



Моделирование режимов электроэнергетических систем в задачах релейной защиты и автоматики

Г.С. НУДЕЛЬМАН, О.А. ОНИСОВА, А.А. НАВОЛОЧНЫЙ
ОАО «ВНИИР»
Россия
onisova@vniir.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Релейная защита и автоматика, моделирование режимов, модели электроэнергетических систем.

1 ВВЕДЕНИЕ

Развитие электроэнергетических систем: усложнение их конфигурации, появление новых типов элементов, ужесточение требований к качеству и надёжности электроснабжения оказывает существенное влияние на функциональные свойства системы релейной защиты и автоматики (РЗА) объектов электроэнергетики. Современные микропроцессорные средства РЗА представляют собой сложные и в определённой степени интеллектуальные устройства, технические возможности которых потенциально позволяют реализовать самые совершенные алгоритмы защиты и автоматики.

Перспективные инновации в электроэнергетике (наиболее яркий пример – концепция «умных» электроэнергетических систем – SmartGrid) и дальнейшее усложнение программно-технических средств РЗА приводят к необходимости поиска нового подхода к решению задач релейной защиты. Такой подход должен обеспечить необходимый уровень функциональности системы РЗА и реализовать максимум потенциальных возможностей микропроцессорной элементной базы.

2 ЗАДАЧИ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Традиционно к задачам РЗА относят: выбор состава функций защиты и автоматики, а также устанавливаемого оборудования РЗА; конфигурирование и выбор параметров срабатывания устройств РЗА; проверку эффективности системы РЗА. В последнее время этот перечень дополнен актуальными задачами синтеза новых алгоритмов и разработки методик выбора параметров срабатывания микропроцессорных средств РЗА.

Для решения указанных задач релейной защиты целесообразно применение современных методов цифрового моделирования электроэнергетических систем. Реализованные на базе программных комплексов, такие методы позволяют не только получить информацию о параметрах возможных электрических режимов (установившихся, режимов повреждений и переходных процессов), но и проверить эффективность реализованных или разрабатываемых алгоритмов действия устройств и систем РЗА.

При осуществлении моделирования необходимо учитывать не только установившиеся режимы (нормальные и послеаварийные) объекта защиты и энергосистемы в целом; важно принимать во внимание также и совокупность электромагнитных и электромеханических

переходных процессов [1], длительность протекания которых может составлять от микросекунд до нескольких секунд (рис. 1).

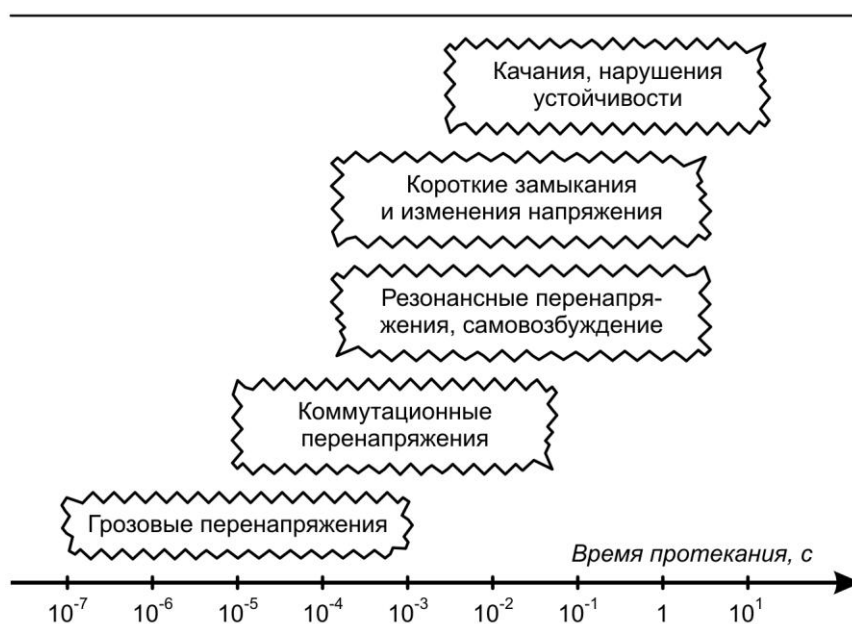


Рис. 1: Переходные процессы, учитываемые при решении задач РЗА

На основе формализации и обобщения известных методов моделирования электроэнергетических систем по критерию применяемого математического аппарата можно ввести классификацию моделей электроэнергетических систем, используемых при решении задач релейной защиты (рис. 2).

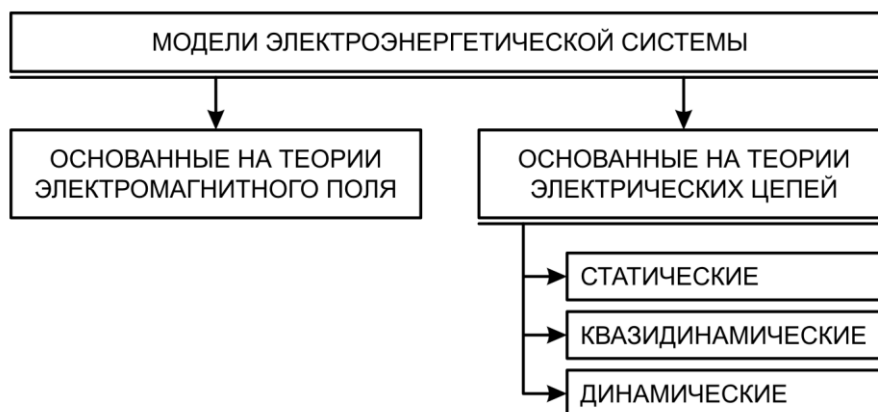


Рис. 2: Классификация моделей электроэнергетических систем

Исторически сформировались два направления моделирования: первое основано на теории поля, второе – на теории электрических цепей.

Наиболее точное описание процессов в электроэнергетических системах позволяют получить модели, основанные на применении методов теории электромагнитного поля [2] (так называемые «распределенные» модели). Однако специфика используемого ими математического аппарата, предполагающая описание процессов не только во времени, но и в пространстве, а также решение дифференциальных уравнений в частных производных (уравнений Максвелла), ограничивает область применения таких моделей лишь частными задачами. Так, распределенные модели вполне могут быть использованы для всестороннего испытания защит отдельных элементов электроэнергетических систем, хотя для решения этой задачи и требуются, как правило, значительные вычислительные ресурсы.

Более широкое распространение получили модели, основанные на применении методов теории электрических цепей («сосредоточенные» модели), предполагающие исследование процессов только во временной области. Вследствие относительной простоты их математического описания, сосредоточенные модели могут применяться для решения широкого круга практических задач и именно эти модели реализованы в подавляющем большинстве специализированных средств цифрового моделирования процессов в электроэнергетических системах.

В общем случае электроэнергетическая система описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений. Жесткость системы, связанная с разномасштабностью описываемых ею процессов – электромагнитных и электромеханических, а также ее высокая размерность обуславливают трудности вычислительного характера (сложность получения устойчивого и точного численного решения). По этой причине при разработке алгоритмов моделирования предпринимаются попытки упрощения исходного описания электроэнергетической системы в соответствии с характером решаемой задачи. Такой подход позволяет выделить следующие виды моделей электроэнергетических систем:

- статические;
- квазидинамические;
- динамические.

Статические модели

Описание статических моделей выполняется в предположении, что электроэнергетическая система функционирует в условиях только установившегося процесса. Статические модели описываются системой в общем случае нелинейных алгебраических уравнений. Для решения таких систем уравнений применяются итерационные методы: простой итерации, Зейделя, Ньютона и т.д. Преимущественное распространение среди них получили метод Ньютона (Ньютона-Рафсона) и его модификации (рис. 3, а), основными достоинствами которых являются быстрота сходимости итерационного процесса, практически не зависящая от размеров расчетной схемы, а также возможность достичь максимальной точности решения.

Нелинейность уравнений, описывающих статическую модель, связана с характеристиками генераторов и нагрузок электрической сети, которые зависят от получаемых в результате расчёта значений напряжения в узлах их подключения. Нелинейный характер параметров сетевых элементов в описании таких моделей, как правило, не учитывается. Это позволяет для расчетов, в которых модели генераторов и нагрузок представлены комбинацией линейных пассивных элементов и постоянных источников тока или э.д.с., использовать топологические методы расчета линейных электрических цепей (наибольшее распространение среди которых получил метод узловых напряжений) и связанный с ними математический аппарат линейной алгебры. Именно таким способом выполняются, к примеру, расчеты токов короткого замыкания.

Ещё одно упрощение, принимаемое обычно при формировании статических моделей, заключается в допущении о симметрии фаз сети. Это упрощение позволяет отказаться от трёхфазного представления моделей и связанной с этим необходимости учёта взаимного влияния цепей фаз. Расчёты основываются на более простой однофазной эквивалентной модели. Несимметричные режимы, такие как обрывы фаз, одно- и двухфазные короткие замыкания, рассчитываются с использованием метода симметричных составляющих.

Квазидинамические модели

При описании квазидинамических моделей во внимание принимаются только определённые виды переходных процессов, характеризующиеся достаточно узким диапазоном описываемых этих процессов постоянных времени. Например, при исследовании электромеханических переходных процессов пренебрегают постоянными времени, соответствующими электромагнитным переходным процессам. Это позволяет выполнять описание всех статических элементов электрической сети (линий электропередач, трансформаторов, статорных цепей вращающихся машин и т.д.) не дифференциальными, а алгебраическими уравнениями (рис. 3, б). Матричное уравнение, описывающее процессы в электрической сети, в этом случае имеет вид:

$$[I] = [Y] \cdot [U],$$

где $[I]$ – вектор, задающих токов узлов; $[Y]$ – матрица узловых проводимостей; $[U]$ – вектор, напряжений в узлах электрической сети.

Для численного решения дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы в роторных цепях электрических машин, могут использоваться методы Эйлера, трапеций, Рунге-Кутты. Шаг решения составляет порядка 10 мс.

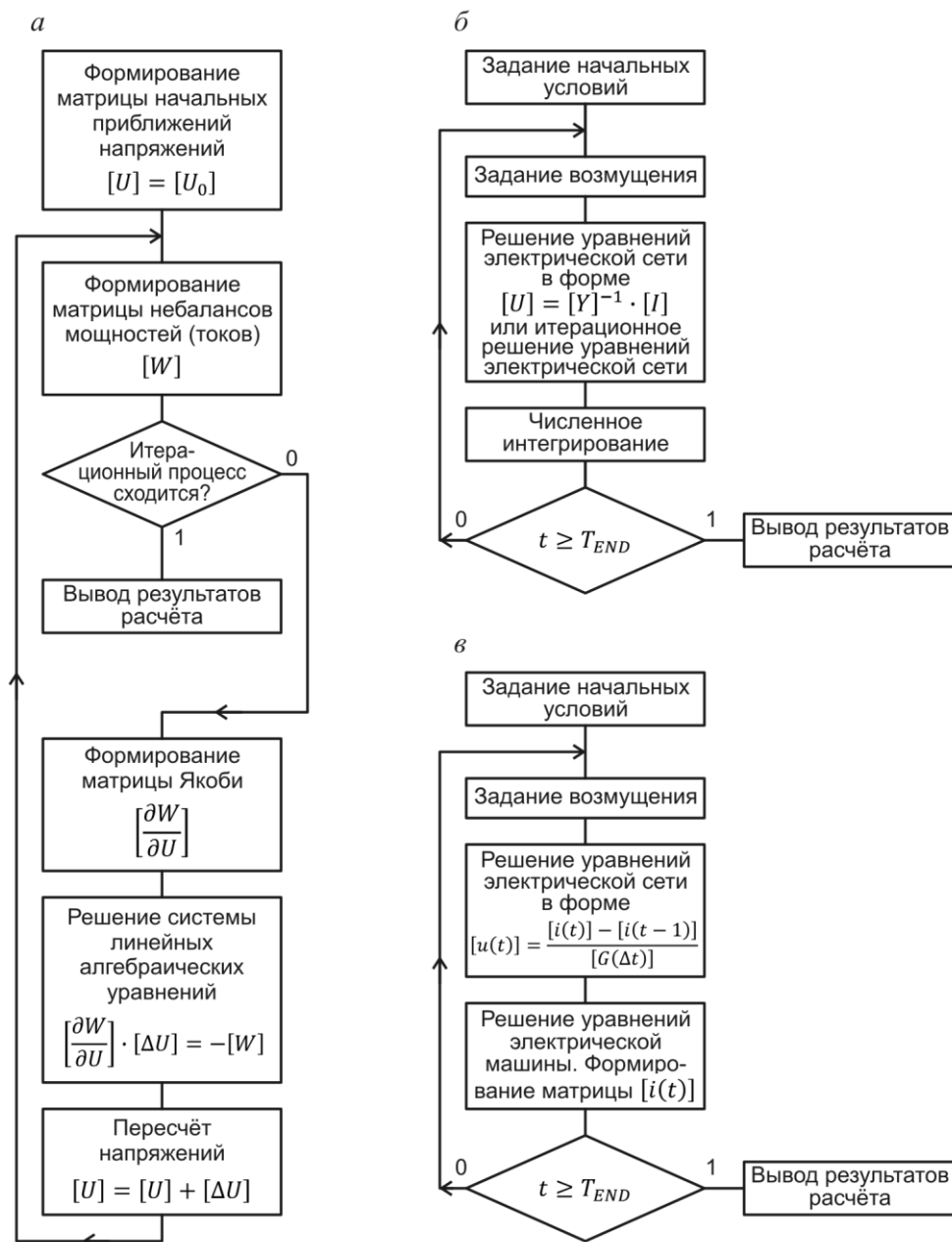


Рис. 3: Укрупнённые алгоритмы цифрового моделирования электроэнергетических систем:
а – метод Ньютона-Рафсона (статическая модель); б – квазидинамическое моделирование;
в – динамическое моделирование.

Алгоритм моделирования электроэнергетических систем с использованием квазидинамической модели состоит из нескольких вложенных друг в друга циклических процессов. Во внешнем цикле выполняется пошаговое численное интегрирование. Если необходимо учитывать нелинейность свойств статических элементов электрической сети, то на каждом шаге численного интегрирования выполняется промежуточный итерационный цикл решения системы нелинейных алгебраических уравнений. Во внутреннем цикле выполняется решение системы линейных алгебраических уравнений.

Как правило, квазидинамическая модель основывается также на однофазной эквивалентной схеме замещения; несимметричные режимы моделируются с использованием схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Динамические модели

При создании динамических моделей используется исходное описание электроэнергетической системы во временной области. Теоретически это позволяет исследовать весь спектр процессов – от быстрых переходных до установившихся. В действительности, вследствие сложности математической формулировки задачи диапазон процессов, адекватно описываемых динамической моделью, ограничен. Тем не менее, упоминаемые выше статическая и квазидинамическая модели фактически представляют собой частные случаи динамической.

Для решения уравнений, описывающих динамическую модель, либо могут быть использованы методы численного интегрирования, либо исходные дифференциальные уравнения должны быть представлены и решены в форме разностных.

В первом случае обычно применяются неявные методы интегрирования с переменным шагом решения (Эйлера, Рунге-Кутты и другие). Однако эти методы, гибкие при исследовании небольших фрагментов электроэнергетических систем или их отдельных элементов, неприменимы к описанию крупных электроэнергетических систем.

Вторая группа методов реализована в составе ЕМТР (ElectroMagnetic Transients Program) алгоритмов (рис. 3, в), широко используемых для исследования электромагнитных переходных процессов в крупных электроэнергетических системах [3]. Переход от дифференциальных уравнений, описывающих статические элементы электрической сети с сосредоточенными параметрами, к разностным уравнениям осуществляется с использованием метода трапеций. При этом индуктивные и емкостные элементы могут быть представлены включенными параллельно постоянным сопротивлением и источником тока (рис. 4, а, рис. 4, б). Значение тока источника рассчитывается на каждом шаге интегрирования. Описание резистивных элементов остается неизменным (рис. 4, в).

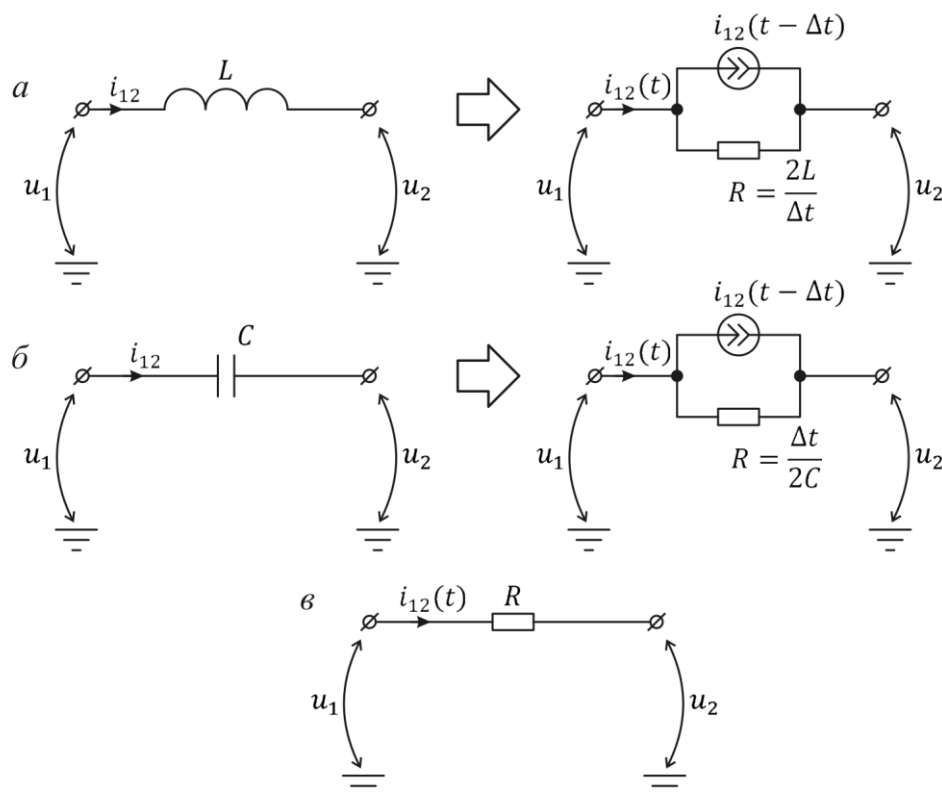


Рис. 4: Схемы замещения простых пассивных элементов

Решение уравнений статических элементов основано на применении модели электрической сети в форме системы уравнений узловых напряжений. Так, токи ветвей простейшей электрической цепи (рис. 5) с использованием приведенных схем замещения пассивных элементов могут быть вычислены следующим образом:

$$\begin{aligned} i_{12}(t) &= \frac{u_1(t) - u_2(t)}{R}; \\ i_{13}(t) &= \frac{\Delta t}{2L} (u_1(t) - u_3(t)) + i_{13}(t - \Delta t); \\ i_{14}(t) &= \frac{2C}{\Delta t} (u_1(t) - u_4(t)) + i_{14}(t - \Delta t). \end{aligned} \quad (1)$$

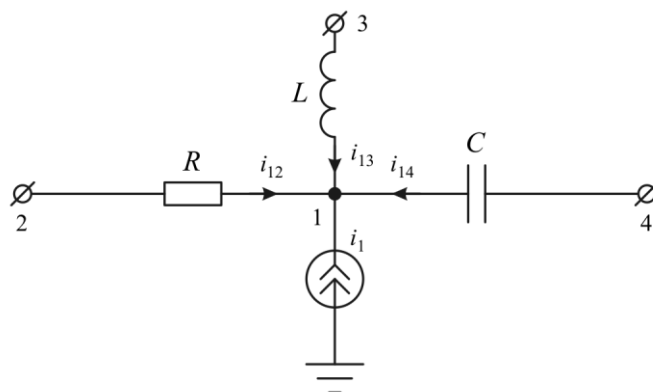


Рис. 5: Простейшая электрическая цепь

Используя первый закон Кирхгофа и выражения (1) для электрической цепи, представленной на рис. 5, можно записать:

$$\left(\frac{1}{R} + \frac{\Delta t}{2L} + \frac{2C}{\Delta t} \right) u_1(t) - \frac{1}{R} u_2(t) - \frac{\Delta t}{2L} u_3(t) - \frac{2C}{\Delta t} u_4(t) = i_1(t) - i_{13}(t - \Delta t) + i_{13}(t - \Delta t).$$

Таким образом, система уравнений, описывающая статические элементы электрической сети, может быть представлена матричным уравнением:

$$[G(\Delta t)] \cdot [u(t)] = [i(t) - i(t-1)], \quad (2)$$

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 $(t-1)$.

Матрица узловых проводимостей в уравнении (2) является функцией шага интегрирования Δt . В связи с этим шаг интегрирования в программах, основанных на ЕМТР-алгоритмах, принимается постоянным. Величина шага в исследованиях электромагнитных переходных процессов составляет порядка 10-50 мкс.

ЕМТР-алгоритмы предусматривают возможность моделирования элементов с распределенными параметрами. Решение уравнений длинной линии электропередачи во временной области, применяемое в ЕМТР-алгоритмах, основано на использовании метода Бержерона [3]. При этом схема замещения линии электропередачи фактически представлена двумя электрическими цепями, не связанными друг с другом непосредственно (рис. 6).

Наличие в исследуемой электроэнергетической системе электрических машин потребует дополнения исходной системы уравнений уравнениями механического движения роторов электрических машин. На рис. 7 приведен пример модели электроэнергетической системы, включающий модель электрической машины с возбудителем, турбиной, системами возбуждения и регулирования скорости.

На современном этапе развития техники средств моделирования появляются новые технические решения, позволяющие осуществлять моделирование в режиме реального

времени. Одно из таких решений – программно-аппаратный комплекс RTDS (Real-Time Digital Simulator – цифровая моделирующая система реального времени) канадской фирмы RTDS Technologies Inc. Применяемый в системе метод цифрового моделирования основан на высокоэффективных ЕМТР-алгоритмах. Комплекс позволяет задействовать в процессе исследования не только «виртуальные» элементы, но и реальные физические устройства (например, средства релейной защиты и противоаварийной автоматики). Реакция этих устройств также может быть учтена в работе моделируемой системы. Непосредственно в процессе моделирования в модели исследуемой энергосистемы допустимо выполнение переключений, изменение режимов работы оборудования, ручное регулирование [4]. Благодаря этим особенностям становится возможным осуществлять всесторонние испытания устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики в условиях, максимально электрически близких к тем, которые имеют место в реальных энергосистемах.

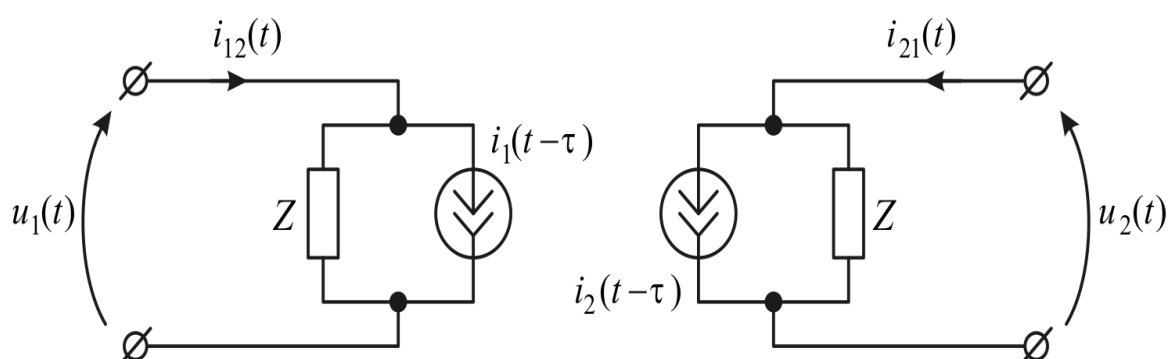


Рис. 6: Схема замещения длинной линии электропередач

Область применения, традиционно отводимая описанным выше моделям электроэнергетических систем в решении задач РЗА, отражена в табл. 1. Развитие средств вычислительной техники и, как следствие, всё большая доступность средств моделирования расширяют сферу применения динамических моделей, которые начинают активнее применяться при проверке эффективности системы РЗА, оценке действия защит в условиях переходных процессов. Динамические модели реального времени начинают находить применение на этапах аттестации средств РЗА, а также для уточнения методик выбора параметров срабатывания.

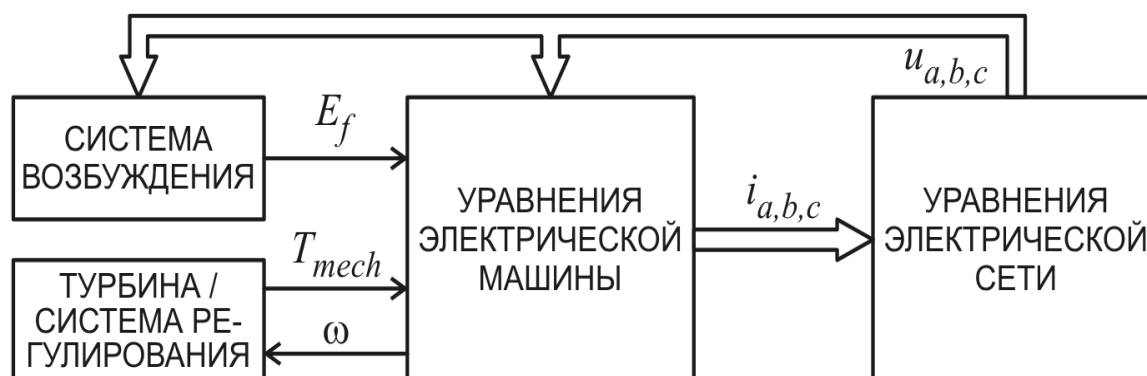


Рис. 7: Модель энергосистемы, содержащей электрическую машину

Задачи РЗА	Модели электроэнергетических систем	Область применения
Выбор состава функций защиты и автоматики Выбор устанавливаемого оборудования РЗА	Статическая Квазидинамическая	Расчет установившихся режимов. Расчет токов короткого замыкания Исследования электромеханических переходных процессов
Конфигурирование и выбор параметров срабатывания устройств РЗА		
Проверка эффективности системы РЗА		Расчет токов короткого замыкания Исследование электромеханических переходных процессов
Синтез новых алгоритмов и разработка методик выбора параметров срабатывания микропроцессорных средств РЗА	Квазидинамическая Динамическая	Исследование электромеханических и электромагнитных переходных процессов

Табл. 1: Область применения моделей энергосистем при решении задач РЗА

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На современном этапе развития электроэнергетических систем всё большая роль в решении задач релейной защиты отводится методам моделирования. На стадии расчета релейной защиты выполняются исследования установившихся режимов и режимов повреждений с использованием статической модели энергосистемы. Для выбора состава и настройки параметров устройств РЗА выполняются расчеты электромеханических переходных процессов на базе квазидинамической модели. На стадии проверки эффективности действия системы РЗА традиционно применяются те же статические и квазидинамические модели энергосистем. И только задачи синтеза новых алгоритмов РЗА, разработки методик расчета параметров срабатывания требуют выполнения более детальных исследований переходных процессов с использованием динамической модели.

В связи с появлением новых задач релейной защиты и совершенствованием средств вычислительной техники целесообразно расширить область применения универсальных динамических моделей. Использование таких моделей позволит уточнять параметры срабатывания устройств РЗА, оценивать действие системы РЗА в условиях переходных процессов, детально исследовать возможности новых алгоритмов РЗА. Динамические модели реального времени, реализованные на базе программно-аппаратных комплексов, дадут возможность проводить полный цикл проверки физических образцов устройств РЗА, получать первичный опыт их эксплуатации в условиях максимально приближенных к тем, которые имеют место в реальных энергосистемах.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Веников, В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: Учеб. для электроэнергет. спец. вузов / В.А. Веников. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.
- [2] Афанасьев А.А., Ефимов В.В. Математическая модель индукторного электрогенератора с комбинированным возбуждением // Электричество. – 2009. – № 7. – С. 28-32.
- [3] 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.
- [4] Real Time Digital Simulation for the Power Industry // RTDS Technologies Inc., Winnipeg, Manitoba Canada, 2009.