

К. т. н. В. В. ВYЧУЖАНИН

Украина, Одесский национальный морской университет
E-mail: vint53@list.ru

Дата поступления в редакцию
08.12 2006 г.

Оппонент И. А. ПАВЛЮКОВСКИЙ
(КБТЭМ-СО, г. Минск)

УСТРОЙСТВО ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ШАГОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ НА ПЛИС

Показана реализация полношаговых и полушагового режимов работы электродвигателя при управлении его фазовыми обмотками схемой на ПЛИС фирмы Altera.

В современных системах автоматического управления в качестве исполнительных механизмов часто применяют шаговые двигатели, называемые в мировой технической литературе вентильно-индукторными, управляемыми вентильными реактивными, коммутируемыми реактивными с переменным магнитным сопротивлением, электронно-коммутируемыми, бесконтактными реактивными и т. д. Ротор шагового двигателя поворачивается дискретно после поступления каждого импульса с выхода системы управления на входы фазовых обмоток двигателя, либо остается неподвижным, когда импульсы не поступают. Благодаря возможности управления перемещением ротора на любой угол шаговые двигатели могут быть успешно использованы при конструировании исполнительных систем дискретного типа, например регулирующего клапана.

Целью настоящей статьи является разработка схем формирования сигналов управления исполнительным механизмом на базе шагового электродвигателя.

Для управления шаговым двигателем (ШД) используют устройства, выполненные на основе специализированных или универсальных микроконтроллеров, полузаказных БИС. Такие устройства легко программируются, потребляют мало энергии и без сложностей включаются в схему. Анализ известных технических решений показал, что для большинства типов слаботочных электродвигателей, в том числе и ШД, целесообразным является проектирование системы управления (СУ) ими на основе полузаказных БИС. К таким БИС можно отнести базовые матричные кристаллы серий 1515, 1537, 1578, 1589, 5501, а также программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС).

ПЛИС характеризуются сокращенным проектно-технологическим циклом, быстрым макетированием и реконфигурированием, удобством программирования пользователем, а также большим числом выводов, настраиваемой стыковкой входов и выходов с практически любым стандартом логических уровней и способностью заменить собой несколько микро-

схем, включая микроконтроллер, регистры портов, интерфейс и т. п. По мере снижения удельной стоимости ПЛИС (в расчете на ячейку) и роста количества ячеек на кристалле программируемая логика активно вторгается в области, ранее традиционно занимаемые микроконтроллерами и специализированными ИС. Учет архитектурных особенностей и (в ряде случаев) преимуществ ПЛИС перед микропроцессорами позволяет выполнять конкурентоспособные изделия на микросхемах программируемой логики [1].

Производители предлагают разнообразные ПЛИС [2, 3]: программируемые простые и сложные логические устройства (SPLD и CPLD), программируемые пользователем базовые матричные кристаллы (FPGA). Они обладают специфическими характеристиками и оптимальным сочетанием таких параметров как быстродействие, энергопотребление, уровень интеграции, стоимость и подходят как для крупносерийного, так и для мелкосерийного производства различных по назначению устройств.

Для решений, не требующих повышенного момента двигателя, в качестве базового был выбран гибридный тип ШД. Двигатели этого типа выполняются с постоянными магнитами, но, в сравнении с ШД других типов, с большим числом полюсов. Выбранный тип ШД оценивался по предельным механическим и динамическим характеристикам, позволяющим выбрать частоту управляющих импульсов, подаваемых на фазовые обмотки ШД. Как известно, предельные механические характеристики устанавливают зависимость допустимого момента сопротивления от частоты управляющих импульсов в установившемся режиме работы. С ростом частоты управляющих импульсов сказывается запаздывание в нарастании тока, и при некоторой предельной частоте момент двигателя становится равным нулю. Для различных типов ШД эта частота может достигать несколько килогерц.

Предельные динамические характеристики, представляющие зависимость частоты приемистости от момента сопротивления и момента инерции нагрузки, позволяют осуществить окончательный выбор частоты управляющих импульсов. Обычно для ШД частоту приемистости рекомендуется выбирать в пределах 100—1000 Гц. Таким образом, ШД должен обрабатывать как единичные импульсы управления, так и последовательность импульсов с частотой, определяемой предельными динамическими характеристиками. Экспериментально установлено, что на часто-

тах управляющих импульсов от 100 до 400 Гц ШД может быть остановлен в пределах одного шага. Из-за инерционности двигателя на больших частотах такая остановка затруднительна. Поэтому при разработке СУ исполнительным устройством с точной обработкой положения и с малым моментом инерции была использована частота перемещения ротора ШД, находящаяся в диапазоне 100...400 Гц. Скорость вращения ШД определяется частотой управляющих импульсов в указанном диапазоне.

При выборе из существующих биполярной и униполярной конфигураций обмоток ШД предпочтение было отдано униполярной конфигурации. Это объясняется тем, что в решаемой задаче не требуется повышенный момент двигателя. Такое решение позволяет уменьшить габариты исполнительного устройства, работать с меньшими потерями, а также существенно упростить разрабатываемую схему СУ. Кроме того, униполярные ШД обычно имеют по одной обмотке в фазах и выполняются с выводом от середины каждой обмотки. Это позволяет изменять направление магнитного поля, создаваемого обмоткой, простым подключением половинок обмоток. В качестве недостатка следует отметить, что для униполярного ШД на выходе СУ необходимо иметь четыре ключевых устройства. Тем не менее в целом схема управления проще, чем СУ для биполярного двигателя.

Для получения оптимальных параметров проектируемой СУ на базе программируемой логики использовалась САПР Quartus II ver. 4.2, позволяющая реализовать проект на ПЛИС фирмы Altera. Такая САПР обеспечивает автоматическую установку приоритета проектирования (минимальное количество ячеек) и оптимизацию программ на его основе, эффективное использование площади кристалла, а также быструю компиляцию и рекомпиляцию проекта. Система проектирования имеет полный цикл и поддерживает сквозной процесс от ввода и контроля до программирования микросхем. Она представляет собой архитектурно независимую среду проектирования, легко приспособливающуюся к конкретным проектным задачам. Файл описания разработанного проекта был создан в текстовом редакторе пакета.

При описании алгоритма функционирования разработанного устройства учитывалась последовательность включения и выключения силовых ключей на выходе СУ, тем самым обеспечивалась реализация соответствующих способов управления фазами ШД (полношагового с включением одной фазы, полношагового с включением двух фаз или полушагового режимов).

Ниже приведен фрагмент файла программного описания работы системы управления на ПЛИС при реализации, например, полношагового режима с включением одной фазы ШД.

```
Subdesign Main
(
  Clk, Revers, Ena: input;
  A, B, C, D : output;
)
Variable
FSM: machine with states(A0,A1,A2,A3,A4);
```

```
Begin
FSM.Clk=Clk;

case FSM is
when A0 =>
if Ena == 1 then
FSM = A1;
A=B"0";
B=B"0";
C=B"0";
D=B"0";
end if;
when A1 =>
if Revers == 0 then
A=B"1";
B=B"0";
C=B"0";
D=B"0";
else
A=B"1";
B=B"0";
C=B"0";
D=B"0";
end if;
when A2 =>
if Revers == 0 then
A=B"0";
B=B"0";
C=B"1";
D=B"0";
else
A=B"0";
B=B"0";
C=B"0";
D=B"1";
end if;
if Ena == 0 then
FSM = A0;
else FSM = A3;
end if;
```

На основе созданных при компиляции выходных файлов после отладки компонентов схемы осуществлено моделирование работы проекта с помощью подсистемы Simulator пакета Quartus II ver. 4.2. Компиляция выполнена с учетом заданных требований: обеспечение временных характеристик проектов; оптимизация используемых ресурсов ПЛИС. В результате компиляции созданы файлы для программирования и конфигурирования ПЛИС Altera, позволяющие использовать полношаговые и полушаговые режимы управления фазами ШД.

При выборе конкретного типа, серии и семейства ПЛИС разработчики обычно руководствуются сложностью, выраженной в количестве логических элементов, а также доступностью средств разработки. Цена ПЛИС пропорциональна ее емкости, а значит, для реализации разрабатываемого устройства необходимо подбирать ПЛИС с оптимальной емкостью.

При компиляции проектов была выбрана ПЛИС CPLD MAX7000S, устройство EPM7032SLC44-5, имеющая 32 логических элемента. При выборе ПЛИС типа CPLD или FPGA предпочтение было отдано первому типу. Это связано с тем, что ПЛИС типа CPLD обладают более широкими функциональными возможностями, большим числом блоков ввода/вывода и при реализации устройства не требуют большого объема памяти. Кроме того, микросхемы CPLD имеют время задержки короче и более предсказуемое, чем FPGA. Используемое семейство MAX7000 является базовым для всех выпускаемых фирмой Altera ПЛИС CPLD. В ПЛИС MAX7000S, устройство EPM7032SLC44-5 реализуется в соответствии с программным описанием любая из трех названных схем управления ШД. Процент использования выбранной ПЛИС (при обеспечении полношагового с включением одной фазы, полношагового с включением двух фаз или полушагового режимов) составил соответственно 81, 78 и 84. Функциональная схема, реализующая СУ ШД, представлена на рис. 1.

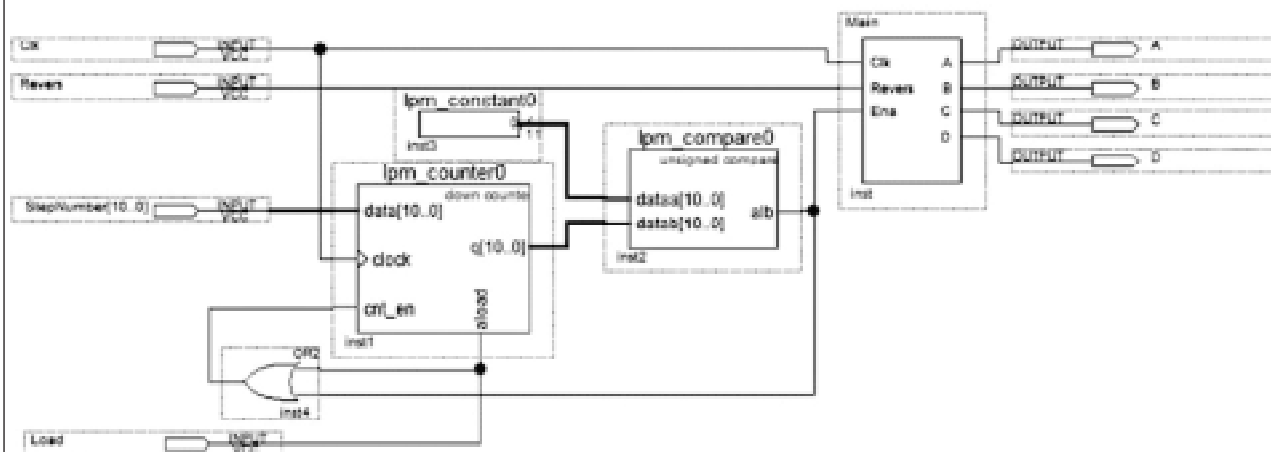


Рис. 1. Функциональная схема управления ШД: lpm_constant0 — блок генерации константы; lpm_counter0 — счетчик числа шагов; lpm_compare0 — компаратор; Main — блок формирования управляющего сигнала

Схема СУ работает следующим образом. Заданное число шагов (импульсов) в параллельном коде подается на входы lpm_counter0 — счетчика числа шагов по сигналу StepNumber [10...0]. Максимальное необходимое число шагов для конкретного устройства, не превышающее заданное число, формируется в lpm_constant0 — блоке генерации константы. В lpm_compare0 — компараторе сравниваются количества импульсов (шагов), поступающих с выходов lpm_constant0 и lpm_counter0. При количестве шагов, меньшем заданного, с выхода lpm_compare0 на вход блока

Main проходит необходимое число импульсов, соответствующее положению исполнительного органа. Блок Main, формирующий управляющий сигнал, обеспечивает временной сдвиг импульсов на выходах A, B, C и D схемы. Прямое направление вращения двигателя задается подачей сигнала «0» на вход Revers. Для изменения направления вращения двигателя необходимо подать сигнал «1» на тот же вход.

Моделированием работы СУ ШД в каждом из трех режимов были получены результаты, приведенные на рис. 2—4.

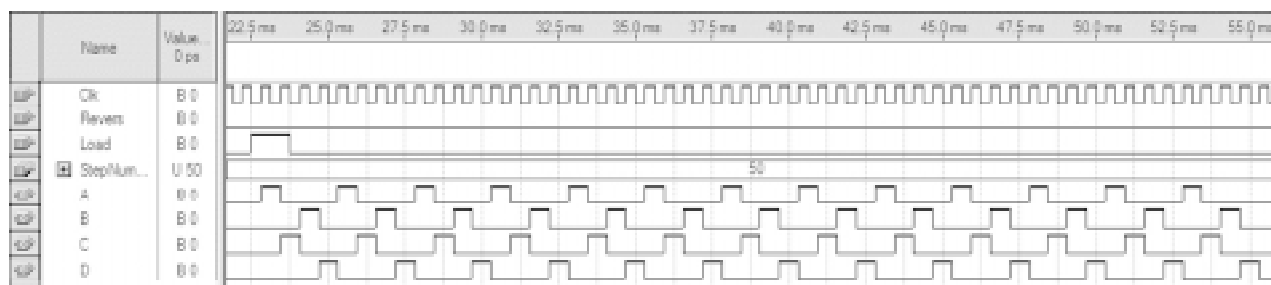


Рис. 2. Результаты моделирования СУ ШД на ПЛИС при полношаговом режиме с включением одной фазы

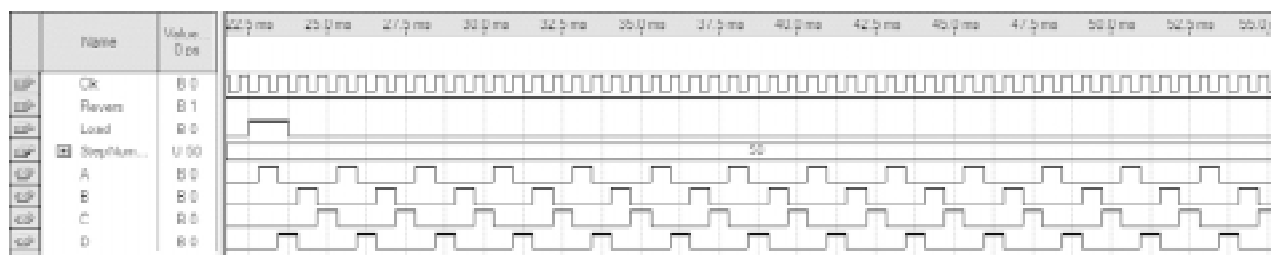


Рис. 3. Результаты моделирования СУ ШД на ПЛИС при полношаговом режиме с включением двух фаз

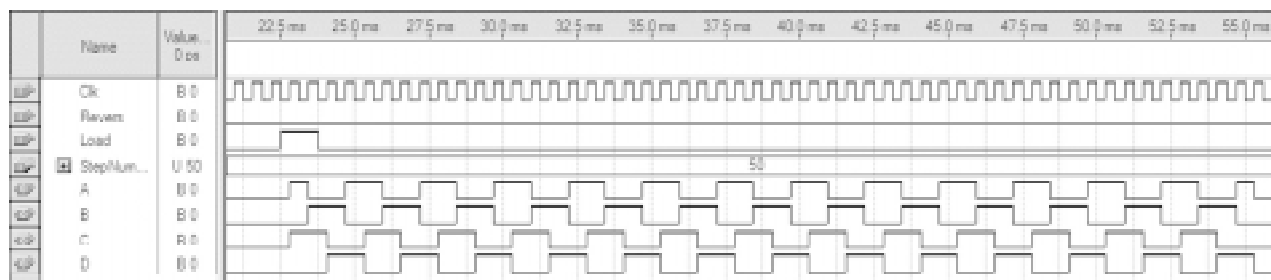


Рис. 4. Результаты моделирования СУ ШД на ПЛИС при полушаговом режиме

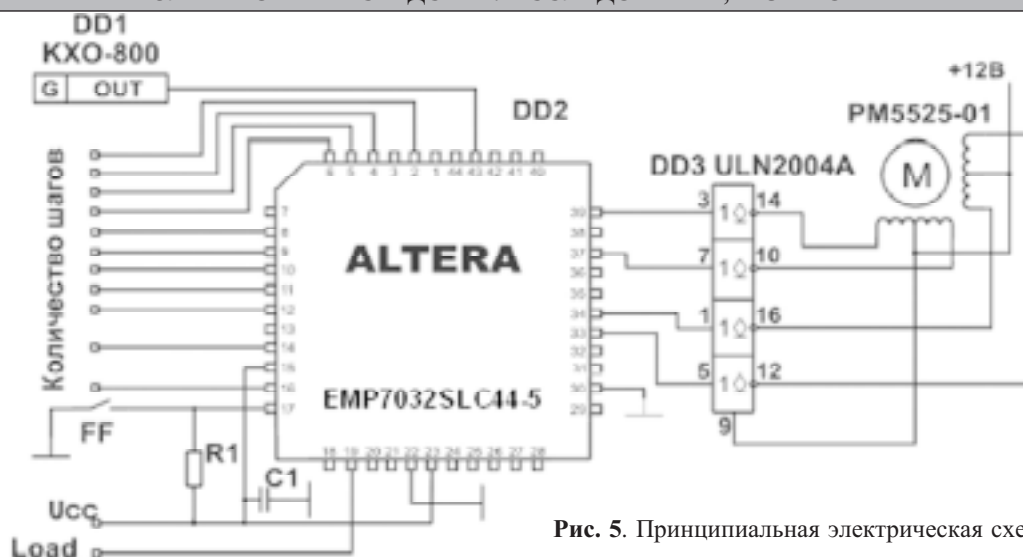


Рис. 5. Принципиальная электрическая схема СУ ШД

Результаты исследований работы СУ ШД на базе ПЛИС подтверждают работоспособность схемы в полном соответствии с предъявленными к ней требованиями. Временные диаграммы (рис. 2—4) были получены при частоте управляющих импульсов 400 Гц для полношаговых режимов и 200 Гц для полушагового режима.

При реализации полношагового режима ШД с включением одной фазы (рис. 2) обеспечивается попеременная коммутация неперекрывающихся фаз ШД. Для выбранного униполярного ШД в этом случае в один и тот же момент времени используется 25% обмоток. При управлении фазами ШД с перекрытием, когда две фазы включены в одно и то же время (рис. 3), ротор фиксируется в промежуточных позициях между полюсами статора. Тем самым обеспечивается примерно на 40% больший момент, чем в случае одной включенной фазы. Второй способ управления обеспечивает такой же угол шага, как и первый способ, но положение точек равновесия ротора смещается на полшага.

Результаты моделирования СУ на ПЛИС ШД, работающего в полушаговом режиме, приведены на рис. 4. Этот способ управления является комбинацией полношагового с включением одной фазы и полношагового с включением двух фаз управления. На каждом втором шаге ШД запитана лишь одна фаза, а в остальных случаях запитаны две. В результате угловое перемещение ротора составляет половину угла шага для полношаговых способов управления. Кроме уменьшения шага, этот способ управления по сравнению с полношаговым позволяет частично избавиться от явления резонанса, а также имеет такое преимущество как более высокая разрешающая способность. Способ не требует формирования ступенчатого тока питания обмоток ШД.

Таким образом, несмотря на то, что разработанная СУ ШД реализует любой из трех способов управления, предпочтение следует отдать управлению при полушаговом режиме работы двигателя.

Для реализации схемы управления фазами ШД разработана принципиальная электрическая схема устройства, приведенная на рис. 5. На принципиальной схеме DD1 — генератор тактовых импульсов. Для коммутации обмоток двигателя используются

транзисторные ключи с открытым коллектором, входящие в состав микросхемы DD3. Микросхема состоит из транзисторных пар с высоковольтными выходами, с общим катодным соединением диодов для переключения индуктивной нагрузки. При разработке принципиальной электрической схемы в качестве ШД выбран электродвигатель PM5525-01, рассчитанный на напряжение питания 12 В, ток фазы 400 мА и имеющий крутящий момент 1,60 кг·см, момент инерции 30 кг·см², угловой шаг 7,5°. Мощность используемого ШД ограничена максимальным током через один ключ и аппаратной суммарной мощностью, рассеиваемой микросхемой DD3.

Все выводы микросхемы снабжены внутренними защитными диодами, т. е. каждая полуобмотка ШД зашунтирована диодом, что устраняет коммутационные выбросы напряжения. Транзисторные ключи DD3 обеспечивают усиление сигналов и защиту выводов ПЛИС от возможного проникновения напряжения питания ШД. Реверсивное управление двигателем задается логическим уровнем сигналов, коммутацией FF.

Примером конкретной реализации разработанной СУ ШД является схема управления электроприводом регулирующего клапана на ПЛИС [4], позволяющая обеспечить заданный перепад давления в схеме охлаждения системы кондиционирования воздуха.

Разработанная принципиальная электрическая схема управления ШД на ПЛИС может быть использована в различных по назначению устройствах безынерционных и точных приводов в специальных робототехнических комплексах, системах судовой и авиационной автоматики, медицинской технике, а также в бытовой технике различной сложности.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Попов Б. И. Однокристалльный микроконтроллер электроприводов // Электротехника.— 1991.— № 7.— С. 3—35.
2. Вычужанин В. В. Состояние рынка и динамика применений ПЛИС фирмы Altera // СHER NEWS.— 2005.— № 4.— С. 22—26.
3. Вычужанин В. В., Тарасов И. В. Новые семейства ПЛИС фирмы Actel // Компоненты и технологии.— 2005.— № 9.— С. 38—42.
4. Вычужанин В. В. Регулирующий клапан для СКВ // Сантехника. Отопление. Кондиционирование.— 2006.— № 1.— С. 60—62.