

УДК 62-83:621.3.07

## МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ И РЕАЛИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ УПРАВЛЕНИЯ НА БАЗЕ КОНТРОЛЛЕРОВ СЕМЕЙСТВА STM32

Волков А. В., Байков Д. В., Герман О.Ю.  
ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева»,  
г. Саранск  
E-mail: [bdv2304@mail.ru](mailto:bdv2304@mail.ru)

**Аннотация.** В статье рассматривается алгоритм микроконтроллерной системы управления преобразователем частоты.

**Ключевые слова:** алгоритм управления; преобразователь частоты; асинхронный двигатель; выпрямитель; инвертор; датчик скорости; контроллер.

### Постановка задачи

Одним из важнейших этапов при создании регулируемого электропривода является процесс реализации энергоэффективных законов управления и повышение КПД самой машины. Целью алгоритма микроконтроллерной системы управления является улучшение динамических и статических характеристик асинхронной электрической машины. Поэтому большое значение имеет не только реализация алгоритма векторного управления, но и адекватность самой модели к процессам, происходящим в преобразователе частоты. Выбор контроллера при реализации системы управления инвертором является одной из главных задач. Контроллер должен обеспечивать высокое быстродействие, иметь разрядность не менее 16 bit, встроенный многоканальный АЦП-модуль и шесть и более таймеров-счетчиков с функцией ШИМ. Применение микроконтроллерной системы позволяет управлять асинхронным двигателем (АД) с использованием различных законов векторного управления, что существенно снижает затраты на построение энергоэффективных приводов переменного тока с асинхронным двигателем.

### Выбор и решение поставленной задачи

Векторное управление электроприводом с асинхронным двигателем применяется при повышенных требованиях к динамическим или статическим характеристикам регулирования входных переменных привода. Улучшение динамических свойств привода с АД является результатом того, что в переходных процессах имеется возможность поддерживать постоянство потокосцепления ротора. Векторное управление применяется в электроприводах главного движения и подачи металлорежущих станков, в намоточных механизмах, требующих регулирования натяжения материала, в сервоприводах, выполняющих задачу быстродействующего регулирования положения, в тяговом электроприводе, в приводе электродов дуговых сталеплавильных печей и множестве других механизмов [1].

Для построения систем векторного управления АД могут быть использованы любые пары векторов, с помощью которых можно представить электромагнитный момент обобщенной электрической машины. Однако от выбора векторов в значительной мере зависит степень сложности системы. Желательно, чтобы величины, представленные векторами в уравнении момента, были наблюдаемы, т.е. чтобы их можно было непосредственно измерить и воздействовать на них при управлении. У короткозамкнутого АД есть только две такие величины – это напряжение и ток статора, и только одна из них, а именно ток статора, может входить в уравнение момента. Тогда другой величиной может быть только ток ротора или какое-либо потокосцепление. Поэтому для выбора остаются три

потокосцепления: статора, ротора и основное, т.е. магнитный поток в зазоре АД. Потокосцепление статора и рабочий поток АД можно непосредственно измерить и использовать этот сигнал в системе управления, что часто и делается при создании приводов высокого качества. В массовых же изделиях разработчики стараются использовать сигналы, доступные без установки датчиков, т.е. все те же ток и напряжение статора, по мгновенным значениям, которых можно вычислить, например, потокосцепление статора. Однако при выборе потокосцепления статора или основного потокосцепления передаточные функции системы управления получаются довольно сложными и малоподходящими для практического использования.

Таким образом, принцип векторного управления заключается в раздельном управлении магнитным потоком и моментом АД с помощью независимых составляющих тока статора, соответствующих проекциям вектора тока на оси системы координат, ориентированной по направлению вектора магнитного потока [2].

### Реализация алгоритма управления в среде PSIM

Модель преобразователя частоты, работающего на асинхронный двигатель мощностью 15 кВт, представлена на рисунке 1. В модели используется система управления с косвенной ориентацией по полю.

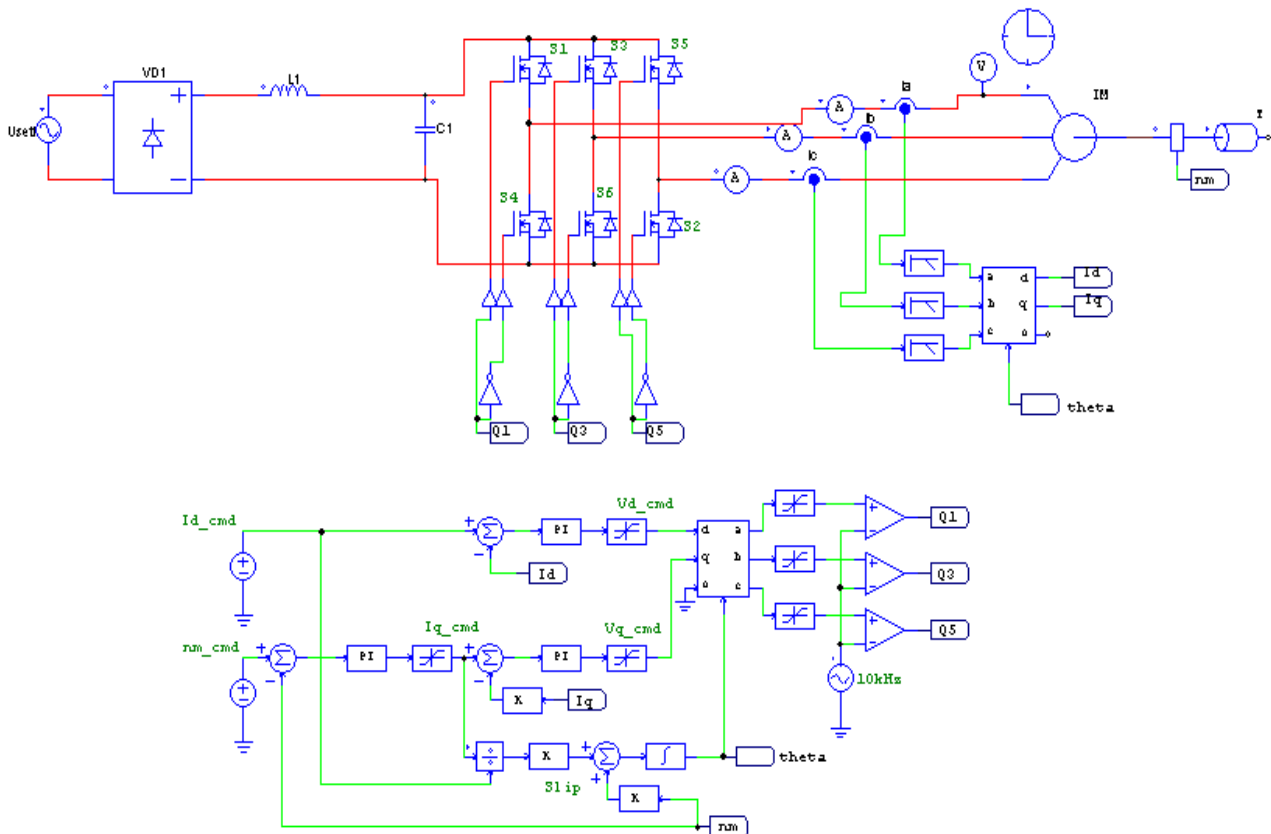


Рисунок 1 – Модель преобразователя с АД в системе PSIM

Схему можно разделить на две части: силовую часть и систему управления силовой частью. Силовая часть состоит из однофазного выпрямителя VD1, входного фильтра L1C1, трехфазного инвертора напряжения, выполненного на МОП-транзисторах (S1–S6), нагрузки, представленной в виде асинхронного двигателя IM и момента на валу T. Систему управления можно разделить на две части – систему измерения тока в статорной обмотке двигателя и систему формирования ШИМ сигнала. Система измерения состоит из трех датчиков тока Ia, Ib, Ic. Осциллограмма тока статора с датчиков тока представлена на рисунке 2.

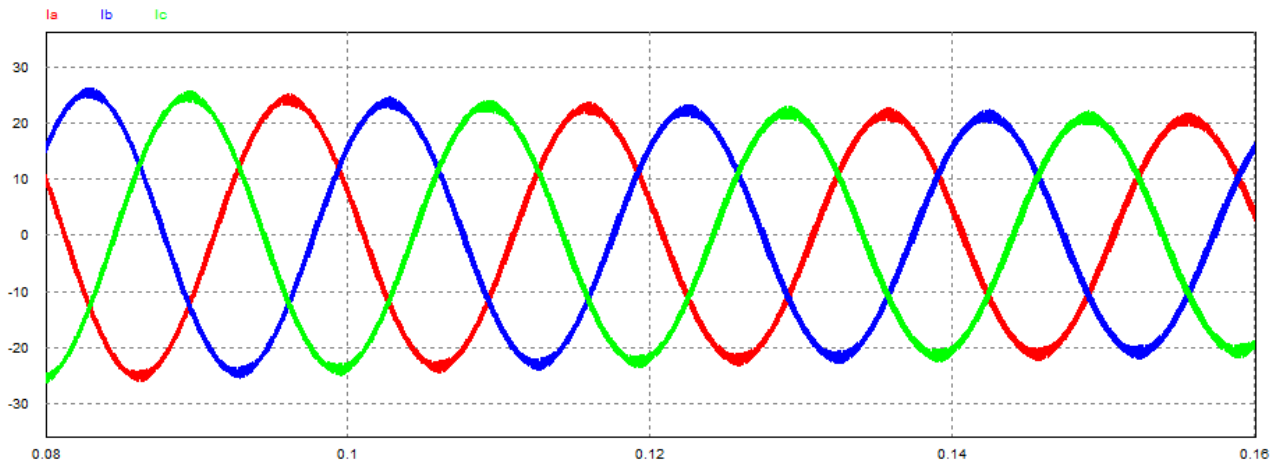


Рисунок 2 – Осциллограмма тока статора

Из осциллограммы видно, что использование инвертора напряжения с ШИМ обеспечивает форму тока близкую к синусоидальной, тем самым увеличивает коэффициент мощности двигателя.

Сигналы с датчиков тока поступают на фильтры второго порядка, обеспечивающие фильтрацию пульсаций высших гармоник тока статора. После фильтрации сигналы тока подаются на блок преобразования функции. Так как форма тока близка к синусоидальной, но не является таковой, необходимо произвести линеаризацию сигналов для того чтобы была возможность для дальнейшей работы с данным сигналом при формировании воздействия на вторую часть схемы.

Блок формирования ШИМ включает в себя два источника напряжения, один из которых формирует ток статора, а второй задает напряжение, смещенное относительно тока статора и датчика тока вращения вала. Сигнал  $I_d\_cmd$  поступает на сумматор, где из него вычитается сигнал блока преобразования  $I_d$ . После этого преобразования сигнал поступает на ПИ-регулятор и линеаризатор, который ограничивает амплитуду сигнала, тем самым поступая на блок преобразования. В это же время, сигнал с источника напряжения  $run\_cmd$  поступает на сумматор, где из него вычитается сигнал датчика скорости вала двигателя. После этого, полученный сигнал поступает на ПИ регулятор и линеаризатор. Сформированный сигнал поступает на блок обратной связи, где из этого сигнала вычитается сигнал из блока преобразования  $I_q$ , а сигнал обратной связи  $theta$  поступает на блок преобразования сигналов с датчиков тока статора.

Блок формирования сигналов управления МОП-транзисторами состоит из блока преобразования, трёх линеаризаторов и трёх компараторов. Сигналы с каждого выхода поступают на транзисторы, управляющие фазами напряжения статорной обмотки.

На рисунке 3 показана осциллограмма управляющего импульса транзистора.

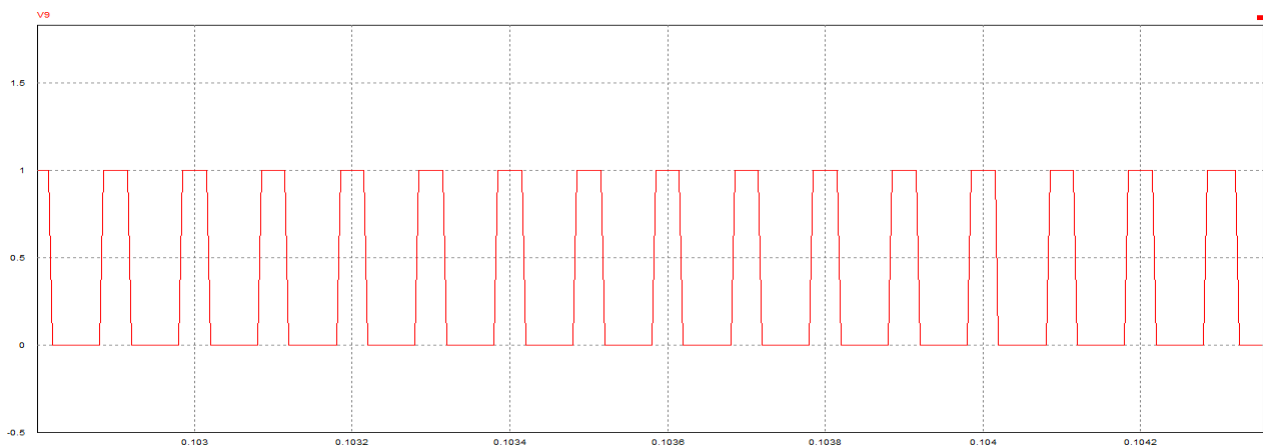


Рисунок 3 – Осциллограмма управляющего импульса транзистора

На рисунке 4 представлено напряжение на статорной обмотке двигателя.

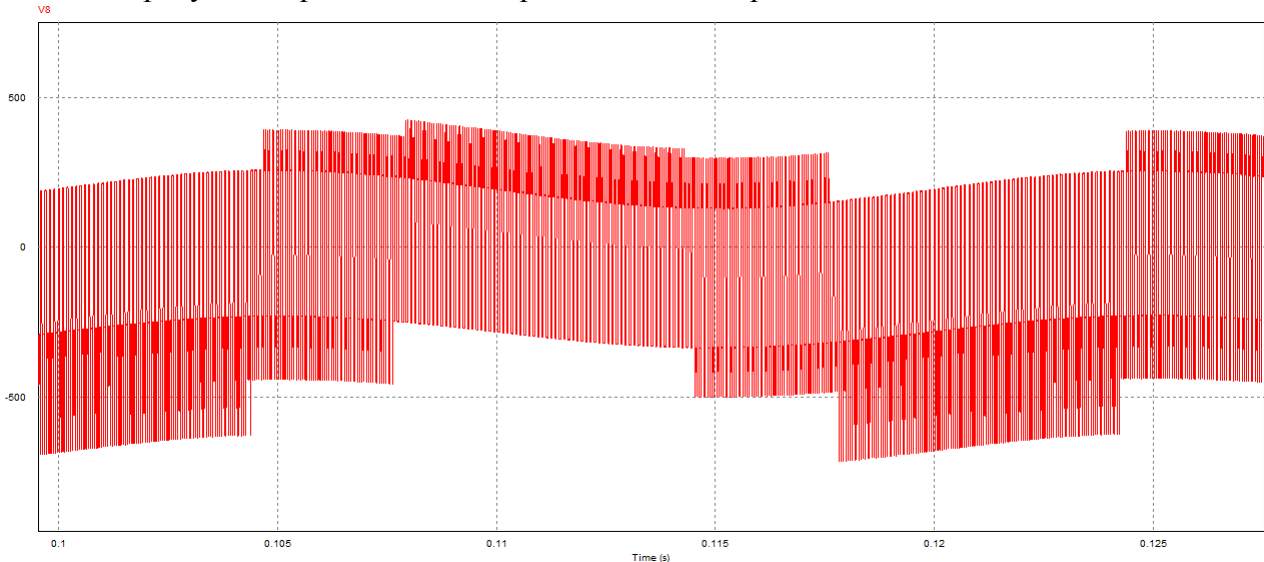


Рисунок 4 – Напряжение на статорной обмотке двигателя

В этой части описано и подтверждено моделированием векторное управление с косвенной ориентацией по полю статора. Реализованная система управления позволяет увеличить коэффициент мощности двигателя и уменьшить потери в стали, за счет отсутствия токов нулевой последовательности.

### **Реализация структуры управления преобразователем частоты на базе контроллеров семейства STM32**

Семейство ARM Cortex - новое поколение процессоров, которые выполнены по стандартной архитектуре и отвечают различным технологическим требованиям. В отличие от других ЦПУ ARM, семейство Cortex является завершенным процессорным ядром, которое объединяет стандартное ЦПУ и системную архитектуру. Микроконтроллеры STM32 выполнены на основе профиля Cortex-M3, которое специально разработано для применений, где необходимы развитые системные ресурсы и, при этом, малое энергопотребление. Они характеризуются настолько низкой стоимостью, что могут конкурировать с традиционными 8 и 16-битными микроконтроллерами. Cortex-M3 является стандартизированным микроконтроллерным ядром, которое помимо ЦПУ, содержит все остальные составляющие основу микроконтроллера элементы (в т.ч. система прерываний, системный таймер SysTick, отладочная система и карта памяти). 4 гигабайтное адресное пространство Cortex-M3 разделено на четко распределенные области кода программы, статического ОЗУ, устройств ввода-вывода и системных ресурсов. В отличие от ядра ARM7, Cortex-M3 выполнено по Гарвардской архитектуре и, поэтому, имеет несколько шин, позволяющие выполнять операции параллельно. Семейство Cortex имеет возможность оперировать с фрагментированными данными (unaligned data), что также отличает его от предшествующих архитектур ARM. Этим гарантируется максимальная эффективность использования внутреннего статического ОЗУ. Семейство Cortex также поддерживает возможности установки и сброса бит в пределах двух областей памяти размером 1 Мбайт по методу bit banding. Этот метод предоставляет эффективный доступ к регистрам и флагам УВВ, расположенных в области статического ОЗУ, и исключает необходимость интеграции полнофункционального битового процессора.

Еще одним ключевым компонентом ядра Cortex-M3 является контроллер векторизованных вложенных прерываний (КВВП). КВВП предоставляет стандартную структуру прерываний для всех Cortex-микроконтроллеров и способы их обработки. КВВП предписывает векторы прерываний для 240 источников, для каждого из которых может быть

установлен свой приоритет.

На рисунке 5 представлена структурная схема контроллера семейства STM32 на базе ядра Cortex-M3.

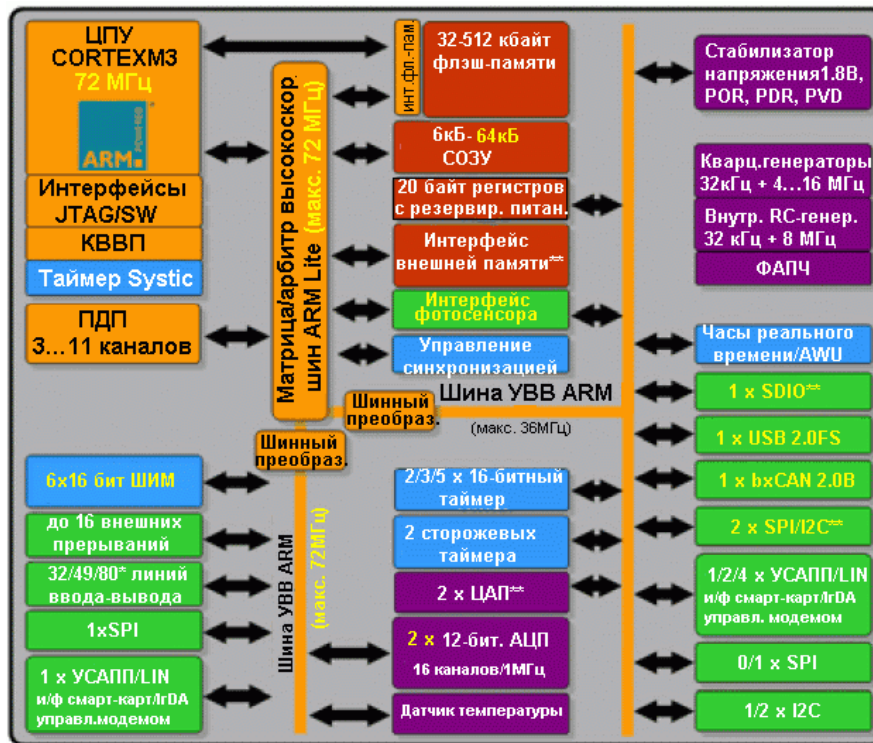


Рисунок 5 – Структурная схема контроллера семейства STM32

На первый взгляд набор встроенных УВВ, в т.ч. два АЦП, таймеры общего назначения, I2C, SPI, CAN, USB и часы реального времени (ЧРВ), кажется идентичным самым простым микроконтроллерам. Но если детально рассмотреть каждое из этих УВВ, то выяснится, что они гораздо более сложные. Например, 12-битный АЦП оборудован датчиком температуры и поддерживает несколько режимов преобразования, а МК с двумя АЦП могут использовать их совместно еще в девяти режимах преобразования. По аналогии с этим, каждый из четырех таймеров, оснащенных блоками захвата и сравнения, могут использоваться как отдельно, так и совместно, образуя более сложные массивы таймеров. У расширенного таймера (advanced timer) добавлена поддержка управления электродвигателями. Для этого у него предусмотрено 6 комплементарных ШИМ-выходов с программируемой паузой перекрытия и вход экстренного останова, который переводит ШИМ-выходы в предварительно запрограммированное безопасное состояние. У интерфейса SPI предусмотрен аппаратный генератор CRC для 8 и 16 слов, что упрощает реализацию интерфейса карт Flash памяти SD и MMC.

Микроконтроллеры STM32 отличаются казалось бы невозможным сочетанием характеристик малого энергопотребления и высокой производительности. Они способны работать от 2В-ого источника питания на тактовой частоте 72МГц и потреблять, при этом, ток, с учетом нахождения в активном состоянии всех встроенных ресурсов, всего лишь 36 мА. Если же использовать поддерживаемые ядром Cortex экономичные режимы работы, то потребляемый ток можно снизить до ничтожных 2 мкА в режиме STANDBY. Для быстроты возобновления активной работы микроконтроллера используется внутренний RC-генератор на частоту 8 МГц. Его активность сохраняется на время запуска внешнего генератора. Благодаря скорости перехода в экономичный режим работы и выхода из них результирующая средняя потребляемая мощность еще больше снижается.

В зависимости от модели, в микроконтроллерах STM32 может быть встроено один или два аналогово-цифровых преобразователя. АЦП питаются отдельным напряжением, которое

в зависимости типа корпуса может находиться в пределах 2.4...3.6В. Источник опорного напряжения (ИОН) АЦП соединен либо внутренне с напряжением питания АЦП, либо со специальными внешними выводами. АЦП характеризуется 12-битной разрешающей способностью и частотой преобразования 1МГц. У него имеется до 18 мультиплексированных каналов, 16 из которых можно использовать для измерения внешних сигналов. Оставшиеся два канала связаны со встроенным датчиком температуры и внутренним ИОН.

В режиме широтно-импульсной модуляции помимо базового режима сравнения, каждый таймер поддерживает специальный режим генерации ШИМ-сигналов. В этом режиме период ШИМ задается с помощью регистра автоматической перезагрузки таймера. Значение заполнения импульсов задается через регистр захвата/сравнения канала. Таким образом, каждый таймер может генерировать до четырех независимых ШИМ-сигналов. Таймеры могут работать и синхронизированно, позволяя генерировать до 16 синхронизированных ШИМ-сигналов. На рисунке 6 представлены различные режимы работы таймеров ШИМ.

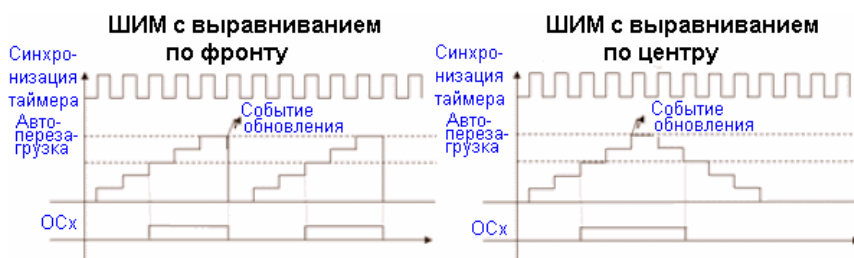


Рисунок 6 – Режимы работы таймеров ШИМ

В каждом канале можно генерировать ШИМ-сигнал с выравнением по фронту или по центру. В режиме с выравнением по фронту, падающий фронт импульса всегда совпадает с моментом перезагрузки таймера. Изменение значения в регистре захвата/сравнения позволяет легко управлять моментом возникновения нарастающего фронта ШИМ-сигнала. В режиме с выравнением по центру, таймер конфигурируется как реверсивный счетчик, который сначала считает в прямом направлении, а затем - в обратном. Когда будет выявлено совпадение счетчика с регистром захвата/сравнения канала, инвертируется состояние выходного сигнала канала.

На рисунке 7 представлена функциональная схема ПЧ с векторной системой управления

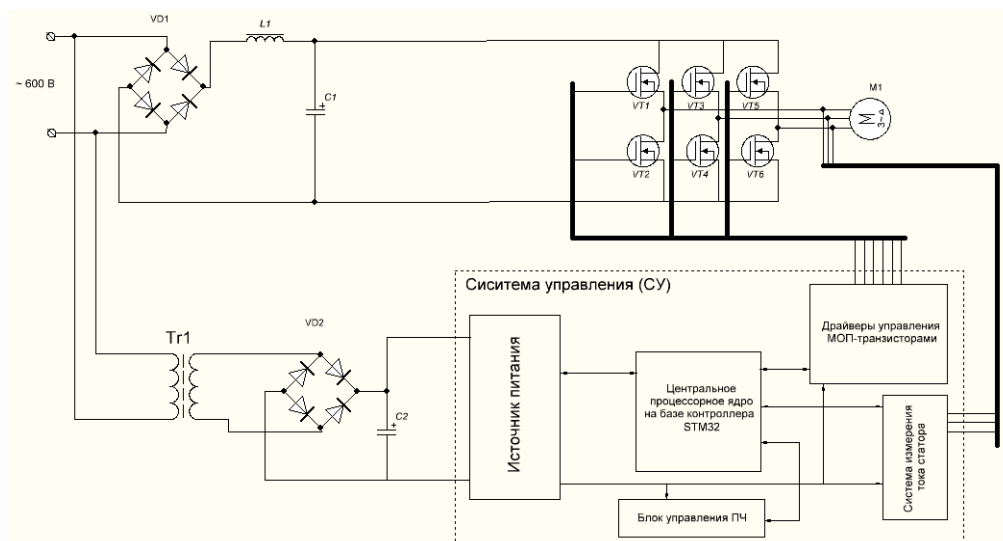


Рисунок 7 – Функциональная схема ПЧ с векторной системой управления

Из функциональной схемы видно, что система управления ПЧ состоит из системы

измерения тока статора, блока управления ПЧ, центрального процессорного ядра на базе контроллера STM32, драйвера управления МОП–транзисторами и источника питания. Так как контроллер обладает высокими техническими характеристиками, то алгоритм, представленный в среде моделирования PSIM можно реализовать на базе контроллера семейства STM32 с ядром Cortex и тактовой частотой 72 МГц. Реализация данного алгоритма может быть произведена с использованием специальных библиотек и языка высокого уровня C/C+.

### Технические характеристики модели

Источник питания: однофазная сеть переменного тока 600 В.

Частота сети: 50 Гц.

Мощность двигателя: 15 кВт.

Напряжение питания двигателя: 380 В.

Коэффициент мощности двигателя  $\cos\varphi$ : 0,8.

### Вывод

Исследование, произведенное выше, позволяет сделать вывод о том, что использование современных контроллеров в системах векторного управления значительно снижает стоимость разрабатываемого устройства, а также облегчает процесс схемотехнической реализации.

### Литература

1. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями: учебное пособие / А. А. Усольцев – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.
2. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А. Б. Виноградов ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 298 с. ISBN

Volkov A., Baikov D., German O.

### SIMULATION ALGORITHM OF FREQUENCY CONVERTER AND STRUCTURE REALIZATION STM32 CONTROLLERS BASED

**Annotation.** In this paper examined the algorithm microcontroller control the frequency converter.

**Key words:** control algorithm; the frequency converter; induction motor; rectifier; inverter; speed sensor; a controller.