

Итак, почтеннейшая публика, мы продолжаем наше представление. Меня зовут Евгений Машалов, я рад Вас видеть на очередном семинаре курсов повышения квалификации и в течение трех академических часов я расскажу Вам о программном комплексе RUSTab. Несмотря на то, что в программе нашего занятия обозначены пункты, по которым я должен вести рассказ, я предлагаю сегодня эту программу изменить, и поговорить не том, каков RUSTab сегодня, а о том, каким он станет. Дело в том, что нам поручена работа по модернизации ПК RUSTab, рассчитанная на три года. Решение о модернизации было принято не потому, что RUSTab недоделан, или что-то там неправильно считает. Дело в том, что программы такого рода вынуждены постоянно развиваться, чтобы соответствовать современным требованиям. Работы над ПК RUSTab были начаты в 2006 году, и с тех пор требования, которые ставились перед разработчиками, пришлось пересмотреть. Во-первых, появляются новые типы оборудования, которые раньше было принято моделировать упрощенно, а сегодня требуются более точные модели. Во-вторых, в исходном техническом задании часть требований была сформулирована уж совсем в общем виде. В частности, требования к моделированию противоаварийной автоматики сводились просто к перечислению её видов из стандарта. Но каждый из видов автоматики представляет собой довольно сложный объект, который в действительности нужно воспроизвести в модели детально. И в этой части возникли некоторые разночтения, которые в процессе модернизации предстоит устранить.

Поэтому сегодня нашей темой станет обсуждение направлений модернизации. Нам очень важно понимать требования технологов, и поэтому, я надеюсь, мы сможем их уточнить еще в процессе планирования работы.

В качестве компенсации за изменение темы я могу предложить Вам запись предыдущего нашего выступления, которая была сделана, смонтирована и выложена в Youtube примерно год назад. Для того чтобы Вам было проще ее найти, записи выложены прямо на странице загрузки ПК RUSTab. В этой записи занятия, которая состоит из двух частей, программа выступления полностью соответствует той, которая указана в Ваших программах и вы можете посмотреть это выступление в любое удобное для Вас время. Если у Вас возникнут вопросы, Вы сможете задать их в письменном виде с помощью электронной почты, на форуме сайта www.rastrwin.ru или в техподдержке. Мы с Владимиром Геннадьевичем постараемся как можно более полно на них ответить. Если Ваш вопрос связан с практическими расчетами, нам может потребоваться файл с моделью.

В нашей организации есть почтовый адрес, сертифицированный СО, на который можно посылать такие схемы для анализа. Есть только пожелание подробно комментировать вопрос с тем, чтобы мы максимально быстро смогли разобраться в ситуации и оперативно ответить.

Несмотря на то, что RUSTab принято решение модернизировать, в текущем своем состоянии ПК значительно превосходит по функционалу и по расчетным возможностям, скажем, Mustang, и вплотную приближается к ПК Eurostag. В составе RUSTab есть модуль, который позволяет создавать свои собственные модели, что для отечественных программ можно отнести к отличительной особенности.

На вопрос о том, правильные ли результаты дает RUSTab можно ответить следующим образом. В процессе разработки ПК RUSTab проходил поэтапное и поэлементное тестирование в головном НТЦ ЕЭС, который бывший

НИИПТ, и по всем реализованным моделям проводилось сравнение результатов расчета с результатами, полученными на эталонах. В качестве эталонов выступали ПК Mustang, ПК Eurostag или программа, выполненная на Matlab, в зависимости от того, какая модель тестировалась. И по всем реализованным в ПК RUSTab моделям получены положительные заключения о соответствии результатов расчета заявленной математической модели. Результаты оформлены в виде серии отчетов, которые в СО имеются.

Также нами разработана, передана в СО и там утверждена программа и методика испытаний ПК RUSTab. По этой программе были проведены испытания в соответствии со 106 приказом, и было принято решение о вводе ПК RUSTab в опытную эксплуатацию. И, соответственно, эта опытная эксплуатация сейчас и проходит в СО. Возможно даже, Вы привлечены к этому процессу. Если это так, то мы готовы принимать замечания. По завершению опытной эксплуатации, возможно, будет принято решение о вводе в промышленную эксплуатацию, но на мой взгляд это решение будет принято не сразу, а после выполнения первого пункта программы модернизации, в котором предусмотрен перевод ПК RUSTab на платформу RastrWin3. Мы этот перевод фактически выполняем по собственной инициативе, поскольку вторая платформа больше не развивается и нам нужно высвободить ресурсы на развитие платформы текущего поколения.

Если говорить о модернизации более конкретно, то на наш взгляд её программа выглядит так. Мы обязательно должны учесть замечания, которые были получены в ходе всевозможных испытаний. Главным образом, они связаны с вопросами, не относящимися к расчету: то есть пользовательский интерфейс, импорт/экспорт и другие виды сервисов. Далее, мы должны устранить незначительные, но все-таки, ошибки, которые были допущены в описаниях моделей в исходном варианте технического задания. Соответственно, для детального описания требования к модернизированному ПК RUSTab мы разрабатываем и уже написали около 200 страниц нового ТЗ. Мы теперь уже обладаем достаточной компетенцией, чтобы такие документы разрабатывать, чего нельзя было сказать о нашем коллективе лет, скажем, 5 назад. В соответствии с новым ТЗ мы планируем реализовать модели новых типов оборудования и модернизировать существующие. Надо сказать, что план модернизации предусматривает тестирование в головном НТЦ после каждого этапа, поэтому мы надеемся, что с достоверностью результатов расчета проблем не возникнет. Один из важных пунктов модернизации – повышение скорости расчета, особенно с учетом того, что мы позиционируем ПК как инструмент для расчета и анализа длительных переходных процессов. И как я уже сказал, планируется перевод на платформу RastrWin3, который уже частично выполнен и я смогу Вам показать уже сегодня как будет выглядеть новый RUSTab. Автоматически мы выходим на выполнение следующего пункта модернизации – улучшение пользовательского интерфейса. Но дополнительно нами предусмотрены расширения пользовательского интерфейса непосредственно для RUSTab, заключающиеся в том, что для наиболее часто используемых задач будут разработаны специальные панели. Имеются в виду формы для обобщения параметров оборудования, которые будут использоваться наряду со стандартными таблицами, специальная панель для работы с безусловными сценариями, панель для настройки АЛАР, графическая среда для автоматизации и конструктора пользовательских устройств и тому подобное.

Вообще принято считать, что программа для расчета переходных процессов в основном нужна для анализа динамической устойчивости. И в основном, использование таких программ сводится к расчету возмущений в соответствии с методическими указаниями по определению максимально-допустимых перетоков или с новым стандартом, в который они трансформировались. Основной вопрос при определении МДП – сохраняется ли устойчивость после возмущения или нет. Конечно, для ответа на этот вопрос нужен расчет переходного процесса, но такой расчет можно сделать и на Mustag, что многие и делают сегодня. На длительности переходного процесса в пределах 5-7 секунд, конечно, очень желательно использовать в расчете точные модели оборудования, но мне кажется, что тонкие особенности оборудования проявляются уже в процессе движения режима к послеаварийному. Например, регулятор возбуждения сильного действия это в действительности подход к управлению током возбуждения. Нам важны основные параметры в каналах управления током возбуждения. А конкретная реализация регулятора, будь это АРВ-СДП1М или ST5B скорее всего не так важна, поскольку тонкости проявляются уже в процессах именно стабилизации напряжения, угла или мощности генератора после возмущения. Вот тут-то и нужно различать, скажем, наличие интегрального канала по напряжению, который учитывается в зарубежных моделях АРВ, и его отсутствие в отечественных моделях. Или, скажем, эффект от действия системного стабилизатора. То же касается и моделей первичного привода. В начальной фазе возмущения нам важен, в основном момент инерции и действие регулятора скорости. Однако после возмущения, может оказаться, что паропроизводительность котла недостаточна и мощность генератора начнет снижаться или еще чего доброго сработает какая-нибудь технологическая защита и наша исходная расчетная модель изменится, за счет вывода из нее этого генератора со всеми вытекающими последствиями. Достаточно почитать акты расследования технологических нарушений, чтобы сделать вывод, что авария происходит не в течение 5-7 секунд после возмущения, а развивается последовательно в течение нескольких минут, за которые в системе успевает измениться частота, сработать защиты от перегрузок, технологические защиты на генераторах, и в итоге вся эта каскадная цепь событий может привести к тому, чему и посвящен акт расследования. Поэтому наш взгляд на расчет переходных процессов не ограничивается расчетом динамической устойчивости после возмущения, а распространяется и на исследование поведения энергосистемы после возмущения, с учетом возможных действий автоматических устройств. По крайней мере, с помощью такого инструмента расчета переходных процессов можно воспроизвести технологическое нарушение и сделать соответствующие выводы, с тем, чтобы в будущем такие ситуации исключить.

В соответствии с тем, что я сейчас попытался сформулировать, будем считать, что основной областью применения ПК является расчет длительных переходных процессов. Динамическую устойчивость он и так сможет рассчитать по определению.

Что же необходимо для того, чтобы ПК обеспечивал возможность расчета длительных процессов? Во-первых – применение эффективных и устойчивых методов интегрирования, которые и являются основным математическим средством моделирования. Метод должен решать задачу точно и быстро. Что для этого требуется, мы в дальнейшем подробно поговорим. Во-вторых в ПК должны быть предусмотрены модели оборудования, которые определяют поведение энергосистемы в периоде до десятков минут. Это модели оборудования, в которых

изменение параметров идет в течение секунд или десятков секунд. Главным образом эти модели связаны с представлением первичного привода – турбин, как паровых, так и газовых, котлов и технологической станционной автоматики. Ну и в-третьих – нам нужно научиться учитывать возможность действия противоаварийной автоматики, поскольку действие, скажем АПНУ может расцениваться как весьма серьезное возмущение, причем модель послеаварийного режима может существенно отличаться от той, в которой АПНУ не учитывалась.

Чтобы проиллюстрировать сказанное я предлагаю довольно избитый пример.

Двухмашинная система, на одной из параллельных связей которых происходит КЗ, снимаемое отключением связи. Если мы пренебрежем динамикой и положим время установления послеаварийного режима достаточно длительным, мы можем запросто оценить параметры доаварийного и послеаварийного режимов путем простого расчета УР. В данном случае изображен угол генератора. Но если учесть длительность, тип и параметры короткого замыкания и рассчитать переходный процесс, мы можем обнаружить что послеаварийный угол пришел к расчетному значению, но сдвинутому на несколько раз 2π . То есть в процессе возмущения генератор разогнулся и сделал несколько проворотов. Как к этому отнесется автоматика нужно разбираться. Ну а если у нас на этой линии еще была отпаечка с весомой асинхронной нагрузкой, то может оказаться что послеаварийного режима на нашем несчастном генераторе не будет вообще. Поэтому, безусловно, необходимо использовать инструменты расчета переходного процесса, чтобы отследить траектории изменения параметров режима во времени и обнаружить условия срабатывания автоматики, которая схему послеаварийного режима может серьезно изменить.

Перейдем к первому пункту требованию к программе для расчета переходных процессов – к требованиям к методам интегрирования. Тема эта конечно узкоспециальная, но я постараюсь максимально доступно изложить основные положения, которые пригодятся нам для понимания работы, собственно, «сердца» любой программы для расчета динамики. Предположим у нас есть автомобиль. Колхозный такой, в общем, автомобиль, который может ехать только с постоянной скоростью. Наша задача – определить положение автомобиля в некоторый нужный нам момент времени. Зная исходную точку, которую мы назовем x_0 , мы можем написать уравнение, которое позволит нам эту задачу решить. Но давайте попробуем представить эту задачу в виде дифференциального уравнения. Мы знаем, что скорость – это производная координаты автомобиля по времени. Она у нас пока постоянная и это пока сильно облегчает нам жизнь. Для того чтобы решить это дифференциальное уравнение численным методом, мы должны разделить время на интервалы определенной длительности, скажем h , в каждом из которых мы должны рассчитать координату с помощью одного из множества существующих методов интегрирования. Возьмем самый простой метод – метод Эйлера, который позволяет нам рассчитать значение переменной состояния, то есть такой, по которой мы знаем производную, в некоторой требуемой точке. Для этого нам нужно знать значение переменной в предыдущей точке, длину шага h и производную. Все это мы знаем и поэтому можем решить задачу данным численным методом. Если присмотреться, у нас и получилось то самое выражение, которое мы сначала записали для определения координаты, только представленное в виде связи между соседними точками во времени. Так легко у нас это вышло по тому, что от нашей производной легко

получить первообразную, то есть решить дифференциальное уравнение аналитически. Но представим себе, что наш автомобиль таки научился разгоняться и тормозить. В этом случае наша производная уже не постоянна. И строго говоря, у нас появилась вторая производная – ускорение, то есть скорость изменения скорости. И мы уже не можем использовать наше первоначальное выражение для решения задачи. Именно сложность или невозможность аналитического решения дифференциального уравнения заставляет нас использовать для решения задачи численные методы, которые справляются с производными любой сложности. Но все численные методы являются лишь приближенными, и, соответственно, вносят погрешность в результат решения задачи. Погрешность методов интегрирования зависит, главным образом, от величины шага, который используется для разбиения расчетного периода. Предположим, мы удвоили существующий шаг и решили задачу повторно. Очевидно, наше решение должно выполняться быстрее, поскольку количество расчетов сократилось в два раза. Но, чуда не произошло, и мы получили существенные отклонения от первоначального решения. При этом отклонение растет по мере увеличения времени. Проблема в том, что на каждом шаге метод интегрирования вносит погрешность, которая называется локальной. По мере движения от шага к шагу эта погрешность накапливается, и составляет глобальную погрешность. Без контроля локальной погрешности мы можем прийти к решению, которое серьезно отличается от истинного. Как сказал бы один литературный герой: «нельзя просто так взять и увеличить шаг». Для того чтобы избежать роста глобальной погрешности, метод интегрирования должен обеспечивать контроль локальной погрешности и ее уменьшение, пропорциональное уменьшению величины шага. В этой части важнейшим свойством метода является порядок, то есть степень снижения погрешности в зависимости от уменьшения шага. Шаг и погрешность связаны экспоненциально. Например, метод 4-го порядка при уменьшении шага в два раза обеспечивает уменьшение погрешности в 16 раз. Если мы научимся обнаруживать недопустимую локальную погрешность и управлять величиной шага, мы сможем контролировать глобальную погрешность и с уверенностью говорить, что наше решение удовлетворяет заданным требованиям точности. В данном примере мы можем уменьшить шаг на интервалах, в которых координата и, соответственно, ее производная изменяются в наиболее высоком темпе и значительно улучшить приближение к истинному решению.

В нашем примере производная (то есть скорость) не зависела от координаты автомобильчика. Но что делать в случае, если такая зависимость есть, и как рассчитать производную в точке, которая нам пока неизвестна? На рисунке представлена кривая изменения переменной x . Предположим на известно значение этой переменной в точке t_{i-1} , и мы желаем рассчитать значение в следующей точке – точке t_i . Если воспользоваться уже известным нам методом Эйлера, рассчитать производную в начальной точке и сделать шаг, то можно получить решение значительно отличающееся от истинного. В этой ситуации можно либо уменьшать шаг, либо применить какой-либо метод более точной оценки производной. Мы можем разбить наш шаг на подшаги поменьше, и выполнить последовательную оценку производной в каждой точке. Видно, что последняя оценка дает нам почти точное решение. Методы интегрирования строятся так, чтобы получить максимально близкую к истинной оценку точки решения и, соответственно значения производной в этой точке. По способу оценки методы разделяются на одношаговые и многошаговые.

Одношаговые методы, такие как, например, методы семейства Рунге-Кутты выполняют оценку производной в промежуточных точках внутри шага, причем промежуточные точки выбираются не равномерно, а в некоторых определенных соотношениях с длиной шага. Используя последовательные приближения, метод позволяет получить приближенное решение в нужной точке. Однако мы можем сделать еще одно такое же решение, выбрав промежуточные точки по-другому, но при этом так, чтобы максимально использовать уже рассчитанные значения. В данном примере мы делаем лишь одно дополнительное приближение, но получаем более точный результат, поскольку порядок метода выше за счет использования дополнительной точки приближения. Решения, полученные первым и вторым способами можно сравнить. И если разность между ними не превышает заранее установленного предела локальной погрешности, можно считать, что решение достаточно точное и продолжить интегрирование. Если же разность превышает допустимую, шаг h нужно уменьшить и повторить процесс интегрирования. Такой способ контроля погрешности называется «встроенным», поскольку схема контроля погрешности встроена в процесс получения решения и лишь незначительно увеличивает вычислительные затраты. Такой же результат в части погрешности, в принципе, мы могли бы получить, выполнив расчет по полному шагу, и два последовательных расчета по половинным шагам, после чего сравнили бы полученные результаты. Но это потребовало бы в несколько раз большего количества оценок производной. Встроенный метод решает эту задачу намного более экономно.

Раз есть одношаговые методы интегрирования, наверное, есть и многошаговые. И такие действительно есть. Их отличие заключается в использовании не одной, а нескольких точек, предшествующих точке, в которой мы должны получить решение. Распространенная схема такого метода состоит из двух этапов. На первом мы строим по нескольким предыдущим точкам аппроксимацию в виде полинома, скажем, полинома Лагранжа. Используя полученную аппроксимацию мы можем приближенно, и даже очень приближенно, но все-таки, определить предварительное решение в требуемой точке. Получив его, мы выполняем второй этап, который использует предварительную оценку производной по предварительному решению. Первый этап носит название предиктор, или «предсказатель», а второй этап – корректор. Точное решение можно получить, выполнив коррекцию несколько раз, то есть итерационно, используя предыдущий результат коррекции как начальное значение для следующей. Если за заданное количество итераций процесс сойдется с требуемой точностью, интегрирование можно продолжить. Если нет – придется уменьшить шаг и повторить расчет. В такой схеме уменьшение и увеличение шага не так просто (хотя и возможно), поэтому часто просто отбрасывают результат и выполняют несколько решений одношаговым методом, для того, чтобы набрать нужные многошаговому методу точки. В этом случае одношаговый метод называется «стартовым» по отношению к многошаговому. По такой схеме в одном из вариантов настройки работает и ПК RUSTab.

С учетом сведений, которые мы почерпнули из этого краткого обзора численного интегрирования, мы вместе можем признать неубедительными высказывания некоторых матерых специалистов о том, что «считать динамику длительностью более 10 секунд не имеет смысла из-за погрешности». Как видите, достаточно контролировать локальную погрешность и управлять ею. Наши коллеги астрономы, например, рассчитывают траектории своих

небесных тел ровно такими же методами, и не испытывают особых затруднений ни с точностью, ни с длительностью «динамики».

Будем считать, что мы научились точно интегрировать длительный переходный процесс. Теперь нам понадобятся модели, которые в этом переходном процессе будут участвовать. Как я уже сказал, к числу таких моделей главным образом относятся модели первичного привода, то есть модели турбин, котлов и других технологических элементов стационарного оборудования. Поскольку на каждую станцию отдельную модель никто делать не собирается, при разработке моделей ставится задача сделать их как можно более обобщенными и универсальными, для того чтобы описать реальный объект только путем задания параметров. Одним из таких обобщений является модель парового энергоблока, которая в RUSTab представляет один из видов первичного привода.

На рисунке представлена структура энергоблока с точки зрения RUSTab. В структуре представлена турбина, с учетом динамики объемов, регулятор скорости, а заодно и мощности, котел, и блок управления всем этим хозяйством. Общая структура энергоблока всегда постоянна, в то время как отдельные ящички в этой структуре могут описывать разные виды и типы оборудования. Модель турбины рассчитывает механический момент на валу генератора, и управляется сигналами положения клапанов: регулирующих и отсечных. Отсечные клапаны необходимы для быстрого управления моментом турбины и часто используются как исполнительный механизм в устройствах автоматики. Регулятор скорости этими клапанами, собственно управляет, принимая во внимание отклонения скорости вращения ротора турбины, электрической мощности или тока статора генератора, а также руководствуясь уставкой по мощности, которую для регулятора формирует блок управления турбиной и котлом. Блок управления получает свою собственную уставку от начальства станции или от централизованной системы, скажем, АРЧМ. В зависимости от отклонений по электрической мощности и частоте блок управления формирует сигналы для регулятора скорости и для котла. В части котла в реальной системе управляющие сигналы, конечно, отдельно формируются по подаче воды, топлива и воздуха, но в данной модели нам можно эти сигналы объединить в один, поскольку особенности устройства котла мы моделировать с такой детализацией не собираемся. Но зато мы достаточно точно моделируем то, как котел реагирует на этот суммарный сигнал изменением давления пара.

Рассмотрим варианты, с которыми нам придется столкнуться при моделировании турбины. Сложность в том, что реальные турбины могут иметь различные компоновки, с разным количеством объемов, вариантов промежуточного перегрева пара и систем паропроводов. Более того, турбины могут быть одновальными или двухвальными. Как я понимаю, основная задача инженеров, которые проектирует и строят турбины – обеспечить максимальный КПД. И им вовсе не до затруднений, которые мы испытываем при расчете переходных процессов. На первом слайде показаны компоновки одновальных турбин. С точки зрения электромеханических переходных процессов каждый элемент каждой компоновки представляет собой апериодическое звено, значение на выходе которого изменяется с некоторым отставанием от значения на входе. На схемах компоновки Вы также можете видеть регулирующие и отсечные клапаны. Регулирующие, в основном, используются для управления мощностью

и частотой вращения в установившемся режиме, в то время как отсечные служат для быстрого изменения момента на валу при внешнем возмущении – сбросе электрической нагрузки, кз и тому подобных явлениях.

На следующем слайде приведены компоновки двухвалных турбин. С точки зрения RUSTab это две турбины, работающие на два генератора со своими моментами инерции, но управляемые одним и тем же сигналом от регулятора скорости.

Для того чтобы как то обобщить все это живописное многообразие компоновок предлагается универсальная модель турбины имени IEEE. Эта модель может быть параметризована так, чтобы вписаться в любую из приведенных ранее компоновок. В некоторых вариантах часть блоков просто не будет использоваться, но для сложных компоновок их будет даже недостаточно, и нам придется «складывать» параметры, скажем пароперегревателя и цилиндра какого-нибудь давления. Однако эта модель представляет собой достаточно удачный компромисс между сложностью и адекватностью. Из особенностей модели следует выделить возможность отдельного управления положением регулирующих и отсечных клапанов, а также возможность учета ограничения давления в пароперегревателях, которые в реальной жизни реализуются, видимо, предохранительными клапанами. Это обстоятельство, безусловно, заслуживает учета в расчетах переходных процессов, поскольку ограничивает возможности турбины по реакции на управляющие воздействия на клапаны.

В некоторых случаях может потребоваться учет эффекта изменения давления в пароперегревателе после длительного закрытия отсечных клапанов. Эти самые случаи связаны с моделированием длительной разгрузки турбины, о которой мы еще поговорим далее. Для таких случаев предусмотрена специальная модель с количеством цилиндров до трех, в которой упомянутый эффект учитывается за счет отрицательной обратной связи по давлению пароперегревателя. Дополнительно учитывается изменение потока пара через отсечные клапаны за счет параметра A , значение которого рассчитывается по термодинамическому соотношению, настолько непонятному на первый взгляд, что оно недостойно упоминания на этом слайде.

В общем, почти на все случаи жизни нам достаточно двух моделей паровых турбин. Перейдем к регуляторам скорости.

Первая модель регулятора достаточно проста и полезна нам тем, что применяется в ПК Mustang. Несмотря на простоту, она адекватно учитывает контур управления скоростью вращения с учетом мертвой зоны, столь ненавистной НПРЧ, ограничения скорости и положения регулирующих клапанов. Кстати только на регулирующие клапаны она и может воздействовать, поскольку контура управления отсечными она не содержит. По отношению к модели Mustang в данную модель введены сигнал задания уставки мощности и сигнал от регулятора «до себя». Модель может использоваться самостоятельно, без блока управления турбиной и котлом.

Следующая модель является расширением предыдущей как раз за счет ввода дополнительного блока управления отсечными клапанами. Контур управления регулируемыми клапанами аналогичен предыдущей модели. Контур управления отсечными реагирует на значительные отклонения скорости ротора турбины. При небольших отклонениях турбина управляется только регулируемыми клапанами. Отсечные клапаны остаются полностью

открытыми. При возрастании скорости вращения на привод отсекающих клапанов будет подан отрицательный сигнал, что вызовет их закрытие. Настройка каналов скорости и ускорения обеспечивает работу отсечных клапанов при отклонениях скорости не менее чем на 5% от номинальной.

Следующая модель регулятора скорости соответствует регулятору на базе электрогидравлических преобразователей, которые, как известно, обеспечивают более высокую скорость реагирования на управляющие воздействия. Эта особенность дает возможность ввести в состав регулятора быстродействующий блок ограничения мощности PLU (Power Load Unbalance). Сигналы от этого блока воздействуют как на регулирующие, так и на отсечные клапаны. Блок одновременно выполняет две функции. Первая: ускорение отсечных клапанов по сигналу IVT, в случае, если его амплитуда превышает 0.1 относительную единицу. В этом случае блок в течение 1 секунды выдает импульс на закрытие отсечных клапанов. По истечении этого времени блок возвращается к основному режиму работы. Кроме того, блок может корректировать уставку регулятора по мощности для восстановления баланса после изменения нагрузки.

Для исполнения этой функции блок реагирует на скорость снижения электрической нагрузки генератора и небаланс между электрической нагрузкой и механической мощностью на валу турбины. Электрическая нагрузка выражена через сумму модулей токов по трем фазам, что исключает срабатывание автоматики при близких КЗ. Механическая мощность турбины, выражена через давление пара на входе, что является вполне распространенным приемом в случае, если параметры модели представлены в относительных единицах. Если электрическая нагрузка снижается с определенной скоростью и эквивалентная мощность турбины превышает электрическую нагрузку на заданную величину – реле взводит триггер. Триггер сбрасывается только при восстановлении баланса мощностей. После срабатывания триггера на управляющие и отсекающие клапаны турбины подается импульс на закрытие длительностью 1с. Уставка по мощности снижается до минимальной с темпом около 2% в секунду. И уставка по мощности не восстанавливается до сброса реле небаланса, и остается на том значении, до которого была снижена. Это позволяет сбалансировать мощность генератора со сниженным значением нагрузки.

На следующем слайде изображен злейший враг нормированного первичного резерва по частоте, люто, бешенно ненавидимый в правилах технической эксплуатации электроустановок регулятор «до себя». Я, признаться, до того как этой темой начал заниматься многократно сдавал ПТЭ и мне всегда было интересно, что это за регулятор такой, который аж удостоился упоминания в столь важном и почитаемом документе. Оказывается это всего-навсего регулятор давления на входе в турбину. Основная его задача – поддерживать постоянное давление пара в котле. Дело в том, что при падении давления КПД котла снижается, нарушаются всякие важные параметры его работы, и поэтому на станциях эти регуляторы очень уважают. Для турбины вроде бы как этот регулятор также полезен, так как при снижении давления содержание влаги в паре растёт, и ресурс турбины в таком режиме снижается быстрее. Вообще, судя по литературе, ресурс турбины всячески страдает от множества факторов. Правда наиболее вредным для ресурса турбины, как и для ресурса практически всего на свете, насколько я понимаю, является самое обычное время. Как и всякое чудо враждебной техники регулятор работает очень просто. При снижении давления ниже

уставки он подает сигнал на закрытие клапанов с тем, чтобы поддержать давление, а это, как верно подмечено в ПТЭ, противодействует работе регулятора скорости, направленной на поддержание частоты вращения. Однако существует более сложный вариант этого регулятора, который в нормальном режиме выполняет свою основную функцию – поддержание постоянного давления, а в переходных режимах, связанных с изменениями скорости вращения, блокируется, предоставляя возможность регулятору скорости выполнять свою работу.

Модель котла, задачей которого является создание этого самого давления пара, изображена на следующем слайде. Такая модель в ПК RUSTab уже есть, и я показывал на прошлых выступлениях, как в динамике себя ведет турбина с учетом котла. В модели предусмотрено управление сигналом от блока управления турбиной и котлом, и управление сигналом от регулирующих клапанов турбины. Данная модель за счет параметризации может представлять как барабанный котел, так и прямоточный. Вся разница по сути лишь в постоянных времени.

Теперь рассмотрим устройство блока управления турбиной и котлом. Давайте вспомним его роль и место на схеме энергоблока, после чего перейдем к внутреннему устройству. Оно, действительно, довольно сложное, потому что этот блок может работать в одном из четырех режимов управления. Такая структура блока нам требуется, чтобы учесть все эти режимы. Если бы мы сделали отдельные модели для каждого из режимов управления, они были бы существенно проще, но во многом друг друга дублировали бы. Я, пожалуй, воздержусь от изложения принципа работы этого устройства, а сразу перейду к режимам, поскольку для нас это сейчас более интересно.

Если мы хотим, чтобы наш энергоблок участвовал в первичном регулировании, мы, скорее всего, выберем для него режим работы с ведущей турбиной. В этом режиме подачей пара в турбину управляет регулятор скорости, что и обеспечивает быструю реакцию генератора на изменения частоты. При этом давление пара не регулируется, а блок управления турбиной и котлом поддерживает его за счет изменения подачи энергоресурсов. Для котла этот режим работы нельзя называть самым выгодным, поэтому участие в НПРЧ и относится к системным услугам. Нужно отметить, что ресурс регулирования частоты в таком режиме конечен, поскольку у котла наличествует эффект падения давления и после использования парового объема момент на валу турбины неизбежно будет снижаться.

В режиме с ведущим котлом блок управления формирует для турбины уставку по мощности, а для котла формирует сигнал подачи энергоресурсов с коррекцией по частоте. Режим ориентирован на поддержание постоянного давления пара перед турбиной за счет изменения ее уставки по мощности. По сути дела сигнал отклонения частоты управляет выработкой пара, что с учетом крайне неторопливой динамики котла не дает возможности быстрого изменения частоты вращения турбины в широких пределах. Но, тем не менее, регулятор скорости способен реагировать на изменения частоты вращения. Такой режим работы энергоблока относится к наиболее экономичным.

Третий режим носит название комбинированный. Как следует из названия, в нем блок управления турбиной и котлом в определенной пропорции совмещает режимы с ведущей турбиной и с ведущим котлом. Система формирования уставки для турбины минимизирует отклонение по мощности и по давлению, в то время как система управления котлом минимизирует отклонение только по давлению. Естественно, комбинированный

режим может быть сведен либо к режиму с ведущей турбиной, либо к режиму с ведущим котлом. Пропорция зависит от желаемого компромисса между объемом резерва по частоте и экономичностью.

Ну и наконец, четвертый режим – режим скользящего давления. В этом режиме регулирующие клапаны турбины полностью открыты, что вообще исключает возможность поддержания частоты. Блок управления в этом случае занят только котлом; турбина работает с постоянной уставкой по мощности. Момент на валу турбины определяется параметрами пара на входе в турбину. Турбина и генератор находятся в равновесии моментов, которое достигается за счет саморегулирования системы. Такой режим работы, как правило, используется на паровых блоках, входящих в состав парогазовых установок. Задачу же поддержания частоты в составе ПГУ решают газовые турбины.

Я уже, наверное, даже несколько раз говорил, что при расчете длительных переходных процессов важно учитывать действия автоматики. Особенно такой, в результате действия которой, мы можем потерять блок. Рассмотренные выше модели первичного привода хотя и могут на первый взгляд показаться сложными, но не позволят смоделировать все технологические защиты блока, поскольку лишь отражают процесс изменения параметров, но не представляют конкретное оборудование, типа РОУ или экономайзеров, на которых можно было бы имитировать защиту. Но такая детализация уж совершенно точно была бы излишней для электромеханических процессов, с ключевым словом «электро».

В качестве компенсации мы вводим модели защиты генератора: от повышения напряжения и от понижения напряжения (ЗМН). Защиты от повышения или понижения частоты, защиты от перегрузки по току ротора или статора, причем в вариантах с моделированием теплового состояния защищаемого объекта. Обычно все эти защиты работают на сигнал. В RUSTab модели этих защит могут работать по выбору либо на сигнал, с выдачей сообщения в протокол расчета, либо на отключение генератора. Ну и турбина защищается автоматом скорости. Поскольку это устройство, похоже, всегда устанавливается на турбины, в RUSTab автомат скорости сделан глобальным: Вы можете задать уставку по скорости, по умолчанию, по-моему, это 12%, и если в процессе расчета некий генератор разгонится выше этой уставки, он будет отключен. Предусмотрен также режим выдачи сообщения о срабатывании автомата скорости без отключения генератора. Использование моделей защит, даже с действием на сигнал, позволяет в процессе расчета обнаружить недопустимые значения параметров оборудования.

Еще одним видом автоматики, используемой на энергоблоках, даже более важным для нас в расчетах динамической устойчивости является автоматика разгрузки турбины. Её задача – ограничение генерации в переходном процессе. Причем это ограничение выполняется не путем отключения блока, который потом еще надо достаточно долго включать и синхронизировать, а путем достаточно быстрого снижения мощности турбины по определенному закону. Для этого устройства формируют сигнал, который подается на систему управления клапанами – регулирующими или отсечными. Их мы с Вами уже хорошо научились моделировать. В действие эти устройства автоматики приводят, как правило, централизованные системы или АПНУ. По способу такого ограничения генерации устройства делятся на устройства импульсной разгрузки, и устройства длительной

разгрузки. Разница в том, что устройства импульсной разгрузки после снятия команды на ограничение разрешают возврат мощности на доаварийное значение. Устройства же длительной разгрузки возвращают мощность турбины на несколько меньшее, чем доаварийное значение, пытаясь скомпенсировать избыток генерации в послеаварийном режиме. Собственно сигнал, который подает это устройство на клапаны может иметь форму импульса, определенной амплитуды и длительности, или к этому импульсу может быть еще пристроен экспоненциальный спад, с заданной постоянной времени. На рисунках слева показаны сигналы, которые формируют соответственно ИРТ и ДРТ, а на рисунках справа – реакция турбины на этот сигнал, поданный в систему управления клапанами. За счет применения этих устройств можно обеспечить сохранение динамической устойчивости при серьезных возмущениях, и поэтому, насколько я знаю, их достаточно часто рекомендуют рассматривать в качестве мероприятий при проектировании.

Принципы работы разгрузки, которые мы рассмотрели, соответствуют принципам работы реальных устройств, которые эти сигналы разгрузки формируют. В них вводят параметры сигнала, которые Вы можете видеть на рисунках слева. В ПК RUSTab будут введены модели таких устройств с соответствующими параметрами, но уже сегодня в RUSTab есть модель похожего устройства, в которой сигнал на клапаны задается в виде кусочно-линейной функции.

Эффект от этого устройства совершенно такой же. Единственный недостаток – приходится вводить пары точек время-значение, и часто, достаточно много. Это не всегда удобно, хотя и позволяет задать любую форму сигнала. В моделях, которые мы рассмотрели ранее, возможности формирования не такие широкие, но зато они близки к стандартным, и это можно сделать существенно проще.

Надо сказать, что в былинах есть упоминания еще об одном способе ограничения разгона генераторов. Речь идет об электрическом торможении, когда на выводы генератора для гашения его избыточной кинетической энергии включается фактически трехфазное короткое замыкание, правда через резисторы. У нас такое устройство тоже предусмотрено, но я не думаю что оно найдет себе широкое применение, ввиду уж больно радикального воздействия, которое оно оказывает на сеть.

С паровым первичным приводом мы закончили, перейдем к приводу газотурбинному. В свое время в литературе встречались мнения, что газовые турбины можно моделировать такими же способами, что и паровые, учитывая только большую маневренность газовых турбин параметрами постоянной инерции и постоянных времени объемов. Вместе с тем, более или менее адекватных моделей газовых турбин в то время и не существовало. На сегодня, к счастью, такие модели разной степени сложности разработаны, и судя по всему не зря, поскольку как вид привода газовая турбина имеет ряд интересных особенностей.

В двух словах как газовая турбина устроена. Он состоит из компрессора, который сжимает воздух раз так в 30-40, камеры сгорания, в которой смешивается этот сжатый воздух с горящим топливом, и рабочей турбины, расширяясь в которой горячая смесь приводит в действие лопатки и создает момент на валу. Ключевой компонент это компрессор. Он, как правило, осевой, и заставить его хорошо сжимать воздух при частоте вращения 3000 оборотов очень сложно. Поэтому компрессор работает на существенно более высокой частоте вращения. В зависимости от

того, на одном валу компрессор с рабочей турбиной или на отдельных, конструкции турбин и называются – одновальными или двухвальными. В одновальной турбине, которая, как правило, сразу проектируется для привода чего либо механического, с постоянной скоростью, компрессор работает через редуктор. Это довольно массивное гидромеханическое сооружение, и поэтому момент инерции такой турбины вполне сравним с моментом инерции паровой турбины близкой мощности. Другое дело двухвальная турбина. Рабочая ее часть существенно более легкая, и поэтому обладает меньшим моментом инерции. В связи с этим генератор с приводом от такой турбины очень легко может разогнаться и выпасть из синхронизма при относительно незначительных для обычного привода возмущениях. В качестве компрессора в двухвальных турбинах используются турбины буквально от самолетов, а еще буквально от тех самых Боингов и Эйрбасов. Управление такой установкой осуществляется, в основном, за счет управления компрессором. Поэтому надо как то моделировать связь между компрессором и силовой или рабочей турбинами по термодинамическим параметрам. Интересной особенностью является так же и то, что генератор на газовой турбине может поглощать активную мощность из сети, то есть турбина может его тормозить. Есть вроде бы даже такой режим работы у турбины. Про управление подачей воздуха от компрессора и подачей топлива в камеру сгорания я уже упоминал: во всех моделях газовых турбин эти контуры разделяются и учитываются довольно детально, поскольку от них зависит устойчивость работы всей установки. Для того чтобы лопатки, сопла и другие части газовой турбины не сгорели, температурой смеси управляют по контуру обратной связи по температуре. Интересно, что для измерения столь высокой температуры не годятся обычные термопары, поэтому температуру измеряют косвенно: ставят теплоотражающий экран, который защищает датчик от перегрева, и показания датчика корректируют с учетом теплопроводности экрана. Такая система измерения, понятное дело, имеет большую инерционность, и поэтому явно учитывается в моделях. Еще более интересно, что оказывается КПД турбины зависит от температуры окружающего воздуха. Чем холоднее воздух на входе, тем КПД турбины выше. Объясняется это тем, что холодный воздух имеет более высокую плотность, и сжать его компрессору проще. Даже есть конструкции со специальными охладителями. Несмотря на то, что они расходуют энергию на охлаждение, итоговый КПД всей установки удается за счет этого поднять. Ну и наконец, у газовых турбин есть связь максимального момента и частоты вращения. Как правило, момент максимален как раз на номинальной частоте, но он падает, как при уменьшении частоты, так и при ее росте.

На следующем слайде представлена модель газовой турбины, которая была разработана господином по фамилии Rowan.

Это де-факто стандарт модели, в которой все перечисленные особенности учтены. В дополнение ко всему, вот этот блок в пунктирной рамке сверху позволяет нам использовать модель как компонент более крупной модели – модели ПГУ. Блок моделирует управление лопатками на выходе турбины, за счет которых можно управлять температурой газов, подаваемых в теплообменник котла-утилизатора, а значит – управлять выработкой пара. Подробно разбирать работу модели я не стану, на ней достаточно поясняющих надписей, чтобы сделать это, при необходимости, собственными силами.

Рассмотренная модель не годится для представления двухвальной турбины, и поэтому для нее была создана специальная модель. На слайде изображена схема модели, предложенной инженером по фамилии Ханнет. Четко можно видеть блоки, отвечающие за моделирования турбины высокого давления, то есть компрессора, и турбины низкого – рабочей турбины, которая работает на привод генератора. Отличительной особенностью модели является то, что она использует инженерный подход к выбору параметров. В публикации, в которой эта модель была предложена господином Ханнетом, значительный объем посвящен определению параметров по серии различных установившихся режимов. Главным образом, измерения, полученные в этом процессе, используются для формирования функций в блоках, которые Вы можете разглядеть на схеме f_1 , f_2 , f_3 и так далее. Сформированная таким образом модель показывает неплохое соответствие получаемых результатов расчета с реальными измерениями параметров турбины в динамике. Достоинств у двухвальных турбин, похоже, что и больше, чем недостатков, среди которых один – крайне низкий запас динамической устойчивости за счет малого момента инерции. Но это обстоятельство нам лишь нужно учитывать в расчетах, и выбирать мероприятия по сохранению этой самой устойчивости. Кстати ограничение генерации путем отключения газовой турбины является довольно эффективной мерой, поскольку газовую турбину существенно проще и быстрее снова запустить, по сравнению с паровой.

Надо сказать, что существуют газотурбинные установки, которые работают на частотах вращения превышающих 3000 оборотов. В этом случае ток генератора идет в сеть через преобразователь частоты, скажем 100 на 50 герц или еще как-то. Такие установки обладают высоким КПД, поскольку нет необходимости поддерживать несвойственную газовой турбине частоту вращения, но имеют существенный недостаток – отключаются при сравнительно небольших возмущениях в сети. Дело в том, что силовая электроника имеет очень низкую перегрузочную способность, ну скажем, 1.05 от номинального тока, а зашунтировать ее ввиду различия частот нельзя. Поэтому такие установки на динамику энергосистемы влияют не лучшим образом. В то время как на генераторах с паровым приводом ставят всякие форсировки, чтобы удерживать напряжение, такая установка в момент кз, даже удаленного, просто исчезает из системы и всё. Кстати в RUSTab такое поведение можно имитировать путем установки на генератор простой максимально-токовой защиты. Моделировать преобразователь такой установки, мне кажется, вовсе не обязательно.

Рассмотренные модели газовых турбин достаточно сложны, поскольку перед ними ставится задача детально воспроизвести процессы реальной установки. Существуют и упрощенные модели, которые пригодны для представления газотурбинного привода в удалении от исследуемой области схемы, или для расчета динамической устойчивости на периоде до нескольких секунд.

На слайде представлена модель GAST, используемая в программном комплексе PSS/E и ряде других. Несмотря на существенные упрощения, в модели по-прежнему представлены контуры управления подачей топлива, обратная связь по температуре на выходе турбины, зависимость момента от частоты вращения, и даже зависимость момента от температуры окружающей среды. В этой модели попросту эквивалентировано большинство блоков,

входящих в стандартную модель. В ПК RUSTab эта модель, конечно, будет реализована, главным образом, для совместимости с другими программными комплексами.

Газовые турбины применяются как в виде самостоятельных блоков, так и в составе парогазовых установок. Отработанные газы, выбрасываемые из турбины, имеют высокую температуру и достаточный объем для того, чтобы быть использованными для подготовки пара, который может приводить в действие обычную паровую турбину. Для этого в состав ПГУ входит котел-утилизатор, с теплообменником, приспособленным к работе на продуктах сгорания газовой турбины. При использовании парогазовой установки можно достигать довольно высокого КПД – около 60%. На следующем слайде показано почему.

Цикл работы газовой турбины носит название цикл Брайтона. Точка 1 газового цикла соответствует условиям окружающей среды на входе ГТ. Воздух с помощью компрессора сжимается и нагревается до точки 2. Переход в точку 3 осуществляется за счет прогрева воздуха сжигаемым газом. Расширение смеси в турбине до точки 4 высвобождает энергию, расходуемую на привод вала турбины. В точке 4 продукты сгорания имеют достаточную температуру для выработки пара в системе теплообмена котла-утилизатора, цикл которого – обычный цикл Ренкина – «встроен» в неиспользуемую область. В газотурбинной установке, не входящей в состав ПГУ, эта энергия в буквальном смысле уходила бы в трубу.

Для моделирования ПГУ нам будут нужны два вида моделей, которые мы уже рассматривали: модель газовой турбины, естественно, и модель парового котла. Модель паровой турбины может быть применена любая, она будет работать на энергии пара, не имея никакого представления как этот пар выработан.

На слайде представлена структурная схема модели ПГУ с учетом термодинамики обмена энергией между газовой турбиной и котлом утилизатором. Все что касается газовой турбины – это на рисунке сверху, нам уже знакомо: то есть все контуры управления здесь представлены. Обратите внимание, что от модели газовой турбины требуется расчет переменных объема и температуры газов на выходе, что, как раз, и обеспечивает рассмотренная нами модель Rowan-II. Модель котла, в целом, соответствует также уже рассмотренной нами модели обычного парового котла, но нам нужно её немного переделать, чтобы учесть различия в управлении подачей топлива, воды и воздуха и подаче отработанных газов. Существуют такие модели котлов-утилизаторов, но для них есть сложности с определением параметров: скажем теплопроводностей, теплоемкостей, потерь давления и других труднообразимых и трудноизмеряемых величин. Поэтому достаточно часто используют функциональную связь, между механической мощностью на валу газовой турбины с количеством теплоты, поступающей в теплообменник котла. На следующем слайде представлена одна из таких моделей, предложенная в отчете CIGRE, если не ошибаюсь, 2006 года.

Обратите внимание на самый первый входной блок. Он делает то самое, о чем я говорил: преобразует мощность турбины в теплоту. Функция задается в кусочно-линейном виде, и значения точек этой функции предлагается либо запрашивать у производителя, либо снимать в серии испытаний. Вся остальная схема котла, как Вы можете убедиться, очень похожа на ту, которую мы уже рассматривали в случае обычного парового котла. Сигнал FAW просто заменен на количество теплоты. Кроме того, в модели еще предусмотрен отбор, на технологические или

теплофикационные нужды B_v и возможность учета объема теплоты от дополнительных горелок Q_s . Также обратите внимание на блок FC – Frequency Control, задачей которого является управление работой котла в режимах со значительными отклонениями частоты.

Похоже, мы уже достаточно поговорили о первичном приводе генераторов для расчета длительных переходных процессов, и научились выбирать модели, отвечающие требованиям для разных вариантов расчета. За кадром, правда остались гидравлические турбины, но с ними, кажется, не возникает особенных проблем и в общеизвестном подходе к моделированию. Рассказ об этом можно найти в предыдущей лекции.

Перейдем к следующему разделу, важному для расчета длительных переходных процессов – к моделированию автоматики. Начнем со всеми любимой и остро необходимой в расчетах автоматики ликвидации асинхронного хода. Мы провели некоторую работу по систематизации устройств этого вида автоматики, и можем выделить несколько типов по принципу выявления асинхронного режима. Первый – всем известный АЛАР по скорости изменения сопротивления. Его особенностью является разделение ступеней для ликвидации асинхронного хода на первом цикле и для ликвидации после определенного проворота. Принцип их действия немного различается, и мы намерены моделировать их также отдельно. Второй – АЛАР, использующий оценку так называемого модельного угла между эквивалентными ЭДС. Реально существующее устройство носит название АЛАР-М. Оценка угла выполняется по модельной схеме, представляющей собой фактически схему замещения защищаемого участка. По этому же принципу работает селективная автоматика предотвращения асинхронного хода, распространенная в операционной зоне Северо-Запада. Из этих же мест восходят корни устройства, которое здесь названо «алгоритмический» – АЛАР-Ц. Устройство анализирует фазовые траектории в координатах угла по линии и его производной, для чего и требуется расчетный алгоритм. Понятно, что это устройство чисто цифровое. Токвый АЛАР заслуженно занимает предпоследнее место, поскольку чаще всего используется в третьих ступенях, и наконец, оказывается, на генераторах тоже могут устанавливать АЛАР. Например, АЛАР-Ц может защищать от асинхронного хода генератор, даже моделируя его уравнения движения. Но в этом пункте идет речь об устройстве «Фz», работающем по дистанционному принципу.

Это самый дистанционный АЛАР, как я уже сказал, может состоять из двух ступеней. Первая предназначена для ликвидации асинхронного хода на первом провороте, для чего измеряется скорость прохождения точки годографа полного сопротивления защищаемого участка по зонам грубого и точного реле сопротивлений, с одновременным контролем изменения направления мощности. Настройка ступени позволяет отличить режим асинхронного хода от короткого замыкания и от синхронных качаний. Вторая ступень имеет счетчик проворотов, который приводит к срабатыванию при определенном количестве прохождений точки годографа по зоне реле, сопровождающихся изменением направления мощности. При этом предусмотрен дополнительный контроль прохождения точки по зоне реле электрического центра качаний.

Для отстройки дистанционного АЛАР от нормальных режимов часто требуется формирование зон реле сопротивления достаточно сложной формы. Такая возможность, например, реализована в МКПА. Мы предлагаем аналогичную возможность формирования сложной зоны путем наложения в режимах объединения или

исключения до четырех базовых зон, или как еще их можно назвать – зон элементарной формы. Это, конечно, эллипс, с произвольным коэффициентом, углом наклона большей оси и смещением относительно начала координат. Многоугольник с произвольным количеством вершин, в том числе и невыпуклый многоугольник, если потребуется. И зона в виде полуплоскости, задаваемая двумя точками, через которые проходит прямая. На следующем слайде представлены примеры двух сложных зон.

Первая – псевдоэллипс, сформированный объединением зон эллиптической формы, а вторая – совершенно фантастическая зона, составленная из объединения и исключения все трех базовых зон. Мне кажется, таких возможностей должно хватить на все случаи жизни. В принципе хватило бы и многоугольника, только точек пришлось бы задавать достаточно много.

Принцип работы АЛАР, использующих модельный угол между векторами эквивалентных ЭДС, основан на косвенном измерении угла между напряжениями на концах защищаемого участка. Устройство, выполненное по этому принципу, запускается по факту превышения углом между векторами эквивалентных ЭДС заданного значения для первой ступени, или при отсчете заданного количества проворотов для второй ступени. Ступени дополнительно контролируют положение ЭЦК, и запускаются только при условии, что данная точка находится в пределах защищаемого участка. Устройство блокируется при скачкообразных изменениях угла с тем, чтобы исключить ложную работу при кз.

САПАХ по принципу работы похож на АЛАР-М. Отличие заключается в том, что САПАХ используется в виде двух комплектов по концам защищаемого участка и предусматривает в качестве основного управляющего торможение генераторов в избыточной части энергосистемы, или наоборот – ограничение нагрузки. САПАХ позволяет, как и следует из названия, выбрать оптимальную точку деления, с тем, чтобы оставить нагрузку в избыточной части энергосистемы. На приведенной схеме при асинхронном ходе, который вызван дефицитом в первой энергосистеме, должен сработать САПАХ 1, отделяя ее и переводя промежуточные подстанции на питание от второй энергосистемы. САПАХ 2 при этом не должен срабатывать. Если асинхронный ход вызван дефицитом во второй энергосистеме, промежуточные подстанции должны быть переведены на питание от первой, действием САПАХ 2. Все это обеспечивается за счет косвенного измерения или моделирования угла между векторами напряжения в точках 1 и 6 в данном случае. При значениях угла близких к 180° , происходит изменение знака мощности. Реле мощности должно быть настроено таким образом, чтобы оно срабатывало раньше углового реле. При дефиците мощности во второй системе вектор напряжения U_1 при асинхронном ходе будет опережать U_2 . Подстанции 2 реле направления мощности срабатывает раньше, а угловое реле – позднее. Устройство САПАХ 2, соответственно сработает. При дефиците мощности в первой системе вектор напряжения U_1 будет отставать от U_2 . Реле направления мощности сработает на Подстанции 1 раньше, чем угловое реле и запустится САПАХ 1.

Токовый АЛАР обычно применяется в качестве резервного. Принцип действия основан на подсчете колебаний фазного тока, максимальные значения амплитуды которых превышают уставку I_{max} , а минимальные значения – ниже I_{min} . При этом длительность периода колебаний не превышает уставку по времени. Пусковой орган токового

АЛАР срабатывает, если количество подсчитанных циклов становится равным заданному значению. Счетчик циклов сбрасывается после срабатывания или в случае, если период колебания превысил уставку по времени.

Все рассмотренные модели достаточно хорошо описаны, хотя нам и пришлось приложить изрядные усилия чтобы найти вмняемую документацию по САПАХ, которую мы обнаружили в виде полуистлевших скрижалей, но увековечили в PDF. Алгоритмы их работы просты, и реализовать их в ПК RUSTab не составляет особого труда. Однако сложность представляет разработка пользовательского интерфейса, с помощью которого можно будет настраивать АЛАР и анализировать их работу. В новом техническом задании нами предлагается следующий вариант панели управления АЛАР, который будет реализован в ПК RUSTab.

Данная панель управления предоставляет возможность выбора места установки АЛАР, в том числе и на генераторах, выбор управляющего воздействия, отдельно для торможения, ускорения и срабатывания. Также предусмотрена настройка зон с наложением, о которой мы говорили, причем на годографе сопротивления, полученном в результате расчета. На годографе сопротивления также предполагается возможность наложения годографа полной мощности, для того чтобы были видны моменты изменения знака. На графиках снизу от годографа предусмотрен вывод угла по связи и его производной, а также дискретных выходов, соответственно на торможение-ускорение и срабатывание устройства. Надеюсь, что нам удастся такую панель реализовать, в результате чего настройка АЛАР станет доступной в RUSTab в полной мере.

В части планируемых улучшений пользовательского интерфейса также предусмотрено упрощение работы со сценарием расчета. По нашим наблюдениям, большинство сценариев, используемых технологами, сводятся к безусловной последовательности действий, параметры которых никак не связаны между собой. Для графического отображения такого сценария предлагается многодорожечный интерфейс, в котором каждая дорожка соответствует некоторому изменяемому в процессе расчета параметру. Внутри дорожки имеется прямоугольник, с изменяемыми размерами, который отражает время начала и окончания воздействия на параметр, а внутри прямоугольника отображается значение, которое это воздействие вводит в параметр. Прямоугольник можно перемещать по дорожке, выбирая момент времени ввода действия. Такая система работы с безусловным сценарием также описана в новом техническом задании.

Возвращаясь к автоматике, в оставшееся время я еще могу показать устройства АОСЧ и АПВ. Устройства АОСЧ нами в RUSTab уже реализованы, но есть мнение, что их тоже следует несколько модернизировать и расширить, что и было сделано. На первом слайде изображены модели устройств АЧР-1 и АЧР по скорости снижения частоты. Кстати последнее устройство может использоваться как пусковой орган для ЧДА или ДАР.

На втором слайде соответственно приведены схемы моделей АЧР-2 и частотного АПВ. Схемы взяты непосредственно из описаний существующих микропроцессорных терминалов и максимально приближены к реальности, может быть разве только за исключением тонкостей измерения собственно частоты.

Как ни стыдно признаться, в текущей версии ПК RUSTab не было предусмотрено моделей автоматического повторного включения. В качестве компенсации этого досадного упущения в модернизации мы предлагаем

выполнить аж две достаточно сложных модели АПВ. Первая модель позволяет выполнять двукратное АПВ с контролем напряжения. При этом контроль напряжения может осуществляться в четырех вариантах: наличие, отсутствие, наличие на обоих шинах, или вообще без контроля.

Вторая модель представляет собой АПВ с контролем синхронизма. В этой модели применяется блок контроля синхронных условий, разрешающий срабатывание устройства. В части параметров, необходимых для определения этих условий у нас допустимая разность напряжений, разность углов, и разность частот по концам связи.

В реальной жизни различают устройства с контролем синхронизма и с улавливанием синхронизма. Отличие последних заключается в том, что момент включения рассчитывается по скорости изменения параметров с учетом времени срабатывания выключателя. В RUSTab мы ограничиваемся АПВ с контролем синхронизма, поскольку время срабатывания выключателя моделировать мы пока не собираемся.

И это, пожалуй, все, что мне удастся рассказать о наших обширных планах за отведенное для занятий время. Если у Вас возникли вопросы или предложения по рассмотренным темам, прошу высказываться.