

# Применение технологий моделирования в развитии инновационных направлений электроэнергетики

На современном этапе развития энергетики был создан ряд технологий, призванных изменить качественные характеристики функционирования энергосистемы: улучшить наблюдаемость и управляемость энергосистемой, повысить эффективность и надежность ее работы. К таким технологиям и связанным с ними тенденциям следует, прежде всего, отнести глобальные системы мониторинга, защиты и управления (WAMS, WAPS, WACS), многоагентные системы, гибкие системы передачи переменного тока (FACTS), цифровые подстанции, применение в энергосистемах возобновляемых источников энергии.

Однако внедрение новых технологий в ряде случаев приводит к возникновению в энергосистеме ранее не характерных для нее режимов: режимы энергосистемы в целом усложняются. Это обуславливает целесообразность осуществления предварительных детальных испытаний планируемых к реализации технологий и использующих их устройств и, прежде всего, в условиях, максимально близких к тем, в которых эти новые технологии и устройства будут эксплуатироваться. Наиболее эффективными и сравнительно низкзатратными инструментами для подобных испытаний являются методы и средства моделирования, позволяющие получить первичный опыт эксплуатации внедряемых решений, выработать рекомендации по их оптимальному применению.

## Авторы:

Нудельман Г.С.,  
Наволочный А.А.,  
Онисова О.А.

## ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕХНОЛОГИЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В соответствии с определением, моделирование предполагает создание модели исследуемого объекта, подобной этому объекту по ряду свойств. Какие это должны быть свойства и насколько полное подобие требуется – определяется задачей исследования.

Для изучения электроэнергетических объектов и систем получили распространение следующие виды моделей:

- электродинамические, представляющие собой наборы связанных между собой физических устройств, подобных реальным объектам (генераторам, линейным элементам, нагрузкам). Для задания расчетных режимов работы модели ис-

следуемой энергосистемы, а также для регистрации и обработки электрических сигналов в настоящее время обычно используют средства современной цифровой техники. Из действующих в России крупных электродинамических моделей следует упомянуть цифро-аналого-физический комплекс ОАО «СО ЕЭС» (ранее – ОАО «НИИПТ»). Недостатки электродинамических моделей связаны с ограничениями в гибкости, оперативности первоначальной настройки;

- аналоговые и гибридные. Моделирующий комплекс гибридного типа представляет собой специализированную многопроцессорную аналого-цифровую систему. Основное решение уравнений математических моделей элементов – так же, как и в аналоговой системе – выполняется в аналоговом виде. Остальные операции (например, настройка параметров моделей и сбор данных) осуществляются цифровым способом. Гибридный подход реализован, к примеру, в моделирующем комплексе реального времени Томского политехнического университета (подробнее с комплексом можно ознакомиться в статье разработчиков, опубликованной в этом же номере журнала). Основным недостатком аналоговых (гибридных) систем моделирования связан с принципиальной привязкой каждого вычислительного модуля комплекса к модели элемента исследуемой энергосистемы и, как следствие, с недостаточной гибкостью в плане изменения логики работы моделей;

- математические модели и моделирующие комплексы на их основе, в том числе, функционирующие в режиме реального времени. Значительная часть применяемых в настоящее время программно-вычислительных комплексов (PSS/e, Eurostag, Mustang, RastrWin и многие другие) использует математические модели, ориентированные на расчет статических режимов (установившегося режима, действующих значений токов короткого замыкания), исследование электромеханических переходных процессов. Существенно меньшая часть программных средств использует т.н. EMTP (ElectroMagnetic Transients Program) алгоритмы, основанные на работах профессора Г. Доммеля [1], и ориентирована на исследование электромагнитных переходных процессов (программные продукты PSCAD, EMTP-RV, ATP-EMTP). И в первом, и во втором

случаях основные трудности реализации могут быть связаны с подготовкой адекватного математического описания моделируемых объектов.

Выбор наиболее подходящих модели и средства моделирования осуществляется с учетом специфики поставленной задачи.

Представляется целесообразным задачи, решаемые в сфере электроэнергетики, классифицировать на следующие группы:

### **Инженерно-практические расчеты**

Эта группа задач связана с расчетами установившихся режимов, анализом статической и динамической устойчивости энергосистем, в том числе большой размерности (свыше 100 000 узлов). В результате расчетов получают информацию о значениях напряжений, потоков мощности, действующих значениях токов короткого замыкания и т.п.

Специфика решаемых задач позволяет принять ряд допущений: вместо трехфазных моделей, требующих учета взаимного влияния цепей фаз, применяются эквивалентные однофазные модели (допущение о симметрии сети); не учитываются электромагнитные переходные процессы в статорных цепях электрических машин; пренебрегают нелинейностью ряда элементов (магнитных систем электрических машин и реакторов, разрядников и ограничителей перенапряжений).

Выполнение таких расчетов – обязательная часть проектных работ, и это отражено в соответствующей нормативной документации.

Примеры используемых программных средств – RastrWin, PSS/e, Eurostag и т.п.

### **Научные задачи, требующие детальных исследований отдельных фрагментов энергосистем**

Исследование перенапряжений и разработка мероприятия по их ограничению, внедрение устройств синхронной коммутации, исследование функционирования устройств FACTS и их систем управления, разработка и исследование алгоритмов действия устройств релейной защиты и автоматики, а также ряд других задач обуславливают появление требований высокой детализации представления расчетной модели, адекватного отражения как «быстрых» (электромагнитных), так и

«медленных» (электромеханических) переходных процессов.

Решение задач этой группы, как правило, требует представления модели электроэнергетической системы в системе фазных координат (A, B, C), учета несимметрии и нелинейности характеристик элементов.

Алгоритмическая база предполагает решение жесткой нелинейной системы дифференциальных уравнений; для этой цели с точки зрения требуемых вычислительных ресурсов предпочтительным оказывается использование EMTP-алгоритмов.

Несмотря на существование необходимой алгоритмической базы и реализующих ее программных продуктов, этой задаче (равно как и следующей) не уделяется должного внимания: в существующей нормативной документации не нашли отражения ни объемы исследований, ни необходимость (или целесообразность) их выполнения.

### **Исследование функционирования физических образцов устройств релейной защиты, автоматики и управления**

Актуальность этой задачи связана с условием алгоритмов действия современных устройств РЗА, разнообразием применяемых разными производителями подходов и – одновременно – с повышением требований надежности и эффективности со стороны энергосистемы.

Эффективный инструмент решения задачи – функционирующие в режиме реального времени электродинамические (физические), аналоговые (гибридные) или программно-аппаратные (цифровые) моделирующие комплексы.

Функционирование модели в темпе, соответствующем скорости протекания процессов в энергосистеме – необходимое условие для реализации подключения внешних (по отношению к модели) физических устройств управления, релейной защиты и автоматики с организацией полнофункциональной обратной связи между моделью и этими устройствами (рис. 1), меняющей режим энергосистемы при изменении состояния испытуемого устройства (т.е. максимально приближенно к тому, как это происходит в реальных условиях). Используемые при этом в цифровых моделирующих комплексах под-

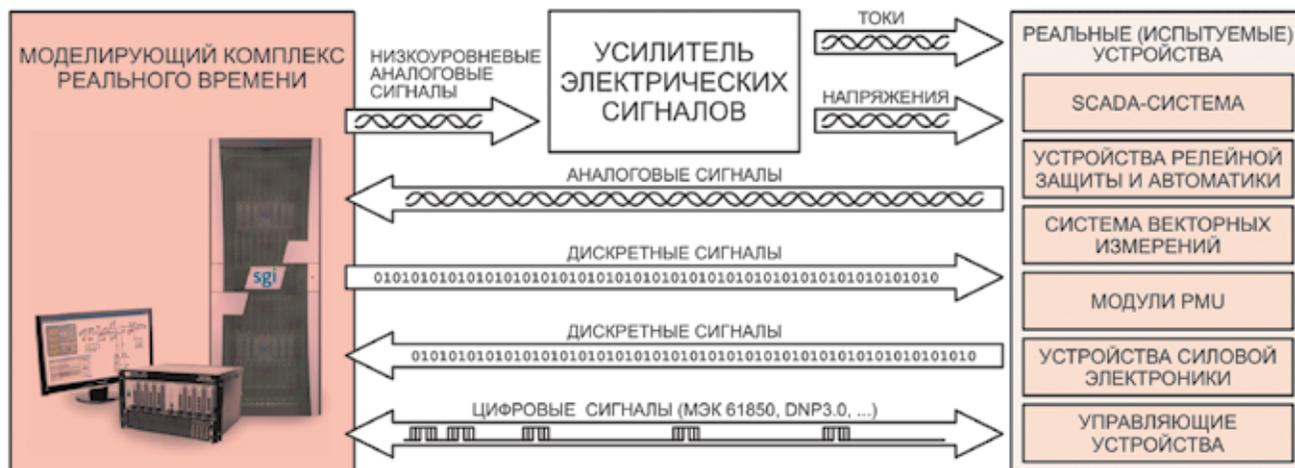


Рис. 1. Структурная схема испытаний физических устройств в режиме реального времени



Рис. 2. Требования к шагу моделирования при осуществлении исследований

ходы обычно связаны с использованием EMTP-алгоритмов (моделирующие системы RTDS и HYPERSIM канадских производителей RTDS Technologies и OPAL-RT Technologies, соответственно).

Отличия программно-аппаратных моделирующих комплексов разных производителей обусловлены также и разными архитектурами построения вычислительных систем. Наибольшую известность получили три архитектуры построения многопроцессорных систем, различающиеся организацией взаимодействия с памятью [2, 3]: симметричные мультипроцессорные системы (Symmetric Multi-Processing – SMP), системы с массовым параллелизмом (Massive Parallel Processing – MPP) и семейство архитектур неоднородного доступа к памяти (Non-Uniform Memory Architecture – NUMA).

Симметричная мультипроцессорная система характеризуется наличием общей физической оперативной памяти, к которой все процессоры имеют равноправ-

ный доступ посредством единой системной шины. Этот вид архитектуры был взят за основу при создании моделирующего комплекса реального времени eMEGAsim (компания OPAL-RT Technologies).

В системе с массовым параллелизмом память физически разделена между отдельными одинаковыми параллельно работающими вычислительными узлами; доступ к памяти какого-либо вычислительного узла имеет только процессор, принадлежащий этому же узлу. Этот вид архитектуры был использован при создании комплекса RTDS.

Большее распространение при реализации параллельных вычислений получила комбинированная архитектура неоднородного доступа к памяти. Оперативная память в вычислительной системе, построенной в соответствии с архитектурой NUMA, физически разделена между однородными вычислительными узлами, однако логически организована общей для всех них. Про-

цессоры, входящие в состав одного вычислительного узла, имеют аппаратный доступ не только к памяти «своего» узла, но и – более медленный – к памяти, размещенной во всех остальных вычислительных узлах. Разновидность архитектуры NUMA – NUMAflex – применена в вычислительных серверах UV компании SGI, используемых в одной из конфигураций моделирующего комплекса реального времени HYPERSIM.

Вне зависимости от используемой архитектуры и от того, выполняется ли моделирование в режиме реального времени или нет, актуальным является вопрос выбора шага моделирования.

Моделирование переходных процессов при коротких замыканиях, качаниях и в асинхронных режимах с целью испытаний устройств РЗА осуществляется, как правило, с шагом 20–80 мкс (рис. 2).

Исследование устройств FACTS, испытания их систем управления требуют существенно меньшего шага (сотни наносекунд – единицы микросекунд) и ужесточают требования к вычислительной мощности средства моделирования.

Тестирование глобальных систем мониторинга, управления и защиты (WAMPAC), моделирование больших энергосистем обычно не предъявляют жестких требований к величине шага моделирования (от 0,1 мс), но при этом становится предпочтительным использование специального математического аппарата, ориентированного на исследования электромеханических переходных процессов. Кроме того, использование моделирующих комплексов для целей управления энергосис-

стемой может потребовать выполнения расчетов не в режиме реального времени, а с опережением.

### Тенденции развития технологий и средств моделирования

Развитие базы цифрового моделирования в режиме реального времени активно происходит по следующим направлениям:

- улучшение условий и возможностей для наращивания вычислительной мощности систем моделирования;
- использование «открытых» аппаратных решений, позволяющее снизить стоимость моделирующего комплекса;
- расширение возможностей по поддержке цифровых протоколов связи с внешними устройствами (МЭК 61850, DNP3.0, OPC, С37.118 и др.), протоколов синхронизации (IEEE 1588, IRIG-B, 1PPS).

В то же время на настоящий момент времени имеется и ряд нерешенных (или не до конца решенных) задач:

- моделирование высокочастотных переходных процессов с шагом по времени 100 нс и менее;
- моделирование электромеханических процессов в больших энергосистемах (более 10000 узлов) в режиме реального времени и с опережением;
- реализация в моделирующих системах реального времени «комбинированных» методов расчета электромагнитных и электромеханических переходных процессов (EMT/Phasor), позволяющих выполнять моделирование процессов в интересующем фрагменте энергосистемы с высокой степенью детализации при одновременном моделировании для остальной части энергосистемы только электромеханических переходных процессов.

Учитывая тенденции более широкого использования в IT-сфере «открытых» архитектур, повышения производительности процессоров, а также активного внедрения в электроэнергетику новых технологий, в ближайшей перспективе следует ожидать, по меньшей мере, расширения области применения моделирующих комплексов реального времени и увеличения круга задач, требующих осуществления детальных исследований процессов в электроэнергетических системах.

Уже сейчас необходимо отметить возрастание роли моделирования в решении ряда задач электроэнергетики (особенно в условиях ограниченности инвестиций):



Рис. 3. Этапы развития новых технологий

- строительство и модернизация объектов электроэнергетики. Технологии моделирования позволяют получить необходимую информацию для принятия обоснованных решений по выбору первичной схемы, типов и параметров оборудования, оптимизации режимов электрических сетей, анализа аварийных ситуаций, прогнозирования поведения энергосистемы;

- планирование развития электроэнергетических систем. Особенно следует отметить роль моделирования в развитии и внедрении инновационных технологий. Представляется целесообразным использование средств моделирования на всех связанных с новыми технологиями этапах (рис. 3). Результатом научно-исследовательских работ (общие исследования поведения новой технологии в составе энергосистемы, выполненные с использованием средств моделирования), должны стать оценка технико-экономических показателей (ТЭП) выполненной разработки, планирование ее внедрения; на этапе опытно-конструкторской разработки (исследование физических образцов создаваемых устройств с использованием моделирования в режиме реального времени) производится корректировка технико-экономических показателей; на этапе внедрения осуществляется моделирование «в привязке» к схеме конкретного объекта (с учетом взаимодействия с существующими устройствами РЗА, средствами управления); конечным итогом процесса должно стать повышение эффективности создания и внедрения новых технологий;

- решение on-line задач управления режимами энергосистем.

### ВЫВОДЫ

1. Моделирование становится одним из основных инструментов развития инновационных направлений электроэнергетики.

2. Необходима разработка и применение методически правильного подхода к

использованию технологий моделирования, основанного на понимании принимаемых допущений, учете несовершенства моделей и т.д.

3. При создании и модернизации объектов электроэнергетики в современных условиях становится необходимым проведение детальных исследований процессов в энергосистеме, испытаний физических образцов устройств релейной защиты, противоаварийной автоматики и систем управления с использованием соответствующих средств моделирования.

Представляется крайне важным определить и отразить в нормативных документах объемы таких исследований и испытаний.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Dommel H.W., EMTP Theory Book, Microtran Power System Analysis Corporation, 4689 W. 12th. Avenue, Vancouver, B.C. V6R 2R7, Canada, 2nd. edition, May 1992.

2. Богданов А.В., Корхов В.В., Марев В.В., Станкова Е.Н. Архитектуры и топологии многопроцессорных вычислительных систем. – М.: Интернет-университет информационных технологий – ИНТУИТ.ру, 2004 г. – 156 с.

3. Евстигнеев В.А., Мирзуитова И.Л. Развитие NUMA-архитектуры: текущее состояние // Современные проблемы конструирования программ. – Новосибирск: Ин-т систем информатики им. А.П. Ершова СО РАН, 2002. – С. 139–154.