям 110 кВ с малым числом параллельных цепей;
- наличие в составе систем электроснабжения большого числа мощных высоковольтных (6 кВ) синхронных и асинхронных двигателей, а также асинхронных двигателей различной мощности, включенных на напряжение до 1 кВ; двигатели оборудованы защитой минимального напряжения с разными уставками по напряжению и времени.

Опыт эксплуатации показал, что при КЗ на питающих линиях 110 кВ и штатной работе релейной



Упрощенная схема сетей 110–220 кВ Томской энергосистемы

защиты и АПВ имеет место нарушение работы потребителей, которое выражается в том, что часть двигателей отключается защитами минимального напряжения. Аналогичные процессы наблюдаются и в Тюменской энергосистеме, где имеют место существенные сбросы двигательной нагрузки нефтегазодобывающих предприятий при КЗ в питающих сетях [3].

В таких условиях можно ожидать, что замыкание транзита 110 кВ Двуреченская–Катальгинская, который разомкнут по тем же причинам, что и транзит 220 кВ, может привести к уменьшению «сброса» нагрузки при КЗ. Естественно, что замыкание указанного транзита 110 кВ также потребует применения дополнительных средств управления, например ФПУ.

В качестве критерия для оценки влияния замыкания транзита 110 кВ принято число двигателей, отключаемых при каком-либо возмущении. В данном случае было рассмотрено двухфазное КЗ на землю на линии Парабель–Лугинецкая с отключением одной цепи быстродействующей защитой и успешным АПВ. Для решения задачи в такой постановке требуется по возможности подробное моделирование нагрузки. Так как двигатели подключены в разных точках разветвленной сети 6–35 кВ и имеют различную электрическую удаленность от центров питания и мест возмущения (КЗ), то замена больших групп двигателей одним эквивалентным не позволяет корректно решить поставленную задачу. В связи с этим была создана подробная база комплекса системы электроснабжения нефтегазодобывающих предприятий Томской области. База включает в себя 15 подстанций напряжением 110/35/6 и 110/10 кВ, а также участки распределительных сетей 35 и 6 кВ. Эта часть базы имеет объем 1140 узлов и 1247 ветвей, содержит 89 высоковольтных синхронных двигателей с системами возбуждения и АРВ, 140 высоковольтных асинхронных двигателей и групп эквивалентных асинхронных двигателей на напряжение 1 кВ.

В целом вся расчетная модель с частично эквивалентированным окружением содержит 1762 узла, 2086 ветвей, 116 агрегатов турбина–генератор, из которых 67 агрегатов учтены полными моделями с системами возбуждения, АРВ и АРЧВ и 49 агрегатов, удаленных от зоны исследования, представлены упрощенными моделями ( $E\varphi = \text{const}$ ). Кроме того, учтены также имеющиеся в составе электроснабжения газотурбинные и поршневые электростанции.

На всех высоковольтных двигателях смоделирована защита минимального напряжения и самоотключение магнитных пускателей в группах двигателей до 1 кВ. На СД также учтена защита от потери синхронизма, которая отключает двигатель, если

скольжение двигателя более 5% держится более 4 с. В расчетах доаварийного установившегося режима отдельные мощные синхронные и асинхронные двигатели, а также эквивалентные двигатели напряжением до 1 кВ учтены статическими характеристиками по напряжению.

Имеющиеся в ПК MUSTANG средства моделирования действия дискретных устройств автоматики позволили также смоделировать в расчетах переходных процессов работу управляемых шунтирующих реакторов (УШР), которые совместно с батареей статических конденсаторов образуют реверсивные источники реактивной мощности. Моделирование УШР в данном случае основано на замене непрерывной функции изменения его проводимости от времени мелкоступенчатой функцией по предложению, приведенному в [4]. В целом блок моделирования возмущений, действия устройств защиты и автоматики содержит 303 набора факторов и действий.

Подробное моделирование нагрузки позволило сделать вывод о том, что переход на параллельную работу по транзиту 220 кВ, как и ожидалось, практически не оказывает влияния на реакцию нагрузки при кратковременном снижении напряжения, а замыкание транзита 110 кВ, соединяющего группы подстанций, приводит к существенному снижению числа отключающихся двигателей при указанном возмущении.

На основе описанной расчетной модели исследовались также и вопросы, непосредственно связанные с проблемой возможности замыкания упомянутого транзита 220 и 110 кВ с точки зрения допустимости работы согласно [5]. В частности, рассматривались также задачи определения зависимости фазовых сдвигов, а следовательно, и перетоков мощности по линиям 110 и 220 кВ от режима системообразующих сетей окружения Томской энергосистемы, определения основных требований к фазоповоротному устройству, включаемому в расщелку транзита 220 и 110 кВ в части диапазона и закона регулирования.

**Выводы.** 1. Выполнение учебных работ с использованием расчетных моделей реальных объектов, в частности на базе ПК MUSTANG, является эффективным средством повышения качества подготовки специалистов для подразделений системного оператора.

2. При поэтапном развитии и уточнении расчетной модели на базе использования данных контрольных замеров и записей регистраторов аварийных процессов может быть создана единая согласованная схема для решения частных задач РДУ ОЭС Сибири.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Веников В.А., Глазунов А.А., Жуков Л.А. и др.** Электрические системы. Электрические сети — М.: Высшая школа, 1998.
2. **Каложный А.Х.** Управление потоками мощности в электрических сетях с помощью фазоповоротных трансформаторов. — Электричество, 1986, № 11.
3. **Моделирование** управляемых шунтирующих реакторов [Электронный ресурс]: <http://forum.regimov.net/index.php?t=msg&goto=5527&rid=0>
4. **Демчук А.Т., Жуков А.В., Лавров С.В.** Система управления режимами Тюменской энергосистемы с использованием технологии векторного измерения параметров: Материалы международ. конф. «Релейная защита и автоматика современных электроэнергетических систем» [Электронный ресурс]: [http://www.energo-info.ru/images/pdf/Rele/Session\\_4/S4-5.pdf](http://www.energo-info.ru/images/pdf/Rele/Session_4/S4-5.pdf)
5. **Методические** указания по устойчивости энергосистем. — Приказ Минэнерго России от 30.06.2003 № 277.

*Авторы: Вайнштейн Роберт Александрович окончил электроэнергетический факультет (ЭЭФ) ТПУ в 1960 г. В 1965 г. защитил кандидатскую диссертацию. Доцент кафедры электроэнергетических систем и сетей ТПУ.*

*Кац Илья Маркович окончил электротехнический институт (ЭЛТИ) ТПУ в 2005 г. В 2009 г. защитил кандидатскую диссертацию. Доцент кафедры электроэнергетических систем и сетей ТПУ.*

*Коломиец Наталья Васильевна окончила ЭЭФ ТПУ в 1968 г. В 1975 г. защитила кандидатскую диссертацию. Доцент кафедры электроэнергетических систем и сетей ТПУ.*

*Лоцман Дмитрий Сергеевич окончил ЭЭФ ТПУ в 2002 г. Начальник отдела устойчивости, противоаварийной и режимной автоматики ОДУ Сибири.*

*Приходько Сергей Николаевич окончил ЭЛТИ ТПУ в 2010 г. Специалист службы энергетических режимов, балансов и развития Томского РДУ.*

*Русол Дмитрий Александрович окончил ЭЛТИ ТПУ в 2000 г. Директор ООО «Нефтьэнергопроект».*

*Шестакова Вера Васильевна окончила ЭЭФ ТПУ в 1990 г. В 1999 г. защитила кандидатскую диссертацию. Доцент кафедры электроэнергетических систем и сетей ТПУ.*