

Моделирование силовых преобразователей в исследовательских задачах и учебном процессе

Modeling of power converters for research and development and educational tasks

Анучин А.С., к.т.н. Anuchin A., PhD.

Аннотация

Описаны возможные способы моделирования современных силовых преобразователей на полностью управляемых ключах. В сравнении приводятся средства среды Simulink пакета MATLAB, языков высокого уровня и моделирование в составе микроконтроллера системы управления. Показаны недостатки и преимущества разных методов.

Annotation

This article deals with different modeling methods for modern power converters. Simulink, C language and modeling inside target microcontroller are compared. The benefits and disadvantages of different methods are shown.

Ключевые слова: моделирование силовых преобразователей, Simulink SimPowerSystem, системы управления реального времени.

Keywords: power converters modeling, Simulink SimPowerSystem, real-time control systems.

Введение

Сегодня MATLAB и среда Simulink являются наиболее популярным инструментом для решения исследовательских и учебных задач. Основными преимуществами данной системы является простота освоения (на начальном уровне) и широкий набор библиотек. В нашей стране своей популярностью для моделирования электротехнических схем и электроприводов MATLAB обязан книге [1]. Она сочетает в себе простоту повествования и содержит базовые примеры по принципу от простого к сложному.

К основным недостаткам книги следует отнести то, что все, приведенные в ней примеры построены вокруг стандартных библиотек SimPowerSystem, которые решают задачу в слишком общем виде, что не лучшим образом сказывается на скорости просчета модели. Так, используя стандартный инвертор, ШИМ, стандартный двигатель и моделируя систему векторного управления, время расчета одной секунды физического времени может превышать тысячи реальных секунд машинного времени, что неприемлемо, если требуется обеспечить проведение большого числа однотипных экспериментов.

Основным недостатком стандартных моделей является их универсальность. Данные модели позволяют исследовать не только системы управления электродвигателями, но и энергетические режимы работы преобразователей и вопросы коммутации отдельных полупроводниковых приборов. Но вопросы коммутационных перенапряжений на ключах не имеют отношения к опытам над системой векторного управления, а отнимают процессорное время и, что еще важнее, время исследователя.

Способы представления инвертора средствами MATLAB

В модели электропривода есть две подсистемы в силовом канале, вычисление которых может быть неоптимально с точки зрения быстродействия — это электрический преоб-

разователь и электродвигатель. Модель электродвигателя строится по уравнениям обобщенной электрической машины, а в электрической цепи она заменяется эквивалентной схемой. Аналогичным образом транзисторы электрического преобразователя представляются эквивалентной схемой с переключаемыми параметрами. Сам по себе метод расчета электрических схем не является сложным, однако постоянное изменение параметров снижает производительность расчета, так как изменение одного параметра неизбежно вызывает влияние на тот же самый параметр, а система не умеет полноценно выделять, какие параметры можно считать при данных условиях условно постоянными, а какие нет. Поэтому наиболее оптимальным был бы отход от электрического моделирования с использованием средств SimPowerSystem к моделированию стандартными средствами Simulink. Если с двигателем все достаточно очевидно, то силовой преобразователь может быть представлен множеством способов:

- апериодическим звеном;
- экстраполятором нулевого порядка;
- идеальным широтно-импульсным преобразователем;
- широтно-импульсным преобразователем с «мертвым» временем.

Одним из способов замены сложного силового преобразователя является его замена на апериодическое звено с некоторым коэффициентом усиления и постоянной времени. Для тиристорных преобразователей это была наиболее часто используемая модель. Для транзисторных преобразователей данная замена также применима, и в качестве постоянной времени используется период ШИМ, а коэффициент усиления определяется напряжением звена постоянного тока. Если управление стойкой производится в обычном комплементарном режиме, когда скважность определяется для верхнего транзистора, а нижний работает в противофазе, то структурная схема для моделирования стойки инвертора будет соот-

ветствовать изображенной на рис. 1. Коэффициент усиления определяется разностью потенциалов на плюсовой и минусовой шинах звена постоянного тока, а стойка формирует выходной потенциал.

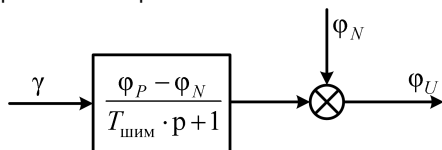


Рис. 1. Структура для моделирования стойки инвертора

Такое представление хорошо подходит для синтеза аналоговых регуляторов традиционным способом, а результаты работы в замкнутом режиме с непрерывным регулятором практически идентичны системе с полной моделью широтно-импульсного преобразователя и задержкой в канале измерения обратной связи, характерной для цифровых систем регулирования [2].

Если система регулирования цифровая, то для этого случая лучше использовать не апериодическое звено, а экстраполятор нулевого порядка с тем же коэффициентом усиления.

Для исследования детального поведения тока внутри периода ШИМ необходимо использовать широтно-импульсный модулятор, выходной логический сигнал которого будет являться сигналом управления верхним транзистором стойки инвертора. Тогда для получения потенциала средней точки стойки необходимо перемножить логический сигнал на напряжение звена постоянного тока.

В качестве примера рассмотрим контур тока якоря ДПТ, питаемого от мостового инвертора, где инвертор представлен в виде экстраполятора нулевого порядка и в виде полноценного широтно-импульсного преобразователя (пока без учета «мертвого» времени). Результаты моделирования контура на скачек задания представлены на рис. 2, а на рис. 3 в масштабе представлен участок переходного процесса, по которому можно оценить поведение тока внутри периода ШИМ.

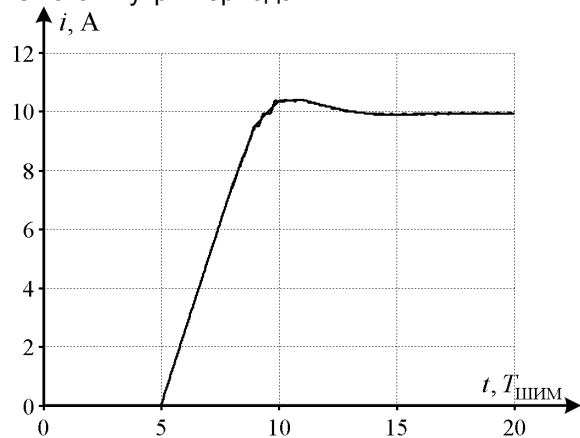


Рис. 2. Переходный процесс с разными моделями инвертора

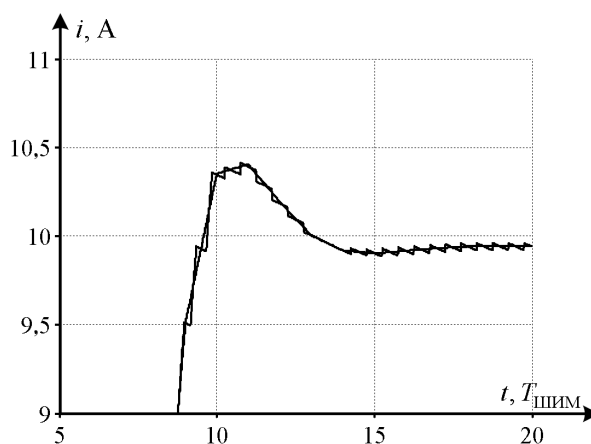


Рис. 3. Переходный процесс (увеличение)

Приведенный график показывает, что экстраполятор нулевого порядка является достаточно адекватной заменой и может быть использован для ускорения процессов моделирования силовых преобразователей. Небольшое уточнение формы тока внутри периода ШИМ требует существенного увеличения времени моделирования, так как шаг численного интегрирования не должен быть меньше времени переключения силовых транзисторов, иначе результат будет иметь видимую дискретность по времени, выражающуюся в дискретность по уровню. То есть при разбиении периода ШИМ на 256 временных интервалов для центрированной ШИМ будет реализовано всего 128 дискрет по уровню при в 256 раз большей длительности моделирования по сравнению с экстраполятором нулевого порядка.

Учет «мертвого» времени

«Мертвое» время следует учитывать в тех случаях, когда его влияние существенно для условий эксперимента. Это, например, работа силового преобразователя с малыми управляющими воздействиями. Следует разделять задачи, когда индуктивность, подключенная к средней точке стойки инвертора, большая и малая. Для случая обычного асинхронного двигателя при частотном регулировании можно считать, что ток фазы редко меняет знак на периоде ШИМ, тогда в модель инвертора можно внести коррекцию по «мертвому» времени.

Если ток фазы положительный, то есть втекает в фазу двигателя, то к фазе будет приложен меньший потенциал, так как при двух отключенных транзисторах ток будет протекать через нижний диод. Если ток фазы отрицательный, то наоборот. Влияние будет пропорционально продолжительности «мертвого» времени и напряжению звена постоянного тока к периоду ШИМ. Например, для 3 мс «мертвого» времени, 100 мс периода ШИМ и 540 В на звене постоянного тока ΔU составит 16,2 В, что может быть учтено в соответствии со структурной схемой рис. 4.

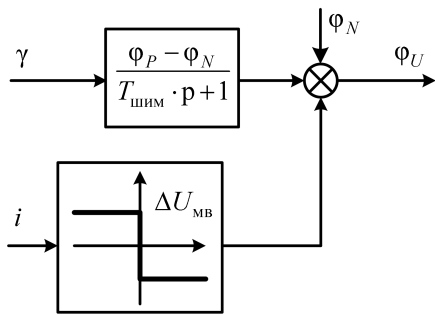


Рис. 4. Учет влияния «мертвого» времени в модели стойки

Для моделей, где индуктивность низкая (например, работа инвертора на синусный фильтр) и ток относительно часто «цепляется» или переходит через ноль, следует представлять инвертор в виде полноценного широтно-импульсного преобразователя. В этом случае на каждом шаге моделирования следует уточнять потенциал фазы в зависимости от знака тока.

При достижении фазным током нуля во время «мертвого» времени потенциал фазы становится равным ЭДС фазы, а ток прерывается. Это не всегда легко смоделировать, поэтому можно удерживать ток релейно в нуле, пока «мертвое» время не закончится.

Моделирование с использованием языков высокого уровня

При всех преимуществах визуального моделирования получаемые модели по быстродействию и виду далеки от того, что должно получиться в конечной реализации на микро-

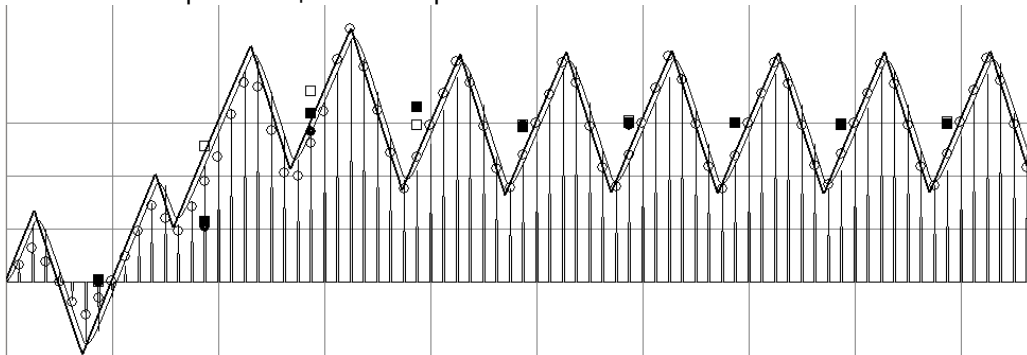


Рис. 5. Результат моделирования контура тока с моделью на языке Си и периодом дискретизации расчетов равным тиму таймера ШИМ

Для повышения скорости моделирования без снижения качества следует применить расчет с переменным шагом интегрирования. Например, известно, что переключение состояния инвертора произойдет через 100 тиков таймера ШИМ, тогда все первые 100 тиков инвертор имеет одинаковое состояние, и данный интервал может быть рассчитан за одну операцию численного интегрирования. Следует помнить, что данное увеличение шага интегрирования возможно лишь при условии, что ток фаз меняется медленно. Если ток переходит через ноль в моменты «мертвого» времени, то это следует отслеживать и проводить моделирование данных участков с уменьшенным шагом.

Если токи фаз не меняют знак в моменты «мертвого» времени, то весь период ШИМ

контроллерной системе управления реального времени. Использование языков высокого уровня (например, Си) позволяет получить достаточно быструю модель объекта регулирования и одновременно получить код системы управления, пригодный для дальнейшего использования в микроконтроллере. Мощности современных компьютеров вполне достаточно для достаточно быстрого и точного моделирования даже при выборе периода дискретизации равного такту широтно-импульсного генератора микроконтроллера, что обеспечивает хорошую точность обработки выходного напряжения инвертора по уровню.

При столь малых приращениях следует использовать числа с плавающей точкой двойной точности, так как применение одинарной даст большую погрешность из-за ограниченной разрядности мантиссы. Пример моделирования системы «инвертор – двигатель постоянного тока» с контуром тока предельного быстродействия представлен на рис. 5. Приведен скриншот с экрана, где представлен переходный процесс тока, сигнала с датчика тока на входе АЦП, измеряемых выборок тока с АЦП с учетом погрешности и других необходимых для отладки параметров. Данный способ удобен тем, что позволяет выводить большое количество отладочной информации и оперативно вносить исправления в алгоритм управления.

получается разбит всего на 6 интервалов численного интегрирования, что делает модель очень быстрой.

Моделирование и отладка систем управления на микроконтроллерах

Современные микроконтроллеры, такие как Concerto или Delfino фирмы Texas Instruments [3, 4], применяемые в задачах управления реального времени, могут быть эффективно использованы и для моделирования объекта управления с одновременной отладкой самой системы управления практически в реальном времени.

В учебном процессе на кафедре АЭП МЭИ уже несколько лет успешно применяются имитационные модели систем «инвертор – двигатель постоянного тока», «инвертор – синхронная машина с постоянными магнитами» и

«инвертор – асинхронный двигатель» для выполнения заданий по курсовому проектированию курса «Системы управления электроприводов». Решение дифференциальных уравнений моделей двигателей осуществляется по методу Рунге — Кутты. Двигатели питаются от идеального инвертора, имеются датчики тока, подключенные к АЦП. Студенты выполняют проектирование систем управления, начиная с

экспериментов определения параметров электрических машин, заканчивая испытанием и отладкой структуры системы управления, выполненной в соответствии с заданием преподавателя. В качестве примера на рис. 6 представлены графики тока фаз при разгоне синхронного двигателя с постоянными магнитами в режиме автокоммутации с токоограничением.

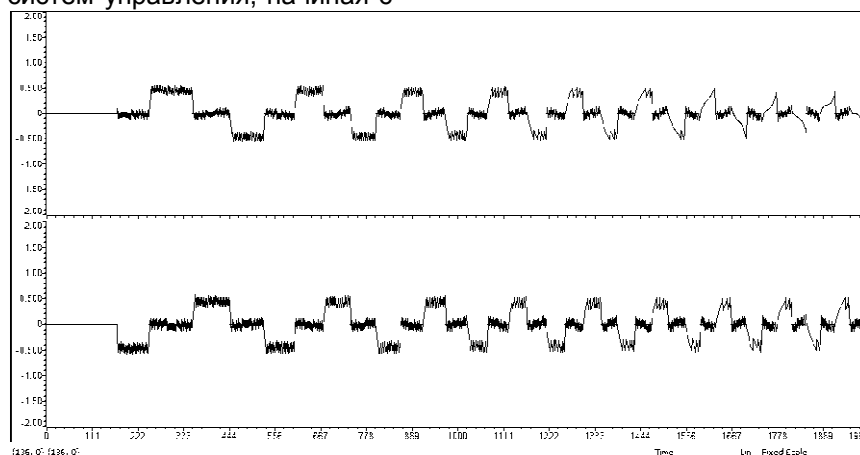


Рис. 6. Разгон синхронной машины с постоянными магнитами в режиме автокоммутации и токоограничением

Моделирование системы непосредственно на целевом микроконтроллере имеет одно очень важное преимущество — оно позволяет точно измерить затраты микроконтроллера на алгоритм управления и оптимизировать код без работы с реальной силовой частью. Таким образом, производилась разработка программного обеспечения системы управления источником питания с синусным выходным фильтром. Код системы управления должен выполнять расчет всех высших гармоник в выходном напряжении и их компенсацию для трех независимых фаз с частотой первой гармоники 400 Гц [5]. Коэффициент гармонических искажений не должен превышать 5% [6].

При частоте ШИМ 25,6 кГц и четырех съемах данных на периоде микроконтроллер с тактовой частотой 150 МГц имеет 1300 тактов для выполнения алгоритма. За это время необходимо взять данные с АЦП, рассчитать частичные суммы преобразования Фурье для 1, 3, 5, 7 и 9-ой гармоник, произвести расчет регуляторов гармоник, рассчитать управляющее воздействие для инвертора, выполнить токоограничение и проверить защиты по мгновенным значениям токов и напряжений для трех независимых фаз.

При реализации данного алгоритма на языке Си программа выполнялась более 3500 тактов при максимальном уровне оптимизации. Основной алгоритм, написанный на ассемблере, уместился в 300 тактов. Из-за сложности алгоритма и низкоуровневых механизмов обращения к памяти для отладки потребовалось реализовать модель силовой части, синусного фильтра и нагрузки непосредственно в микроконтроллере. Время выполнения в процессе отладки оценивалось системой профайлинга.

Выводы

Если провести исследование современных авторефератов, то можно с уверенностью сказать, что более 90% моделей электроприводов выполнено в среде Simulink пакета MATLAB. В то же время существует достаточно много возможностей оптимизировать процесс моделирования, как с точки зрения скорости моделирования, так и с точки зрения дальнейшего практического удобства использования результатов.

Библиографический список

1. Герман-Галкин С.Г., Компьютерное моделирование полупроводниковых систем Matlab 6.0, Люмена (Санкт-Петербург), 2001, сс.320
2. Анучин А.С. Методики расчета параметров цифрового ПИ-регулятора в электроприводе, Электротехника, Знак, Москва, 2014, №5, С. 32-39
3. http://www.ti.com/lscds/ti/microcontroller/32-bit_c2000/c28x_delfino/overview.page?paramCriteria=no
4. http://www.ti.com/lscds/ti/microcontroller/32-bit_c2000/c28x_arm_cortex-m3/overview.page?paramCriteria=no
5. Анучин А.С., Кульманов В.И., Беляков Ю.О., Выбор рациональной структуры цифровой системы управления источников вторичного стабилизированного питания переменного тока, Вестник Национального Технического Университета «ХПИ»: Проблемы автоматизированного электропривода, теория и практика, №36 (1009) 2013, Харьков, С. 234,235
6. ГОСТ Р 54073 – 2010

Сведения об авторах

Анучин Алексей Сергеевич, к.т.н., зав. каф. АЭП ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ», +74953627021, anuchinas@mpei.ru