

Технологии цифрового моделирования электроэнергетических систем в режиме реального времени

Е.Н. КОЛОБРОДОВ, А.А. НАВОЛОЧНЫЙ, О.А. ОНИСОВА, Д.С. РЫБИН

RAVINDER VENUGOPAL, VINCENT LAPOINTE

ОАО «ВНИИР», Россия

OPAL-RT, Канада

ekolobrodov@abselectro.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Моделирование в режиме реального времени, цифровые динамические модели реального времени, испытания средств РЗА и систем управления, RTDS, OPAL-RT, eMEGAsim, HYPERSIM.

1 ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени в электроэнергетике обозначился ряд проблем, требующих пересмотра подходов к дальнейшему развитию электроэнергетических систем: рост потребления электроэнергии; удалённость расположения центров генерации от мест потребления электроэнергии; ужесточение санкций, накладываемых на поставщиков электроэнергии при низком её качестве или недоотпуске; обоснованная необходимость внедрения источников малой распределённой генерации. В качестве одного из средств решения возникающих при этом задач активно рассматривается внедрение в электроэнергетику элементов интеллектуальных энергосистем с активно-адаптивной сетью (концепция «Smart Grid»). В то же время использование новых устройств приводит к возникновению в электроэнергетических системах ранее не характерных для них режимов, существенным образом влияющих на работу средств режимной и противоаварийной автоматики, релейной защиты.

Наиболее детально изучить поведение энергосистемы при внедрении в неё новых элементов, осуществить оценку функционирования средств релейной защиты и противоаварийной автоматики, систем управления в новых условиях возможно с помощью постоянно совершенствующихся инструментов моделирования, особую роль среди которых приобретают цифровые средства моделирования реального времени.

2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

2.1 Понятие о моделировании в режиме реального времени. История развития

Основной задачей моделирования в электроэнергетике является воссоздание процессов, происходящих в электроэнергетических системах в различных схемно-режимных ситуациях, с использованием моделей электроэнергетических объектов необходимой степени адекватности. Моделирование реализуется с использованием только аппаратных или комбинации аппаратных и программных средств, выступающих в роли модели энергосистемы или её фрагмента.

Моделирование в режиме реального времени осуществляется в темпе, соответствующем скорости протекания процессов в самой энергосистеме. Функционирование модели в реальном времени создаёт необходимые предпосылки для подключения внешних (по отношению к модели) физических устройств управления, релейной защиты и автоматики с организацией полнофункциональной обратной связи, меняющей исходный режим энергосистемы при изменении состояния испытуемого устройства (подобно тому, как это происходит на самом энергообъекте). Это позволяет наиболее полно и детально исследовать поведение устройств в

условиях, максимально приближенных к реальным, даёт возможность осуществить первичное опробование новых решений без вмешательства в энергосистему, предвидеть последствия возмущающих и управляющих воздействий на неё.

Моделирующие комплексы реального времени находят всё большее применение при:

- проведении полного цикла проверки оборудования (устройств релейной защиты, режимной и противоаварийной автоматики, системных регуляторов и т.п.) на базе цифровых динамических моделей реального времени;
- разработке и исследовании устройств FACTS (гибкие системы переменного тока), HVDC (вставки постоянного тока), моделировании энергосистем, в составе которых имеются эти устройства;
- разработке и проверке алгоритмов действия устройств защиты, регулирования и управления, систем управления устройствами FACTS;
- осуществлении детальных исследований электроэнергетических систем переменного и постоянного тока (установившиеся режимы, электромагнитные и электромеханические переходные процессы) и их взаимного влияния;
- реализации мероприятий по управлению энергосистемами;
- создании комплексных решений в сфере активно-адаптивных сетей (глобальные системы контроля, управления и защиты WAMPAC, многоагентные системы, распределённая генерация, современные коммуникационные технологии и т.д.);
- обучении и тренировке инженерно-технического персонала объектов электроэнергетики;
- выполнении сертификационных испытаний оборудования.

Развитие технологий моделирования в режиме реального времени связано со следующими направлениями:

- создание электродинамических моделей. Именно этому направлению было уделено преимущественное внимание в СССР. Электродинамическая модель (ЭДМ) представляет собой набор связанных друг с другом физических моделей реальных объектов (генераторов, нагрузок и т.п.), разработанных на основе теории подобия [1]. Некоторые объекты (например, линии электропередач переменного тока) в ЭДМ представлены не геометрически подобными моделями, а схемами замещения, составленными из реальных физических элементов;
- создание аналоговых и гибридных средств моделирования. Основное решение уравнений математических моделей элементов энергосистемы как в аналоговой, так и в гибридной системах моделирования выполняется в аналоговом виде (специализированной аналоговой вычислительной машиной). Настройка параметров модели, сбор данных в гибридном моделирующем комплексе осуществляются цифровым способом;
- создание цифровых моделирующих комплексов реального времени. На современном этапе развития средств моделирования появились технические возможности для решения уравнений, описывающих моделируемую систему, в режиме реального времени непосредственно в цифровом виде. Это позволило существенно улучшить оперативность создания моделей, гибкость изменения параметров их настройки и возможности задания режима. В то же время не для всех объектов современной электрической сети разработано адекватное математическое описание, следовательно, обусловленные наличием таких объектов процессы не могут быть достоверно воспроизведены цифровой моделью.

2.2 Технологии цифрового моделирования в режиме реального времени

Общая структурная схема системы моделирования, ориентированной на решение задач электроэнергетики в режиме реального времени, приведена на рис. 1.

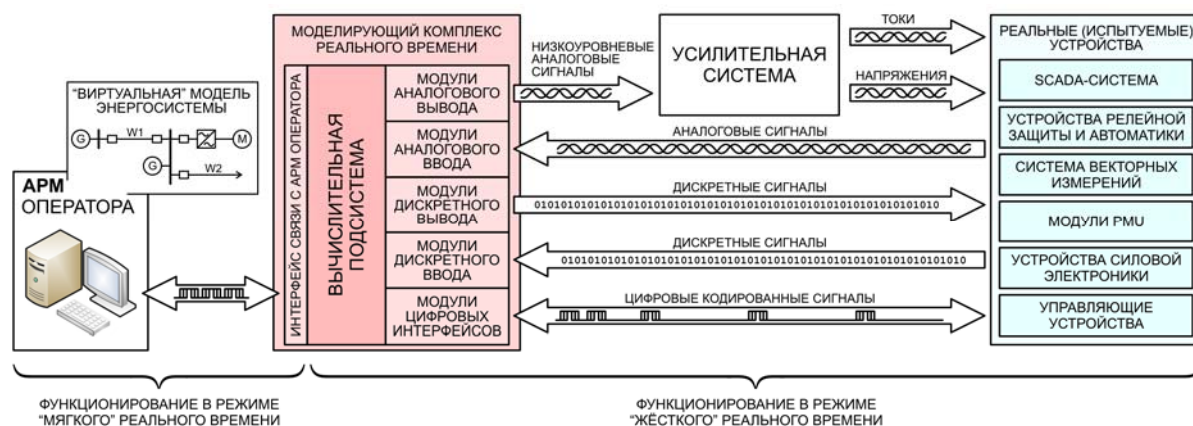


Рис. 1

Моделирующий комплекс реального времени в общем случае содержит:

- вычислительную подсистему, задача которой заключается в решении уравнений математических моделей элементов энергосистемы в темпе исследуемого процесса;
- модули аналогового вывода – предназначены для выдачи рассчитываемых вычислительной подсистемой мгновенных значений токов и напряжений на внешнее реальное оборудование. Применяемые в настоящее время в этих модулях цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП) имеют разрядность, как правило, 16 бит; выходной сигнал – напряжение низкого (размах до 32 В) уровня, поэтому в большинстве случаев дополнительно требуется использование внешних преобразователей/усилителей тока и напряжения. Обновление данных на входе ЦАП осуществляется со временем, соответствующим шагу моделирования, поэтому для «сглаживания» выходного аналогового сигнала некоторые производители закладывают механизмы передискретизации и экстраполяции. С целью снижения влияния электромагнитных возмущений на линию связи с объектом (усилителями), каждый выход выполняется по дифференциальной схеме;
- модули аналогового ввода – служат для приёма аналоговых электрических сигналов от испытываемых устройств (например, регуляторов). Разрядность используемых аналого-цифровых преобразователей и диапазон входного напряжения обычно соответствуют решениям производителя, принятым для модулей аналогового вывода;
- модули дискретного вывода – требуются для выдачи дискретных сигналов на внешнее оборудование (например, команд на отключение или включение выключателя, управления устройствами FACTS; сигналов блокировки или ускорения действия защиты). Дискретные выходы могут быть реализованы с использованием быстродействующих твёрдотельных реле или гальванически изолированных от вычислительной подсистемы транзисторных ключей; в некоторых вариантах исполнения модули дискретного вывода могут выдавать дискретные сигналы уровня ТТЛ (0/+5 В), модулированные однополярные сигналы;
- модули дискретного ввода – необходимы для приема информации о состоянии внешнего оборудования. Как правило, каналы дискретного ввода имеют оптронную развязку от внешних цепей. Часто используются внешний источник питания напряжением до 30 В постоянного тока и внутренние заменяемые токоограничивающие резисторы, хотя для удобства подключения к контактам выходных реле испытываемой аппаратуры могут предлагаться решения с интегрированным источником. Существуют разновидности модулей дискретного ввода, способные принимать модулированный сигнал (широотно-импульсная модуляция);
- модули цифровых интерфейсов – служат для обеспечения взаимодействия с физическим оборудованием в соответствии с протоколами, наиболее распространёнными в сфере промышленной автоматизации (DNP, PROFIBUS, Modbus, CAN, OPC), релейной защите (МЭК 61850 8.1 – GOOSE, МЭК 61850 9.2 – SV, C37.118). Как правило, эти модули имеют возможность синхронизации данных по ряду протоколов (1PPS, IEEE1588 – PTP, IRIG-B, NTP).

Компоненты моделирующего комплекса и присоединённое к нему испытываемое физическое оборудование образуют систему, функционирующую в режиме т.н. «жесткого»

реального времени (время реакции на события в которой со стороны моделирующего комплекса минимально и всегда точно известно).

На автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора возлагаются задачи мониторинга и инициирования событий в процессе моделирования, поэтому взаимодействие АРМ оператора и моделирующего комплекса может осуществляться в режиме «мягкого» реального времени (т.е. задержка реакции на события не критична и допустима).

Выполнение расчётов в режиме жесткого реального времени в современных цифровых моделирующих системах обеспечивается использованием многопроцессорной (многомашинной) вычислительной системы. Известны две базовые архитектуры построения многопроцессорных систем, различающиеся организацией взаимодействия с памятью [2]: симметричные мультипроцессорные системы (Symmetric Multi-Processing – SMP) и системы с массовым параллелизмом (Massive Parallel Processing – MPP).

Симметричная мультипроцессорная система характеризуется наличием общей физической оперативной памяти, к которой все процессоры имеют равноправный доступ посредством единой системной шины. Основное достоинство SMP-архитектуры заключается в относительной простоте программирования, связанной с заложенным механизмом обмена данными между процессорами: в качестве средства обмена данными используется общая память. Недостаток системы – плохая масштабируемость: в каждый момент времени системная шина может обрабатывать только одну транзакцию, поэтому при увеличении количества процессоров существенно обостряется проблема разрешения конфликтов между ними при обращении к общему устройству памяти. Кроме того, сама шина имеет ограниченную (хотя и высокую) пропускную способность. Реально с использованием SMP-архитектуры удаётся создать эффективно функционирующую вычислительную систему, содержащую не более 32 процессоров.

Отличительной чертой системы с массовым параллелизмом является физическое разделение памяти между отдельными одинаковыми параллельно работающими вычислительными узлами. Доступ к памяти вычислительного узла имеет только процессор, принадлежащий этому же узлу, поэтому обмен данными между модулями обеспечивается организацией специальных коммуникационных каналов и реализацией механизма передачи сообщений. Достоинством MPP-архитектуры является высокая степень масштабируемости, позволяющая создать вычислительные системы, содержащие до нескольких тысяч процессоров. Недостаток систем с массовым параллелизмом связан со значительно меньшей (чем у SMP-систем) скоростью обмена данными между вычислительными узлами; для увеличения производительности MPP-систем требуется минимизировать объём передаваемых между узлами данных, что, требует специальной техники программирования.

MPP- и SMP-архитектуры в «чистом» виде в настоящее время практически не используются, однако эти архитектуры были взяты за основу при создании моделирующих комплексов реального времени RTDS (канадской компании RTDS Technologies [3]) и eMEGAsim (также канадского разработчика OPAL-RT Technologies [4]) соответственно.

Большее распространение при реализации параллельных вычислений получили комбинированные архитектуры. Одно из наиболее известных решений – архитектура неоднородного доступа к памяти NUMA (Non-Uniform Memory Architecture) и её разновидности [5]. Оперативная память в вычислительной системе, построенной в соответствии с архитектурой NUMA, как и в MPP-системе, физически разделена между однородными вычислительными узлами, однако логически организована общей для всех вычислительных узлов. Процессоры, входящие в состав одного вычислительного узла, имеют аппаратный доступ не только к памяти «своего» узла (как в SMP-системе), но и – более медленный (отсюда термин «неоднородный доступ» в названии архитектуры) – к памяти, размещённой во всех остальных вычислительных узлах (рис. 2). Разновидность этой технологии – NUMAflex, особенность которой заключается в отказе от использования больших многопроцессорных плат и переходе к модульным наборным и потому легко адаптируемым под запросы пользователя решениям – применена в вычислительных серверах SGI UV, используемых в одной из конфигураций моделирующего комплекса реального времени HYPERSIM компании OPAL-RT.

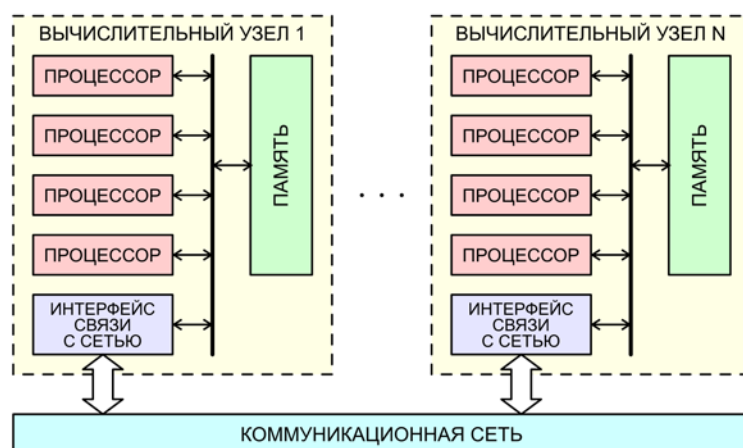


Рис. 2

Необходимость взаимодействия с физическими образцами устройств контроля, защиты и управления обусловила появление требований высокой детализации представления расчетной модели, адекватного отражения электромагнитных переходных процессов.

Стандартом «де-факто» при осуществлении моделирования электромагнитных переходных процессов в больших электроэнергетических системах (в том числе в режиме реального времени) стали ЕМТР-алгоритмы (ElectroMagnetic Transients Program), основанные на работах профессора Г. Доммеля (Herman W. Dommel) [6]. В соответствии с реализованным в этих алгоритмах подходом исходные дифференциальные уравнения преобразуются и решаются в форме разностных.

Решение разностных уравнений статических элементов основано на применении модели электрической сети в форме системы уравнений узловых напряжений:

$$[G(\Delta t)] \cdot [u(t)] = [i(t) - i(t-1)], \quad (1)$$

где $[G(\Delta t)]$ – матрица узловых проводимостей; $[u(t)]$ – вектор напряжений в узлах электрической сети в момент времени t ; $i(t)$ – вектор токов источников тока в момент времени t ; $i(t-1)$ – вектор токов источников тока в момент времени $(t-1)$.

При формировании системы уравнений (1) переход от исходных дифференциальных уравнений, описывающих статические элементы электрической сети, к разностным уравнениям осуществляется с использованием метода трапеций. Индуктивные и емкостные элементы при этом замещаются включенными параллельно постоянными сопротивлениями, учитывающимися в матрице активных проводимостей $[G(\Delta t)]$, и источниками тока [6]. Значения тока источников рассчитываются на каждом шаге и учитываются при формировании векторов $i(t)$, $i(t-1)$. Матрица узловых проводимостей в уравнении (1) является функцией шага интегрирования Δt . В связи с этим шаг интегрирования в программах, основанных на ЕМТР-алгоритмах, принимается постоянным.

Величина шага в общем случае определяется требуемой для решения конкретной задачи степенью детализации переходных процессов (рис. 3). Моделирование переходных процессов при коротких замыканиях, качаниях и асинхронных режимах с целью испытаний устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики, как правило, осуществляется с шагом 20-80 мкс. Исследование устройств FACTS, тестирование их систем управления требует существенно меньшего шага (сотни наносекунд – единицы микросекунд) и предъявляет повышенные требования к вычислительной мощности средства моделирования. При тестировании глобальных систем мониторинга, защиты и управления (WAMPAC), моделировании больших энергосистем, т.е. в ситуациях, в которых не требуется воспроизведение быстрых переходных процессов, целесообразно использование специального математического аппарата, ориентированного на исследования электромеханических

переходных процессов; при этом шаг моделирования может быть достаточно большим (от 0,1 мс). Кроме того, использование моделирующих комплексов для целей управления энергосистемой может требовать выполнения расчётов не в режиме реального времени, а с опережением.

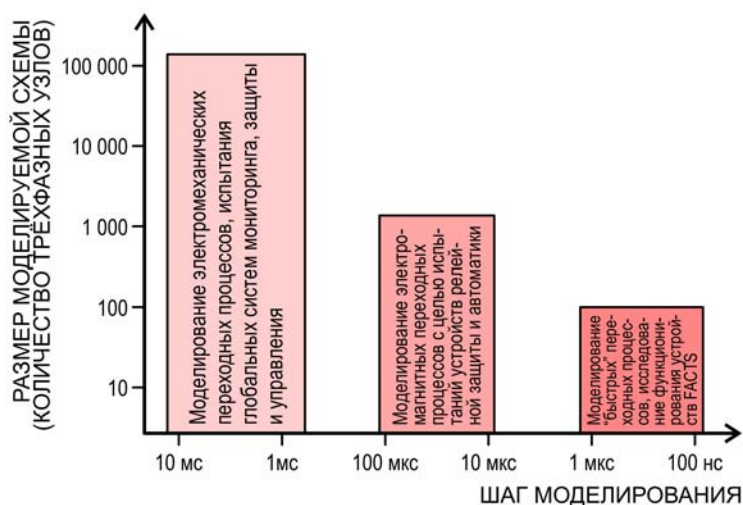


Рис. 3

Различия в требуемых величинах шага моделирования нашли отражение и в аппаратной организации моделирующих комплексов. Так, в решении компании RTDS Technologies вычислительные платы, участвующие в моделировании работы быстрых устройств силовой электроники, связываются друг с другом напрямую высокоскоростными каналами связи. Компания OPAL-RT предлагает «выносить» решение уравнений, описывающих отдельные объекты моделирования, на программируемые логические матрицы (FPGA – field-programmable gate array), обладающие за счёт узкой специализации (переконфигурируются под решение каждой конкретной задачи заново) высокой вычислительной производительностью.

2.3 Опыт использования инструментов моделирования в режиме реального времени для детальных испытаний устройств релейной защиты

Задачи экспериментальной проверки физических образцов устройств релейной защиты и автоматики могут наиболее эффективно решаться с использованием современных программно-аппаратных средств моделирования в режиме реального времени, позволяющих оперативно создавать виртуальную модель энергосистемы под конкретную задачу, выполнять моделирование сложных схемно-режимных ситуаций и анализировать поведение испытуемых устройств.

Так, например, с целью осуществления испытаний, выявления возможности совместного использования дифференциально-фазных защит различных производителей, в Центре моделирования ОАО «ВНИИР» разработана цифровая динамическая модель фрагмента электрической сети 220 кВ, обеспечено её взаимодействие с физическими устройствами РЗА.

Модель позволяет исследовать функционирование испытуемых устройств защиты в следующих схемно-режимных ситуациях:

- одно-, двух-, трехфазные короткие замыкания с различной величиной апериодической составляющей в токе короткого замыкания;
- короткие замыкания, приводящие к насыщению трансформаторов тока;
- короткие замыкания с разновременностью замыкания поврежденных фаз;
- каскадные отключения коротких замыканий на параллельной линии, приводящие к реверсу потока мощности защищаемой линии;
- асинхронные режимы с различной частотой скольжения.

Графический интерфейс модели (рис. 4) позволяет оперативно изменять режимы её работы, задавать характеристики возмущений, регистрировать параметры моделируемых режимов с использованием виртуальных средств отображения и сохранения информации. На этой же иллюстрации (см. рис. 4) в качестве примера приведен график переходного процесса при трёхфазном коротком замыкании с разновременностью замыкания повреждённых фаз.

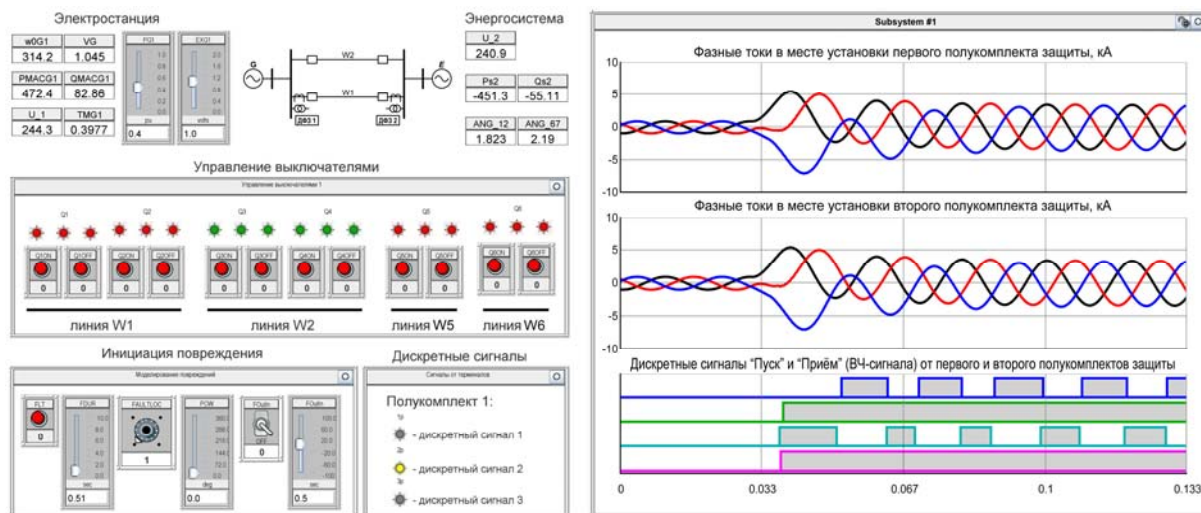


Рис. 4

Ключевые особенности испытаний с использованием разработанной цифровой динамической модели:

- гибкое и быстрое изменение параметров модели;
- оперативное моделирование значительного количества режимов;
- повторяемость условий для создания режимов.

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Технологии цифрового моделирования на современном этапе их развития позволяют осуществлять моделирование электроэнергетических систем в режиме реального времени с необходимой степенью детализации. Применение этих технологий открывает широкие возможности для тестирования устройств РЗА, совершенствования и разработки новых алгоритмов их действия, решения комплексных задач развития энергетики.

2) К настоящему времени прослеживаются следующие тенденции развития средств моделирования в режиме реального времени:

- повышение вычислительной мощности процессоров, совершенствование технологий и скорости обмена данными, улучшение условий и возможностей для наращивания систем моделирования;
- появление новых задач, для решения которых становится целесообразным применение моделирующих комплексов реального времени, вызывает необходимость расширения алгоритмической базы цифрового моделирования. В частности, приобретает актуальность задача реализации в моделирующих системах реального времени «комбинированных» методов расчета EMT/Phasor, позволяющих выполнять единовременное моделирование процессов в различных фрагментах энергосистемы с использованием разных алгоритмов. Так, представляется весьма важной возможность моделирования процессов в интересующем фрагменте энергосистемы с высокой степенью детализации (динамическая модель) при одновременном моделировании для остальной части энергосистемы только электромеханических переходных процессов (квазидинамическая модель). Это позволит избежать необходимости специального

предварительного эквивалентирования модели энергосистемы, а также создавать и оперативно использовать «виртуальные» модели больших энергосистем для целей детальных исследований отдельных её фрагментов с «подключением» к ним реальных физических устройств;

- разработка новых и совершенствование существующих моделей элементов электроэнергетических систем;
- использование «открытых» аппаратных решений, позволяющее ускорить процесс внедрения в инструментарий цифрового моделирования современных технологий взаимодействия средств релейной защиты, систем автоматизации, что будет способствовать большей степени интеграции виртуальных моделей энергосистем с физическим оборудованием.

3) Изучение текущего состояния и перспектив развития инструментов цифрового моделирования позволяет сформулировать следующие требования к моделирующим комплексам реального времени, выполнение которых целесообразно и достижимо на современном этапе развития аппаратных и алгоритмических средств:

- масштабируемость (расширяемость) аппаратной части комплекса, позволяющая обеспечить моделирование сложных схем (схем, содержащих более 1000 однофазных узлов – с шагом моделирования 25-100 мкс);
- корректное моделирование процессов в электроэнергетической системе (получение точного и устойчивого решения) в широком частотном диапазоне (от 0 Гц до 10 МГц ориентировочно);
- наличие широкого набора стандартных верифицированных моделей, а также моделей новых элементов энергосистемы, возобновляемых источников энергии, накопителей электрической энергии, устройств FACTS;
- поддержка в максимальном объеме цифровых протоколов связи с внешними устройствами;
- максимальные удобство и гибкость интерфейса.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: Учеб. для электроэнергет. спец. вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.
- [2] Богданов А.В., Корхов В.В., Мареев В.В., Станкова Е.Н. Архитектуры и топологии многопроцессорных вычислительных систем. – М.: Интернет-университет информационных технологий – ИНТУИТ.ру, 2004 г. – 176 с.
- [3] Real Time Digital Simulation for the Power Industry [Цифровое моделирование в режиме реального времени для энергетики; материалы фирмы-производителя программно-аппаратного комплекса RTDS] // RTDS Technologies Inc., Winnipeg, Manitoba Canada, 2009.
- [4] ePOWERgrid Product Family Overview [Обзор семейства продуктов ePOWERgrid; материалы компании OPAL-RT Technologies; электронный ресурс] // <http://www.opal-rt.com/epowergrid-product-family-overview/>.
- [5] 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.
- [6] 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.