

АДАПТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕЦИЗИОННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Рогкустов С. В., Куповых В. С., Кулинич Д. В.

Научный руководитель — профессор Бронов С. А.

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Моделирование электромеханических систем (ЭМС) широко используется при их проектировании. ЭМС обычно разделяют на общепромышленные и прецизионные. Общепромышленные ЭМС предназначены для создания усилия и к ним предъявляются обычно не очень жёсткие требования по точности. Прецизионные ЭМС, напротив, должны обеспечивать высокую точность при сравнительно небольших усилиях и являются, как правило, сравнительно маломощными. Модели прецизионных и общепромышленных ЭМС содержат модели одних и тех же отдельных элементов — двигателей, источников электропитания, датчиков, регуляторов, механической нагрузки. И принципы получения этих моделей в целом одни и те же. Но степень детализации этих моделей часто оказывается различной. Это связано с различными требованиями к погрешностям моделирования, обусловленными заданной погрешностью ЭМС. Например, обычная математическая модель асинхронного двигателя при общепринятых в теории электрических машин допущениях о симметрии, косинусоидальном распределении индукции и т. п. обеспечивает погрешность 5...10% воспроизведения угла поворота ротора (т. е. единицы градусов), что более чем достаточно для общепромышленных ЭМС. Но в прецизионных ЭМС погрешность по углу может составлять единицы угловых минут, поэтому погрешность моделирования в единицы градусов оказывается абсолютно неприемлемой. Для повышения точности воспроизведения процессов необходимы более детализированные модели, например, учитывающие несимметрию обмоток двигателя, конечное время переключения транзисторных ключей инвертора, токи через обратные диоды, упругость вала механической передачи и т. д. Теоретически такие модели должны давать достаточную точность, но при этом существенно усложняется сам процесс моделирования.

Как правило, моделирование представляет собой численное решение системы алгебро-дифференциальных уравнений, включая элементы логического выбора. Возможно, на каждом шаге численного интегрирования придётся осуществлять численное решение алгебраических уравнений, матричные преобразования, интерполяцию и т. п. ресурсоёмкие операции. Это приводит, прежде всего, к увеличению времени счёта. Если моделируется разомкнутая ЭМС, то увеличение времени счёта может оказаться сравнительно терпимым, но в замкнутых ЭМС время счёта увеличивается в сотни и тысячи раз. В некоторых случаях модель оказывается настолько жёсткой (особенно, если приходится учитывать отдельные короткие импульсы управления), что становится практически неработоспособной.

В научно-учебной лаборатории систем автоматизированного проектирования Института космических и информационных технологий Сибирского федерального университета разрабатывается концепция адаптивной системы моделирования, предусматривающая подбор в процессе счёта моделей элементов и расчётных методов. Объектом моделирования выбрана прецизионная электромеханическая система, например, для систем поворота антенн космических аппаратов.

Суть работы адаптивной системы моделирования заключается в следующем. Модель электромеханической системы создаётся как объединение моделей отдельных модулей — двигателя, источника питания, механической нагрузки, датчиков, регуляторов.

Предполагается, что такая ЭМС является замкнутой. Модель каждого элемента может быть представлена с различной степенью детализации, т. е. при различных упрощающих допущениях. Таким образом, для каждого элемента имеет набор моделей. В зависимости от принятых допущений, эти модели могут быть в виде дифференциальных уравнений, алгебраических уравнений, формул, алгоритмов выбора, табличных данных. Соответственно этому, при расчётах для этих моделей необходимо использовать различные методы: численного интегрирования (например, методы Рунге-Кутты и т. п.), алгебраические численные методы (например, метод Ньютона-Рафсона и т. п.), численные методы оптимизации (линейное, нелинейное, динамическое программирование), методы интерполяции (сплайновой и т. п.).

В процессе моделирования на различных его этапах выбираются различные конкретные варианты моделей (рисунок 1) и соответствующие им методы.

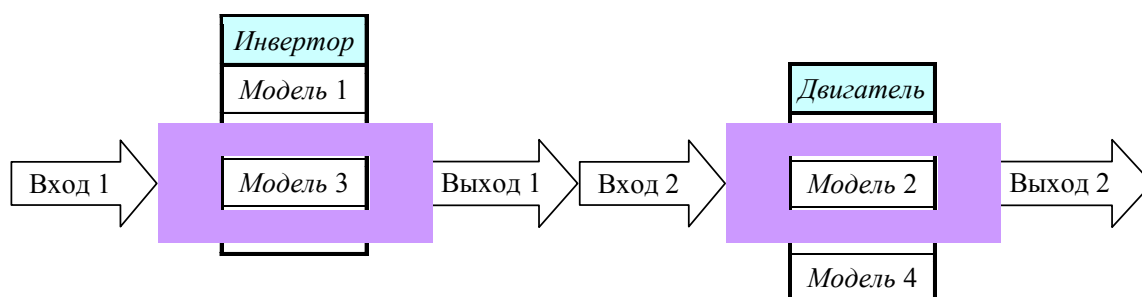


Рис. 1. Принцип адаптивного выбора моделей

Процесс моделирования может протекать следующим образом.

Пусть ЭМС содержит два элемента – *Инвертор* и многофазный *Двигатель* переменного тока; для каждого из них разработано по 4 модели различной степени детализации.

Для *Инвертора* существуют модели следующих типов:

- 1) источник идеального многофазного синусоидального напряжения;
- 2) источник напряжения с широтно-импульсной модуляцией по синусоидальному закону;
- 3) то же, что пункт 2, но с учётом реального алгоритма работы диодно-транзисторных ключей (их частичной управляемости) при равенстве нулю внутреннего сопротивления транзисторов и диодов, их мгновенном переключении;
- 4) то же, что и пункт 3, но с учётом реальных ВАХ диодов и транзисторов, конечного времени их переключения.

Для *Двигателя* существуют модели следующих типов:

- 1) система алгебраических уравнений для расчёта установившегося режима в предположении геометрической и электрической симметрии, косинусоидального распределения индукции;
- 2) система дифференциальных уравнений для расчёта переходного процесса в предположении геометрической и электрической симметрии, косинусоидального распределения индукции в единой системе координат обмоток для приведённой к двухфазной системе модели;
- 3) то же, что и по пункту 2, но для реального числа фаз;
- 4) то же, что и по пункту 3, но с учётом геометрической и электрической несимметрии.

На разных этапах моделирования могут оказаться востребованы различные модели *Инвертора* и *Двигателя* в различных сочетаниях — в зависимости от цели исследования, характера протекающих в данный момент процессов, допустимой погрешности

расчётов и желаемого времени счёта. Например, в случае исследования тока в обмотках в установившемся режиме работы используется модель 1 *Инвертора* и модель 1 *Двигателя*. При исследовании характера изменения скорости ротора при включении ЭМС, используются наиболее простые модели всех блоков с минимумом дифференциальных уравнений: модель 1 *Инвертора* и модель 2 *Двигателя*. На конечном этапе отработки перемещения могут быть использованы более точные модели 3 *Инвертора* и 4 *Двигателя*. Если целью является исследование токов в транзисторах и диодах коммутатора, то необходимы модель 4 *Инвертора* и модель 3 *Двигателя*. Если исследуется равномерность вращения ротора, то потребуются самые точные модели 4 *Инвертора* и 4 *Двигателя*. Возможны и другие сочетания моделей.

При этом можно заметить, что некоторые модели могут сочетаться с другими произвольным образом, а некоторые — только с определёнными моделями других элементов. Например, все модели *Инвертора* могут сочетаться с моделью 4 или 5 *Двигателя* (с реальным числом фаз). Но если используется модель 2 *Двигателя* (приведённая к двухфазной модели), то может использоваться только модель 1 *Инвертора*.

Таким образом, в данном процессе заложены возможности автоматизации выбора нужной модели с учётом поставленных задач и их сочетаемости. Очевидно, что эти коммутационные свойства моделей должны быть заданы заранее определённым образом, чтобы система моделирования могла их понимать и использовать в процессе выбора оптимального сочетания типов моделей.

Каждая модель ЭМС предполагает также использование определённого метода расчёта. В частности, сочетания моделей 1 *Инвертора* и 1 *Двигателя* приводит к появлению только алгебраических уравнений, т. е. к необходимости производить расчёты алгебраическими методами (аналитическими или численными). Если появляется хотя бы одно дифференциальное уравнение, то необходимы численные методы. Их существует много — в некоторых случаях необходимы точные методы (например, Рунге-Кутты), иногда достаточно менее точных, но быстрых (например, Эйлера).

Анализ приведённых моделей *Инвертора* и *Двигателя* показывает, что они не исчерпывают всех возможностей детализации.

В частности, может быть модель *Инвертора* с выходным прямоугольным напряжением, с учётом цепей его питания (например, силовых фильтров). ВАХ транзисторов и диодов также могут быть аппроксимированы различным образом: с допущением о постоянстве падения напряжения в открытом состоянии, с допущением о постоянстве активного сопротивления в открытом состоянии, с допущением о нелинейной зависимости сопротивления от протекающего тока, с учётом или без учёта сигналов в цепях управления и т. д.

Так же и *Двигатель* может быть представлен моделями, полученными, например, с учётом зависимости насыщения от магнитных потоков, с учётом реальной формы распределения индукции (например, заданной таблично по результатам экспериментальных исследований) и т. д.

Создание адаптивной системы моделирования предполагает решение ряда задач. В частности, необходимо учитывать возможность превращения одного типа моделей в другие, например, дифференциальных уравнений в алгебраические и наоборот. В этом случае некоторые замкнутые контуры меняют свои расчётные возможности. В частности, если все уравнения модели являются дифференциальными и записаны в нормальной форме Коши, но порядок расчёта их правых частей при численном интегрировании не имеет значения. Для алгебраических уравнений порядок расчёта должен соответствовать последовательности прохождения сигнала. Это чрезвычайно важно, в частности, при наличии контуров обратной связи.

Важным является выбор метода расчётов в конкретных обстоятельствах, для чего все заложенные в систему методы должны быть оценены с точки зрения возможностей их использования:

- 1) функциональность (для чего могут использоваться);
- 2) погрешность и её зависимость от решаемых уравнений;
- 3) время счёта и его зависимость от сложности решаемых уравнений;
- 4) возможность увязки с другими методами, применяемыми одновременно для моделей других элементов;
- 5) увязка с методами, использованными на предыдущем этапе моделирования;
- 6) увязка с методами, которые будут использованы на следующем этапе моделирования.

При создании моделей элементов также приходится решать ряд специфических задач:

- 1) увязка моделей различного уровня детализации по составу внутренних параметров, переменных состояния, входных и выходных величин;
- 2) возможность осуществлять пересчёт параметров, переменных состояния, входных и выходных величин при переходе от одной модели к другой (при этом их число может меняться);
- 3) возможность изменять порядок расположения уравнений в модели в случае необходимости, что бывает связано с изменением моделей других элементов;
- 4) возможность "вложения" в модель нужных методов расчёта, например, методов численного решения алгебраических уравнений, методов интерполяции, оптимизации и т. п.;
- 5) каждая модель должна быть помечена набором функциональных индикаторов для системы моделирования, отражающих характер использованного математического аппарата, возможность использования определённых методов, сочетаемость (и несочетаемость) с другими моделями определённого вида.

Адаптивная система моделирования включает следующие основные блоки:

- 1) блок управления процессом моделирования;
- 2) блок измерения параметров моделирования (времени, текущего состояния процесса, критериев эффективности);
- 3) библиотеку наборов моделей элементов различной степени детализации;
- 4) библиотеку наборов методов различной функциональной направленности;
- 5) блок визуализации результатов моделирования;
- 6) блок супервизорного управления с предоставлением текущей информации и возможностью вмешиваться в процесс моделирования в ручном режиме, в автоматическом режиме или в программном режиме;
- 7) блок унификации (разработки математических моделей с представлением их в некотором унифицированном виде).

Такая система моделирования может быть разработана в виде самостоятельного программного продукта, но более целесообразно использовать возможности некоторых уже существующих программных платформ, например, программы Matlab. В Matlab имеются некоторые структурные составляющие, необходимые в адаптивной системе моделирования, например, имеется прекрасная математическая библиотека методов, достаточно удобная система визуализации результатов, в том числе имеются возможности супервизорного управления. Основой адаптивной системы моделирования может стать Simulink, дополненный собственными программными надстройками, написанными, например, на языке C#.