

## **СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ПЕРЕМЕННЫМИ СТРУКТУРОЙ И ПАРАМЕТРАМИ**

**Куповых В.С., Рубан А.Г., Черешкевич С.В.  
Научный руководитель — профессор Бронов С.А.**

*Сибирский федеральный университет*

Прецизионные электроприводы (ПЭП) являются специфическим объектом моделирования. Характерным для них является наличие элементов различной физической природы (электрической, механической и электромеханической), малая погрешность отдельных элементов (например, датчики углового положения могут иметь разрядность  $2^{15}$ , что соответствует погрешность 0,67 угл. мин.), постоянные времени различных элементов могут существенно различаться (в сотни и тысячи раз), могут присутствовать импульсные элементы с малой длиной импульса, а также элементы с временными задержками. Всё это существенно усложняет моделирование ПЭП, так как существующие методы численного интегрирования в сочетании с моделями элементов обеспечивают погрешность порядка 10...20%, что вполне приемлемо для общей оценки работоспособности ПЭП, но не позволяет исследовать его работу на уровне погрешностей элементов. Можно ввести понятие масштаба моделирования, который характеризует степень детализации процессов в модели и возможность воспроизведения этих их на фоне самых крупных в данном объекте процессов.

Можно выделить следующие типовые режимы работы ПЭП, которые требуют специальных условий моделирования.

Режим пуска (включения). При этом электрические начальные условия, как правило, нулевые. Цель моделирования — определение работоспособности ПЭП или его пусковых характеристик. Требования по точности моделирования невысокие. Изменения всех электрических переменных значительные. Изменения механических переменных может быть как значительным (пуск на заданную скорость), так и незначительным (пуск в режиме стояния).

Режим изменения скорости или угла поворота. При этом электрические начальные условия ненулевые. Механические начальные условия (угол поворота, скорость) могут быть как нулевыми, так и ненулевыми. Цели моделирования могут быть различными: исследование изменений токов в обмотках двигателя; исследование отклонений угла поворота или скорости, исследование отдельных сигналов в соответствующих элементах системы управления и др. В этом случае возможны как невысокие, так и высокие требования к воспроизведению деталей процессов, т. е. требуется различный масштаб моделирования.

Режим работы установившийся. При этом целью исследований могут быть: повторяющиеся процессы в инверторе (переключения транзисторов и соответствующие сигналы в системе управления), активные потери мощности, форма токов в обмотках, колебания скорости, момента, угла поворота (при удержании двигателя в заданном положении). Очевидно, что в некоторых случаях требуются сравнительно обобщённые модели процессов (например, для анализа потерь), а в других — наиболее детализированные (при исследовании сигналов в системе управления). Именно в этом режиме обеспечивается заданная точность ПЭП.

Режим работы аварийный. В данном случае, как правило, исследуют переходные процессы обобщённо, т. е. допустима невысокая точность расчётов. Но иногда требуется проанализировать работу системы управления в аварийном режиме и тогда необходимо добиваться повышенной точности расчётов и учёта многочисленных деталей.

Из анализа режимов можно сделать вывод, что в разных режимах для одних и тех же блоков требуются разные точности моделирования.

Отдельная проблема возникает при моделировании смены режимов и необходимости просмотра различных процессов, в зависимости от режима и, возможно, даже в рамках одного режима. Например, желательно посмотреть форму тока в обмотках и тут же — сигналы в системе управления. Одновременно просматривать эти переменные невозможно, так как слишком разный масштаб времени (частоты порядка десятков герцов для токов и порядка мегагерцов для импульсов в системе управления). Кроме того, параметры сигналов в системе управления могут слабо влиять на форму тока и поэтому, вообще говоря, их можно моделировать отдельно. То же самое происходит при использовании импульсной (цифровой) системе управления, когда один импульс, пришедший в определённый момент времени, меняет процессы в некотором направлении и далее они протекают уже без учёта детальных параметров импульсов в системе управления. Но сам момент прихода такого импульса должен быть зафиксирован точно.

Таким образом, в целом выявляется необходимость построения системы моделирования, способной оперативно менять программные модели (рисунок 1) отдельных элементов в процессе моделирования.

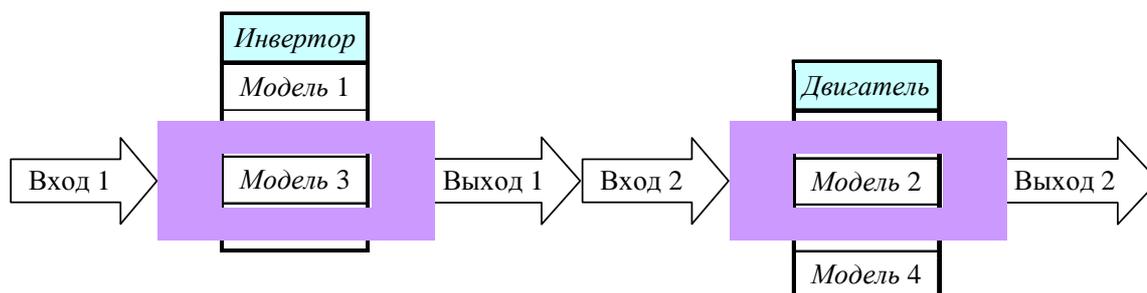


Рисунок 1 — Принцип адаптивного выбора моделей

Кроме моделей, в системе моделирования используются также конкретные численные методы, которые приспособлены к моделям с определёнными характеристиками. Поэтому изменение модели логично сопроводить изменением используемого метода. В настоящее время большинство моделирующих программ позволяет выбрать методы из достаточного числа возможных вариантов, но только перед началом счёта.

При смене моделей может оказаться необходимым переформировать модель всей системы, так как, например, вместо некоторых динамических моделей (в форме дифференциальных уравнений) могут появиться статические (в форме алгебраических или даже логических выражений). Могут трансформироваться и некоторые модели, записанные в алгоритмической форме. Это потребует увязки нового состава переменных состояния с прежним (входные и выходные переменные часто остаются прежними). Таким образом, адаптивность к выбору моделей элементов предполагает также определённую степень адаптивности к смене модели всей системы.

Процесс смены моделей элементов, методов и модели всей системы не может происходить без соответствующего научного обоснования. Необходимо обеспечить при такой смене преемственность, когда конечные значения переменных прежних моделей становятся начальными для новых моделей. Необходимо обеспечить корректную передачу информации в части внутренних переменных моделей (некоторые из них могут исчезать при упрощении модели и появляться при её усложнении). Необходимо гарантировать сходимость процесса при смене моделей.

В целом ставится задача автоматизировать выбор всех составляющих процесса моделирования с учётом заданного режима и исследуемых переменных. При этом возможны рациональные и оптимальные алгоритмы. Рациональные алгоритмы обеспечивают работоспособность модельного процесса, а оптимальные — его эффективность. В качестве критериев эффективности можно использовать, например, время счёта или общую погрешность.

В научно-учебной лаборатории САПР Института космических и информационных технологий СФУ в настоящее время имеется некоторый опыт использования сменных моделей электропривода различной степени детализации — двигателя (синхронного двигателя с постоянными магнитами), транзисторного коммутатора, датчика положения на основе вращающегося трансформатора. При использовании в качестве всех элементов наиболее детальных моделей обычный процесс моделирования затягивается на много часов. При использовании на различных этапах процесса различных моделей, в зависимости от их влияния на этот этап (пуск, отработка малых перемещений и др.) удаётся сделать время счёта существенно меньшим — порядка десятков минут. При этом в настоящее время имеется опыт супервизорного управления моделированием, когда исследователь отслеживает процесс на экране дисплея и осуществляет прерывание моделирования с последующим выбором других моделей.

Современные системы моделирования технических объектов, представляемых алгебро-дифференциальными уравнениями, построены с использованием следующих общих принципов: тем или иным способом вводится математическая модель объекта, выбирается метод численного интегрирования (например, Рунге-Кутты), задаются внешние воздействия и осуществляется численное интегрирование с промежуточными алгебраическими вычислениями. В результате получаются переходные характеристики для переменных состояния. При этом существует обратная связь между точностью и временем расчётов: чем точнее должны быть расчёты, тем детальнее должна быть модель и меньше шаг интегрирования, т. е. больше его общее время. Даже современные быстродействующие компьютеры затрачивают десятки минут, а в некоторых случаях и часы, на расчёт одного переходного процесса. Это допустимо, если технический объект и соответствующая ему модель отлажены и требуется однократный расчёт процесса. Но в ходе отладки модели или изменения объекта (при проектировании) могут потребоваться десятки и сотни расчётов. В этом случае общее время моделирования может достигать многих дней и оказаться неприемлемым с точки зрения сроков проектирования. В частности, это имеет место при разработке прецизионных электроприводов, у которых погрешность позиционирования (или, например, допустимая нестабильность скорости) может достигать долей процента и чтобы её выявить, необходимо учитывать несимметрию двигателя, процессы в транзисторных ключах, погрешности в датчиках, узкие импульсы в цифровых блоках управления и многое другое. Это делает модель жёсткой и требует очень малого шага интегрирования (иногда даже нельзя использовать автоматический выбор шага и приходится задавать его фиксированным и весьма малым). В результате расчёт каждого переходного процесса в таком электроприводе продолжается несколько часов. Если

использовать упрощённые модели элементов электропривода, расчёты ускоряются на 2...3 порядка, но погрешность становится равной 5...15%. Оба эти варианта — длительные расчёты при высокой точности и малая точность при быстрых расчётах — не приемлемы.

Таким образом, возникает классическая задача оптимизации, связанная с выбором наилучшего сочетания точности и времени счёта. Решению этой задачи могут способствовать некоторые специфические особенности моделируемых процессов. Применительно к прецизионным электроприводам они заключаются в следующем.

Часто работу электропривода можно условно разбить на несколько этапов: начало процесса, его сравнительно установившийся режим, окончание процесса. Для прецизионных электроприводов начало процесса не имеет большого значения, так как в этом случае обрабатываемая ошибка велика и нет необходимости в точных расчётах. В установившемся режиме часто тоже не требуются точные расчёты, так как электропривод обычно работает с постоянной скоростью в режиме насыщения по сигналу управления из-за сравнительно большой ошибки. На заключительном этапе отработки требования к точности расчётов существенно повышаются, так как ошибка начинает быстро уменьшаться и собственно в данном случае проявляются прецизионные свойства электропривода. Направляется решение: на тех этапах, где не нужна высокая точность (и отработки, и расчётов), следует использовать наиболее простые модели и "быстрые" методы численного интегрирования, а на этапах выхода к заданным координатам следует использовать точные модели и методы. Это означает, что система моделирования и сама модель должны быть с изменяющимися структурой и параметрами.

Воздействовать на систему моделирования можно в режиме ручного супервизорного управления, наблюдая за переходным процессом и вмешиваясь в его ход на соответствующих этапах, а можно поручить эту задачу самой системе моделирования, введя соответствующий блок настройки. Тогда система моделирования становится самонастраивающейся с элементами адаптации.

В научно-учебной лаборатории САПР СФУ ведутся работы по созданию самонастраивающейся адаптивной системы моделирования технических объектов (на примере прецизионных электроприводов). На данном этапе разработаны комплексы моделей электромеханических устройств с различной степенью детализации — индукторного двигателя двойного питания, синхронного двигателя с постоянными магнитами, вращающегося трансформатора, сельсина, асинхронного и синхронного тахогенераторов. При этом варьируются следующие особенности моделей: число фаз (двухфазные, трёхфазные), возможность аппроксимации индуктивностей косинусоидальными зависимостями от угла поворота, наличие геометрической симметрии, наличие электрической симметрии, система координат (собственная обмоток, единая), учёт электромагнитных процессов в обмотках. Разработаны модели источников питания (транзисторных коммутаторов) с учётом их свойств: насыщение транзисторов, мгновенные или конечные фронты импульсов питания, учёт цепей управления, учёт действия обратных диодов. Для некоторых вариантов замкнутых систем электропривода разработаны корректирующие звенья также различной степени детализации (в частности, с введением или исключением нелинейных связей между амплитудами и частотами питания).

В настоящее время выполнены некоторые предварительные исследования эскизного варианта разрабатываемой системы моделирования с использованием ручного супервизорного управлением, в ходе которого можно остановить процесс моделирования и заменить модель (например, двигателя), выбрав более точную или более обобщённую. Можно выбрать модель источника питания, датчиков обратных

связей и т. д. Можно также задать метод численного интегрирования и способ выбора шага — автоматический или фиксированный. Задачей дальнейших исследований является автоматизация настройки с учётом целей моделирования и особенностей анализируемых процессов.